



## برآورد میزان جذب سزیم در ماهی نقره‌ای دریا (دیسانتراچاس لابرکس) با استفاده از مدل چند بخشی و شبکه‌ی عصبی

عفت یاحقی<sup>۱</sup>، امیر موافقی<sup>۲\*</sup>، محمدامین عسکری<sup>۱</sup>، ژایلا کریمی دیبا<sup>۳</sup>، نورالدین محمدزاده<sup>۲\*</sup>  
۱. گروه فیزیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، صندوق پستی: ۳۴۱۴۹-۵۵۹۹، قزوین - ایران  
۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران  
۳. مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

**چکیده:** سزیم-۱۳۷ یکی از شکافت-پاره‌ها است که معمولاً بعد از حوادث هسته‌ای، نظیر حادثه‌ی فوکوشیما، همراه با ید-۱۳۱ در محیط زیست انتشار می‌یابد. آلودگی ناشی از این رادیونوکلید با توجه به نیم-عمر حدود ۳۰ سال آن، تا مدت زیادی در محیط زیست باقی می‌ماند و می‌تواند به راحتی وارد زنجیره‌ی غذایی انسان شود. با استفاده از مدل دوبخشی، نحوه‌ی توزیع و جذب سزیم-۱۳۷ در ماهی نقره‌ای دریا (دیسانتراچاس لابرکس) توصیف شده است. در این مدل، بخش اول خون و بخش دوم سایر بافت‌ها هستند. با استفاده از روش عددی و با در نظر گرفتن پرتوهای غذایی به عنوان ورودی، معادلات این مدل حل و پرتوهای سزیم در بخش‌های مختلف محاسبه شده است. با مقایسه‌ی این پرتوهای با داده‌های تجربی گزارش شده، ضریب‌های انتقال بین بافتی ماهی به دست آمد که با ضریب‌های انتقال محاسبه شده به وسیله‌ی نرم‌افزار COMKAT نیز مقایسه شدند؛ اختلاف حدود ۲٪ بود. سپس با تغییر ضریب‌های انتقال، دسته منحنی‌های جذب سزیم-۱۳۷ و مشخصات آن‌ها برای آموزش شبکه‌ی عصبی به دست آمد. آموزش شبکه با مشخصات منحنی‌ها، در ۶ گروه انجام شد و نتایج حاصل از همگرایی شبکه نشان داد که شبکه حدود ۹۹٪ پاسخ درست دارد و می‌توان از آن برای تخمین ضریب‌های انتقال بین بافتی، درصد نمکی آب و میزان پرتوهای سزیم-۱۳۷ در آب استفاده کرد.

**کلیدواژه‌ها:** سزیم-۱۳۷، مدل دوبخشی، ماهی نقره‌ای دریا، ضریب انتقال، شبکه‌ی عصبی

## Estimation of Caesium-137 Intake in Dicentrarchus Labrax by Using Compartmental Model and Neural Network

E. Yahaghi<sup>1</sup>, A. Movafeghi<sup>2,3\*</sup>, M.A. Askari<sup>1</sup>, G. Karimi Diba<sup>3</sup>, N. Mohammadzadeh<sup>2,3</sup>  
1. Department of Physics, Imam Khomeini University, P.O.Box: 34149-5599, Qazvin - Iran  
2. Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran  
3. Iran Nuclear Regulatory Authority, AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

**Abstract:** Cs-137 is one of the fission products that is usually released in environment after nuclear accidents. This contamination remains in environment for a long time due to long half life of Cs-137 (30 years) and can enter easily into the human food chain. A two-compartmental model was implemented to describe caesium intake and its distribution in Dicentrarchus Labrax, using a proposed differential equation model. The model included two compartments, the first compartment was the blood and the second one was the tissue. The activity of Cs-137 was undertaken in each compartment by means of a numerical method and the activity of Cs-137 was considered as an input of compartmental equations. We obtained the transfer coefficients between fish tissues by comparing the radiation curves with the actual data. In the light of the differences with the transfer coefficients, the calculation by the COMKAT software was found to be about 2%. Then, we provided the activity curves of Cs-137 and their characteristics (feature extractions) by changing the transfer coefficients and they were utilized to train the neural network. The network was trained for six data groups, and the results of the network testing had about 99% correct response, therefore it can be employed to estimate the transfer coefficients in fish tissue, the salinity range, and the activity of Cs-137 in water.

**Keywords:** Caesium-137, Two-Compartmental Model, Dicentrarchus Labrax, Transfer Factors, Neural Network

\*email: amovafeghi@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۹/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۲/۱۷



## ۱. مقدمه

سزیم-۱۳۷ یکی از رادیونوکلیدهایی است که در اثر حوادث هسته‌ای در طبیعت رها شده و می‌تواند از راه تغذیه وارد بدن شود [۱]. براساس گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی اتمی میزان پخش این رادیو-نوکلید در حادثه‌ی فوکوشیما از مرتبه‌ی  $10^{16}$  بکرل (حدود یک دهم حادثه‌ی چرنوبیل) بوده است. اکثر ترکیب‌های سزیم موجود در آب و خاک، به شدت در آب محلول بوده و می‌توانند از طریق غذا و آبشش وارد بدن موجودات آبی شوند. تغذیه از ماهی و جانوران آبی یکی از راه‌های عمده‌ی ورود سزیم به بدن انسان است. در آب بسیاری از دریاها سزیم وجود دارد که به تدریج در بدن ماهی انباشته می‌شود. اندازه‌ی آن در بدن ماهی متناسب با غلظت پتاسیم است، چرا که رفتار سزیم در بافت شبیه پتاسیم است و به آن‌ها دو عنصر هم‌رده گفته می‌شود [۱، ۲، ۳]. معمولاً غلظت پتاسیم در دهانه‌ی رودخانه‌ها کم و در آب دریا زیاد است. به علت تغییرات غلظت و نحوه‌ی جذب سزیم و پتاسیم در بافت انتظار می‌رود ماهی‌های دریا نسبت به ماهی‌های رودخانه سزیم انباشته شده‌ی بیشتری داشته باشند. باید توجه داشت که فیزیولوژی بدن ماهی‌های مختلف در مقدار این جذب مؤثر است [۴، ۵، ۶].

