

## ارایه مدل ریاضی به منظور بررسی فرآیند گیاه پالایی خاک های آلوده به مواد نفتی

فراز منتظرالصدق<sup>۱</sup>

رضا عزتیان<sup>۲\*</sup>

سهیلا یغمایی<sup>۱</sup>

تاریخ پذیرش: ۸۶/۸/۱۵

تاریخ دریافت: ۸۶/۴/۲۰

### چکیده

در سال های اخیر استفاده از گیاهان به منظور پالایش خاک های آلوده به مواد نفتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با وجود آن که در این راستا کوشش های آزمایشگاهی و تجربی زیادی صورت پذیرفته، اما این کوشش ها بر اساس پیش بینی های تحلیلی و مدل سازی ریاضی نبوده است. مفاهیم نظری این پدیده، از نقطه نظر بررسی تاثیر هر یک از متغیر های موثر بر فرایند، دارای اهمیت می باشد. بررسی حاضر تلاشی در راستای شناسایی و تعیین اثر هریک از متغیرهای مورد اشاره در پدیده گیاه پالایی می باشد. با تلفیق معادلات پیوستگی و انتقال جرم، یک مدل ریاضی به روش اختلاف متناهی معرفی می شود و با حل عددی یک تجربه گیاه پالایی با استفاده از گیاه پنبه دانه، علاوه بر تشریح تاثیر پارامترهای زمان، ویژگی های ریشه، طول عمر گیاه، جمعیت های میکروبی و غلظت هیدروکربن، مطابقت تجربه و مدل نشان داده شده است.

واژه های کلیدی: مدل ریاضی، گیاه پالایی، آلودگی نفتی خاک، حل عددی، جمعیت های میکروبی.

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه صنعتی شریف.

۲- دکترای مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست و انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران\* (مسئول مکاتبات).

## مقدمه

- افزایش میزان هوادهی از راه های آزاد سازی مستقیم اکسیژن و یا ایجاد مسیره های عبور هوا
  - کند و یا متوقف نمودن حرکت ترکیبات ارگانیک آب گریز
  - تبدیل مواد سمی به مواد غیر سمی یا موادی که سمیت کمتری دارند.<sup>۹</sup>
  - کاهش نفوذ عمودی مواد سمی در خاک با جذب آب های اضافی در سطح
  - انباشتگی فلزات در سطح خاک<sup>۱۰</sup> (۲)
- گیاه پالایی در کنار مزایا دارای محدودیت هایی نیز می باشد که به طور اختصار به برخی از آن ها اشاره می شود.
- از برتری های این روش جهت پاک سازی مناطق آلوده می توان به موارد ذیل اشاره نمود:
- عملیات توسط نور آفتاب انجام می گیرد<sup>۱۱</sup> و از نظر مصرف انرژی مقرون به صرفه است.
  - باعث آشفته گی اکولوژی محل نمی شود.
  - در برخی موارد تنها راه عملی مقرون به صرفه می باشد.
- برخی محدودیت های این روش عبارتند از:
- به مساحت زیاد زمین و زمان زیاد جهت انجام عملیات پاک سازی نیازمند می باشد.
  - تنها قادر به پاک سازی عمق های کم خاک (تا عمق نفوذ ریشه گیاه مورد استفاده در خاک) می باشد.
  - تمام انواع آلاینده ها با غلظت های مختلف توسط این پدیده قابل پاک سازی نیستند (۲).
- محل هایی مانند خاک ها و زمین های آلوده شده به علت وجود پالایشگاه ها، زمین های زراعی آلوده شده با سموم و علف کش ها و... می توانند محل های مناسبی به منظور استفاده از این روش در نظر گرفته شوند.

در سال های اخیر گیاه پالایی، به معنی استفاده از گیاهان با هدف پاک سازی خاک از انواع آلاینده ها مانند انواع علف کش ها، حشره کش ها و هیدروکربن های آروماتیک امکان جدیدی برای مدیریت پساب ها و فاضلاب ها در اختیار محققان این رشته قرار داده است. این روش، راه حلی عملی به منظور پالایش و تصفیه مقادیر زیاد خاک هایی که آلودگی کمی دارند<sup>۱</sup>، می باشد. با وجود آن که فن آوری هایی مانند هوادهی<sup>۲</sup>، پالایش به وسیله میکروارگانیسم ها<sup>۳</sup> و جامدسازی<sup>۴</sup> بدین منظور به کار می روند، اما به طور کلی از لحاظ اقتصادی برای حجم های زیاد خاک مقرون به صرفه نیستند (۱)

از طرفی فن آوری های خارج از محل<sup>۵</sup> عملاً برای حجم های بالای خاک ناکارآمد و گران قیمت به شمار می روند. در این راستا به نظر می رسد تنها راه عملی استفاده از گیاهان به منظور پالایش خاک باشد. (۱)

طبق تعریف، گیاه پالایی یا به عبارت دیگر پالایش خاک با استفاده از گیاه، عبارت است از استفاده از گیاهان سبز و سایر ارگانیسم های اوتوتروف<sup>۶</sup> به منظور پاک سازی آلاینده ها در خاک. نکته شایان ذکر در این قسمت آن است که وجود گیاهان می تواند باعث تامین کربن، مواد مغذی و... در خاک شود و در نتیجه باکتری های هتروتروف<sup>۷</sup> امکان رشد و تجزیه آلاینده ها را پیدا نمایند (۱).

طبق تحقیقات صورت پذیرفته، وجود گیاهان در خاک به چندین صورت موجب تصفیه و پاک سازی آن می شود:

- بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک
- حذف فلزات سنگین، رادیواکتیو و برخی دیگر مواد آلاینده خاک نظیر ترکیبات معطر چند حلقه ای
- افزایش جمعیت میکروبی موجود در خاک<sup>۸</sup>

- 1-Slightly Contaminated Soils
- 2-Aeration
- 3- Bioremediation
- 4 -Solidification
- 5- Ex Situ
- 6 -Autotrophic organisms
- 7 -Heterotrophic
- 8- Rhizodegradation

- 9 -Phytodegradation
- 10-Phytoextraction
- 11 -Solar driven

## نیازمندی تجربیات آزمایشگاهی به تحلیل ریاضی

استفاده از گیاهان به منظور پالایش خاک به طور روزافزونی در سال های اخیر مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه نشان می دهد که به خصوص برای تصفیه نهایی خاک های آلوده به مواد نفتی و مانند آن، روش یاد شده بسیار مفید و قابل استفاده عملی، در عین اقتصادی بودن آن می باشد.

با وجود آن که تاکنون تحقیقات تجربی زیادی در این زمینه صورت گرفته ولی به علت پیچیدگی های موجود کمتر به بحث های مدل سازی و ریاضی آن توجه شده است. ممکن است در نگاه اول تخمین نتایج با استفاده از روش تجربی از سهولت بالاتری برخوردار باشد ولی با توجه به تنوع گیاهان مورد استفاده، تنوع آلاینده های موجود در خاک، تنوع نوع خاک هر محل و نیز تنوع روش هایی که به وسیله آن گیاهان باعث کاهش غلظت انواع آلاینده ها در خاک می شوند با به کارگیری تحلیل و مدل ریاضی در موارد بسیاری می توان از نتایج تجربی به دست آمده برای یک آزمایش، برای سایر محل های آلوده شده استفاده نمود. ارایه یک مدل ریاضی با امکان تغییر در پارامترها و متغیرهای تجربی علاوه بر آن که به درک بهتر این پدیده کمک خواهد نمود، می تواند به پیش بینی رفتار این پدیده در سایر محل ها، کمک شایانی بنماید. به منظور استفاده از گیاهان در تصفیه خاک به طور عملی، می بایست ساز و کار انجام فرآیند بررسی و با نتایج تجربی مقایسه گردد. شایان ذکر است که تاکنون کوشش های اندکی در این زمینه صورت گرفته و در آن ها تنها به سرنوشت مواد مغذی یونی و برخی فلزات در خاک اشاره شده است (۳).

در مطالعه حاضر اطلاعات تجربی مورد استفاده با توجه به منابع در دسترس تهیه و تنظیم گردیده است.

در تمامی مراحل مدل سازی و برنامه نویسی این نکته مد نظر بوده که تمامی پارامترهای هندسی، پارامترهای مربوط به آلاینده ها، پارامترهای مربوط به خاک، پارامترهای مربوط به ریشه و... قابل تغییر باشد و در نتیجه مدل ارایه شده برای طیف

وسعی از گیاهان، آلاینده ها و مناطق و شرایط مختلف قابل تعمیم است.

## مدل سازی ریاضی

به منظور بررسی و مدل سازی پدیده گیاه پالایی ارایه یک مدل ساده و در عین حال دقیق و عملی مورد نظر بوده- است.

به طور خلاصه برای مدل سازی این پدیده، باید از دو معادله پیوستگی و انتقال جرم به طور همزمان استفاده نمود. معادله پیوستگی که در واقع همان قانون بقای جرم است، در این جا برای آب نوشته می شود. در این راستا اثر وجود ریشه، به دلیل مصرف بخشی از آب حائز اهمیت خواهد بود. اما همان طور که انتظار می رود، جذب آب توسط ریشه را نمی توان همواره یکسان در نظر گرفت. مقدار جذب با توجه به عمر گیاه و گردش شبانه روز متغیر می باشد. بنابراین در این قسمت معادلات به دست آمده مربوط به رشد ریشه و پخش آن مورد نظر قرار خواهد گرفت. بدین منظور گیاهی مانند گیاه پنبه که اطلاعات آن در مراجع مختلف موجود است و با دخیل نمودن ضرایب لازم در معادلات پیوستگی، مورد توجه قرار می گیرد (۴).

