

## بررسی انتقال ویروس در محیط متخلخل اشباع به کمک مدل

### Hydrus-1D جهت تعیین حریم چاه

(دریافت ۸۱/۴/۱۷ پذیرش ۸۲/۸/۲۰)

پریسا احمدپور\* سید اویس ترابی\*\* مسعود تجریشی\*\*\*

#### 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 به کارگیری و شناخت فرایندها 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 به کار رود. 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 گرفته است. پارامترهای ورودی مدل از مطالعات و مقالات قبلی استخراج گردیده و میزان فاصله‌ای که غلظت ویروس به حد مجاز آب شرب می‌رسد، تعیین شده است. 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 اشباع شبیه‌سازی می‌کند.

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

## Investigation of Virus Transport in the Saturated Porous Media by Hydrus-1D Model

Ahmadpour, P., (M.Sc.)

Torabi, S.O., Ph.D student

Tajrishy, M., Assist. Prof.

Dept. of Civil Eng., Sharif University of Technology

#### Abstract

Groundwater may become contaminated with pathogenic microorganisms from artificial recharge with wastewater or surface water, or from septic tanks or leaking sewage pipes. Therefore, to protect groundwater from contamination, adequate setback distances between these sources of contamination and production wells for drinking water are needed. Surface

\* دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف  
\*\* دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف  
\*\*\* استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

water is also a source of drinking water production. Surface water may be contaminated with pathogenic microorganisms, mainly due to discharges of wastewater and by manure run-off from agricultural land. To produce safe drinking water from surface water these pathogens must be removed. One effective way is the passage of surface water, through soil, as is the case in bank filtration, dune recharge and deep well injection. To assure production of safe drinking water, adequate travel times and travel distances are needed. The only way to evaluate the effectiveness of soil passage is to calculate virus concentration removal by means of a computational model. Computational models are useful for the modeling of microorganism transport such as bacteria and virus, for application and identification of processes. This model can be applied for the determination of cesspool locations, water wells, septic tank locations and disposal locations of sludge in agricultural lands. Disposal of wastewater in cesspool is the main method of disposal wastewater in Iran. The annual volume of domestic wastewater in Iran was estimated to be about  $3 \times 10^9 \text{ m}^3$ . In this paper, virus removal by soil passage from cesspools to groundwater and transports in groundwater were evaluated as a function of travel time and travel distance by means of a numerical model for permeable soils (sand, loamy sand and sandy loam) in a sample aquifer. Input parameters of the model are provided from previous studies. The results show that a travel distances of 29, 18 and 6m is adequate to inactivate pathogenic microorganisms in the sandy, sandy-loam and loamy-sand soils, respectively. The selected model is HYDRUS-1D (software for simulating water, heat and solute movement in one-dimensional variably saturated media).

#### مقدمه

سرانجام میکروارگانیسم‌های فاضلاب در تماس با خاک، فاکتور مهمی در دفع فاضلاب در زمین است. 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 انسان، ویروس‌ها، تخم انگل ژیا ردیا و پروتوزوا می‌باشند [۴]. مشخص شده است که ویروس‌ها قادر به جا به جایی در فاصله‌های قابل ملاحظه‌ای از میان محیط زیرسطحی بسته به اندازه‌شان، میزان 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 برمبنای زمان انتقال آب تعیین می‌شود. به عنوان مثال در آلمان و هلند، زمان انتقال ۵۰ تا ۶۰ روز مورد نیاز است [۴ و ۷]. اطلاعات اخیر از ریسک سرایت و مصرف آب شرب، منجر به تعیین حداکثر غلظت مجاز میکروارگانیسم‌های بیماری‌زای موجود در آب شرب شده

است که برمبنای حداکثر ریسک قابل پذیرش برای سرایت یک نفر در ۱۰۰۰۰ نفر در هر سال و روابط دوز-واکنش میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا می‌باشند [۸]. حداکثر غلظت مجاز ویروس،  $10^{-7} \times 1/8$  پلاک ویروس در هر لیتر است [۴]. قطعاً این غلظت خیلی کم، به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری 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 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.

بیتون و همکاران [۱۰] در سال ۱۹۸۳، الگوهای بقاء و انتقال پولی ویروس<sup>۱</sup> و اکوویروس<sup>۲</sup> 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 سریع تر است و مشخص شد که درجه همراهی لجن - ویروس به نوع ویروس و نوع لجن بستگی دارد [۱۰]. پاولسون و همکاران [۱۱] در سال ۱۹۹۰، اثر جریان اشباع و غیراشباع را بر بقاء و انتقال باکتریوفاژ MS2 مقایسه کردند و به نظر رسید که تحت شرایط غیراشباع، غیرفعال شدن و جذب ویروس افزایش یافته است. یحیی و همکاران [۱۲] در سال ۱۹۹۳، بقای باکتریوفاژهای MS2 و PRD1 را در آب زیرزمینی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده شد که PRD1 دارای زمان بقای طولانی تر نسبت به MS2 می باشد. پاولسون و جریبا [۱۳] در سال ۱۹۹۴، آزمایش هایی 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 ملاحظه ای از نوع خروجی بر حذف هر یک از این ویروس ها نشدند.

