

## بررسی انتقال ویروس در محیط متخلخل اشباع به کمک مدل Hydrus-1D جهت تعیین حریم چاه

پریسا احمدپور (ewrc@sharif.edu)

دانشجوی کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشگاه صنعتی شریف

سید اویس ترابی (oveis@mehr.sharif.edu)

دانشجوی دکتری آب، دانشگاه صنعتی شریف

مسعود تجریشی (tajrishy@sharif.edu)

استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

### چکیده

منابع آب زیرزمینی که مهمترین منبع تولید آب آشامیدنی هستند، ممکن است از طریق تغذیه مصنوعی با فاضلاب یا آب سطحی، چاههای جاذب، نشت از مخازن سپتیک یا نشت از لوله‌های فاضلاب به میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا آلوده شوند. بنابراین، برای محافظت از منابع آب زیرزمینی باید فاصله مناسبی را بین منبع آلودگی، آب زیرزمینی و چاههای تأمین آب در نظر گرفت. برای اطمینان از تولید آب آشامیدنی سالم، زمان و فاصله سفر مناسبی برای ویروس مورد نیاز است. یکی از راههای مؤثر، ارزیابی اثر عبور از خاک در محاسبه کاهش غلظت میکروارگانیسم‌ها، مدلسازی ریاضی مسئله است. مدل ریاضی انتقال میکروارگانیسم‌ها نظیر باکتری و ویروس در بکارگیری و شناخت فرآیندها مفید خواهد بود. مدل می‌تواند برای تعیین محل چاههای جاذب فاضلاب نسبت به چاههای آب شرب، تعیین محل مخازن سپتیک و تعیین محل دفع لجن در زمینهای کشاورزی بکار رود. دفع فاضلاب در چاههای جاذب، عمده‌ترین نحوه دفع فاضلاب در ایران می‌باشد که حجم سالانه این فاضلابها در ایران در حدود ۳ میلیارد مترمکعب تخمین زده شده است. در این مقاله، میزان کاهش غلظت ویروس در مراحل عبور از چاه جاذب تا آب زیرزمینی و سپس حرکت با جریان آب زیرزمینی به عنوان تابعی از زمان و فاصله سفر به کمک مدل عددی برای انواع گوناگون خاک نفوذپذیر (ماسه، ماسه لومی و لوم ماسه‌ای) با توجه به موقعیت آب زیرزمینی و هندسه آبخوان نمونه مورد بررسی قرار گرفته‌است. پارامترهای ورودی مدل از مطالعات و مقالات قبلی استخراج گردیده و میزان فاصله‌ای که غلظت ویروس به حد مجاز آب شرب می‌رسد، تعیین شده‌است. نتایج مدلسازی نشان می‌دهد که حریم ایمن چاه جاذب در خاکهای ماسه‌ای، ماسه لومی و لوم ماسه‌ای به ترتیب برابر ۲۹، ۱۸ و ۶ متر می‌باشد. مدل مورد استفاده، مدل HYDRUS-1D می‌باشد که حرکت یک بعدی جریان آب، حرارت و آلاینده‌ها را در محیط متخلخل غیراشباع شبیه سازی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ویروس، چاه جاذب فاضلاب، حرکت ویروس در محیط متخلخل، مدلسازی، حریم چاه

### مقدمه

سرانجام میکروارگانیسم‌های فاضلاب در تماس با خاک، یک فاکتور مهم در دفع فاضلاب در زمین می‌باشد. چگونگی حرکت میکروارگانیسم‌ها در آب زیرزمینی، خاک یا روانابهای سطحی، اساساً به بقای آنها در خاک و درجه نگهداری توسط خاک بستگی دارد. انواع گوناگونی از میکروارگانیسم‌ها در فاضلاب موجود می‌باشد. مهمترین میکروارگانیسم‌های مؤثر بر سلامتی اشخاص، ویروسها، تخم انگل ژیاوردا و پروتوزوا می‌باشند [۴]. مشخص شده است که ویروسها قادر به سفر در فاصله‌های قابل ملاحظه‌ای از میان محیط زیرسطحی بسته به اندازه‌اشان، مشخصات جذب و درجه غیرفعال شدنشان هستند [۵]. با این وجود، عبور از خاک، مانع مهمی در برابر انتقال ویروس‌ها است [۶].

اخیراً، میزان مساحت‌های حریم چاه و فیلتراسیون ساحلی بر مبنای زمان سفر آب تعیین می‌شود. به عنوان مثال در آلمان و هلند، زمان سفر ۵۰ تا ۶۰ روز مورد نیاز است [۷ و ۴]. اطلاعات اخیر از ریسک سرایت و مصرف آب شرب، منجر به تعیین ماکزیمم غلظت مجاز میکروارگانیسم‌های بیماری‌زای موجود در آب شرب شده است که بر مبنای ماکزیمم ریسک قابل پذیرش برای سرایت یک نفر در ۱۰۰۰۰ نفر در هر سال و روابط دوز-واکنش میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا می‌باشند [۸]. ماکزیمم غلظت مجاز ویروس،  $10^{-7} \times 1/8$  پلاک ویروس در هر لیتر می‌باشد [۴]. قطعاً این غلظت خیلی کم، مستقیماً قابل اندازه گیری نیست و تنها راه ارزیابی اثر عبور از خاک و محاسبه غلظت ویروس در نقطه برداشت آب از غلظت منبع، مدلسازی ریاضی مسئله است. به دلیل بیماری‌زا بودن ویروس، در مطالعات صحرائی از ویروسهای مدل استفاده می‌شود که ارائه دهنده رفتار انتقال ویروس بوده و مضر نیستند. معمولاً باکتریوفازهای MS2 و PRD1 به دلیل جذب کمتر نسبت به ویروسهای بیماری‌زا و ایجاد بدترین شرایط برای انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹].

مطالعات زیادی در زمینه انتقال ویروس در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است. اما به دلیل پیچیده بودن و هزینه بالای مطالعات صحرائی، تعداد انگشت شماری مطالعه صحرائی در مورد انتقال ویروس انجام شده است. مطالعات انجام شده در زمینه انتقال ویروس را می‌توان به دو دسته آزمایشگاهی و مدلسازی تقسیم بندی نمود که در ادامه به بیان تعدادی از آنها پرداخته می‌شود.

#### • مطالعات آزمایشگاهی

Bitton و همکاران در سال ۱۹۸۳، الگوهای بقا و انتقال poliovirus1 و echovirus1 را در هسته های خاکی دست نخورده که با لجن هضم شده مخلوط شده بود، مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه مشخص شد که کاهش ویروس در طی فصول گرم و خشک سال نسبت به فصول گرم و مرطوب سریعتر است و مشخص شد که درجه همراهی لجن- ویروس به نوع ویروس و نوع لجن بستگی دارد [ ۱۰ ]. Powelson و همکاران در سال ۱۹۹۰، اثر جریان اشباع و غیراشباع را بر بقا و انتقال باکتریوفاز MS2 مقایسه کردند و به نظر رسید که تحت شرایط غیراشباع، غیرفعال شدن و جذب ویروس افزایش یافته است [ ۱۱ ]. Yahya و همکاران در سال ۱۹۹۳، بقای باکتریوفازهای MS2 و PRD1 را در آب زیرزمینی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده شد که PRD1 دارای زمان بقای طولانی تر نسبت به MS2 می‌باشد [ ۱۲ ]. Powelson و Gerba در سال ۱۹۹۴، آزمایشاتی در مقیاس ستون و ناپیوسته ( batch ) برای ارزیابی چگونگی اثر نوع ویروس، نوع خروجی فاضلاب و درجه اشباع خاک بر حذف ویروس انجام دادند، اما متوجه تأثیر قابل ملاحظه‌ای از نوع خروجی بر حذف هر یک از این ویروس‌ها نشدند [ ۱۳ ].

