

مقایسه روشهای برآورد نسبت پخشیدگی اکسیژن و گذرپذیری هوا با استفاده از اشباع موثر و مقدار رطوبت خاک

پناه محمدی^{۱*} - محمدرضا نیشابوری^۲ - عباس احمدی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱/۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۳۰

چکیده

پخشیدگی گاز در خاک نسبت به پخشیدگی آن در اتمسفر (D_p/D_0) و نیز گذرپذیری هوا در خاک (K_a) تابع خصوصیات فیزیکی خاک نظیر اندازه و پیوستگی منافذ و همچنین تخلخل تهویه‌ای است. پخشیدگی گاز در خاک نیز بر اساس خصوصیات شکل، اندازه و پیچ‌خوردگی منافذ و مقدار رطوبت خاک (θ) متفاوت می‌باشد و به همین خاطر اندازه‌گیری مستقیم آنها سخت و زمان‌بر می‌باشد. در این تحقیق تعداد ۳۰ نمونه خاک از کلاسهای بافتی مختلف بصورت دست‌نخورده با استفاده از استوانه فولادی تهیه و در اشباع موثر (Se) و θ متعدد، مقادیر D_p/D_0 با روش حالت غیرماندگار پخشیدگی گاز اکسیژن (D_p) و K_a با روش بار افتان اندازه‌گیری و تغییرات آنها با Se و θ به صورت معادله رگرسیونی بدست آمد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان Se و θ خاک D_p/D_0 و K_a بصورت تابع لگاریتمی کاهش و حداکثر و حداقل مقدار آنها به ترتیب در رطوبت‌های کم و زیاد (نزدیک اشباع) بدست آمد. تحلیل نتایج حاصله بر اساس معیارهای R^2 ، $RMSE$ و $GMER$ نشان می‌دهد که استفاده از Se باعث افزایش چشمگیر در دقت برآورد می‌شود. همچنین طبق نتایج بدست آمده می‌توان از مقدار Se و θ خاک به منظور برآورد D_p/D_0 و K_a استفاده کرد بدون اینکه نیازی به اندازه‌گیری مستقیم این دو خصوصیت باشد.

واژه‌های کلیدی: اکسیژن‌متر، پخشیدگی گاز، گذرپذیری هوا، رطوبت خاک، اشباع موثر

مقدمه

تولون و Freon-12 حتی اگر فعالیت‌های این سه گاز کاملاً متفاوت باشند نیز نزدیک هم هستند. به هم خوردن ساختمان خاک نیز بر D_p تاثیرگذار می‌باشد (۱۳). در خاک دست‌نخورده ساختمان خاک پایدار است و تمامی منافذ درشت^۴ در خاک حفظ می‌شوند. طبق نتایج به دست آمده در مطالعه تومونوری و همکاران (۳۰)، گاز در خاک می‌تواند از میان منافذ درشت سریع‌تر حرکت کند. در نتیجه در رطوبت‌های یکسان مقدار D_p در خاک‌های دست‌نخورده بیشتر از خاک‌های دست‌خورده می‌باشد. اکثر مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی پخشیدگی گاز شامل پارامترهایی هستند که تابع خصوصیات فیزیکی خاک مانند تخلخل کل (۱۸) و همچنین نوع خاک (مدل‌های کلاسیک پنمن (۲۶) و ون‌باول (۳۱)) بوده که بخاطر فقدان اطلاعات جامع در مورد نحوه تاثیرگذاری این خصوصیات روی پارامترهای مدل، موفق به پیش‌بینی دقیق پخشیدگی گاز نشدند. در مقایسه‌ای که بین خاک خشک و مرطوب توسط کال (۳) و پانندیک

نسبت پخشیدگی گاز در خاک به پخشیدگی آن در اتمسفر^۴ (D_p/D_0) و گذرپذیری هوا در خاک^۵ (K_a) تابع رطوبت خاک و سایر خصوصیات فیزیکی مانند بافت و توزیع اندازه ذرات، تخلخل تهویه‌ای، توزیع اندازه منافذ و میزان پیوستگی آنها می‌باشد (۴). گرابل و سایمر (۸) نشان دادند که چگالی ظاهری و اندازه خاکدانه‌ها تاثیر کمی روی پخشیدگی گازها دارند، اما کورریه (۶) گزارش کرد که به جز در مواردی که تخلخل تهویه‌ای بالا است، چگالی ظاهری بیشترین تاثیر را در مقدار D_p یک خاک با تخلخل تهویه‌ای مشخص دارد. همچنین پترسون و همکاران (۲۷) نشان دادند که مقادیر D_p تری‌کلرو اتیلن،

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، استاد و استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(Email: Panah.m83@gmail.com) * - نویسنده مسئول:

4- Relative diffusivity
5- Air permeability

6- Macrospores

در خاک بوده و مدل‌هایی که برای برآورد این دو خصوصیت ارائه شدند نیاز ارزیابی جامع از خواص فیزیکی خاک و شرایط آزمایش دارند که باعث کاهش اعتماد در استفاده از این مدل‌ها می‌شود. این در حالی است که این دو خصوصیت وابسته به مقدار رطوبت و اشباع موثر خاک (رطوبت تقسیم بر رطوبت اشباع) می‌باشند که به راحتی قابل اندازه‌گیری هستند. لذا هدف این تحقیق اندازه‌گیری K_a و D_p در رطوبت‌های متعدد (رطوبت اشباع تا هوا خشک) در نمونه‌های مختلف بافتی و بدست آوردن رابطه‌ای به منظور برآورد و تخمین برآورد این دو خصوصیت با کاربرد اشباع موثر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

