



دانشگاه اُرمیاء و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و ششم، شماره پنجم، ۱۳۹۸  
۹۵-۱۱۲

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.16773.3210

## تأثیر وزن دهی مناسب داده‌های منحنی رطوبتی خاک در تجزیه‌های حداقل مربعات

امیررضا شیخ‌بگلو<sup>۱</sup>، \* حبیب خداوردیلو<sup>۲</sup>، کامران زینالزاده<sup>۳</sup>، حسین خیرفام<sup>۴</sup> و نسرين آزاد<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، <sup>۲</sup> دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، <sup>۳</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، <sup>۴</sup> استادیار گروه علوم محیط‌زیست پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه، <sup>۵</sup> دانش‌آموخته دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۰

### چکیده

**سابقه و هدف:** برآورد دقیق پارامترهای هیدرولیکی خاک اهمیتی کلیدی در شبیه‌سازی انتقال آب، املاح و آلاینده‌ها، مدیریت آب مزرعه، مدیریت تولید و حفاظت خاک و آب دارد. پارامترهای مدل منحنی رطوبتی، عموماً با برازش تابع رگرسیون غیرخطی منحنی رطوبتی بر نقطه- داده‌های اندازه‌گیری شده توسط روش حداقل مربعات به دست می‌آیند. با این حال، واریانس داده‌های منحنی رطوبتی در محدوده مقادیر مختلف رطوبت با یکدیگر متفاوت است. از این رو، برخلاف «دنباله تر» منحنی رطوبتی، ممکن است روش رایج رگرسیون غیروزن‌دار در برآورد «دنباله خشک» منحنی کارایی کافی نداشته باشد. این در حالی است که برخی فرآیندهای مهم در خاک، مانند باز- توزیع رطوبت یا انتقال آلاینده‌ها در خاک، در مقادیر رطوبتی کم در خاک و متناظر با مکش‌های زیاد منحنی رخ می‌دهند؛ بنابراین، در برازش توابع مختلف هیدرولیکی بر منحنی رطوبتی خاک، تعیین وزن‌های مناسب برای نقاط مختلف می‌تواند دقت برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی را در محدوده رطوبت‌های کم‌مقدار افزایش دهد. بنابراین هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر وزن‌دهی نقطه- داده‌های منحنی رطوبتی در افزایش دقت برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک بود.

**مواد و روش‌ها:** برای انجام این پژوهش، نمونه‌های دست‌نخورده از عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک با شش تکرار جمع‌آوری شد. منحنی رطوبتی نمونه‌های خاک در مکش‌های صفر تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. برازش معادله منحنی رطوبتی ون-گنوختن بر داده‌های اندازه‌گیری شده  $h(\theta)$  و برآورد پارامترهای هیدرولیکی آن در برنامه RETC، با روش رگرسیون متداول حداقل مربعات غیروزن‌دار و همچنین روش رگرسیون حداقل مربعات وزن‌دار انجام شد. بدین منظور، با ایجاد وزن‌هایی به صورت معکوس واریانس مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی در شش تکرار، تأثیر خطای برآورد منحنی در مقادیر رطوبت پایین نیز با وزن بزرگ‌تری در برازش رگرسیون در نظر گرفته شد. در نهایت دقت رگرسیون غیروزن‌دار و وزن‌دار در برازش مدل منحنی رطوبتی بر داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از معیارهای آماری مقایسه گردید و روش میانگین‌گیری مناسب پارامترهای هیدرولیکی معرفی شد.

\* مسئول مکاتبه: [h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir](mailto:h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir)

**یافته‌ها:** مقایسه مقادیر بهینه پارامترهای هیدرولیکی به دست آمده از برازش مدل منحنی رطوبتی ون-گنوختن به دو روش رگرسیون غیروزن‌دار و وزن‌دار نشان داد که میانگین مقادیر پارامترهای رطوبت باقی مانده ( $\theta_r$ )، رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) و ضریب  $\alpha$  (عکس مکش ورود هوا) در روش وزن‌دار کم‌تر از روش غیروزن‌دار بود، در حالی که پارامتر  $n$  در روش وزن‌دار بیش‌تر از روش غیروزن‌دار به دست آمد. استخراج منحنی رطوبتی خاک بر اساس پارامترهای هیدرولیکی برآورد شده به دو روش غیروزن‌دار و وزن‌دار نشان داد که با وجود این که روش وزن‌دار منجر به افزایش خطا ( $NRMSE$ ) در برآورد منحنی رطوبتی و کاهش همبستگی بین مقادیر رطوبت برآوردی و مشاهداتی شد، دقت برآورد نزدیکی مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده را در مقادیر رطوبت کم (مکش زیاد) افزایش و درصد خطای نقطه‌ای را در مقادیر رطوبت کم نسبت به روش غیروزن‌دار تا مقدار زیادی کاهش داد. مقایسه دو روش میانگین‌گیری از پارامترهای هیدرولیکی خاک در تکرارهای انجام شده (میانگین‌گیری از پارامترهای هیدرولیکی (روش I) و میانگین‌گیری از مقادیر رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف و برآورد پارامترهای هیدرولیکی (روش II)) نشان داد که خطای روش II در هر دو روش غیروزن‌دار و وزن‌دار، کم‌تر از روش I بود. باین حال، درصد خطای نقطه‌ای در برآورد منحنی رطوبتی در مقادیر رطوبت کم در روش I کم‌تر از روش II بوده و روش I منجر به کاهش چشم‌گیر درصد خطا در روش وزن‌دار شد.

**نتیجه‌گیری:** اختصاص وزن مناسب به نقطه- داده‌های منحنی رطوبتی، سبب بهبود برازش منحنی در دنباله خشک منحنی رطوبتی گردید که اهمیت زیادی در شبیه‌سازی فرآیندهایی مانند باز- توزیع رطوبت یا انتقال آلاینده‌ها در خاک به ویژه در شرایط خشک و نیمه‌خشک دارد.

**واژه‌های کلیدی:** برنامه RETC، پارامترهای هیدرولیکی خاک، حداقل مربعات غیروزن‌دار، حداقل مربعات وزن‌دار، مدل ون-گنوختن

### مقدمه

اندازه‌گیری توابع هیدرولیکی به برآورد غیرمستقیم آن‌ها با روش‌های موسوم به «توابع انتقالی خاک» (۳، ۱۰، ۱۱ و ۱۴) و «حل معکوس» (۷، ۸، ۹ و ۱۸) نیز پرداخته شده و با هم مقایسه گردیده‌اند (۱). مقدار بهینه پارامترهای هیدرولیکی خاک را می‌توان با برازش «مستقیم» مدل‌های منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی بر داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت و مکش ماتریک خاک و یا رطوبت/مکش و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک به دست آورد. بدین منظور عموماً از روش بهینه‌سازی با رگرسیون حداقل مربعات استفاده می‌گردد. این فرآیند اغلب با

توابع منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی در شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در ناحیه غیراشباع خاک، مدیریت بهینه آب مزرعه و عملکرد گیاه و حل مشکلات زیست‌محیطی مانند حفاظت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی کاربرد دارند (۹، ۱۵ و ۲۲). برآورد دقیق پارامترهای هیدرولیکی در کمی‌سازی و مدل‌سازی جریان آب در خاک در فرآیندهایی مانند نفوذ، ذخیره رطوبتی خاک، تبخیر، جذب آب توسط گیاه، جریان آب زیرزمینی، رواناب، فرسایش و انتقال املاح در خاک ضروری است (۱۶ و ۲۰)؛ بنابراین، افزون بر تلاش برای ارتقای روش‌های مستقیم

آن هر دو متغیر  $x$  و  $y$  عدم قطعیت دارند باید از روش وزن‌دهی مناسب استفاده کرد (۶). تلینگیشن و بولستر (۲۰۰۹ و ۲۰۱۰) در برآورد داده‌های جذب فسفر در خاک با استفاده از معادله غیرخطی لانگمویر، با مقایسه روش‌های ULS و WLS، بر اهمیت وزن‌دهی مناسب داده‌ها در تحلیل حداقل مربعات تأکید کردند (۲۰ و ۲۱). بولستر و تلینگیشن (۲۰۱۰) در بررسی روش‌های مختلف تحلیل رگرسیون با استفاده از روش حداقل مربعات وزن‌دار در داده‌های پدیده‌های جذب و انتقال مانند جذب املاح توسط ذرات خاک نشان دادند که در انتخاب روش مناسب وزن‌دهی باید به ماهیت داده‌های مستقل و وابسته و این‌که کدام یک از آن‌ها اندازه‌گیری شده و یا فاقد خطا هستند، توجه نمود (۵). نامبردگان با در نظر گرفتن روش وزن‌دهی مناسب بر داده‌ها، داده‌های جذب فسفر را به روش WLS تحلیل نمودند.