#### • مطالعات مدلسازی

Ouyang و Yates در سال ۱۹۹۲، مدلی برای پیش بینی سرانجام و انتقال ویروس در خاکهای غیراشباع (VIRTUS) (Virus Transport in Unsaturated Soils) توسعه دادند. نتایج پیش بینی شده توسط مدل با داده‌های اندازه گیری شده انتقال ویروس در مطالعات ستون آزمایشگاهی مقایسه شد و به استثنای یک نقطه، در دیگر موارد نتایج بر هم منطبق شدند [ ۱۴ ]. Chrysikopoulos در سال ۱۹۹۶، یک مدل استوکستیک برای انتقال یک بعدی ویروس در محیط متخلخل همگن، اشباع و نیمه محدود توسعه داد. در این مدل، فرآیند جذب ویروس با یک ضریب توزیع استوکستیک وابسته به زمان شرح داده شد و نتایج نشان داد که این ضریب باعث افزایش گسترش غلظت ویروس در فاز مایع می‌شود [ ۱۵ ]. Schijven و همکاران در سال ۱۹۹۹، حذف باکتریوفازهای MS2 و PRD1 را با تغذیه شن ساحلی در یک سایت صحرائی در ساحل کاستریکام هلند مطالعه کردند. برای محاسبات مدلسازی، نسخه اصلاح شده کد کامپیوتری CXTFIT [ ۱۶ ] استفاده شد که بر مبنای حل تحلیلی مدل‌های انتقال متعادل و غیرمتعادل (Kinetic) می‌باشد. محاسبات و آنالیزهای حساسیت نشان دادند که این کد برای شبیه سازی منحنی پیشرفت فازها، کاملاً مناسب نیست [ ۹ ]. Schijven و Simunek در سال ۲۰۰۲، داده های مطالعه انجام شده در سال ۱۹۹۹ را به هدف تحقیق تفاوت‌های میان روشهای مدلسازی یک بعدی و دوبعدی، تفاوت‌های میان مدل‌های جذب سینتیک تک سایتی و دوسایتی و نقش ناهمگنی در خواص خاک توسط کد اصلاح شده Hydrus1D و Hydrus2D مورد تحلیل قرار دادند. مدل دوبعدی و دو سایتی، بهترین برآزش را به داده ها در برداشت [ ۱۷ ]. در این مقاله، به منظور تعیین حریم چاه جاذب فاضلاب، حرکت باکتریوفاز MS2 در طی دو مرحله عبور، شامل حرکت یک بعدی و عمودی از چاه جاذب به آب زیرزمینی و سپس حرکت یک بعدی و افقی با جریان آب زیرزمینی توسط مدل Hydrus1D با استفاده از پارامترهای بدست آمده از مطالعه Schijven و همکاران در سال ۱۹۹۹ شبیه سازی شده و میزان فاصله ای که غلظت ویروس به حد مجاز می‌رسد در سه نوع خاک ماسه، ماسه لومی و لوم ماسه‌ای محاسبه شد. از آنجا که چاه جاذب در خاکهای نفوذپذیر احداث می‌شود، این سه نوع خاک مورد بررسی قرار گرفت.

#### مشخصات ویروسها

ویروسها ذرات خیلی کوچکی هستند که توسط ناتوانی‌اشان به تولید مجدد در بیرون از یک سلول زنده شناسایی می‌شوند. گرچه ویروسها از نظر اندازه متفاوتند ولی اکثراً فوق العاده کوچکتر از باکتریها هستند. قطر ویروس بین ۲۰ تا ۳۰۰ نانومتر می‌باشد [ ۱۵ ]. ویروسها را براساس نوع میزبان به سه دسته حیوانی، باکتریایی (باکتریوفاز) و ویروسهای گیاهی تقسیم می‌کنند. ویروسها عموماً دارای بار منفی بوده و دارای اشکال و ترکیبات شیمیایی متنوع می‌باشند [ ۱۵ ]. بیش از یک صد نوع مختلف ویروس در مدفوع انسانی مشاهده گردیده است. ویروسهای روده ای شامل آنتروویروسها (enteroviruses)، رئوویروسها (reoviruses)، پارو ویروسها (paroviruses) و روتاویروسها

(rotaviruses) می‌باشند. آنترو ویروسها شامل کوکساکسی ویروسها (coxsackieviruses)، اکوویروسها (echoviruses) و پولیویروسها (polioviruses) هستند [۳].

### مدلسازی انتقال ویروسها در طی عبور از خاک

بعد از عبور از فواصل و زمان خاص از میان خاک، ویروسها حذف می‌شوند. حذف ویروس، ناپدید شدن و کاهش ویروس از سیستم است و معمولاً به صورت کاهش لگاریتمی غلظت ویروس،  $\log_{10} (C/C_0)$  بیان می‌شود. مهمترین پروسه‌های مؤثر در حذف ویروس در طی عبور از خاک، جذب و غیرفعال شدن می‌باشند [۵]. Advection و Dispersion هم بر گسترش و رقیق شدن غلظت ویروسها مؤثر هستند. جذب ویروسها به خاک ممکن است به صورت غیربرگشت پذیر (irreversible) یا برگشت پذیر (reversible) مدل شود. در حالت جذب برگشت پذیر، ممکن است سایت‌های جذب، متعادل و یا سینتیک باشند. جذب ویروسها به خاک و همزمان با غیرفعال شدن در اسکیل‌های گوناگونی می‌توانند مطالعه شوند که شامل ستونی، ناپیوسته (batch) و صحرایی می‌باشد. در آزمایشات ناپیوسته، تقریباً همیشه جذب متعادل مطالعه شده و اثر جابجایی (advection) و پخش (dispersion) قابل تحقیق نیست [۴]. در نمونه‌های ستونی، انتقال ویروس به صورت پروسه یک بعدی مدل شده و معمولاً به علت همگونی خاک از اثر پخش صرفنظر می‌شود. علیرغم اینکه در اکثر مطالعات ستونی جذب متعادل در نظر گرفته شده است، بیان شده است که فرایند واقعی جذب سینتیک است [۴]. در مطالعات صحرایی، اثر پخش خیلی مهم است و نشان داده شده که در آبخوانهای ماسه ای، جذب به صورت سینتیک می‌باشد [۹].

حرکت جریان در محیط غیراشباع یکبعدی از شکل اصلاح شده معادله ریچارد تبعیت می‌کند. البته با این فرض که فاز هوا نقش کم‌اهمیتی را در فرآیندهای جریان مایع ایفا می‌کند و در ضمن از جریان سیال ناشی از گرادیان حرارتی نیز صرفنظر شده است [۲۷]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] \quad (1)$$

معادلات حاکم بر انتقال ماده محلول، شامل ترم‌های جابجایی، پخش، غیرفعال شدن و جذب سینتیک برای جریان یک بعدی در محیط غیر اشباع به صورت زیر است [۲۷]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_B}{\theta} \frac{\partial S}{\partial t} = D_l \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \mu_l C - \frac{\rho_B}{\theta} \mu_s S \quad (2)$$

$$\rho_B \frac{\partial S}{\partial t} = k_{att} \theta C - k_{det} \rho_B S - \mu_s \rho_B S \quad (3)$$

که

C، تعداد ویروسهای آزاد در واحد حجم در فاز آب  $[Pfu \ L^{-3}]$ ؛ S، غلظت ویروس جذب شده است که به صورت تعداد ویروسها در واحد جرم خاک  $[Pfu \ M^{-1}]$  بیان می‌شود؛  $\rho_B$ ، دانسیته حجمی خاک اشباع  $[M \ L^{-3}]$ ؛  $\theta$ ، محتوای حجمی رطوبت  $[L^3 L^{-3}]$ ؛  $D_l$  ضریب پخش طولی  $[L^2 T^{-1}]$ ؛ v، سرعت آب منفذی  $[L T^{-1}]$ ؛  $k_{att}$  و  $k_{det}$ ، ضرایب نرخ چسبیدن و جدایش  $[T^{-1}]$ ؛  $\mu_l$ ، ضریب نرخ غیرفعال شدن ویروس آزاد  $[T^{-1}]$ ؛  $\mu_s$ ، ضریب نرخ غیرفعال شدن ویروس جذب شده می‌باشد  $[T^{-1}]$ ؛ و  $\alpha$  عبارتست از زاویه بین جهت جریان و محور قائم.