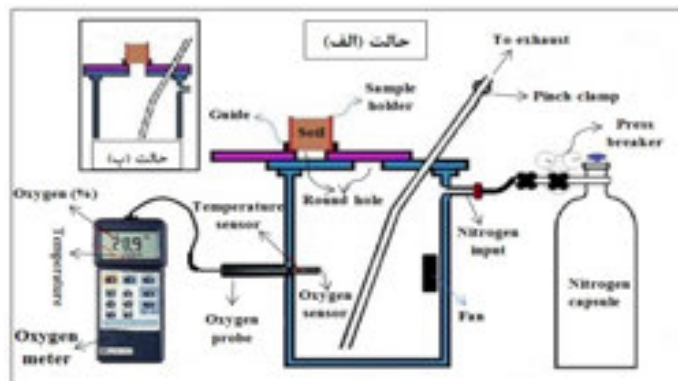
برای انجام این تحقیق تعداد ۳۰ نمونه خاک دست نخورده شامل تمامی ۱۲ کلاس بافت خاک به غیر از دو کلاس سیلتی و رس‌شنی با روش استوانه فلزی تهیه و در آزمایشگاه خاکشناسی دانشگاه تبریز مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها با محلول کلرید کلسیم نیم نرمال اشباع شده و با استفاده از ستون‌های آب آویزان در مکش‌های صفر، ۱/۵، ۲/۵، ۵/۵ کیلوپاسکال و با استفاده از دستگاه صفحات فشاری در مکش‌های ۱۰، ۳۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال (۱)، به حالت تعادل رسانده شدند. در هر مکش، رطوبت خاک استوانه‌ها به روش وزنی اندازه‌گیری و مقادیر D_p و K_a نمونه‌ها با استفاده از معادلات ۲ و ۳ محاسبه گردید. همچنین برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها از قبیل بافت (۷)، وزن مخصوص ظاهری و حقیقی (۱۱)، درصد کربن آلی (۲۳)، EC، SAR (با استفاده از دستگاه فلیم‌فتمتر) و درصد رطوبت اشباع (Se) نیز در نمونه‌های دست‌خورده اندازه‌گیری شد که در جدول ۱ آورده شده است.

و رونکلز (۲۵) انجام شد، تاکید شده است که اضافه شدن رطوبت خاک بسیار بیشتر از کاهش مقدار هوای خاک حاصل از تراکم در کاهش پخشیدگی گاز تاثیرگذار است. بنابراین D_p پیش‌گویی شده برای خاک مرطوب کمتر از خاک خشک خواهد بود. تغییر در شکل و اندازه منافذ پر از هوا در اثر تغییر رطوبت دلیلی برای تفاوت ذکر شده است. علاوه بر این مسدود شدن منافذ اشغال شده با هوا توسط آب تاثیر بیشتری در جلوگیری از پخشیدگی و کاهش D_p می‌گذارد (۳) و (۲۰).

گذرپذیری هوا در خاک (K_a) تابع قوانین حاکم بر انتقال همرفتی هوا از طریق منافذ اشغال شده با هوا بوده و وابسته به شیب فشار کل هوای اعمال شده می‌باشد. سرعت جریان سیال و انتقال هوا از طریق خاک بر اساس قانون دارسی با اختلاف فشار بین دو طرف نمونه رابطه مستقیم و با طول ستون محیط متخلخل رابطه معکوس دارد (۵ و ۱۶). پارامتر K_a از اوایل قرن بیستم برای توصیف، تعیین و مشخص کردن سریع و راحتتر آرایش ساختاری و به هم پیوستگی فضای منافذ در خاک استفاده می‌شود (۱۰ و ۲۰) و همچنین از آن برای پیش‌بینی خواص مهم فیزیکی دیگر خاک مانند هدایت هیدرولیکی اشباع خاک استفاده شده است (۱۲ و ۱۵). اندازه‌گیری K_a در مزرعه (در مقایسه با اندازه‌گیری آزمایشگاهی) به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی دقیق‌تر است (۹ و ۳۲) اما به دلیل ساختار ناهمگن و توزیع غیریکنواخت لایه‌های سطحی خاک، تغییرات این ناحیه زیاد است (۱۷). در حالیکه با اندازه‌گیری K_a در آزمایشگاه تصویر دقیق‌تر از شبکه منافذ را می‌توان در آزمایشگاه با در نظر گرفتن طیف گسترده‌ای از رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در پتانسیل‌های ماتریک به دست آورد (۱۹). گذرپذیری هوا در آزمایشگاه با استفاده از روشهای متعدد اندازه‌گیری می‌شود، اما دو روش اصلی مورد استفاده برای این منظور، روش بار ثابت (اندازه-گیری جریان هوا) و روش بار افتان (اندازه‌گیری فشار) می‌باشد. انتخاب روش معمولاً بستگی به امکانات و راحتی روش دارد (۵ و ۲). همانطور که ذکر شد D_p و K_a از خصوصیات مهم فیزیکی و کاربردی

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های به کار رفته در این تحقیق

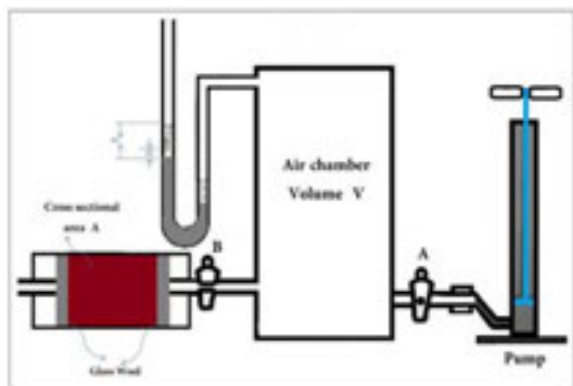
خصوصیات	حداقل	میانگین	حداکثر	انحراف استاندارد	CV
درصد شن	۷/۷	۴۲/۳	۹۰/۰۸	۲۶/۹	۰/۶
درصد سیلت	۱/۳	۳۱/۸	۵۸/۷	۱۶/۲	۰/۵
درصد رس	۵/۶	۲۵/۷	۵۱/۲	۱۴/۲	۰/۵
درصد ماده آلی	۰	۱/۴۰۵	۴/۳۲	۱/۵۴۰	۱/۰۹۶
جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	۱/۱	۱/۴	۱/۷	۰/۱	۰/۱
جرم مخصوص حقیقی (g/cm^3)	۲/۱	۲/۳	۲/۴	۰/۰۸	۰/۰۳
EC (dS/m)	۰/۸	۲/۵	۴/۸	۱/۴	۰/۵
SAR	۱/۹	۱۴/۷	۴۴/۴	۱۳/۹	۰/۹
درصد رطوبت اشباع (Se)	۱۹	۴۰	۵۷	۹/۴۳	۰/۳۳



شکل ۱- تصویر شماتیک از دستگاه اندازه گیری ضریب پخشیدگی اکسیژن

$$\log \frac{p_a / (p_a - p_2)}{p_a / (p_a - p_1)} = \frac{D \delta t}{2.303} \quad (2)$$

در این رابطه D_p پخشیدگی اکسیژن در خاک، P_a فشار جزئی اکسیژن در اتمسفر آزاد و P_1 و P_2 فشار جزئی اکسیژن داخل محفظه در زمانهای t_1 و t_2 می باشد. ویژگی K_a را می توان به دو روش بار ثابت و بار افتان اندازه گیری کرد (۲۹). برای اندازه گیری K_a در این تحقیق به دلیل در دسترس بودن و همچنین سهولت و صرف وقت کمتر، از روش بار افتان که توسط کرکهام (۱۴) ارائه شده است، استفاده گردید (شکل ۲).