با مصرف این ماهی‌ها، سزیم انباشته در آن‌ها وارد بدن انسان می‌شود و اگر آلودگی بدن به سزیم بیش‌تر از حد آستانه باشد، پی‌آمدهایی مانند حالت تهوع، استفراغ، اسهال و خون‌ریزی خواهد داشت. تماس طولانی مدت با سزیم، باعث بیهوشی شده و به دنبال آن اِغما و مرگ رخ می‌دهد. شدت عوارض بستگی به مقاومت بدن، مدت زمان تماس و غلظت سزیم دارد [۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱]. باید توجه شود که این اثرات در دزهای بالا ظاهر می‌شوند.

هم‌زمان با توزیع رادیونوکلیدها در بدن موجود زنده و انتقال آن به اندام‌ها و بافت‌ها، واپاشی ماده‌ی پرتوزا و پدیده‌ی دفع نیز روی می‌دهد. رادیونوکلیدهایی که قابل جابه‌جایی در مایعات بدن هستند، عمدتاً از طریق ادرار دفع می‌شوند. در رادیونوکلیدهای مصرف شده به همراه مواد غذایی، دفع از طریق مدفوع نیز صورت می‌گیرد. سرعت دفع از بدن براساس سوخت و ساز آن‌ها تعیین می‌گردد و برای دفع هر رادیونوکلید از بدن الگوی خاصی وجود دارد [۱۰، ۶، ۸]. لازم به ذکر است که کاهش مقدار رادیونوکلید در بدن براساس دفع زیستی و نیز واپاشی آن صورت می‌گیرد که به نیم-عمر فیزیکی و

زیست‌شناختی آن بستگی دارد. بخش‌های موجود در بدن موجودات زنده که با یک فیزیولوژی و یا غشاء خاص از هم جدا می‌شوند دارای نیم-عمرهای زیست‌شناختی متفاوت هستند [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳].

در پژوهش‌های زیادی، از مدل‌های چندبخشی برای توصیف‌گذار و مقدار جذب سزیم پرتوزا در بدن ماهی نقره‌ای<sup>(۱)</sup> و سایر جانوران آبی استفاده شده است. در این پژوهش‌ها ثابت‌های انتقال سزیم-۱۳۷ در بخش‌های مختلف بدن جانداران محاسبه شده است [۱۰، ۸، ۶]. گروهی با استفاده از داده‌های به دست آمده از اندازه‌گیری سزیم-۱۳۷ در بخش‌های مختلف بدن ماهی، ثابت‌های انتقال را به دست آورده‌اند. نتایج این گروه نشان می‌دهد جذب سزیم در بدن به عوامل دیگری از جمله درصد نمکی آب نیز بستگی دارد [۱۲، ۱۴، ۶] و معادله‌های چندبخشی به تنهایی نمی‌توانند توصیف‌کننده‌ی چگونگی جذب سزیم در بدن ماهی نقره‌ای دریا باشند. برای داشتن یک مدل واحد که بتواند تمام پارامترهای موجود را دربر بگیرد باید توأم با مدل چندبخشی از دیگر روش‌های توصیف‌کننده‌ی رفتار غیرخطی مدل استفاده کرد. یکی از روش‌هایی که می‌تواند در چنین مدل‌هایی، که به پارامترهای مختلف بستگی دارند، به کار رود شبکه‌ی عصبی است. در این روش پارامترهای غیرخطی به عنوان ورودی شبکه در نظر گرفته می‌شوند و از آموزش شبکه با روش‌های مختلف، پاسخ شبکه به دست می‌آید [۱۵].

در این مقاله روش شبکه‌ی عصبی و مدل چندبخشی برای بررسی رفتار غیرخطی جذب سزیم-۱۳۷ در بافت ماهی نقره‌ای دریا به کار گرفته شده است. با توجه به این که جذب سزیم-۱۳۷ در بدن به پارامترهای مختلفی از جمله درصد نمکی آب وابسته است که در معادله‌ی ریاضی به طور مستقیم قابل بیان نیست، از شبکه‌ی عصبی برای پیش‌بینی نحوه‌ی جذب سزیم-۱۳۷، درصد نمکی و مقدار پرتوزایی آب در حوادث هسته‌ای استفاده شده است.

## ۲. روش‌ها

### ۲.۱ مدل چندبخشی

برای تعیین میزان جابه‌جایی مواد و پرتوزایی سزیم در بدن ماهی نقره‌ای دریا که در ادامه به اختصار ماهی نامیده می‌شود می‌توان از مدل چندبخشی استفاده کرد. در این مدل، سزیم به صورت یک ترکیب شیمیایی همراه آب وارد بدن ماهی شده و پس از



که در آن،  $C_1(t)$  مقدار پرتوزایی در پلاسما و  $I(t)$  مقدار سزیم ورودی به بدن در زمان  $t$  است؛  $\lambda_R$  ثابت واپاشی سزیم و  $K_{r1}$  و  $K_{r2}$  ضرایب‌های انتقال بین بخشی سزیم و  $K_{o1}$  ضریب دفع زیست‌شناختی در بخش‌های مختلف است. برای بخش دوم داریم

$$\frac{dC_2(t)}{dt} = -\lambda_R C_2(t) + K_{r1} C_1(t) - K_{r2} C_2(t) \quad (2)$$