در ادامه، معادله موازنه جرم برای آلاینده نوشته شده و با استفاده از نتایج به دست آمده در بخش پیشین به حل این معادله پرداخته می شود.

همان طور که قبلاً بحث شد، روش های متعددی برای کاهش میزان آلاینده ها در خاک توسط ریشه گیاهان موجود است. با توجه به این نکته که هدف مقاله حاضر بررسی خاک هایی است که با انواع هیدروکربن ها آلوده شده اند، در هنگام نوشتن معادله موازنه جرم در قسمت سوم سعی خواهد شد تمامی روش هایی که در طی فرایند موجب کاستن از غلظت هیدروکربن ها می شود، مورد نظر قرار گیرد. با اعمال تغییرات در پارامترهای تجربی و نیز با در نظر گرفتن سایر ساز و کار های مشروح، می توان معادلات را برای سایر مواد آلاینده، مانند فلزات و انواع سموم نیز مورد استفاده قرار داد (۵).

حال معادله (۴-۲) را با توجه به رابطه فوق بازنویسی

می‌نماییم:

$$C \frac{\partial h_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_w \left( \frac{\partial h_w}{\partial z} - 1 \right) \right] - S_w \quad (۴-۴)$$

فرض می‌کنیم  $\theta_w$  و  $K_w$  که از خصوصیات خاک

هستند مطابق روابط Vachaud<sup>۳</sup> نوشته شوند:

$$K_w = K_{ws} \frac{a}{A + |h_w|^b} \quad (۵-۴)$$

$$\theta_w = \frac{\alpha(\theta_{ws} - \theta_{wr})}{\alpha + |h_w|^\beta} + \theta_{wr} \quad (۶-۴)$$

در روط فوق زیرنویس  $S$  به مفهوم حالت اشباع،

زیرنویس  $r$  به معنای باقی مانده و  $a$ ،  $b$ ،  $\alpha$ ،  $\beta$  پارامترهای

هندسی هستند که از منابع برای انواع خاک در دسترس می-

باشند.

در مبحث جذب آب توسط ریشه مقاومت در برابر

انتقال آب و نیروی محرکه سیستم با سن ریشه، نوع و شکل

ریشه، نوع خاک و میزان آب موجود در خاک ارتباط دارد. به

منظور مدل نمودن این پدیده معمولاً میزان آب جذب شده بر

واحد طول ریشه در نظر گرفته می‌شود. در بسیاری مدل ها این

مقدار برای مقادیر رطوبت بیش از میزان بحرانی، ثابت و برای

کمتر از میزان بحرانی تابعی خطی از میزان رطوبت خاک در

نظر گرفته می‌شود. میزان بحرانی رطوبت عبارت است از حجم

آب به حجم خاک در نقطه‌ای که مکانیزم جذب آب توسط

ریشه تغییر می‌نماید. این مقدار در حدود  $0.22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$

اندازه گیری شده است (۸).

تحقیقات نشان می‌دهد که آب جذب شده به وسیله

ریشه در شب و روز متغیر بوده و حالت نوسانی در طول ۲۴

ساعت شبانه روز مشاهده می‌گردد. می‌توان میزان جذب آب را

در شبانه روز مطابق تابعی سینوسی فرض نمود. در این حالت

فرض می‌شود میزان جذب آب با فرارسیدن شب به تدریج

### معادله پیوستگی

تقریباً تمامی مدل هایی که تاکنون ارائه شده‌اند،

حرکت آب را با معادله Darcy-Richards<sup>۱</sup> بررسی می-

نمایند. در این معادله ترم جذب آب به طرق مختلف بحث می-

گردد. جذب آب توسط ریشه با توجه به زمان و نیز عمق ریشه

متغیر می‌باشد. در این بررسی فرض می‌کنیم فقط آب حرکت

می‌کند و حرکت گاز موجود در لابلای ذرات خاک قابل اغماض

است. ضمناً ساختار خاک را ثابت و بدون قابلیت به هم فشرده

شدن و تغییر در نفوذپذیری آن در نظر می‌گیریم. با فرضیات

یاد شده معادله پیوستگی به صورت ذیل به دست می‌آید (۶):

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = -\nabla q_w - S_w \quad (۱-۴)$$

در معادله فوق حجم آب موجود در خاک بر حسب

حجم خاک می‌باشد.  $q_w$  شار حرکت آب است که به سرعت

Darcy<sup>۲</sup> معروف می‌باشد.  $S_w$  در معادله فوق بیانگر جذب آب

توسط ریشه است.

اگر معادله فوق را برای حالتی در نظر بگیریم که جریان

فقط در جهت عمودی  $Z$  موجود است، معادله به شکل ذیل

نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_w \left( \frac{\partial h_w}{\partial z} - 1 \right) \right] + S_w = 0 \quad (۲-۴)$$

در این معادله  $h_w$  هد فشاری آب در خاک است که

به  $\theta_w$  وابسته می‌باشد.  $t$  زمان،  $Z$  عمق خاک و  $K_w$  ضریبی تابع

نوع خاک می‌باشد. وجه تمایز معادلات مختلف در واقع ترم

جذب آب در آن معادله خواهد بود. در اینجا به منظور حل

معادله لازم است به نوعی رابطه میان  $\theta_w$  و  $K_w$  مشخص باشد.

در اینجا می‌توان از پارامتر  $C$  استفاده نمود. مطابق تعریف  $C$  یا

ظرفیت نگه داری آب عبارت است از (۷):

$$C = \frac{\partial \theta_w}{\partial h_w} \quad (۳-۴)$$

1- Darcy-Richards Equation

2- Darcy Velocity

3-Vachaud

$$\frac{dP(z)}{dz} = e^{-fz+c} \quad (10-4)$$

در رابطه فوق  $P$  بیانگر کسری از ریشه است که از سطح تا عمق  $z$  را در بر می‌گیرد. مقادیر  $f$  و  $c$  ثوابتی هستند که در ادامه خواهیم دید تابع زمان رشد گیاه یا عمر آن می‌باشند. به منظور به دست آوردن  $P$  لازم است که از رابطه فوق در فاصله صفر تا  $z$  انتگرال گیری گردد. بنابراین خواهیم داشت:

$$P(z) = \int_0^z dP = \int_0^z e^{-fz+c} dz = \frac{e^c}{f} (1 - e^{-fz}) \quad (11-4)$$

در هر زمان حداکثر عمق ریشه را  $z_m$  تعریف نموده و با توجه به تعریف  $P$  می‌دانیم  $P(z_m) = I$  بنابر این خواهیم داشت:

$$e^c = \frac{f}{(1 - e^{-fz_m})} \quad (12-4)$$

با توجه به معادله ۱۱-۴ داریم:

$$\frac{dP(z)}{dz} = \frac{fe^{-fz}}{(1 - e^{-fz_m})} \quad (13-4)$$

با فرض آن که پخش ریشه در تمامی نقاط خاک یکسان می‌باشد، طول ریشه  $L$  در حجم کوچکی از خاک  $dV = Adz$  را می‌توان به صورت ذیل نوشت:

$$\begin{aligned} L &= L_d Adz \\ &= L_T [P(z+dz) - P(z)] \end{aligned} \quad (14-4)$$

عبارت فوق بیان می‌دارد که کل طول ریشه  $L_T$  (در زمانی که  $z_m$  حداکثر عمق ریشه است) ضرب در کسری از ریشه که در فاصله  $dz$  است، برابر با تراکم ریشه (طول ریشه بر واحد حجم خاک) ضربدر حجم آن بخش می‌باشد.  $A$  بیانگر مساحت ریشه در عمق  $z$  است. حال با یک جا به جایی خواهیم داشت:

$$L_d = \frac{L_T}{A} \cdot \frac{dP(z)}{dz} \quad (15-4)$$

با توجه به رابطه ۱۴-۴ و رابطه فوق می‌توان نوشت:

کاهش یافته و در نیمه شب به صفر می‌رسد. رابطه ذیل بدین منظور قابل اعمال خواهد بود (۹):

$$q = \frac{q_{max}}{2} [1 + \cos(2\pi t)] \quad (7-4)$$

در رابطه فوق  $q$  نمایانگر حجم آب جذب شده بر واحد طول ریشه بر واحد زمان می‌باشد.  $q_{max}$  نیز حداکثر این مقدار در طول شبانه روز است. مقدار میانگین حجم آب جذب شده را با  $q_{av}$  نشان داده می‌شود و با انتگرالگیری از رابطه فوق در طول شبانه روز به صورت ذیل به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} q_{av} &= \int_0^1 q dt \\ &= \int_0^1 \frac{q_{max}}{2} [1 + \cos(2\pi t)] dt \\ &= \frac{q_{max}}{2} \end{aligned} \quad (8-4)$$

در اینجا لازم است مفهوم تراکم ریشه معرفی گردد. تراکم ریشه  $L_d$  عبارت است از طول ریشه بر واحد حجم خاک. حال می‌توان با توجه به مفاهیم یاد شده میزان جذب آب را در معادله (۴-۴) مطابق ذیل بیان نمود:

$$\begin{aligned} S_w &= L_d \cdot q_{av} \\ &= \frac{q_{max}}{2} \cdot L_d \end{aligned} \quad (9-4)$$

در معادله فوق میزان حداکثر آب جذب شده بر واحد حجم ریشه بر واحد زمان  $q_{max}$  از منابع برای گیاهان مختلف در دسترس می‌باشد. بحث مهمتر تراکم ریشه یا  $L_d$  می‌باشد که در ادامه بدان خواهیم پرداخت (۱۰).

