

## اثر تحکیم روی ضریب انتشار مولکولی یون کلر در یک خاک رسی

کاظم بدو<sup>۱\*</sup>، مجید فرشباغ<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۱۲

۱- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: k.badv@urmia.ac.ir

### چکیده

به علت کمبودن تخلخل و آهسته بودن سرعت جریان آب در خاک‌های رسی، مهمترین مکانیزم انتقال آلودگی انتشار مولکولی است. در این تحقیق اثر تحکیم خاک رس روی ضریب انتشار مولکولی یون کلر بررسی گردید. نمونه خاک از منطقه نازلو واقع در شمال غرب شهرستان ارومیه تهیه شده و پس از تعیین مشخصات فیزیکی، پارامترهای تحکیم خاک تعیین گردید. برای تعیین ضریب انتشار مولکولی یون کلر در درجات تحکیم متفاوت در یک بازه تنش افزایشی و سپس کاهش، نمونه استوانه‌ای شکل خاک پس از رسیدن به میزان تحکیم مشخص در دستگاه تحکیم، تحت آزمایش انتشار مولکولی قرار گرفته و ضریب انتشار مولکولی آن اندازه‌گیری شد. این کار با استفاده از کد کامپیوتری POLLUTE و با برآزش داده‌های نظری روی داده‌های مشاهده‌ای غلظت- زمان انجام گردید. نتایج نشان داد که با افزایش میزان تحکیم خاک و کاهش نسبت تخلخل آن از ۰/۴ به ۰/۳۵ در بازه تنش ۲۵ kPa تا ۴۰۰ kPa، ضریب انتشار مولکولی از  $5/94 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  به  $5/36 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  کاهش یافت. در مرحله باربرداری تحکیم از ۴۰۰ kPa تا ۵۰ kPa ضریب انتشار مولکولی خاک از  $5/36 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  به  $5/42 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  افزایش یافت. نتایج این مطالعه نشان داد که روند انتشار آلودگی به طریقه انتشار مولکولی در خاک رسی نازلو، تابعی از میزان تحکیم این خاک است لیکن اثر تحکیم در کاهش ضریب انتشار مولکولی خاک قابل ملاحظه نیست. تطابق خوب داده‌های مشاهده‌ای و نظری نشان داد که مدل فیزیکی طراحی شده، روش‌های آزمایشگاهی به کار گرفته شده و مدل نظری استفاده‌شده از دقت خوبی برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی: تحکیم، خاک رسی نازلو، ضریب انتشار مولکولی، نسبت تخلخل، POLLUTE

## Effect of Consolidation on Chloride Diffusion Coefficient in a Clayey Soil

K Badv<sup>\*1</sup>, M Farshbaf<sup>2</sup>

Received: 6 January 2015 Accepted: 2 July 2016

1-Prof., Dept. of Civil Engin., Univ. of Urmia. Iran

2-M.Sc. Student, Dept. of Civil Engin., Univ. of Urmia. Iran

\*Corresponding Author, Email: k.badv@urmia.ac.ir

### Abstract

Due to low porosity and slow water flow in clayey soils, the dominant pollutant transport mechanism may be molecular diffusion. The effect of consolidation of clayey soil on the chloride diffusion coefficient was investigated. The soil sample was collected from Nazloo region on North West of Urmia. After determination of soil physical parameters, the consolidation parameters were obtained. For determination of the chloride diffusion coefficient at different degrees of consolidation, when the cylindrical soil sample reached a certain degree of consolidation in the consolidation apparatus, the diffusion test was conducted and the diffusion coefficient was measured. This was conducted by the computer code POLLUTE by fitting the computed data on the observed concentration-time data. The results showed that by increasing the degree of consolidation and decreasing the soil void ratio from 0.4 to 0.35, in the range of stresses from 25 kPa to 400 kPa, the diffusion coefficient decreased from  $5.94 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s to  $5.36 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. In the unloading process of consolidation from 400 kPa to 50 kPa the diffusion coefficient increased from  $5.36 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s to  $5.42 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. The results of this study showed that the process of pollutant migration by molecular diffusion in the fine grained clayey soil of Nazloo was dependent on the degree of consolidation of the soil but the effect of consolidation on the decrease of soil diffusion coefficient is not significant. The good agreement between the observed and predicted data showed that the designed physical model, the adopted laboratory procedures and the theoretical model had good accuracy.

**Keywords:** Consolidation, Molecular diffusion coefficient, Nazloo clayey soil, POLLUTE, Void ratio

مولکولی از یک نقطه به نقطه دیگر خاک، اختلاف (یا گرادیان) غلظت است و پارامتر این مکانیزم حرکتی ضریب انتشار مولکولی<sup>۲</sup> است (رو و همکاران ۲۰۰۴، بدو و نجفزاده ۱۳۹۱، بدو ۱۳۹۲). این ضریب تابع عوامل متعددی چون رطوبت، درجه حرارت و درجه تحکیم خاک است و تغییر هرکدام از این عوامل موجب

### مقدمه

به دلیل نفوذپذیری کم و سرعت آهسته آب، مکانیزم حرکت غالب برای عناصر شیمیایی در خاک-های ریزدانه، مکانیزم انتشار مولکولی<sup>۱</sup> است (رو و بدو ۱۹۹۶a، ۱۹۹۶b، بدو و رو ۱۹۹۶، شکلفورد و دانیل ۱۹۹۱، رو و همکاران ۲۰۰۴). عامل اصلی انتشار

<sup>2</sup> - Molecular diffusion coefficient

<sup>1</sup> - Molecular diffusion

افزایش تحکیم آستر رسی، منافذ خاک کوچکتر شده و ضریب نفوذپذیری برای آب و ضریب انتشار مولکولی آن کاهش می‌یابد (رو و همکاران ۲۰۰۴). با کاهش ضریب نفوذپذیری خاک، میزان عناصر شیمیایی عبوری از میان آستر رسی در اثر انتقال توده‌ای آب (ادویشن<sup>۲</sup>) کاهش یافته و با کاهش ضریب انتشار مولکولی، میزان عناصر شیمیایی عبوری در اثر پدیده انتشار مولکولی نیز کاهش یافته و موجب می‌شود بار آلودگی منتقل شده از کف مدفن زباله به سفره‌های آب زیر مدفن کاهش یابد.

تا کنون مطالعات زیادی درخصوص ارتباط بین افزایش تحکیم و کاهش ضریب نفوذپذیری خاک انجام پذیرفته است (شکل‌فورد و جاود ۱۹۹۱، بدو و زادکریم ۱۳۸۲، آهنگر عصر و همکاران ۲۰۱۰) لیکن در خصوص ارتباط بین افزایش تحکیم و کاهش ضریب انتشار مولکولی خاک تحقیقات کمی صورت پذیرفته است. در این مطالعه با انجام یک سری آزمایش‌های آزمایشگاهی ارتباط بین این دو پارامتر خاک مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه پاسخ دادن به این سوال بوده است که افزایش تحکیم خاک تا چه میزان ضریب انتشار مولکولی یک عنصر شیمیایی را در خاک کاهش می‌دهد و آیا این کاهش قابل ملاحظه است و به- طرز قابل ملاحظه‌ای موجب کاهش انتقال آلودگی در خاک در اثر پدیده انتشار مولکولی می‌شود یا خیر؟

### تحکیم و انتشار مولکولی

گرچه پدیده تحکیم با پدیده انتشار مولکولی عناصر شیمیایی در خاک دو پدیده کاملاً متفاوت هستند لیکن از دیدگاه نظری از یک مدل ریاضی تبعیت می‌کنند. معادله تحکیم به صورت زیر نوشته می‌شود (ترزاقی و پک ۱۹۶۷):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad [1]$$

تغییر ضریب انتشار مولکولی عنصر شیمیایی در خاک می‌شود (پورتر و همکاران ۱۹۶۰، بدو ۱۹۹۵، شکل‌فورد و لی ۲۰۰۵، پاپاچریستودولو و همکاران ۲۰۰۷).