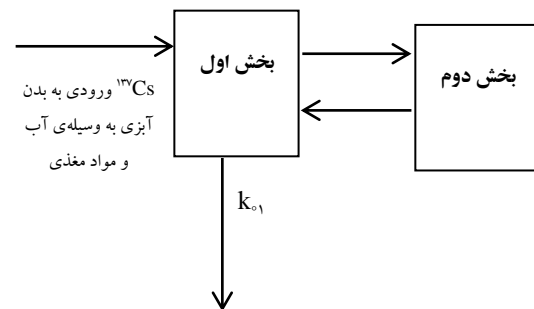
برای به دست آوردن میزان پرتوزایی در هر بخش لازم است معادله‌های فوق با ورودی  $I(t)$  حل شوند. این ورودی متناسب با پرتوزایی سزیم موجود در آب و مواد غذایی است که به بدن ماهی وارد می‌شود. غلظت یکنواخت سزیم در آب می‌تواند با تابع ریاضی با ورودی به شکل مربع بیان شود. حل تحلیلی این معادله‌ها برای ورودی مربعی در نظر گرفته شده پیچیده است. در این‌جا از روش عددی رانگ کوتای<sup>(۲)</sup> مرتبه‌ی ۴ استفاده شده و جواب‌های معادله‌ها (پرتوزایی سزیم در بخش‌های مختلف بدن ماهی) به دست آمده است. این روش از دقت مناسبی برخوردار است. با حل این معادله‌ها و مقایسه‌ی جواب‌های به دست آمده با داده‌های تجربی پرتوزایی سزیم-۱۳۷ در بدن ماهی اعتبار مدل بررسی و سپس جواب‌ها با نتایج حاصل از نرم‌افزار COMKAT مقایسه شده‌اند. قابل توجه است که در این معادله‌ها پارامتر درصد نمکی آب قابل بیان نیست و نمی‌توان آن را مستقیماً در نظر گرفت، در نتیجه برای بررسی این پارامتر همراه دیگر مشخصات مدل نیاز به روش دیگری است. در این‌جا از شبکه‌ی عصبی استفاده شده است.

شبکه‌ی عصبی معمولاً برای مدل‌هایی استفاده می‌شود که پاسخ خطی ندارند و پارامترهای ورودی در آن‌ها خیلی زیاد است. در این‌جا از یک شبکه‌ی پرسپترون چندلایه استفاده شده است. در این نوع شبکه‌ها از یک لایه برای اعمال ورودی‌های مسئله استفاده می‌شود که در نهایت یک لایه‌ی پنهان<sup>(۳)</sup> و یک لایه‌ی خروجی، پاسخ‌های مسئله را ارایه می‌نمایند. توابع فعالیت مختلفی به فراخور مسئله در نرون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. گره‌های موجود در لایه‌ی ورودی، نرون‌های حسی<sup>(۴)</sup> و گره‌های لایه‌ی خروجی، نرون‌های پاسخگو<sup>(۵)</sup> هستند. نرون‌های پنهان نیز در لایه‌ی پنهان قرار دارند [۱۵]. آموزش این‌گونه شبکه‌ها معمولاً با روش پس انتشار خطا<sup>(۶)</sup> انجام می‌شود. در این مقاله از این شبکه با سه لایه‌ی ورودی، خروجی و پنهان و هم‌چنین تابع نرون‌های تاثرات سیگنویید، که متناسب با شرایط مسئله قابل تغییر

ورود به دهلیزهای قلب از طریق جریان سرخرگی در بدن پخش می‌شود و پس از رسیدن به مویرگ‌ها قابلیت برهم‌کنش با بافت را پیدا می‌کند. کسری از ماده‌ی پرتوزا پس از جذب در بافت و گسیل تابش متناسب با نیم-عمر زیست‌شناختی‌اش از بافت خارج شده و بقیه‌ی ماده هم از طریق عملکرد کلیه، روده‌ی بزرگ و آبشش‌ها از بدن ماهی دفع می‌شود. در این‌جا با توجه به رفتار سزیم-۱۳۷ که مشابه پتاسیم است و در بدن موجودات زنده به طور یکنواخت پخش می‌شود، مدل چندبخشی برای بدن ماهی و یا هر موجود آبی مشابه، با دو بخش مشخص شده است. هر بخش قسمتی از بدن است که با یک لایه‌ی مشخص و یا فیزیولوژی خاص از سایر قسمت‌های بدن متمایز می‌شود. در این مدل، آب و مواد غذایی به عنوان منبع ورود سزیم به بدن، دستگاه گوارش و پلاسما به عنوان بخش اول و استخوان‌های جذب سزیم و سایر بافت‌ها بخش دوم و کلیه‌ها، روده‌ی بزرگ و آبشش‌ها به عنوان بخش خروجی در نظر گرفته شده‌اند. سزیم وارد شده به بدن در بین این بخش‌ها در تعادل است (شکل ۱) [۱، ۳، ۱۴].

شکل ۱ مدل چندبخشی جذب و دفع سزیم-۱۳۷ در و از بدن ماهی را نشان می‌دهد. سزیم-۱۳۷ همراه غذا و آب به بدن ماهی وارد شده و توسط جریان خون به سایر بافت‌ها منتقل و به تدریج توسط دستگاه گوارش و آبشش‌ها دفع و از بدن ماهی خارج می‌شود. این انتقال زیست‌شناختی در بدن با واپاشی و تابش همراه است [۴، ۵]. با توجه به معادله‌های تعادل که بیان‌کننده‌ی مقدار پرتوزایی در یک مقطع زمانی است، معادله‌ی پرتوزایی برای بخش اول چنین به دست می‌آید

$$\frac{dC_1(t)}{dt} = I(t) - \lambda_R C_1(t) - K_{r1} C_1(t) + K_{r2} C_2(t) - K_{o1} C_1(t) \quad (1)$$



شکل ۱. مدل دوبخشی بدن ماهی برای بررسی میزان جذب سزیم در آن.

