

# ارائه مدل ریاضی مستقل از پارامترهای محیطی در فرایند حذف آلودگی خاک به روش گیاه پالایی

مرتضی قدیریان<sup>۳</sup>

منوچهر وثوقی<sup>۲</sup>

پریوش مصلحی مصلح آبادی<sup>۱</sup>

(دریافت ۸۸/۱۰/۱۸ پذیرش ۸۹/۶/۱)

## چکیده

در این مقاله یک مدل ریاضی سه قسمتی برای حذف آلودگی خاک به روش گیاه پالایی بر اساس میزان رشد و مرگ ریشه در سیستم ارائه شد. متغیرهای این مدل بر اساس قسمت‌هایی با حجم متفاوتند که هر یک ضریب تجزیه مشخص و از درجه اول دارند. زمانی که ریشه در خاک حرکت می‌کند، خاک در سبکل لایه‌های نزدیک به ریشه (ریزوسفر)، ناحیه مرگ ریشه و ناحیه خاک قرار می‌گیرد. لذا با این که در این مدل، آلودگی بی حرکت و ثابت در نظر گرفته می‌شود ولی با توجه به این که ریشه در خاک نفوذ می‌کند، خاک در معرض ریزوسفر قرار می‌گیرد. در این مدل برای بیان چگونگی رشد ریشه، مدلی در نظر گرفته شد که هم رشد مکانی یعنی تغییرات نمایی با عمق و هم رشد زمانی یعنی تغییرات سینوسی با زمان را شامل می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** حذف آلودگی، گیاه پالایی، ریزوسفر، مدل ریاضی

## A Mathematical Model Independent of Environmental Parameters for soil Pollution Removal by Phytoremediation

Parivash Moslehi Moslehabadi<sup>1</sup>

Manoochehr Vosoughi<sup>2</sup>

Morteza Ghadirian<sup>3</sup>

(Received Jan. 8, 2010 Accepted Aug. 23, 2010)

### Abstract

In this paper, a three-zone mathematical model is developed for soil pollutant removal by phytoremediation which is based on the root growth and decay in the system. The variables of the model are based on parts which have different volumes and a given first order decay coefficient. When the root moves in the soil, soil lies in the cycles of layers near the root (rhizosphere), root decay zone, and soil zone. It follows then that despite the fact that the model is based on the assumption of immobile pollutant, the fact that root moves in the soil ensures that soil meets the rhizosphere. To account for the root growth, a model is developed that involves both its spatial growth (exponential variation with depth) and its temporal growth (sinusoidal variation with time).

**Keywords:** Pollutant Removal, Phytoremediation, Rhizosphere, Mathematical Model.

1. M.Sc. Faculty Member of Chem. and Petroleum Eng. Dept., Sharif University of Tech., Tehran
2. Prof. of Chem. and Petroleum Eng. Dept., Sharif University of Tech., Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 66165487 vosoughi@sharif.edu
3. M.Sc. Student of Chem. and Petroleum Eng. Dept., Sharif University of Tech., Tehran

- ۱- کارشناس ارشد و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
- ۲- استاد دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران (نویسنده مسئول) ۶۶۱۶۵۴۸۷ (۰۲۱) vosoughi@sharif.edu
- ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۵ تا ۱۰۰ برابر بیشتر از فعالیت میکربی خاک در حال عادی است [۸]. این افزایش فعالیت میکربی در ناحیه ریزوسفر باعث افزایش احتمال تجزیه ترکیبات آلی می‌گردد [۹]. مقالات علمی متعدد نشان می‌دهند که بهره‌برداری از افزایش فعالیت میکربی در ناحیه ریزوسفر، پارامتر مهمی در اتخاذ استراتژی پاکسازی‌های در محل است. توانایی خاک در تدارک عناصر غذایی، ذخیره آب، رهاسازی گازهای گلخانه‌ای، اصلاح و تبدیل آلاینده‌ها به شدت متأثر از کیفیت و کمیت مواد آلی موجود در خاک است [۱۰].