### فاکتورهای مؤثر بر جذب ویروسها به خاک

اندرکنش ایجاد شده بین ویروسها و ذرات خاکی با مشخصات سطحی‌اشان تعیین می‌شود. اندرکنش‌های ویروس - خاک در طبیعت، الکترواستاتیک و آب‌گریز است. مشخصات سطحی ممکن است با نوع ویروس، نوع خاک، تغییرات pH، پیوند یونی، یونهای چند ظرفیته و مواد آلی تغییر کند [۱۸]. تغییرات این اندرکنشها با تغییر در ضرایب نرخ چسبیدن و جدایش مشخص می‌شود (جدول ۱).

#### • اثر نوع ویروس

رفتار ویروسهای مختلف در اندرکنش آنها با جامدات از اختلافات بار الکتریکی و آب‌گریزی سطح ویروس نتیجه می‌شود [۱۹]. ویروسهای با بار سطحی منفی و آب‌گریزی کم، به عنوان ویروس مدل در بدترین حالت جهت بررسی انتقال انتخاب می‌شوند.

- **اثر نوع خاک**

خاکهای ریز دانه دارای ظرفیت جذب بیشتر نسبت به خاکهای درشت دانه هستند. خاکهای با میزان بالای ذرات سیلت یا رس نسبت به ماسه، ظرفیت حذف بیشتری از ویروس دارند. همچنین خاکهای حاوی قطعاتی با بار مثبت مانند اکسیدهای آهن، آلومنیوم و منگنز به دلیل داشتن بار مثبت در pH طبیعی، ظرفیت حذف بیشتری از ویروس دارند [ ۱۸ ].

- **pH اثر**

در pH بالاتر، افزایش دافعه الکترواستاتیکی باعث کاهش نرخ چسبیدن و افزایش نرخ جداسازی می‌شود [ ۲۰ ]. بنابراین، بسته به pH و بار ویروس و ذرات خاک، جذب تعدادی از ویروسها ممکن است برگشت پذیر و جذب تعدادی برگشت ناپذیر باشد.

- **اثر مواد آلی**

مواد آلی حل شده و یا معلق، تمایل به رقابت با ویروسها برای سایت‌های جذب روی خاک دارند و بنابراین جذب ویروس را کاهش می‌دهند [ ۱۸ ]. از طرف دیگر، مواد آلی جامد، سایت‌های جذب آب گریز را برای ویروسها تأمین می‌کنند و باعث افزایش جذب می‌شوند [ ۲۱ ]. بنابراین، اثرات مواد آلی به ویژه تحت شرایط صحرائی، باعث عدم قطعیت قابل ملاحظه‌ای در پیش بینی حذف ویروس خواهد شد.

- **سرعت جریان آب**

همه مطالعاتی که اثر سرعت نرخ جریان را تحقیق کرده اند، نشان می‌دهند که تحت نرخ جریان بالاتر به علت فرصت کمتر برای جذب، حذف ویروس کاهش می‌یابد [ ۲۲ ].

### **فاکتورهای مؤثر بر غیرفعال شدن ویروس در محیط زیرسطحی**

ویروسها با گذشت زمان توسط غیرفعال شدن، توانایی سرایت به میزبان را از دست می‌دهند. ویروسها به دلیل تخریب پروتئین‌های پوشش و تجزیه پذیری اسیدهای نوکلئیک غیرفعال می‌شوند [ ۱۸ ]. غیرفعال شدن معمولاً به صورت یک فرآیند درجه اول مدل می‌شود. مهمترین فاکتورهای مؤثر بر غیرفعال شدن ویروس، دما، جذب به مواد خاص و خاک، شرایط غیراشباع و فعالیت میکروبی می‌باشند (جدول ۱).

- **دما**

دمای آب زیرزمینی تنها فاکتور خیلی مهم در پیش بینی غیرفعال شدن ویروس می‌باشد [ ۲۲، ۲۳ و ۲۴ ]. نرخ غیرفعال شدن با افزایش دما، افزایش می‌یابد [ ۲۲ و ۲۳ ].

- **اثر فعالیت میکروبی**

ممکن است به دلیل فعالیت میکروبی، غیرفعال شدن ویروسها افزایش یابد [ ۲۴ ]. تعدادی از محققین متوجه شدند که غیرفعال شدن ویروس تحت شرایط استریل نسبت به شرایط غیراستریل کندتر است [ ۲۵ ].

- **اثر شرایط غیر اشباع**

برای مقایسه حذف ویروسها در خاکهای مشابه تحت شرایط اشباع و غیراشباع، اطلاعات زیادی در دسترس نمی‌باشد. تحت شرایط غیراشباع، سهم اثر غیرفعال شدن بر انتقال ویروس، اهمیت بیشتری دارد [ ۴ ]. همچنین در شرایط غیراشباع، به دلیل وجود سطوح جذب آب- هوا، جذب ویروس هم افزایش می‌یابد [ ۴ ].

### **غلظت ویروس در فاضلاب خام**

میزان غلظت انواع ویروس در فاضلاب خاک در کشورهای مختلف، بسته به زمان اندازه گیری و فصول شیوع بیماری متفاوت است. در جدول ۲، غلظت ویروس در فاضلاب خام طبق مراجع گوناگون آمده است.

جدول ۱ - فاکتورهای مؤثر بر حذف ویروس در جریان آب زیرزمینی

حذف ویروس		فاکتور مؤثر	
غیرفعال شدن ویروس	جذب ویروس به خاک		
-	تأثیر مثبت	افزایش بار منفی	نوع ویروس
-	تأثیر مثبت	آب گریزی	
-	تأثیر مثبت	کاهش قطر ذرات	نوع خاک
-	تأثیر مثبت	وجود ترکیبات دارای بار مثبت	
-	تأثیر مثبت	کاهش pH وجود مواد آلی کاهش سرعت جریان آب افزایش دما افزایش فعالیت میکروبی شرایط غیر اشباع	
-	عدم قطعیت		
-	تأثیر مثبت		
تأثیر مثبت	-		
تأثیر مثبت	-		
تأثیر مثبت	-		

جدول ۲ - غلظت ویروسهای Enteric در فاضلاب خام [ ۲۶ ]

مرجع	کشور	میزان ویروس (پلاک در لیتر)
Smith و Irving	استرالیا	۱۵۰-۱۰۷۵۰
Westwood و Sattar	کانادا	۱۰۰۰
Hedstrom و Lund	دانمارک	۴۴۰۰۰
Nielsen و Lydholm	دانمارک	۱۸۰۰
Rao و همکاران	هند	۱۰۰۰-۱۱۵۰۰
Shuval	فلسطین اشغالی	۱۱۱۸۴
Buras	فلسطین اشغالی	۶۰۰۰-۴۹۲۰۰۰
Kott و Vasl	فلسطین اشغالی	۲۳۲۰
Strickland و Malherbe	آفریقای جنوبی	۲۱۰۰۰۰
Sanderson و Kelly	آمریکا	<۲۰-۴۴۰
Mack و همکاران	آمریکا	۵۰۰-۲۷۶۰۰۰
Melnick و Wallis	آمریکا	۷-۱۲۰
England	آمریکا	۸۰-۵۰۳۴۰
Millstein و Kalter	آمریکا	۴۰-۵۸۰
Mellon و Ware	آمریکا	۷۶۰۰۰
Clark و همکاران	آمریکا (نیویورک)	۷۰۰۰
Clup و همکاران	آمریکا	۵۰۰۰
Berg	آمریکای مرکزی	۳۲-۱۰۷