که در آن  $t$  زمان و  $C_i(t)$  غلظت کل سزیم در بخش‌های مختلف است. جذب سزیم و پتاسیم در بافت شبیه هم است و با توجه به این که در آب دریا مقدار زیادی پتاسیم به صورت نمک وجود دارد که بر جذب سزیم تأثیر می‌گذارد، برای به دست آوردن داده‌ها باید آن را به عنوان یک عامل مهم در نظر گرفت. داده‌های در دسترس برای این شبیه‌سازی منحنی تغییرات غلظت و یا پرتوزایی سزیم در بدن ماهی برحسب زمان و مقادیر ضریب‌های انتقال بین بافت‌ها هستند. این داده‌ها به وسیله‌ی هاتینگ و همکارانش [۶] برای آب نمکی با درصد ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۳۸ تهیه شده‌اند. برای به دست آوردن آن‌ها، ماهی‌های ۴٫۷ تا ۹٫۹ گرمی برای مدت ۱۷ روز در آب دریا با پرتوزایی  $10 \text{ kBq/L}$  و برای مدت ۵۰ روز دیگر در آب بدون پرتوزایی قرار گرفتند. با استفاده از این داده‌ها برای ارزیابی مدل ارایه شده، ضمن ارایه‌ی نتایج به دست آمده از مدل، بین نتایج و نرم‌افزار COMKAT نیز مقایسه‌ای صورت گرفته است.

### ۳. نتایج و بحث

ابتدا اعتبار مدل از طریق مقایسه‌ی منحنی‌های خروجی مدل و داده‌های تجربی بررسی و با نتایج نرم‌افزار COMKAT مقایسه شد. پس از بررسی اعتبار مدل، با تغییر ضریب‌های انتقال، منحنی‌های پرتوزایی به دست آمد و سپس ویژگی‌های این منحنی‌ها استخراج شد. در ادامه شبکه‌ی عصبی توضیح داده شده در بخش ۱.۲ تحت آموزش قرار گرفت و نتایج آزمون شبکه‌ی عصبی به دست آمد.

#### ۱.۳ ارزیابی مدل چندبخشی بررسی پرتوزایی سزیم

ابتدا در محیط MATLAB، برنامه‌ای برای شبیه‌سازی مدل چندبخشی نوشته شد. در این برنامه معادلات چندبخشی با ضریب‌های انتقال بین بافتی سزیم گزارش شده به وسیله‌ی کایکونن [۳] حل و منحنی تغییرات غلظت سزیم برحسب زمان در بافت با روش عددی رانگ کوتا به دست آمد. با مقایسه‌ی منحنی تغییرات غلظت سزیم در بافت با داده‌های تجربی، مدل ارزیابی شد. نمونه‌ای از این منحنی‌ها برای غلظت نمکی ۱٪،  $K_{01}$ ،  $K_{12}$  و  $K_{21}$  به ترتیب برابر ۰٫۰۱، ۰٫۰۱ و ۰٫۱۲ در شکل ۳ نشان داده شده است. داده‌های به دست آمده از مدل، در حد به طور متوسط ۳٪ اختلاف، با داده‌های تجربی مطابقت داشت (ضریب همبستگی ۰٫۹۲۷). این مدل با استفاده از نرم‌افزار COMKAT نیز ارزیابی شد [۱۶، ۱۷]. نتایج نشان داد که با ضریب‌های انتقال و ورودی مشخص، خروجی تغییرات غلظت سزیم برحسب زمان در نرم‌افزار COMKAT در حد اختلاف ۲٪ با داده‌های اندازه‌گیری شده مطابقت داشت.

است، استفاده شده است. با تغییر ضریب‌های انتقال، منحنی‌های تغییرات پرتوزایی به دست آمده و ویژگی‌های استخراج شده از این دسته منحنی‌ها به عنوان ورودی شبکه‌های عصبی به کار گرفته شده‌اند. یکی دیگر از ورودی‌ها درصد نمکی آب در نظر گرفته شد.

#### ۲.۲ استخراج ویژگی‌های تغییرات پرتوزایی

با توجه به محدود بودن تعداد ورودی‌های شبکه‌ی عصبی، لازم است ویژگی‌هایی از منحنی‌های تغییرات پرتوزایی استخراج شود. یکی از این ویژگی‌ها تغییرات غلظت سزیم برحسب زمان در بافت و پلازما است که تفاوت آن‌ها را مشخص می‌نماید. از ویژگی‌های مختلفی که در جدول ۱ ارایه شده‌اند، استفاده شد. این ویژگی‌ها در شکل ۲ نیز نشان داده شده‌اند. تعاریف گشتاور مرتبه‌ی اول، گشتاور مرتبه‌ی دوم و  $MTT^{(v)}$  در جدول ۱ چنین است

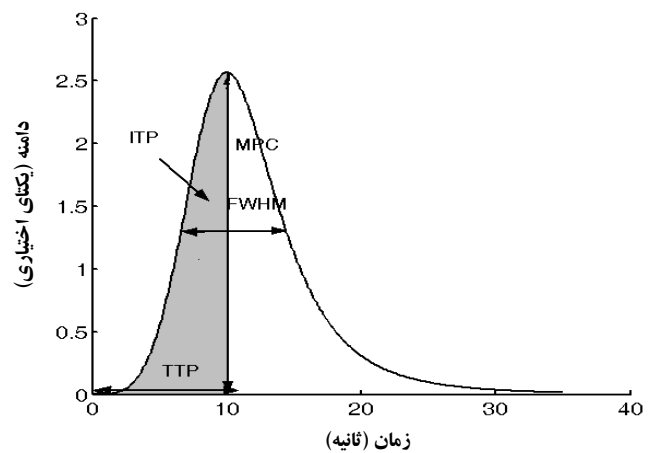
$$\text{Moment}_1 = \int_0^T t C_i(t) dt, \quad \text{Moment}_2 = \int_0^T t^2 C_i(t) dt$$