جذب مواد آلی توسط گیاهان به خوبی ثابت شده است و مدل‌های زیادی برای این فرایند ارائه گردیده‌اند [۱۱]. یکی از اولین مدل‌های موجود، مدلی چند بخشی بر اساس تجمع مواد آلی در شاخ و برگ درختان بر مبنای ضرائب انتقال بین فازهای مختلف شامل خاک، ریشه و ساقه بوده است [۱۲]. در یکی دیگر از کارهای اولیه روی مدل‌سازی گیاه پالایی بر روی حذف متیل تترابوتیل اتر MTBE، یک مدل ریاضی بر اساس شبیه‌سازی توزیع MTBE در گیاهان آلفا-آلفا به‌کار برده شده است و ضرائب نفوذ بر اساس ۵۰ درصد کاهش غلظت MTBE در جریان تراوش، تخمین زده شده‌اند [۱۳]. امروزه تأکید زیادی بر کاربرد مدل‌سازی‌های پیچیده‌تری است که از روشهای ریاضی و پردازش‌های رایانه‌ای استفاده روز افزون‌تری دارند [۱۴]. در مدل‌هایی که تاکنون ارائه شده‌اند، تأیید رشد و مرگ ریشه گیاهان و حجم ریزوسفر در گیاه پالایی در نظر گرفته نشده است که در این مقاله به بررسی این پارامترهای مهم پرداخته شد.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- بیان مدل

مفهوم این مدل بر این اساس است که سیستم خاک-گیاه-آلودگی به چند ناحیه تقسیم می‌شود. خود ریشه، تعدادی از نواحی اطراف ریشه که متأثر از ریشه هستند (ریزوسفر)، ناحیه نابودسازی ریشه و خاک و ناحیه نامتأثر از ریشه یا همان توده خاک. یک طرح شماتیک از این تقسیم بندی در شکل ۱ نمایش داده شده است. هر کدام از این نواحی به مثابه یک راکتور جدا با حجم متفاوت و کاملاً همگن عمل می‌کنند. تغییر در حجم هر ناحیه بر حسب زمان از طریق معرفی توابع رشد و مرگ ریشه بیان می‌شود.

در این مدل همان‌طور که ریشه‌های جدید در خاک نفوذ می‌کنند و فعالیت میکربی را افزایش می‌دهند، خاک اطراف ریشه نیز تبدیل به ریزوسفر می‌شود. با مرگ ریشه، ریشه و ریزوسفر مربوطه به ناحیه مرگ ریشه منتقل می‌شوند که سرانجام توسط فرایند خاک‌سازی به خاک بر می‌گردند. برای شبیه‌سازی گیاه پالایی گیاهان متفاوت، از توابع رشد و مرگ مختلفی استفاده می‌گردد.

با توجه به اینکه آلودگی خاک نقش بسیار مهمی در آلودگی منابع آب دارد، حذف آلودگی خاک یکی از فرایندهای مهم زیست‌محیطی به‌شمار می‌آید. یک آلودگی محیط زیستی، ماده‌ای طبیعی یا مصنوعی است که بر اساس فعالیت‌های بشری منتشر می‌شود و تأثیرات نامطلوبی بر انسان و محیط زیست دارد [۱]. ترکیبات آلی در اکثر مکان‌های آلوده قابل مشاهده‌اند. بسیاری از این ترکیبات، سمی هستند و مدتها در محیط زیست باقی می‌مانند و باعث ایجاد خطر برای محیط و جانداران می‌گردند. نفت خام و مشتقات آن معمولاً از طریق ذخیره، لوله‌های انتقال، شیرابه مواد دفع شده نفتی و حوادث ناخواسته به محیط راه می‌یابند [۲].

اگرچه زیست پالایی<sup>۱</sup> فواید بسیاری نسبت به دیگر روشهای پاکسازی دارد اما اجرای روشهای زیست پالایی در همه مکان‌ها میسر نیست. یک جایگزین در این شرایط، استفاده از گیاهان به منظور افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های مناسب برای تجزیه هیدروکربن‌ها در خاک است. استفاده از گیاهان برای تحریک میکروارگانیسم‌های سم‌زدا و نابودگر آلوده‌کننده‌های آلی، یک فرایند طبیعی است که به دلیل تأثیر زیاد، هزینه‌های کم و نیاز به کمترین وسایل، با استقبال زیادی روبرو شده است [۳].

واژه گیاه پالایی<sup>۲</sup> نخستین بار توسط رسکین<sup>۳</sup> در ۱۹۹۱ در یک سخنرانی در مورد روشهای کاهش آلودگی در محیط زیست مطرح گردید. این واژه توسط کانینگهام<sup>۴</sup> و برتی<sup>۵</sup> در سال ۱۹۹۳ برای نخستین بار در مقاله‌ای به‌کار برده شد. تعریف دقیق‌تری از این واژه در سال ۱۹۹۵ توسط اشنور<sup>۶</sup> بیان گردید [۴]. گیاه پالایی یک روش در محل است که فاقد هرگونه اثرات تخریبی برای محیط زیست و بسیار کم هزینه است [۵].