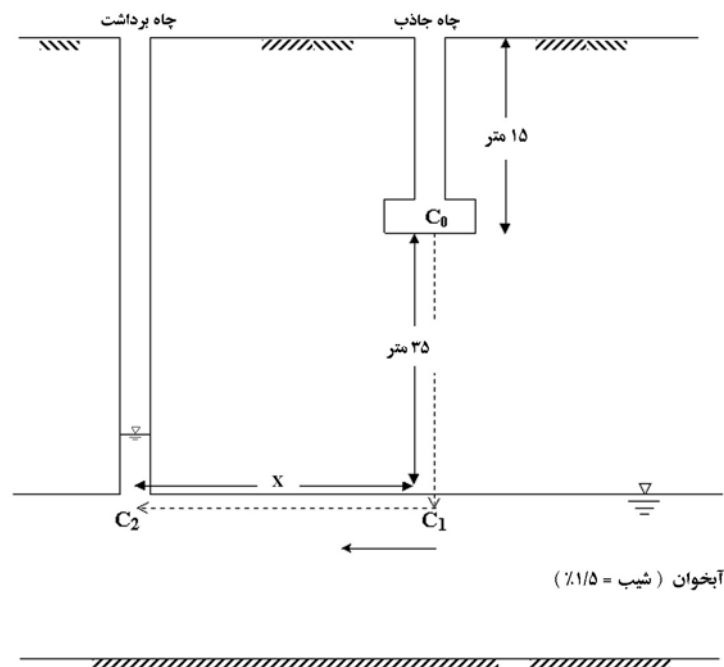
### مدلسازی انتقال ویروس به منظور تعیین حریم چاه

در این مطالعه به منظور تعیین حریم چاههای جاذب، حرکت ویروس از چاه جاذب به آب زیرزمینی و سپس حرکت در آبخوان در دو مرحله بصورت عمودی و افقی مدلسازی شده است. تصویر شماتیک جهت مدلسازی در شکل ۱ نشان داده شده است.

انواع گوناگونی از مدل‌های تحلیل و عددی به منظور بررسی حرکت آلودگی در محیط‌های متخلخل وجود دارد که می‌توان از جمله آنها: Hydrus1D، Hydrus2D، 2dfatmic، CHEMFLOW، Cfitim، N3dade، STANMOD، SWMS-2d، Viralt، CXTFIT، و Canvas را نام برد. با بررسی معادلات حاکم بر انتقال ویروس، مقایسه آنها با معادلات مدل‌های ذکر شده و پارامترهای ورودی آنها و دسترسی به پارامترهای ورودی مدل‌ها با توجه به مطالعات انجام شده، مدل Hydrus1D انتخاب گردید. این مدل، قابلیت مدل‌سازی جذب به صورت متعادل، سینتیک، تک سایتی و دو سایتی را داراست. در ضمن، دارای محیط گرافیکی برای ورود اطلاعات می‌باشد که باعث سهولت کاربرد می‌شود. این مدل، توسط Simunek و همکاران در سال ۱۹۹۸ با همکاری آزمایشگاه بهداشت و وزارت کشاورزی آمریکا (USDA) تهیه گردیده است که حرکت آب، گرما و آلاینده‌ها را در محیط متخلخل یک بعدی و غیراشباع شبیه سازی می‌کند [ ۲۷ ].

### فرضیات و تنظیم پارامترهای ورودی

پارامترهای ورودی مدل شامل پارامترهای حل عددی، پارامترهای ابعادی مسئله، پارامترهای هیدرولیکی خاک موردنظر (ضریب نفوذپذیری، تخلخل، درصد رطوبت اشباع، دانسیته و ...)، پارامترهای جذب و غیرفعال شدن ویروس و شرایط اولیه و شرایط مرزی می‌باشد.



شکل ۱ - تصویر شماتیک موقعیت چاه جاذب نسبت به آبخوان

### • ابعاد مسئله

از آنجا که مدل Hydrus1D قابلیت مدل‌سازی در یک بعد را داراست، در این مطالعه در هر دو مرحله عمودی و افقی، مدل‌سازی به صورت یک بعدی انجام شده است. باتوجه به آمارهای موجود از وضعیت آب زیرزمینی در تهران، عمق متوسط آب زیرزمینی از سطح زمین، ۵۰ متر در نظر گرفته شد و فرض شد که پس از حفر چاه به میزان ۱۵ متر به لایه نفوذپذیر رسیده و انباره چاه در فاصله ۱۵ متری از سطح زمین قرار گرفته است. لذا عمق مفید مدل‌سازی در مرحله اول (عمودی)، ۳۵ متر می‌باشد. البته باتوجه به نتایج مدل‌سازی دیده می‌شود که میزان حذف ویروس در جهت عمودی به دلیل سرعت بالای جریان ناچیز می‌باشد و میزان تغییر این عمق، تأثیر چندانی در تعیین حریم چاه ندارد. چون قسمت اعظم حذف در جهت افقی و با حرکت کند ویروس در آبخوان صورت می‌گیرد [ ۱ ].

در مرحله دوم مدل‌سازی، حرکت ویروس با جریان آب زیرزمینی خواهد بود. تنها عامل حرکت ویروس همراه با آب، شیب آبخوان می‌باشد. باتوجه به آمارهای موجود از وضعیت اعماق آب زیرزمینی در تهران و رسم کنتورهای عمق نسبت به موقعیت جغرافیایی مناطق

گوناگون، شیب آبخوان در تهران، اغلب کمتر از ۱ درصد می‌باشد [ ۱ ]. در جهت اطمینان و از آنجا که افزایش شیب موجب تسریع حرکت ویروس می‌شود، جهت ایجاد حداقل شرایط برای حذف ویروس، این شیب ۱/۵ درصد منظور شد.

#### • حل عددی

در این مدل، روش المان محدود Galerkin برای حل معادلات انتقال آلودگی با شرایط مناسب اولیه و مرزی بکار برده می‌شود. گسسته سازی مکانی ( Space Discretization ) با روش المان محدود و گسسته سازی زمان ( Time Discretization ) با روش تفاضل محدود می‌باشد. فرآیند حل به گونه‌ای است که در هر مرحله زمانی، یک تابع تکرار برای حل معادلات استفاده می‌شود. پس از همگرا شدن، حل معادلات ادامه می‌یابد.

#### • پارامترهای هیدرولیکی

در مدل Hydrus1D، گزینه‌هایی برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک از یکسری از اطلاعات مهم خاک وجود دارد. یکی از این گزینه‌ها، انتخاب بافت خاک طبق طبقه بندی USDA به صورت ماسه‌ای، لوم سیلتی، لوم رسی و ... می‌باشد. سپس با انتخاب نوع خاک، پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد نظر شامل ضریب هدایت هیدرولیکی، تخلخل، دانسیته و درصد رطوبت اشباع تعیین می‌شود. از آنجا که چاه جاذب فاضلاب در زمینهای نفوذپذیر احداث می‌شود، مدلسازی در سه حالت برای سه نوع خاک ماسه‌ای، ماسه لومی و لوم ماسه‌ای انجام شد.

#### • پارامترهای انتقال آلودگی

پارامترهای انتقال آلودگی که جهت مدلسازی انتقال ویروس مورد نیاز است شامل ضریب چسبیدن ( $k_{att}$ )، ضریب جداشدن ( $k_{det}$ )، ضریب غیرفعال شدن ویروس آزاد ( $\mu_i$ )، ضریب غیرفعال شدن ویروس چسبیده ( $\mu_s$ ) و پراکندگی هیدرودینامیک طولی ( $\alpha_l$ ) می‌باشد. اکثر مطالعات انتقال ویروس در مقیاس آزمایشگاهی و با فرض جذب متعادل انجام شده است، در حالی که مطالعات اخیر صحرائی نشان داده است که جذب ویروس در آبخوانهای ماسه‌ای، سینتیک و برگشت پذیر است [ ۹ ].

