

برآورد انتقال بخار آب در خاک‌های غیراشباع تحت تأثیر پتانسیل اسمزی

مصطفی گودرزی^۱، سید فرهاد موسوی^{۲*}، مجید بهزاد^۳ و هادی معاضد^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۷/۲)

چکیده

آگاهی از فرآیند انتقال کودهای شیمیایی، مواد رادیواکتیو و دیگر مواد محلول در خاک و محیط‌های متخلخل برای درک آثار زیست‌محیطی و اقتصادی بسیاری از شیوه‌های دفع فاضلاب‌های صنعتی، کشاورزی و شهری از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در این تحقیق، اثر نیروی اسمزی (حاصل از شوری‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد) بر انتقال بخار آب در سه نوع خاک لوم رسی سیلتی، لوم و لوم شنی با استفاده از یک مدل فیزیکی آزمایشگاهی بررسی شد و سپس از نتایج حاصل از آزمایش‌ها برای صحت‌سنجی مدل برآورد انتقال بخار آب ارائه شده توسط کلی و سلکر (۹) استفاده گردید. نتایج نشان داد که هر چه بافت خاک سنگین‌تر می‌شود، میزان انتقال بخار آب به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در شوری ۰/۵ درصد و روز پنجم آزمایش، میزان بخار انتقال یافته برای خاک‌های لوم شنی، لوم و لوم رسی سیلتی برابر ۰/۳۶۲، ۰/۱۹۶ و ۰/۱۲ کیلوگرم بر متر مربع بود. در شوری ۱/۵ درصد، میزان انتقال بخار در این سه خاک به ترتیب ۰/۷۲۳ و ۰/۳۸ کیلوگرم بر متر مربع بود. از مقایسه داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها با داده‌های حاصل از حل مدل کلی و سلکر با استفاده از نرم‌افزار Mathcad PLUS 6.0 مشاهده گردید که این مدل همخوانی مناسبی با این داده‌ها دارد. از آنجایی که انتقال بخار آب از خاک‌های غیر آلوده به سمت توده‌های آلوده می‌تواند باعث افزایش حجم هاله آلودگی شود، لذا این فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی باید در مدل‌های انتقال آلودگی در مجاورت منابع غلیظ در نظر گرفته شوند.

واژه‌های کلیدی: محیط متخلخل، انتقال املاح، پتانسیل آب

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. گروه سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳. گروه آبیاری و زه‌کشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mousavi_sf@yahoo.com

مقدمه

چنانچه پتانسیل آب در خاک از ۱۵ اتمسفر فراتر رود پیوستگی مولکول‌های آب از بین رفته و آب تنها می‌تواند به صورت بخار حرکت کند. اگرچه حرکت بخار آب بسیار کند است، اما مقدار آن به مراتب بیشتر از آن چیزی است که محاسبات تئوری نشان می‌دهد. حرکت بخار آب ممکن است یا در اثر پخشیدگی بخار آب و یا در اثر جریان توده‌ای ناشی از اختلاف فشار بخار انجام شود (۱).

انتقال بخار آب در خاک‌های غیر اشباع تحت تأثیر شیب حرارتی و اسمزی انجام می‌شود. مواد محلول در آب موجود در خلل و فرج خاک باعث ایجاد پتانسیل اسمزی می‌شوند. شیب پتانسیل اسمزی می‌تواند جریان آب و بخار قابل توجهی در خاک‌های دارای غلظت زیاد املاح ایجاد کند. این موضوع توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است (۴، ۸، ۹، ۱۲، ۱۴ و ۲۲). برای این‌که انتقال آب از طریق اسمزی در خاک اتفاق بیفتد، نیاز به یک غشای نیمه تراوا می‌باشد. به گونه‌ای که این غشا مانع عبور یونها شده، در حالی که آب می‌تواند به طور آزادانه از آن عبور کند. در محیط‌هایی با خاصیت غشای نیمه تراوا، جریان آب تحت تأثیر پتانسیل اسمزی از مناطق با غلظت کم به مناطق با غلظت زیاد رخ می‌دهد (۹ و ۱۱).

پتانسیل اسمزی در حضور یک چنین غشای نیمه تراوایی می‌تواند باعث اختلاف فشار در سیال شود (۱۱). این پدیده، در اکثر اوقات در عرض دیواره سلولی گیاه دیده می‌شود و این دیواره نیمه تراوا مانع عبور یونها شده و اجازه می‌دهد که آب به طور آزادانه از آن عبور کند (۹).

در بسیاری از مسائل مربوط به کشاورزی و محیط زیست، پدیده‌ها در محیط‌های متخلخل غیر اشباع صورت می‌گیرند (۳). تا کنون تحقیقات زیادی در زمینه حرکت آب مایع در خاک‌های غیر اشباع صورت گرفته است. در حالی که تحقیق در مورد مکانیزم و تأثیر انتقال بخار آب در محیط‌های غیر اشباع محدود می‌باشد.

مایعات حاصل از شستشو که از منابعی شامل محل‌های دفن فاضلاب (زباله‌دان‌های بهداشتی، زباله‌دان‌های مواد خطرناک و

تالاب‌های ذخیره فاضلاب)، فعالیت‌های کشاورزی و نشت اتفاقی مواد شیمیایی ناشی می‌شود، اغلب دارای غلظت زیاد املاح می‌باشند و شیب اسمزی ایجاد شده در اطراف این منابع باعث انتقال قابل توجه بخار آب می‌شود (۲۰).

بخار منتقل شده از خاک‌های غیر آلوده به سمت توده‌های آلوده توسط چگالش بخار در بالای محلول‌های آلوده و غلیظ، باعث افزایش حجم هاله آلودگی و حرکت افقی آلاینده‌ها به شکل مایع می‌شود. به همین دلیل، این فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی بایستی در مدل‌های انتقال آلودگی در نظر گرفته شوند (۲۱). ارزیابی کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی تا حدود زیادی به قابلیت یا توانایی پیش‌بینی جریان آب و بخار آب و حرکت آنها در منطقه غیر اشباع بستگی دارد (۱۹).

تا کنون بسیاری از محققین فرآیند جریان آب در خاک‌های غیر اشباع که شامل انتقال همزمان آب، بخار آب، مواد محلول و گرما می‌شود، را از لحاظ تئوری و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند (۵، ۶، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۱۶). کهیل و پارلانژ (۲) رطوبت حجمی و دمای خاک در ۲، ۴، ۷، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر زیر سطح خاک در یک خاک بدون پوشش را با تواتر ۲۰ دقیقه برای یک هفته اندازه گرفتند. شار (Flux) بخار آب در ۷ تا ۱۰ سانتی‌متر با استفاده از معادلات انتقال انرژی و انتقال جرم تعیین گردید. نتایج نشان داد که شار بخار آب در این لایه حدود ۵۰٪ انتقال انرژی کل و ۲۵٪ انتقال رطوبت را انجام داد. بنابراین انتقال بخار آب در خاک از اهمیت خاصی برخوردار است.