$MTT = \text{Moment}_1 / \text{Area of function curve}$

(۳)

جدول ۱. ویژگی‌های محاسبه شده برای منحنی‌ها

| ویژگی   | یکا     | توصیف   |
|---------|---------|---|
| MPC     | اختیاری | بیشینه مقدار تابع                             |
| TTP     | s       | زمان لازم برای رسیدن به بیشینه مقدار تابع     |
| ITP     | a.u.    | سطح زیرمنحنی تابع از صفر تا بیشینه مقدار تابع |
| FWHM    | s       | پهنای نیم ارتفاع                              |
| Moment1 | Bq/g    | گشتاور مرتبه‌ی اول                            |
| Moment2 | Bq/g    | گشتاور مرتبه‌ی دوم                            |



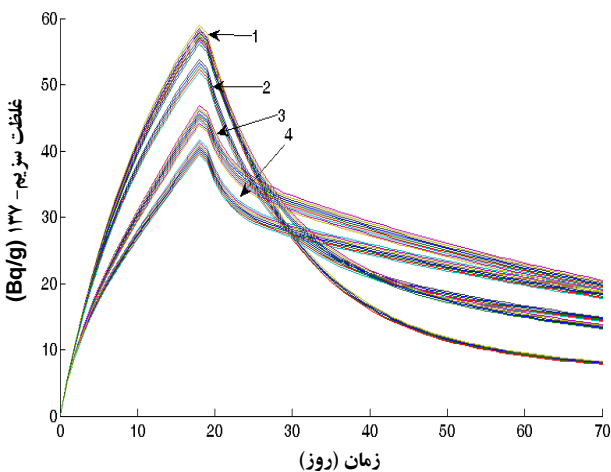
شکل ۲. پارامترهای محاسبه شده برای منحنی‌ها.



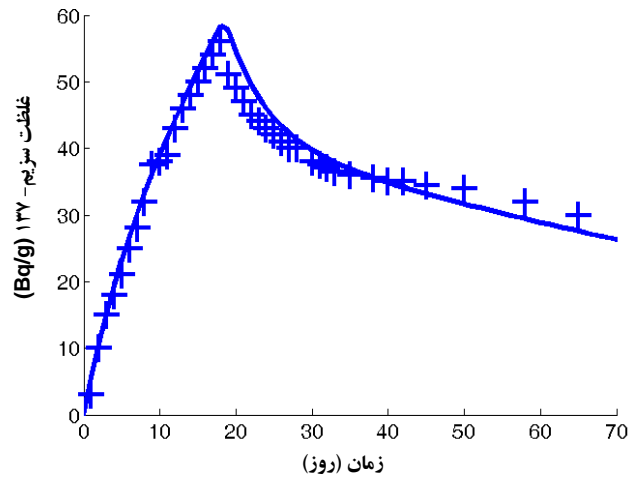
مقادیر ضریب‌های انتقال سزیم برای ماهی موردنظر مشخص می‌شود. نمونه‌ای از منحنی‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. در این منحنی‌ها تغییرات غلظت سزیم-۱۳۷ در بافت ماهی با زمان نشان داده شده است. غلظت سزیم-۱۳۷ در بافت ابتدا به صورت افزایشی است و بعد از روز ۱۷ که ماهی‌ها در آب معمولی قرار می‌گیرند مقدار سزیم بدن آن‌ها به تدریج کم می‌شود. دسته منحنی‌های ۱ تا ۴ به ترتیب برای غلظت نمکی ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰٪ براساس ضریب‌های انتقال گزارش شده به وسیله هاتینگ [۶] به دست آمده‌اند. با افزایش درصد نمکی آب مقدار سزیم-۱۳۷ جذبی کاهش می‌یابد و هم‌چنین در هر دسته منحنی با افزایش ضریب‌های انتقال، غلظت سزیم بیش‌تر شده است.

از این دسته منحنی‌های تغییرات زمانی غلظت سزیم در بافت به این ترتیب می‌توان استفاده کرد که با داشتن یک منحنی کامل و یا قسمتی از تغییرات غلظت سزیم در بافت (که جزء مجموعه منحنی‌های به دست آمده نیست) و مقایسه با مجموعه منحنی‌ها ضریب‌های انتقال، درصد نمکی آب و مقدار سزیم آبی که ماهی در آن بوده است می‌تواند پیش‌بینی شود.

با توجه به غیرخطی بودن منحنی‌های خروجی و تعداد زیاد آن‌ها، روش دستی مقایسه‌ی منحنی‌های داده‌ها با دسته منحنی‌های خروجی مدل برای کاربر راحت نیست و لازم است روش دیگری برای استفاده‌ی سریع از این مجموعه خروجی در نظر گرفته شود. با توجه به مزایای شبکه‌ی عصبی، از این روش استفاده شد. در شبکه‌ی عصبی لازم است پارامترهایی از منحنی‌های غلظت سزیم در بافت به عنوان ورودی شبکه در نظر گرفته شود تا بتوان شبکه را آموزش داد. پارامترهای پیشینه مقدار تابع (MPC)،



شکل ۴. نمونه‌ای از منحنی‌های خروجی مدل چندبخشی.



شکل ۳. تغییرات مقدار سزیم با زمان در بدن ماهی؛ (+) تجربی، (-) به دست آمده از مدل.