شکل ۲- تصویر شماتیک دستگاه اندازه گیری گذرپذیری هوا

در این روش زمان تخلیه هوای داخل مخزن از طریق نمونه خاک و افت فشار از P_1 به P_2 اندازه گیری شده و با کاربرد رابطه زیر مقادیر K_a محاسبه گردید (برای جزئیات بیشتر به مرجع نیشابوری و همکاران (۲۴) رجوع شود):

$$K_a = -2.303 \frac{V \eta \delta s (\log P_2 - \log P_1)}{A P_a (t_2 - t_1)} \quad (3)$$

در این معادله V : حجم مخزن بر حسب سانتی متر مکعب، η

طبق نتایج گزارش شده در جدول ۱ کلاس بافت خاکهای مورد مطالعه شامل بافت های درشت شنی تا ریز رسی بود. دامنه تغییرات درصد شن نمونه های خاک بین ۷/۷۵ تا ۹۰/۰۸ درصد و با میانگین ۴۲/۳۹ درصد، درصد سیلت بین ۱/۳۷ تا ۵۸/۷۷ درصد و با میانگین ۳۱/۸۳ درصد و دامنه تغییرات درصد رس بین ۵/۶۱ تا ۵۱/۲ درصد و با میانگین ۲۵/۷۷ درصد می باشد. همچنین تغییرات EC از ۰/۸۷ تا ۴/۸۵ دسی زیمنس بر متر و SAR نمونه ها از ۱/۹۹ تا ۴۴/۴ متغیر بود. در این تحقیق به منظور بدست آوردن ضریب پخشیدگی از روش حالت غیرماندگار پخشیدگی گاز اکسیژن (۲۸) و با بکارگیری دستگاه اکسیژن متر استفاده شد (شکل ۱).

در این روش با تزریق نیتروژن به داخل محفظه و تخلیه اکسیژن، شیب زیاد غلظت بین اکسیژن داخل محفظه (حدود صفر) و بیرون محفظه (حدود ۲۱ درصد) ایجاد می گردد. در این شرایط با توجه به اختلاف غلظت بالای دو گاز اکسیژن و نیتروژن در دو سوی نمونه، این دو گاز در خلاف جهت هم حرکت و اکسیژن هوا وارد محفظه و در جهت عکس آن گاز N_2 از محفظه به اتمسفر منتشر می گردد. با اندازه گیری غلظت های (%) اولیه و ثانویه اکسیژن به ترتیب در شروع و پایان آزمایش (انتشار اکسیژن از داخل نمونه در مدت زمان ۳۰۰ ثانیه)، با دستگاه اکسیژن متر، از معادله زیر (۱) استفاده کرده و غلظت های اولیه و ثانویه اکسیژن اندازه گیری شده را به فشار جزئی اولیه و ثانویه (P_1 و P_2) تبدیل و سپس با بکارگیری معادله ۲ مقدار پخشیدگی نمونه خاک در هر رطوبت محاسبه شد.

$$P_1 = \frac{C R \theta}{M_i} \quad (1)$$

در این رابطه P_1 فشار جزئی گاز (Pa)، C غلظت گاز در واحد حجم (g/m^3)، R ثابت عمومی گاز برابر $1/0.13 \times 10^{-5}$ ($J/mole K$)، θ دما بر حسب درجه کلونین و M_i جرم مولکولی گاز است.

1- Oxygen meter

شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

در نمودار شکل ۳ نیز R^2 بدست آمده برای برآورد K_a و D_p/D_0 از طریق اندازه‌گیری با Se و θ ، مقدار قابل توجه و به ترتیب برابر 0.9763 و 0.9933 برای K_a و D_p/D_0 می‌باشد. طبق این شکل علیرغم اینکه معادلات بدست آمده برای برآورد K_a و D_p/D_0 در دو حالت استفاده از Se و θ با هم متفاوت هستند ولی با توجه به وابستگی Se به θ (نسبت رطوبت خاک به رطوبت اشباع خاک) روند تغییرات K_a و D_p/D_0 نسبت به افزایش یا کاهش Se و θ مشابه هم بوده و R^2 یکسانی نیز دارند. در نمودار شکل ۴ نیز مقادیر D_p/D_0 و K_a با θ و Se خاک، رابطه لگاریتمی داشته و مقادیر بدست آمده برای این دو خصوصیت رابطه عکس با مقدار θ و Se دارد.

همانطور که در شکل فوق نشان داده شده شیب کاهش D_p/D_0 و K_a در محدوده رطوبت اشباع تا حدود ۱۵ درصد زیاد است در حالیکه در رطوبت‌های کمتر از ۱۵ درصد احتمالاً به خاطر اینکه اکثر منافذ خاک آب خود را از دست داده‌اند از شدت کاهش مقدار D_p/D_0 و K_a کاسته شده و شیب منحنی کم می‌شود.

در جدول ۳، R^2 معادله برآورد D_p/D_0 و K_a با دو روش (استفاده از رطوبت و اشباع موثر) برای هر کدام از کلاسهای بافتی محاسبه و ارائه شده است.

همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود در اکثر کلاسهای بافتی به غیر از بافت لوم رسی، R^2 های بدست آمده در مورد رابطه و تغییرات D_p/D_0 و K_a با Se نسبت به θ بیشتر بوده و در واقع نشان میدهد که استفاده از Se بهتر و دقیقتر از رطوبت نمونه‌ها، می‌تواند D_p/D_0 و K_a را برآورد کند. معادله بهترین خط برازشی بین مقدار D_p/D_0 و K_a با اشباع موثر و رطوبت خاک برای مجموعه خاک‌های قرار گرفته در هر کلاس بافت بطور جداگانه در جداول ۴ و ۵ آورده شده است. طبق جدول ۴ حداقل و حداکثر R^2 معادله برآورد K_a ، به ترتیب برابر 0.63 (بافت لومرسی سیلتی) و 0.95 (بافت شن لومی و لومی) و همچنین حداقل و حداکثر R^2 معادله برآورد D_p/D_0 به ترتیب برابر 0.85 (بافت شنی) و 0.95 (بافت رس سیلتی) بدست آمده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌کنید علیرغم اینکه برای هر کلاس بافتی معادله جداگانه بدست آمده اما R^2 بالایی داشته و دامنه تغییرات آن هم برای K_a و هم برای D_p/D_0 کم و قابل اعتماد می‌باشد.