هدف از این تحقیق، بررسی میزان انتقال بخار آب در سه نوع خاک و در شرایط غیر اشباع تحت تأثیر نیروی اسمزی (شوری‌های مختلف) با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی و هم‌چنین صحت‌سنجی مدل برآورد انتقال بخار آب ارائه شده توسط کلی و سلکر (۹) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

اگر دو محلول غلیظ و رقیق در کنار یکدیگر قرار داشته باشند و

ماتریک اولیه نمونه‌ها در مقاطع شور و غیر شور می‌بایستی یکسان می‌شد. برای این کار، ابتدا درصد رطوبت نمونه‌های خاک در مکش ۳ اتمسفر اندازه‌گیری شد. سپس این درصد رطوبت به نمونه‌های خاک اعمال گردید. از دستگاه صفحه فشاری برای اندازه‌گیری پتانسیل ماتریک نمونه‌های خاک استفاده شد.

اثر شوری‌های مختلف بر انتقال بخار آب توسط نمک کلرید سدیم و در سه سطح شوری ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد برای هر سه نوع خاک بررسی گردید. حالت‌های مختلف مورد آزمایش و خصوصیات آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

روش کار به این صورت بود که برای بخش غیر شور، ابتدا رطوبت نمونه خاک مورد آزمایش با افزودن مقدار مشخص آب مقطر به طور یکنواخت، به درصد رطوبت معادل مکش ۳ اتمسفر رسانده شد. سپس نمونه‌ها درون نایلون گذاشته شده و پس از بستن درب آنها، در یک ظرف عایق به مدت دو روز نگه داری شدند تا رطوبت در خاک کاملاً یکنواخت شده و نمونه‌ها به تعادل برسند. سپس نمونه‌های خاک را مجدداً مخلوط کرده و از آنها برای پرکردن لوله‌های مدل استفاده شد.

خاک‌های مورد استفاده برای بخش شور، توسط محلول‌های نرمال نمک کلرید سدیم مرطوب گردیدند. نرمالیت محلول‌ها برای هر نمونه با توجه به سطح شوری به کار رفته، درصد رطوبت و نوع خاک متفاوت بود. در این تحقیق، سطوح شوری بر اساس وزن خشک خاک‌ها اعمال گردید و پس از تهیه محلول‌های نرمال برای هر سطح شوری، نمونه‌های خاک‌ها همانند بخش غیر شور و با همان درصد رطوبت مرطوب شدند. پس از آماده شدن دو بخش شور و غیر شور، آنها را بلافاصله در درون محفظه مدل قرار داده، درب آنها را کاملاً بسته و در دمای ثابت ۲۱ درجه سلسیوس قرار داده شدند. برای این که دما کاملاً ثابت باشد و تغییرات دما اثری بر فشار بخار نداشته باشد، از دستگاه انکوباتور استفاده گردید و نمونه‌ها درون آن قرار داده شدند.

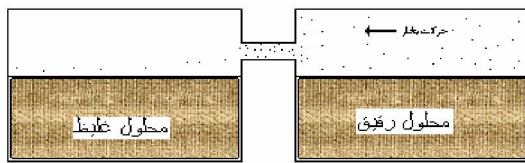
برای اندازه‌گیری میزان بخار آب انتقال یافته، از تغییرات رطوبتی خاک در دو بخش شور و غیر شور با گذشت زمان

به طریقی بین این دو محلول ارتباط برقرار شود، مولکول‌های بخار آب از محلول رقیق به محلول غلیظ منتقل می‌شوند (شکل ۱)، تا زمانی که دو محلول به تعادل برسند. بر اساس این فرضیه، یک مدل آزمایشگاهی ساخته شد.

مدل آزمایشگاهی استفاده شده در این تحقیق، از لوله‌های پلاستیکی به قطر ۴ سانتی‌متر که به صورت حلقه‌هایی به طول ۲/۵ سانتی‌متر درآمده‌اند، تشکیل شده است. مدل مورد نظر دو بخش دارد. بخش اول، که به عنوان بخش غیر شور استفاده می‌شود، شامل ۶ حلقه می‌باشد که در کنار همدیگر گذاشته شده و کاملاً با چسب آب‌بندی گردیدند، به نحوی که هیچ‌گونه نشتی از آنها وجود نداشت. بخش دوم، که به عنوان بخش شور از آن استفاده گردید، از دو حلقه تشکیل شده و مانند بخش غیر شور در کنار همدیگر قرار گرفته و کاملاً آب‌بندی شدند. انتهای هر دو بخش شور و غیر شور با یک درپوش کاملاً مسدود گردید. سپس این دو بخش درون یک محفظه فلزی سرپوشیده که کاملاً آب‌بندی شده به صورت افقی به نحوی قرار گرفتند که بین دو بخش شور و غیر شور یک فاصله ۱/۲۵ سانتی‌متر به عنوان شکاف هوادار باقی ماند.

آماده‌سازی نمونه‌های خاک

در این تحقیق، سه نوع خاک با بافت لوم شنی، لوم و لوم رسی سیلتی مورد آزمایش قرار گرفت. برای این که اثر واکنش مواد معدنی و شیمیایی موجود در خاک با محلولی که در آزمایش‌ها به خاک اضافه می‌گردد به حداقل برسد، نمونه‌های خاک درون ظرف‌های پلاستیکی که از ته سوراخ شده بودند ریخته شده و توسط آب لوله‌کشی و سپس آب مقطر به مدت ۱۰ روز شستشو داده شدند. بعد از آبشویی، خاک‌ها ابتدا هواخشک شده و بعد به مدت ۲۴ ساعت درون دستگاه خشک‌کن با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شدند تا کاملاً خشک شوند. سپس، خاک‌ها کوبیده شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و برای آزمایش آماده گردیدند. با توجه به این که هدف این تحقیق بررسی اثر نیروی اسمزی بر انتقال بخار آب بود، لذا پتانسیل



شکل ۱. نمایی از فرآیند انتقال بخار آب از محلول رقیق به محلول غلیظ (چپ) و مدل آزمایشگاهی ساخته شده (راست)