نکته اصلی در این قبیل فعالیتها انتخاب گیاهانی است که ضمن پالایش پساب‌ها و خاکهای آلوده، امکان تکمیل دوره رشد آنها در شرایط آلودگی نیز وجود داشته باشد. امروزه همواره سعی بر آن است تا در حد امکان از گیاهان بومی و محلی برای این منظور استفاده شود زیرا پرورش و تطابق گیاهان سایر سرزمین‌ها با شرایط سرزمین مقصد با توجه به رشد نامطلوب این گیاهان در پسابهای آلوده، بسیار دشوار است [۶]. ریزوسفر بخشی از خاک است که در تماس یا در مجاورت ریشه گیاه قرار دارد و در نتیجه تحت تأثیر مستقیم ریشه‌های گیاه است [۷]. فعالیت میکربی در ریزوسفر بین

<sup>1</sup> Bioremediation

<sup>2</sup> Phyto Remediation

<sup>3</sup> Raskin

<sup>4</sup> Cunningham

<sup>5</sup> Berti

<sup>6</sup> Schnoor

رابطه ۳ مربوط به مرگ ریشه است. در اینجا فرض بر این است که ریشه و ریزوسفر پس از مرگ ریشه به این ناحیه انتقال می یابند

$$\frac{dV_B}{dt} = [1 + \sum \beta_i] V_R D_{(t)} - K_H V_D \quad (3)$$

روابط بالا، بالانس جرمی تولید و مرگ ریشه و خاک در این سه ناحیه را نشان می دهند.

هدف از مدل سازی، به دست آوردن میزان کاهش آلودگی ها در واحد زمان یعنی  $\frac{dC}{dt}$  بود. لذا باید به نحوی این ترم تولید شود

$$\frac{d(CV)}{dt} = C \frac{dv}{dt} + V \frac{dc}{dt} \quad (4)$$

که در این رابطه

$C$  غلظت آلاینده و  $V$  حجم سیستم است.

موازنه جرمی آلاینده در هر ناحیه ریشه و لایه های ریزوسفری اطراف آن به صورت زیر است

$$\frac{d(c_i V_i)}{dt} = V_R \beta_i G_{(t)} C_B - V_R \beta_i D_{(t)} C_i - K_i V_i C_i \quad (5)$$

که در رابطه بالا

جمله اول نشان دهنده میزان ورود آلاینده از ناحیه توده خاک است و فرض شده که هیچ آلاینده ای به ریشه راه نمی یابد و فقط در خاک اطراف ریشه یعنی ریزوسفرها، آلاینده وجود خواهد داشت و جمله دوم نشان دهنده میزان خروج آلاینده ها از ناحیه اول به ناحیه مرگ ریشه است. جمله سوم میزان پاکسازی آلاینده توسط لایه های ریزوسفر را نشان می دهد که این میزان توسط ضریب پاکسازی بیولوژیکی در لایه ریزوسفر با  $K_i$  تعیین می شود.

نظیر رابطه بالا برای ناحیه مرگ ریشه و توده خاک نیز نوشته می شود و در رابطه ۴ قرار می گیرد و میزان  $\frac{dc}{dt}$  برای هر ناحیه به دست می آید. به عنوان مثال برای ناحیه ریزوسفری رابطه ۶ به دست می آید

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{1}{V_i} [V_R \beta_i G_{(t)} C_B - D_i C_i - C_i \frac{dv_i}{dt}] - K_i C_i \quad (6)$$

با محاسبه رابطه بالا که بیانگر تغییرات غلظت آلاینده نسبت به زمان در هر یک از ۳ ناحیه مورد بررسی در سیستم است و حل عددی آن، می توان میزان کاهش آلاینده ها را به دست آورد. به این منظور باید تمام جمله ها و پارامترهای سمت راست روابط بالا معین باشند که به غیر از توابع رشد و مرگ ریشه که به ترتیب با  $G_{(t)}$