در جدول ۵ حداقل و حداکثر R^2 بدست آمده برای معادله برآورد K_a با استفاده از θ خاک برای هر کدام از کلاس‌های بافتی به ترتیب 0.73 (بافت لومرسی سیلتی) تا 0.92 (بافت لومی) و همچنین R^2 معادله برآورد D_p/D_0 بین حداقل 0.81 تا حداکثر 0.96 به ترتیب برای نمونه‌های با کلاس بافت لومسیلتی و لومرسی نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود همانند Se تغییرات مقدار D_p/D_0 و K_a با θ خاک در هر کلاس بافتی از معادله خاصی

ویسکوزیته هوا (ساتی پویز)، θ طول نمونه خاک (ساتی متر) A سطح مقطع خاک، (ساتی متر مربع) P_a فشار هوا (اتمسفر)، P_1, P_2 فشار هوای داخل مخزن (میلی متر آب) در شروع و پایان اندازه‌گیری، $t_2 - t_1$ زمان افت فشار داخل مخزن (ثانیه) و K_a گذریذیری خاک برای هوا (دارسی) است. در این تحقیق بمنظور ارزیابی دقت روشهای برآورد از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2) ، مجذور میانگین مربعات خطا $(RMSE)$ و میانگین هندسی نسبت خطا $(GMER)$ استفاده شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (5)$$

$$GMER = \exp \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{\hat{y}_i}{y_i} \right) \right] \quad (6)$$

در این معادلات y_i مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{y}_i مقادیر برآورد شده، \hat{y}_i میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و N تعداد کل داده‌های مقایسه شده می‌باشد.

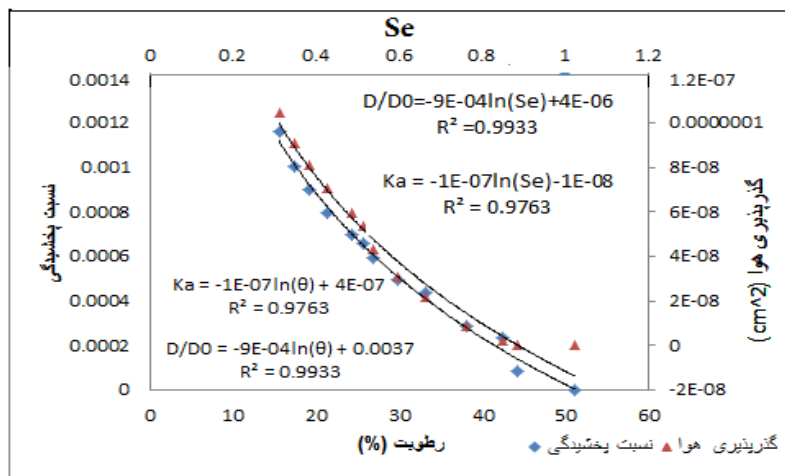
نتایج و بحث

در شکل‌های ۳ و ۴ منحنی تغییرات D_p/D_0 و K_a اندازه‌گیری شده نسبت به تغییر Se و θ در برخی خاک‌ها نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود مقادیر نسبت پخشیدگی اکسیژن و گذریذیری هوا در مقایسه با مقدار رطوبت (θ) و همچنین اشباع موثر (Se) تابع معادله لگاریتمی بوده و افزایش θ و Se منجر به کاهش D_p/D_0 و K_a بصورت لگاریتمی می‌شود. طبق نتایج بدست آمده از آنجایی که در تمامی نمونه‌ها معادله لگاریتمی بهترین برازش را داشت بنابراین هم معادله و هم R^2 به دست آمده برای هر کدام از نمونه‌ها به طور جداگانه برای تمامی نمونه‌ها محاسبه گردید. مثالی از این معادلات و نمودارها در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب برای دو نمونه با بافت‌های لوم رسی سیلتی (نمونه ۱۹۹) و لوم شنی (نمونه ۲۷۱) با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بشرح جدول زیر، به ترتیب در

- 1- Coefficient of determination
- 2- Root mean square deviation
- 3- Geometric mean of error ratio

تأثیرگذاری روی تخلخل تهویه‌ای تأثیر زیادی روی تغییرات D_p/D_0 دارند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در معادله بدست آمده برای مجموعه چند نمونه خاک، R^2 حاصل در مقایسه با تک تک نمونه‌ها کمتر می‌باشد.

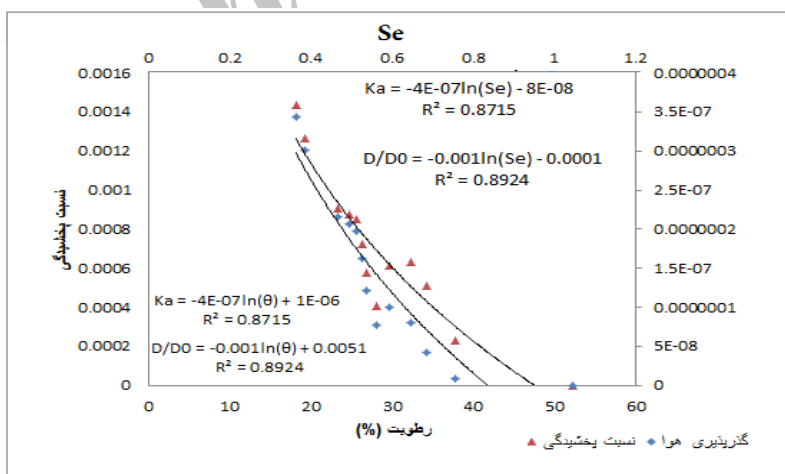
پیروی کرده و در واقع تأثیرگذاری اندازه ذرات و کلاس بافت خاک را نشان می‌دهد. این نتیجه با نتایج بدست آمده در تحقیقی که مولدراپ و همکاران (۲۱) انجام دادند مطابقت دارد. آنان گزارش کردند که D_p/D_0 در پروفیل یک خاک طبیعی تحت تأثیر بافت و ساختمان خاک بوده و این دو خصوصیت از طریق



شکل ۳- منحنی تغییرات نسبت پخشیدگی و گذرپذیری هوا برای نمونه‌ای با کلاس بافت لوم رسی سیلتی

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه های ۱۹۹ و ۲۷۱ به کار رفته در این تحقیق

نمونه	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	ماده آلی (%)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	جرم مخصوص حقیقی (g/cm^3)	EC (dS/m)	SAR	Se(%)
۱۹۹	۳۷/۷۶	۵۱/۷۶	۱۰/۴۸	۴/۳۲	۱/۳۲	۲/۱۵	۴/۱۷	۱۶/۵۳	۵۱
۲۷۱	۱۷/۷۹	۲۰/۴۵	۶۱/۷۶	۳/۶	۱/۶۵	۲/۴	۱/۸۴	۱/۹۹	۳۴



شکل ۴- منحنی تغییرات نسبت پخشیدگی و گذرپذیری هوا برای نمونه با کلاس بافت لوم شنی

شده در Se و Θ های مختلف (در مجموع ۳۹۰ نقطه) نیز بررسی و معادله بهترین خط برازشی بدست آمده برای هر کدام در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب برای برآورد D_p/D_0 و K_a ارائه شده است.