شکل ۳ نشان می‌دهد که غلظت سزیم ابتدا با زمان افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که مادامی که ماهی در آب حاوی سزیم قرار دارد (۱۷ روز اول) مقدار سزیم جذب شده در بدن ماهی افزایش می‌یابد و هنگامی که ماهی بعد از ۱۷ روز در آب معمولی عاری از سزیم قرار می‌گیرد، غلظت سزیم انباشته در بدن ماهی از طریق واپاشی و دفع از بدن موجود زنده به تدریج کاهش می‌یابد. ضریب‌های انتقال بین بخشی سزیم و ضریب‌های دفع زیست‌شناختی برای شکل ۳ و درصد نمکی ۱٪ مطابق با مدل  $K_{12}$ ،  $K_{21}$  و  $K_{01}$ ، به ترتیب  $0.01$ ،  $0.12$  و  $0.01$  است که با مقادیر ضریب‌های انتقال بین‌بافتی گزارش شده به وسیله هاتینگ [۶] هم‌خوانی دارد. نتایج این قسمت نشان می‌دهد که مدل چندبخشی ارائه شده می‌تواند برای ارزیابی میزان جذب سزیم در بدن ماهی مورد استفاده قرار گیرد. این مدل هم‌چنین توانایی بررسی و پیش‌بینی مقدار سزیم جذبی در ماهی‌های مختلف در زمان حادثه‌های هسته‌ای مانند حادثه‌ی فوکوشیما را دارد. در حادثه‌هایی از این نوع به علت متغیر بودن مقدار سزیم ورودی معادله‌های چندبخشی دارای تابع ریاضی مشخصی نیست و مدل غیرخطی است.

در ادامه از نتایج این قسمت برای محاسبه‌ی سزیم جذبی و ضریب‌های انتقال بین‌بافتی استفاده شد. با تغییر ضریب‌های انتقال سزیم در بافت، مجموعه منحنی‌های تغییرات غلظت سزیم در بافت برحسب زمان به دست آمد. با مقایسه‌ی این منحنی‌ها با داده‌های تجربی که بعداً در اندازه‌گیری‌ها به دست می‌آیند،



## ۲.۳ نتایج شبکه‌ی عصبی

بعد از ارزیابی مدل و به دست آوردن مرتبه‌ی بزرگی ضریب‌های انتقال بین بخش‌های مختلف بدن ماهی، با تغییر این ضریب‌های انتقال در مدل چندبخشی، دسته‌ی منحنی‌های تغییرات پرتوزایی یا غلظت سزیم برحسب زمان محاسبه شد. محاسبات منحنی‌های تغییرات غلظت سزیم، در بدن ماهی برای آب با درصد نمک مختلف (۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۲۸، و ۳۵٪)، از طریق جذب آبششی انجام و از روی این منحنی‌ها پارامترهای جدول ۱ محاسبه شد. برای هر دسته ضریب‌های انتقال مشخص شده در هر بخش، ۹ پارامتر محاسبه شد که با در نظر گرفتن ۹ پارامتر برای بخش ۲ و عامل غلظت نمک در آب به عنوان یک عامل مهم، تعداد ورودی‌های شبکه‌ی عصبی به ۱۹ عدد بالغ شد.

این پارامترها به عنوان ورودی به شبکه‌ی عصبی داده شدند. برای استفاده از این داده‌ها از یک شبکه‌ی پرسپترون چندلایه  $(MLP)^{(10)}$  با عملکرد پیش‌خور  $(11)$  بهره گرفته شد. این شبکه از سه لایه‌ی ورودی، میانی و خروجی تشکیل شده است. در لایه‌ی ورودی ۱۹ نرون وجود دارد و تعداد ورودی‌ها برابر ۶۴۴۴ در ۶ دسته‌بندی مختلف نمکی است. در تنها لایه‌ی میانی ۲۰ نرون وجود دارد و تابع تبدیل این نرون‌ها تانژانت سیگموئید است. خروجی شبکه، تک نرونی است. نحوه‌ی آموزش شبکه روش پس‌انتشار خطا می‌باشد. لازم به ذکر است که این روش آموزشی در الگوریتم‌های متعددی ارایه شده است. از بهترین و مؤثرترین روش‌ها که در بسته نرم‌افزار MATLAB نیز موجود می‌باشد، روش مارکاردت- لونبرگ  $(12)$  است که در محیط MATLAB به اختصار با نام ML شناخته می‌شود. این روش ضمن افزایش سریع همگرایی به نتیجه‌گیری هم سرعت می‌بخشد.

با آموزش این شبکه‌ی سه لایه، بهترین وزن‌ها برای خطوط ارتباطی شناسایی و تثبیت شد. شبکه در ۱۰۰۰ دور دارای همگرایی لازم و خطای آموزش کمینه است. روند نزول کمیت میانگین مربع خطا  $(MSE)^{(13)}$  در ۰/۰۱ ثابت می‌شود و خطای شبکه در مرحله‌ی آموزش ۱٪ است. برای آزمون شبکه، از اطلاعات انتخابی در مجموعه استفاده و به کمک این اطلاعات شبکه به آزمون گذاشته شد و نتایج حاصل در جدول ۳ ثبت گردید. نتایج آزمایش شبکه نشان داد که در این شبکه کم‌ترین میانگین مربع خطا برای دسته‌بندی آب نمکی ۳۵٪ و بیش‌ترین آن برای گروه‌بندی ۱٪

مقدار میانگین تابع، سطح زیرمنحنی، MTP،  $TTP^{(8)}$ ،  $ITP^{(9)}$ ، Moment1 و Moment2 برای هر منحنی به ازای مقادیر مختلف ثابت‌های انتقال در بخش ۱ و ۲ به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان داد که با توجه به متفاوت بودن منحنی‌های خروجی مدل، پارامترهای فوق می‌توانند به عنوان شناسه‌ی منحنی در ورودی شبکه‌ی عصبی عمل نمایند. نمونه‌ای از پارامترهای محاسبه شده برای غلظت نمکی و ضریب‌های انتقال مختلف در جدول ۲ آورده شده است که تفاوت پارامترهای محاسبه شده برای پارامترهای مختلف ورودی را نشان می‌دهد. برای خروجی شبکه‌ی عصبی، هر منحنی تغییرات غلظت سزیم-۱۳۷ در بافت در دسته منحنی به دست آمده از معادله‌ها، شماره‌گذاری و با این شناسه در خروجی مشخص شد.