شکل ۱- سیستم در نظر گرفته شده برای مدل سازی

در مورد خاک نیز اگرچه خاک و آلودگی های آن ثابت و غیرمتحرک در نظر گرفته می شوند اما با انجام این چرخه، خاک و آلودگی ها در معرض ریشه قرار می گیرند. برای مدل کردن این تفاوت مکانی در فعالیت میکربی، به طور اختیاری شش ریزوسفر در نظر گرفته شد و برای هر کدام، ضرائب تجزیه سازی متفاوت و درجه اولی فرض گردید. حرکت آلودگی ها نیز به واسطه جریان های کششی به سمت ریشه، به دلیل حلالیت کم آلودگی در نظر گرفته شد. میزان آلودگی توسط گیاه بر حسب مدارک موجود برای نفت خام و مشتقات آن بسیار ناچیز است [۴]. در توسعه این مدل فرض بر این است که چگالی خاک ثابت است و بنابراین بالانس حجمی همان بالانس جرمی خواهد بود. موازنه بقای جرم برای ریشه و ریزوسفر اطراف آن به صورت زیر است

$$\frac{dV_i}{dt} = V_R [G_{(t)} - D_{(t)}] \beta_i \quad (1)$$

که در آن

$V_i$  حجم ریزوسفر،  $t$  زمان،  $V_R$  حجم ریشه،  $\beta_i$  حجم ریزوسفر تولید شده به روی میزان ریشه جدید تولید شده و  $G_{(t)}$  و  $D_{(t)}$  ضرائب رشد و مرگ ویژه ریشه هستند. برای محاسبات ریشه  $V_I = V_R$  و  $\beta_i = 1$  است.

موازنه حجم برای توده خاک شامل تبدیل خاک به ریزوسفر و ریشه در حین رشد ریشه و از طرفی افزایش میزان خاک بر اثر تولید خاک در اثر فرایند خاک سازی از ناحیه مرگ ریشه است که یک فرایند درجه اول در نظر گرفته می شود

$$\frac{dV_B}{dt} = K_H V_D - [1 + \sum \beta_i] V_R G_{(t)} \quad (2)$$

که در آن

$K_H$  ضریب خاک شونگی،  $t$  زمان، اندیس  $B$  برای بدنه خاک و  $D$  برای مرگ است.

در روابط بالا  $P_5$  بازه زمانی بین رشد و مرگ ریشه یا به عبارتی طول عمر ریشه است که با توجه به تحقیقات گذشته حدود دو ماه در نظر گرفته می‌شود. پارامتر  $P_4$  نیز با استفاده از روابط ریاضی به صورت زیر به دست می‌آید [۱۶]

$$P_4 = \frac{\pi P_2}{T_m \sin\left(\frac{\pi P_5}{T_m}\right)} \quad (13)$$

در روابط ذکر شده پارامتر  $\beta_i$  به عنوان میزان تغییرات حجم ناحیه  $i$  از ریزوسفر بر واحد تغییرات حجم ریشه در نظر گرفته می‌شود. اندازه‌گیری دقیق تجربی حجم ریزوسفر بسیار مشکل است. در تحقیقات مختلف، روشهایی برای تخمین عاقلانه‌ای از این پارامتر ارائه شده است. برای محاسبه حجم لایه‌های ریزوسفر، سیستم استوانه‌ای با شعاع  $r$  و لایه‌هایی به ضخامت  $RT$  در نظر گرفته می‌شود. بنابراین

$$V_i = \pi L([r + (i)RT]^2 - [r + (i-1)RT]^2) \quad (14)$$

که در این رابطه

$i$  معرف لایه  $i$ ام است و از لایه‌های داخلی شروع می‌شود. در رابطه بالا فرض بر این است که هیچ روی هم افتادگی بین لایه‌های ریزوسفر ریشه‌های مختلف وجود ندارد. به علاوه رابطه بین حجم ریزوسفر و حجم ریشه، مورد نیاز است. در این رابطه فرض بر این است که فاکتور مهم در تولید ریزوسفر تغییر در طول ریشه است و نه در قطر آن. با توجه به این فرض نشان داده می‌شود که ضریب حجمی ویژه ریزوسفر ( $\beta_i^{\max}$ ) برای لایه  $i$  از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\beta_i^{\max} = \frac{2\alpha + 2i - 1}{\alpha^2} \quad (15)$$

که  $\alpha$  برابر است با نسبت اندازه شعاع به ضخامت لایه  $i$  ریزوسفر ( $r/RT$ ). برای سیستم‌های با چگالی کم ریشه، رابطه بالا تخمین خوبی از حجم ریزوسفر خواهد بود اما در سیستم‌های با چگالی بالای ریشه که برای گیاه پالایی مورد نیاز است، این رابطه مقادیری بیش از مقدار واقعی را نشان می‌دهد که این امر به دلیل همپوشانی لایه‌های ریشه‌های مختلف است. به عنوان یک فرض اولیه برای در نظر گرفتن این همپوشانی از  $0.2\beta_i^{\max}$  تا  $0.4\beta_i^{\max}$  استفاده می‌شود [۱۷].

