

## Evaluation and Validation of Models for Estimating Oxygen Diffusion Coefficient in Different Soil Texture Classes

PANAH MOHAMMADI<sup>1\*</sup>, MOHAMMAD REZA NEYSHABOURI<sup>1</sup>, HOSSEIN BEYRAMI<sup>2</sup>

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2. National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran.

(Received: Feb. 8, 2021- Revised: June. 2, 2021- Accepted: June. 8, 2021)

### ABSTRACT

The diffusion of gas in the soil, which is usually expressed relative to its diffusion in the atmosphere ( $D_p/D_0$ ), varies based on the characteristics of shape, size and tortuosity of the pores, ventilation porosity and soil moisture content ( $\theta$ ), and its direct measurement is generally difficult and time consuming. In this study, while preparing soil samples from different texture classes, oxygen gas diffusion ( $D_p$ ) was measured at different levels of ventilation porosity ( $\epsilon$ ) and moisture content ( $\theta$ ) by unsteady-state conditions. Then its changes with  $\epsilon$  and  $\theta$  were investigated as a regression equation. The results showed that with increasing  $\epsilon$  and decreasing  $\theta$ , the ratio of  $D_p/D_0$  increased and its maximum and minimum values were obtained in the minimum soil moisture (at suction 1500 kPa) and maximum soil moisture (at zero suction), respectively. The performance of five models (Penman, 1940; Marshall, 1959; Millington and Quirk, 1960 and 1961; Moldrup et al., 2000) and the obtained regression model in this study (Equation 11) were evaluated and compared using RMSE, GMER and GSDER criteria. The results showed that the estimated  $D_p/D_0$  with equation 11 adapted very well with the measured data (RMSE = 0.022) and had a minimum overestimation or underestimation (GMER = 1.019), compared with the other models proposed in this research. Due to the high correlation of the estimated data by regression equation with the measured data (GSDER = 1.251), the degree of accuracy of this equation is higher than the five models and it can be a suitable alternative for them, if it is validated with a wider range of soils.

**Keywords:** Soil Texture, Oxygen Diffusion In Soil, Ventilation Porosity, Soil Moisture.

---

\*Corresponding Author's Email: panah.m83@gmail.com

## ارزیابی و صحت‌سنجی مدل‌های برآورد ضریب پخشیدگی اکسیژن در کلاس‌های متفاوت بافت خاک

پناه محمدی<sup>۱\*</sup>، محمدرضا نیشابوری<sup>۱</sup>، حسین بیرامی<sup>۲</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲. مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۱۸)

### چکیده

پخشیدگی گاز در خاک که معمولاً نسبت به پخشیدگی آن در اتمسفر ( $D_p/D_0$ ) بیان می‌شود، بر اساس ویژگی‌های شکل، اندازه و اعوجاج منافذ، تخلخل تهویه‌ای و مقدار رطوبت خاک ( $\theta$ ) متفاوت می‌باشد و اندازه‌گیری مستقیم آن عموماً سخت و زمان‌بر می‌باشد. در این پژوهش ضمن تهیه نمونه‌های خاک دست‌نخورده از کلاس‌های بافتی مختلف، پخشیدگی گاز اکسیژن ( $D_p$ ) در تخلخل تهویه‌ای ( $\varepsilon$ ) و رطوبت‌های ( $\theta$ ) متعدد و به روش غیرماندگار اندازه‌گیری و تغییرات آن با  $\varepsilon$  و  $\theta$  به صورت معادله رگرسیونی بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش  $\varepsilon$  و کاهش  $\theta$  خاک،  $D_p/D_0$  افزایش یافته و حداکثر و حداقل مقدار آن به ترتیب در رطوبت‌های حداقل (رطوبت خاک در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) و حداکثر (رطوبت خاک در مکش صفر) حاصل شد. نتیجه برآورد پنج مدل ارائه‌شده در منابع (پنمن، ۱۹۴۰؛ مارشال، ۱۹۵۹؛ میلینگتون و کوئیریک، ۱۹۶۰؛ میلینگتون و کوئیریک، ۱۹۶۱؛ مولدراپ و همکاران، ۲۰۰۰) و مدل رگرسیونی بدست آمده در این تحقیق (معادله ۱۱) با استفاده از معیارهای  $GSDER$ ،  $RMSE$  و  $GMER$  ارزیابی و مقایسه شدند. نتایج حاصله نشان داد که  $D_p/D_0$  برآوردی با معادله ۱۱ حداکثر تطابق را با داده‌های اندازه‌گیری شده داشته ( $RMSE$  برابر ۰/۰۲۲) و دارای حداقل بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی ( $GMER$  برابر ۱/۰۱۹) در مقایسه با سایر مدل‌های به کار گرفته شده در این تحقیق می‌باشد. با توجه به تطابق بالای داده‌های حاصل از این معادله رگرسیونی با داده‌های اندازه‌گیری شده ( $GSDER$  برابر ۱/۲۵۱) درجه صحت و درستی این معادله در مقایسه با پنج مدل سابق برآورد  $D_p/D_0$  بیشتر بوده و می‌تواند در صورت اعتبارسنجی با دامنه وسیع‌تری از خاک‌ها، جایگزینی مناسب برای آنها باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بافت خاک، پخشیدگی اکسیژن در خاک، تخلخل تهویه‌ای، رطوبت خاک.