### مطالعات مدل سازی

یاتس و اواینگ [۱۴] در سال ۱۹۹۲، مدلی برای پیش بینی سرانجام و انتقال ویروس در خاک های غیراشباع (VIRTUS)<sup>۳</sup> توسعه دادند. نتایج پیش بینی شده توسط مدل با داده های اندازه گیری شده انتقال ویروس در مطالعات ستون آزمایشگاهی مقایسه شد و به استثنای یک نقطه، در دیگر موارد نتایج بر هم منطبق شدند. کریس کوبولوس [۱۵] در سال ۱۹۹۶، یک مدل استوکستیک برای انتقال یک بعدی ویروس در محیط متخلخل همگن، اشباع و نیمه محدود توسعه داد. در این مدل، فرایند 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

<sup>۱</sup> Polivirus1

<sup>۲</sup> Echovirus1

<sup>۳</sup> Virus Transport in Unsaturated Soils

در فاز مایع می شود. شیجون و همکاران [۹] در سال ۱۹۹۹، حذف باکتریوفاژهای MS2 و PRD1 را با تغذیه شن ساحلی در یک سایت صحرایی در ساحل کاستریکام هلند مطالعه کردند. برای محاسبات مدل سازی، نسخه اصلاح شده کد کامپیوتری CXTFIT [۱۶] استفاده شد که بر مبنای حل تحلیلی مدل های انتقال متعادل و غیرمتعادل<sup>۴</sup> می باشد. محاسبات و آنالیزهای حساسیت نشان دادند که این کد برای شبیه سازی منحنی پیشرفت فاژها، کاملاً مناسب نیست. شیجون و سیمونک [۱۷] در سال ۲۰۰۲، داده های مطالعه انجام شده در سال ۱۹۹۹ را به هدف تحقیق تفاوت های میان روش های مدل سازی یک بعدی و دوبعدی، تفاوت های میان مدل های 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 برازش را به داده ها در برداشت. در این مقاله، به منظور تعیین حریم چاه جاذب فاضلاب، حرکت باکتریوفاژ 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 به دست آمده از مطالعه شیجون و همکاران [۹] در سال ۱۹۹۹ شبیه سازی شده و میزان فاصله ای که غلظت ویروس به حد مجاز می رسد در سه نوع خاک ماسه، ماسه لومی و لوم ماسه ای محاسبه شد. از آنجا که چاه های جاذب عمدتاً در خاک های نفوذپذیر احداث می شوند، این سه نوع خاک مورد بررسی قرار گرفت.

### مشخصات ویروس ها

ویروس ها ذرات خیلی کوچکی هستند که توسط ناتوانیشان به تولید مجدد در بیرون از یک سلول زنده شناسایی می شوند. گرچه ویروس ها از نظر اندازه متفاوتند ولی اکثراً فوق العاده کوچکتر از باکتری ها هستند. قطر ویروس بین ۲۰ تا ۳۰۰ نانومتر می باشد [۱۵]. ویروس ها را براساس نوع میزبان به سه دسته حیوانی، باکتریایی (باکتریوفاژ) و ویروس های گیاهی تقسیم می کنند. ویروس ها عموماً دارای بار منفی بوده و دارای اشکال و

<sup>۴</sup> Kineti

ترکیبات شیمیایی متنوع می باشند [۱۵]. بیش از یک صد نوع مختلف ویروس در مدفوع انسانی مشاهده گردیده است. ویروس های روده ای شامل آنترروویروس ها<sup>۱</sup>، رئوویروس ها<sup>۲</sup>، پارو ویروس ها<sup>۳</sup> و روتاویروس ها<sup>۴</sup> می باشند. آنتررو ویروس ها شامل کوکساکسی ویروس ها<sup>۵</sup>، اکوویروس ها<sup>۶</sup> و پولیوویروس ها<sup>۷</sup> هستند [۳].

### مدل سازی انتقال ویروس ها در عبور از خاک

بعد از عبور از فواصل و زمان خاص از میان خاک، ویروس ها حذف می شوند. حذف ویروس، ناپدید شدن و کاهش ویروس از سیستم است و معمولاً به صورت کاهش لگاریتمی غلظت ویروس،  $\log_{10} (C/C_0)$  بیان می شود. مهم ترین فرایندهای مؤثر در حذف ویروس در عبور از خاک، جذب و غیرفعال شدن می باشند [۵]. اثر جابجایی<sup>۸</sup> و پخش<sup>۹</sup> هم بر گسترش و رقیق شدن غلظت ویروس ها مؤثر هستند. جذب ویروس ها به خاک ممکن است به صورت غیربرگشت پذیر<sup>۱۱</sup> یا برگشت پذیر<sup>۱۰</sup> مدل شود. در حالت جذب برگشت پذیر، ممکن است سایت های جذب، متعادل و یا سینتیک باشند. جذب ویروس ها به خاک و همزمان با غیرفعال شدن در مقیاس های گوناگونی می توانند مطالعه شوند که شامل ستونی، ناپیوسته و صحرایی می باشد. در آزمایش های ناپیوسته، تقریباً همیشه جذب متعادل مطالعه شده و اثر جابجایی و پخش قابل تحقیق نیست [۴]. در نمونه های ستونی، انتقال ویروس به صورت فرایند یک بعدی مدل شده و معمولاً به علت همگنی خاک از اثر پخش صرف نظر می شود. با وجودی که 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