در مورد ثوابت تجزیه، نرخ تجزیه کنندگی براساس میزان فاصله از ریشه در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که ضرائب لایه‌های ریزوسفر براساس فاصله از ریشه به طور خطی کاهش پیدا می‌کند و در لایه آخر به  $1/5$  برابر ضریب توده خاک می‌رسد. ضریب

$D(t)$  و نمایش داده می‌شوند، مابقی قابل محاسبه‌اند. روشی که در این تحقیق از آن استفاده شد، روش انباشته<sup>۱</sup> بود.

بیشترین مقدار جرم ریشه موجود در هر سال به عنوان میزان افزایش سالیانه ریشه تعریف می‌شود. با توجه به مفاهیم مدل  $\Phi$  به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\Phi = \frac{\max[L(t)] - \min[L(t)]}{\max[L(t)]} \quad (7)$$

که در این رابطه

$\Phi$  درصد سالیانه میزان افزایش ریشه و  $L$  معرف طول ریشه است. با این تعریف  $\Phi$  برای گیاهان یکساله برابر ۱ خواهد بود.

در رابطه بالا  $\max[L(t)]$  در  $L_{(Tm/2)}$  و  $\min[L(t)]$  در  $L_{(Tm)}$  خواهد بود.  $L(t)$  نیز با انتگرال گیری از  $L(z,t)$  طبق رابطه زیر به دست می‌آید

$$L(t) = \int_0^{\infty} L(z,t) dz \quad (8)$$

که در این رابطه

$Z$  عمق ریشه است.

با توجه به این تعاریف می‌توان نشان داد که  $\Phi = 1 - e^{-2P_2}$ . گستره پارامتر  $p_2$  از  $0.05$  (به ازای  $\Phi = 0.1$ ) شروع و به  $2/5$  (به ازای  $\Phi = 0.99$ ) ختم می‌شود. نهایتاً می‌توان نشان داد که بیشترین جرم ریشه برابر خواهد بود با  $\frac{P_1 Z_m \exp(P_2)}{P_3}$  و از اینجا پارامتر  $P_1$  نیز تعیین می‌گردد.

طبق تعریف انجام شده برای توابع مرگ و ریشه می‌توان نوشت [۱۵]

تغییر طول ریشه = (طول ریشه)  $\times$  (میزان مرگ ریشه - میزان رشد ریشه)

$$(G_{(t)} - D_{(t)}) \times L_{(t)} = \frac{\Delta L_{(t)}}{\Delta t} = \frac{\partial L_{(t)}}{\partial t} \quad (9)$$

با ساده سازی، رابطه ۱۰ به دست می‌آید

$$\frac{\partial L(t)}{\partial t} G_{(t)} - D_{(t)} = \frac{1}{L(t)} \quad (10)$$

در این مرحله با انجام برخی محاسبات، توابع همیشه مثبت ذیل برای  $G(t)$  و  $D(t)$  به دست می‌آید

$$G_{(t)} = P_4 \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi t}{T_m} + \frac{\pi P_5}{T_m}\right) \right] \quad (11)$$

$$D_{(t)} = P_4 \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi t}{T_m} + \frac{\pi P_5}{T_m}\right) \right] \quad (12)$$

