# برآورد هدایت هیدرولیکی پرکلرواتیلن در سیستم دو فازی

منصور چترنور [۱]، مهدی همایی [۲] و محمد محمودیان شوشتری [۳]
۱-دانشجوی کارشناسی ارشد گروه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس، ۲-استاد گروه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس، ۳-استاد گروه عمران، دانشگاه شهید چمران اهواز

## چکیده
آلاینده‌های نامحلول در آب، تحت عنوان فاز مایع غیرآبی (*NAPL*)[۱۵۲] به دلیل اثرات باقیمانده سبب از بین رفتن موجودات زنده می‌شوند. در این پژوهش هدایت هیدرولیکی پرکلرواتیلن به روش بار ثابت در خاکی با بافت *SiL* تعیین و با آب مقایسه گردید که مقدار آن برای پرکلرواتیلن و آب به ترتیب ۹۴/۳۲ و ۳۱/۳۲ سانتی متر بر روز بدست آمد. هدایت هیدرولیکی غیر اشباع دو سیال هم به عنوان تابعی از پتانسیل ماتریک خاک بر پایه‌ی مدل‌های معلم-ون‌گنوختن، معلم- بروکس-کوری و معلم-کوسوگی بدست آمد. مقدار پارامترهای توزیع تخلخل( و ) و پتانسیل ورود هوا به خاک ( ) در مدل‌های معلم- بروکس-کوری و معلم-کوسوگی برای پرکلرواتیلن از آب بیشتر است. در هر سه مدل منحنی هدایت هیدرولیکی پرکلرواتیلن در قسمتهای بیشتر نمودار، بالاتر از آب قرار گرفته است. پرکلرواتیلن به دلیل هدایت هیدرولیکی بیشتری که نسبت به آب دارد در صورت ورود به خاک حرکت سریع تری را به سمت آبهای زیر زمینی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: آلودگی محیط زیست، پرکلرواتیلن، فاز مایع غیر آبی، هدایت هیدرولیکی

## مقدمه
هدایت هیدرولیکی قدرت و توان خاک را در انتقال آب و آلاینده نشان می‌دهد. به طور عمده عوامل مؤثر بر هدایت هیدرولیکی بر منحنی نگهداشت خاک نیز اثر می‌گذارند. از جمله روش‌های پاک‌سازی محیط متخلخل، خروج مواد آلاینده از طریق زهکشی خاک است. پس از زهکشی، مقداری آلاینده تحت تأثیر نیروهای مویینگی به صورت لایه‌ای نازک در سطح ذرات خاک و نیز روی سطح آب منفذی موجود در خاک قرار می‌گیرند . در میان آلاینده‌های نامحلول، کلرواتان‌ها به عنوان آلاینده‌های مهم آبهای زیر زمینی هستند و از جمله کلرواتان‌های رایج می‌توان به پرکلرواتیلن و تری‌کلرواتیلن اشاره نمود .لازمه مطالعه رفتار مواد آلاینده در خاک، آگاهی از ویژگی‌های این ترکیبات و نیز ویژگی‌های هیدرولیکی خاک است. ون‌گنوختن (Van Genuchten, ۱۹۸۰) با تلفیق مدل منحنی رطوبتی ون‌گنوختن و مدل بروکس-کوری با استفاده از مدل معلم معادلاتی را به صورت زیر بدست آورد.

$$K_r = S_e^{(2.5+\frac{2}{\lambda})} \qquad (۱)$$

$$K_r = S_e^{0.5}\{1-[1-S_e^{\frac{1}{m}}]^m\}^2 \qquad (۲)$$

مدل معلم- کوسوگی که با ترکیب مدل معلم (Mualem, ۱۹۷۸) با مدل کوسوگی(Kosugi,۱۹۹۴) بدست آمده است؛ به شرح زیر است:

$$K(S_e) = \begin{cases} K_s S_e^{l}\left\{\frac{1}{2}erfc\left(\frac{\ln(h/a)}{\sqrt{2n}}+\frac{n}{\sqrt{2}}\right)\right\}^2 & h<0 \\ K_s \end{cases} \qquad (۳)$$

ون‌گل و روی از روابط فشار- اشباع (*S-P*) اشباع باقی مانده‌ی *NAPL*ها و بدست آوردن مدلی مناسب برای پیش بینی رفتار آن‌ها در محیط‌های متخلخل استفاده کردند و نتیجه گرفتند هنگامی که تمامی NAPL محیط، شامل *NAPL* باقی مانده و محصور شده باشد نفوذپذیری نسبی *NAPL* به سمت صفر میل خواهد کرد. پارکر و لنهارد ، مدل‌های ون‌گنوختن و معلم-