تراکم ریشه یا  $L_d$  که معمولاً به منظور شناسایی مدل پخش ریشه به کار می‌رود، با افزایش عمق تغییر می‌نماید. همان طور که در قسمت قبل نیز اشاره گردید، تراکم ریشه عبارتست از طول ریشه بر واحد حجم خاک. Gerwitz و Page<sup>۱</sup> دریافتند که تحت شرایط آبیاری مناسب و در خاک یکدست، مقدار ریشه یک گیاه با عمق به صورت یک تابع توانی کاهش می‌یابد. این تابع را به صورت ذیل می‌توان تعریف نمود (۱۱):

با توجه به این بخش، عبارات لازم به منظور به دست آوردن  $S_w$  را با توجه به معادله (۴-۹) در اختیار داریم.

### معادله انتقال جرم

در این بخش، همان طور که پیش تر نیز اشاره شد، موازنه جرم را برای هیدروکربن آلوده کننده نوشته و عوامل مختلف آن را مورد بحث و بررسی قرار خواهیم داد. بدین منظور از غلظت هیدروکربن در فاز آبی استفاده خواهیم نمود.

همان گونه که در بخش پیشین نیز در نظر گرفتیم، از محورهای مختصات دکارتی که مبدا آن در نقطه اتصال گیاه به زمین است، استفاده خواهیم نمود. معادله انتقال جرم مجدداً تنها در راستای  $z$  نوشته شده و حرکت یک بعدی برای هیدروکربن در جهت عمود به زمین در نظر گرفته می شود. علت این امر آن است که آب به عنوان منتقل کننده هیدروکربن در نظر گرفته شده و همان گونه که در بخش های پیشین نیز بحث گردید، آب ثقیلی عامل اصلی انتقال در این زمینه می باشد. شایان ذکر است در مساله مورد بررسی، غلظت هیدروکربن مورد نظر در زمان صفر دارای پروفیل غلظت ثابتی می باشد که تنها تابع عمق  $z$  خواهد بود.

در اکثر مدل های ارایه شده، انتقال هیدروکربن در خاک به صورت عمودی و همراه با آب، به صورت ذیل در نظر گرفته شده است:

$$\frac{\partial \theta_w C_w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[ q_w C_w - D_H \frac{\theta_w \partial C_w}{\partial z} \right] - S_s \quad (1-5)$$

در معادله فوق  $C_w$  بیانگر غلظت هیدروکربن در فاز آبی می باشد.  $D_H$  ثابت انتشار<sup>۲</sup> و  $S_s$  که از موارد اصلی بحث خواهد بود، بیانگر مقدار کاهش کلی هیدروکربن در فاز آبی می باشد. مقادیر  $\theta_w$  و  $q_w$  از حل معادله ۴-۴ در قسمت پیشین به دست آمده اند. در این بخش سازو کار های کاهش هیدروکربن مورد نظر به قرار ذیل خواهند بود (۱۳):

الف- جذب در ماتریس خاک و سطح ریشه

ب- جذب درون ریشه

$$L_d = L_{md} e^{-fz} \quad (16-4)$$

که در عبارت فوق:

$$L_{md} = \frac{L_T f}{A(1 - e^{-fz_m})}$$

با توجه به مباحث یاد شده، ملاحظه می گردد که همان طور که پیش بینی می شد، مدل پخش ریشه به صورت تابع توانی به دست می آید. با دقت در رابطه نهایی به دست آمده مشخص می گردد که برای حل عددی معادله نیاز به  $L_{md}$  و  $f$  خواهیم داشت. این مقادیر می توانند هم به صورت تجربی (Page و Gerwitz در سال ۱۹۷۶) محاسبه شوند و هم از روابط ریاضی که توسط Borg و Grimes<sup>۱</sup> در این رابطه ارایه شده است، تعیین گردند. ایندو در سال ۱۹۸۶ دریافتند که افزایش عمق ریشه  $z_m$  در طول عمر یک گیاه را می توان با یک تابع سینوسی نمایش داد (۱۲):

$$z_m = z_T \{0.5 + 0.5 \sin[3.03 \cdot (t/t_T) - 1.47]\} \quad (17-4)$$

در رابطه فوق  $t_T$  عمر گیاه یا زمان رسیدن گیاه به حداکثر رشد خود می باشد و  $z_T$  بیانگر حداکثر عمق ریشه در زمان رشد گیاه  $t_T$  خواهد بود. طبق یافته های Gerwitz و Page روابط مشابهی برای  $L_{md}$  و  $1/f$  موجود است. این روابط به صورت ذیل معرفی می گردند:

$$1/f = (1/f)_T \{0.5 + 0.5 \sin[3.03(t/t_T) - 1.47]\} \quad (18-4)$$

$$L_{md} = L_{Td} \{0.5 + 0.5 \sin[3.03(t/t_T) - 1.47]\} \quad (19-4)$$

در روابط فوق باید در نظر داشت که واحد عبارت داخل پرانتز سینوس رادیان بوده و در  $t=t_T$  عبارت داخل کروشه برابر واحد و در نتیجه  $L_{Td}$  و  $(1/f)_T$  ماکزیمم  $L_{md}$  و  $1/f$  خواهند بود. مقادیر  $L_{Td}$  و  $(1/f)_T$  برای گیاهان مختلف توسط Borg و Grimes به دست آمده و همچنین مقدار  $t_T$  در منابع برای انواع گیاهان مورد استفاده در فرآیند گیاه خاک درمانی موجود است.

$$S_{rd} = \frac{\partial \sigma_r C_r}{\partial t} \quad (5-5)$$

در رابطه فوق  $C_r$  غلظت ماده آلی مورد نظر می‌باشد که بر روی سطح ریشه جذب می‌گردد،  $\sigma_r$  حجم ریشه است که با استفاده از شعاع ریشه و تراکم ریشه  $L_d$  به صورت ذیل تعریف می‌گردد:

$$\sigma_r = \pi r_r^2 L_d \quad (6-5)$$

برای غلظت های کم آلودگی، رابطه‌ای خطی میان غلظت سطح ریشه و غلظت کل وجود خواهد داشت. این نکته را Briggs<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۲ به صورت ذیل بیان نمود:

$$C_r = R_{cf} C_w \quad (7-5)$$

که در رابطه فوق  $R_{cf}$  بیانگر عامل غلظت در ریشه گیاه بوده و مطابق رابطه ذیل به دست خواهد آمد:

$$R_{cf} = 0.82 + 10^{(0.77 \log K_{ow} - 1.52)} \quad (8-5)$$

در رابطه یاد شده  $K_{ow}$  مقداری ثابت و بسته به خصوصیت ماده آلی خواهد داشت.

### ب- جذب درون ریشه

Briggs در سال ۱۹۸۳ نشان داد که فرآیند دیگری که منجر به انتقال هیدروکربن ها از خاک به ریشه می‌گردد، فرآیند جذب توسط ریشه‌ها می‌باشد. این رابطه به وسیله‌ای که آنرا با  $T_{scf}$  نشان می‌دهیم، تعریف می‌گردد:

$$C_{is} = T_{scf} C_w \quad (9-5)$$

در رابطه فوق  $C_{is}$  بیانگر غلظت هیدروکربن درون ساقه گیاه می‌باشد. مقدار  $T_{scf}$  مستقل از مقدار غلظت در محیط خاک بوده و معمولاً کمتر از واحد است. رابطه‌ای میان  $K_{ow}$  و  $T_{scf}$  وجود دارد که در سال ۱۹۸۲ به شرح ذیل منتشر گردید:

$$T_{scf} = 0.784 \exp \left[ \frac{-(\log K_{ow} - 1.78)^2}{2.44} \right] \quad (10-5)$$

ج- تجزیه بیولوژیکی در خاک و ریشه  
بنابراین خواهیم داشت:

$$S_s = S_{sd} + S_{rd} + S_{ru} + S_{sb} + S_{rb} \quad (2-5)$$

در رابطه فوق،  $S_{sd}$  میزان انتقال هیدروکربن به درون ماتریس خاک،  $S_{rd}$  میزان انتقال هیدروکربن به سطح ریشه،  $S_{ru}$  مقدار جذب هیدروکربن در ریشه،  $S_{sb}$  مقدار تجزیه هیدروکربن در خاک و  $S_{rb}$  میزان تجزیه هیدروکربن در ریشه می‌باشد. حال به تشریح هریک از این عبارات خواهیم پرداخت:

### الف- جذب در ماتریس خاک و سطح ریشه

جذب هیدروکربن از فاز آبی به سطح جامد ماتریس خاک عبارتست از:

$$S_{sd} = \frac{\partial}{\partial t} [\rho_s (1-n) C_{sd}] \quad (3-5)$$

که در رابطه فوق  $\rho_s$  تراکم ماتریس جامد،  $n$  میزان تخلخل خاک و  $C_{sd}$  میزان جرم هیدروکربن جذب شده بر واحد جرم خاک می‌باشد. همان طور که در بخش های قبل نیز اشاره گردید، فرض بر این است که میزان آلودگی اندک باشد. در نتیجه با توجه به مقاله ارایه شده در سال ۱۹۹۰ توسط domniko و schoartze می‌توان ایزوترم خطی برای  $C_{sd}$  به ترتیب زیر در نظر گرفت (۱۴):

$$C_{sd} = K_d C_w \quad (4-5)$$

که در رابطه فوق  $K_d$  ضریبی ثابت برای تابع غلظت هیدروکربن می‌باشد.