جهت انجام مدلسازی در هر دو مرحله افقی و عمودی و در تمام انواع خاکها، ضرایب  $k_{att}$ ،  $k_{det}$ ،  $\mu_i$  و  $\mu_s$  از مطالعه صحرائی Schijven و همکاران در سال ۱۹۹۹ که حذف باکتریوفاژهای MS2 و PRD1 را در آبخوان ماسه‌ای بررسی کرده بودند، استخراج گردید. البته به دلیل حداقل شرایط برای حذف ویروس، حداقل  $k_{att}$  موجود در مقاله استفاده شد. یک فرض مهم در این مدلسازی، همگن بودن خاک می‌باشد. پارامتر  $\alpha_l$  تابع مقیاس مطالعه بوده و به درجه ناهمگونی خاک بستگی دارد. در مطالعه صحرائی Schijven و همکاران در سال ۱۹۹۹، به دلیل همگن بودن خاک، این ضریب که از منحنی‌های پیشرفت ردیاب پایا (tracer) تعیین شده بود کم و در حد ۰/۰۰۱ طول پیشرفت آلودگی بود [ ۹ ]. چون در تنظیم پارامترهای هیدرولیکی خاک و انتقال آلودگی، خاک همگن فرض شده بود، برای اعمال اثر ناهمگنی خاک در انتقال ویروس و ایجاد حداقل شرایط برای حذف ویروس، این ضریب طبق نتایج Lallemand-Barres و Peaudcerf در سال ۱۹۷۸ به میزان ۰/۱ طول پیشرفت آلودگی منظور شد [ ۲۸ ].

#### • شرایط اولیه

مدلسازی در دو مرحله عمودی و افقی در خاک اشباع انجام شد. به منظور تعیین عمق اشباع در جهت عمود ناشی از نفوذ فاضلاب، باتوجه به سطح معمول انبارها و دبی فاضلاب سرانه، هد متوسط در کف انبار به دست آمده و سپس با استفاده از مدل Hydrus1D و CHEMFLOW، منحنی رطوبت-عمق در خاکهای ماسه‌ای، لوم ماسه‌ای و ماسه لومی ترسیم گردید. باتوجه به نتایج مشخص شد که خاک ماسه‌ای و ماسه لومی به شدت تا اعماق بالای ۱۰۰ متر اشباع می‌شوند. سرعت اشباع شدن در خاک لوم ماسه‌ای کندتر بود [ ۱ ]. اما باتوجه به اینکه عمق مفید ۳۵ متر در نظر گرفته شده بود، در درازمدت این عمق در خاکهای نفوذپذیر اشباع خواهد شد. البته این نتایج با فرض یک‌بعدی بودن شبیه‌سازی، همگن بودن خاک و عدم وجود ذرات ریزدانه و غیرقابل نفوذ در خاک می‌باشد. لذا باتوجه به اشباع بودن خاک در هر دو مرحله مدلسازی، شرایط اولیه برای انتقال جریان در قسمت عمودی، رطوبت ثابت برابر درصد رطوبت اشباع در تمام اعماق و شرایط اولیه در قسمت افقی هد ثابت برابر صفر در تمام فواصل می‌باشد. شرایط اولیه برای انتقال ویروس، غلظت اولیه صفر برای فاز مایع و فاز جامد در تمام اعماق می‌باشد.

• شرایط مرزی

انتخاب شرایط مرزی مناسب، تاثیر بسزایی در نتایج مدلسازی عددی خواهد داشت. شرایط مرزی برای انتقال جریان در قسمت عمودی در بالا هد ثابت و در پایین زهکشی آزاد می باشد. شرایط مرزی انتقال جریان در قسمت افقی هد ثابت در ابتدا و انتها می باشد. شرایط مرزی برای انتقال ویروس، در قسمت عمودی در بالا غلظت ثابت برابر غلظت ویروس در فاضلاب خام و در پایین گرادیان غلظت برابر صفر می باشد. در قسمت افقی، در ابتدا غلظت ثابت برابر ماکزیمم غلظت کاهش یافته ویروس بعد از مرحله عبور عمودی و رسیدن به آب زیرزمینی و در پایین گرادیان غلظت برابر صفر می باشد.

جدول ۳-الف - مقادیر پارامترهای ورودی در مدلسازی حرکت ویروس در

خاک‌های ماسه‌ای، ماسه لومی و لوم ماسه‌ای

مقدار/ نوع	پارامتر
MS2	نوع ویروس یا باکتریوفاژ
۱۰	دمای آب زیرزمینی (°C)
۰/۰۳	$\mu_1$ (day <sup>-1</sup> )
۰/۰۹	$\mu_s$ (day <sup>-1</sup> )
۰/۸	$K_{att}$ (day <sup>-1</sup> )
۰/۰۰۳	$K_{det}$ (day <sup>-1</sup> )

جدول ۳-ب - مقادیر پارامترهای ورودی در مدلسازی حرکت ویروس در خاک

مقدار/ نوع				پارامتر	
خاک لوم ماسه‌ای		خاک ماسه لومی		خاک ماسه‌ای	
حرکت افقی	حرکت عمودی	حرکت افقی	حرکت عمودی	حرکت افقی	حرکت عمودی
۵۰۰	۳۵۰	۵۰۰	۳۵۰	۵۰۰	۳۵۰
۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۳۵
۰/۰۱	۷	۰/۵۱۳	۷	۱/۵۹	۷
۰/۱۰۶	۰/۱۰۶	۳/۵	۳/۵	۷/۱۳	۷/۱۳
۱/۵۶	۱/۵۶	۱/۵۵	۱/۵۵	۱/۵۵	۱/۵۵

کالیبراسیون مدل

مدل Hydrus-1D برای شبیه‌سازی حرکت ویروس در محیط متخلخل اشباع، با توجه به مطالعات Schijven و همکاران [۹] کالیبره شد. این مطالعات در ساحل کاستریکام هلند و در یک آبخوان ماسه‌ای، در فصل زمستان انجام یافته است. در تحقیقات ایشان، حذف باکتریوفاژهای MS2 و PRD1 مورد مطالعه قرار گرفت و مقادیر پارامترهای  $\alpha_L$ ,  $\mu_s$ ,  $\mu_1$ ,  $K_{det}$ ,  $K_{att}$  در فرآیند حذف این دو باکتریوفاژ بدست آمد [۱].



## نتایج مدل‌سازی

با توجه به موارد ذکر شده و با فرض همگن بودن محیط متخلخل و مدل‌سازی یک بعدی، پارامترهای ورودی در کلیه مراحل مشخص گردید که در جدول ۳-الف و ب ارائه شده است. منحنی‌های کاهش غلظت ویروس بر حسب زمان و فاصله سفر در کلیه مراحل مدل‌سازی و در انواع خاکها در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

همانگونه که در منحنی‌های کاهش غلظت ویروس مشاهده می‌شود، میزان حذف در مرحله اول ناچیز است که در خاک ماسه‌ای به میزان  $\text{Log}_{10}$  ۰/۶۴، در خاک ماسه لومی به میزان  $\text{Log}_{10}$  ۱/۱۵ و در خاک لوم ماسه‌ای به میزان  $\text{Log}_{10}$  ۲/۸۵ می‌باشد. از آنجا که سرعت حرکت ویروس در مرحله اول، ناشی از نیروی ثقلی، زیاد می‌باشد سهم ترم‌های جابجایی و پخش در معادلات بالا بوده و فرصت کافی برای جذب ویروس وجود ندارد. با کاهش هدایت هیدرولیکی، سرعت حرکت کاهش یافته و میزان حذف افزایش می‌یابد، در این صورت میزان حذف در خاک لوم ماسه‌ای حداکثر است.