### مقدمه

بوده و از میان منافذ درشت، سریع‌تر از منافذ ریز<sup>۲</sup> حرکت می‌کند (Horn and Smucker, 2005)، در نتیجه در رطوبت‌های یکسان مقدار  $D_p$  در خاک‌های دست‌نخورده بیشتر از خاک‌های دست‌خورده می‌باشد (Tomonori and Miyazaki, 2005). اکثر مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی پخشیدگی گاز شامل پارامترهایی هستند که تابع خصوصیات فیزیکی خاک مانند تخلخل کل (Millington and Quirk, 1961) و همچنین نوع خاک (مدل‌های کلاسیک Penman (1940) و Van Bavel (1952)) بوده که به‌خاطر فقدان اطلاعات جامع در مورد نحوه تأثیرگذاری این خصوصیات روی پارامترهای مدل، موفق به پیش‌بینی دقیق پخشیدگی گاز نشدند. در مقایسه‌ای که بین خاک خشک و مرطوب توسط Call (1957) و Papendick and Runkles (1965) انجام شد، تأکید شده است که اضافه شدن رطوبت خاک بسیار بیشتر از کاهش مقدار هوای خاک حاصل از تراکم، در کاهش

مکانیسم اصلی انتقال اکسیژن در خاک به روش پخشیدگی ( $D_p$ ) است که یک فرآیند پویا بوده و تحت تأثیر رطوبت خاک و سایر ویژگی‌های فیزیکی مانند بافت و توزیع اندازه ذرات، ساختمان خاک، تخلخل تهویه‌ای، توزیع اندازه منافذ و میزان پیوستگی آن‌ها می‌باشد (Jose et al., 2015; Corey, 1957). Grable and Siemer (1968) نشان دادند که چگالی ظاهری و اندازه خاکدانه‌ها تأثیر اندکی بر پخشیدگی گازها دارند، اما Currie (1984) گزارش کرد که به‌جز در مواردی که تخلخل تهویه‌ای بالا است، چگالی ظاهری بیشترین تأثیر را در مقدار  $D_p$  یک خاک با تخلخل تهویه‌ای مشخص دارد. تخریب و به‌هم خوردن ساختمان خاک نیز بر مقدار  $D_p$  تأثیرگذار است (Jin and Jury, 1996). در خاک دست‌نخورده ساختمان خاک پایدار بوده و تمامی منافذ درشت<sup>۱</sup> در خاک حفظ می‌شوند. انتشار گاز در خاک تابع اندازه منافذ خاک

\* نویسنده مسئول: panah.m83@gmail.com

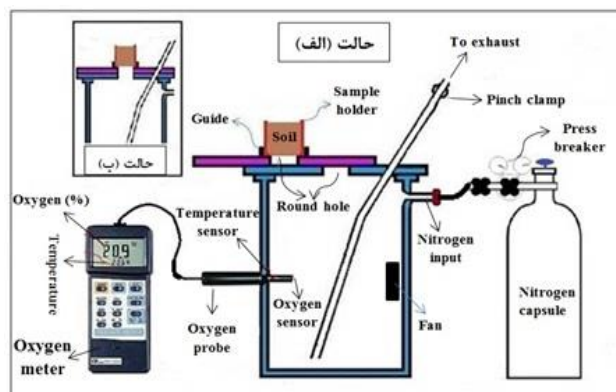
فلزی به قطر ۵ و ارتفاع ۴ سانتی‌متر از اراضی استان آذربایجان - شرقی تهیه و به آزمایشگاه منتقل گردید. نمونه‌ها با محلول کلرید کلسیم ۰/۰۵ نرمال اشباع شده و در مکش‌های صفر، ۱/۵، ۲/۵، ۳/۵، ۵/۵ و ۷/۵ کیلوپاسکال با ستون آب آویزان و در مکش‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال در دستگاه صفحه فشار به حالت تعادل رسانده شدند (Mohamadi *et al.*, 2013). جهت محاسبه رطوبت نمونه‌ها در هر مرحله از اعمال مکش، پس از هر تعادل، نمونه‌ها توزین و وزن مرطوب آنها یادداشت گردید. سپس بلافاصله ضریب انتشار اکسیژن ( $D_p$ ) در هر نمونه به روش بار افتان تعیین گردید. در پایان اعمال آخرین مکش و توزین و اندازه‌گیری  $D_p$  متناظر آن، با انتقال نمونه‌ها به آون و خشک کردن آنها وزن خشک هر کدام از نمونه‌ها تعیین و بدین ترتیب با استفاده از وزن مرطوب هر مرحله از مکش، وزن خشک نهایی و وزن مخصوص ظاهری، رطوبت وزنی و حجمی نمونه‌ها محاسبه گردید (Topp and Ferre, 2002). همچنین رطوبت حجمی نمونه‌ها در هر مرحله از تعادل مکش (۱۳ نقطه مکش) بعنوان حجم منافذ خالی از آب تعیین و با در نظر گرفتن حجم کل نمونه (حجم استوانه‌های فولادی) تخلخل تهویه‌ای نمونه‌ها در این نقاط محاسبه شد. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها شامل بافت (Gee and Or, 2002)، وزن مخصوص ظاهری و حقیقی (Grossman and Reinesch, 2002)، درصد کربن آلی (Nelson and Sommers, 1996)، هدایت الکتریکی ( $EC_e$ ) و نسبت جذب سدیم (SAR) در عصاره گل اشباع و نیز درصد رطوبت اشباع ( $S_e$ ) در تمام نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. همچنین پخشیدگی گاز اکسیژن با استفاده از روش غیرماندگار پخشیدگی گاز اکسیژن (Taylor, 1949) و با به‌کارگیری دستگاه اکسیژن‌متر<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شد (Mohamadi *et al.*, 2013).