لایه‌های خاک سطحی که برای کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند در اثر عوامل متعددی به مرور زمان تحکیم پیدا کرده و حجم منافذ خاک کوچکتر می‌شود. از میان این عوامل به فشار روبار ناشی از رفت و آمدهای ترافیکی (مانند رفت و آمد ماشین‌آلات کشاورزی)، بارگذاری سطحی (مانند دپوی محصولات کشاورزی در سطح خاک) و افت سطح آب زیرزمینی (در اثر بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی) می‌توان اشاره کرد. در اثر تحکیم و کوچک‌تر شدن منافذ خاک، خصوصیات ژئوتکنیکی مربوط به حرکت آب و آلودگی در خاک مانند ضریب نفوذپذیری و ضریب انتشار مولکولی کاهش می‌یابند. ارتباط بین تحکیم و ضریب نفوذپذیری خاک توسط محققان زیادی بررسی شده و مشخص گردیده است که اگر خاک با درجه رطوبتی حدود ۲ الی ۴ درصد بیشتر از رطوبت بهینه متراکم شود دارای کمینه ضریب نفوذپذیری خواهد بود (دانیل و بنسون ۱۹۹۰، بدو ۱۳۸۷، زنگ ۲۰۱۰).

در کف مدفن‌های زباله که با اصول مهندسی- بهداشتی ساخته می‌شوند از لایه‌های رسی متراکم شده (آسترهای رسی<sup>۱</sup>) استفاده می‌شود. در روی این آستر رسی، لایه زهکش شیرابه قرار می‌گیرد. مجموع این دو لایه به سیستم مانع انتقال آلودگی<sup>۲</sup> معروف است. وظیفه این سیستم، جمع‌آوری شیرابه و جلوگیری از حرکت آن به طرف لایه‌های خاک زیر مدفن زباله و سفره‌های آب زیرزمینی است. هنگامی که زباله به مرور زمان در داخل مدفن تخلیه و دفن می‌شود و ارتفاع آن بالا می‌رود، بار ناشی از انبوه زباله‌ها به لاینرهای رسی زیر مدفن فشار آورده و باعث تحکیم آنها می‌شوند. با

<sup>1</sup> - Clayey liners

<sup>2</sup> - Barrier system

<sup>3</sup> - Advection

$$f = - nD_e \frac{dc}{dz} \quad [5]$$

از آنجا که غلظت مواد شیمیایی در خاک (مانند عناصر موجود در شیرابه در کف مدفن زباله) در اثر انتشار به لایه‌های زیر سطحی خاک به مرور زمان کم می‌شود، در اغلب اوقات پدیده انتشار مولکولی در خاک به صورت غیر ماندگار<sup>۴</sup> اتفاق می‌افتد. در این حالت انتشار مولکولی بصورت معادله ۶ که به قانون دوم فیک<sup>۵</sup> معروف است تعریف می‌شود (رو و همکاران ۲۰۰۴):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad [6]$$

با مقایسه معادله ۶ با معادله ۱ تشابه این دو معادله از نظر ریاضی مشخص می‌شود. بدین صورت که در پدیده تحکیم، کاهش (یا استهلاک) اضافه فشار آب حفره‌ای خاک متناسب با ضریب تحکیم خاک ( $C_v$ ) در طول زمان اتفاق می‌افتد. در پدیده انتشار مولکولی غیرماندگار نیز، کاهش غلظت عنصر شیمیایی در خاک متناسب با ضریب انتشار مولکولی مؤثر آن عنصر در خاک ( $D_e$ ) در طول زمان کاهش می‌یابد. بنابراین در پدیده تحکیم پارامتر ضریب تحکیم همان نقشی را بازی می‌کند که پارامتر ضریب انتشار مولکولی مؤثر در پدیده انتشار مولکولی در خاک بازی می‌کند.

### مواد و روش‌ها

خاک مورد آزمایش در این تحقیق از منطقه نازلوی ارومیه که در قسمت شمالغرب شهرستان ارومیه و در نزدیکی دانشگاه ارومیه واقع شده است نمونه برداری شد. قبل از انجام آزمایش‌های تحکیم و انتشار مولکولی، برای پی‌بردن به خواص فیزیکی خاک، آزمایش‌های دانه‌بندی با دو روش الک کردن و هیدرومتری، حدود اتربرگ، چگالی ویژه و تراکم انجام

در این معادله  $u$  اضافه فشار آب حفره‌ای<sup>۱</sup> ( $PL^{-2}$ )،  $t$  زمان سپری شده پس از شروع تحکیم ( $T$ )،  $C_v$  ضریب تحکیم ( $L^2T^{-1}$ ) و  $Z$  عمق خاک یا فاصله نقطه مورد نظر تا سطح لایه مورد تحکیم می‌باشد ( $L$ ). طبق معادله تحکیم، اضافه فشار آب حفره‌ای خاک ( $u$ ) در طول زمان ( $t$ ) با میزانی معادل ضریب تحکیم خاک مستهلک شده و خاک تحکیم پیدا می‌کند.

پدیده انتشار مولکولی در خاک به دو صورت یکنواخت و غیر یکنواخت می‌تواند صورت پذیرد (رو و همکاران ۲۰۰۴). انتشار مولکولی یکنواخت از معادله ۲ تبعیت می‌کند که به قانون اول فیک<sup>۲</sup> معروف است (دات و لو ۱۹۶۲، کمپر و ون شیک ۱۹۶۶):

$$f = - D_p \frac{dc}{dz} \quad [2]$$

در این معادله  $f$  جرم منتقل شده در خاک در واحد سطح و واحد زمان (شار جرمی)<sup>۳</sup> ( $M$ )،  $D_p$  ضریب انتشار مولکولی محیط متخلخل خاک ( $L^2T^{-1}$ )، و  $dc$  اختلاف غلظت یون در یک فاصله معین  $dz$  در داخل خاک است. ضریب انتشار مولکولی محیط متخلخل خاک  $D_p$  با رابطه زیر به ضریب انتشار مولکولی مؤثر خاک  $D_e$  مربوط می‌شود (گیلهام و چری ۱۹۸۲، گیلهم و همکاران ۱۹۸۴):

$$D_p = \theta D_e \quad [3]$$

در این معادله  $\theta$  ( $L^3 L^{-3}$ ) رطوبت حجمی خاک است. اگر خاک اشباع باشد پوکی خاک ( $n$ ) جایگزین  $\theta$  می‌شود. این دو پارامتر با درجه اشباع خاک ( $S$ ) توسط معادله ۴ به هم مربوط می‌شوند:

$$\theta = Sn \quad [4]$$

با جاگذاری معادلات ۳ و ۴ در داخل معادله ۲، این معادله بصورت زیر در می‌آید:

<sup>4</sup> - Non-steady state

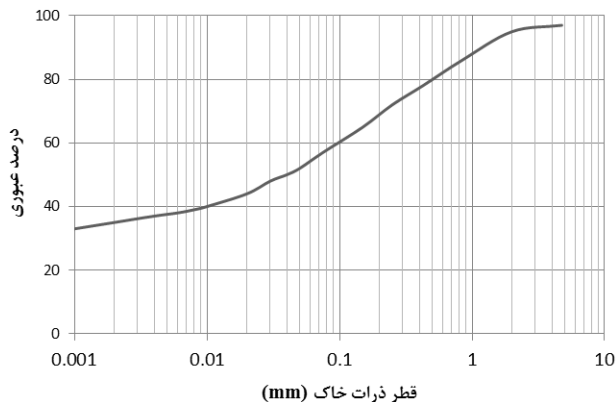
<sup>5</sup> - Fick's second law

<sup>1</sup> - Excess pore water pressure

<sup>2</sup> - Fick's first law

<sup>3</sup> - Mass flux

مشخصات بوده و می‌تواند به‌عنوان مصالح خاکی مناسب برای ساخت آستر رسی مورد استفاده قرار گیرد.



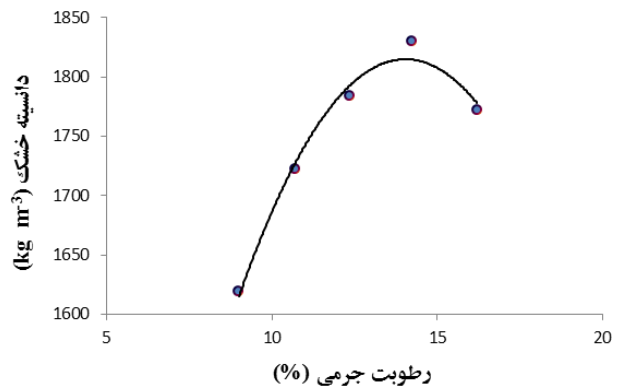
جدول ۱- مشخصات مکانیکی خاک رس نازلو.

نوع خاک	کلاس بافت	رطوبت بهینه تراکم	دانسیتته خشک
		(%)	(kg m <sup>-3</sup> )
رس	CL	۱۴	۱۸۱۴
حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیری	چگالی ویژه
(%)	(%)	(%)	(Gs)
۲۷	۱۶	۱۱	۲/۶۷

برای حفظ یکنواختی و حصول اطمینان از یکسان بودن نمونه‌های خاک، تمام آزمایش‌های تحکیم - انتشار مولکولی با استفاده از یک توده خاک قبلاً آماده شده رس نازلو که دارای رطوبت یکسان ۳ درصد بیشتر از رطوبت بهینه بود، انجام پذیرفت. طبق تحقیقات انجام پذیرفته، خاک که در درجه رطوبت بهینه دارای بیشترین چگالی خشک خود است، دارای کمترین ضریب نفوذپذیری خود نیست؛ بلکه کمترین نفوذپذیری در بازه رطوبتی حدود ۲ الی ۴ درصد بیش از رطوبت بهینه حاصل می‌شود (دانیل ۱۹۹۳، دانیل و بنسون ۱۹۹۰).

شدند. شکل ۱ منحنی دانه‌بندی و شکل ۲ منحنی تراکم خاک را نشان می‌دهد. در جدول ۱ نیز مشخصات مکانیکی نتیجه شده از این آزمایش‌ها روی خاک نازلو خلاصه شده است. طبق جدول ۱، این خاک بدلیل دارا بودن شاخص خمیری (PI) ۱۱٪ و درجه رطوبت حد روانی (LL) ۲۷٪ مطابق چارت کاساگرانده، خاک رسی با خاصیت خمیری کم است (CL). مطابق منحنی دانه-بندی نشان داده شده در شکل ۱، این خاک دارای ۳۴٪ رس، ۲۰٪ سیلت (لای)، ۴۰٪ ماسه و ۶٪ شن است و لذا نوع خاک را می‌توان با عنوان "ماسه رسی با مقداری سیلت و کمی شن" شناسایی نمود (بی‌نام ۲۰۰۶). در ادامه متن به اختصار از نام "رس نازلو" برای این خاک استفاده شده است.

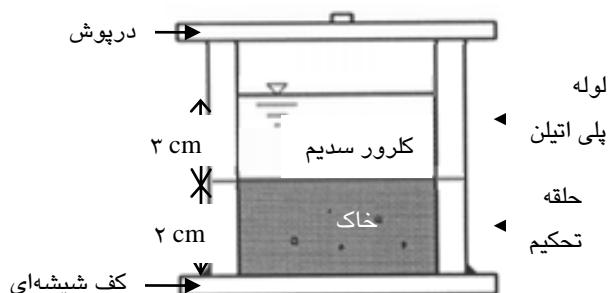
شکل ۱- منحنی دانه‌بندی خاک رس نازلو.



شکل ۲- منحنی تراکم خاک رس نازلو.

خاک‌های رسی که برای آسترهای رسی در کف مدفن‌های زباله مهندسی استفاده می‌شوند در کنار سایر مشخصات تعریف شده در کم‌ترین حالت باید دارای ۱۵ الی ۲۰ درصد دانه‌های عبوری از الک ۲۰۰ (کوچکتر از ۲ میکرون) و شاخص خمیری بیش از ۷٪ باشند (رو ۲۰۰۱، رو و همکاران ۲۰۰۴). بنابراین خاک رس نازلو بدلیل دارا بودن شاخص خمیری ۱۱٪ و دارا بودن بیش از ۲۰٪ درصد عبوری از الک ۲۰۰، دارای این

۱۰۰۰ و ۳ cm و مدت زمان آزمایش ۳۰ ساعت بود. هر آزمایش برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج، دو بار تکرار شده و تمامی آزمایش‌ها در دمای  $22 \pm 2$  درجه سلسیوس انجام شدند. شکل ۳ بطور مصور مدل فیزیکی آزمایش را نشان می‌دهد. در آزمایش‌ها تنها مکانیزم حرکتی یون کلر به داخل خاک به طریقه انتشار مولکولی به دلیل وجود اختلاف غلظت یون کلر در مخزن و داخل خاک بود و هیچ جریان آبی به داخل خاک وجود نداشت زیرا خاک اشباع بوده و کف خاک مسدود بود.



شکل ۳- مدل مصور آزمایش انتشار مولکولی با حلقه تحکیم.