داده‌های منحنی رطوبتی خاک نیز دارای ماهیت برازشی و تحت تأثیر یک‌سری متغیر مستقل و شرایط محیطی بوده و واریانس داده‌ها در محدوده مقادیر مختلف رطوبت با یکدیگر متفاوت است. حال آن‌که در برازش توابع هیدرولیکی مختلف (از جمله تابع منحنی رطوبتی ون-گنوختن) بر نقطه-داده‌های هیدرولیکی اندازه‌گیری شده، عموماً از روش بهینه‌سازی (رگرسیون) حداقل مربعات خطا (SSE) غیروزن‌دار استفاده می‌شود. در این برازش، اگر همه داده‌های اندازه‌گیری دارای خطای ثابتی نباشند، استفاده از روش ULS ممکن است به خطاهایی بیانجامد. به بیان دیگر، در روش مرسوم غیروزن‌دار در واقع نقاط نزدیک به اشباع سهم بیش‌تری در تعیین مقدار تابع خطا دارند و بنابراین تابع منحنی رطوبتی برازش بهتری به نقاط موجود در دنباله تر منحنی رطوبتی نسبت به دنباله خشک آن دارد. این در حالی است که برخی فرآیندها

حداقل‌سازی مجموع مربعات خطا<sup>۱</sup> (SSE) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده متغیر وابسته انجام می‌گیرد که به روش حداقل مربعات غیروزن‌دار<sup>۲</sup> (ULS) معروف است. یکی از فرضیات مبنایی این روش آن است که همه داده‌ها دارای خطای اندازه‌گیری یکسانی هستند و انحراف استاندارد خطا در تمام مقادیر داده‌ها ثابت است، اما این فرض در رابطه با هر نوع داده مدل‌سازی، صادق نیست. به‌گونه‌ای که در مورد داده‌های آزمایشگاهی که در آن‌ها با افزایش مقدار متغیر مستقل ( $x$ ) مقدار متغیر وابسته ( $y$ ) کاهش می‌یابد، منطقی نیست که فرض شود وزن همه نقاط مشاهده‌ای یکسان است و مقدار خطای همه مشاهدات ارزش یکسانی در برازش خط رگرسیون داشته باشند. در این‌گونه موارد، می‌توان از روش حداقل مربعات وزن‌دار جهت افزایش دقت برآورد پارامترهای مدل استفاده نمود؛ بنابراین، در رابطه با داده‌هایی که دارای خطای اندازه‌گیری یکسانی نیستند، یکی از راه‌ها وزن‌دهی به داده‌ها متناسب با معکوس واریانس آن‌ها است که به روش حداقل مربعات وزن‌دار<sup>۳</sup> (WLS) معروف است. در نتیجه این روش، برآورد واقعی‌تری از خطای داده‌ها به دست می‌آید (۵).

در سال‌های اخیر، از روش یادشده تنها در مطالعات کم‌شماری در رابطه با فرآیندهای جذب سطحی<sup>۴</sup> استفاده شده است. کانترل (۲۰۰۸) روش‌های مختلف برآورد حداقل مربعات خطای داده‌ها را بررسی و کارایی آن‌ها در مسائل شیمی اتمسفری را ارزیابی نمود. ایشان نخست روش حداقل مربعات استاندارد را بررسی نمودند و سپس با ارزیابی روش WLS، تأکید کردند که در رابطه با پدیده‌هایی که در

- 1- Sum of Squared Error
- 2- Unweighted Least Squares
- 3- Weighted Least Squares
- 4- Adsorption

ارومیه با مختصات عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۶۲ متر بالاتر از سطح آب‌های آزاد، در زمینی به ابعاد ۱۰×۱۰ مترمربع و بدون پوشش گیاهی انجام شد. در دشت ارومیه، میانگین دمای سردترین ماه (دی) و گرم‌ترین ماه (تیر) به ترتیب ۱۵/۱- و ۳۵/۵ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه ۳۴۰ میلی‌متر می‌باشد. نمونه‌برداری از خاک به صورت نمونه‌های دست‌خورده از عمق ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک و به صورت دست‌نخورده با استفاده از استوانه نمونه‌برداری با ارتفاع معین از وسط این عمق و با شش تکرار (در شش نقطه از یک محیط دایره‌ای به قطر پنج متر و با فواصل نمونه‌گیری یکسان) انجام شد. جرم ویژه ظاهری خاک با روش استوانه (۴)، بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۲)، مواد آلی به روش والکلی- بلک اصلاح شده (۱۷) و مقادیر هدایت الکتریکی و pH خاک با عصاره‌گیری اشباع از خاک (۱۹) تعیین گردیدند (جدول ۱). افزون بر این، منحنی رطوبتی نمونه‌های خاک پس از اشباع نمونه‌ها مطابق روش مورداستفاده توسط خداوردیلو و همکاران (۲۰۱۱)، در مکش‌های صفر، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۹۵ سانتی‌متر با استفاده از دستگاه جعبه شن و در مکش‌های ۱۰۰، ۳۳۰، ۵۴۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر با دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد (۱۴). نمونه‌های دست‌نخورده برای تعیین منحنی رطوبتی خاک تا مکش ۴۰۰۰ سانتی‌متر با استوانه‌هایی به ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر و برای مکش‌های بالاتر با استوانه‌هایی به ارتفاع ۲/۲۵ سانتی‌متر (برای کاهش زمان تعادل) برداشته شد.

در خاک (از جمله باز- توزیع رطوبت یا انتقال آلاینده‌ها، به‌ویژه در شرایط رطوبتی خشک و نیمه‌خشک) در گستره‌ای محدود از منحنی رطوبتی و عموماً در شرایط رطوبتی متناظر با دنباله خشک منحنی رطوبتی رخ می‌دهند. بنابراین ممکن است برازش منحنی رطوبتی به‌طور کلی با دقتی مناسب انجام گیرد اما در برآورد بخشی از منحنی رطوبتی (بخش خشک منحنی، که اغلب در شبیه‌سازی جریان آب در خاک نیز تأثیر بیش‌تری دارد)، کارآمد نبوده و از این رو قادر به بازآفرینی شرایط واقعی حاکم بر فرایند توزیع رطوبت در آن خاک نباشد (۱۳)؛ بنابراین، انتظار می‌رود برآورد ضرایب منحنی رطوبتی مدل ون-گنوختن به روش WLS به نتایجی متفاوت از روش مرسوم ULS بیانجامد. با این حال تا آن‌جا که ما می‌دانیم، تاکنون مطالعه مشخصی در این زمینه انجام نگرفته است؛ بنابراین، پیشنهاد ما این است که در برازش توابع مختلف هیدرولیکی بر آن‌ها (از جمله تابع منحنی رطوبتی ون-گنوختن) باید با تعیین وزن‌های مناسب برای نقطه- داده‌های مختلف، دقت برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی در محدوده رطوبت‌های کم- مقدار آن نیز مدنظر قرار گیرد. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر وزن‌دهی نقطه- داده‌های منحنی رطوبتی خاک در افزایش دقت برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک و مقایسه روش‌های ULS و WLS در این خصوص بود.