<sup>۱</sup> Enteroviruses

<sup>۲</sup> Reoviruses

<sup>۳</sup> Paroviruses

<sup>۴</sup> Rotaviruses

<sup>۵</sup> Coxsackieviruses

<sup>۶</sup> Echoviruses

<sup>۷</sup> Polioviruses

<sup>۸</sup> Advection

<sup>۹</sup> Dispersion

<sup>۱۰</sup> Irreversible

<sup>۱۱</sup> Reversible

نشان داده شده که در آبخوان های ماسه ای، جذب به صورت سینتیک می باشد [۹].

حرکت جریان در محیط غیراشباع یک بعدی از شکل اصلاح شده معادله ریچارد تبعیت می کند. البته با این فرض که فاز هوا نقش کم اهمیتی را در فرایندهای جریان مایع ایفا می کند و در ضمن از جریان سیال ناشی از گرادیان حرارتی نیز صرف نظر 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 ترم های جا به جایی، پخش، غیرفعال شدن و جذب سینتیک برای جریان یک بعدی در محیط غیر اشباع به صورت زیر است [۲۷]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_B}{\theta} \frac{\partial S}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \mu_1 C - \frac{\rho_B}{\theta} \mu_S S \quad (2)$$

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

که:

C، تعداد ویروس های آزاد در واحد حجم در فاز آب [Pfu L<sup>-3</sup>]

S، غلظت ویروس جذب شده است که به صورت تعداد ویروس ها در واحد جرم خاک [Pfu M<sup>-1</sup>] بیان می شود؛

$\rho_B$ ، دانسیته حجمی خاک اشباع [M L<sup>-3</sup>]

$\theta$ ، محتوای حجمی رطوبت [L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup>]

$D_1$  ضریب پخش طولی [L<sup>2</sup> T<sup>-1</sup>]

v، سرعت آب منفذی [L T<sup>-1</sup>]

$k_{att}$  و  $k_{det}$ ، ضرایب نرخ چسبیدن و جدایش [T<sup>-1</sup>]

$\mu_1$ ، ضریب نرخ غیرفعال شدن ویروس آزاد [T<sup>-1</sup>]

$\mu_S$ ، ضریب نرخ غیرفعال شدن ویروس جذب شده

می باشد [T<sup>-1</sup>]

و  $\alpha$  عبارتست از زاویه بین جهت جریان و محور قائم.

### فاکتورهای مؤثر بر جذب ویروس ها به خاک

اندرکنش ایجاد شده بین ویروس ها و ذرات خاکی با مشخصات سطحی شان تعیین می شود. اندرکنش های ویروس - خاک در طبیعت، الکترواستاتیک و آب گریز است. مشخصات سطحی ممکن است با نوع ویروس، نوع خاک، تغییرات pH، پیوند یونی، یون های چند ظرفیتی و

مواد آلی تغییرکنند [ ۱۸ ]. تغییرات این اندرکنشها با تغییر در ضرایب نرخ چسبیدن و جداشدن 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 برای 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، آلومینیوم و منگنز به دلیل داشتن بار مثبت در pH طبیعی، ظرفیت حذف بیشتری از ویروس دارند [ ۱۸ ].

#### اثر pH

در pH بالا، افزایش دافعه الکترواستاتیکی باعث کاهش نرخ چسبیدن و افزایش نرخ جداشدن 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 آب‌گریز 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 پیش‌بینی حذف ویروس خواهد شد.

#### سرعت جریان آب

همه مطالعاتی که اثر سرعت نرخ جریان را تحقیق کرده‌اند، 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).

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

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

#### دما

دمای آب زیرزمینی تنها فاکتور خیلی مهم در پیش‌بینی 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.

#### غلظت ویروس در فاضلاب خام

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

#### 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 به صورت عمودی و افقی

مدل‌سازی شده‌است. تصویر شماتیک برای مدل‌سازی در شکل ۱ نشان داده شده است.