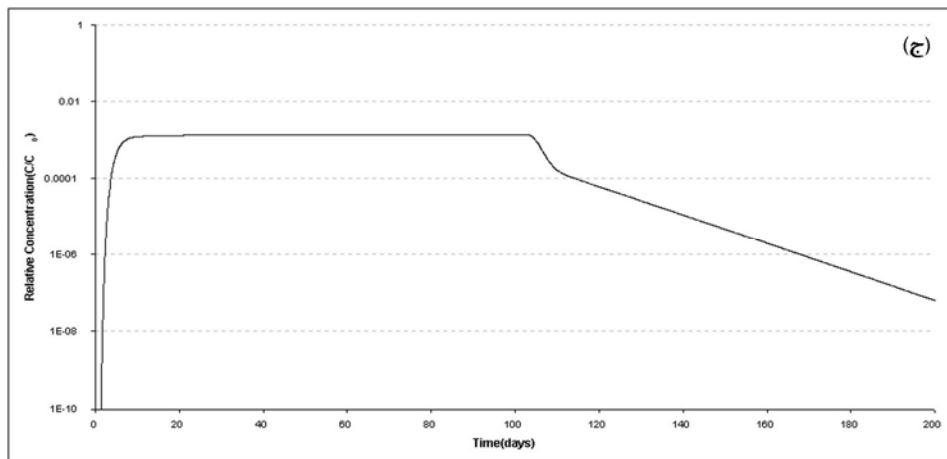
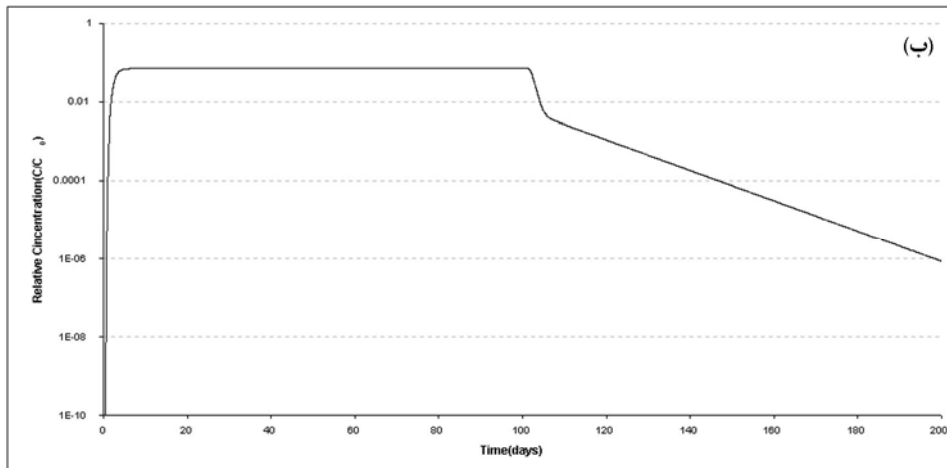
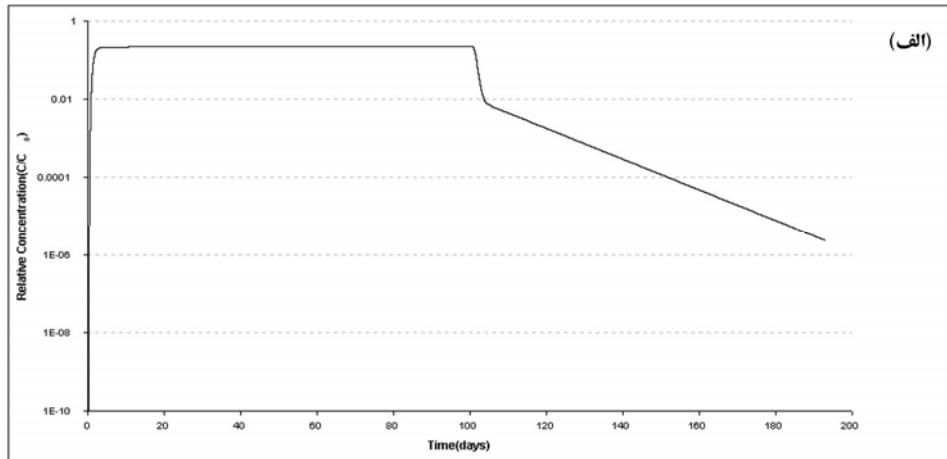
با توجه به غلظت مجاز ویروس در آب شرب ( $10^{-7} \times 1/8$  پلاک در لیتر) و میزان غلظت ورودی به آبخوان در خاکهای مختلف، حاصل از مرحله اول مدل‌سازی، برای تعیین حریم چاه باید فاصله‌ای را تعیین نمود که حذف ویروس در مرحله دوم در خاک ماسه‌ای به میزان  $\text{Log}_{10}$  ۹/۹۵، در خاک ماسه لومی به میزان  $\text{Log}_{10}$  ۹/۴۵ و در خاک لوم ماسه‌ای به میزان  $\text{Log}_{10}$  ۷/۷۴ برسد. این فاصله در زمانهای مختلف متغیر است. لذا با توجه به نتایج مدل، جهت تعیین حریم مطمئن، حداکثر زمان انتخابی ۱۰۰ روز می‌باشد که برابر دوره تزریق ویروس است. با توجه به نتایج مدل‌سازی، این فاصله در مدت زمان ۱۰۰ روز برای خاک ماسه ای ۲۹ متر، برای خاک ماسه لومی ۱۸ متر و برای خاک لوم ماسه‌ای ۶ متر بدست آمده است. جمع‌بندی نتایج مدل‌سازی حرکت و حذف ویروس در سه نوع خاک ماسه‌ای، ماسه لومی و لوم ماسه‌ای را در جدول ۴ و شکل ۴ ملاحظه می‌نمایید.

البته شایان ذکر است که در خاکهای ماسه لومی و لوم ماسه‌ای به علت داشتن ذرات ریزدانه و افزایش سطوح جذب، قطعاً ضرایب  $K_{det}$  و  $K_{att}$  بیشتر از خاک ماسه‌ای می‌باشد. اما به علت فقدان مطالعات صحرایی در این گونه از خاکها، ضرایب جذب و جداسدن مساوی خاک ماسه‌ای در نظر گرفته شد و فقط پارامترهای هیدرولیکی خاک تغییر یافت. بنابراین در واقعیت، میزان حذف در خاک ماسه لومی و لوم ماسه‌ای نسبت به خاک ماسه‌ای به مراتب بیشتر است. نتایج حاصل از مطالعات ستونی و ناپیوسته در این گونه از خاکها نیز مؤید این مطلب می‌باشد [۱۸].