در طول آزمایش‌های انتشار مولکولی، از مخزن حاوی محلول کلرور سدیم در ۱۰ نوبت نمونه‌برداری شد. پس از هر نمونه‌برداری معادل حجم محلول برداشت شده از مخزن، آب مقطر به مخزن اضافه گردید تا سطح محلول در مخزن ثابت بماند. رقیق شدن غلظت محلول در مخزن در اثر اضافه کردن آب مقطر، در محاسبات نظری توسط کد کامپیوتری که در ادامه توضیح داده شده است در نظر گرفته شد. در پایان آزمایش، غلظت یون کلر در محلول‌های نمونه‌برداری شده با استفاده از دستگاه یون متر ( Microprocessor pH/ION Meter ساخت شرکت WTW آلمان) اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از داده‌های غلظت، نمودارهای مشاهده‌ای غلظت- زمان برای هر آزمایش ترسیم گردید که در ادامه توضیح داده شده است. در آزمایش‌ها به-

روش در نظر گرفته شده برای سلسله آزمایش‌های تحکیم - انتشار مولکولی بدین صورت بود که ابتدا خاک در داخل دستگاه تحکیم تحت تنش مورد نظر قرار گرفته و پس از تحکیم تحت آن تنش، آزمایش انتشار مولکولی روی آن انجام پذیرفته و ضریب انتشار مولکولی خاک برای یون کلر در آن درجه تحکیم، به دست آمد. مقرر گردید این آزمایش‌ها برای دوباره بارگذاری و باربرداری تحکیم انجام پذیرد تا اثر تنش- های رفت و برگشتی روی ضریب انتشار مولکولی خاک مشخص شود. برای این منظور ابتدا خاک رس نازلو با رطوبتی حدود ۳ درصد بیشتر از رطوبت بهینه یعنی با رطوبت ۱۷٪ در داخل مولد تراکم مطابق روش تراکم پروکتور استاندارد<sup>۱</sup> کوبیده شد (دانیل و بنسون ۱۹۹۰). سپس با فشار دادن حلقه تحکیم به قطر ۲ اینچ (۵/۰۸ cm) در سطح خاک کوبیده شده، نمونه‌ای از خاک با ارتفاعی برابر با ۲/۵ cm داخل حلقه تحکیم قرار گرفته و در داخل محفظه ادومتر دستگاه تحکیم قرار داده شد و تنش مورد نظر به خاک اعمال شد. مقادیر تنش‌ها در حالت‌های بارگذاری و باربرداری در ادامه شرح داده شده است. پس از تحکیم تحت تنش مورد نظر، خاک به همراه حلقه تحکیم از داخل دستگاه تحکیم خارج و استوانه‌ای از جنس پلی اتیلین که قطر داخلی آن با قطر خاک داخل حلقه برابر بود، روی حلقه نصب شده و کف حلقه نیز با یک صفحه شیشه‌ای با استفاده از چسب آکواریوم مسدود گردید. سپس محلول کلرور سدیم با غلظت  $1000 \text{ mg L}^{-1}$  یون کلر، در بالای خاک به ارتفاع ۳ cm ریخته شده و آزمایش انتشار مولکولی آغاز شد. میزان رطوبت خاک قبل از تماس با محلول کلرور سدیم و بعد از تماس با آن تغییر محسوسی نداشت. در مجموع ۷ آزمایش انتشار مولکولی انجام پذیرفت که در تمامی آنها قطر و ارتفاع نمونه خاک به ترتیب ۵/۰۸ cm و ۲/۵ cm، غلظت پیشینه یون کلر در خاک  $120 \text{ mg L}^{-1}$ ، غلظت و ارتفاع محلول کلرور سدیم به ترتیب  $1 \text{ mg L}^{-1}$

<sup>۱</sup> - Standard proctor compaction method

می‌شود. این شرط مرزی با معادله زیر تعریف می‌شود (رو و همکاران ۲۰۰۴):

$$c(t, z=0) = c_0 - \frac{1}{H_f} \int_0^t f(c, t, z=0) dt \quad [7]$$

در معادله  $\nu$ ،  $f(c, t, z=0)$  شار آلودگی جرمی عبوری از سطح خاک (عمق  $z=0$ ) با غلظت  $c$  و در طول زمان  $t$  می‌باشد. بنابراین  $c(t, z=0)$  غلظت یون کلر در هر لحظه  $t$  در سطح بالای خاک (عمق  $z=0$ )،  $c_0$  غلظت اولیه یون کلر (در ابتدای آزمایش) در سطح خاک و  $H_f$  ارتفاع محلول کلرور سدیم در مخزن بالای خاک (شکل ۳) می‌باشد.

از مرز پائین (کف) خاک به دلیل مسدود بودن با یک صفحه شیشه‌ای هیچ جرمی از یون کلر نمی‌تواند عبور کند، لذا به این مرز، مرز با "شار جرمی صفر"<sup>۳</sup> گفته شده و با معادله زیر تعریف می‌شود (رو و همکاران ۲۰۰۴):

$$c(t) = -D_s \frac{\partial c}{\partial z} = 0, (z=L) \quad [8]$$

کد کامپیوتری POLLUTE برای انجام محاسبات و پیش‌بینی نظری روند تغییرات غلظت یون کلر در سطح خاک در تماس با مخزن کلرور سدیم در طول زمان، داده‌های زیر را لازم دارد: (الف) داده‌های خاک شامل ارتفاع، دانسیته خشک، پوکی، ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک و شرایط مرزی بالا و پائین خاک، (ب) غلظت اولیه یون کلر در مخزن بالای خاک در زمان صفر (لحظه شروع آزمایش) و غلظت پیشینه<sup>۴</sup> یون کلر در خاک، و (ج) مدت زمان آزمایش و تعداد زمان-هایی که غلظت در مخزن بالا باید محاسبه شوند. از میان این داده‌ها، تنها ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک نامعلوم است که این ضریب به صورت سعی و خطایی به نرم‌افزار معرفی می‌شود. بدین صورت که در چندین نوبت این ضریب داده شده و در هر نوبت نتایج

دلیل ضخامت کم خاک رس (۲ cm) اندازه‌گیری غلظت در ارتفاع خاک میسر نبود.

### مدل نظری انتشار مولکولی و شرایط مرزی حاکم

برای پیش‌بینی رفتار مدل آزمایشگاهی انتشار مولکولی و محاسبه نظری داده‌های غلظت-زمان برای یون کلر، از کد کامپیوتری POLLUTE استفاده شد (رو و بوکر ۱۹۹۴). این کد از روش لایه محدود<sup>۱</sup> برای محاسبات استفاده می‌کند که یک روش مناسب برای تحلیل انتقال آلودگی در خاک‌های با لایه‌های افقی است؛ طوری که خصوصیات هر لایه در جهت افقی ثابت باشد. در این حالت، معادلات حاکم می‌توانند با معرفی تبدیلات لاپلاس و فوریه (برای حالت‌های دو و سه بعدی) ساده‌سازی شده و براحتی حل شوند. روش لایه محدود ابتدا توسط رو و بوکر معرفی شد (رو و بوکر ۱۹۸۷، ۱۹۸۵a,b) و سپس در کد کامپیوتری POLLUTE برای شرایط انتقال آلودگی به صورت یک و نیم‌بعدی به کار گرفته شد. یک و نیم بعدی بودن به این معنی است که مدل می‌تواند حرکت آلودگی در جهت قائم در خاک را در نظر گرفته (بعد یک) و هم زمان جریان افقی آب در سفره آب زیرزمینی در زیر خاک را نیز مدل کند (بعد نیم).