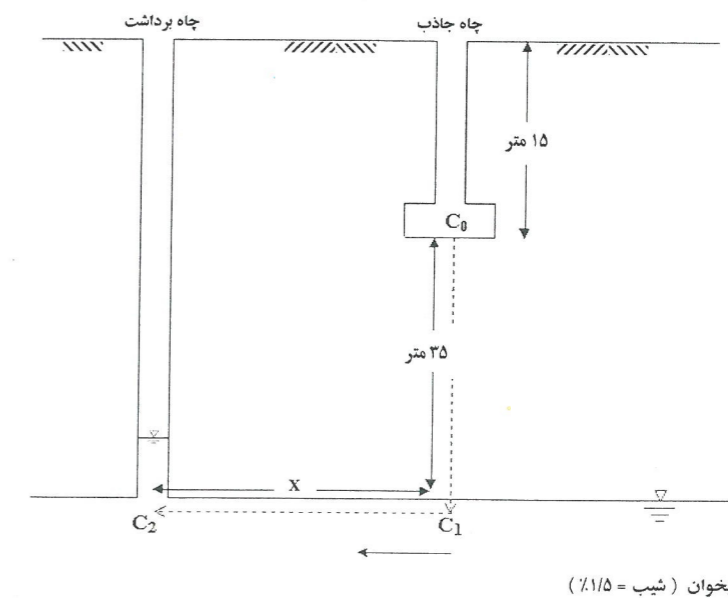
انواع گوناگونی از مدل‌های تحلیل و عددی به منظور بررسی حرکت آلودگی در محیط‌های متخلخل وجود دارد که می‌توان از جمله آنها: Hydrus1D، Hydrus2D، 2dfatmic، CHEMFLOW، Cfitim، N3dade، STANMOD، SWMS-2d، VIRTUS، CXTFIT، Viralt و Canvas را نام برد. با بررسی معادلات حاکم بر انتقال ویروس، مقایسه آنها با معادلات مدل‌های 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، تک‌سایتی و دو‌سایتی را داراست. در ضمن، دارای محیط گرافیکی برای ورود اطلاعات می‌باشد که باعث سهولت کاربرد می‌شود. این کد، توسط سیمونک و همکاران [۲۷] 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 شبیه‌سازی می‌کند.

### 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.

### 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



شکل ۱- تصویر شماتیک موقعیت چاه نسبت به آبخوان

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]. برای اطمینان و از آنجا که افزایش شیب موجب تسریع حرکت ویروس می‌شود، برای ایجاد حداقل شرایط برای حذف ویروس، این شیب ۱/۵ درصد منظور شد.

### حل عددی

در این مدل، روش المان محدود برای حل معادلات انتقال آلودگی با شرایط مناسب اولیه و مرزی به کار برده می‌شود. گسسته‌سازی مکانی<sup>۲</sup> با روش المان محدود و گسسته‌سازی زمانی<sup>۳</sup> 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 یک سری 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 غیره 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 برای مدل‌سازی انتقال ویروس مورد نیاز است شامل ضریب چسبیدن ( $K_{att}$ ),  
<sup>1</sup> Galerkin  
<sup>2</sup> Space Discretization  
<sup>3</sup> Time Discretization

ضریب جداشدن ( $K_{det}$ ), ضریب غیرفعال شدن ویروس آزاد ( $\mu_i$ ), ضریب غیرفعال شدن ویروس چسبیده ( $\mu_s$ ) و پراکندگی هیدرودینامیک طولی ( $\alpha_i$ ) 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].

برای 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 شیجون 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 این تحقیق استفاده شد. یک فرض مهم در مدل‌سازی، همگن بودن خاک می‌باشد. پارامتر  $\alpha_i$  تابع مقیاس مطالعه بوده و به درجه ناهمگنی خاک بستگی دارد. در مطالعه صحرائی شیجون و همکاران در سال ۱۹۹۹، به دلیل همگن بودن خاک، این ضریب که از منحنی‌های پیشرفت ردیاب پایا<sup>۴</sup> 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 به دست آمده توسط لالمان- بارز و پودسرف<sup>۵</sup> 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 عمودی ناشی از نفوذ فاضلاب، باتوجه به سطح معمول انباره‌ها و دبی فاضلاب سرانه، ارتفاع متوسط در کف انباره 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

<sup>4</sup> Tracer

<sup>5</sup> Lallemand-Barres and Peauderf

اشباع شدن در خاک لوم ماسه ای کندتر بود [۱]. اما با توجه به این که عمق مفید ۳۵ متر در نظر گرفته شده بود، در درازمدت این عمق در خاک‌های نفوذپذیر اشباع خواهد شد. البته این نتایج با فرض یک بعدی بودن شبیه‌سازی، همگن بودن خاک و عدم وجود ذرات ریزدانه و غیرقابل نفوذ در خاک می‌باشد.

لذا با توجه 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 ارتفاع آب 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 ارتفاع آب و در پایین زهکشی آزاد می‌باشد. شرایط مرزی انتقال جریان در قسمت افقی ارتفاع آب در ابتدا و انتها می‌باشد. شرایط مرزی برای انتقال ویروس، در قسمت عمودی در بالا غلظت ثابت برابر غلظت ویروس در فاضلاب خام و در پایین شیب غلظت برابر صفر می‌باشد. در قسمت افقی، در ابتدا غلظت ثابت برابر حداکثر غلظت کاهش یافته ویروس بعد از مرحله عبور عمودی و رسیدن به آب زیرزمینی و در پایین شیب غلظت برابر صفر می‌باشد.