پخشیدگی گاز تأثیرگذار است. چرا که ضریب انتشار گازها در آب کمتر از انتشار آنها در هوا است و به همین خاطر  $D_p$  برآورد شده برای خاک مرطوب کمتر از خاک خشک خواهد بود (Thorbjorn *et al.*, 2008). به عبارت دیگر تغییر در شکل و اندازه منافذ پر از هوا در اثر تغییر رطوبت و همچنین پرشدن منافذ خالی توسط آب، باعث جلوگیری از پخشیدگی گاز و کاهش  $D_p$  در خاک مرطوب می‌شود (Call, 1957 ; Moldrup *et al.*, 2001).

همان‌طور که ذکر شد  $D_p$  یکی از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی و کاربردی خاک می‌باشد و مدل‌هایی که برای برآورد این خصوصیت ارائه شده‌اند نیاز به ارزیابی جامع از خواص فیزیکی خاک و شرایط آزمایش دارند که این مسئله باعث کاهش اعتماد در استفاده از این مدل‌ها می‌شود. این در حالی است که این خصوصیت، وابسته به مقدار تخلخل تهویه‌ای و رطوبت خاک هم می‌باشد که به راحتی قابل اندازه‌گیری هستند. ضریب انتشار گازها در خاک در منابع علمی معمولاً به صورت نسبتی  $D_p/D_0$  یعنی نسبت ضریب انتشار گاز در خاک ( $D_p$ ) به ضریب انتشار همان گاز در هوای آزاد ( $D_0$ ) ارائه می‌شود که به خاطر حذف اثر دما و فشار آتمسفر در اندازه‌گیری است. هدف این تحقیق اندازه‌گیری  $D_p/D_0$  در تخلخل‌های تهویه‌ای و رطوبت‌های متعدد (رطوبت اشباع تا هوا خشک) روی نمونه‌های متفاوت خاک از نظر بافتی و به دست آوردن رابطه‌ای برای برآورد  $D_p/D_0$  از روی متغیرهای سهل‌الوصول تخلخل تهویه‌ای و رطوبت حجمی و نهایتاً مقایسه نتایج به دست آمده با مدل‌های متداول برآورد کننده این خصوصیت (Penman, 1940 ; Millington and Quirk, 1960 ; Marshall, 1959 ; Moldrup, 2000) می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق تعداد ۹۰ نمونه خاک دست‌نخورده در ده کلاس بافت خاک (به غیر از دو کلاس سیلتی و رس‌شنی) با استوانه



شکل ۱- تصویر نمایشی دستگاه اندازه‌گیری ضریب پخشیدگی اکسیژن

رابطه ۷) مولدراپ و همکاران، ۲۰۰۰  $D_p/D_0 = \varepsilon^{1.5} \frac{\varepsilon}{\phi}$   
 در این روابط  $D_p/D_0$  ضریب پخشیدگی اکسیژن در خاک نسبت به هوا،  $\varepsilon$  تخلخل تهویه‌ای و  $\phi$  تخلخل کل خاک برحسب  $m^3 m^{-3}$  می‌باشد. به منظور ارزیابی دقت مدل‌ها نیز از شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE)، میانگین هندسی نسبت خطا<sup>۲</sup> (GMER) و انحراف استاندارد هندسی خطا<sup>۳</sup> (GSDER) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2}{N}} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

$$GMER = \exp \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln \left( \frac{\hat{y}}{y_i} \right) \right] \quad \text{(رابطه ۹)}$$

$$GSDER = \exp \left[ \left( \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[ \ln \left( \frac{\hat{y}}{y_i} \right) - \ln(GMER) \right]^2 \right)^{1/2} \right] \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

در معادلات مذکور  $y_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده و  $\hat{y}_i$  مقادیر برآورد شده  $D_p/D_0$ ،  $\bar{y}_i$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و  $N$  تعداد کل داده‌های مقایسه شده می‌باشد.

## نتایج و بحث

جدول (۱) دامنه تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در هریک از نمونه‌های خاک مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد. کلاس بافت خاک‌های مورد مطالعه شامل بافت‌های شنی تا رسی است. دامنه تغییرات درصد شن نمونه‌های خاک بین ۷/۷ 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 می‌باشد. تغییرات EC از ۰/۸۷ تا ۴/۸۵ دسی-زیمنس بر متر و SAR نمونه‌ها از ۱/۹۹ تا ۴۴/۴ متغیر بود.

در این روش با تزریق گاز نیتروژن ( $N_2$ ) به داخل محفظه و تخلیه اکسیژن آن (شکل ۱)، شیب بالای غلظت بین اکسیژن داخل محفظه (حدود صفر) و بیرون محفظه (حدود ۲۱ درصد) ایجاد شد. 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 انتشار یافته و اکسیژن هوا وارد محفظه و در جهت عکس آن گاز  $N_2$  از محفظه وارد اتمسفر می‌گردد. با اندازه‌گیری غلظت‌های اولیه و ثانویه اکسیژن به ترتیب در شروع و پایان آزمایش، با استفاده از دستگاه اکسیژن‌متر، از معادله ۱ استفاده کرده و غلظت‌های اولیه و ثانویه اکسیژن اندازه‌گیری شده برحسب فشار جزئی اولیه و ثانویه ( $P_1$  و  $P_2$ ) محاسبه شد. سپس با به کارگیری معادله ۲ مقدار پخشیدگی اکسیژن متناظر هر رطوبت، در نمونه خاک‌ها محاسبه گردید (Mohamadi et al., 2013).