شرایط مرزی بالا و پائین خاک در مدل فیزیکی انتشار مولکولی که در شکل ۳ نشان داده شد به شرح زیر است. سطح بالایی خاک که در تماس با مخزن حاوی محلول کلرور سدیم است بدلیل دارا بودن جرم مشخصی از یون کلر در ابتدای انتشار مولکولی، دارای شرط مرزی "جرم محدود"<sup>۲</sup> است؛ بدین معنی که غلظت و جرم یون کلر در ابتدای آزمایش دارای مقدار معینی بوده و در طول زمان (در طول مدت آزمایش) در اثر انتشار مولکولی یون کلر به داخل خاک، از غلظت و جرم یون کلر در مخزن بالای خاک (مرز بالایی خاک) کاسته

<sup>3</sup> - Zero flux

<sup>4</sup> - Background concentration

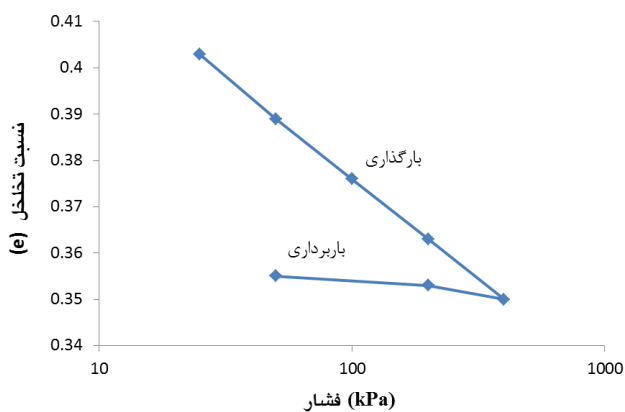
<sup>1</sup> - Finite layer technique

<sup>2</sup> - Finite mass

یعنی نشانه تحکیم دست نخورده ( $C_c$ )، نشانه انقباض ( $C_s$ ) و ضریب تحکیم ( $C_v$ ) به ترتیب برابر با ۰/۰۱۲۷، ۰/۰۰۱۴ و  $۱۰\text{ m}^2\text{ s}^{-1} \times ۱۰^{-۲۳}$  نتیجه شدند.

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های تحکیم خاک رس نازلو.

تنش تحکیمی (kPa)	کاهش ارتفاع (mm)	نسبت تخلخل (e)
۰	۰	۰/۴۰۹
۲۵	۰/۱۱	۰/۴۰۳
۵۰	۰/۳۲	۰/۳۸۹
۱۰۰	۰/۵۹	۰/۳۷۶
۲۰۰	۰/۸۱	۰/۳۶۳
۴۰۰	۱/۰۴	۰/۳۵۰
۲۰۰	۱/۰۰	۰/۳۵۳
۵۰	۰/۹۶	۰/۳۵۵



شکل ۴- منحنی تحکیم خاک رس نازلو.

### نتایج آزمایش‌های انتشار مولکولی

نتایج آزمایش‌های انتشار مولکولی در جدول ۳ خلاصه شده‌اند. شکل ۵ نیز نمودارهای مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده (نظری) غلظت- زمان در مخزن بالای خاک را نشان می‌دهند. مطابق نتایج نشان داده شده در جدول ۳ و شکل ۵، ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک رس نازلو در بازه افزایش تنش (بارگذاری) ۲۵ تا

محاسبات نرم‌افزار (نتایج پیش بینی شده غلظت- زمان) روی نتایج مشاهده‌ای غلظت- زمان ترسیم شده و آن ضریب انتشار مولکولی که بهترین تطابق را بین نتایج مشاهده‌ای و نتایج پیش بینی شده نشان دهد، به‌عنوان ضریب انتشار مولکولی مؤثر یون کلر در خاک آزمایش شده انتخاب می‌شود. در ادامه، نتایج آزمایش‌های انجام شده شرح داده شده است.

### نتایج و بحث

#### نتایج آزمایش‌های تحکیم

جدول ۲ نتایج آزمایش‌های تحکیم روی خاک رس نازلو را نشان می‌دهد. هم‌چنان‌که در جدول ۲ دیده می‌شود، تنش‌های اعمال شده در مرحله بارگذاری عبارت بودند از صفر، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال. تنش‌های اعمال شده در مرحله باربرداری نیز عبارت بودند از ۴۰۰، ۲۰۰ و ۵۰ کیلوپاسکال. این میزان از تنش‌ها در محدوده تنش‌هایی قرار داشتند که یک خاک رسی استفاده شده در لایه (لایزر) رسی زیر یک مدفن زباله مهندسی معمولاً تحت آن تنش‌ها قرار می‌گیرد. در جدول ۲ کاهش ارتفاع و نسبت تخلخل نهایی نمونه خاک در مقابل مقادیر تنش‌های تحکیمی مربوطه قید شده‌اند. مطابق جدول ۲، نسبت تخلخل نمونه خاک از مقدار ۰/۴۰۹ در تنش صفر به مقدار ۰/۳۵۰ تحت تنش بیشینه ۴۰۰ کیلوپاسکال کاهش یافته و سپس در اثر باربرداری تا ۵۰ کیلوپاسکال، به مقدار ۰/۳۵۵ افزایش می‌یابد.

شکل ۴ منحنی تحکیم خاک رس نازلو را نشان

می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش تنش نسبت تخلخل خاک کاهش یافته و سپس در اثر باربرداری نسبت تخلخل افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۴ (و جدول ۲) افزایش نسبت تخلخل خاک در مرحله باربرداری ناچیز است. درصد کاهش و سپس افزایش نسبت تخلخل به- ترتیب ۱۴/۴ درصد (کاهش) و ۱/۴ درصد (افزایش) می‌باشد. از شکل ۴ پارامترهای تحکیم خاک رس نازلو



ماهوتی ۲۰۰۴، ۲۰۰۵، بدو و جعفری ۲۰۱۳). محدوده مقادیر مندرج در جدول ۳ در داخل محدوده مقادیر گزارش شده برای رس‌ها یعنی  $10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \times (3-8)$  می‌باشد.

از مجموعه نتایج آزمایش‌های تحکیم و انتشار مولکولی روی خاک رس نازلو چنین می‌توان نتیجه گرفت که برای خاک آزمایش شده و در محدوده تنش‌ها و تحکیم اعمال شده روی این خاک، افزایش تحکیم خاک موجب کاهش نسبت تخلخل خاک به میزان حدود ۱۴ درصد و کاهش ضریب انتشار مولکولی یون کلر در این خاک به میزان حدود ۱۰ درصد شد. این میزان کاهش ضریب انتشار مولکولی برای یک خاک ریزدانه متراکم شده قابل ملاحظه نبوده و می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که تحکیم و فشردن خاک‌های رسی در طبیعت (مانند خاک‌های کشاورزی) و در پروژه‌های مهندسی (مانند مدفن‌های بهداشتی - مهندسی زیاله) تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کندتر شدن حرکت عناصر شیمیایی و کاهش انتشار آلودگی در خاک‌های ریزدانه رسی به طریقه انتشار مولکولی ندارد.

#### تحلیل حساسیت ضریب انتشار مولکولی

از ویژگی‌های خوب استفاده از کد محاسباتی مانند POLLUTE، ضمن پیش‌بینی رفتار مدل فیزیکی و تعیین پارامتر انتقال آلودگی (مانند ضریب انتشار مولکولی در این مطالعه)، امکان بررسی حساسیت پارامترها بر رفتار مدل مطالعه شده با استفاده از تحلیل‌های حساسیت است. برای این منظور تحلیل‌های حساسیت پارامترهای متعدد که در رفتار مدل فیزیکی اثرگذار هستند انجام پذیرفت و حساسیت هرکدام از پارامترها بررسی شد (فرشباغ ۱۳۹۱).