#### کالیبراسیون مدل

مدل Hydrus-1D برای شبیه‌سازی حرکت ویروس در محیط متخلخل اشباع، با توجه به مطالعات شیجون<sup>۱</sup> و همکاران [۹] کالیبره شد. این مطالعات در ساحل کاستریکام هلند و در یک آبخوان ماسه‌ای، در فصل زمستان انجام یافته‌است. در تحقیقات ایشان، حذف باکتریوفازهای MS2 و PRD1 مورد مطالعه قرار گرفت و مقادیر پارامترهای  $\alpha_L, \mu_s, \mu_1, K_{det}, K_{att}$  در فرایند حذف این دو باکتریوفاز به دست آمد [۱].

<sup>۱</sup> Schijven

#### 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 شد که در جدول ۳ و ۴ ارائه شده‌است. منحنی‌های کاهش غلظت ویروس بر حسب زمان و فاصله انتقال در کلیه مراحل مدل‌سازی و در انواع خاک‌ها در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌است.

همان‌گونه که در منحنی‌های کاهش غلظت ویروس مشاهده می‌شود، میزان حذف در مرحله اول ناچیز است که در خاک ماسه‌ای به میزان  $\text{Log}_{10} 0.74$ ، در خاک ماسه لومی به میزان  $\text{Log}_{10} 1.15$  و در خاک لوم ماسه‌ای به میزان  $\text{Log}_{10} 2.85$  می‌باشد. از آنجا که سرعت حرکت ویروس در مرحله اول، ناشی از نیروی ثقلی زیاد می‌باشد سهم عبارت‌های 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  $\text{Log}_{10} 9.95$ ، در خاک ماسه لومی به میزان  $\text{Log}_{10} 9.45$  و در خاک لوم ماسه‌ای به میزان  $\text{Log}_{10} 7.74$  برسد. این فاصله در زمان‌های مختلف متغیر است. لذا با توجه به نتایج مدل، برای 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 ماسه‌ای ۲۹ متر، برای خاک ماسه لومی ۱۸ متر و برای خاک لوم ماسه‌ای ۶ متر به دست آمده‌است. جمع‌بندی نتایج مدل‌سازی حرکت و حذف ویروس در سه نوع خاک ماسه‌ای، ماسه لومی و لوم ماسه‌ای را در جدول ۵ و شکل ۴ ملاحظه می‌نمایید.

شایان ذکر است که در خاک‌های ماسه لومی و لوم ماسه‌ای به علت داشتن ذرات ریزدانه و افزایش سطوح جذب، قطعاً ضرایب  $K_{att}$  و  $K_{det}$  بیشتر از خاک ماسه‌ای می‌باشد. اما به علت فقدان مطالعات صحرایی در این گونه

از خاک‌ها، ضرایب جذب و جدا شدن 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 خاک‌ها نیز مؤید این مطلب می‌باشد [۱۸].

جدول ۳- مقادیر پارامترهای ورودی در مدل‌سازی حرکت ویروس در خاک‌های ماسه‌ای، ماسه لومی و لوم ماسه‌ای