به منظور به دست آوردن میزان جذب هیدروکربن بر روی سطح ریشه، می‌توان مواد آلی را در آب به صورت قطعات مجزا در نظر گرفت. بنا به نظریه Bell<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۰ عامل اصلی در این خصوصیت آب‌گریزی هیدروکربن عامل اصلی شناخته شده است. طبق همین تحقیقات، می‌توان جذب در سطح ریشه را به صورت ذیل بیان نمود:

مونود بررسی شده و نتایج قابل قبولی نیز حاصل شده است. (۱۷)

اکثر باکتری های تجزیه کننده مواد آلاینده در خاک تمایل به چسبیدن بر روی سطوح جامد و تشکیل بیوفیلم را دارا می باشند. به طور کلی، سوپسترا می تواند با هر مقدار از آب موجود در خاک به درون بیوفیلم نفوذ نماید. بنابراین می توان غلظت مواد آلاینده درون بیوفیلم را با غلظت کلی آلاینده در محیط برابر در نظر گرفت. می توان بدین منظور مدل مونود را به ترتیب ذیل به کار برد:

$$S_{sb} = \frac{k_b X_b C_w}{K_{bs} + C_w} \quad (12-5)$$

در رابطه فوق  $k_b$  ماکزیمم میزان استفاده از سوپسترا در خاک می باشد و  $K_{bs}$  برابر با نصف غلظت اشباع در خاک در نظر گرفته می شود.  $X_b$  غلظت میکروبی در خاک است.

فضای بین ریشه ها به علت وجود ریشه ها، خصوصیات متفاوتی نسبت به خاکی که در آن ریشه های وجود ندارد نشان می دهد. این فضا اصطلاحاً ریزوسفیر<sup>۲</sup> یا محدوده ریشه نامیده می شود. در این بخش جمعیت میکروارگانیسم ها ۵۰ تا ۱۰۰ برابر بیشتر از خاک بدون حضور ریشه گیاه می باشد. اگر لایه بیومس به اندازه کافی ضخیم گردد، مقاومت در برابر انتقال جرم به وجود خواهد آمد. در این مورد، می توان معادله ای در حالت پایا و در مختصات استوانه ای به ترتیب ذیل نوشت:

(۱۳-۵)

$$D_f \left( \frac{\partial^2 C_f}{\partial r^2} + \frac{\partial C_f}{r \partial r} \right) = \frac{k_f X_f C_f}{K_{fs} + C_f} \quad r_r \leq r \leq r_r + L_f$$

در معادله فوق،  $D_f$  ثابت نفوذ جرمی در بیوفیلم،  $C_f$  غلظت هیدروکربن در بیوفیلم،  $\Gamma$  شعاع لایه،  $k_f$  و  $K_{fs}$  ثوابت معادله مونود،  $X_f$  غلظت میکروبی در بیوفیلم،  $L_f$  ضخامت بیوفیلم و  $r_r$  شعاع ریشه است. معادله فوق با شرایط مرزی ذیل حل شده است:

$$r = r_r + L_f \quad C_f = C_{rf}$$

رابطه فوق مخصوصاً برای موادی با قطبیت متوسط صحیح می باشد. میزان جذب آب طبق رابطه ای خطی به شرح ذیل منطقی به نظر می رسد:

$$S_{rw} = C_{ts} S_w \quad (11-5)$$

مدل های Briggs با وجود آن که نسبتاً ساده هستند، ولی صحت آن ها برای اکثر گیاهان و آلاینده ها آزمایش و تایید شده می باشد. خصوصاً در سال های اخیر از روابط یاد شده در مقالاتی که در این زمینه منتشر می شود، استفاده شده است (۱۵).

### ج- تجزیه بیولوژیکی در خاک و ریشه

درصد زیادی از میکروارگانیسم های تجزیه کننده آلاینده ها شامل باکتری ها می شود. باکتری ها ممکن است در خاک موجود باشند و یا به طور مصنوعی بدان اضافه گردند. باکتری ها عموماً در عمق یک تا دو متری سطح وجود دارند که وجود و یا رشدشان وابسته به وجود گیاهان می باشد. جمعیت میکروبی با افزایش عمق کاهش یافته و معمولاً بین  $10^6$  و  $10^7$  سلول باکتری در هر گرم خاک خشک طبیعی موجود است. تجزیه مواد به طور کلی به دو صورت توسط میکروارگانیسم ها صورت می گیرد:

الف- کومتابولیسم: تجزیه بیولوژیکی کومتابولیت به وسیله آنزیم هایی که توسط میکروارگانیسم جهت تجزیه سوپسترا تولید می گردد.

ب- استفاده ثانویه<sup>۱</sup>: بدان مفهوم که متابولیسم یک ماده در حضور دیگر سوپستراهایی که وجودشان برای میکروارگانیسم ضروری می باشد، صورت گیرد. (۱۶)

استفاده از ترکیب شیمیایی، چه از راه کومتابولیسم و چه استفاده ثانویه موجب بالا رفتن رشد بیومس خواهد گردید. کینتیک تجزیه هیدروکربن های موجود در خاک مخصوصاً در غلظت های پایین، توسط مدل مونود یا مدل های تغییر یافته



خاک را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. هیدروکربن به آهستگی به همراه آب به سمت عمق بیشتر کشیده شده و ضمناً ریشه‌های گیاه پنبه آنرا مطابق مکانیزم هایی که پیشتر بحث گردید، جذب می‌نماید. همچنین کل عمق ها در ابتدا همان رطوبت  $0.25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  را دارا هستند.

خطوط ترسیمی منحنی‌های به دست آمده از آن جهت ناشی شده‌اند که اکثر جرم هیدروکربن در ماتریس خاک جذب شده‌است و بین غلظت های هیدروکربن درون ماتریس خاک و آب یک رابطه خطی فرض شده است.

شرایط مرزی لازم با توجه به صورت مسئله ای که مطرح گردید شامل عبارات ذیل خواهد بود:

$$C_w(0, z) = C_0(z)$$

$$C_w(t, 0) = 0$$

$$\frac{\partial C_w(t, L)}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \theta_w(t, L)}{\partial z} = 0$$

$$\theta_w(0, z) = 0.25$$

$$\theta_w(t, 0) = 0.25$$

شرط مرزی اول نشان می‌دهد که هیدروکربن در زمان اولیه پروفایلی مطابق بحث های قبلی را دارا می‌باشد. با توجه به این نکته که سطح محل در زمان صفر کاملاً پاک سازی شده است، عبارت دوم نوشته می‌شود.  $L$  نمایانگر حداکثر عمق مورد بحث است. شروط سوم و چهارم بیانگر این شرط می‌باشند که شار آب و هیدروکربن در این عمق صفر در نظر گرفته شده است.

همان طور که گفته شد، میزان رطوبت خاک در ابتدا قبل از آغاز شبیه‌سازی ثابت بوده و در تمام طول مدت شبیه‌سازی نیز میزان رطوبت سطح با آبیاری منظم ثابت نگه داری می‌شود. این شروط نیز با عبارات پنجم و ششم در شرایط مرزی یاد شده، بیان شده‌اند.

$$r = r_r \quad \frac{\partial C_f}{\partial r} = 0$$

در عبارت فوق  $C_{Lf}$  غلظت سوپسترا در سطح مرزی میان بایوفیلم و فاز آبی می‌باشد. در نتیجه خواهیم داشت:

$$J_f = \int_{r_r}^{r_r+L_f} \frac{k_f X_f C_f}{K_{fs} + C_f} d\pi r^2 \quad (14-5)$$

که  $J_f$  فلاکس سوپسترا به بایوفیلم می‌باشد. حال در صورتی که پاسخ حاصل را ضرب در تراکم ریشه نماییم، میزان جذب هیدروکربن در ریشه به دست خواهد آمد:

$$S_{rb} = L_d \cdot J_f \quad (15-5)$$

در بحث حاضر، غلظت سوپسترا در حدی در نظر گرفته شد که میزان غلظت میکروارگانیزم ها در خاک ثابت باقی بماند. همچنین ساز و کار استفاده ثانویه از سوپسترا به علت این که در هر مطالعه موردی، تفاوت خواهد نمود، لحاظ نشده‌است. با در دست داشتن مکانیزم های مذکور برای هر میکروارگانیزم، می‌توان مشابه فوق عمل نموده و ترم مربوط به جذب را به دست آورد.