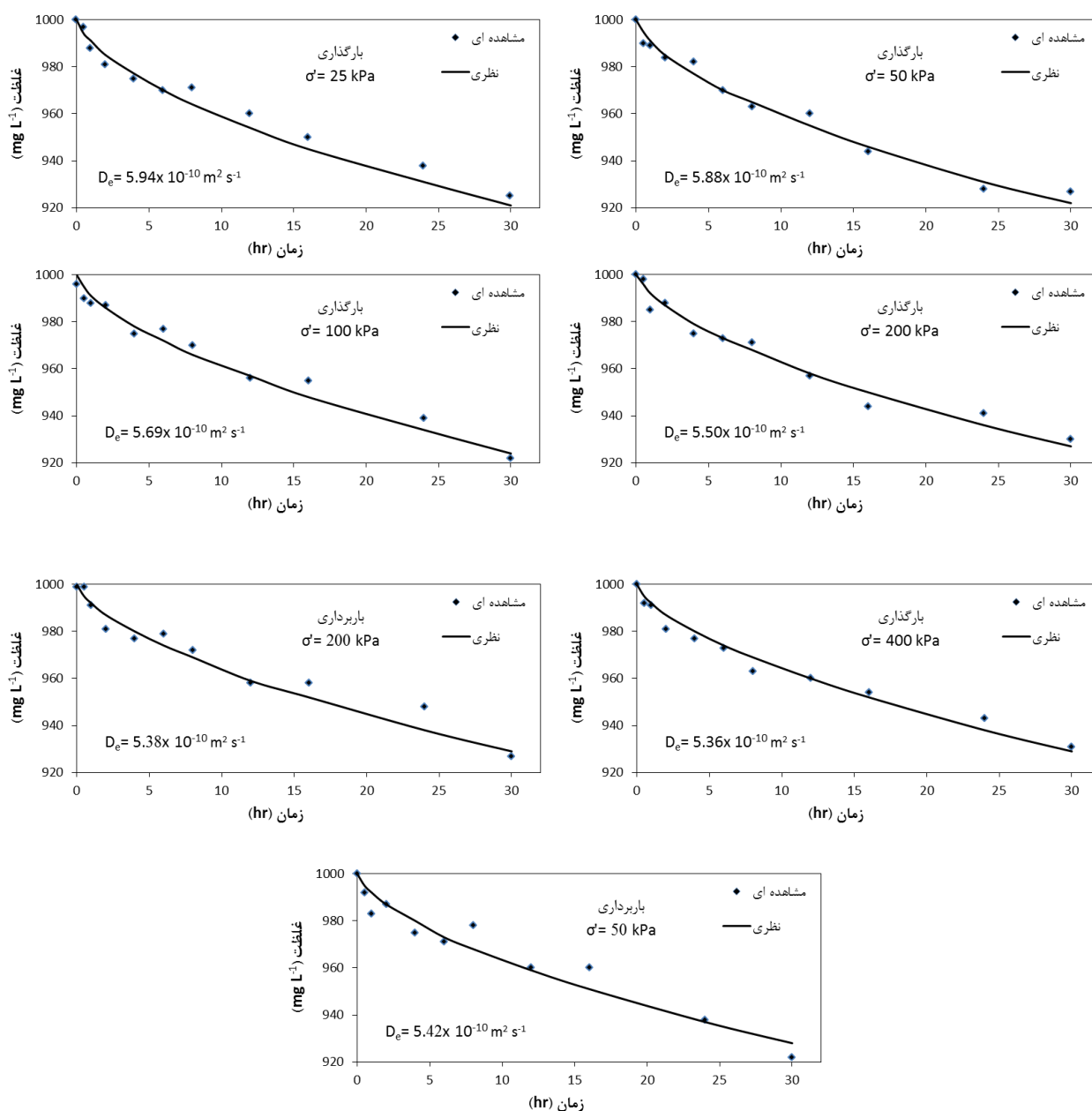
۴۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب از مقدار  $10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \times 9/4$  به مقدار  $10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \times 5/36$  کاهش یافته است. این میزان کاهش حدود ۹/۸ درصد می‌باشد. با افزایش تنش خاک، نسبت تخلخل و حجم حفرات خاک کاهش یافته، مسیر آبی در دسترس برای انتشار مولکولی عناصر شیمیایی (در اینجا یون‌های کلر و سدیم) تنگ‌تر و پیچ‌در پیچ‌تر شده (اعوجاج بیشتر) و در نتیجه ضریب انتشار مولکولی عنصر شیمیایی کاهش می‌یابد. در بازه کاهش تنش (باربرداری) از ۴۰۰ الی ۵۰ کیلوپاسکال، ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک از مقدار  $10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \times 5/36$  به مقدار  $10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \times 5/42$  افزایش یافته است. این میزان افزایش حدود ۱/۱ درصد و ناچیز است.

#### جدول ۳- نتایج آزمایش‌های انتشار مولکولی خاک رس

##### نازلو

شماره نمونه	نوع فشار اعمال شده	فشار اعمالی (kPa)	نسبت تخلخل خاک (%)	ضریب انتشار مولکولی یون کلر ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )
۱		۲۵	۰/۴۰۳	$5/94 \times 10^{-10}$
۲		۵۰	۰/۳۹۷	$5/88 \times 10^{-10}$
۳	بارگذاری	۱۰۰	۰/۳۷۹	$5/69 \times 10^{-10}$
۴		۲۰۰	۰/۳۶۳	$5/50 \times 10^{-10}$
۵		۴۰۰	۰/۳۵۱	$5/36 \times 10^{-10}$
۶	باربرداری	۲۰۰	۰/۳۵۲	$5/38 \times 10^{-10}$
۷		۵۰	۰/۳۵۵	$5/42 \times 10^{-10}$

مقادیر ضریب انتشار مولکولی به دست آمده برای رس نازلو در این مطالعه با مقادیر ضریب انتشار مولکولی خاک‌های رسی مشابه که دارای نسبت تخلخل قابل مقایسه‌ای بودند و توسط محققان در مطالعات دیگر گزارش شده‌اند هم‌خوانی دارند (شکل‌فورد و دانیل ۱۹۹۱، بدو و عیسی‌زاده ۱۳۸۴، رو و بدو ۱۹۹۶a، بدو و



شکل ۵ - تغییرات غلظت یون کلر در مخزن بالای خاک در طول زمان در آزمایش‌های انتشار مولکولی تحت تنش‌های مختلف: بارگذاری (۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال) و باربرداری (۲۰۰ و ۵۰ کیلوپاسکال).