جدول ۲. نمونه ورودی‌های محاسبه شده برای شبکه‌ی عصبی با توجه به منحنی‌های مقدار سزیم در بخش‌های ۱ و ۲

| پارامتر            | مثال اول   | مثال دوم   |                                       |
|--------------------|------------|------------|---------------------------------------|
| $K_{01}$           | ۰/۰۸       | ۰/۰۸       | پارامترهای<br>بخش اول<br>بدن ماهی     |
| $K_{12}$           | ۰/۱۱۰۸     | ۰/۱۲۴      |                                       |
| $K_{21}$           | ۰/۰۰۷۲     | ۰/۰۰۵۸     |                                       |
| درصد نمکی          | ۰/۰۱       | ۰/۰۱       |                                       |
| بیشینه مقدار تابع  | ۹۳/۰۵      | ۹۳/۶۳      |                                       |
| مقدار میانگین تابع | ۳۱/۲۴      | ۳۲/۱۵      |                                       |
| سطح زیرمنحنی       | ۲۲۷۹/۱۶    | ۲۲۸۳/۲۳    |                                       |
| MTT                | ۲۱/۶۶      | ۲۱/۵۵      |                                       |
| Moment1            | ۴۹۳۷۹/۸    | ۴۹۲۰۸/۷۹   |                                       |
| Moment2            | ۱۴۴۷۳۲۷/۸  | ۱۴۳۰۶۱۹/۷۸ |                                       |
| FWHM               | ۲۲         | ۲۲         | پارامترهای<br>ورودی<br>شبکه‌ی<br>عصبی |
| ITP                | ۱۰۳۵/۳     | ۱۰/۴۰      |                                       |
| TTP                | ۲۱/۵۹      | ۲۸/۷۳۵     |                                       |
| بیشینه مقدار تابع  | ۴/۰۵       | ۳/۳۶       |                                       |
| مقدار میانگین تابع | ۲/۰۴       | ۱/۶۶۴      |                                       |
| سطح زیرمنحنی       | ۱۴۶/۷۹۶    | ۱۰۵/۱۴۶    |                                       |
| MTT                | ۲۹/۶۹      | ۲۸/۷       |                                       |
| Moment1            | ۴۳۳۵/۱۴    | ۳۰۱۸/۲۰    |                                       |
| Moment2            | ۱۵۷۲۱۹/۳۹۵ | ۱۰۶۶۷۴/۳۱  |                                       |
| FWHM               | ۲۹         | ۲۹         |                                       |
| ITP                | ۴۸/۹۸      | ۳۷/۳۸      | پارامترهای<br>بخش دوم<br>بدن ماهی     |
| TTP                | ۲۱/۶۳      | ۲۸/۷۶      |                                       |



#### ۴. نتیجه‌گیری

بررسی مقدار سزیم-۱۳۷ جذب شده در موجودات آبی از جمله ماهی‌ها که در سلامتی انسان مؤثراند، بسیار مهم است. ضریب‌های انتقال بین‌بافتی در جذب این مواد، نقش مهمی دارند. با استفاده از مدل چندبخشی و شبکه‌ی عصبی روشی برای تخمین ضریب‌های انتقال، درصد نمکی و پرتوژیایی آب با داشتن منحنی تغییرات غلظت سزیم در بافت ماهی نقره‌ای دریا ارائه شد. آموزش شبکه با استفاده از پارامترهای استخراج شده از منحنی‌های غلظت سزیم به دست آمده از حل معادله‌های چندبخشی و درصد نمکی آب انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از شبکه‌ی عصبی برای پیش‌بینی مقدار سزیم در بافت این ماهی می‌تواند تا ۹۹٪ پاسخ درست ارائه دهد. در مواردی که داده‌ها زیاد و رابطه‌ی آن‌ها غیرخطی است، این روش کارایی مناسبی برای تخمین ضریب‌های انتقال سزیم جذب شده در بافت دارد. همچنین این روش می‌تواند برای محاسبه‌ی سزیم جذب شده توسط ماهی نقره‌ای دریا به کار گرفته شود. از روی پرتوژیایی سزیم می‌توان مقدار دز جذب شده توسط انسان بر اثر مصرف ماهی را محاسبه کرد. این مدل هم‌چنین کارایی لازم برای تخمین دز جذبی سزیم بر اثر حوادث هسته‌ای را دارا است. این روش برای سایر جانداران آبی نیز قابل استفاده است.

#### پی‌نوشت‌ها:

۱. Dicentrarchus Labrax
۲. Runge Kutta
۳. Hidden
۴. Sensory
۵. Responding
۶. Back Propagation
۷. Mean Transit Time
۸. TTP: Time to Peak
۹. ITP: Integral to Peak
۱۰. Multi Layer Peceptron
۱۱. Feed Forward
۱۲. Marquardt-Levenberge
۱۳. Mean Square Error

است، و پارامتر همبستگی برای آزمون‌ها در ۶ گروه در حدود  $R=0.999$  می‌باشد که در حالت آرمانی مقدار آن باید یک باشد؛ یعنی شبکه پاسخ بسیار مناسبی به ورودی‌های آزمون داد. رابطه‌ی رگرسیون بین نتایج خروجی شبکه و مقادیر تجربی در ستون سمت چپ جدول ۳ داده شده است. در این روابط A خروجی شبکه و T مقدار تجربی است. مشاهده می‌شود که شیب خط نظیر معادله، یک و عرض از مبدأ آن برای هر گروه متفاوت است؛ یعنی شبکه برای بعضی از گروه‌ها بهتر جواب می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که ضریب همبستگی بزرگ‌تر از ۰.۹۹ است. با توجه به این که در این جا کاربر تصمیم گیرنده‌ی نهایی است اگر خطای پاسخ شبکه زیاد باشد به وسیله‌ی کاربر تصحیح می‌شود.