ضریب ازبین رفتن هیدروکربن با هرکدام از ساز و کار های یاد شده را می‌توان به صورت ذیل در نظر گرفت (۱۶):

$$R_D = 1 + \frac{\rho_s(1-n)K_d}{\theta_w} + \frac{\pi r^2 L_d R_{cf}}{\theta_w} \quad (16-5)$$

#### شرایط مرزی و مقادیر عددی

فرض کنیم مکانی به وسیله آلاینده هیدروکربنی که مشخصات آن در ادامه خواهد آمد، آلوده شده است. آلودگی سطح منطقه را برای چندین روز پوشانیده است. به منظور پاک سازی منطقه، در ابتدا سطح را کاملاً از آلودگی پاک سازی می‌نمایند. سپس از گیاه پنبه برای گیاه‌خاک درمانی منطقه استفاده می‌شود. گیاه در زمین کاشته شده، و طوری آبیاری می‌گردد که رطوبت به طور ثابت در سطح  $0.25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  باقی بماند. سفره آب زیرزمینی به قدری عمیق است که رطوبت

حال با داشتن مقادیر عددی مورد نیاز خواهیم توانست معادله را حل نموده و اثر هریک از متغیرها را بر پروفایل غلظت بررسی نماییم. مقادیر عددی مورد نیاز طبق جداول ۱.۲ و ۳ می‌باشند:

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده برای گیاه (پنبه) در حل معادله

پارامتر	مقدار	واحد	مرجع
$R_r$	۰/۰۵	cm	Nye and Tinker 1997
$L_{Td}$	۳/۰	cmcm <sup>-3</sup>	"
$t_T$	۷۰	day	ماکزیمم مقدار ممکن
$q_{av}$	۰/۰۰۰۲	cm <sup>3</sup> cm <sup>-1</sup> day	Taylor 1992
$1/f_T$	۱۰۰	cm	"

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده برای هیدروکربن در حل معادله

پارامتر	مقدار	واحد	مرجع
$K_d$	۰/۰۰۱	cm <sup>3</sup> mg <sup>-1</sup>	Domenico and Schwartz 1990
$D_H$	۰/۱	cm <sup>2</sup> h <sup>-1</sup>	Bouwer and McCarty 1985
$R_{cf}$	۱۵	-	Bell 1992
$T_{scf}$	۱/۰	-	Taylor and Klepper 1975

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده برای میکروارگانیزم ها در حل معادله

پارامتر	مقدار	واحد	مرجع
$k_b$	۰/۰۲	h <sup>-1</sup>	Semprini and McCarty 1992
$X_b$	۰/۰۰۱	mg cm <sup>-3</sup>	Miller and Donahue 1990
$K_{bs}$	۰/۰۰۰۴	mg cm <sup>-3</sup>	Semprini and McCarty 1992
$k_f$	۰/۰۲	h <sup>-1</sup>	برابر با مقدار در خاک
$K_{fs}$	۰/۰۰۰۴	mg cm <sup>-3</sup>	برابر با مقدار در خاک
$X_f$	۰/۱	mg cm <sup>-3</sup>	Foster 1983
$L_f$	۰/۰۰۲	cm	"
$D_f$	۰/۰۲	cm <sup>2</sup> h <sup>-1</sup>	Bouwer and McCarty 1985

## فرمولاسیون به روش المان های متناهی

به منظور حل معادله ۲-۴ روش کرانک نیکلسون به کار گرفته شد. در این راستا لازم است مقادیر  $i \pm 1/2$  برای نقاط مکانی و  $n \pm 1/2$  برای نقاط زمانی در نظر گرفته شوند. برای پیش بینی  $K_w$  در مکان  $i \pm 1/2$  از روابط ذیل استفاده شده است:

$$K_{i+1/2}^{n+1/2} = \frac{(K_{i+1}^{n+1/2} + K_i^{n+1/2})}{2} \quad (۱-۷)$$

$$K_{i-1/2}^{n+1/2} = \frac{(K_i^{n+1/2} + K_{i-1}^{n+1/2})}{2} \quad (۲-۷)$$

$K_w$  در زمان  $n \pm 1/2$  به وسیله رابطه ذیل مشخص گردید:

$$K_i^{n+1/2} = K_i^n + \frac{\partial K}{\partial t} \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (۳-۷)$$

که در آن:

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \frac{(K_i^n - K_i^{n-1})}{\Delta t} \quad (۴-۷)$$

بنابراین معادله (۳-۷) تبدیل خواهد شد به:

$$K_i^{n+1/2} = \frac{3}{2} K_i^n - \frac{1}{2} K_i^{n-1} \quad (۵-۷)$$

معادله فوق می‌تواند برای  $K_w$  در مکان  $i \pm 1/2$  نوشته شود. حال صورت کرانک نیکلسون معادله ۲-۴ را می‌توان به وسیله روش نیوتن رافسون حل نمود.

### حل مسئله به روش حل عددی

با توجه به موجود بودن اجزای معادله انتقال جرم و با استفاده از معادله پیوستگی و نیز مشخص بودن شرایط مرزی، با داشتن مقادیر عددی پارامترهای معادله به حل آن می‌پردازیم.

در این قسمت نمودارهای حاصل را با تغییر در عوامل مختلف معادله مجدداً ترسیم نموده و به بررسی اثر هر عامل بر روی آن خواهیم پرداخت.

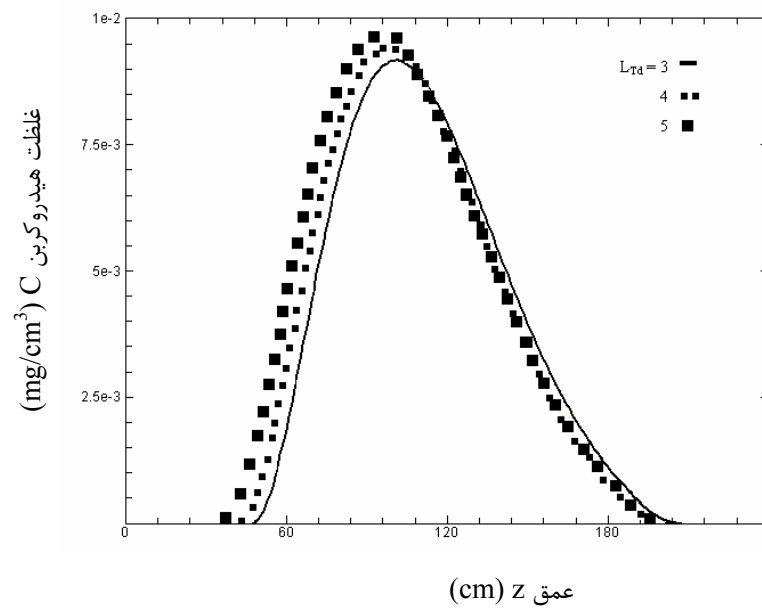
شکل ۱ حساسیت نمودار به عامل  $L_{Td}$  را نشان می‌دهد. وجود طول ریشه بیشتر بر واحد خاک موجب به وجود آمدن مناطق جذب بیشتر و در نتیجه تجمع هیدروکربن در مناطقی که طول ریشه بیشتری موجود است، خواهد گردید. این نمودار به خوبی اثر ریشه را بر انتقال هیدروکربن ها نشان می‌دهد. البته افزایش طول ریشه، کمی بر مساحت جذب تاثیر خواهد داشت و با افزایش آن، تا حدی موجب کاهش غلظت

هیدروکربن آلاینده خواهد گردید ولی با توجه به شکل حاصل، تاثیر تراکم ریشه بر حرکت هیدروکربن ها بیشتر از آن می‌باشد. نمودار ۲- نمایانگر اثر طول عمر یا اصطلاحاً زمان بلوغ گیاه را بر غلظت هیدروکربن نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشخص است که هرچه زمان رسیدن گیاه به بلوغ کمتر باشد، گیاه سریع تر رشد نموده و در نتیجه اثر آن بر روی غلظت سریع تر و محسوس تر خواهد گردید.

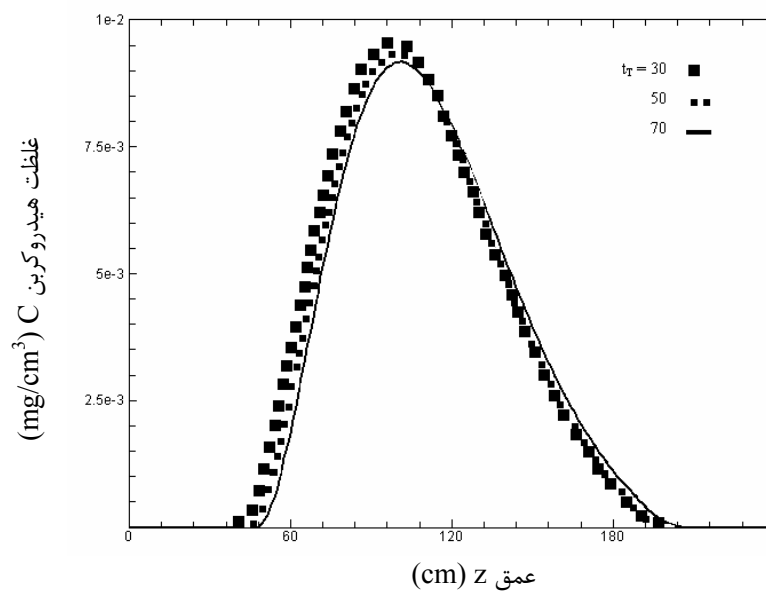
نمودار ۳ اثر شعاع ریشه را بر پروفیل غلظت هیدروکربن نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع ریشه، سطح ریشه جهت جذب بیشتر افزایش خواهد یافت و در نتیجه کاهش غلظت هیدروکربن را در زمان کمتر مشاهده خواهیم نمود.