جدول ۱. حالت‌های مختلف مورد آزمایش

بافت خاک	میزان شوری (درصد نمک اضافه شده)	درصد رطوبت اولیه ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$)
لوم شنی	۰/۵	۰/۰۷۵
لوم شنی	۱	۰/۰۷۵
لوم شنی	۱/۵	۰/۰۷۵
لوم	۰/۵	۰/۱۵۲
لوم	۱	۰/۱۵۲
لوم	۱/۵	۰/۱۵۲
لوم رسی سیلتی	۰/۵	۰/۳۳
لوم رسی سیلتی	۱	۰/۳۳
لوم رسی سیلتی	۱/۵	۰/۳۳

که \bar{V}_w حجم مولی جزئی آب ($18 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{mol}$)، T دما (K)، N_w کسر مولی آب و R عدد ثابت گازها (8.314 J/K.mol) می‌باشد. بهتر است که پتانسیل اسمزی برحسب غلظت املاح محلول c_j (mol/m^3) محاسبه شود. لذا به جای معادله ۱ می‌توان از معادله ۲ استفاده کرد (۹):

$$\psi_s = RT \sum_j c_j \quad [2]$$

معادله ۲ برای محلول‌های ایدآل معتبر است. ولی همیشه در محلول‌های آبی غلیظ به اندازه چند میلی‌مول از ایده‌آلی رابطه وانت هوف انحراف وجود دارد. لذا، برای بیان درست کسر مولی آب در محلول، که با افزایش رقت محلول به عدد یک نزدیک می‌شود، بایستی مقادیر به دست آمده را با استفاده از ضریب اسمزی، ϕ ، اصلاح نمود. ضریب اسمزی برای محلول‌های با غلظت‌های متفاوت را می‌توان با استفاده از

استفاده گردید. به این منظور، درصد رطوبت وزنی بعد از ۵ و ۱۵ روز اندازه‌گیری شد. روش کار به این صورت بود که برای زمان‌های ۵ و ۱۵ روز در هر سطح شوری و نوع خاک، دو نمونه مجزای کاملاً مشابه تهیه شد و در درون دستگاه انکوباتور قرار گرفت. بعد از ۵ و ۱۵ روز، نمونه‌ها از دستگاه خارج شده و بلافاصله مقاطع ۲/۵ سانتی‌متری جدا شده و درصد رطوبت وزنی آنها تعیین شد. این روند برای سه سطح شوری ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد و سه نوع خاک انجام شد.

پتانسیل اسمزی

پتانسیل اسمزی یک محلول رقیق را می‌توان با استفاده از رابطه وانت هوف محاسبه کرد (۹):

$$\psi_s = \frac{RT \ln(N_w)}{V_w} \quad [1]$$

می‌باشد. با جای‌گذاری معادله ۵ در معادله ۶، معادله ۷ به دست می‌آید (۹):

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial \psi}{\partial x}) - \dot{m} \quad [7]$$

معادله ۷ یک معادله دیفرانسیل جزئی تعمیم یافته می‌باشد که برای محاسبه انتقال مایع، بخار و یون در محیط‌های متخلخل به کار می‌رود.

معادله ۷ را می‌توان برای انتقال بخار آب به صورت زیر

نوشت:

$$\frac{\partial m_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_v \frac{\partial P_v}{\partial x}) - \dot{m}_v \quad [8]$$

که m_v جرم بخار، \dot{m}_v عبارت تولید و مصرف برای بخار آب و P_v دانسیته بخار آب (M/L^2) می‌باشد. فشار بخار آب را می‌توان با استفاده از معادله ۹ محاسبه کرد:

$$\frac{P_v}{P_v^0} = \exp\left(\frac{-(\psi_s + \psi_m) \bar{V}_w}{RT}\right) \quad [9]$$

که P_v دانسیته بخار آب (M/L^2)، P_v^0 دانسیته بخار آب اشباع (M/L^2)، ψ_s پتانسیل اسمزی (M/LT^2) و ψ_m پتانسیل ماتریک (M/LT^2) می‌باشد. مقادیر پتانسیل ماتریک را می‌توان به طور تقریبی به وسیله درصد رطوبت حجمی خاک و با استفاده از یک تابع نگهداشت آب خاک، مانند آنچه که توسط ون گنوختن ارائه گردیده، محاسبه کرد (۹):

$$\psi_m = \frac{\rho_w g}{\alpha} \left[\frac{1}{\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{m}}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \quad [10]$$

که g شتاب ثقل (m/s^2)، α عکس فشار ورودی هوا ($1/m$)، θ رطوبت خاک (m^3/m^3)، θ_r رطوبت باقی‌مانده در خاک (m^3/m^3)، θ_s رطوبت اشباع (m^3/m^3)، n ضریب تناسب بدون بعد و $m = 1 - 1/n$ می‌باشد. مقادیر معادله ون گنوختن برای خاک‌های مورد آزمایش در جدول ۲ ارائه گردیده است. این پارامترها از منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌ها و اجرای برنامه RETC حاصل شد.

فرمول‌های تجربی محاسبه کرد. یکی از متداول‌ترین فرمول‌ها برای تخمین ضریب اسمزی، فرمول پیترز است. معادله پیترز برای الکترولیت‌های ۱:۱ و ۱:۲ به صورت معادله ۳ است (۹):

$$\phi = 1 - \left[\frac{A_m m_v^{1/2}}{(1 + B m_v^{1/2})} \right] + m_v [\beta_1 + \beta_2 \exp(-\alpha_1 m_v^{1/2})] + m_v^2 C^\phi \quad [3]$$

که β_1 (kg/mol)، β_2 (kg/mol) و C^ϕ (kg^2/mol^2) پارامترهای ویژه‌ای هستند که برای هر الکترولیت مشخص‌اند، α_1 برای الکترولیت‌های ۱:۱ و ۱:۲ برابر با $mol^{1/5}/kg^{1/5}$ ، B برای همه الکترولیت‌ها برابر با $mol^{1/5}/kg^{1/5}$ ، مولالیت‌ه الکترولیت (معادل با قدرت یونی الکترولیت) (mol/kg) و A_m ($kg^{1/5}/mol^{1/5}$) ضریب دبای - هوکل است که از رابطه ۴ محاسبه می‌گردد (۹):

$$A_m = \frac{1}{2.303} (\pi N_A \rho_w)^{1/2} \left(\frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r k T} \right)^{1/2} \quad [4]$$

که N_A عدد آووگادرو ($1/mol$)، ρ_w چگالی آب خالص (kg/m^3)، T دمای مطلق (K)، ϵ_0 ثابت الکتریکی خلأ ($C^2/N.m^2$)، ϵ_r ثابت الکتریکی نسبی آب در دمای T (بدون بعد)، k ثابت بولتزمن (J/K) و e بار الکتریکی اولیه (C) می‌باشد.