$$P_i = \frac{CRT}{M_i} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$\log \frac{P_a / (P_a - P_2)}{P_a / (P_a - P_1)} = \frac{D \delta_i}{2.303} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در این روابط  $P_i$  فشار جزئی گاز (پاسکال)،  $C$ ، غلظت گاز در واحد حجم ( $g/m^3$ )،  $R$ ، ثابت عمومی گاز  $J/mole K$ ،  $T$ ، دما برحسب درجه کلوین،  $M_i$ ، جرم مولکولی گاز،  $P_a$ ، فشار جزئی اکسیژن در اتمسفر آزاد و  $P_1$  و  $P_2$  فشار جزئی اکسیژن داخل محفظه در زمان‌های  $t_1$  و  $t_2$  می‌باشند. داده‌های به دست آمده برای  $D_p/D_0$  با پنج مدل برآوردی (معادلات ۳ تا ۷) وابسته به خصوصیات فیزیکی خاک که غالباً برای برآورد  $D_p/D_0$  مورد استفاده قرار می‌گیرند مورد مقایسه قرار گرفتند.

$$D_p/D_0 = 0.66\varepsilon \quad \text{(رابطه ۳) پنمن، ۱۹۴۰}$$

$$D_p/D_0 = \varepsilon^{1.5} \quad \text{(رابطه ۴) مارشال، ۱۹۵۹}$$

$$D_p/D_0 = \frac{\varepsilon^2}{\phi^{2/3}} \quad \text{(رابطه ۵) میلینگتون و کوئیریک، ۱۹۶۰}$$

$$D_p/D_0 = \frac{\varepsilon^{10/3}}{\phi^2} \quad \text{(رابطه ۶) میلینگتون و کوئیریک، ۱۹۶۱}$$

جدول ۱- ویژگی‌های آماری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک

ویژگی	حداقل	میانگین	حداکثر	انحراف استاندارد	CV
درصد شن	۷/۷	۴۲/۳	۹۰/۰۸	۲۶/۹	۰/۶۴
درصد سیلت	۱/۳	۳۱/۸	۵۸/۷	۱۶/۲	۰/۵۱
درصد رس	۵/۶	۲۵/۷	۵۱/۲	۱۴/۲	۰/۵۵
درصد ماده آلی	۰	۱/۴۰۵	۴/۳۲	۱/۵۴۰	۱/۰۹
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	۰/۰۴
درصد رطوبت اشباع (Se)	۱۹	۴۰	۵۷	۹/۴۳	۰/۲۳
تخلخل تهویه‌ای	۰	۰/۲۰	۰/۵۲	۰/۱۲	۰/۵۹

$D_p/D_0$  در مقابل  $\varepsilon$  و  $\theta$  خطی بوده و با افزایش  $\varepsilon$ ،  $D_p/D_0$  افزایش، ولی برعکس با افزایش  $\theta$ ،  $D_p/D_0$  کاهش می‌یابد. بعبارت دیگر معادله خطی بهترین برازش را در تمامی کلاس‌های بافتی خاک نشان داد که در جدول (۲)، معادله بهترین خط برازشی برآورد  $D_p/D_0$  با هر کدام از دو متغیر  $\varepsilon$  و  $\theta$  و  $R^2$  حاصله برای هر کلاس بافت ارائه شده‌است.

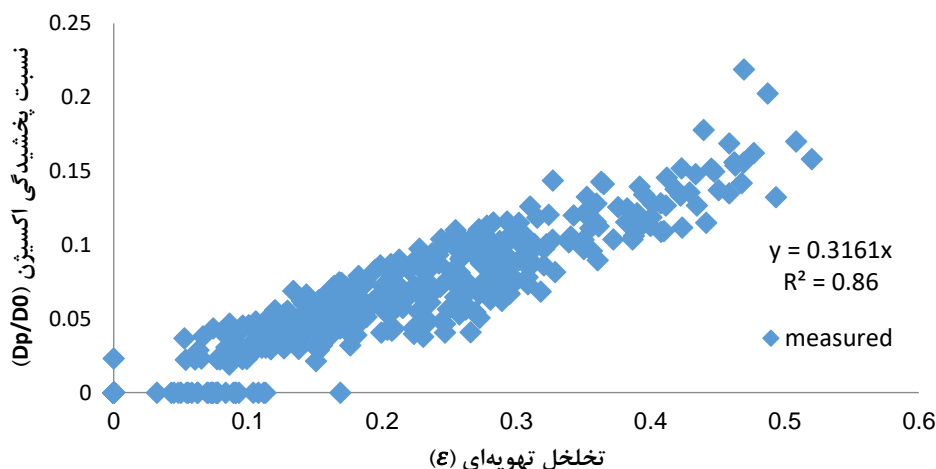
همانطور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد با اندازه‌گیری  $D_p/D_0$  در تخلخل تهویه‌ای ( $\varepsilon$ ) و رطوبت ( $\theta$ ) متناظر هر کدام از مکش‌های اعمال شده روی نمونه‌های خاک، روند تغییرات  $D_p/D_0$  نسبت به تغییر  $\varepsilon$  و  $\theta$  در تمامی نمونه‌های خاک و همچنین گروه‌های دسته‌بندی شده بر اساس کلاس بافت خاک ده کلاس بافتی مورد آزمایش در این تحقیق) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. بررسی نتایج نشان داد که، تغییر مقادیر