در مقابل نمودار ۴ اثر نسبتاً کمتر مقادیر فاکتور غلظت هیدروکربن در ریشه گیاه  $R_{cf}$  بر پروفیل غلظت را نشان می‌دهد. هرچه مقدار عددی این عامل بیشتر باشد، جذب در ریشه گیاه بیشتر بوده و در نتیجه اثر ریشه بر پروفیل غلظت مشخص تر خواهد گردید.

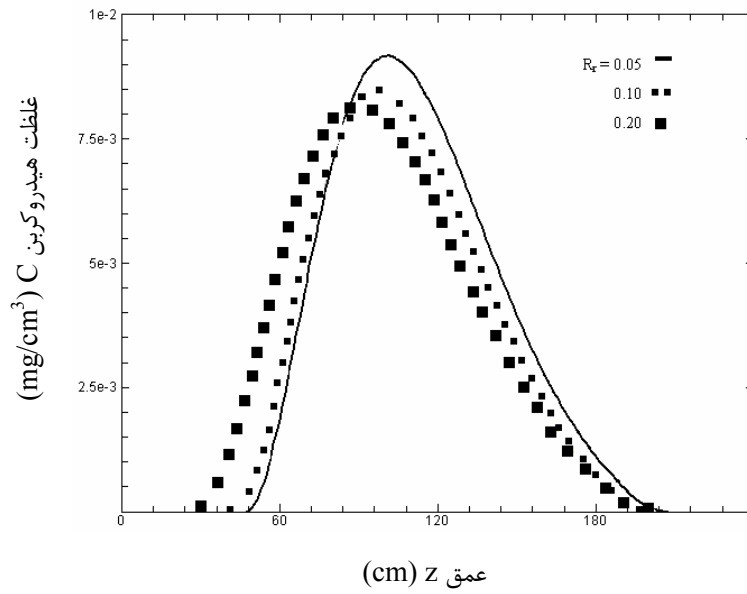
در نمودارهای ۵ الی ۸ تغییرات جمعیت میکروبی  $X_f$  و ضخامت بایوفیلم  $L_f$  لحاظ گردیده‌است. مطابق نمودارهای ۷ و ۸ ملاحظه می‌گردد که با افزایش جمعیت میکروبی و یا ضخامت بایوفیلم، ترم های  $S_{rb}$  و  $S_{sb}$  در معادله ۵-۱ افزایش داشته و در نتیجه میزان کاهش هیدروکربن بیشتر می‌گردد. با توجه به این امر می‌توان اثر افزایش جمعیت میکروبی در محل فرآیند گیاه خاک پالایشی را از نظر کمیت مورد بررسی قرار داد.



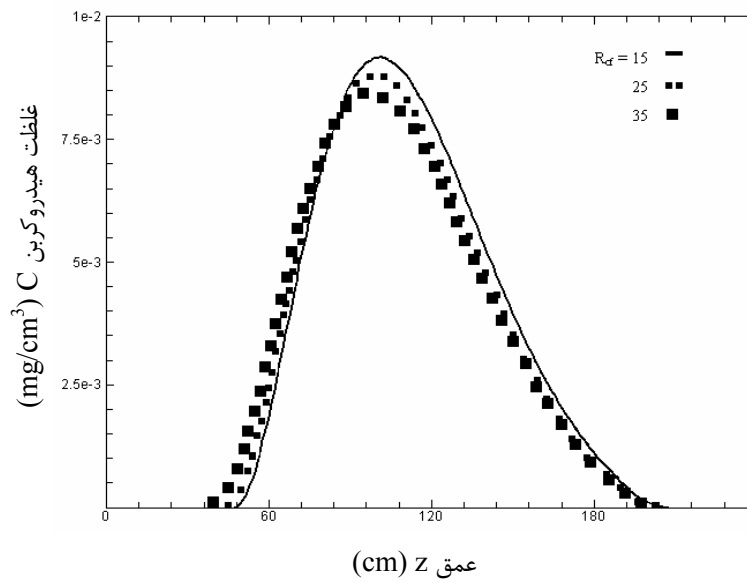
نمودار ۱- اثر  $L_{Td}$  بر نمودار مقدار غلظت هیدروکربن بر حسب عمق



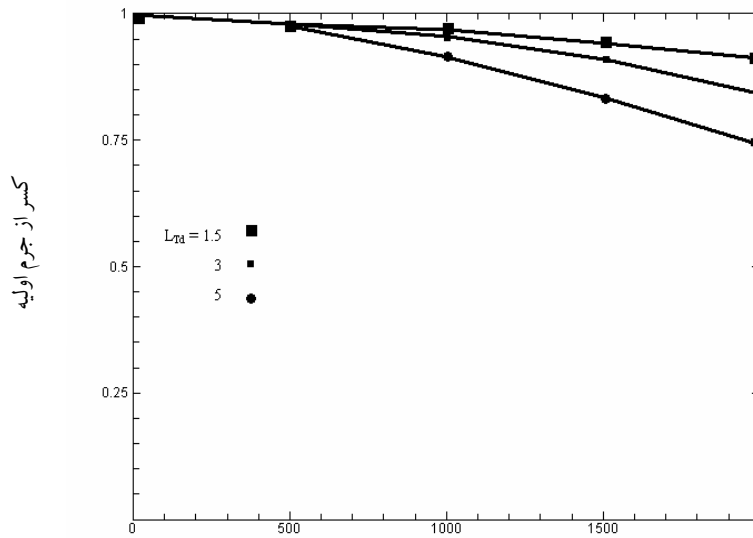
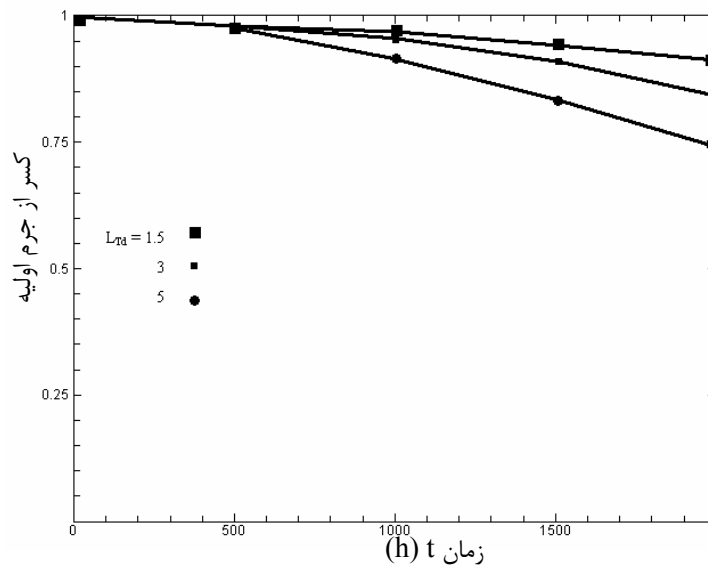
نمودار ۲- اثر  $t_T$  بر نمودار مقدار غلظت هیدروکربن بر حسب عمق

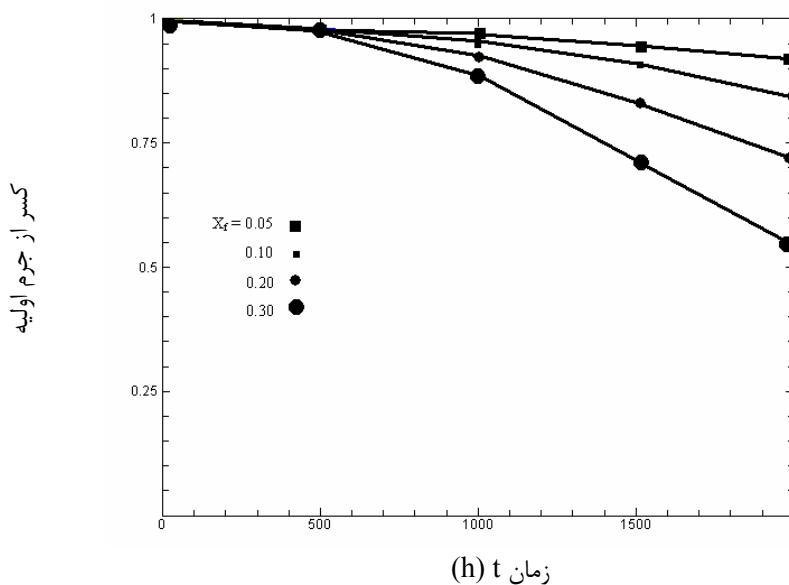
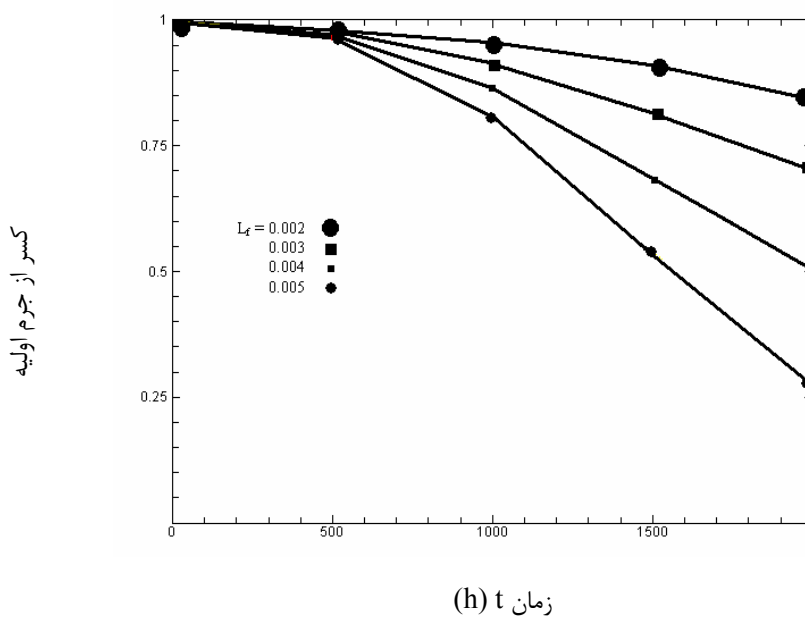