مدل انتقال بخار

معادلات حاکم بر جریان آب مایع و بخار آب دارای شکل مشابهی می‌باشند. حرکت آب در هر دو حالت بخار و مایع، پدیده مرتبه اولی است که توسط قوانین انتشار فیک و دارسی توصیف می‌شوند (۹):

$$q = -K \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad [5]$$

که K یک ضریب انتقال کلی (L/T) و q جریان ($M/L^2 T$) است. با به کار بردن اصل بقای جرم برای یک نقطه، معادله ۶ به دست می‌آید:

$$-\frac{\partial q}{\partial x} = \dot{m} + \frac{\partial m}{\partial t} \quad [6]$$

که m جرم و عبارتی برای تولید (Source) و مصرف (Sink)

جدول ۲. پارامترهای معادله ون گنوختن برای خاک‌های مورد آزمایش

n	α (1/m)	θ_r (m ³ /m ³)	θ_s (m ³ /m ³)	ρ_b (kg/m ³)	بافت خاک
۱/۵۱	۱۰	۰/۰۳	۰/۴۳۷	۱/۵	لوم شنی
۱/۲۳۶	۳/۸۴۶	۰/۰۲۷	۰/۴۶۳	۱/۴۳	لوم
۱/۱۶۴	۲	۰/۰۴	۰/۴۷۱	۱/۵۴	لوم رسی سیلتی

در جدول ۳ ارائه شده، مشاهده می‌شود که در کلیه سطوح شوری (۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد) هر چه بافت خاک سنگین‌تر می‌شود، میزان انتقال بخار آب به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. دلیل این امر کوچک‌تر شدن اندازه خلل و فرج خاک با سنگین‌تر شدن بافت آن می‌باشد. هر چه اندازه تخلخل ریزتر باشد مقاومت بیشتری در مقابل پنخشدگی و انتقال بخار آب وجود دارد.

ب) اثر سطوح مختلف شوری بر انتقال بخار آب

با توجه به جدول ۳ و شکل ۲ مشاهده می‌شود که برای خاک لوم رسی سیلتی، در هر سه سطح شوری، مقدار رطوبت در بخش شور افزایش یافته است. مقدار بخار آب تجمعی انتقال یافته بعد از ۵ و ۱۵ روز برای شوری‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۳۷، ۰/۲۵ و ۰/۷۴، ۰/۳۸ و ۱/۱۲ کیلوگرم بر مترمربع است.

با توجه به جدول ۳ و شکل ۳ مشاهده می‌گردد که برای خاک لوم، در هر سه سطح شوری، مقدار رطوبت در بخش شور افزایش و در بخش غیر شور کاهش یافته است. مقدار بخار آب تجمعی انتقال یافته بعد از ۵ و ۱۵ روز برای شوری‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد به ترتیب ۰/۱۹۶، ۰/۵۸۲، ۰/۳۸۸ و ۱/۱۶، ۰/۷۲۳ و ۲/۱۴ کیلوگرم بر مترمربع است.

با توجه به جدول ۳ و شکل ۴ مشاهده می‌گردد که برای خاک لوم شنی هم در هر سه سطح شوری مقدار رطوبت در بخش شور افزایش و در بخش غیر شور کاهش یافته است. ولی به دلیل وجود شیب اسمزی قوی‌تر، شدت انتقال بخار آب در این خاک بیشتر از دو خاک قبلی می‌باشد. مقدار بخار آب

کلی و سلکر (۹) مجموعه معادلاتی که حرکت همزمان آب در فاز بخار و مایع و انتقال یون در محیط‌های متخلخل غیر اشباع را بررسی می‌کنند را استخراج کرده و نهایتاً به معادله ۱۱ رسیدند که به کمک آن انتقال بخار آب در طول یک شکاف هوایی بین دو مقطع شور و غیر شور، با فرض این‌که توزیع مجدد رطوبت در خاک به صورت آنی باشد، قابل محاسبه است:

$$q = -K_v \cdot \frac{P_v(\theta_s) - P_v(\theta_r)}{dx} \quad [11]$$

که q جریان بخار آب بین دو مقطع (M/L^2T) ، θ_r رطوبت حجمی مقطع شور، θ_s رطوبت حجمی مقطع غیر شور، dx طول شکاف هوایی (L) ، K_v ضریب پنخشدگی بخار آب در شکاف هوایی (L^2/T) ، $P_v(\theta_s)$ جریان بخار آب در مقطع شور (M/L) و $P_v(\theta_r)$ جریان بخار آب در مقطع غیر شور (M/L) می‌باشد.

از آنجا که یکی از اهداف این تحقیق صحت‌سنجی مدل برآورد انتقال بخار آب ارائه شده توسط کلی و سلکر (معادله ۱۱) بود، از داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها برای صحت‌سنجی این مدل استفاده گردید. برای این کار، می‌بایستی معادله ۱۱ به نحوی حل می‌گردید. چون این معادله به سادگی قابل حل نبود، لذا از نرم‌افزار Mathcad PLUS 6.0 استفاده شد و نتایج حاصل از آن با نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها مقایسه گردید.

نتایج و بحث

الف) اثر بافت خاک بر انتقال بخار آب

بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، که به‌طور خلاصه

جدول ۳. مقادیر تجمعی بخار آب انتقال یافته در خاک‌ها و شوری‌های مختلف

نوع خاک	میزان شوری (درصد نمک)	بخار آب انتقال یافته تا روز ۵ (kg/m ^۳)	بخار آب انتقال یافته تا روز ۱۵ (kg/m ^۳)
لوم شنی	۰/۵	۰/۳۶۲	۱/۲۲
لوم شنی	۱	۰/۷۶۶	۲/۳۸
لوم شنی	۱/۵	۱/۴۷	۴/۵۳
لوم	۰/۵	۰/۱۹۶	۰/۵۸۲
لوم	۱	۰/۳۸۸	۱/۱۶
لوم	۱/۵	۰/۷۲۳	۲/۱۴
لوم رسی سیلتی	۰/۵	۰/۱۲	۰/۳۷
لوم رسی سیلتی	۱	۰/۲۵	۰/۷۴
لوم رسی سیلتی	۱/۵	۰/۳۸	۱/۱۲

رسی سیلتی در سطوح شوری ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد، هم‌خوانی مناسبی بین مقادیر پیش‌بینی شده از حل مدل کلی و سلکر (۹) و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد. برای خاک لوم، در سطوح شوری ۰/۵ و ۱/۵ درصد هم‌خوانی مناسبی بین مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر پیش‌بینی شده وجود دارد. اما در شوری ۱ درصد، مقادیر پیش‌بینی شده کمی بیشتر می‌باشند. برای خاک لوم شنی در تمام سطوح شوری، مقادیر پیش‌بینی شده بیشتر از مقادیر آزمایشی می‌باشد. این تفاوت شاید به دلیل عدم توزیع لحظه‌ای رطوبت در خاک با شوری زیاد باشد.