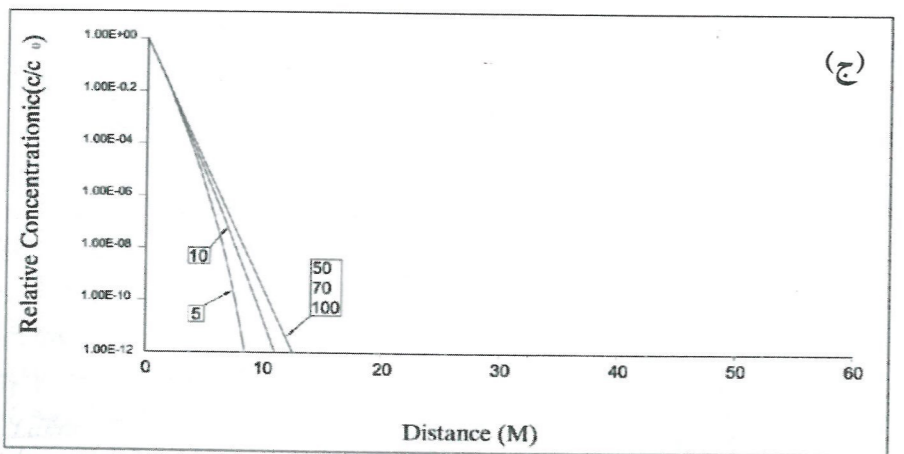
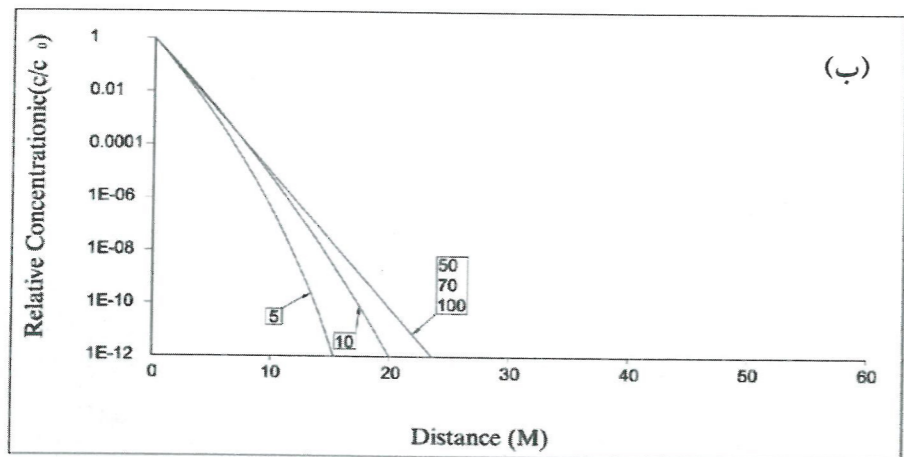
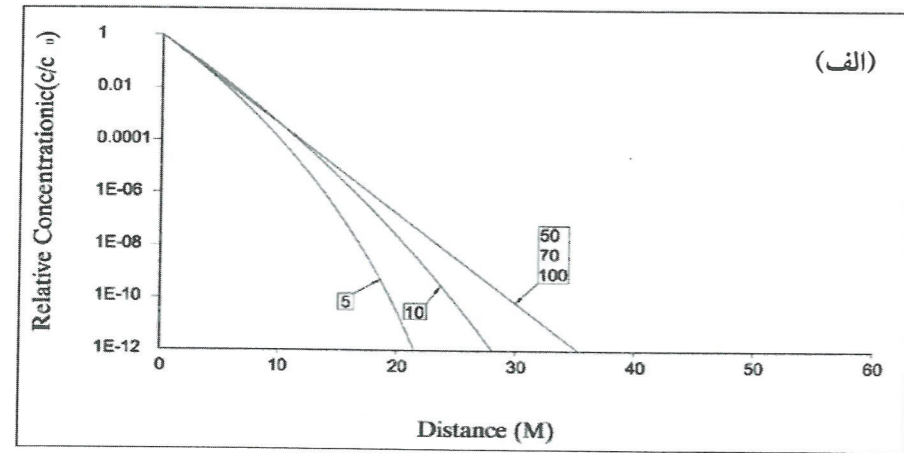
مقدار/ نوع	پارامتر
MS2	نوع ویروس یا باکتریوفاز
۱۰	دمای آب زیرزمینی (°C)
۰/۰۳	$\mu_1 (\text{day}^{-1})$
۰/۰۹	$\mu_s (\text{day}^{-1})$
۰/۸	$K_{att} (\text{day}^{-1})$
۰/۰۰۳	$K_{det} (\text{day}^{-1})$