### مواد و روش‌ها

**اندازه‌گیری داده‌ها:** این پژوهش در سایت تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه واقع در دشت

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه.

Table 1. Physical and chemical properties of the studied soil.								
pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	ماده آلی Organic matter (%)	جرم ویژه ظاهری Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	بافت خاک Soil texture	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	عمق خاک Soil depth (cm)
8.4	0.45	0.80	1.38	لوم رسی (Clay loam)	29.0	36.5	34.5	10-30

در مقادیر رطوبت پایین نیز با وزن بزرگ‌تری در برازش رگرسیون در نظر گرفته شد (۵، ۶، ۲۰ و ۲۱).

$$w_i = \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} \quad (2)$$

که در آن،  $w_i$  مقدار وزن و  $\sigma_{y_i}^2$  واریانس مربوط به هر نقطه اندازه‌گیری از داده‌ها است. در واقع با اندازه‌گیری هر نقطه از منحنی رطوبتی با تعداد تکرار مشخص (شش تکرار در این پژوهش)، مقدار واریانس متغیر  $y$  (رطوبت حجمی) در هر نقطه محاسبه شد و در محاسبه وزن استفاده گردید.

ارزیابی خطای برآورد مدل: برای ارزیابی و مقایسه دقت روش‌های ULS و WLS در برازش مدل ون-گنوختن بر داده‌های اندازه‌گیری شده، از ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطا (ME)، درصد خطای نقطه‌ای (EP) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) استفاده شد (رابطه‌های ۳ تا ۶):

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{o}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}}{\bar{o}} \quad (3)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (4)$$

$$EP = \frac{|O_i - P_i|}{O_i} \times 100 \quad (5)$$

$$R^2 = \left( \frac{\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 \sum (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (6)$$

مدل منحنی رطوبتی ون-گنوختن: کمی‌سازی منحنی رطوبتی خاک با مدل ون-گنوختن (۲۳) با فرض  $m = 1 - 1/n$  انجام شد (رابطه ۱):

$$S_e(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = 1 / [(1 + |\alpha h|^n)^m] \quad (1)$$

که در آن،  $\theta_s$ ،  $\theta_r$  و  $S_e$  به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و باقی‌مانده و درجه اشباع خاک،  $h$  بر حسب cm مکش ماتریک خاک در رطوبت  $\theta$ ،  $n$  پارامتر بدون بعد شکل و  $\alpha$  بر حسب cm<sup>-1</sup> (عکس مکش ورود هوا) پارامترهای برازشی مدل می‌باشند.

برنامه RETC و برازش منحنی رطوبتی به روش رگرسیون غیروزن‌دار و وزن‌دار: از برنامه RETC (۲۴) برای برازش مدل منحنی رطوبتی ون-گنوختن با استفاده از روش بهینه‌سازی حداقل مربعات (SSE) استفاده شد. روند متداول این است که وزن یکسانی به همه نقطه-داده‌ها در گستره مقادیر مختلف بار مکش ( $h$ ) تعلق می‌گیرد (روش ULS). در این پژوهش، افزون بر روش ULS از روش رگرسیون حداقل مربعات وزن‌دار (WLS) نیز استفاده شد (۵، ۶، ۲۰ و ۲۱). هدف از کاربرد روش یاد شده، انتساب وزن‌هایی مناسب برای داده‌های موجود در دنباله خشک منحنی رطوبتی بود تا در محاسبه تابع هدف برای برازش مدل، این نقاط نیز سهم متناسبی در مقدار SSE داشته و برازش بهتری بر آن‌ها صورت گیرد. بدین‌منظور با ایجاد وزن‌هایی بر داده‌های اندازه‌گیری شده (رابطه ۲)، تأثیر خطای برآورد منحنی

## نتایج و بحث

در جدول ۲ پارامترهای آماری شش تکرار از رطوبت‌های اندازه‌گیری شده خاک در مکش‌های مختلف ارائه شده است. مقادیر وزن حداقل مربعات وزن‌دار به صورت معکوس واریانس‌ها در هر مکش محاسبه گردید. مقدار وزن در رطوبت‌های زیاد کم‌تر است و با افزایش مکش خاک، مقدار وزن افزایش می‌یابد (شکل ۱). این بدان مفهوم است که داده‌های اندازه‌گیری شده در دنباله خشک منحنی رطوبتی (نقاطی با مکش‌های بالاتر) واریانس کم‌تر و بنابراین دقت بیشتری دارند. با در نظر گرفتن این وزن‌ها، مقادیر بهینه پارامترهای مدل ون-گنوختن توسط برنامه RETC به روش وزن‌دار و هم‌چنین به روش غیروزن‌دار به دست آمد (جدول ۳). مقادیر بهینه پارامترهای هیدرولیکی به دست آمده از این دو روش، برای خاک‌های مورد مطالعه کاملاً متفاوت بود. در مورد تمام خاک‌ها و هم‌چنین به‌طور میانگین، مقادیر پارامترهای رطوبت باقی‌مانده ( $\theta_r$ )، رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) و پارامتر  $\alpha$  در روش WLS کم‌تر از روش ULS ولی در رابطه با پارامتر  $n$  در روش وزن‌دار بیشتر از روش غیروزن‌دار بود. این مقادیر متفاوت، منجر به منحنی‌های رطوبتی کاملاً متفاوتی از هر خاک شد (شکل ۲). این تفاوت‌ها می‌تواند منجر به برآوردهایی متفاوت از رفتار خاک برای نمونه در توزیع رطوبت و انتقال املاح گردد.

با جایگذاری پارامترهای هیدرولیکی (جدول ۳) در رابطه ون-گنوختن، مقادیر رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف در دو روش غیروزن‌دار و وزن‌دار در شش تکرار محاسبه و با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه گردید (جدول ۴، شکل‌های ۳ و ۴).

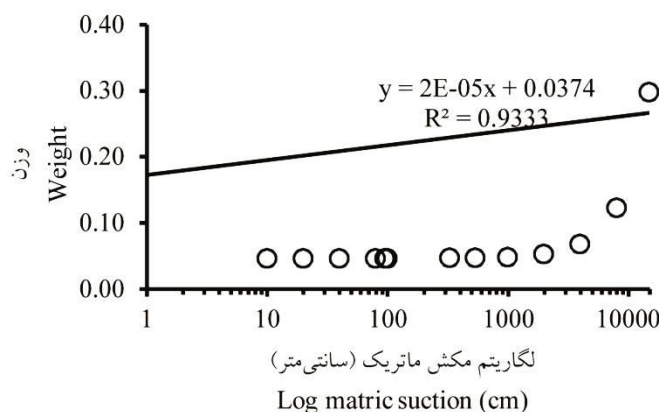
که در آن‌ها،  $O_i$  و  $P_i$  و  $\bar{O}$  و  $\bar{P}$  به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده در هر نقطه اندازه‌گیری و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده رطوبت خاک بوده و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد. شاخص  $NRMSE$  میانگینی از خطای مطلق برآوردها را اندازه‌گیری نموده و تغییرات خطای مدل‌ها را با دامنه متفاوت داده‌ها نشان می‌دهد. در حالی‌که،  $EP$  درصد خطا در هر نقطه و شاخص  $ME$  میانگین خطای نسبی و شدت کلی بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی مدل را نشان می‌دهد. ضریب تبیین نیز شاخصی از همبستگی یا همراستایی مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده است (۲).