در این تحقیق به منظور بدست آوردن یک معادله واحد برای برآورد مقدار D_p/D_0 و K_a از روی مقدار Se و Θ خاک، تغییرات این دو خصوصیت با مقدار Se و Θ برای مجموعه نمونه‌های آزمایش

جدول ۳- مقایسه R^2 بدست آمده برای برآورد D_p/D_0 و K_a با کاربرد اشباع موثر و رطوبت

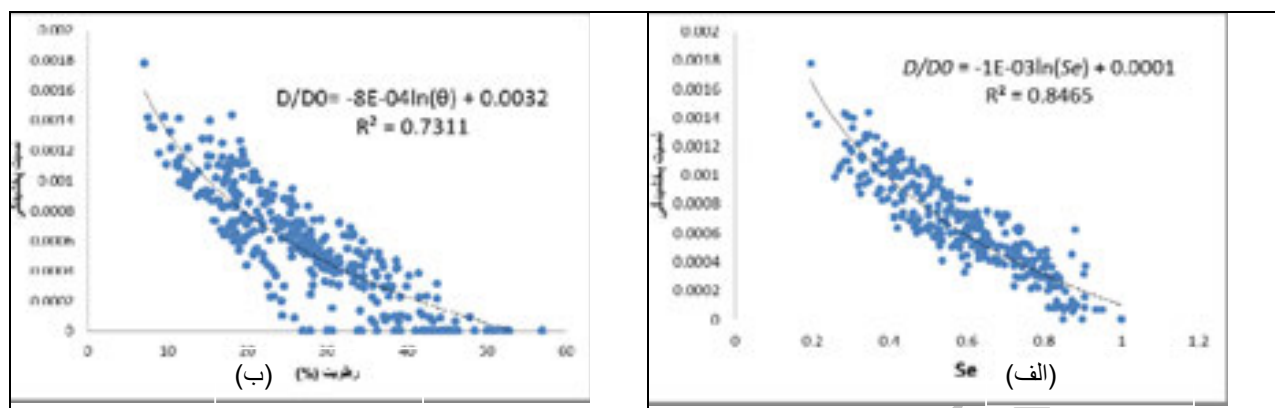
بافت	R^2 بدست آمده در استفاده از Se		R^2 بدست آمده در استفاده از Θ	
	D_p/D_0	K_a	D_p/D_0	K_a
رس سیلتی	۰/۹۳	۰/۸۸	۰/۹۵	۰/۸۷
لوم رسی	۰/۷۴	۰/۸۰	۰/۹۴	۰/۹۶
لوم	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۳
شن لومی	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۸۳
لوم رسی سیلتی	۰/۶۳	۰/۷۳	۰/۹۴	۰/۹۲
رس	۰/۷۴	۰/۸۰	۰/۹۴	۰/۹۲
لوم رسی شنی	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۹۳
لوم شنی	۰/۸۴	۰/۷۷	۰/۸۷	۰/۷۶
لوم سیلتی	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۸۱
شن	۰/۸۶	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۸۲

جدول ۴- معادله برآورد D_p/D_0 و K_a از روی Se مجموعه نمونه‌های هر کلاس بافتی

R^2		معادله برآورد D_p/D_0	معادله برآورد K_a	کلاس بافت (تعداد)
D_p/D_0	K_a			
۰/۹۵	۰/۹۳	$D_p/D_0 = -9E-04 \ln(Se) + 5E-05$	$K_a = -3E-07 \ln(Se) - 2E-08$	رس سیلتی (۳)
۰/۹۴	۰/۷۴	$D_p/D_0 = -0.001 \ln(Se) - 9E-06$	$K_a = -2E-07 \ln(Se) - 2E-08$	لوم رسی (۳)
۰/۹۳	۰/۹۱	$D_p/D_0 = -0.001 \ln(Se) + 6E-05$	$K_a = -3E-07 \ln(Se) - 2E-08$	لوم (۳)
۰/۹۴	۰/۹۵	$D_p/D_0 = -0.001 \ln(Se) - 2E-05$	$K_a = -2E-07 \ln(Se) - 3E-08$	شن لومی (۳)
۰/۹۴	۰/۶۳	$D_p/D_0 = -8E-04 \ln(Se) + 9E-05$	$K_a = -2E-07 \ln(Se) - 6E-09$	لوم رسی سیلتی (۳)
۰/۹۴	۰/۷۴	$D_p/D_0 = -0.001 \ln(Se) + 1E-05$	$K_a = -2E-07 \ln(Se) - 3E-08$	رس (۳)
۰/۹۱	۰/۹۵	$D_p/D_0 = -9E-04 \ln(Se) + 0.0001$	$K_a = -2E-07 \ln(Se) - 2E-08$	لوم رسی شنی (۳)
۰/۸۷	۰/۸۴	$D_p/D_0 = -0.001 \ln(Se) + 8E-05$	$K_a = -3E-07 \ln(Se) - 4E-08$	لوم شنی (۳)
۰/۸۷	۰/۸۵	$D_p/D_0 = -0.001 \ln(Se) + 0.0001$	$K_a = -3E-07 \ln(x Se) + 1E-08$	لوم سیلتی (۳)
۰/۸۵	۰/۸۶	$D_p/D_0 = -0.002 \ln(Se) + 0.0002$	$K_a = -2E-06 \ln(Se) + 9E-08$	شن (۳)