جدول ۲- معادلات رگرسیون خطی برای برآورد  $D_p/D_0$  از دو متغیر  $\theta$  و  $\varepsilon$

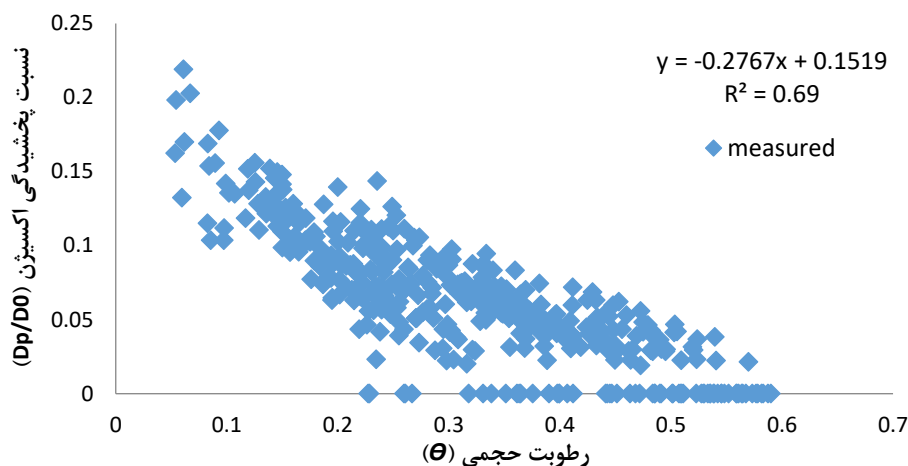
با متغیر $\theta$		با متغیر $\varepsilon$		بافت
$R^2$	معادله به‌دست‌آمده	$R^2$	معادله به‌دست‌آمده	
۰/۸۷	$D_p/D_0 = -0.133\theta + 0.153$	۰/۷۴	$D_p/D_0 = 0.280\varepsilon$	رس سیلتی
۰/۹۳	$D_p/D_0 = -0.203\theta + 0.195$	۰/۹۱	$D_p/D_0 = 0.364\varepsilon$	لوم رسی
۰/۹۲	$D_p/D_0 = -0.251\theta + 0.183$	۰/۹۲	$D_p/D_0 = 0.361\varepsilon$	لوم
۰/۸۹	$D_p/D_0 = -0.155\theta + 0.167$	۰/۹۱	$D_p/D_0 = 0.354\varepsilon$	شن لومی
۰/۸۹	$D_p/D_0 = -0.119\theta + 0.134$	۰/۸۵	$D_p/D_0 = 0.348\varepsilon$	لوم‌رسی سیلتی
۰/۹۳	$D_p/D_0 = -0.193\theta + 0.195$	۰/۹۱	$D_p/D_0 = 0.291\varepsilon$	رس
۰/۸۹	$D_p/D_0 = -0.197\theta + 0.168$	۰/۸۷	$D_p/D_0 = 0.287\varepsilon$	لوم‌رسی شنی
۰/۷۱	$D_p/D_0 = -0.162\theta + 0.161$	۰/۸۰	$D_p/D_0 = 0.314\varepsilon$	لوم شنی
۰/۸۳	$D_p/D_0 = -0.145\theta + 0.162$	۰/۸۶	$D_p/D_0 = 0.379\varepsilon$	لوم سیلتی
۰/۸۴	$D_p/D_0 = -0.587\theta + 0.317$	۰/۶۷	$D_p/D_0 = 0.375\varepsilon$	شن

با کاربرد  $\varepsilon$  بین ۰/۶۷ (بافت شنی) تا ۰/۹۲ (بافت لوم) بوده و در استفاده از  $\theta$  نیز مقدار این پارامتر بین ۰/۷۱ (بافت لوم‌شنی) تا ۰/۹۳ (بافت لوم‌رسی و رس) متغیر است. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود گروه‌بندی نمونه‌های خاک مورد آزمایش در این تحقیق در کلاس‌های بافتی جداگانه باعث شده که برای هر کلاس بافتی معادله جداگانه به‌دست آمده و ضمن اینکه هرکدام از این معادلات  $R^2$  بالایی دارند، دامنه تغییرات آن در استفاده از  $\varepsilon$  و  $\theta$  نیز کم و قابل اعتمادتر می‌باشد.

با اندازه‌گیری  $D_p/D_0$ ،  $\varepsilon$  و  $\theta$  در مکش‌های صفر تا ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، نمودار روند تغییرات  $D_p/D_0$  نسبت به دو ویژگی دیگر ( $\varepsilon$  و  $\theta$ ) در نمونه‌های مربوط به هر کلاس بافتی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و با ترسیم خط برازشی و بر اساس ضریب  $R^2$ ، بهترین معادله برآورد  $D_p/D_0$  برای هر کلاس انتخاب شدند (جدول ۲). طبق نتایج ارائه‌شده در این جدول، معادله بدست آمده برای تمامی کلاس‌های مورد بررسی بصورت خطی می‌باشد. دامنه تغییرات  $R^2$  معادله بدست آمده برای برآورد  $D_p/D_0$



شکل ۲- تغییرات نسبت پخشیدگی ( $D_p/D_0$ ) با تخلخل تهویه‌ای ( $\varepsilon$ ) برای تمام ۱۰ کلاس بافتی



شکل ۳- تغییرات نسبت پخشیدگی  $(D_p/D_0)$  با رطوبت حجمی  $(\theta)$  برای تمام ۱۰ کلاس بافتی