<sup>1</sup> Lumped

داخلی ترین لایه نیز ۱۰ برابر مقدار توده خاک در نظر گرفته می شود. این فرضیات بر این اساس انجام می شود که فعالیت میکربی در این لایه ها بین ۵ تا ۱۰۰ برابر فعالیت میکربی توده خاک است [۱۸]. آخرین ضریب، ضریب تجزیه ریشه است. ضریب خاک شوندگی یا ضریب تجزیه ریشه و ریزوسفر، از مطالعات انجام شده بر روی گونه های خاک شده تخمین زده می شود [۱۹]. اگرچه بر اساس فرضیه اولیه، تمام ریشه و ریزوسفر مربوط به آن وارد ناحیه مرگ می شوند اما این فرض باعث خطا در تخمین ضریب خاک شوندگی می گردد. دلیل این امر این است که سرعت خاک شوندگی ریشه بسیار کمتر از لایه های ریزوسفر است که خود قبلاً خاک بوده اند. لذا برای ضریب خاک شوندگی در هر نیمه عمر ۳۱ روزه، مقداری برابر<sup>-۱</sup> (روز) ۰/۰۲۲ در نظر گرفته می شود. تمام این پارامترها در جدول ۱ آورده شده اند.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی

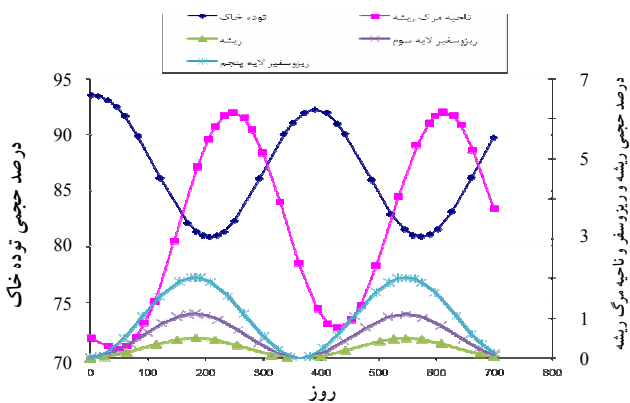
به منظور مقایسه نتایج مدل با اطلاعات تجربی، از نتایج تحقیق دیگری که اخیراً در ایران برای فرایند گیاه پالایی آلاینده های نفتی بر روی گیاه آلفا-آلفا انجام شده استفاده گردید [۲۰]. معادلات دیفرانسیل با استفاده از شرایط مرزی حل شدند. به منظور حل معادلات دیفرانسیل از نرم افزار برنامه نویسی MATLAB ویرایش ۷/۰۴ استفاده گردید.

### ۴- نتایج و بحث

از حل عددی معادلات دیفرانسیل مربوط به مدل، دو نوع نتیجه به دست می آید. نوع اول مربوط به حجم نواحی مختلف توده خاک، ریشه و لایه های ریزوسفر برای سیستم است و نوع دوم مربوط به

تغییرات غلظت در این نواحی است. در هر نوع از این داده ها، نمودارهایی به دست می آید که برای آسان شدن مقایسه بین آنها هم برای نمودارهای حجم-زمان و هم نمودارهای غلظت-زمان، محورهای عمودی این نمودارها که همان حجم و غلظت نواحی مختلف هستند، به ترتیب به حجم اولیه کل خاک و غلظت اولیه آلودگی در آن ناحیه تقسیم شدند تا بتوان نتایج را بر حسب درصد بیان نمود.

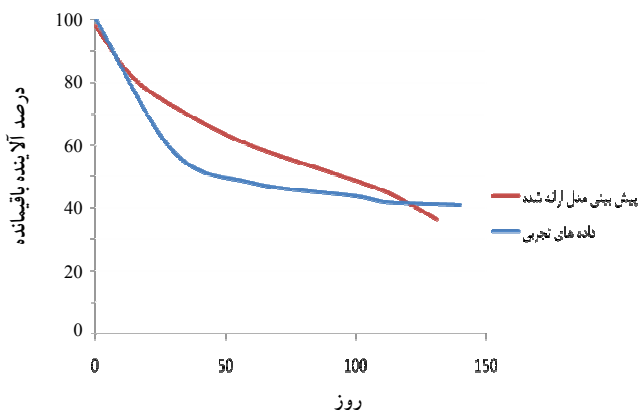
همان طور که در شکل ۲ دیده می شود بیشترین حجم، مربوط به توده خاک است. با گذر زمان از میزان توده خاک کم شده و به میزان ریشه و به طور گسترده تر به ریزوسفر اضافه می شود. زمانی که ریشه و ریزوسفر مربوطه تحلیل رفته و کاهش یافت، به میزان ناحیه مرگ ریشه و پس از آن به میزان توده خاک اضافه می گردد و این چرخه ادامه می یابد.