جدول ۵- معادله برآورد D_p/D_0 و K_a از روی رطوبت مجموعه نمونه‌های هر کلاس بافتی

R^2		معادله بدست آمده برای D_p/D_0	معادله بدست آمده برای K_a	بافت (تعداد)
D_p/D_0	K_a			
۰/۸۷	۰/۸۸	$D_p/D_0 = -8E-04 \ln(\Theta) + 0.0033$	$K_a = -3E-07 \ln(\Theta) + 1E-06$	رس سیلتی (۳)
۰/۹۶	۰/۸۰	$D_p/D_0 = -0.001 \ln(\Theta) + 0.0051$	$K_a = -2E-07 \ln(\Theta) + 9E-07$	لوم رسی (۳)
۰/۹۳	۰/۹۲	$D_p/D_0 = -0.001 \ln(\Theta) + 0.0038$	$K_a = -3E-07 \ln(\Theta) + 9E-07$	لوم (۳)
۰/۸۳	۰/۹۲	$D_p/D_0 = -9E-04 \ln(\Theta) + 0.0036$	$K_a = -3E-07 \ln(\Theta) + 1E-06$	شن لومی (۳)
۰/۹۲	۰/۷۳	$D_p/D_0 = -8E-04 \ln(\Theta) + 0.0032$	$K_a = -2E-07 \ln(\Theta) + 7E-07$	لوم رسی سیلتی (۳)
۰/۹۲	۰/۸۰	$D_p/D_0 = -0.001 \ln(\Theta) + 0.0048$	$K_a = -2E-07 \ln(\Theta) + 9E-07$	رس (۳)
۰/۹۳	۰/۹۲	$D_p/D_0 = -9E-04 \ln(\Theta) + 0.0033$	$K_a = -2E-07 \ln(\Theta) + 6E-07$	لوم رسی شنی (۳)
۰/۷۶	۰/۷۷	$D_p/D_0 = -9E-04 \ln(\Theta) + 0.0036$	$K_a = -3E-07 \ln(\Theta) + 1E-06$	لوم شنی (۳)
۰/۸۱	۰/۸۴	$D_p/D_0 = -0.001 \ln(\Theta) + 0.004$	$K_a = -3E-07 \ln(\Theta) + 1E-06$	لوم سیلتی (۳)
۰/۸۲	۰/۸۴	$D_p/D_0 = -0.002 \ln(\Theta) + 0.0052$	$K_a = -2E-06 \ln(\Theta) + 5E-06$	شن (۳)



شکل ۵- تغییرات نسبت پخشیدگی با Se (الف) و رطوبت (ب) برای تمام نمونه‌ها

بسیار کوچک می‌باشد که نشان دهنده تطابق نزدیک مقادیر برآوردی با اندازه‌گیری شده در روش استفاده از Se است. در ارتباط با معیار $GMER$ نیز هرچقدر مقادیر بدست آمده بیشتر و یا کمتر از یک باشند به ترتیب نشان‌دهنده بیش‌برآوردی و یا کم‌برآوردی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده و تجربی است. با توجه به مقادیر $GMER$ بدست آمده، استفاده از هر دو روش بکار رفته برای برآورد D_p/D_0 دارای بیش برآوردی بوده و مقادیر برآورد شده بزرگتر از مقایر واقعی می‌باشد لکن $GMER$ بدست آمده در روش اندازه‌گیری Se (۱/۰۶۵) به مراتب کمتر از روش اندازه‌گیری θ (۸/۸۴۷) بوده و همانند معیارهای R^2 و $RMSE$ برتری روش اندازه‌گیری Se را نسبت به روش اندازه‌گیری θ بمنظور برآورد D_p/D_0 نشان میدهد چرا که میزان بیش برآوردی آن خیلی کمتر می‌باشد. در تحقیقی که کال و همکاران (۲۱) برای مقایسه دو خاک خشک و مرطوب انجام دادند، نشان دادند که اضافه شدن θ خاک بسیار بیشتر از کاهش مقدار هوای خاک از طریق تراکم در کاهش پخشیدگی گاز تاثیرگذار است که این در نتیجه کاهش سطح مقطع مسیر جریان عبور گاز می‌باشد. به عبارت دیگر مسدود شدن منافذ توسط آب باعث کاهش پخشیدگی گاز می‌شود چرا که ضریب پخشیدگی گازها در محیط‌های آبی کمتر از محیط گازی بوده و از طرف دیگر نقش رطوبت در ارتباط با کاهش پخشیدگی گاز در مقایسه با سایر عواملی که باعث انسداد منافذ می‌شوند، بیشتر است و این نتیجه با یافته‌های تحقیق حاضر مطابقت دارد. مدل‌های کلاسیک (۲۶) به خاطر فقدان اطلاعات جامع در مورد تاثیر خصوصیات فیزیکی خاک موفق به ارائه پیش‌بینی دقیق از نسبت پخشیدگی گاز نگردیده و ورنر و همکاران (۳۳) گزارش کردند که مدل پنمن (۲۶) اغلب به عنوان یک مدل بدون محدودیت برای شرایط مزرعه‌ای می‌باشد. این در حالی است که اکثر مدل‌های اخیر نسبت پخشیدگی گاز، شامل پارامترهایی هستند که خصوصیات

طبق نمودارهای ارائه شده در شکل ۵ نیز همانند شکل ۴، مقدار D_p/D_0 با مقدار Se و θ خاک رابطه عکس داشته و با افزایش آنها مقدار D_p/D_0 بصورت تابع لگاریتمی کاهش می‌یابد که معادلات بدست آمده (معادله ۷ و ۸) به ترتیب زیر نشان داده شده‌اند.

$$D_p/D_0 = -1E-03\ln(Se) + 0.0001 \quad (7)$$

$$D_p/D_0 = -8E-04\ln(\theta) + 0.0032 \quad (8)$$

همانطور که در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد در این تحقیق برای ارزیابی دقت برآورد K_a و D_p/D_0 ، از سه معیار ارزیابی دقت تخمین، یعنی R^2 ، $RMSE$ و $GMER$ استفاده شد. نتایج ارزیابی حاصل از سه ملاک مذکور در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- ارزیابی دقت برآورد D_p/D_0 نمونه های خاک از طریق اندازه‌گیری رطوبت و Se

روش برآورد D_p/D_0	$GMER$	$RMSE$	R^2
اندازه گیری Se	۱/۰۶۵	۰/۲۳	۰/۸۴۶۵
اندازه‌گیری رطوبت	۸/۸۴۷	۶/۱۵	۰/۷۳۱۱

طبق نتایج ارائه شده در جدول ۶ مقایسه هر سه شاخص آماری بدست آمده از دو روش به کار رفته در این تحقیق برای برآورد D_p/D_0 از طریق اندازه‌گیری θ و Se ، دقت بالای روش اندازه‌گیری Se را در مقایسه با θ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود R^2 به ترتیب ۰/۸۴۶۵ و ۰/۷۳۱۱ برای معادلات ۷ و ۸ بدست آمد که نشان دهنده برتری روش استفاده از Se در مقایسه با استفاده از θ برای برآورد D_p/D_0 بوده و باعث افزایش ۱۱/۵ درصدی دقت برآورد می‌شود. همچنین هر چقدر مقدار $RMSE$ کوچکتر و به صفر نزدیکتر باشد نشان دهنده تطابق بیشتر مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده است. با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که مقدار $RMSE$ در روش اندازه‌گیری Se (۰/۲۳) در مقایسه با روش اندازه‌گیری θ (۶/۱۵)