با استفاده از نتایج بالا به طور معکوس می‌توان با داشتن داده‌های جدید مانند ضریب‌های انتقال بین‌بافتی و تغییر غلظت سزیم و نمک در آب شبکه را تعلیم داد و به وسیله‌ی این شبکه آموزش دیده، با داشتن منحنی‌های غلظت سزیم-۱۳۷ در بافت ماهی، مقدار غلظت سزیم و نمک در آب را مشخص کرد. از مزایای استفاده از شبکه‌ی عصبی، قابلیت بررسی پارامترهای دیگر مانند اثر سایر مواد پرتوزا در جذب این عنصر و موارد دیگر است. بسیاری از این پارامترها را نمی‌توان با معادلات ریاضی مدل‌سازی کرد.

جدول ۳. نتایج آزمون شبکه برای ۶ گروه مختلف نمکی

| معادله‌ی خط رگرسیون | ضریب همبستگی | درصد MSE | درصد نمک آب |
|---------------------|--------------|----------|-------------|
| $0.01+T=A$          | ۰.۹۹۹۹       | ۱.۳۱۵    | ۱           |
| $0.081+T=A$         | ۰.۹۹۹۲       | ۱.۳۰۲    | ۵           |
| $0.4+T=A$           | ۰.۹۹۹۹       | ۱.۲۰۶    | ۱۰          |
| $0.3+T=A$           | ۰.۹۹۹۹       | ۰.۶۶۷    | ۲۰          |
| $0.024+T=A$         | ۰.۹۹۹۹       | ۰.۵۱۴    | ۲۸          |
| $0.0049+T=A$        | ۰.۹۹۹۹       | ۰.۴۲۸    | ۳۵          |



1. G.Y. Bystrzejewska-Piotrowska, P.L. Urban, Accumulation of cesium in leaves of *lepidums sativum* and its influence on photosynthesis and transpiration, *ACTA Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 45(2) (2003) 131–137.
2. NCRP Report No. 154, Cesium-137 in the Environment: Radioecology and Approaches to Assessment and Management Radiation Protection: A Memoir of the National Radiological Protection Board, *J. Radiol. Prot.*, 27 (2007) 375.
3. M. Kaikkonen, A novel assay method for measuring added plasma caesium and its application in the measurement of short-term kinetics, *ACADEMIC DISSERTATION*, Faculty of Veterinary Medicine of the University of Helsinki, in Walter Auditorium, Agnes Sjöberginkatu, 2 (2006) 27.
4. Y.G. Zhu, E. Smolders, Plant uptake of radiocesium: a review of mechanism, regulation and application, *Journal of Experimental Botany*, 51 (351) (2000) 1653–1654.
5. R. Handley, R. Overstreet, Uptake of carrier-free <sup>137</sup>Cs by *Rumex crispus* L. Plant, *Physiol.*, 43 (1968) 1401–1405.
6. J. Hattink, N. Celis, G. De Boeck, C. Krijger, R. Blust, Accumulation of <sup>137</sup>Cs in the European Sea Bass *Dicentrarchus labrax* (L.) in a salinity gradient: Importance of uptake via gills, diet and ingested water Radioprotection, *C- EDP Sciences*, 44(5) (2009) 665–670.
7. K.N. Ishikawa, K. Tagami, S. Uchida, Estimation of <sup>137</sup>Cs Plant Root Uptake Using Naturally Existing <sup>133</sup>Cs, *Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement*, 6 (2008) 146–151.
8. S.W. Paine, A. Parker, J.P. Gardiner, P.J.H. Webborn, R.J. Riley, Prediction of the Pharmacokinetics of Atorvastatin, Cerivastatin, and Indomethacin Using Kinetic Models Applied to Isolated Rat Hepatocytes Drug Metabolism and Disposition, *D.M.D.*, 36 (2008) 1365–1374.
9. M. Steiner, I. Linkov, S. Yoshida, The role of fungi in the transfer and cycling of radionuclides in forest ecosystems, *Journal of Environmental Radioactivity*, 58 (2002) 217–241.
10. V. Leland Miller, F. Nancy Krebs, K. Michael Hambidge, A Mathematical Model of Zinc Absorption in Humans As a Function of Dietary Zinc and Phytate, *The Journal of Nutrition Methodology and Mathematical Modeling*, 19 (2010) 135–141.
11. P.K.N. Yu, P.K.S. Lam, B.K.P. Ng, A.M.Y. Li, Biokinetic of Cesium in *Perna viridis*, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19(2) (2000) 271–275.
12. J. Dighton, T. Tugay, N. Zhdanova, Fungi and ionizing radiation from radionuclides, *FEMS Microbiol Lett*, 281 (2008) 109–120.
13. CH.A.N Prause, External Detection and Measurement of Inhaled Radionuclides Using Thermoluminescent Dosimeters, the Office of Graduate Studies of Texas A and M University in partial fulfillment to the requirements for the degree of Master of Science, December, (2006).
14. G. Sanchez, J. Lopez-Fidalgo, Mathematical Techniques For Solving Analytically Large Compartmental Systems, *Health Physics Society*, (2003) 184–193.
15. W.R. Parks, D.S. Levine, D.L. Long, *Fundamentals of Neural Network Modeling: Neuropsychology and Cognitive Neuroscience*, The MIT Press (1998).
16. L.J. Pez-fidalgo, J.M. Rodríguez-di'az, G.S.A'Nchez, M.T. Santos-martín, Optimal Designs for Compartmental Models with Correlated Observations, *Journal of Applied Statistics*, 32(10) (2005) 1075–1088.
17. R.W. Leggetta, L.R. Williams, D.R. Meloc, J.L. Lipsztein, A physiologically based biokinetic model for cesium in the human body, *The Science of the Total Environment*, 317 (2003) 235–255.