در اکثر تحقیقات انجام شده مانند نثار و همکاران (۱۳)، گور و همکاران (۵)، سالزمن و همکاران (۱۷) و ژوری و لتی (۷) انتقال بخار آب در نتیجه گرادیان حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، اثر بافت خاک و سطوح مختلف شوری بر انتقال بخار بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که پدیده انتقال بخار آب در خاک‌های غیر اشباع تحت تأثیر نیروی اسمزی بستگی به بافت خاک و میزان شوری خاک دارد که با تحقیقات انجام شده توسط اسکوتر (۱۸)، وایسبراد و همکاران (۲۲) و کلی و سلکر (۹) تطابق دارد. هم‌چنین با توجه به نتایج به دست آمده، ملاحظه می‌شود که مدل کلی و سلکر (۹) در گرادیان‌های اسمزی کم، هم‌خوانی خوبی با نتایج این

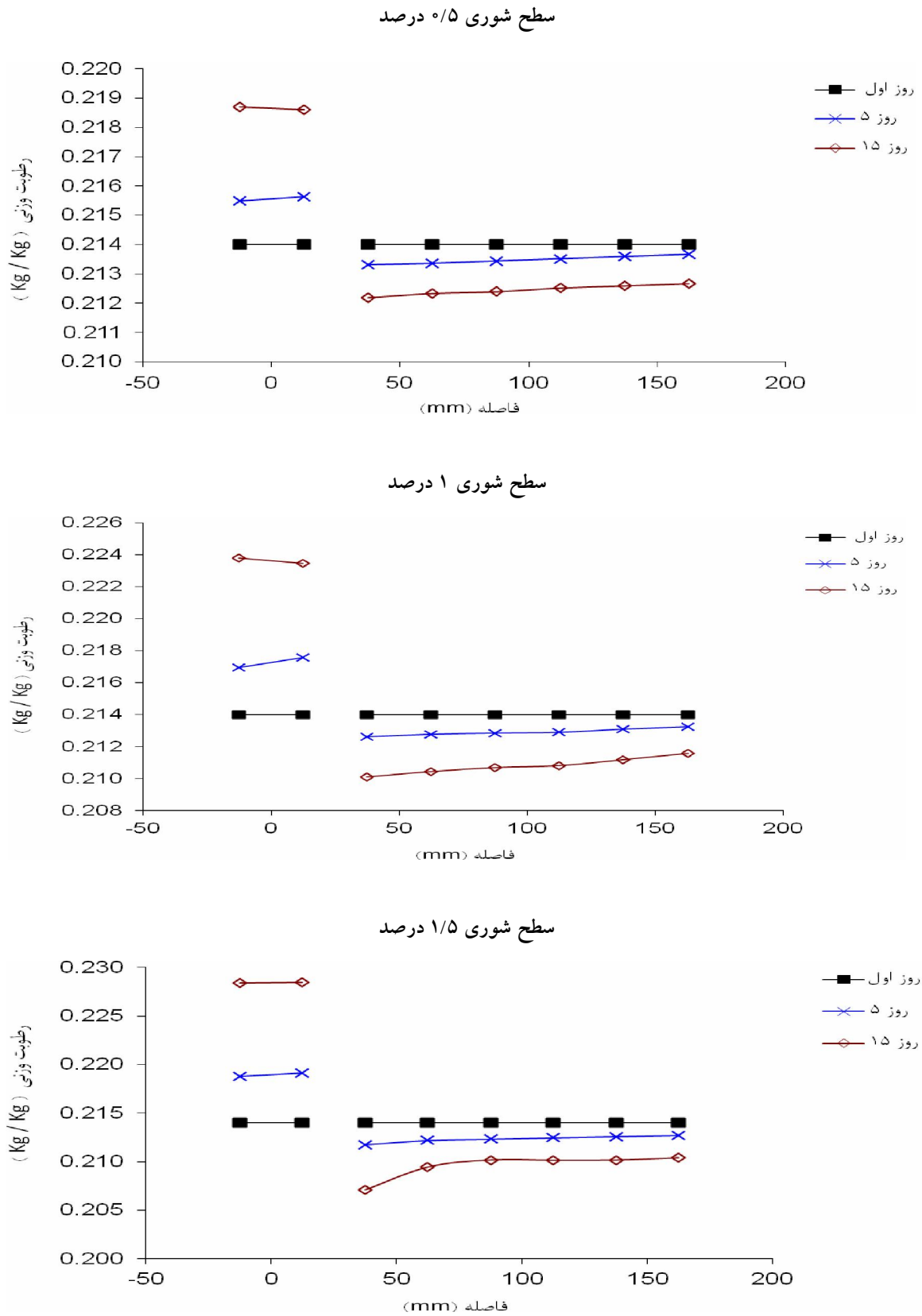
تجمعی انتقال یافته بعد از ۵ و ۱۵ روز برای شوری‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد به ترتیب ۰/۳۶۳، ۱/۲۲ و ۰/۷۶۶ و ۲/۳۸، ۱/۴۷ و ۴/۵۳ کیلوگرم بر مترمربع است.