در نهایت، به منظور معرفی یک سری از پارامترهای هیدرولیکی خاک از میان شش تکرار انجام شده، از دو روش استفاده گردید. در روش اول (روش I)، از پارامترهای هیدرولیکی حاصل از برازش برای شش نمونه مربوط به هر نقطه میانگین‌گیری شد در حالی‌که در روش دوم (روش II)، ابتدا از مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده شش نمونه خاک در مکش‌های مختلف استفاده شده برای تعیین منحنی رطوبتی شش نمونه میانگین‌گیری شد و سپس مدل منحنی رطوبتی به داده‌های حاصل از این میانگین‌گیری برازش یافت و پارامترهای هیدرولیکی خاک به دست آمد. در هر دو حالت یادشده، نتایج برازش منحنی رطوبتی با روش‌های رگرسیون غیروزن‌دار و وزن‌دار، با استفاده از رابطه‌های ۳ تا ۶ مقایسه گردید.

جدول ۲- پارامترهای آماری رطوبت خاک در مکش‌های مختلف در شش تکرار.

Table 2. Statistical parameters of soil water content in different suctions in six replicates.

پارامتر Parameter	مکش ماتریک Matric suction (cm)													
	15000	8000	4000	2000	1000	540	330	100	95	80	40	20	10	0
بیش‌ترین (Max) Maximum	0.087	0.191	0.223	0.241	0.261	0.280	0.279	0.297	0.316	0.323	0.347	0.39	0.42	0.46
کم‌ترین (Min) Minimum	0.06	0.15	0.18	0.19	0.21	0.23	0.23	0.24	0.26	0.27	0.29	0.32	0.35	0.37
میانگین Mean	0.08	0.17	0.19	0.22	0.23	0.25	0.25	0.26	0.28	0.28	0.31	0.36	0.39	0.43
انحراف معیار (Sd) Standard deviation	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
ضریب تغییرات (CV) Coefficient of variation	0.10	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.08	0.08	0.07	0.06	0.08	0.08



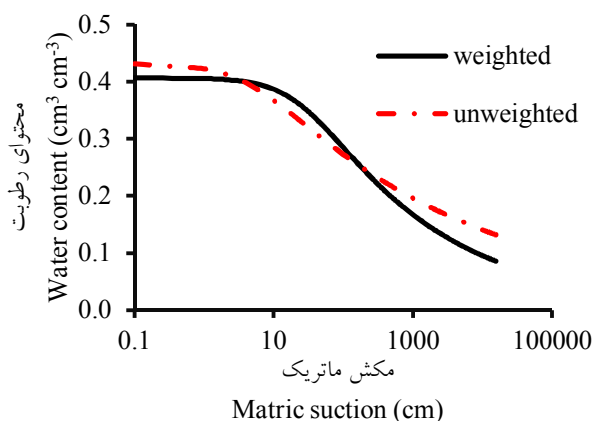
شکل ۱- مقادیر وزن محاسبه شده برای رگرسیون وزن دار در مکش‌های مختلف.

Figure 1. Calculated weights for weighting regression at different values of matric suctions.

جدول ۳- پارامترهای هیدرولیکی به دست آمده از برنامه RETC به دو روش رگرسیون وزن دار و غیروزن دار برای تکرارهای مختلف.

Table 3. Hydraulic parameters obtained from the RETC using two methods of weighted and unweighted regression for different replications.

رگرسیون وزن دار Weighted regression				رگرسیون غیروزن دار Unweighted regression				شماره تکرار Repeat number
$n$ (-)	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$n$ (-)	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	
1.227	0.050	0.431	0.0008	1.160	0.192	0.452	0.0153	1
1.310	0.004	0.358	0.0007	1.164	0.011	0.362	0.0005	2
1.257	0.037	0.404	0.0009	1.156	0.189	0.431	0.0003	3
1.235	0.040	0.439	0.0001	1.145	0.210	0.467	0.0007	4
1.225	0.066	0.436	0.0009	1.146	0.333	0.462	0	5
1.224	0.024	0.374	0.0004	1.113	0.424	0.419	0	6
1.246	0.037	0.407	0.0006	1.147	0.227	0.432	0.0028	میانگین Mean



شکل ۲- مقایسه منحنی رطوبتی محاسبه شده با استفاده از مقادیر میانگین پارامترهای به دست آمده از روش‌های رگرسیون وزن دار و غیروزن دار.

Figure 2. Comparison of the soil retention curve calculated with the mean values of the parameters obtained from the weighted and unweighted regression methods.



ULS، نقاط نزدیک به اشباع سهم بیش‌تری در تعیین مقدار تابع خطا داشته و بنابراین برازش منحنی رطوبتی در بخش خشک آن کارآمد نیست (۱۳). این در حالی است که اختصاص وزن مناسب به داده‌های منحنی رطوبتی، موجب بهبود برازش منحنی رطوبتی در دنباله خشک آن می‌شود. در پژوهش‌های پیشین نیز که در رابطه با فرآیندهای جذب توسط بولستر و تلینگیشن (۲۰۱۰)، کانترل (۲۰۰۸) و تلینگیشن و بولستر (۲۰۰۹ و ۲۰۱۰) انجام شده است (۵، ۶، ۲۰ و ۲۱)، بر استفاده از روش WLS و وزندهی مناسب در برازش روابط حاکم بر داده‌هایی که انحراف استاندارد خطای آن‌ها در تمام مقادیر داده‌ها ثابت نیست، تأکید شده است. مقادیر ME در روش WLS در همه تکرارها منفی می‌باشد که بیانگر کم‌برآوردی مدل است (جدول ۴).

طبق نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۴، مقادیر  $R^2$  در روش ULS بیش‌تر از روش WLS به‌دست آمدند. هر چند روش WLS موجب افزایش خطا (NRMSE) در برآورد منحنی رطوبتی و کاهش همبستگی (ضریب  $R^2$ ) بین مقادیر رطوبت برآورد شده و مشاهداتی شد (جدول ۴)، دقت برآورد (نزدیکی مقادیر اندازه‌گیری‌شده و برآورد شده) در مقادیر رطوبت کم (مکش زیاد) را افزایش (شکل ۳-الف) و درصد خطای نقطه‌ای را در مقادیر رطوبت کم نسبت به روش ULS به مقدار زیادی کاهش داد (شکل ۳-ب)؛ بنابراین، اهمیت کاربردی نتایج این پژوهش در برخی فرآیندهای حاکم در خاک مانند باز-توزیع رطوبت یا انتقال آلاینده‌ها در خاک به‌ویژه در شرایط خشک و نیمه‌خشک که در مقادیر رطوبتی کم در خاک و متناظر با دنباله خشک منحنی رطوبتی رخ می‌دهند، نمایان می‌شود؛ زیرا در روش مرسوم