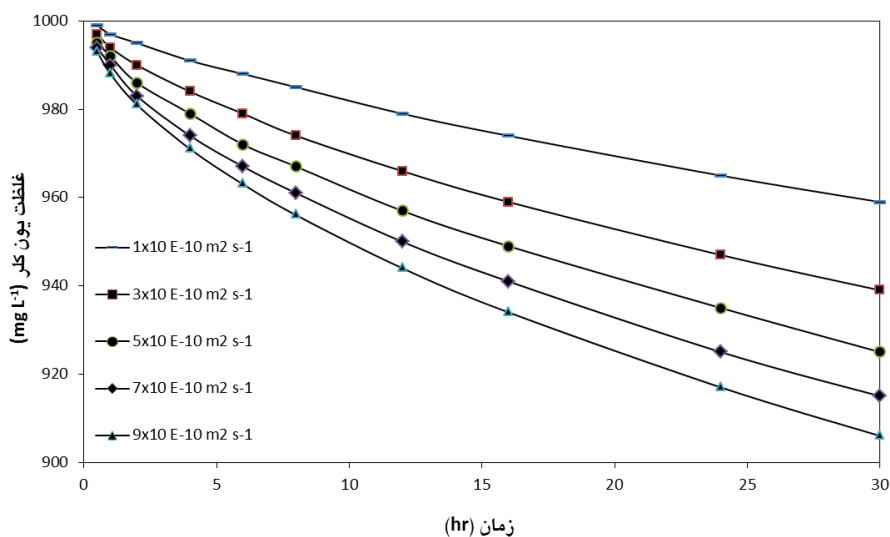
تا  $10^{-10}$  تا  $9 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  تغییر یافته و نمودارهای پیش‌بینی شده (نظری) مطابق شکل‌های ۶ و ۷ رسم گردیدند. هم‌چنان‌که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، هنگامی‌که ضریب انتشار مولکولی خاک  $10^{-10}$  تا  $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  فرض شده است، غلظت یون کلر در سطح خاک (مرز خاک و محلول کلرور سدیم) پس از مدت ۳۰ ساعت، از  $1000 \text{ mg L}^{-1}$  به  $959 \text{ mg L}^{-1}$  کاهش یافته است ( $41 \text{ mg L}^{-1}$  یا  $4/1$

در شکل‌های ۶ و ۷ نتایج تحلیل حساسیت ضریب انتشار مولکولی یون کلر در نمودارهای غلظت-زمان و غلظت عمق خاک نشان داده شده است. این تحلیل بدین‌منظور انجام پذیرفت که نقش این پارامتر در تغییرات غلظت در مرز بالای خاک آزمایش شده بطور کمی مشخص گردد. در تحلیل‌ها ضمن ثابت نگه‌داشتن کلیه داده‌ها، ضریب انتشار مولکولی از  $10^{-10}$  تا  $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

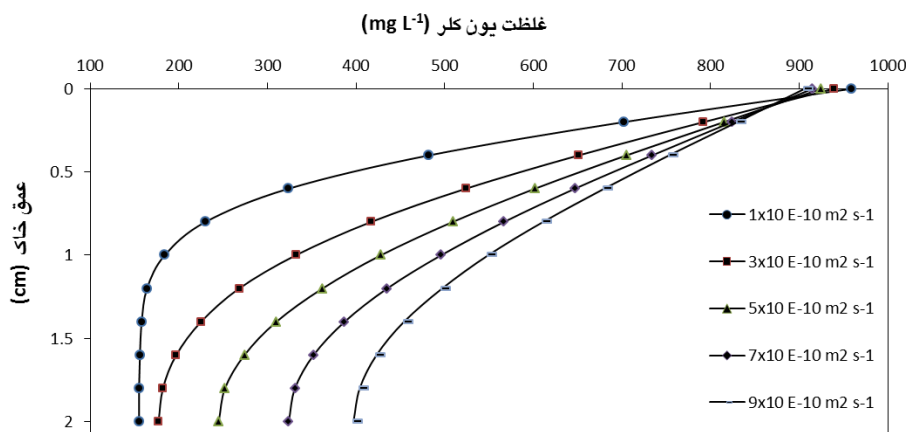
فرض شود، غلظت یون کلر در کف خاک به مقدار  $\text{mg L}^{-1}$   $397$  می‌رسد. یعنی افزایش ۹ برابری ضریب انتشار مولکولی باعث انتقال جرم بیشتری از یون کلر به کف خاک شده و در این محاسبه این مقدار از نظر کمی  $2/5$  برابر است.

نتایج محاسبات نشان می‌دهد که تغییرات غلظت در سطوح بالایی و پایینی خاک برای شرایط در نظر گرفته شده آزمایشگاهی با اشل کوچک (در این مطالعه)، برای پارامتر ضریب انتشار مولکولی خاک از حساسیت متوسطی برخوردار بوده و این محاسبات برای شرایط محیطی و در اشل صحرایی (مانند یک لاینر  $1/5$  متری در کف مدفن زباله) باید کنترل شود تا میزان حساسیت این پارامتر بهتر مشخص گردد.

درصد کاهش). در صورتی که اگر ضریب انتشار مولکولی ۹ برابر یعنی  $9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  فرض شود، غلظت یون کلر در سطح خاک از  $1000 \text{ mg L}^{-1}$  در زمان صفر به  $906 \text{ mg L}^{-1}$  بعد از ۳۰ ساعت کاهش می‌یابد ( $\text{mg L}^{-1}$  ۹۴ یا  $9/4$  درصد کاهش). یعنی افزایش ۹ برابری ضریب انتشار مولکولی باعث بالا رفتن میزان انتشار مولکولی به داخل خاک و در نتیجه کاهش غلظت در سطح خاک به میزان حدود  $2/3$  برابر می‌شود (با استناد به شکل ۶ و توضیحات اشاره شده در بالا، عدد  $2/3$  از تقسیم کردن عدد  $9/4$  به عدد  $4/1$  حاصل شده است). در کف خاک نیز مطابق شکل ۷ هنگامی که ضریب انتشار مولکولی خاک  $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  فرض شده است، غلظت یون کلر در کف خاک پس از مدت ۳۰ ساعت، به مقدار  $155 \text{ mg L}^{-1}$  رسیده است. در صورتی که اگر ضریب انتشار مولکولی ۹ برابر یعنی  $9 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$



شکل ۶- تغییرات غلظت یون کلر نسبت به زمان در سطح خاک با ضرایب انتشار مولکولی مختلف.



شکل ۷- تغییرات غلظت یون کلر نسبت به عمق خاک با ضرایب انتشار مولکولی مختلف.

### نتیجه‌گیری کلی

با استفاده از سری آزمایش‌های آزمایشگاهی با استحکام و انتشار مولکولی به‌طور متناوب، اثر تحکیم روی ضریب انتشار مولکولی خاک رس منطقه نازلوی شهرستان ارومیه بررسی گردید. پس از هر مرحله از بارگذاری (یا باربرداری)، آزمایش انتشار مولکولی یون کلر روی خاک انجام پذیرفته و ضریب انتشار مولکولی خاک با تطبیق‌سازی داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده (با استفاده از مدل نظری) تعیین گردید. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که با افزایش تحکیم و کاهش نسبت تخلخل، مجاری آبی عبوری برای حرکت عناصر شیمیایی در محیط متخلخل خاک تنگ‌تر شده، اعوجاج مسیر بیشتر شده و ضریب انتشار مولکولی خاک کاهش می‌یابد. در مرحله بارگذاری در بازه تنش ۱۴ تا ۲۵ کیلوپاسکال نسبت تخلخل خاک حدود ۱۴ درصد کاهش یافت که موجب شد ضریب انتشار مولکولی خاک حدود ۱۰ درصد کاهش یابد. این میزان کاهش ضریب انتشار مولکولی برای یک خاک رسی ریزدانه متراکم شده، قابل ملاحظه نبوده و می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که تحکیم و فشردن این نوع خاک توسط عوامل طبیعی و یا انسانی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کندتر شدن حرکت عناصر شیمیایی و

کاهش انتشار آلودگی به طریقه انتشار مولکولی ندارد. در بازه کاهش تنش (باربرداری) از ۴۰۰ تا ۵۰ کیلوپاسکال، ضریب انتشار مولکولی فقط حدود ۱ درصد افزایش یافت که خیلی ناچیز است.