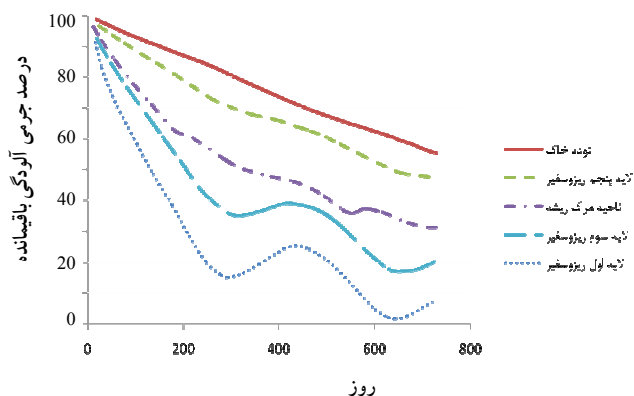
شکل ۲- مقایسه در صد حجمی قسمت های مختلف سیستم نسبت به هم

جدول ۱- پارامترهای طراحی لازم برای استفاده در این مدل [۲۰]

گیاهان دائمی	گیاهان یکساله	پارامترهای طراحی
۰/۳۴ mm	۰/۳۴ mm	شعاع ریشه، r
۰/۳ mm	۰/۳ mm	ضخامت لایه های ریزوسفر، RT
۰/۴ β <sup>max</sup>	۰/۴ β <sup>max</sup>	ضریب حجمی ریزوسفر، β
۰/۰۲۲ (روز) <sup>-۱</sup>	۰/۰۲۲ (روز) <sup>-۱</sup>	ثابت خاک شوندگی ریشه، KH
۰/۰۰۲ (روز) <sup>-۱</sup>	۰/۰۰۲ (روز) <sup>-۱</sup>	ضریب تجزیه کنندگی ناحیه مرگ ریشه، KD
۰/۰۰۰۵ (روز) <sup>-۱</sup>	۰/۰۰۰۵ (روز) <sup>-۱</sup>	ضریب تجزیه کنندگی توده خاک، KB
۰/۹۸	۰/۲۹	درصد سالیانه میزان افزایش ریشه، Φ
۲۰ cm	۲۰ cm	بیشینه عمق ریشه، Z <sub>m</sub> (۹۹ درصد ریشه بالای این عمق قرار دارد)
۵۵ روز	۵۵ روز	طول عمر متوسط ریشه، P <sub>5</sub>



شکل ۴- مقایسه میان درصد آلاینده باقیمانده به دست آمده از مدل و آزمایشهای تجربی



شکل ۳- درصد آلاینده های نفتی باقیمانده در نواحی مختلف گیاهان یکساله  $\Phi=0/98$

### ۵- نتیجه گیری

مدل ریاضی ارائه شده با نتایج داده های آزمایشگاهی گیاه آلفا-آلفا مقایسه گردید. همانطور که انتظار می رفت، میزان آلاینده باقیمانده در خاک نسبت به زمان، یک روند نزولی داشت. مدل با داده های آزمایشگاهی تطابق نسبتاً خوبی نشان داد. به هر حال چنین مدل هایی بدون بررسی برای سایر گیاهان و سایر آلاینده ها نمی توانند به کار گرفته شوند. مواد شیمیایی باید کمیته های فیزیکی و شیمیایی مشابهی داشته باشند و همچنین ضرائب به کار گرفته شده در مدل باید برای هر نوع شرایطی بررسی گردند. در این تحقیق، مدل با اطلاعات به دست آمده از سایت های بزرگ و اسنجی نشد. پارامترهای به کار گرفته شده از اطلاعات آزمایشگاهی، شرایط سایت های بزرگ را به خوبی منعکس نمی کنند.

در شکل ۳ مقایسه ای میان نواحی چندگانه مدل در حذف آلاینده ها برای گیاهان یکساله ( $\Phi=0/98$ ) نمایش داده شده است. این مقایسه نشان می دهد که بیشترین میزان حذف آلاینده ها توسط لایه های ریزوسفری نزدیک به ریشه و کمترین میزان پاکسازی توسط توده خاک انجام می گیرد. نکته قابل توجه در مورد گیاهان یکساله این است که لایه های آخر ریزوسفری، عملاً تأثیر زیادی در پاکسازی ندارند و شبیه به توده خاک عمل می کنند.