نمودار ۳- اثر  $R_r$  بر نمودار مقدار غلظت هیدروکربن بر حسب عمق



نمودار ۴- اثر  $R_{ef}$  بر نمودار مقدار غلظت هیدروکربن بر حسب عمق

نمودار ۵- اثر  $L_{Td}$  در کاهش کلی مقدار هیدروکربن با توجه به زماننمودار ۶- اثر  $t_T$  در کاهش کلی مقدار هیدروکربن با توجه به زمان

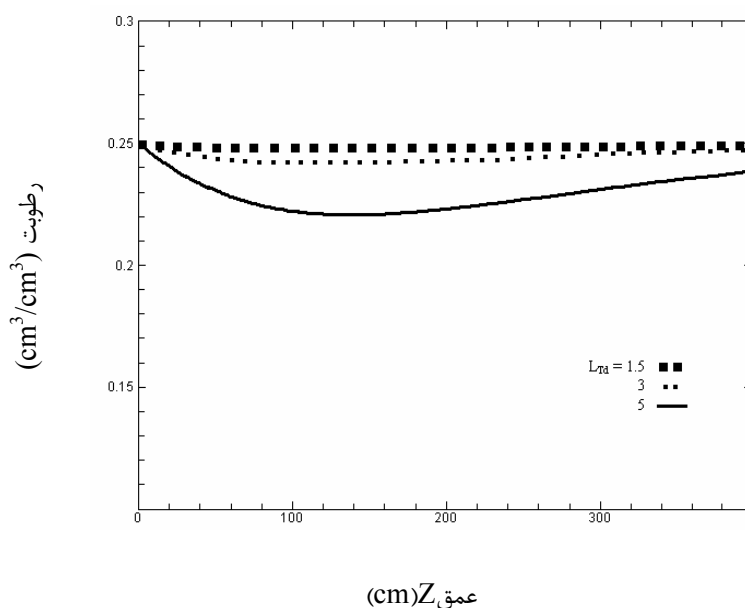
نمودار ۷- اثر  $X_f$  در کاهش کلی مقدار هیدروکربن با توجه به زماننمودار ۸- اثر  $L_f$  در کاهش کلی مقدار هیدروکربن با توجه به زمان

عملی از نمودارهای مربوط، جمعیت میکروبی خاک مجاور ریشه گیاه و نیز ضخامت بایوفیلم مورد دقت و توجه کافی قرار داده شوند.

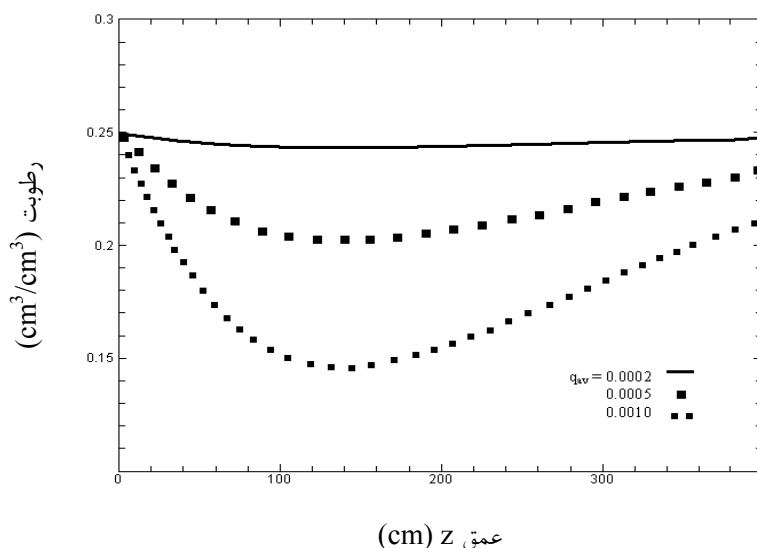
مطابق مراجع موجود مشاهده می‌گردد که محدوده واقعی تغییرات  $X_f$  و  $L_f$  بسیار گسترده بوده و نیز مطابق نمودارهای نشان داده شده، حساسیت تغییرات غلظت هیدروکربن نسبت به این عوامل بسیار زیاد می‌باشد. بنابراین لازم است در استفاده

نکته دیگری که ذکر آن در این قسمت حائز اهمیت می‌باشد آن است که با بررسی دقیق نمودارهای مربوط می‌توان مجدداً برای هر گیاه و تحت هر شرایطی، قانون محاسبه سرانگشتی بر اساس داده‌های عددی و نیز شکل خطی معادله به دست آورد. این قوانین خواهند توانست به طور تقریبی پارامترهای مورد نیاز را در طراحی فرآیند مربوطه تعیین نمایند. البته با دقت در ساز و کارهای مربوطه، محدودیت عمر

گیاه و نیز تغییرات احتمالی در شرایط مرزی مساله و شرایط خاک می‌توان به این نکته پی برد که نمودار خطی مذکور تنها برای محدوده‌ای از زمان صادق است و نمی‌توان آن را برای زمان نامحدود و کاهش غلظت هیدروکربن تا مقادیر نزدیک صفر ادامه داد.



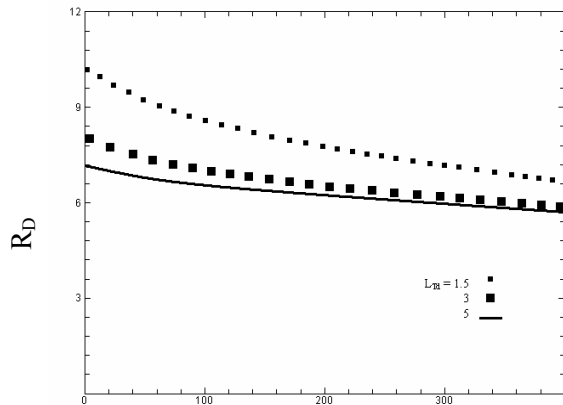
نمودار ۹- اثر تغییرات  $L_{Td}$  بر منحنی تغییرات رطوبت با عمق



نمودار ۱۰- اثر تغییرات  $q_{av}$  بر منحنی تغییرات رطوبت با عمق

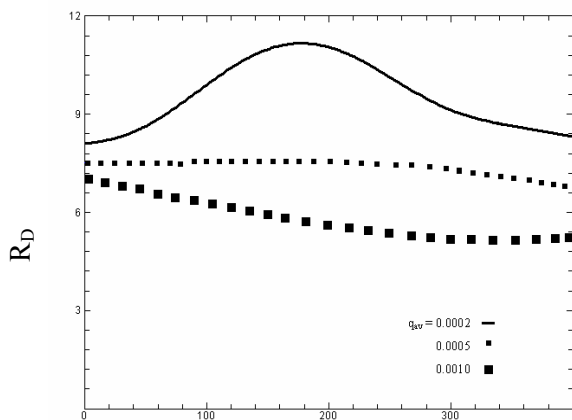


واقع نمودارهای مذکور نمایانگر متوسط شرایط رطوبت و ضریب از بین رفتن کربن خواهند بود.



عمق Z (cm)

نمودار ۱۱- اثر تغییرات  $L_{T28}$  بر منحنی تغییرات ضریب جذب هیدروکربن  $R_D$



عمق Z (cm)

نمودار ۱۲- اثر تغییرات  $q_{av}$  بر منحنی تغییرات ضریب

جذب هیدروکربن  $R_D$

در نمودار ۹ ملاحظه می‌گردد که با افزایش تراکم ریشه، میزان رطوبت در هر نقطه کاهش می‌یابد. علی‌القاعده تاثیر میزان متوسط جذب آب توسط گیاه تاثیر ویژه‌ای بر منحنی رطوبت خاک داشته و به خصوص در جهت تعیین راهبرد آبیاری گیاه باید مورد توجه قرار گیرد. نمودار ۱۰ موید این واقعیت می‌باشد. باید توجه داشت که از آن جا که آب

به منظور بررسی دقیق تر این مقوله نیاز به روابط دقیق خاک در عمق های بیشتر و نیز مقادیر تجربی برای میزان جمعیت واقعی میکروبی و ضخامت بایوفیلم در عمق های بیشتر خواهیم داشت.