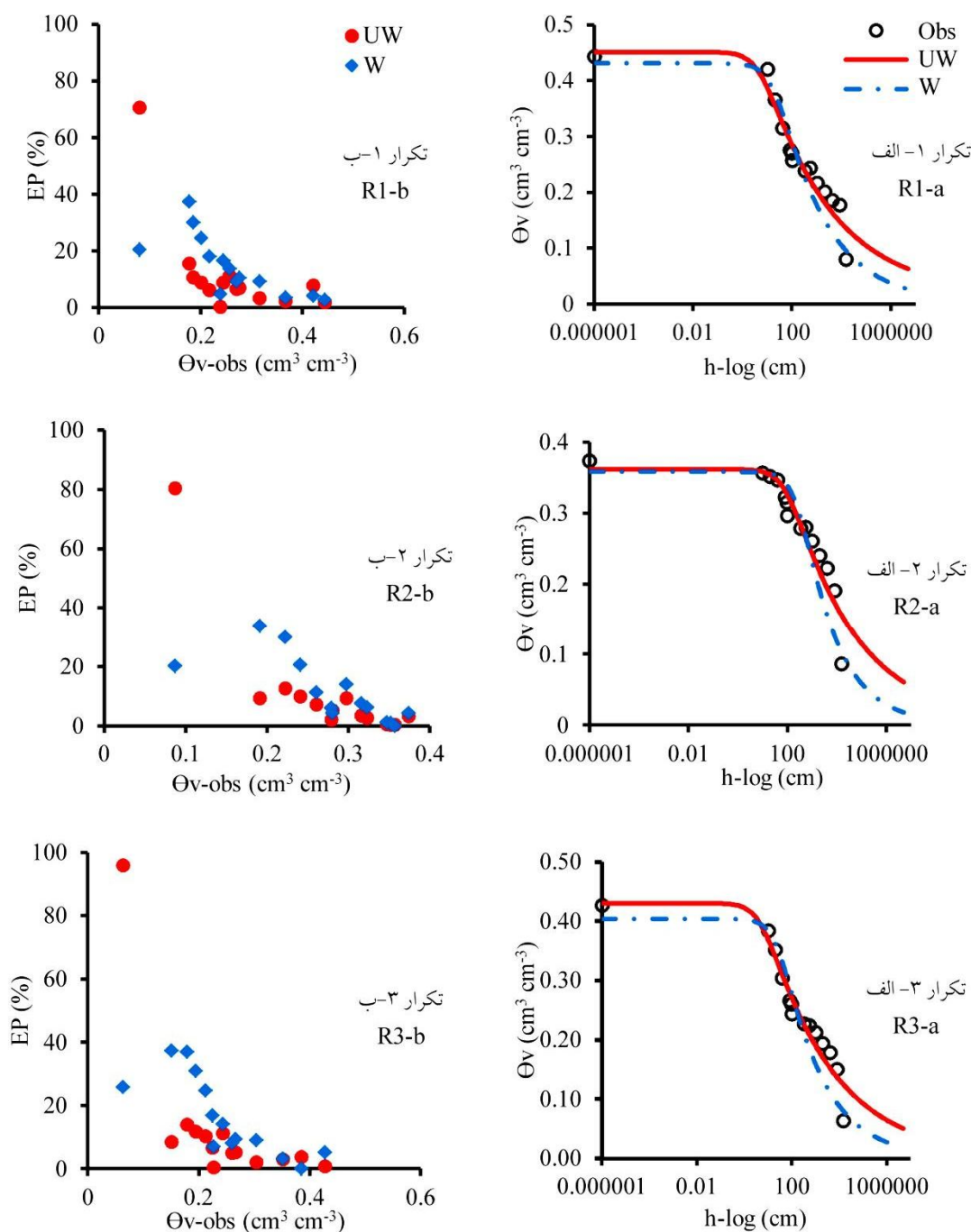
جدول ۴- شاخص‌های ارزیابی و مقایسه دو روش رگرسیون غیروزن‌دار و رگرسیون وزن‌دار در برآورد مقادیر رطوبت حجمی متناظر با مکش‌های مختلف منحنی رطوبتی خاک برای تکرارهای مختلف.

**Table 4. Evaluation and comparison indices of unweighted and weighted regression in predicting the volumetric soil moisture content corresponds to the various suctions of the soil water retention curves for different replications.**

رگرسیون وزن‌دار Weighted regression			رگرسیون غیروزن‌دار Unweighted regression			شماره تکرار Repeat number
$R^2$	ME ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	NRMSE (-)	$R^2$	ME ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	NRMSE (-)	
$y = 1.09x - 0.0341$ $R^2 = 0.9074$	-0.010	0.1346	$y = 0.9341x + 0.0174^*$ $R^2 = 0.9342$	-0.000018	0.0918	1
$y = 1.1306x - 0.0445$ $R^2 = 0.8807$	-0.0079	0.1197	$y = 0.8874x + 0.0322$ $R^2 = 0.8937$	0.00059	0.0870	2
$y = 1.1076x - 0.0395$ $R^2 = 0.9004$	-0.013	0.1504	$y = 0.9358x + 0.0162$ $R^2 = 0.9383$	0.00014	0.0916	3
$y = 1.0901x - 0.0372$ $R^2 = 0.8829$	-0.012	0.1494	$y = 0.9212x + 0.0218$ $R^2 = 0.9229$	0.000030	0.0972	4
$y = 1.0884x - 0.0341$ $R^2 = 0.9044$	-0.011	0.1411	$y = 0.9381x + 0.0159$ $R^2 = 0.9386$	-0.000026	0.0911	5
$y = 1.0854x - 0.034$ $R^2 = 0.8151$	-0.012	0.1632	$y = 0.8949x + 0.0272$ $R^2 = 0.9009$	0.00007	0.0940	6

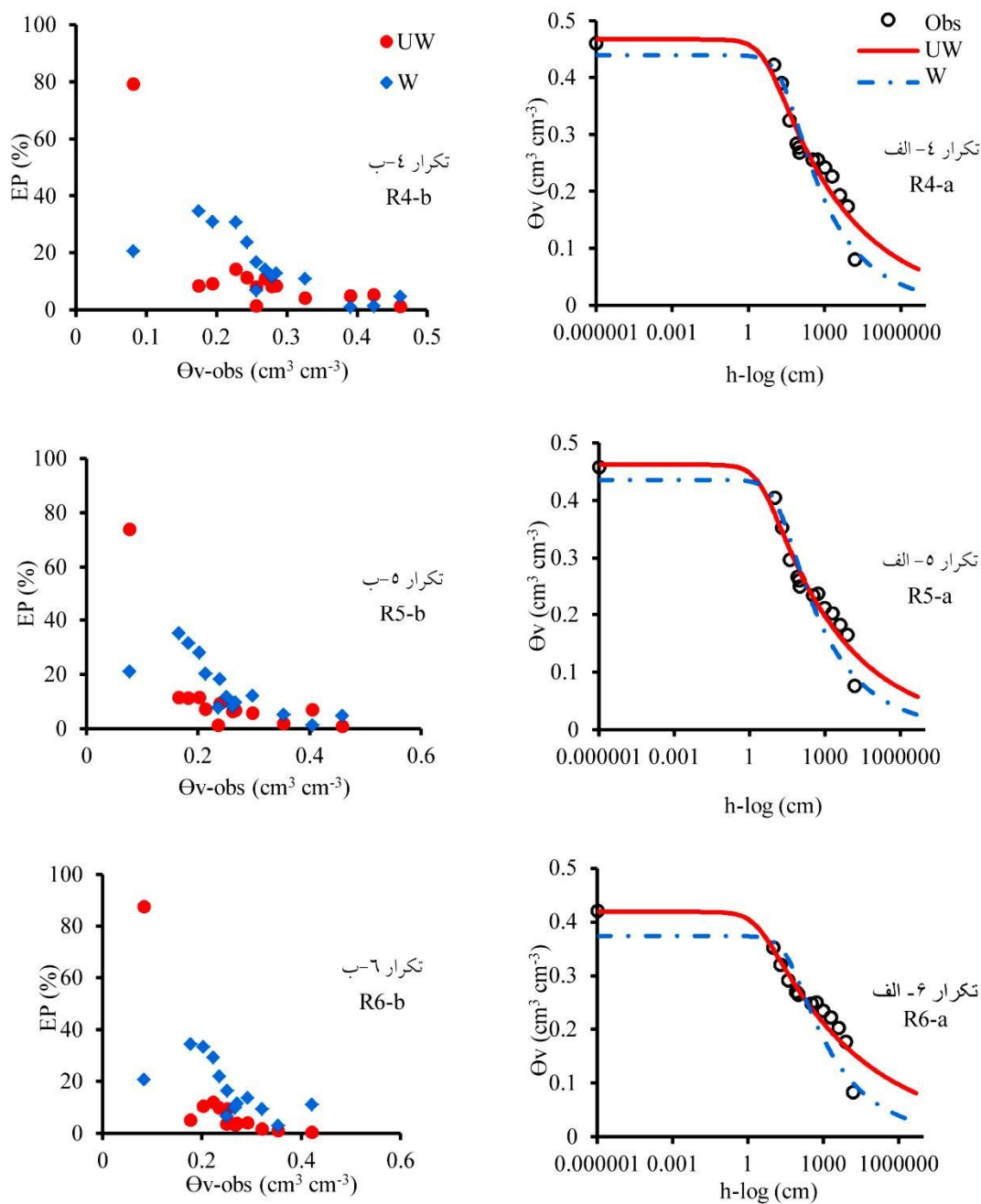
\* معادله رگرسیون بین مقادیر رطوبت مشاهده‌ای (x) و محاسبه شده (y).