۰/۶۹) نشان می‌دهد که استفاده از  $\varepsilon$  نتیجه درست‌تری در مقایسه با استفاده از  $\theta$  داشته و می‌تواند با دقت و اطمینان بیشتری جهت برآورد  $D_p/D_0$  مورد استفاده قرار گیرد. نکته قابل توجه این است که ادغام تمامی کلاس‌های بافتی در یک گروه باعث کاهش  $R^2$  حاصله در مقایسه با تفکیک کلاس‌های بافتی در گروه‌های جداگانه شده و این موضوع بویژه در مورد کاربرد  $\theta$  بیشتر و تاثیرگذارتر است. بنابراین با توجه به دقت بالاتر کاربرد  $\varepsilon$ ، این ویژگی جهت برآورد  $D_p/D_0$  انتخاب و صحت و درستی آن با سایر مدل‌های به کار رفته در منابع (روابط ۳ تا ۷) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور از معیارهای ارزیابی دقت تخمین  $RMSE$ ،  $GMR$  و  $GSDER$  استفاده شد که نمودار مقایسه‌ای و نتایج ارزیابی حاصل از سه ملاک مذکور به ترتیب در شکل‌های (۴ و ۵) و جدول (۳) ارائه شده‌است.

در ادامه به منظور به دست آوردن یک معادله رگرسیونی واحد برای برآورد  $D_p/D_0$  از روی هر کدام از دو متغیر  $\theta$  و  $\varepsilon$  اندازه‌گیری شده، تغییرات  $D_p/D_0$  با دو متغیر مذکور برای مجموعه کلاس‌های بافت (در مجموع ۱۱۷۰ نقطه مشاهداتی) نیز ترسیم و در شکل‌های (۲ و ۳) ارائه شده است.

براساس شکل‌های (۲ و ۳)، با افزایش  $\varepsilon$  مقدار  $D_p/D_0$  افزایش و برعکس با افزایش  $\theta$  خاک مقدار  $D_p/D_0$  کاهش می‌یابد که معادلات به دست آمده برای هر کدام از این متغیرها (رابطه ۱۲ و ۱۳) به ترتیب عبارت‌اند از:

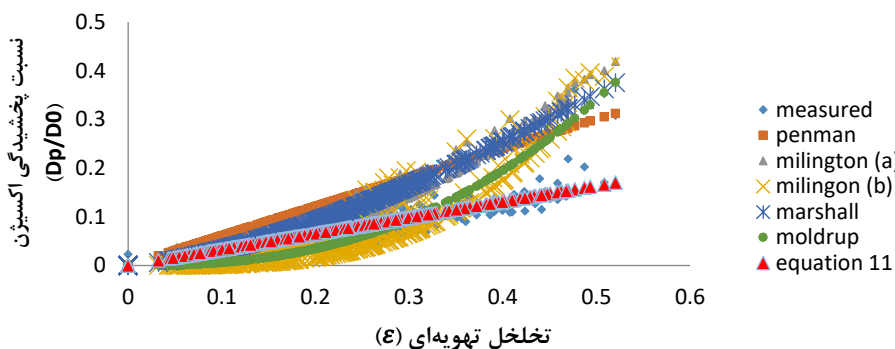
$$D_p/D_0 = 0.3161(\varepsilon) \quad R=0.86^{**} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$D_p/D_0 = -0.2767(\theta) + 0.1519 \quad R=0.69^{**} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

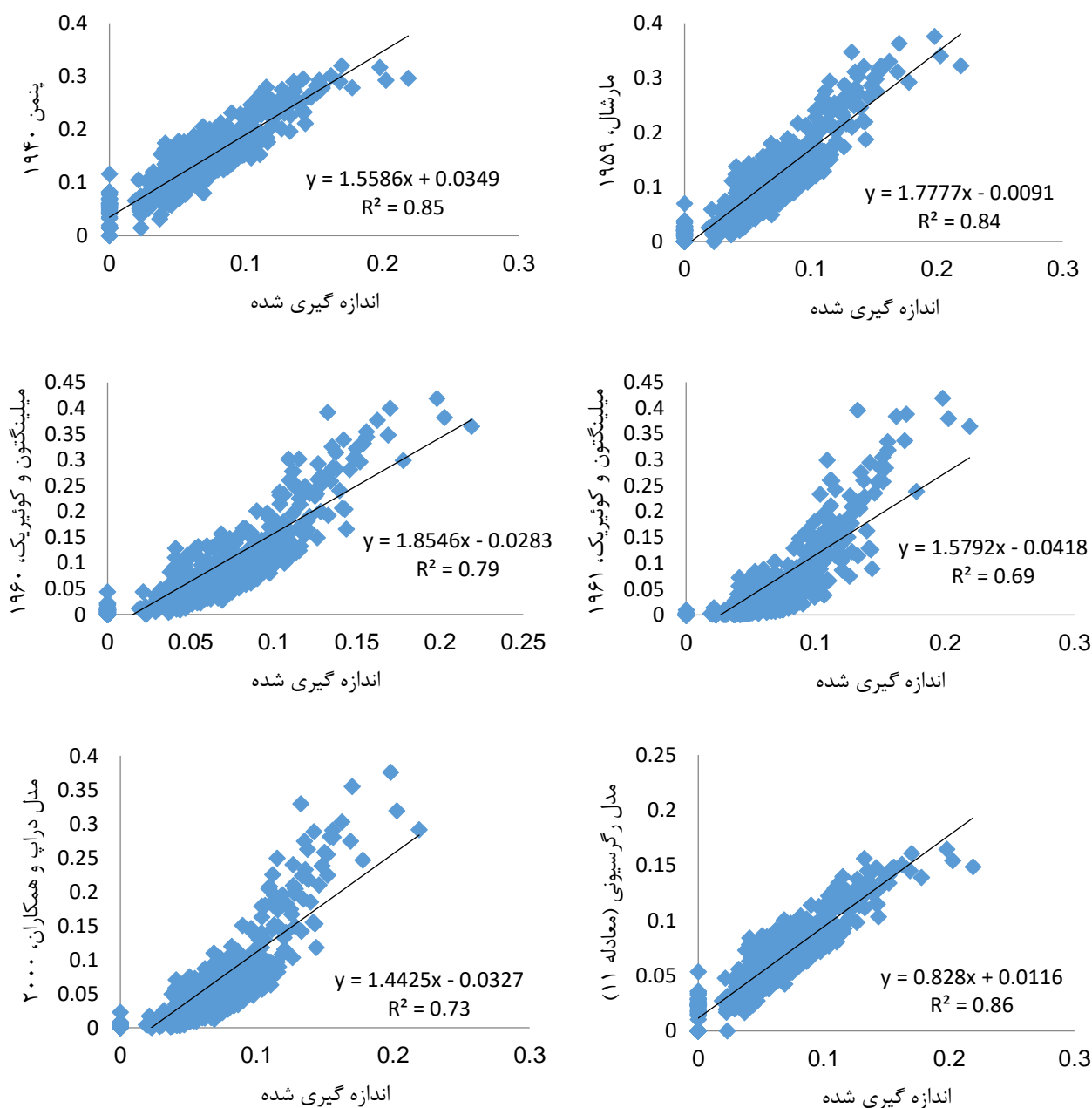
مقایسه  $R^2$  بدست آمده برای هر کدام از ویژگی‌های بکار گرفته شده ( $\theta$  و  $\varepsilon$ ) در برآورد  $D_p/D_0$  (به ترتیب برابر ۰/۸۶ و