با توجه به معادلات موجود، می توان نمودارهای دیگری نیز در این رابطه ترسیم نمود. در این رابطه نمودار رطوبت بر حسب عمق با توجه به شرایط مساله مورد بحث و نیز تغییرات ضریب از بین رفتن هیدروکربن  $R_D$  با توجه به عمق جالب توجه خواهند بود. در این رابطه، تغییر پارامترهای مورد بحث نیز لحاظ شده تا تحلیل نمودارهای حاصل براساس عامل مربوطه امکان پذیر گردد.

به منظور رسم نمودار رطوبت بر حسب عمق، از پاسخ هایی که در بخش ۴ به دست آوردیم و نیز از شرایط مساله مورد نظر در این بخش استفاده خواهیم نمود. پاسخ های عددی معادله ۴-۴ را با توجه به شرایط مرزی مساله که مقدار رطوبت  $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  را در سطح در کلیه زمان ها با توجه به شرایط آبیاری منظم و نیز همین مقدار رطوبت را در زمان صفر برای کل خاک در نظر گرفته و پاسخ ها را با تغییر در  $q_{av}$  و  $L_{T28}$  رسم می‌نماییم. نمای کلی توابع به دست آمده در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند.

بادقت در معادله ۵-۱۶ ملاحظه می شود که رابطه ضریب از بین رفتن هیدروکربن با رطوبت تقریبا عکس یکدیگر بوده، بنابراین در صورتی که فاکتور مذکور را با توجه به عمق رسم نماییم، شکلی تقریبا عکس نمودارهای قبل به دست خواهد آمد. نمودارهای نهایی با توجه به ثوابتی که پیشتر مطرح گردید، برای این مساله مطابق نمودار های ۱۱ و ۱۲ خواهند بود.

یادآور می‌شود که در رسم چهار نمودار اخیر، شرایط پایا مد نظر بوده که با توجه به شرایط مساله و در نظر گرفتن جذب آب توسط ریشه به صورت متوسط  $q_{av}$ ، در نظر گرفتن انتقال آب به این صورت در یک بازه زمانی منطقی می‌باشد. در

متن، نتایج به دست آمده مجدداً توسط برنامه نوشته شده تحت VISIOAL BASIC رسم شد.

به منظور بررسی اثر عوامل مختلف بر نتیجه نهایی معادله، عوامل مختلف یاد شده را در محدوده قابل قبول و منطبق با نتایج تجربی تغییر داده و به رسم و تحلیل منطقی نمودارهای حاصل پرداخته شد. نتیجه نهایی بحث های صورت گرفته منجر به نکات ذیل گردید:

- الف- به دست آوردن یک روش محاسبه سرانگشتی زمان فرآیند با توجه به نوع گیاه، نوع هیدروکربن و نوع خاک محل
- ب- به دست آوردن معیاری عددی جهت انتخاب بهینه گیاه با توجه به عامل زمان رسیدن به بلوغ یا عمر گیاه
- ج- به دست آوردن معیاری عددی جهت تعیین شرایط آبیاری بهینه گیاه مورد استفاده

بحث حاضر می‌تواند به عنوان ملاکی برای تعیین عوامل مورد نیاز تجربی در بررسی فرآیند گیاه پالایی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به نتایج موجود می‌توان آزمایش هایی را طراحی نمود که به دست آوردن نتایج نهایی معادله انتقال جرم منجر شده و نتایج تجربی با مقادیر نظری بدست آمده از روابط ریاضی با دقت بیشتری انطباق داشته باشد.

در نظر گرفتن شرایط مرزی مختلف به همراه انواع گیاهان و شرایط آبیاری، آلودگی و ماده آلوده‌کننده متفاوت و سپس تطابق مقادیر نهایی با مقادیر به دست آمده، کمک شایانی به بهبود معادلات و در نتیجه اصلاحات احتمالی آن ها خواهد گردید. همچنین در نظر گرفتن جزئیات بیشتر در تعیین خصوصیات خاک محل و شرایط دقیق تر برای میکرو ارگانیسم های مورد استفاده از قدم های بعدی در این زمینه می‌باشد.

#### منابع

1. Yoon-Young Chang, M. Yavuz Carapcioglu, Plant-Enhanced Subsurface Bioremediation of Nonvolatile Hydrocarbons, 1998
2. Kijune Sung, M.Yavuz Corapcioglu, M.C. Drew, C.L. Munster, Plant and Environment Interactions: Plant

محیط انتقال هیدروکربن می‌باشد، با کاهش رطوبت خاک، کاهش میزان انتقال در خاک را خواهیم داشت.

با توجه به معادله ۵-۱۶ و نیز نمودارهای فوق، همان طور که گفته شد رابطه‌ای عکس میان ضریب از بین رفتن هیدروکربن و میزان رطوبت خاک وجود دارد. از طرفی همان طور که اشاره گردید، در صورت کاهش رطوبت، علاوه بر آن که خشک شدگی مقطعی برای نقاطی از ریشه به وجود آمده و موجب مرگ آن می‌گردد، انتقال هیدروکربن ها نیز با مشکل مواجه خواهد شد. بنابراین به منظور حفظ تعادل میان این دو لازم است شرایط آبیاری گیاه با توجه به شرایط موجود بهینه گردد. از لحاظ نظری به منظور دستیابی به نقطه بهینه، گیاه باید طوری آبیاری گردد که نقطه بحرانی منحنی رطوبت آن، در نقطه‌ای بیش از حداقل رطوبت مورد نیاز ریشه قرار گیرد.

#### نتیجه گیری

مدل سازی ریاضی فرآیند گیاه پالایی مشابه مدل سازی بسیاری دیگر از پدیده‌ها مستلزم به دست آوردن پاسخ دستگاه معادلات است. بدین ترتیب برای مدل سازی پدیده گیاه پالایی معادله پیوستگی برای یکی از اجزای مورد نظر نوشته شده و سپس با نوشتن معادله موازنه جرم به تحلیل و بررسی پاسخ ها پرداخته می‌شود.

معادله پیوستگی در این فرآیند با توجه به این که آب محیط انتقال اصلی می‌باشد، برای آب در نظر گرفته شده است بزرگترین مشکل مدل های ارایه شده قبلی، عدم در نظر گرفتن طبیعت گیاه، رشد گیاه، نوسانات جذب آب در ساعات مختلف شبانه روز و عدم در نظر گرفتن طول عمر گیاه و توانایی جذب آن در دوره‌های مختلف رشد می‌باشد.

در بررسی حاضر، با در نظر گرفتن عواملی مانند رشد گیاه، میزان جذب آب در ساعات مختلف شبانه روز، تراکم ریشه و زمان رسیدن گیاه به مرحله بلوغ در معادله پیوستگی، معادله نهایی انتقال آب در این فرآیند به دست آمد.

به منظور حل معادلات از برنامه MATLAB استفاده گردید، ولی در جهت تطابق و همگن بودن منحنی‌های کل

11. F.J Moltz, Water Transport in Soil-Root Systems: Transient Analysis, 1986
12. J.B. Passioura, I.R. Cowan. On Solving the Non-Linear Diffusion Equation for the Radial Flow of the Water to Roots. 1988
13. V. Rasiah, G.C. Carlson and R.A. Kohl. Assessment of Functions and Parameter Estimation In Root Water Uptake Simulation. 1992
14. B.E. Rittmann. Evaluation of Steady State Biofilm Kinetics. 1990
15. C.W. Rose, G.F. Byrne and G.K. Hansen. Water Transport from Soil through Plant to Atmosphere: A Lumped-Parameter Model. 1986
16. J.L. Schnoor. Vegetative Remediation of Hazardous Waste Sites. 1993.
3. Steven C. McCutcheon. Phytoremediation: What every good Chemical Engineer should know. University of Georgia, 2003
4. Kijune Sung, Jaisoo Kim, C.L. Munster, M. Yavuz Corapcioglu, Soyoun Park, M.C. Drew, Y.Y. Chang, A simple approach to modeling microbial biomass in the rhizosphere, 2003
5. Yoon-Young Chang, B. Bae, I. Lee, M. Yavuz Carapcioglu, Modeling Plant Aided In-Situ Bioremediation of Soils Contaminated with a Volatile Organic Compound (VOC), 2002
6. Shashi Mathur, Modeling Phytoextraction in Contaminated Soils, 2004
7. Corapciuglu, M.Y, Baehr A.L, A Compositional Multiphase Model for Groundwater Contamination by Petroleum Products, 1992
8. K.C. Jones, Organic Contaminants in the Environment, 1991
9. F. Lafolie, L. Bruckler and F.Tardieu, Modeling Root Water Potential and Soil-Root Water Transport, 1991
10. C. McFarlane, T. Pfleeger, J. Fletcher, Effect Uptake and Disposition of Nitrobenzene in Several Terrestrial Plants, 1990