\* The regression equation between the observed (x:  $\Theta_v$ -obs) and the calculated (y:  $\Theta_v$ -p) soil moisture content.



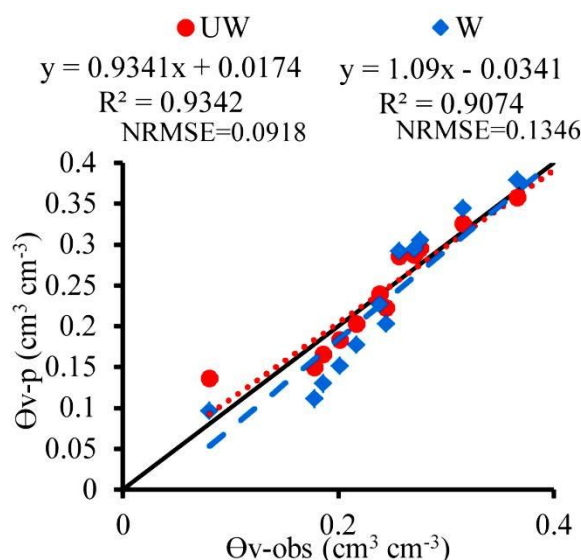
شکل ۳- الف: مقایسه منحنی رطوبتی مشاهده‌ای و محاسبه‌شده با مقادیر پارامترهای به‌دست آمده از دو روش رگرسیون غیروزن‌دار (UW) و وزن‌دار (W) در تکرارهای مختلف. ب: مقایسه درصد خطای نقطه‌ای ( $EP$ ) دو روش رگرسیون غیروزن‌دار و وزن‌دار در برآورد منحنی رطوبتی خاک در تکرارهای مختلف.

Figure 3. a: Comparison of observed soil retention curves with those calculated using the hydraulic parameters obtained via two methods of unweighted (UW) and weighted (W) regression in different replications (R1-R6). b: Comparison of error percentages ( $EP$ ) of two methods of unweighted and weighted regression in estimating soil retention curve in different replications (R1-R6).



ادامه شکل ۳- الف: مقایسه منحنی رطوبتی مشاهده‌ای و محاسبه‌شده با مقادیر پارامترهای به‌دست آمده از دو روش رگرسیون غیروزن‌دار (UW) و وزن‌دار (W) در تکرارهای مختلف. ب: مقایسه درصد خطای نقطه‌ای (EP) دو روش رگرسیون غیروزن‌دار و وزن‌دار در برآورد منحنی رطوبتی خاک در تکرارهای مختلف.

Continue Figure 3. a: Comparison of observed soil retention curves with those calculated using the hydraulic parameters obtained via two methods of unweighted (UW) and weighted (W) regression in different replications (R1-R6). b: Comparison of error percentages (EP) of two methods of unweighted and weighted regression in estimating soil retention curve in different replications (R1-R6).



شکل ۴- مقایسه مقادیر رطوبت مشاهده‌ای با رطوبت‌های محاسبه‌شده با استفاده از مقادیر پارامترهای هیدرولیکی به‌دست آمده از دو روش رگرسیون غیروزن‌دار (UW) و وزن‌دار (W) برای تکرار اول.

Figure 4. Comparison of observed soil moisture contents with those calculated using the values of the hydraulic parameters obtained by two methods of unweighted (UW) and weighted (W) regression for the first replication.

روش وزن‌دار موجب برآورد مقادیر کم‌تری از رطوبت در رطوبت‌های متوسط و برآورد مقادیر رطوبت بیشتر در نقاط رطوبتی بالا شد (شکل ۵- الف و ب). با این حال، روش وزن‌دار مقدار رطوبت اشباع را کم‌تر از روش غیروزن‌دار برآورد نمود (شکل ۵- ب و جدول ۶). همچنین، برآورد بیش‌تر رطوبت در محدوده رطوبتی بالا بین ۲۸ تا ۴۰ درصد و برآورد کم‌تر رطوبت در محدوده رطوبتی متوسط و محدوده ظرفیت زراعی بین ۱۸ تا ۲۵ درصد در روش وزن‌دار، موجب افزایش خطای روش وزن‌دار نسبت به روش غیروزن‌دار شد (شکل ۵- الف و ب). خطای روش II در هر دو حالت غیروزن‌دار و وزن‌دار کم‌تر از روش I بود (جدول ۶). با این حال، درصد خطای نقطه‌ای در برآورد رطوبت منحنی رطوبتی در مقادیر کم در روش I کم‌تر از روش II بود و روش I توانست درصد خطا را در روش وزن‌دار به مقدار چشم‌گیری بکاهد (شکل ۵).

با توجه به تغییرپذیری مکانی بالای ویژگی‌های فیزیکی خاک لازم است در اندازه‌گیری منحنی رطوبتی خاک در چندین تکرار انجام گردد. در این بخش از پژوهش برای معرفی یک منحنی رطوبتی میانگین از میان تکرارهای مختلف، دو روش میانگین‌گیری I و II با یکدیگر مقایسه گردید (جدول ۵). سپس با استفاده از مقادیر پارامترهای هیدرولیکی جدول ۵، منحنی رطوبتی خاک توسط مدل ون-گنوختن محاسبه و با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد (جدول ۶ و شکل ۵). میزان خطا (NRMSE) در روش II در هر دو حالت غیروزن‌دار و وزن‌دار کم‌تر از روش I بود (جدول ۶). با این حال، درصد خطای نقطه‌ای در برآورد رطوبت منحنی رطوبتی در مقادیر رطوبت کم در روش I کم‌تر از روش II بود و روش I توانست درصد خطا را در روش وزن‌دار به مقدار چشم‌گیری بکاهد (شکل ۵).

متوسط، درصد خطای نقطه‌ای در روش II در هر دو حالت غیروزن‌دار و وزن‌دار کم‌تر از روش I بود. با این حال، درصد خطا در رطوبت پایین در روش I در هر دو حالت غیروزن‌دار و وزن‌دار و به‌ویژه در حالت وزن‌دار کم‌تر از روش II به‌دست آمد (شکل ۵-ج).

درصد خطا را در روش وزن‌دار به مقدار چشم‌گیری بکاهد (شکل ۵).

به بیان دقیق‌تر، درصد خطای نقطه‌ای در محدوده رطوبتی بالا در هر دو روش I و II و در دو حالت غیروزن‌دار و وزن‌دار کم بود (در محدوده ۰/۳ تا ۶/۶ درصد، شکل ۵-ج). ولی در محدوده رطوبتی

جدول ۵- پارامترهای هیدرولیکی به‌دست‌آمده از برنامه RETC به دو روش رگرسیون وزن‌دار و غیروزن‌دار در دو روش میانگین‌گیری I و II.