نمی‌توان جهت بدست آوردن K_a فقط به مقدار رطوبت خاک بسنده کرد و لازم است در مطالعات آتی نقش سایر خصوصیات فیزیکی خاک و نحوه و میزان اثرگذاری آنها نیز بررسی شود. همچنین بر اساس دو معیار $RMSE$ و $GMER$ نیز علی‌رغم اینکه $RMSE$ بدست آمده در هر دو روش بسیار کم و جزئی بوده و نشان دهنده تطابق بالایی مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده می‌باشد اما بخصوص در روش استفاده از θ مقدار $GMER$ ($18/03$) به مراتب بیشتر از روش Se ($1/272$) بوده و طبق این نتایج، استفاده از روش اندازه‌گیری Se در خصوص برآورد K_a به روش اندازه‌گیری θ ترجیح داده و توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق با فرض ثابت بودن سایر خصوصیات فیزیکی خاک می‌توان با اطمینان قابل توجهی از این روابط بویژه رابطه γ برای پیشگویی و برآورد D_p/D_0 بدون اندازه‌گیری مستقیم آن استفاده کرد. همچنین نتایج ارائه شده در معادلات ۹ و ۱۰ به منظور برآورد K_a از روی مقدار Se و θ خاک نشان می‌دهد که استفاده از Se باعث افزایش دقت برآورد گردیده و این در حالیست که استفاده از θ زیاد قابل اعتماد نمی‌باشد که دلیل آن را می‌توان به وابستگی K_a به خصوصیات و عوامل مختلفی غیر از رطوبت نسبت داد. بنابراین پیشنهاد می‌شود بمنظور برآورد D_p/D_0 با استفاده از θ مطالعات بیشتری صورت گرفته و پارامترهایی بغیر از θ ، مانند خصوصیات فیزیکی (بافت، ساختمان) و شیمیایی یک معادله جامع و کاربردی‌تر بدست آورد.

فیزیکی خاک مانند تخلخل کل (۱۸) و آب باقیمانده (۲۲) را منعکس می‌کند. معادله بدست آمده برای برآورد مقدار K_a در Se و θ های مختلف برای مجموعه خاک‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود در این مورد هم مقدار K_a وابسته به مقدار Se و θ خاک بوده و با افزایش آنها، مقدار K_a کاهش یافته است. رابطه‌ای که بهترین برازش را بین K_a و مقدار این دو خصوصیت نشان می‌دهد، معادله لگاریتمی و بصورت زیر می‌باشد.

$$K_a = -2E-07 \ln(Se) + 2E-0.8 \quad (9)$$

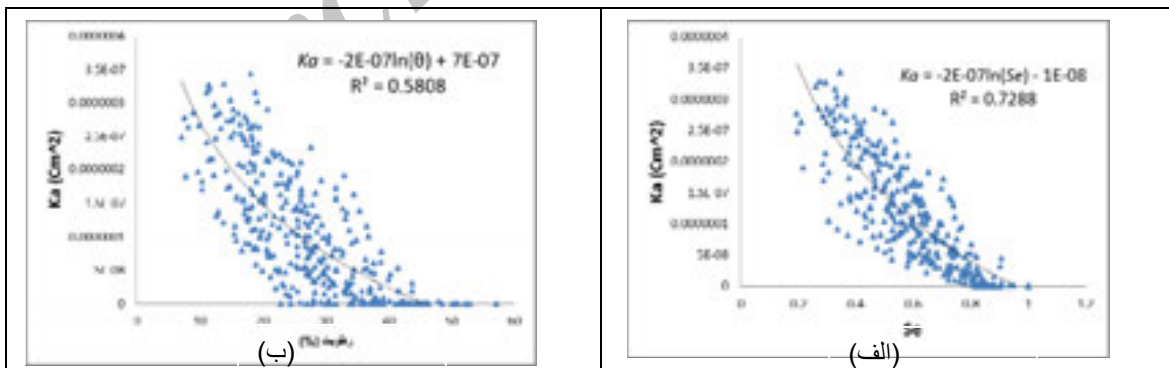
$$K_a = -2E-07 \ln(\theta) + 7E-07 \quad (10)$$

مقادیر R^2 ، $RMSE$ و $GMER$ بدست آمده برای ارزیابی دقت برآورد K_a نمونه های خاک از طریق اندازه‌گیری θ و Se برای ۳۰ نمونه خاک بکار رفته در این تحقیق در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- ارزیابی دقت برآورد K_a نمونه های خاک از طریق اندازه-گیری رطوبت و Se

روش برآورد K_a	R^2	$RMSE$	$GMER$
اندازه گیری Se	۰/۷۲۸۸	۰/۱۶۱	۱/۲۷۲
اندازه‌گیری رطوبت	۰/۵۸۰۸	۰/۰۱۹	۱۸/۰۳

همانطور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود R^2 به ترتیب برابر $0/7288$ و $0/5808$ برای برآورد K_a با استفاده از Se و θ بدست آمده که نشان می‌دهد در مورد برآورد K_a نیز استفاده از Se در مقایسه با θ ، تا حدود زیادی (افزایش دقت حدود ۱۴/۸ درصد) باعث افزایش دقت برآورد گردیده و K_a را دقیق‌تر برآورد میکند و این در حالی است که با توجه به R^2 پایین روش اندازه‌گیری θ ($0/5808$) استفاده از پارامتر مقدار رطوبت ملاک و معیار مناسبی برای برآورد K_a نبوده و