شکل ۴ مقایسه ای بین داده های تجربی حاصل از آزمایش ها و داده های حاصل از میزان پاکسازی پیش بینی شده توسط مدل ارائه می دهد. همانطور که مشاهده می شود نتایج مدل، سازگاری خوبی با داده های تجربی حاصل از این سری آزمایش ها نداشت. دلیل این امر نیز هدررفت یا به عبارتی شسته شدن آلودگی از خاک است که در این تحقیق از آن جلوگیری نشد و این هدر رفت آلودگی جزء پاکسازی انجام شده توسط فرایند گیاه پالایی محسوب شد.

### ۶- مراجع

- Hatzinger, P.B., Alexaner, M., Kelsey, J., Kottler, B., and Name, K. (1997). "Sequestration and realistic risk from toxic chemicals remaining after bioremediation." *Annals New York Academy of Science*, 829, 1-5
- Bossent, I., and Barntha, R. (1984). "The fate of petroleum in soil ecosystems." *Petroleum Microbiology*, 1(2), 435-473.
- April, W., and Sims, R. C. (1990). "Evaluation of the use of prairie grasses for stimulating polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soil." *Chemosphere*, 20(1-2), 253-265.
- Schnour, J.L., and Licht, L.A. (1995). "Phytoremediation of organic and nutrient contaminants." *Environmental Science and Technology*, 29(7), 318-323.
- Shump, J. F., and Tracy, J.C. (1993). "Beneficial effects of plants in the remediation of soil and groundwater contaminated with organic material." *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 23(1), 41-77.

- 6- Zamyadi, A., Liaghat, A. M., and Hassanoghli, A. R. (2004). "Investigation into the possibility of phytoremediation of industrial wastewater containing zinc." *J. of Water and Wastewater*, 48, 3-12. (In Persian)
- 7- Anderson, T.A., Guthrie, E.A., and Walton, B.T. (1993). "Bioremediation in the rhizosphere." *Environmental Science and Technology*, 27(13), 2630-2636.
- 8- Atlas, R. M., and Bartha, R. (1993). *Microbial ecology: Fundamentals and applications*, Benjamin/Cummings, Publishing Company Inc., Don Mills, SON.
- 9- Bulan, N., and Adrino, D. (2001). "Rhizosphere the twilight zone of the hidden hall." *Contaminated Soil Sediment Water*, 11-13.
- 10- Hassanoghli, A., Liaghat, A., and Mirabzadeh, M. (2002). "Effect of water reuse on organic matter concentration of soil and its self purification." *J. of Water and Wastewater*, 42, 2-11. (In Persian)
- 11- Briggs, G.G., Bromilow, R. H., and Evans, A.A. (1982). "Relationships between lipophilicity and root uptake and translocation of non-ionised chemical by banley." *Pesticide Science*, 13, 495-504.
- 12- Paterson, S., Mackay, D., and Mc Farlane, C. (1994). "A model of organic chemical uptake by plants from soil and atmosphere." *Environmental Science and Technology*, 28(13), 2259-2266.
- 13- Zhang, Q., Davis, L. C., and Erickson, L. E. (2001). "Phytoremediation on methyl-tert-butyl ether (MTBE) in groundwater- experimental of and modeling studies." *Environmental Science and Technology*, (35), 725-731.
- 14- Pirazizi, A. A. (2002). "Process of environmental models in developing countries." *J. of Water and Wastewater*, 41, 57-63. (In Persian)
- 15- Chang, Y. M., and Carapciuglu, Y. (1998). "Plant- enhanced subsurface bioremediation of nonvolatile hydrocarbons." *J. of Environmental Engineering*, 2, 162-164.
- 16- Eissenstat, G., and Yanai, A. (1997). "Ecology of root lifespan." *Advanced in Ecological Research*, 27, 1-60.
- 17- White, P. L., Thoma, G. J., and Reynolds, M. (2003). "Influence of organic and inorganic soil amendments on plant growth in crude oil- contaminated soil." *Implication J. of Phytoremediation*, 5, 281-292.
- 18- Anderson, T.A., and Guthrie, E.A. (1993). "Bioremediation in the rhizosphere." *Environmental Science and Technology*, 27(13), 2630-2636.
- 19- Dormaar, J. F., and Willms, W.D. (1993). "Decomposition of blue grama and rough fescue root in prairie soils." *J. Range Management*, 46, 207-213.
- 20- Ezzatian, R. (2008). "Laboratory research and mathematical modeling for purification of oily polluted soils by phytoremediation with using native plants." Ph.D. Thesis, College of Environmental, Sciences and Research Branch, Azad University, Tehran. (In Persian)