جدول ۴- مقادیر پارامترهای ورودی در مدل‌سازی حرکت ویروس در خاک‌های مختلف

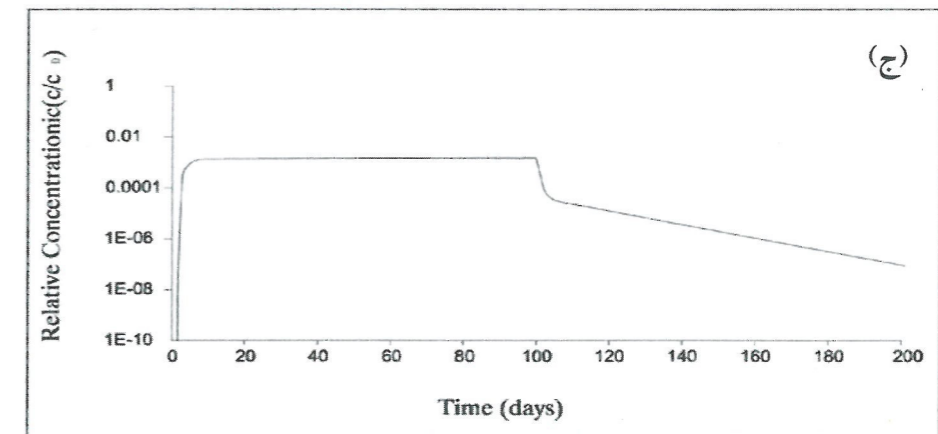
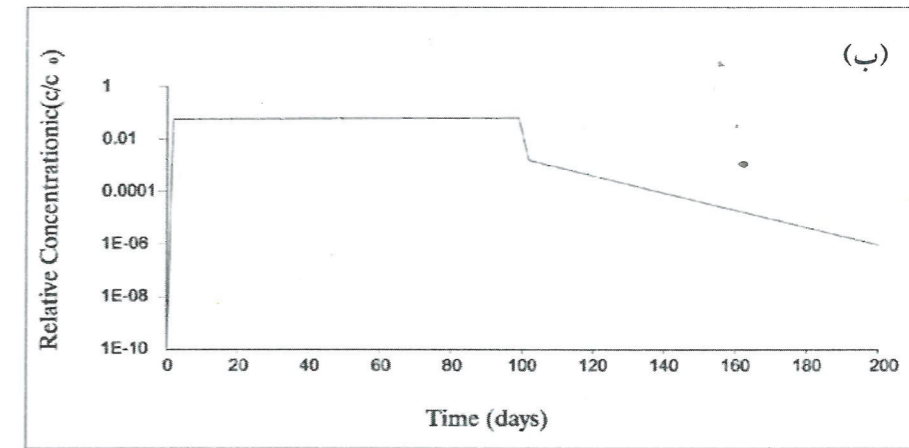
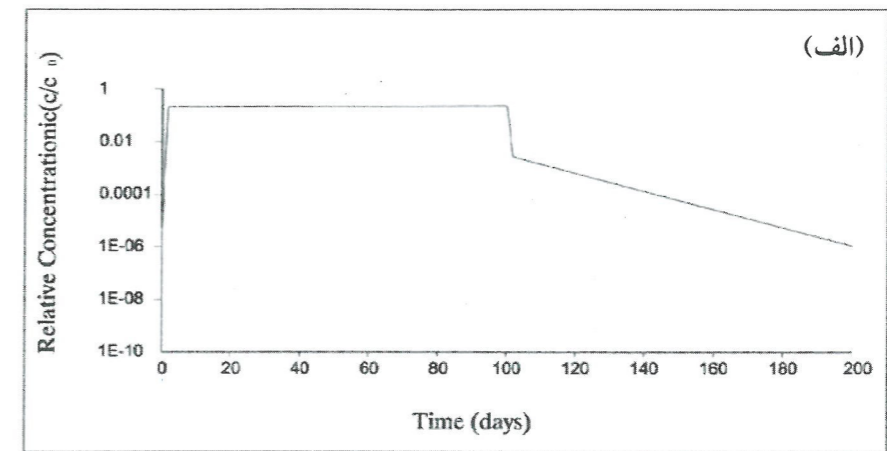
مقدار/ نوع						پارامتر
خاک لوم ماسه‌ای		خاک ماسه لومی		خاک ماسه‌ای		
حرکت عمودی	حرکت افقی	حرکت عمودی	حرکت افقی	حرکت عمودی	حرکت افقی	
۵۰۰	۳۵۰	۵۰۰	۳۵۰	۵۰۰	۳۵۰	$\alpha_1 (\text{cm})$
۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	زمان نهائی شبیه‌سازی (روز)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	مدت زمان تزریق ویروس (روز)
۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۳۵	طول شبیه‌سازی (متر)
۰/۰۱	۷	۰/۵۱۳	۷	۱/۵۹	۷	غلظت اولیه (پلاک بر میلی لیتر)
۰/۱۰۶	۰/۱۰۶	۳/۵	۳/۵	۷/۱۳	۷/۱۳	هدایت هیدرولیکی اشباع (متر بر روز)
۱/۵۶	۱/۵۶	۱/۵۵	۱/۵۵	۱/۵۵	۱/۵۵	چگالی خاک (گرم بر سانتی متر مکعب)

جدول ۵- نتایج مدل‌سازی حرکت ویروس در خاک اشباع (قبل از رسیدن به حد مجاز،  $\text{Log}_{10}$ )