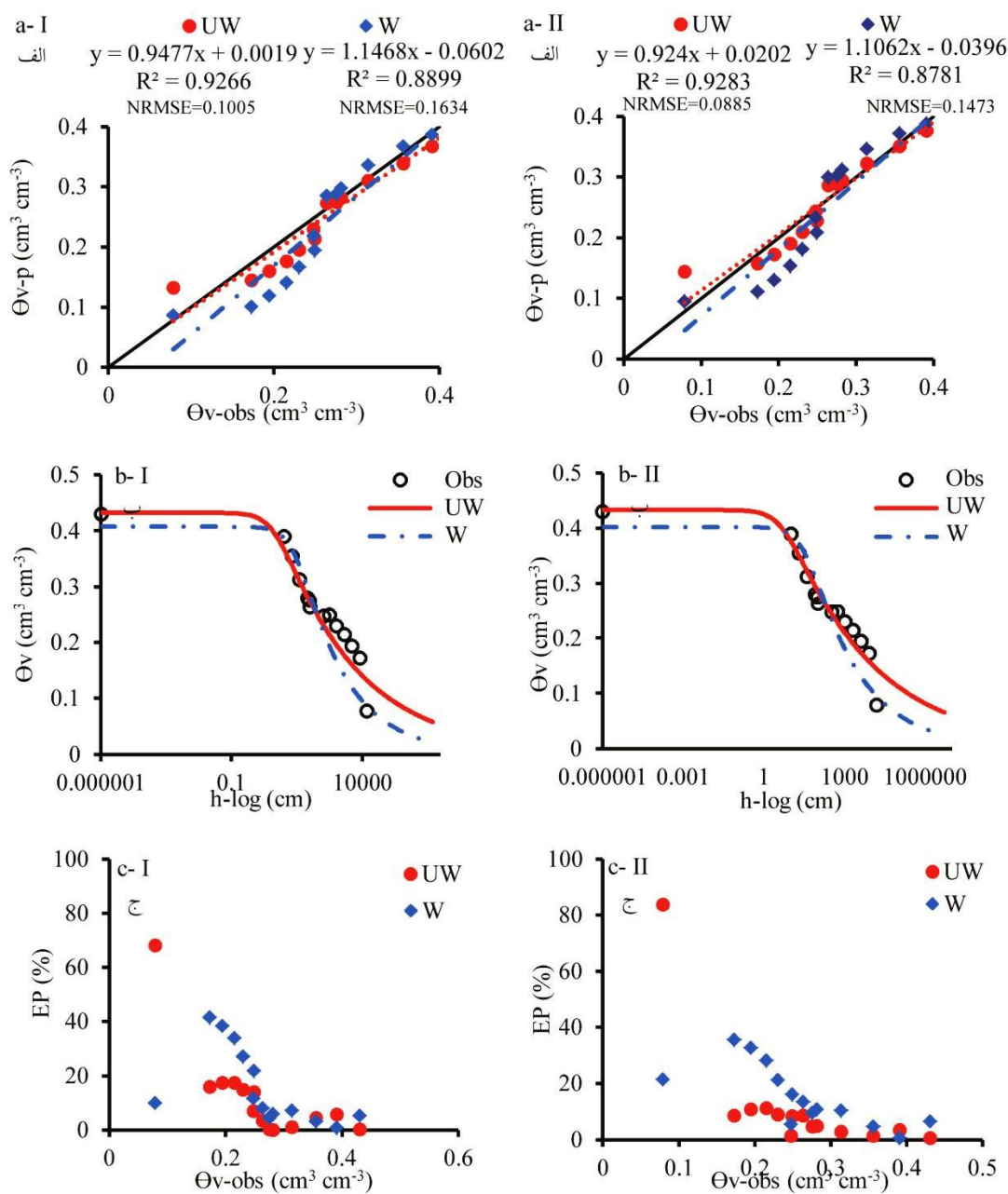
**Table 5. Hydraulic parameters obtained from the RETC using two methods of weighted and unweighted regression in two I and II averaging methods.**

رگرسیون وزن‌دار Weighted regression				رگرسیون غیروزن‌دار Unweighted regression				روش‌های میانگین‌گیری
$n$ (-)	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$n$ (-)	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	Averaging methods
1.246	0.0369	0.407	0.0006	1.147	0.226	0.432	0.0028	I
1.238	0.0285	0.402	0.0006	1.138	0.197	0.433	0.0007	II

جدول ۶- مقایسه دو روش I و II در برآورد منحنی رطوبتی خاک در رگرسیون غیروزن‌دار و رگرسیون وزن‌دار.

**Table 6. Comparison of I and II methods in estimating soil retention curve in unweighted and weighted regression.**

رگرسیون وزن‌دار Weighted regression			رگرسیون غیروزن‌دار Unweighted regression			روش‌های میانگین‌گیری
$R^2$	$ME$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$NRMSE$ (-)	$R^2$	$ME$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$NRMSE$ (-)	Averaging methods
0.8899	-0.021	0.1634	0.9266	-0.012	0.1005	I
0.8781	-0.012	0.1473	0.9283	0.00014	0.0885	II



شکل ۵- الف: مقایسه مقادیر رطوبت مشاهده‌ای با رطوبت‌های محاسبه‌شده با استفاده از مقادیر پارامترهای هیدرولیکی به‌دست‌آمده از دو روش رگرسیون غیروزن‌دار (UW) و وزن‌دار (W) در دو روش میانگین‌گیری I و II. ب: مقایسه منحنی رطوبتی مشاهده‌ای و محاسبه‌شده با مقادیر پارامترهای به‌دست‌آمده از دو روش رگرسیون غیروزن‌دار (UW) و وزن‌دار (W) در دو روش میانگین‌گیری I و II. ج: مقایسه درصد خطای نقطه‌ای (EP) دو روش رگرسیون غیروزن‌دار و وزن‌دار در برآورد منحنی رطوبتی خاک در دو روش میانگین‌گیری I و II.

Figure 5. a: Comparison of observed soil moisture contents with those calculated using the values of the hydraulic parameters obtained by two methods of unweighted (UW) and weighted (W) regression in two I and II averaging methods. b: Comparison of observed soil retention curves with those calculated using the hydraulic parameters obtained via two methods of unweighted (UW) and weighted (W) regression in two I and II averaging methods. c: Comparison of error percentages (EP) of two methods of unweighted and weighted regression in estimating soil retention curve in two I and II averaging methods.

### نتیجه‌گیری کلی

استفاده از روش متداول رگرسیون غیروزن‌دار در برازش تابع منحنی رطوبتی ون-گنوختن بر داده‌های اندازه‌گیری شده سبب برازش بهتر این تابع بر دامنه بزرگ-مقدار متغیر وابسته (رطوبت‌های بالا و نزدیک به اشباع در دنباله تر منحنی رطوبتی) شد. باین‌حال، در یک خاک نسبتاً خشک که توزیع رطوبت در دامنه نسبتاً خشک منحنی رطوبتی رخ می‌دهد، این توابع هیدرولیکی دقت کافی نداشته و استفاده از روش بهینه‌سازی رگرسیون وزن‌دار می‌تواند سبب بهبود دقت این توابع در دنباله خشک منحنی رطوبتی گردد. هدف از کاربرد روش رگرسیون وزن‌دار، انتساب وزن‌هایی مناسب برای داده‌های موجود در دنباله خشک منحنی رطوبتی است تا در محاسبه تابع هدف برای برازش مدل (مجموع مربعات خطا یا  $SSE$ )، این نقاط نیز سهم متناسبی در مقدار  $SSE$  داشته باشند و

برازش بهتری بر آن‌ها صورت گیرد. افزون بر این، به‌منظور معرفی یک سری از پارامترهای هیدرولیکی خاک از میان تکرارهای انجام شده، میانگین‌گیری از پارامترهای هیدرولیکی به‌دست‌آمده در همه تکرارها (روش I) نسبت به میانگین‌گیری از مقادیر رطوبت حجمی تکرارها در مکش‌های مختلف و برآورد پارامترهای هیدرولیکی (روش II) دارای درصد خطای نقطه‌ای کم‌تری در برآورد رطوبت منحنی رطوبتی در مقادیر رطوبت کم بود و روش I توانست درصد خطا را در روش وزن‌دار به مقدار چشم‌گیری بکاهد. پیشنهاد می‌شود تأثیر برآورد پارامترهای هیدرولیکی به روش وزن‌دهی و تفکیک آن در رطوبت‌های پایین، در شبیه‌سازی رفتارهای خاک از جمله انتقال رطوبت در خاک موردبررسی قرار گیرد.