[۱۵۲]. Nonaqueous Phase Liquids

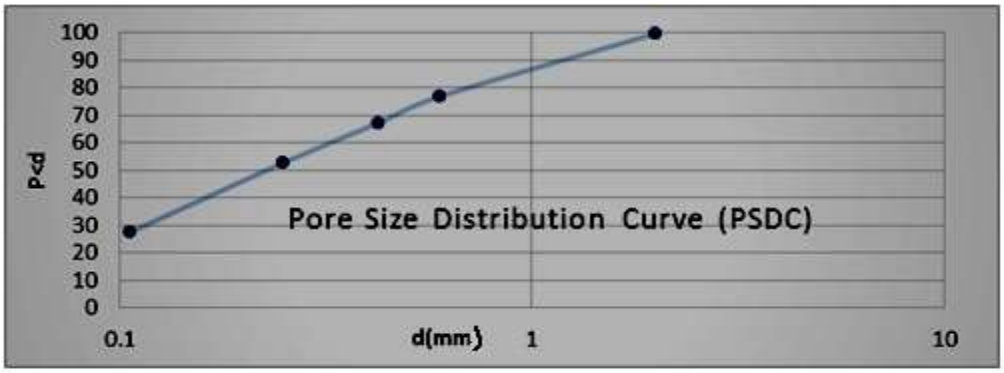
ون‌گنوختن را برای سیستم سه فازی هوا-آب-*NAPL* و سیستم دو فازی *NAPL*-هوا در یک خاک شنی اصلاح کردند. این محققان فرض نمودند که قابلیت خیس‌کنندگی آب بیشتر از *NAPL* و *NAPL* بیشتر از هوا است. هدف از این پژوهش تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع در سیستم دو فازی پرکلرواتیلن-هوا و برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع توسط مدل‌های معلم-ون‌گنوختن، معلم-بروکس‌وکوری، و مدل معلم -کوسوگی، در سیستم‌های دوفازی *NAPL*-هوا است.

## مواد و روش ها

ویژگی‌های فیزیکی و منحنی توزیع اندازه ذرات محیط متخلخل مورد مطالعه در این پژوهش به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ ارائه شده است. پارامترهای فیزیکی $g$ و $dg$ به ترتیب انحراف معیار هندسی و میانگین هندسی قطر ذرات خاک می‌باشند.

**جدول ۱. ویژگی¬های فیزیکی خاک مورد استفاده در پژوهش**

| بافت | تخلخل حجمی (%) | $_b$ (g.cm$^{-3}$) | $_p$ (g.cm$^{-3}$) | dg )mm( | $_g$ |
|---|---|---|---|---|---|
| PGS | ۴۷/۰ | ۲۲/۱ | ۲۹/۲ | ۰۶۶/۱ | /۵۸۳ |




***SiL*** **شکل ۱ منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات خاک**

پرکلرواتیلن با نام اختصاری (*PCE*)، از گروه ترکیبات آلیفاتیک کلردار با فرمول شیمیایی آن ($C_2CL_4$)) و دارای جرم مولکولی و چگالی به ترتیب ۸/۱۶۵ g/ml و ۶/۱ g/ml است. این ترکیب به صورت مایعی فرار، به شدت پایدار و اغلب غیر قابل اشتعال می‌باشد. میزان حلالیت پرکلرواتیلن به میزان ۱۱۵۰ mg/l در ۲۰ $^oC$ است . پرکلرواتیلن تحت شرایط بی هوازی از طریق فرایند هالوژن زدایی احیایی[۱۵۳] به تری کلرواتن (*TCE*)، ایزومرهای دی‌کلرواتان (*DCE*) و سایر ترکیبات همچون وین‌کلرید[۱۵۴] و اتن تبدیل می‌شود (Amin *et al*, ۲۰۰۱).