نتایج تحلیل حساسیت روی پارامتر ضریب انتشار مولکولی خاک نشان داد که این پارامتر برای شرایط در نظر گرفته شده در این مطالعه از حساسیت متوسطی برخوردار است لیکن باید این محاسبات برای شرایط محیطی و در اشل بزرگتر صحرایی کنترل شود تا میزان حساسیت این پارامتر بهتر مشخص گردد.

تطابق خوب نتایج آزمایشگاهی با نتایج محاسباتی به‌دست آمده از کد کامپیوتری POLLUTE نشان داد که روش‌ها و مدل‌های آزمایشگاهی به‌کار گرفته شده و مدل نظری استفاده شده از دقت خوبی برخوردار هستند.

### فهرست علائم

$u$	اضافه فشار آب حفره‌ای
$C_v$	ضریب تحکیم
$D_p$	ضریب انتشار مولکولی محیط متخلخل
$D_e$	ضریب انتشار مولکولی مؤثر
$\theta$	درجه رطوبت حجمی
$n$	درجه پوکی

$C_0$	غلظت اولیه	$S$	درجه اشباع
$H_f$	ارتفاع محلول	$f$	شار جرمی

### منابع مورد استفاده

- بدو ک، ۱۳۹۲. اصول مهندسی دفن زباله - مبانی طراحی لندفیل‌ها. انتشارات دانشگاه ارومیه، ۴۹۷ صفحه.
- بدو ک، ۱۳۸۷. مکانیک خاک. انتشارات دانشگاه ارومیه، چاپ دوم ۱۳۹۳، ۲۲۸ صفحه.
- بدو ک و عیسی‌زاده ب، ۱۳۸۴. شبیه سازی سیستم های تله هیدرولیکی طبیعی و مهندسی در مدفن زباله با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی یک بعدی سه لایه‌ای. مجله علمی پژوهشی هیدرولیک، جلد اول، شماره ۱، صفحه‌های ۵۵ تا ۶۸.
- بدو ک و زادکریم س، ۱۳۸۲. مطالعه آزمایشگاهی نفوذپذیری سه محوری مصالح هسته مرکزی و پرده آب بند سد خاکی شهر چای ارومیه، صفحه‌های ۱ تا ۸، چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شیراز، ایران.
- بدو ک و نجف‌زاده م، ۱۳۹۲. مقایسه عملکرد لایه‌های مانع انتقال آلودگی با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۲، صفحه‌های ۷۱ تا ۸۴.
- فرشباغ م، ۱۳۹۱. مطالعه رابطه خصوصیات تحکیم‌پذیری و انتشار مولکولی خاک رس منطقه نازلوی ارومیه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ۱۱۳ صفحه.
- Ahangar-Asr A, Faramarzi A, Mottaghifard N and Javadi AA, 2010. Modeling of permeability and compaction characteristics of soils using evolutionary polynomial regression. *Computers and Geosciences* 37(11): 1960-1969.
- Anonymous, 2006. *Canadian Foundation Engineering Manual*. 4<sup>th</sup> Edition, Edmonton, Canada.
- Badv K, 1995. Diffusive and advective-diffusive transport through saturated and unsaturated soils. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Western Ontario, London, Canada, p. 522.
- Badv K and Rowe RK, 1996. Contaminant transport through a soil liner underlain by an unsaturated stone collection layer. *Canadian Geotechnical Journal* 33: 416-430.
- Badv K and Mahooti AA, 2004. Advective-diffusive and hydraulic trap modeling in two and three layer soil systems. *Journal of Science and Technology* 28(B5): 559-572.
- Badv K and Mahooti AA, 2005. Chloride transport in layered soil systems with hydraulic trap effect. *Environmental Technology* 26(8): 885-897.
- Badv K and Jafari H, 2013. Laboratory modeling of two-dimensional diffusive and advective-diffusive chloride transport through silt and clay. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 37(C2): 311-324.
- Daniel DE, 1993. *Clay Liners, Geotechnical Practice for Waste Disposal*. New York, Chapman and Hall 137-163.
- Daniel DE and Benson CH, 1990. Water content-density criteria for compacted soil liners. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering* 116(12): 1811-1830.
- Dutt GR and Low PF, 1962. Diffusion of alkali chlorides in caly-water systems. *Soil Science* 93: 233-240.
- Kemper WD and van Schail JC, 1966. Diffusion of salts in clay-water systems. *Soil Science Society of America Proceedings* 30: 534-540.
- Gillham RW and Cherry JA, 1982. Contaminant migration in saturated unconsolidated geologic deposits. Special Paper 189, Geophysical Society of America. Boulder, U.S.A.
- Gillham RW Robin MJL Dytynshyn DJ and Johnson HM, 1984. Diffusion of nonreactive and reactive solutes through fine-grained barrier materials. *Canadian Geotechnical Journal* 21: 541-550.

- Papachristodoulou C, Ioannides K and Spathis S, 2007. The effect of moisture content on radon diffusion through soil: assessment in laboratory and field experiments. *Health Physics* 92(3): 257-264
- Porter, LK, Kemper, WD, Jackson RD and Stewart BA, 1960. Chloride diffusion in soils as influenced by moisture content. *Proceedings Soil Science Society of America* 24: 460-463.
- Rowe RK, 2001. Liner systems. Pp. 739-788. In: Rowe RK (eds). *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook*. Kluwer Academic Publishers.
- Rowe RK and Badv K, 1996a. Chloride migration through clay underlain by fine sand or silt. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 122(1): 60-68.
- Rowe RK and Badv K, 1996b. Advective-diffusive contaminant migration in unsaturated coarse sand and fine gravel. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 122(12): 965-975.
- Rowe RK and Booker JR, 1994. 1D pollutant migration through a non-homogeneous soil, POLLUTE version 6. Distributed by GAEA Environmental Engineering Ltd., 44 Canadian Oaks Drive, Whitby, Ontario, Canada.
- Rowe RK and Booker JR, 1985a. 1-D pollutant migration in soils of finite depth. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE* 111(GT4): 479-499.
- Rowe RK and Booker JR, 1985b. 2-D pollutant migration in soils of finite depth. *Canadian Geotechnical Journal* 22(4): 429-436.
- Rowe RK and Booker JR, 1987. An efficient analysis of pollutant migration through soil. Pp. 13-42. In: Lewis RW, Hinton E, Bettess P and Schrefler BA (eds). *Numerical Methods in Transient and Coupled Systems*. John Wiley.
- Rowe RK, Quigley RM, Brachman RWI and Booker JR, 2004. *Barrier Systems for Waste Disposal Facilities*. Taylor & Francis Books Ltd (E & FN Spon) London, 587 p.
- Shackelford CD and Daniel DE, 1991. Diffusion in a saturated soil, II. Results for compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE* 117: 485-505.
- Shackelford CD and Javed F, 1991. Large-scale laboratory permeability testing of a compacted clay soil. *Geotechnical Testing Journal* 14(2): 171-179.
- Shackelford CD and Lee JM, 2005. Analyzing diffusion as analogy with consolidation. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131(11): 1345-1359.
- Terzaghi K and Peck R, 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice* 2nd Edition. John Wiley, New York.
- Zhang F, 2010. Soil water retention and relative permeability for full range of saturation. US Department of Energy, Publication No. PNNL-19800, 30P. Oak Ridge, TN, U.S.A.