شکل ۶- منحنی تغییرات گذرپذیری هوا با Se (الف) و رطوبت (ب) برای تمام نمونه‌ها

- ۱- امامی ح., نیشابوری م.ر., شرفاء م., لیاقت ع.م. ۱۳۸۸. تخمین رطوبت نقطه عطف منحنی رطوبتی با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک. *مجله آب و خاک*, ج ۲۳. ش ۲. ص ۹۵-۱۰۳.
- 2- Ball B.C., and Schjønning P. 2002. Air permeability. In J.H. Dane and G.C. Topp, Eds. *Methods of Soil Analysis*, Part 4. Soil Sci. Soc. Am. J. 5:1141-1158.
- 3- Call F. 1957. Soil fumigation: V. Diffusion of ethylene dibromide through soils. *J. Sci. Food Agric.* 8:143-150.
- 4- Corey A.T. 1957. Measurement of water and air permeability in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 21:7-10.
- 5- Corey A.T. 1986. Air permeability. In A. Klute, Ed. *Methods of Soil Analysis*, Part 1 Physical and Mineralogical Methods, 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI. 9: 1121-1136.
- 6- Currie J.A. 1984. Gas diffusion through soil crumbs: the effect of compaction and wetting. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 35: 1-10.
- 7- Gee G.W. 2002. Particle size analysis. In: H.D. Jacob and G. Clarke Topp, Co-editor (eds). *Methods of Soil Analysis*. Part 4. Physical Methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 4:201-414.
- 8- Grable A.R. and Siemer E.G. 1968. Effect of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 32: 180-186.
- 9- Green R.D., and Fordham S.J. 1975. A field method for determining air permeability in soil. In *Soil Physical Conditions and Crop Production*. Tech. Bull. 29. HMSO, London. 273-288.
- 10- Green W.H., and Ampt G.A. 1911. Studies on soil physics. Part 1. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4: 1-24.
- 11- Grossman R.B., and Reinesch T.G. 2002. The solid phase. In: H.D. Jacob and G. Clarke Topp, Co-editor (ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 4. Physical Methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 201-414.
- 12- Iversen B.V., Moldrup P., Schjønning P., and Jacobsen O.H. 2003. Field application of a portable air permeameter to characterize spatial variability in air and water permeability. *Vadose Zone J.* 2: 618-626.
- 13- Jin Y., and Jury W.A. 1996. Characterizing the dependence of gas diffusion coefficient on soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 66-71.
- 14- Kirkham D. 1946. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 11:93-99.
- 15- Loll P., Moldrup P., Schjønning P., and Riley H. 1999. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: application in stochastic water infiltration modeling. *Water Resour. Res.* 35:2387-2400.
- 16- Maasland M., and Kirkham D. 1955. Theory and measurement of anisotropic air permeability in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 19: 395-400.
- 17- McIntyre D.S., and Tanner C.B. 1959. Anormally distributed soil physical measurements and nonparametric statistics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 88: 133-137.
- 18- Millington R.J., and Quirk J.P. 1961. Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.* 57: 1200-1207.
- 19- Moldrup P., Yoshikawa S., and Olesen T., Komatsum T., and Rolston D.E. 2003. Air permeability in undisturbed volcanic ash soils: predictive model test and soil structure fingerprint. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 32-40.
- 20- Moldrup P., Olesen T., Komatsum T., Schjønning P., and Rolston D.E. 2001. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 613-623.
- 21- Moldrup P., Olesen T., Yamaguchi T., Schjønning P., and Rolston D.E. 2004. Three porosity model for predicting the gas diffusion coefficient in undisturbed soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 750-759.
- 22- Moldrup P., Olesen T., Yamaguchi T., and Schjønning P., and Rolston D.E. 2000. Predicting the gas diffusion coefficient in undisturbed soil from soil water characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 94-100.
- 23- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: D.L. Sparks (Ed) *Methods of Soil Analyses*. Part 3. Chemical Methods. SSSA. Madison, WI., USA. 961-1010.
- 24- Neyshabouri M.R., Rafiee Alavi S.A.R., Rezaei H., and Nazemi A.H. 2010. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from air permeability. 19th World Congress of Soil Science. Brisbane Australia. 62-65.
- 25- Papendick R.I., and Runkles J.R. 1965. Transient-state oxygen diffusion in soil: I. The case when rate of oxygen consumption is constant. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 100:251-261.
- 26- Penman H.L. 1940. Gas and vapor movements in soil: The diffusion of vapors through porous solids. *J. Agric. Sci.* 30: 437-462.
- 27- Petersen L.W., Rolston D.E., Moldrup P., and Yamaguchi T. 1994. Volatile organic vapor diffusion and absorption in soil. *J. Environ. Qual.* 23: 799-805.
- 28- Taylor S.A. 1949. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. *Soil Sci. Soc. Proc. J.* 14:55-61.
- 29- Taylor S., and Ashcroft G. 1972. *Physical edaphology. The physics of irrigated and nonirrigated soils.* W. H. Freeman and Company. Pages, 563.
- 30- Tomonori F., and Miyazaki T. 2005. Effects of bulk density and soil type on the gas diffusion coefficient in repacked and undisturbed soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 170(11): 892-901.
- 31- Van Bavel C.H.M. 1952. Gaseous diffusion and porosity in porous media. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:91-104.
- 32- Van Groenewoud H. 1968. Methods and apparatus for measuring air permeability of the soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*

106:275–279.

- 33- Werner D., Grathwohl P., and Hohener P. 2004. Review of field methods for the determination of the tortuosity and effective gas-phase diffusivity in the vadosezone. *Vadose Zone J.* 3:1240–1248.

Archive of SID



Comparison of Methods to Estimate The Oxygen Diffusion Ratio and Air Permeability by Using The Effective Saturated and Soil Moisture

P. Mohamadi^{1*} - M.R. Neyshaboori² - A. Ahmadi³

Received:26-03-2013

Accepted:22-10-2013

Abstract

Gas diffusion ratio in the soil in compare to diffusion in the atmosphere (DP/D_0) and air permeability in the soil (K_a) is a function of soil physical characteristic, including pore size, continuity and air porosity. Also gas diffusion in soil is different based on the shape, moisture content (Θ), size and pore tortuosity. Therefore direct measurement is difficult and time consuming. In this study, 30 number of soil samples from different texture classes were prepared as undisturbed soil using a steel cylinder. At different effective saturation (S_e) and Θ content, DP/D_0 values were measured with oxygen diffusion unsteady method and K_a was measured with falling head method. The regression equation of their variation with the moisture and S_e was obtained. The results showed that with increase in soil Θ and S_e , DP/D_0 and K_a decreased as a logarithmic function. Maximum and minimum value are obtained, at low and high humidity (near saturation), respectively. Analysis of the results according to R^2 , RMSE and GMER showed that use S_e caused a significant increase in the accuracy of estimated. Also based on the results, the amount of soil S_e and Θ can be used to estimate DP/D_0 and K_a , without direct measurement of them.

Keywords: Oxygen meter, Gas diffusion, Air permeability, Soil moisture, Effective saturation

1,2,3- Former MSc Student, Professor and Assistant Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, University of Tabriz, Respectively
(* - Corresponding Author Email: Panah.m83@gmail.com)