جدول ۳- مقایسه صحت برآورد نسبت پخشیدگی اکسیژن  $(D_p/D_0)$  با بکارگیری پنج مدل ارائه شده در منابع (روابط ۳ تا ۷)

و مدل رگرسیونی به دست آمده (معادله ۱۱)				
$GSDER$	$GMR$	$RMSE$	$R^2$	مدل‌های بکار برده شده
۱/۳۷۶	۱/۷۰۳	۰/۰۶۸	۰/۸۵	پنمن، ۱۹۴۰
۱/۶۷۷	۱/۰۶۱	۰/۰۵۸	۰/۸۴	مارشال، ۱۹۵۹
۲/۷۹۶	۰/۵۱۶	۰/۰۴۸	۰/۷۹	میلینگتون و کوئیریک، ۱۹۶۰
۱/۴۲۸	۱/۳۶۰	۰/۰۶۰	۰/۶۹	میلینگتون و کوئیریک، ۱۹۶۱
۲/۰۹۱	۰/۶۳۴	۰/۰۳۹	۰/۷۳	مولدراپ و همکاران، ۲۰۰۰
۱/۲۵۱	۱/۰۱۹	۰/۰۲۲	۰/۸۶	مدل رگرسیونی (معادله ۱۱)



شکل ۴- مقایسه مدل‌های برآورد نسبت پخشیدگی اکسیژن ( $D_p/D_0$ ) با تخلخل ( $E$ )



شکل ۵- نمودار نسبت  $D_p/D_0$  برآورد شده با مدل‌ها نسبت به اندازه‌گیری شده

در جدول (۳) مقدار  $R^2$  بدست آمده از رسم نمودار مقادیر  $D_p/D_0$  برآوردی از طریق هر کدام از مدل‌های استفاده شده در

همچنین نقش مهم ویژگی‌های فیزیکی خاک روی نسبت پخشیدگی، موفق به ارائه پیش‌بینی دقیق از نسبت پخشیدگی گاز نبودند. Werner *et al.*, 2004 گزارش کردند که مدل Penman (1940) اغلب به عنوان یک مدل بدون محدودیت برای شرایط مزرعه‌ای می‌باشد. این در حالی است که اکثر مدل‌های اخیر برآورد نسبت پخشیدگی گاز، شامل پارامترهایی هستند که ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند تخلخل کل (Millington and Quirk, 1961) و آب باقیمانده (Moldrup *et al.*, 2000) را منعکس می‌کنند.

### نتیجه‌گیری

پخشیدگی و یا ضریب انتشار اکسیژن در خاک بر اساس خصوصیات شکل، اندازه و پیچ‌خوردگی منافذ و مقدار رطوبت متفاوت می‌باشد و به همین خاطر اندازه‌گیری مستقیم آن سخت و زمان‌بر می‌باشد. نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان می‌دهد که به‌کارگیری تخلخل تهویه‌ای به‌جای رطوبت حجمی به عنوان متغیر فیزیکی سهل‌الوصول، برآورد درست‌تر و مطمئن‌تری از ضریب انتشار اکسیژن در خاک می‌دهد. مقایسه پنج مدل ارائه شده در منابع توانائی متفاوتی در برآورد ضریب انتشار اکسیژن داشته و در این راستا مدل (Moldrup *et al.*, 2000) بالاترین و مدل (Penman 1940) کمترین درستی برآورد را داشتند. این در حالی است که مدل رگرسیونی خطی ارائه شده در تحقیق جاری بر مبنای هر سه شاخص آماری *RMSE*، *GMER* و *GSDER* برآورد بهتری از ضریب انتشار اکسیژن در خاک در مقایسه با پنج مدل ارائه شده در منابع نشان داد. اما به منظور کاربردی کردن مدل مذکور، نیاز به اعتبار سنجی آن در دامنه وسیع‌تری از انواع خاک‌ها دارد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