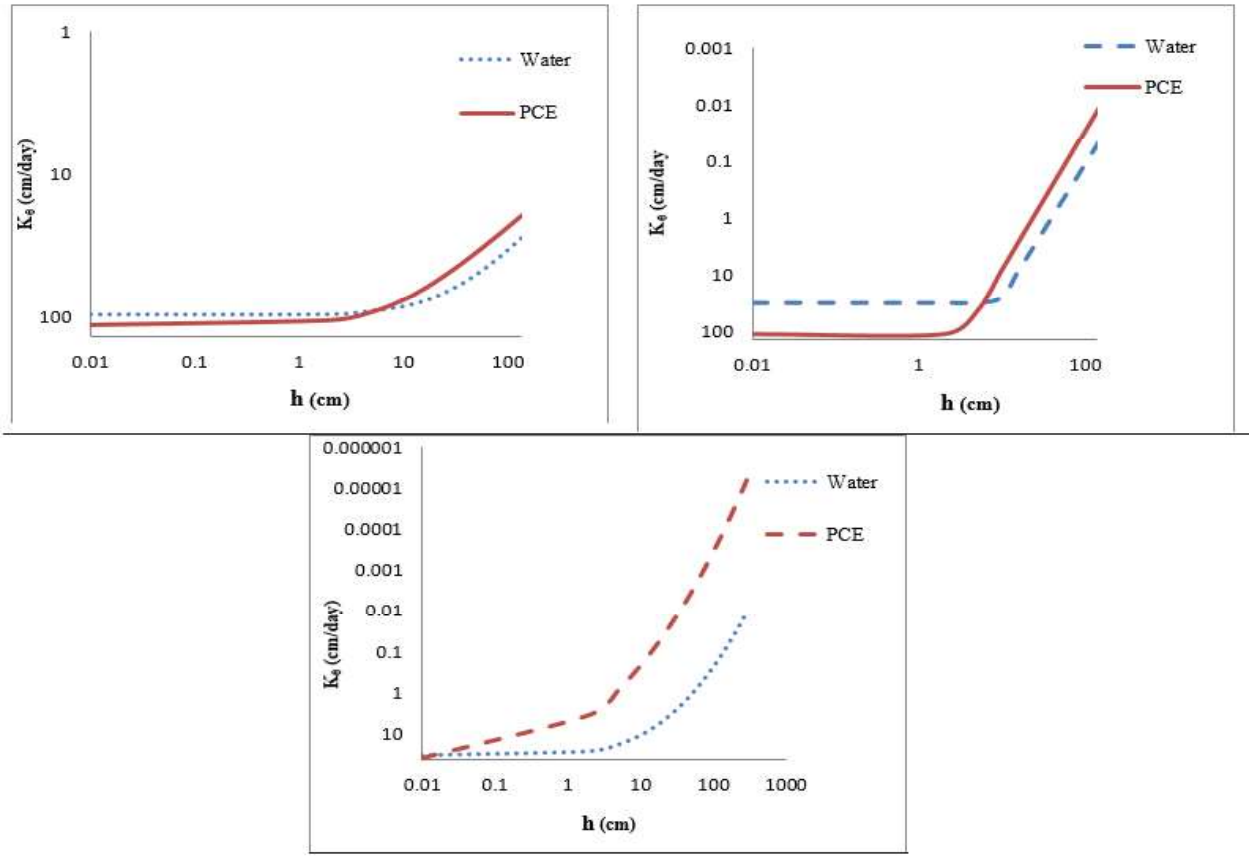
برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع از روش بار پایا یا ثابت[۱۵۵] استفاده شد. مقدار مشخصی از خاک مورد مطالعه در درون استوانه با ابعاد مشخص ریخته شد، عمل فشرده سازی خاک درون استوانه به منظور اعمال جرم مخصوص ظاهری انجام شد. پس از برقراری جریان تحت فشار بار ثابت، دبی سیال عبوری از خاک در مدت زمان مشخص اندازه گیری شد و در نهایت مقدار هدایت هیدرولیکی محیط بدست آمد.

## نتیجه گیری و بحث

شکل ۲ برآورد هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک *SiL* بر مبنای مدل‌های معلم-ون‌گنوختن، معلم-بروکس‌وکوری و معلم-کوسوگی را برای سیالات آب و پرکلرواتیلن نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که در مورد مدل معلم-ون‌گنوختن و معلم-بروکس- کوری، هدایت هیدرولیکی آب در مکش‌های صفر و نزدیک به اشباع (کمتر از ۱۰ سانتی‌متر) بیشتر از پرکلرواتیلن و در مکش‌های بیشتر(بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر) هدایت هیدرولیکی خاک برای پرکلرواتیلن با شدت بیشتری نسبت به آب افزایش می‌یابد و به صورت پرکلرواتیلن> آب است. جداول (۲) پارامترهای مدل‌های هدایت هیدرولیکی معلم-ون‌گنوختن، معلم-بروکس -کوری و

[۱۵۳]. Dehalorespiration
[۱۵۴]. Viny chloride
[۱۵۵].Constant Head Method

معلم- کوسوگی را نشان می‌دهد؛ در بیشتر موارد، پارامترهای توزیع تخلخل (n) در مدل هیدرولیکی معلـم- ون‌گنـوختن بـرای آب از پرکلرواتیلن بیشتر است، در مدل معلم- بروکس-کوری پارامتر برای پرکلرواتیلن بیشترین است و در مدل معلم- کوسوگی هم پارامتر برای پرکلرواتیلن بیشتر است که به رفتار نگهداشت این سیالات در محیط متخلخل مربـوط می‌شـود. پارامترهـای نقطـه مکـش ورود هوا ( ) برای پرکلرواتیلن نسبت آب بیشتر است. همچنین، پارامترهای توزیع تخلخل خاک کمتر از پارامترهای نقطـه مکـش ورود هـوا به خاک تغییر می‌کنند.