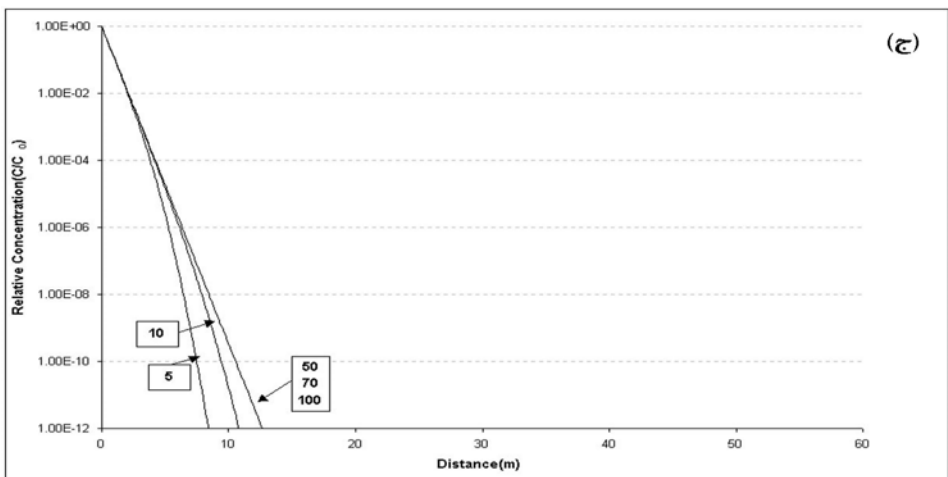
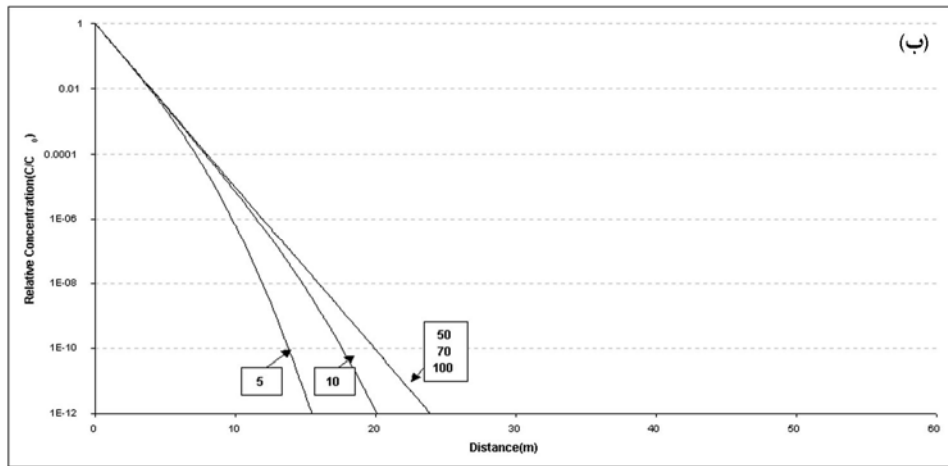
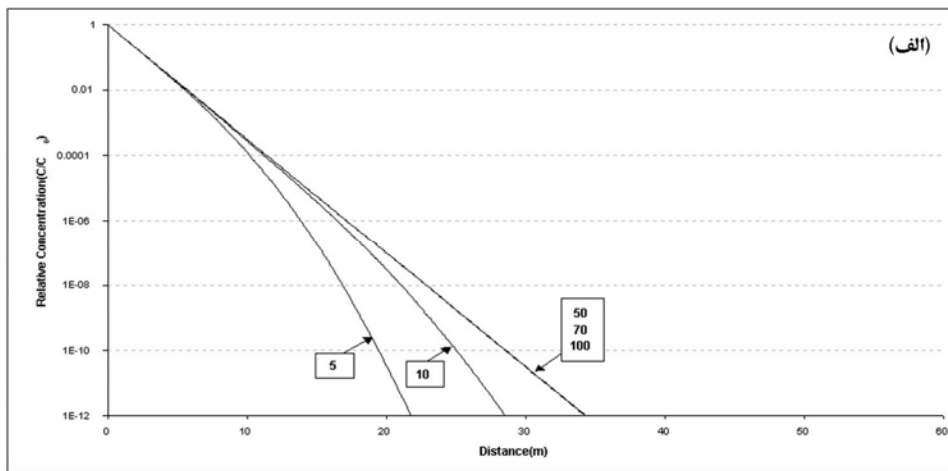
## پیشنهادات

حذف ویروس در محیط متخلخل، حاصل از دو فرآیند جذب و غیرفعال شدن می‌باشد. این فرآیندها متأثر از عوامل گوناگونی هستند که باعث عدم قطعیت‌های فراوان در نتایج مطالعات خواهند شد. مطالعه حاضر با فرض همگن بودن محیط متخلخل، یک بعدی بودن انتقال و با استفاده از داده‌های مطالعات محدود صحرایی در خارج از کشور انجام شده است. ناهمگونی خاک، وجود ترکیبات مختلف در خاک، نوع ویروس و سایر عوامل مؤثر بر دو فرآیند حذف ویروس که قبلاً به آنها اشاره شد، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج مدل‌سازی خواهند داشت. لذا با توجه به محدودیت‌های فوق، تعیین یک حریم مطمئن برای چاههای جاذب در کشور و تامین آب شرب مناسب از منابع آب زیرزمینی، مستلزم انجام مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی بیشتر و آگاهی از ترکیبات و ناهمگونی های خاک با استفاده از باکتریوفاژها می‌باشد. از آنجا که مطالعات ویروس به دلیل بیماریزا بودن ویروس، توسط ویروس‌های مدل یا باکتریوفاژها انجام می‌شود، انجام مطالعات آزمایشگاهی بیشتر برای تایید و ارجاع رفتار باکتریوفاژها به ویروس‌های بیماریزا ضروری به نظر می‌رسد.

وجود کاتیونهای فلزی در خاک، pH پایین و وجود ترکیبات رسی در خاک از جمله عواملی هستند که باعث افزایش حذف ویروس در خاک می‌شوند. لذا شاید بتوان به دنبال راهکاری گشت که میزان حذف در طی انتقال ویروس از چاه جاذب به آب زیرزمینی حداکثر شده و میزان حریم کاهش یابد، و یا به گونه‌ای از انتقال ویروس به منابع آب زیرزمینی جلوگیری گردد. این مساله می‌تواند به عنوان یک زمینه تحقیقاتی مناسب ادامه یافته و منجر به نتایج مثبتی در این زمینه گردد.



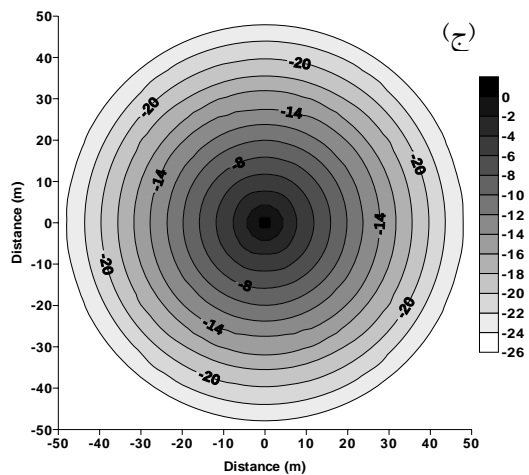
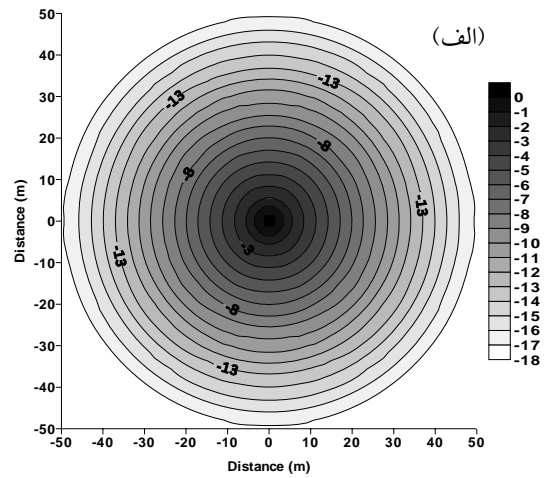
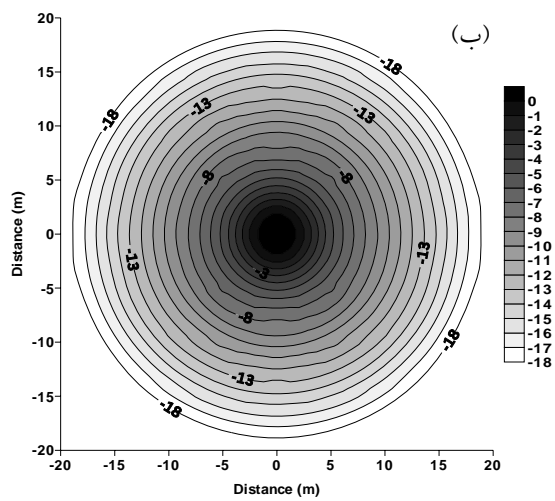
شکل ۲ - منحنی پیشرفت ویروس در جهت عمودی در عمق ۳۵ متر (سطح آب زیرزمینی) در:  
 الف) خاک ماسه‌ای با ماکزیمم غلظت نسبی ۰/۲۳ (معادل ۱/۵۹ پلاک در میلی لیتر) که میزان حذف در ماکزیمم غلظت مساوی  $10^{\log 0.64}$  می‌باشد، ب) خاک ماسه لومی با ماکزیمم غلظت نسبی ۰/۰۷ (معادل ۰/۵۱۳ پلاک در میلی لیتر) که میزان حذف در ماکزیمم غلظت مساوی  $10^{\log 1.13}$  می‌باشد، ج) خاک لوم ماسه‌ای با ماکزیمم غلظت نسبی ۰/۰۰۱۴ (معادل ۰/۰۰۹۹ پلاک در میلی لیتر) که میزان حذف در ماکزیمم غلظت مساوی  $10^{\log 2.85}$  می‌باشد.