ج) صحت‌سنجی مدل کلی و سلکر

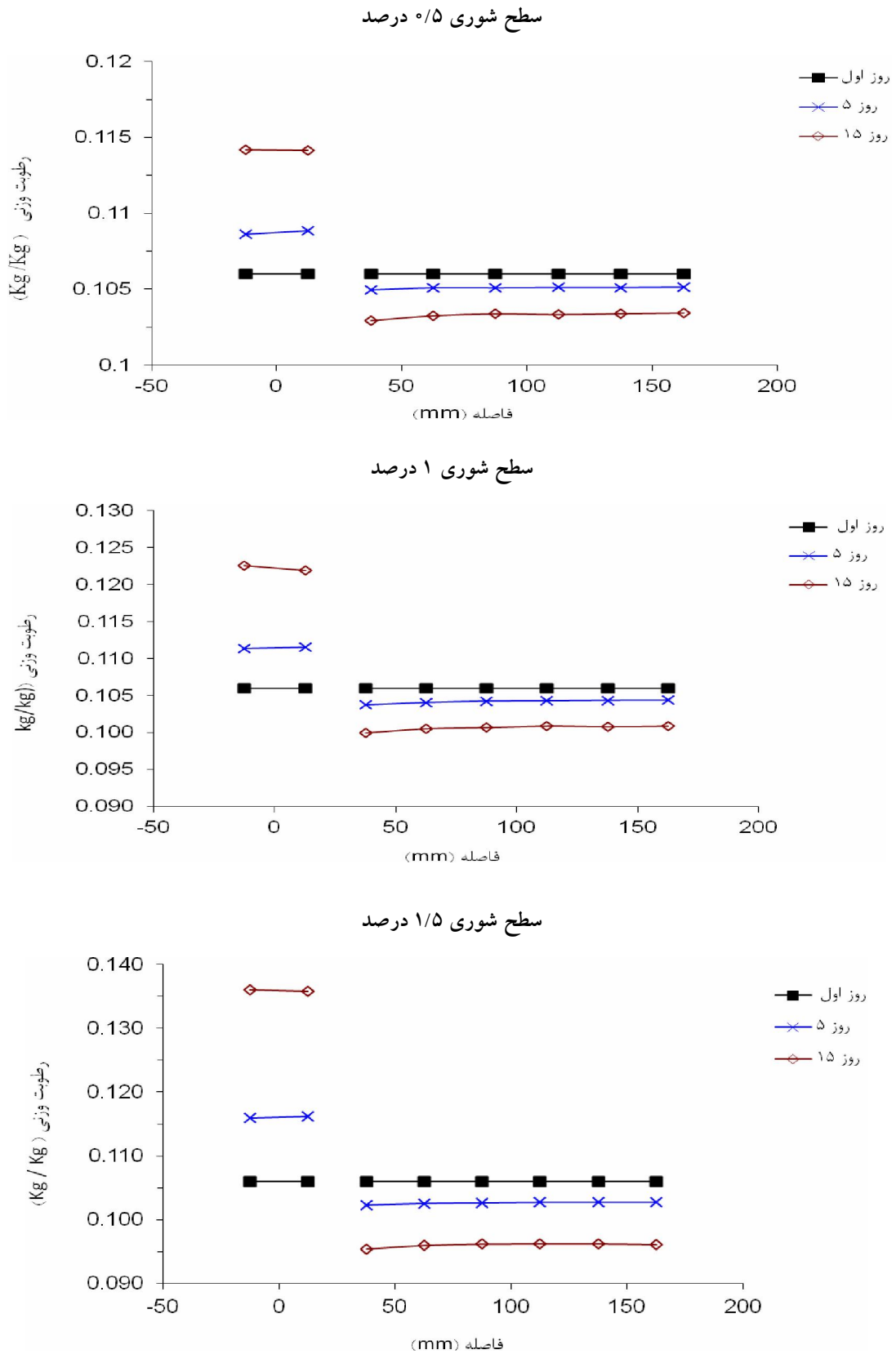
یکی از اهداف این تحقیق، صحت‌سنجی مدل انتقال بخار آب ارائه شده توسط کلی و سلکر (معادله ۱۱) بود. برای این کار، از داده‌های به دست آمده از این آزمایش‌ها استفاده گردید. بدین منظور، ابتدا مدل ارائه شده با استفاده از نرم‌افزار Mathcad PLUS 6.0 حل شد. با امکانات موجود در این نرم‌افزار، نمودار مقادیر تجمعی انتقال بخار آب را رسم نموده و با مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها مقایسه شدند.

برای حل معادله ۱۱ ابتدا می‌بایستی مقادیر پتانسیل اسمزی و ضریب اسمزی برای هر یک از حالت‌های آزمایش محاسبه می‌گردید. برای به دست آوردن مقادیر ضریب اسمزی از رابطه تجربی پیترز (به نقل از ۲۱) استفاده گردید. پارامترهای معادله پیترز برای نمک کلرید سدیم در جدول ۴ و مقادیر ضریب اسمزی و پتانسیل اسمزی برای هر یک از حالت‌های مورد آزمایش در جدول ۵ ارائه شده است.

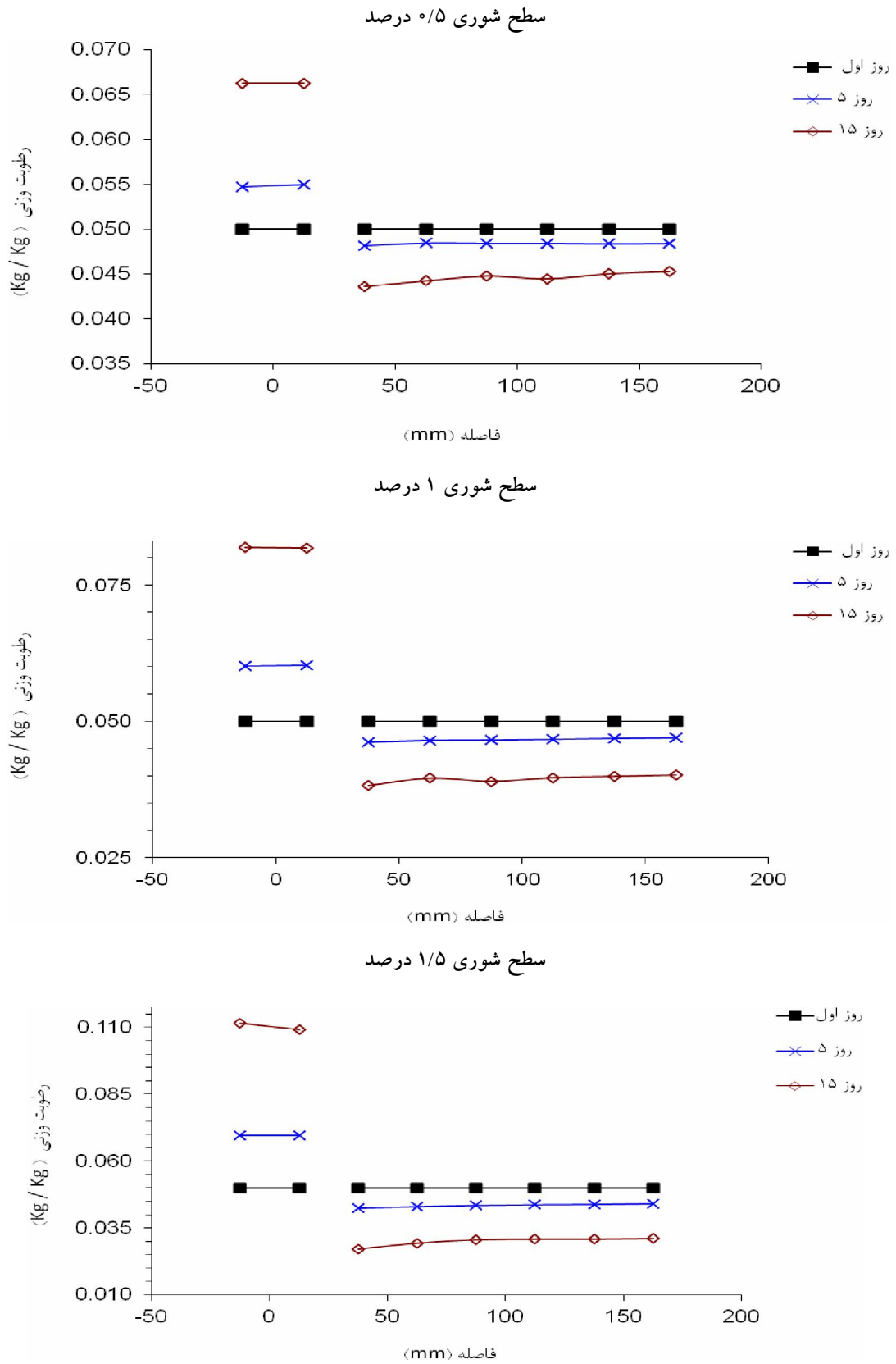
با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که برای خاک لوم