**شکل ۲. منحنی‌های هدایت هیدرولیکی خاک *SiL* در سیستم‌های دو فازی برای سیالات آب و پرکلرواتیلن**

**جدول ۲. پارامترهای مدل های منحنی نگهداشت و هدایت هیدرولیکی خاک *SiL***

| سیال | مدل | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | پارامترهای مشترک | | LN | | M-BC و BC, | | | VG-M و VG | | | |
| | $K_s$ (cm.day$^{-1}$) | $\theta_s$ | $\delta$ | $\alpha^*$ | $\theta_r$ | $\lambda$ | $\alpha^*$ | $\ell$ | $\alpha^{-1}$ | m | n |
| پرکلرواتیلن | ۳۹/۹۴ | ۰/۴۱ | ۳/۱۷ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۷ | ۰/۱۵ | ۰/۲۹۵ | ۰/۵ | ۰/۱۲۷ | ۰/۱۱ | ۱/۱۲ |
| آب | ۳۲/۳۱ | ۰/۴۱ | ۲/۲۶ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۳ | ۰/۱۴ | ۰/۱۱ | ۰/۵ | ۰/۰۲۹ | ۰/۲۵ | ۱/۲۵ |

**معلم در مدل کوسوگی، . ۴.پارامتر .در مدل بروکس-کوری، ۳ .در مدل ون گنوختن، ۲ .۱**

## منابع

Amin, M.M., Faraji, M., Momenbeik, F. and Hasanzadeh, A. ۲۰۱۱. Biodegradation of Perchloroethylene (PCE) in the Synthetic Industrial Wastewater Using Anaerobic Migrating Blanket Reactor (AMBR). *Health System Research,*۷.

Huling, S.G. and Weaver, J.W. ۱۹۹۱. *Dense nonaqueous phase liquids*: Superfund Technology Support Center for Ground Water, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory.

Kaseros, V.B., Sleep, B.E. and Bagley, D.M. ۲۰۰۰. Column studies of biodegradation of mixtures of tetrachloroethene and carbon tetrachloride. *Water Research*, ۳۴(۱۷): ۴۱۶۱-۴۱۶۸.

Kosugi, K. ۱۹۹۴. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Resources Research*, ۳۰(۴): ۸۹۱-۹۰۱.

Mualem, Y. ۱۹۷۸. Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: generalized macroscopic approach. *Water Resources Research*, ۱۴(۲): ۳۲۵-۳۳۴.

Parker, J. and Lenhard, R. ۱۹۸۷. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow: ۱. Saturation-pressure relations. *Water Resources Research*, ۲۳(۱۲): ۲۱۸۷۲۱۹۶

Schwille, F. and Pankow, J.F. ۱۹۸۸. Dense chlorinated solvents in porous and fractured media- model experiments

Van Geel, P. and Roy, S. ۲۰۰۲. A proposed model to include a residual NAPL saturation in a hysteretic capillary pressure-saturation relationship. *Journal of contaminant hydrology*, ۵۸(۱): ۷۹-۱۱۰.

van Genuchten, M.T. ۱۹۸۰. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J*, ۴۴(۵): ۸۹۲-۸۹۸.

**Abstract**

The water-insoluble contaminants such as Nonaqueous Phase Liquids, destroy the organisms due to residual effects. In this study, the hydraulic conductivity of Perchloroethylene in clay textured soil was determined by constant head method and compared tothat of water. The value of hydraulic conductivity was measured to be ۳۲.۹۴ and ۳۲.۳۱ cm. day$^{-۱}$ for Perchloroethylene and water, respectively. The unsaturated hydraulic conductivity for both fluids as function of matric potential obtained based on Mualem-Brooks-Corey, Mualem-van Genuchten and Mualem-Kosugi models was larger than that of water. The value of pore size distribution perameters (i.e. and ) and air entry value parameter ( ) in Mualem-Brooks-Corey and Mualem-Kosugi models for Perchloroethylene was larger than water. In most places of the chart, the hydraulic conductivity curve of Perchloroethylene in three models, is located above the water, due to the different physical properties of the fluids. Perchloroethylene has more hydraulic conductivity compared to water and it would move much faster to the groundwater if entered into the soil.