شکل ۳- منحنی لگاریتمی غلظت نسبی ویروس- فاصله با جریان آب زیرزمینی در روزهای ۵، ۱۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ روز در: الف) خاک ماسه‌ای، ب) خاک ماسه لومی، ج) خاک لوم ماسه‌ای

جدول ۴ - نتایج مدل‌سازی حرکت ویروس در خاک اشباع

جهت حرکت	طول حرکت (m)			میزان حذف ویروس ( $Log_{10}$ )		
	خاک لوم ماسه‌ای	خاک ماسه لومی	خاک ماسه‌ای	خاک لوم ماسه‌ای	خاک ماسه لومی	خاک ماسه‌ای
عمودی	۳۵	۳۵	۳۵	۲/۸۵	۱/۱۵	۰/۶۴
افقی	۶	۱۸	۲۹	۷/۷۴	۹/۴۵	۹/۹۵



شکل ۴- میزان کاهش لگاریتمی غلظت ویروس  $Log_{10} (C/C_0)$  پس از ورود از چاه جاذب به آب زیرزمینی با عبور از آبخوان در: الف) خاک ماسه‌ای که میزان حذف مورد نیاز برای قابل شرب بودن آب زیرزمینی،  $Log_{10}$  ۹/۹۵ می‌باشد (پس از عبور فاضلاب به میزان ۲۹ متر)، ب) خاک ماسه لومی که میزان حذف مورد نیاز برای قابل شرب بودن آب زیرزمینی  $Log_{10}$  ۹/۴۵ می‌باشد (پس از عبور فاضلاب به میزان ۱۸ متر)، ج) خاک لوم ماسه‌ای که میزان حذف مورد نیاز برای قابل شرب بودن آب زیرزمینی  $Log_{10}$  ۷/۷۴ می‌باشد (پس از عبور فاضلاب به میزان ۶ متر)

## فهرست مراجع :

- ۱- احمدپور، پریسا، مدلسازی انتقال ویروس در محیط متخلخل اشباع جهت تعیین حریم چاه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۱.
- ۲- نواری، مهدی، بررسی اثرات تغییرات سطح آب دریا و هندسه ساحلی بر پیشروی آب شور در آبخوانهای ساحلی، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۰.
- ۳- شریعت پناهی، محمد، اصول کیفیت و تصفیه آب و فاضلاب، دانشگاه تهران، ۱۳۷۵.
- 4- Schijven, J. F., Hasanizadeh, S. M., 2000. Removal of viruses by soil passage: overview of modeling, processes and parameters. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 30, 49-127.
- 5- Gerba, C. P., Keswick, B. H., Dupont, H. L., and Fields, H. A., 1984, Isolation of rotavirus from drinking water. *Monogr. Virol.* 15, 119-125.
- 6- Schijven, J. F. and Rietveld, L. C. 1996. How do field observation compare with models of microbial removal? In: *The 1996 Proceeding of the Groundwater Foundation's 12th Annual Fall Symposium*, pp. 105-114. Boston, MA.
- 7- Dizer, H., Nasser, A., and Lopez, J. M., 1984, Penetration of different human pathogenic viruses into sand columns percolated with distilled water, groundwater or wastewater. *Appl. Environ. Microbiol.* 47, 409-415.
- 8- Regli, S., J. B. Rose, C. N. Haas, and C. P. Gerba, 1991, Modeling the risk from Giardia and Viruses in drinking water, *J. AWWA*, 213, 76-84.
- 9- Schijven, J. F., Hoogenboezem, W., Hassanizadeh, S. M., and Peters, J. H., 1999, Modeling removal of bacteriophages MS2 and PRD1 by dune infiltration at Castricum, the Netherlands, *Water Res.* 35, 1101-1111.
- 10- Bitton, G., Farrah, S. R., Ruskin, R. H., Butner, J., and Chou, Y. J., 1983, Survival of pathogenic and indicator organisms in groundwater. *Ground Water* 21, 405-410.
- 11- Powelson, D. K., Simpson, J. R., and Gerba, C. P., 1990, Virus transport and survival in saturated and unsaturated flow through soil columns. *J. Environ. Qual.* 19, 396-401.
- 12- Yahya, M. T., Galsomies, L., Gerba, C. P., and Bales, R. C., 1993, Survival of MS2 and PRD1 bacteriophagen in groundwater, *Wat. Sci. Tech.* 27(3-4), 409-412.
- 13- Powelson, D. K. and Gerba, C. P., 1994, Virus removal from sewage effluents during saturated and unsaturated flow through soil columns, *Water Res.* 28, 2175-2181.
- 14- Yates, M. V. and Ouyang, Y., 1992, VIRTUS, a model of virus transport in unsaturated soils, *Appl. Environ. Microbiol.* 58, 1609-1616.
- 15- Chrysikopoulos, C. V. and Sim, Y., 1996, One-dimensional virus transport in homogeneous porous media with time-dependent distribution coefficient, *J. Hydrol.* 185, 199-219.
- 16- Toride, N., Leij, F. J., and van Genuchten, M. T., 1995, The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiment, Version 2.0 U. S. Salinity Laboratory, Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture, Riverside, CA. Report No. 137.
- 17- Schijven, J. F. and Simunek, J., 2002, Kinetic modeling of virus transport at the field scale. *Contaminant Hydrology.* 55, 113-135.
- 18- Gerba, C. P. 1984, Applied and theoretical aspects of virus adsorption to surfaces. *Adv. Appl. Microbiol.* 30, 133-168.
- 19- Shields, P. A. and Farrah, S. R., 1987, Determination of the electrostatic and hydrophobic character of enteroviruses and bacteriophages. *Abstr. Q-82. Program Abstr. 87th Annu. Meet. Am. Soc. Microbiol. American Society for Microbiology, Washington, D. C.*
- 20- Goyal, S. M. and Gerba, C. P., 1979, Comparative adsorption of human enteroviruses, simian rotavirus, and selected bacteriophages to soils, *Appl. Environ. Microbiol.* 38, 241-247.
- 21- Bales, R. C., Li, S., Maguire, K. M., Yahya, M. T., and Gerba, C. P., 1993, MS2 and poliovirus transport in porous media: hydrophobic effects and chemical perturbation, *Water. Res. Res.* 29, 957-963.
- 22- Hurst, C. J., Gerba, C. P., and Cech, I., 1980, Effects of environmental variables and soils characteristics on virus survival in soil, *Appl. Environ. Microbiol.* 40, 1067-1079.

- 23- Yates, M. V., Gerba, C. P., and Kelley, L. M., 1985, Virus persistence in groundwater. *Appl. Environ. Microbiol.* 49, 778-781.
- 24- Yates, M. V., Yates, S. R., Wagner J., and Gerba, C. P., 1987, Modelling virus survival and transport in the subsurface, *J. Contam. Hydrol.* 1, 329-345.
- 25- Sobsey, M. D., Dean, C. H., Knuckles, M. E., and Wagner, R. A., 1980, Interaction and survival of enteric viruses in soil materials, *Appl. Environ. Microbiol.* 40, 92-101.
- 26- Havelaar, A. H., 1993, Bacteriophages as models of enteric viruses in the environment, *ASM News* 59, 614-619.
- 27- Simunek, J. , Sejna, M. , and Van Genuchten, M.Th. 1998. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. International Ground Water Modeling Center (IGWMC), TPS 70.
- 28- Lallemand Barres, P. , and Peaudecerf, P. 1978. Recherche des relations entre la valeur de la dispersion macroscopique d, un milieu aquifere, ses autres caracteristiques et les conditions de mesure, etude bibliographique. *Bulletin. Bureau de Recherches Geologiques et Minieres. Sec. 3/4: 277-287.*