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



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

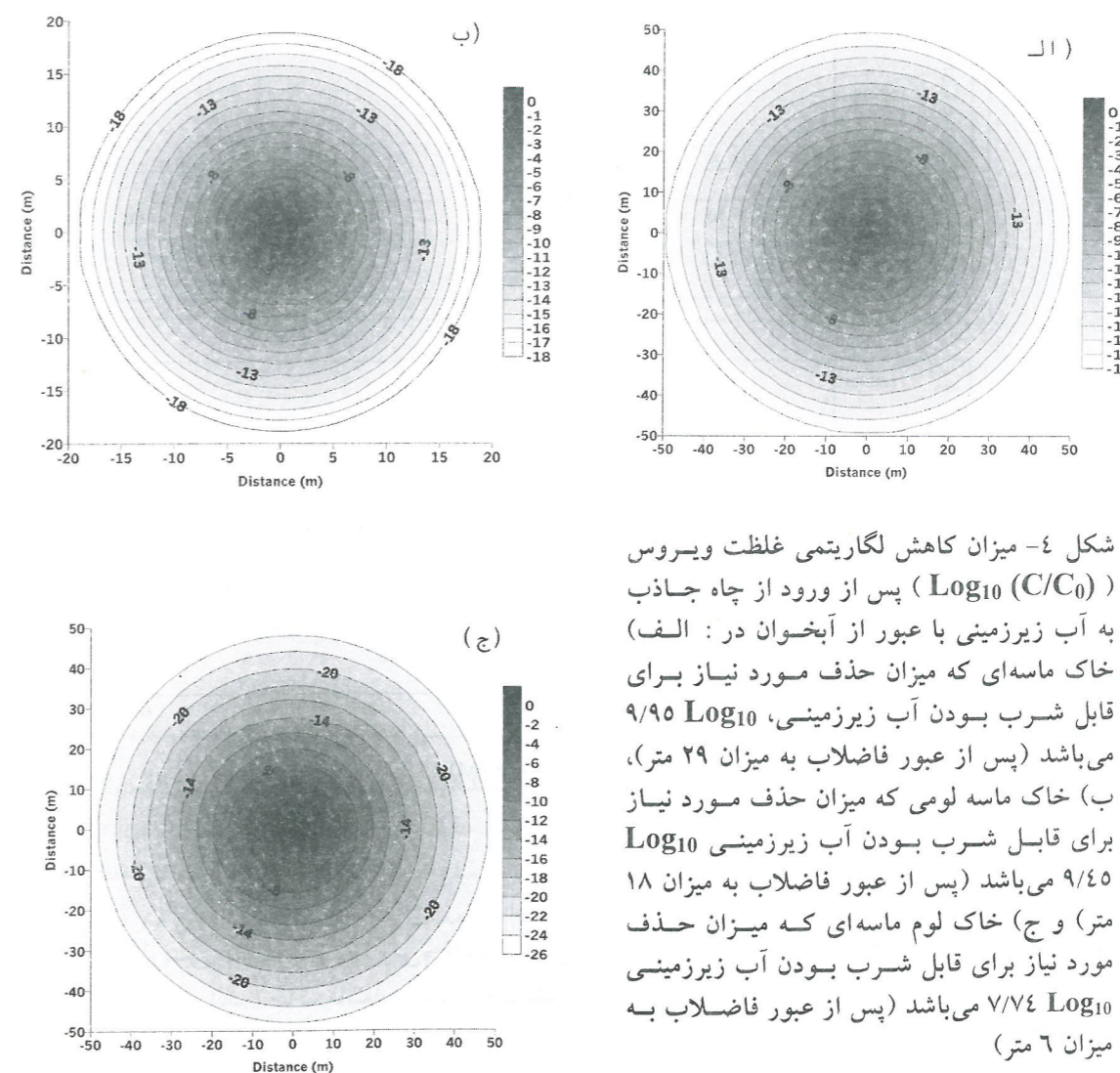


شکل ۲ - منحنی پیشرفت ویروس در جهت عمودی در عمق ۳۵ متر (سطح آب زیرزمینی) در: الف) خاک ماسه‌ای با حداکثر غلظت نسبی ۰/۲۳ (معادل ۱/۵۹ پلاک در میلی لیتر) که میزان حذف در حداکثر غلظت مساوی  $\text{Log}_{10}$  ۰/۶۴ می‌باشد، ب) خاک ماسه لومی با حداکثر غلظت نسبی ۰/۰۷ (معادل ۰/۵۱۳ پلاک در میلی لیتر) که میزان حذف در حداکثر غلظت مساوی  $\text{Log}_{10}$  ۱/۱۳ می‌باشد و ج) خاک لوم ماسه‌ای با حداکثر غلظت نسبی ۰/۰۰۱۴ (معادل ۰/۰۰۹۹ پلاک در میلی لیتر) که میزان حذف در حداکثر غلظت مساوی  $\text{Log}_{10}$  ۲/۸۵ می‌باشد.

حذف ویروس در محیط متخلخل، حاصل از دو فرایند جذب و غیرفعال شدن می‌باشد. این فرایندها 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. ناهمگنی خاک، وجود ترکیبات مختلف در خاک، نوع ویروس و سایر عوامل مؤثر بر دو فرایند 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 ناهمگنی‌های

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 شود.



شکل ۴- میزان کاهش لگاریتمی غلظت ویروس ( $\text{Log}_{10}(C/C_0)$ ) 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،  $\text{Log}_{10} 9/95$  می‌باشد (پس از عبور فاضلاب به میزان ۲۹ متر)، ب) خاک ماسه لومی که میزان حذف مورد نیاز برای قابل شرب بودن آب زیرزمینی  $\text{Log}_{10} 9/45$  می‌باشد (پس از عبور فاضلاب به میزان ۱۸ متر) و ج) خاک لوم ماسه‌ای که میزان حذف مورد نیاز برای قابل شرب بودن آب زیرزمینی  $\text{Log}_{10} 7/74$  می‌باشد (پس از عبور فاضلاب به میزان ۶ متر)

- ۱- احمدپور، پ.، "مدل‌سازی انتقال ویروس در محیط متخلخل اشباع جهت تعیین حریم چاه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۱.
- ۲- نواری، م.، "بررسی اثرات تغییرات سطح آب دریا و هندسه ساحلی بر پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی"، پایان نامه کارشناسی.
- ۳- شریعت پناهی، م.، (۱۳۷۵). "اصول کیفیت و تصفیه آب و فاضلاب"، دانشگاه تهران.
- 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., Rose, J. B., Haas, C. N., and Gerba, C. P., (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., 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 Desrelations Entre la Valeur de la Dispersion Macroscopique d, un Milieu Aquifere, ses Autres Caracterististiques et les Conditions de mesure, Etude Bibliographique", Bulletin., Bureau de Recherches, Geologiques et Minieres. Sec, 3/4: 277-287.