شکل ۲. توزیع رطوبت وزنی خاک در مدل آزمایشگاهی برای خاک لوم رسی سیلتی



شکل ۳. توزیع رطوبت وزنی خاک در مدل آزمایشگاهی برای خاک لوم



شکل ۴. توزیع رطوبت وزنی خاک در مدل آزمایشگاهی برای خاک لوم شنی

جدول ۴. پارامترهای رابطه پیتزر برای کلرید سدیم

نوع نمک	وزن مولکولی (kg/mol)	حلالیت (mol/kg)	C^ϕ (kg ² /mol ²)	β_1 (kg/mol)	β_2 (kg/mol)
کلرید سدیم	۰/۰۰۵۸۴۴	۴/۵۳	۰/۰۰۱۲۷	۰/۲۶۶۴	۰/۰۷۶۵

جدول ۵. مقادیر ضریب اسمزی و پتانسیل اسمزی محاسبه شده برای خاک‌های مورد آزمایش

نوع خاک	مولالیت (mol/kg)	ضریب اسمزی (ϕ)	پتانسیل اسمزی Ψ_s (MPa)
لوم شنی	۱/۷۱	۰/۹۰۲	۴/۱۶۶
لوم شنی	۳/۴۲	۰/۹۶۸	۸/۳۳
لوم شنی	۵/۱۳	۱/۲۲۳	۱۲/۴۹۷
لوم	۰/۸۵۵	۰/۸۷۳	۲/۰۸۳
لوم	۱/۷۱	۰/۹۰۲	۴/۱۶۶
لوم	۲/۵۶۶	۰/۹۴۶	۶/۲۵۱
لوم رسی سیلتی	۰/۴	۰/۸۷۳	۰/۹۷۴
لوم رسی سیلتی	۰/۸	۰/۸۷۲	۱/۹۵
لوم رسی سیلتی	۱/۲	۰/۸۸۲	۲/۹۲

جدول ۶. انتقال بخار آب تجمعی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل کلی و سلکر (۹) در طول یک شکاف هوایی ۱۲/۵ میلی‌متری برای خاک‌های مورد آزمایش

بافت خاک	روز پنجم آزمایش			روز پانزدهم آزمایش		
	سطح شوری (%)			سطح شوری (%)		
لوم رسی سیلتی	۰/۲۲	۰/۲۸	۰/۴۰	۰/۳۳	۰/۷۲	۱/۱۵
	اندازه‌گیری شده					
لوم	۰/۲۳	۰/۲۷	۰/۳۹	۰/۳۴	۰/۷۰	۱/۱۰
	محاسبه شده					
لوم شنی	۰/۲۷	۰/۳۳	۰/۶۱	۰/۶۰	۱/۰	۲/۲
	اندازه‌گیری شده					
لوم رسی سیلتی	۰/۲۸	۰/۴۴	۰/۶۶	۰/۶۵	۱/۳	۲/۳
	محاسبه شده					
لوم رسی سیلتی	۰/۳۵	۰/۷	۱/۶	۱/۲	۲/۲	۴/۸
	اندازه‌گیری شده					
لوم رسی سیلتی	۰/۵	۱/۰	۲/۲	۱/۴	۳/۰	۶/۱
	محاسبه شده					

تحقیقات بیشتری با در نظر گرفتن گرادیان اسمزی و حرارتی به صورت هم‌زمان انجام شود و نیز با اصلاح معادله کلی و سلکر (۹) مدل دقیق‌تری ارائه گردد.

آزمایش‌ها دارد. اما در گرادیان‌های اسمزی زیاد، مدل مربوطه کارایی مناسبی ندارد که دلیل آن می‌تواند فرضیات در نظر گرفته شده برای توسعه مدل باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که

نتیجه گیری

در این پژوهش، انتقال بخار آب در سه نوع خاک لوم رسی سیلتی، لوم و لوم شنی، در شرایط غیراشباع و سه سطح شوری ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج آزمایش‌ها دیده شد که انتقال بخار آب در خاک‌های بافت سبک در کلیه سطوح شوری سریع‌تر و بیشتر از خاک‌های با بافت سنگین صورت می‌گیرد. در همه خاک‌ها، با افزایش شوری، میزان بخار آب انتقال یافته از بخش غیر شور به بخش شور افزایش می‌یابد. در خاک لوم شنی و شوری ۱/۵ درصد، شدت انتقال بخار آب آنقدر زیاد بود که بعد از ۱۵ روز خاک بخش غیر شور تقریباً خشک شد. با توجه به نتایج حاصل از حل مدل کلی و سلکر (۹) با کاربرد نرم‌افزار Mathcad مقایسه آن با نتایج اندازه‌گیری‌ها، دیده می‌شود که این مدل در شیب‌های اسمزی کم، همخوانی کاملی با نتایج آزمایش‌ها دارد.