### REFERENCES

- Call, F. (1957). Soil fumigation: Vertical diffusion of ethylene di-bromide through soils. *J. Sci. Food Agric.* 8:143-150.
- Corey, A.T. (1957). Measurement of water and air permeability in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 21:7-10.
- Currie, J.A. (1984). Gas diffusion through soil crumbs: the effect of compaction and wetting. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 35: 1-10.
- Gee, G.W. and Or. D. (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.
- 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.
- 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.* PP. 201-414.
- Horn, R. and Smucker, A. (2005). Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil and Tillage Research* 82:5-14.
- 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.
- Jose, N., Mauricio, O., Luis, M. and Edmundo, A. (2015). Oxygen diffusion in soils: Understanding the factors and processes needed for modeling.

این تحقیق در برابر  $D_p/D_0$  اندازه‌گیری شده نشان دهنده برتری مدل رگرسیونی (معادله ۱۱) و مدل پنمن (۱۹۴۰) با  $R^2$  به ترتیب برابر  $0/۸۶$  و  $0/۸۵$  بوده که نشان دهنده دقت بالاتر این دو مدل در برآورد  $D_p/D_0$  نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد. همچنین مدل میلینگتون و کوئیریک (۱۹۶۱) دارای کمترین میزان دقت و  $R^2$  برابر  $0/۶۹$  می‌باشد.

علی‌رغم اینکه مقدار  $R^2$  بدست آمده برای مدل رگرسیونی (معادله ۱۱) تقریباً برابر با مدل پنمن (۱۹۴۰) می‌باشد اما به منظور مقایسه دقیق‌تر روش‌های استفاده شده در این تحقیق، میزان تطابق داده‌های برآوردی با هر کدام از مدل‌ها در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به جدول (۳) و بر مبنای هر سه شاخص آماری، مدل رگرسیونی ایجاد شده در تحقیق جاری برآورد درست‌تر و مطمئن‌تری از  $D_p/D_0$  در مقایسه با مدل‌های منابع نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود هر سه معیار ارزیابی *RMSE* (مقدار صفر نشان دهنده حداکثر تطابق)، *GMER* (نشان دهنده بیش‌برآوردی و کم-برآوردی مدل) و *GSDER* (نشان دهنده میزان تطابق و انحراف داده‌های حاصل از مدل) حداکثر تطابق و دقت مدل خطی ارائه شده در این تحقیق نسبت به سایر مدل‌ها را اثبات می‌کند. براساس معیار *RMSE* داده‌های برآوردی مدل رگرسیونی حاصله دارای حداکثر تطابق ( $0/۰۲۲$ ) و مدل (Penman 1940) حداقل تطابق ( $0/۰۶۸$ ) با داده‌های اندازه‌گیری شده دارند. براساس معیار *GMER* نیز این دو مدل مذکور کمترین و بیشترین میزان بیش‌برآوردی به ترتیب برابر  $1/۰۱۹$  و  $1/۷۰۳$  داشته‌اند. مدل‌های Millington and Quirk (1960) و Moldrup *et al.*, 2000 نیز نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده کم‌برآوردی نشان می‌دهند.

این نتایج نشان‌گر این است که مدل‌های کلاسیک به‌خاطر محدودیت استفاده در نمونه‌ها و کلاس‌های مختلف بافتی، و



- Chilean J. Agric. Res. vol.75: 35-44.
- Marshall, T.J. (1959). A relation between permability and size distribution of pores. *J. Soil Sci.* 9:1-8.
- Millington, R.J. and Quirk, J.P. (1960). Transport in porous media. p. 97-106. In F.A. Van Beren et al. (sd.) Trans. 7<sup>th</sup> Int. Congr. Soil Sci., Vol. 1, Madison, WI. 14-24 Aug. 1960. Elsevier, Amsterdam.
- Millington, R.J. and Quirk, J.P. (1961). Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.* 57: 1200-1207.
- Mohamadi, P., Neyshaboori, M.R. and Ahmadi, A. (2013). Comparison of Methods to Estimate the Oxygen Diffusion Ratio and Air Permeability by Using the Effective Saturated and Soil Moisture, *Journal of Water and Soil.* 27:1023-1033.
- 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.
- Moldrup, P., Olesen, T., Yamaguchi, T., Schjonning, 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
- 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. PP. 961-1010
- 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.
- Penman, H. L. (1940). Gas and vapor movements in soil: The diffusion of vapors through porous solids. *J. Agric. Sci.* 30: 437-462.
- Topp, G.C. and Ferre, P.A. (2002). Water content. In: J.H. Dane and G.C. Topp (eds). *Methods of Soil Analysis: Physical Methods, Part 4.* Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI, USA, pp. 417-547.
- Taylor, S. A. (1949). Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. *Soil Sci. Soc. Proc. J.* 14:55-61.
- Thorbjorn, A., Moldrup, P., Blendstrup, H., Komatsu, T. and Rolston, D. (2008). A gas diffusivity model based on air-, solid-, and water-phase resistance in variably saturated soil. *Vadose Zone Journal* 7:1276.
- 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.* 170:892-901.
- Van Bavel, C. H. M. (1952). Gaseous diffusion and porosity in porous media. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:91-104.
- 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.