اما در شیب‌های اسمزی زیاد، مدل مقادیر انتقال بخار آب را بیشتر از مقادیر آزمایشی برآورد می‌کند. هرچه شیب اسمزی موجود در شکاف هوایی زیادتر باشد، سیستم زودتر به تعادل می‌رسد و انتقال بخار آب متوقف می‌گردد. از آنجایی که وجود املاح در آب خاک باعث ایجاد شیب پتانسیل اسمزی می‌شود و این مسئله باعث انتقال بخار آب قابل توجهی می‌گردد، لذا در مجاورت منابعی مانند محل‌های دفن زباله، تزریق فاضلاب‌های خطرناک، فعالیت‌های کشاورزی و نشت‌های اتفاقی مواد شیمیایی، که اغلب دارای غلظت املاح بالایی می‌باشند و شیب اسمزی بسیار زیاد تولید می‌نمایند، انتقال بخار آب از خاک‌های غیر آلوده به سمت توده‌های آلوده باعث افزایش حجم آلودگی و حرکت افقی آلاینده‌ها به صورت مایع می‌شود. بنابراین در مدل‌های انتقال آلودگی، باید آثار انتقال بخار آب ناشی از نیروی اسمزی در نظر گرفته شود.

منابع مورد استفاده

۱. علیزاده، ا. ۱۳۸۳. رابطه آب و خاک و گیاه. چاپ چهارم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.
2. Cahill, A. T. and M. B. Parlange. 1998. On water vapor transport in field soils. *Water Resour. Res.* 34(4): DOI: 10.1029/97WR03756.
3. Fayar, M. J. 2000. Unsat-H, Version 3.0: Unsaturated Soil Water and Heat Flow Model. U. S. Department of Energy, Richland, Washington.
4. Garavito Rojas, A. M. F. 2005. Chemical osmosis in clayey sediments: Field experiments and Numerical Modelling. PhD Dissertation, The Vrije University, Amsterdam, The Netherlands.
5. Gurr, C. G., T. J. Marshall and J. T. Hutton. 1952. Movement of water in soil due to a temperature gradient. *Soil Sci.* 74: 335-346.
6. Jackson, R. D. 1964. Water vapor diffusion in relatively dry soil. I. Theoretical considerations and sorption experiments. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28: 172-176.
7. Jury, W. A. and J. Letey. 1979. Water vapor movement in soil: Reconciliation of theory and experiment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 823-827.
8. Keijzer, T. 2000. Chemical osmosis in natural clayey materials. PhD. Dissertation, University of Utrecht, The Netherlands.
9. Kelly, S. F. and J. S. Selker. 2001. Osmotically driven water vapor transport in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1634-1641.
10. Lu, S., T. Ren, Z. Yu and R. Horton. 2011. A method to estimate the water vapour enhancement factor in soil. *European J. Soil Sci.* 62(4): 498-504.
11. Malusis, M. and C. Shackelford. 2004. Predicting solute flux through a clay membrane barrier. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 130: 477-487.
12. Nassar, I. N. and R. Horton. 1997. Heat, water and solute transfer in unsaturated porous media. I. Theory development and transport coefficient evaluation. *J. Trans. Porous Med.* 27: 17-38.
13. Nassar, I. N., M. H. Shafey and R. Horton. 1997. Heat, water, and solute transfer in unsaturated porous media. II. Compacted soil beneath plastic cover. *J. Trans. Porous Med.* 27: 39-55.
14. Parlange, J. Y. 1973. Movement of salt and water in relatively dry soils. *Soil Sci.* 116: 249-255.

15. Parlange, M. B., A. T. Cahill, D. R. Nielsen, J. W. Hopmans and O. Wendroth. 1998. Review of heat and water movement in field soils. *Soil Till. Res.* 47: 5-10.
16. Sakai, M., N. Toride and J. Simunek. 2009. Water and vapor movement with condensation and evaporation in a sandy column. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 707-717.
17. Salzmann, W., K. Bohne and M. Schmidt. 2000. Numerical experiments to simulate vertical vapor and liquid water transport in unsaturated non-rigid porous media. *J. Geoderma* 98: 127-155.
18. Scotter, D. R. 1974. Salt and water movement in relatively dry soil. *Aust. J. Soil Res.* 12(1): 27-35.
19. Selih, J. and A. C. M. Sousa. 2003. Drying and moisture transport in porous material. *J. Trans. Porous Med.* 49: 81-92.
20. Simmons, C. T., M. L. Pierini and J. L. Hutson. 2002. Laboratory investigation of variable-density flow and solute transport in unsaturated-saturated porous media. *J. Trans. Porous Med.* 47: 215-244.
21. Ward, A. L. and G. W. Gee. 2003. *Vadose Zone Transport Field Study*. U.S. Department of Energy, Richland, Washington.
22. Weisbrod, N., M. R. Niemet and J. S. Selker. 2002. Imbibition of saline solutions into dry and prewetted porous media. *J. Adv. Water Resour.* 25(7): 841-855.

Estimation of Water Vapor Transport in Unsaturated Soils under Osmotic Potential

M. Goodarzi¹, S.F. Mousavi^{2*}, M. Behzad³ and H. Moazed³

(Received : Mar. 17-2012 ; Accepted : Sep. 23-2012)

Abstract

The transport process of chemical-fertilizers, radioactive materials and other solutes in soils and porous media is important to understand the environmental and economic effects of industrial, agricultural and urban waste disposal methods. In unsaturated porous media, large gradient in aqueous osmotic potential derives significant water vapor fluxes towards regions of high solute concentrations. In this research, the effects of osmotic potential (resulting from salinities of 0.5, 1 and 1.5%) on water vapor transport in three soil textures (silty clay loam, loam and sandy loam) were examined by using a physical laboratory model. Then, the experimental results were compared with Kelly and Selker (2001) model for validation of the predicted water vapor transport. The results showed that the rate of water vapor transport reduces significantly as soil texture gets heavier. For example, in salinity of 0.5% and 5th day of experiment, the amount of transported vapor in sandy loam, loam and silty clay loam soils was 0.362, 0.196 and 0.12 kg/m², respectively. Large osmotic potential near the high solute concentration in soils caused significant vapor movement toward dense solutions. In salinity of 1.5%, transported vapor in these soils was 1.47, 0.723 and 0.38 kg/m², respectively. Total water vapor movement until the 15th day was more than the 5th day. Comparison of experimental results with Kelly and Selker model results, using Mathcad PLUS 6.0 software, showed a good agreement between the observed and predicted data. Since water vapor delivered from uncontaminated soils to the contaminated soils can result in increased contaminant plume volume, these physical and chemical processes must be included in the predictive models of contaminant transport in the vicinity of concentrated sources.

Keywords: Porous media, Solute transport, Water potential.

1. Dept. of Water Eng., College of Agric., Isf. Univ. of Technol., Isfahan, Iran.

2. Dept. of Hydraulic Structures, Faculty of Civil Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.

3. Dept. of Irrig. and Drain., College of Water Sci. and Eng., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*: Corresponding Author, Email: mousavi_sf@yahoo.com