### منابع

1. Abbasi, F. 2009. Assessment of indirect methods to estimate soil hydraulic properties for simulating soil moisture in a sandy loam soil. J. Agric. Engin. Res. 9: 4. 31-44. (In Persian)
2. Afrasiabi, F., Khodaverdiloo, H., Asadzadeh, F., and van Genuchten, M.Th. 2019. Comparison of alternative soil particle-size distribution models and their correlation with soil physical attributes. J. Hydrol. Hydromech. 67: 2. 179-190.
3. Bayram, M., and Bahmani, O. 2017. Determination appropriate model for estimating soil water characteristic curve in various moisture conditions in the one compacted clay soil. J. Environ. Stud. 43: 1. 73-86. (In Persian)
4. Blake, G.R., and Hartge, K.H. 1986. Bulk density. P 363-375, In: Klute, A. (Ed), Methods of soil analysis. Part 1. 2<sup>nd</sup> ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison. WI.
5. Bolster, C.H., and Tellinghuisen, J. 2010. On the significance of properly weighting sorption data for least squares analysis. Soil. Sci. Soc. Am. J. 74: 2. 670-679.
6. Cantrell, C.A. 2008. Technical Note: Review of methods for linear least-squares fitting of data and application to atmospheric chemistry problems. Atmos. Chem. Phys. 8: 5477-5487.
7. Filipović, V., Weninger, T., Filipović, L., Schwen, A., Bristow, K.L., Zechmeister-Boltenstern, S., and Leitner, S. 2018. Inverse estimation of soil hydraulic properties and water repellency following artificially induced drought stress. J. Hydrol. Hydromech. 66: 2. 170-180.
8. Ghobadian, R., Farhadi, B., Maleki, R., and Farmanifard, M. 2015. 2D/3D numerical simulation of saturated and unsaturated soil characteristics and comparison with tension disc. Irrigation Sciences and Engineering (Sci. J. Agric.). 37: 4. 133-143. (In Persian)
9. Groh, J., Stumpp, C., Lücke, A., Pütz, T., Vanderborght, J., and Vereecken, H. 2018. Inverse estimation of soil hydraulic and transport parameters of layered soils from water stable isotope and lysimeter data. Vadose Zone J. 17: 1. 1-19.

10. Haghverdi, A., Ghahraman, B., Joleini, M., Khoshnud Yazdi, A.A., and Arabi, Z. 2011. Comparison of different Artificial Intelligence methods in modeling water retention curve (Case study: North and Northeast of Iran). *J. Water Soil Cons.* 18: 2. 65-84. (In Persian)
11. Haghverdi, A., Ghahraman, B., Khoshnud Yazdi, A.A., Joleini, M., and Arabi, Z. 2012. Evaluation and comparison between some point and parametric pedotransfer functions in predicting soil water contents in different matric potentials. *J. Water Soil Cons.* 19: 2. 1-22. (In Persian)
12. Jacob, H., and Clarke, G. 2002. *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Method.* Soil Science Society of America, Inc, Madison, Wisconsin, USA. 1692p.
13. Jafari Gilandeh, S., Rasoulzadeh, A., and Khodaverdiloo, H. 2013. Evaluating some pedotransfer functions for simulation of transient water flow in soil. *J. Water Soil Resour. Cons.* 2: 4. 1-13. (In Persian)
14. Khodaverdiloo, H., Homae, M., van Genuchten, M.Th., and Dashtaki, S.G. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *J. Hydrol.* 399: 1-2. 93-99.
15. Lai, J., and Ren, L. 2016. Estimation of effective hydraulic parameters in heterogeneous soils at field scale. *Geoderma.* 264: 28-41.
16. Nakhaei, M., and Šimůnek, J. 2014. Parameter estimation of soil hydraulic and thermal property functions for unsaturated porous media using the HYDRUS-2D code. *J. Hydrol. Hydromec.* 62: 1. 7-15.
17. Nelson, D.W., and Sommers, L. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*, Pp: 539-579.
18. Ramos, T.B., Gonçalves, M.C., Martins, J.C., van Genuchten, M.Th., and Pires, F.P. 2006. Estimation of soil hydraulic properties from numerical inversion of tension disk infiltrometer data. *Vadose Zone J.* 5: 684-696.
19. Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., and Sumner, M.E. 2001. *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods.* Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI. 1390p.
20. Tellinghuisen, J., and Bolster, C.H. 2009. Weighting formulas for the least-squares analysis of binding phenomena data. *J. Phys. Chem. B.* 113: 17. 6151-6157.
21. Tellinghuisen, J., and Bolster, C.H. 2010. Least-squares analysis of phosphorus soil sorption data with weighting from variance function estimation: A statistical case for the Freundlich isotherm. *Environ. Sci. Technol.* 44: 13. 5029-5034.
22. Valdes-Abellan, J., Pachepsky, Y., and Martinez, G. 2018. Obtaining soil hydraulic parameters from soil water content data assimilation under different climatic/soil conditions. *Catena.* 163: 311-320.
23. Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
24. Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., and Yates, S.R. 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.* Report No. EPA/600/2-91/065. R.S Kerr Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK. 85p.





## Influence of Properly Weighting Soil-Water Retention Curve Data in Least Squares Analysis

A.R. Sheikhabglou<sup>1</sup>, \*H. Khodaverdiloo<sup>2</sup>, K. Zeinalzadeh<sup>3</sup>,  
H. Kheirfam<sup>4</sup> and N. Azad<sup>5</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Urmia University, <sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Soil Science, Urmia University, <sup>3</sup>Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Urmia University, <sup>4</sup>Assistant Prof., Dept. of Environmental Sciences, Urmia Lake Research Institute, Urmia University, <sup>5</sup>Ph.D. Graduate, Dept. of Water Engineering, Urmia University

Received: 06.17.2019; Accepted: 09.11.2019

### Abstract

**Background and Objectives:** The accurate prediction of soil hydraulic parameters is essential to simulate the transport of water, solutes and contaminants in soil, management of the agricultural water, management of production and conservation of soil and water. The least squares regression is the most common method applied for fitting the soil-water retention curve (SWRC) function to the observed data-points to optimize its parameters. However, the variance of SWRC data varies in different moisture content and therefore, unlike the wet-end of SWRC, the conventional unweighted regression method may not be sufficiently effective in estimating its dry-end (higher suctions). While, selected soil processes, such as soil moisture redistribution or transport of contaminants in soil occur in low soil moisture contents which correspond to the dry-end of the curve. Consequently, in fitting different hydraulic functions to SWRC, the accuracy of SWRC parameters would be improved in the low-moisture range content by determining the appropriate weights for data points. Accordingly, the objective of this study was to investigate the effect of properly weighting the SWRC data points on increasing the accuracy of the estimated soil hydraulic parameters.

**Materials and Methods:** In this study, undistributed soil samples were collected from 20 cm soil depth with six replications. The SWRC of the samples were measured at suctions of 0 to 15000 cm. In order to fit the van Genuchten equation of SWRC on measured values of  $h(\theta)$  and to estimate its hydraulic parameters through RETC code, the weighted least squares regression method was also used along with the conventional standard least squares regression method. For this purpose, some weights were assigned to the data points as the inverse of the variance of the measured volumetric soil water content in six replications, so that, the effect of the curve estimation error in low moisture contents were considered by assigning larger weights in the regression fitting. Finally, the accuracy of unweighted and weighted regression in the fitting of the SWRC model on the measured data was compared using statistical criteria and a suitable method for the averaging of hydraulic parameters was introduced.

**Results:** Comparison of the fitted hydraulic parameters by unweighted and weighted regression showed that the mean values of the residual water content ( $\theta_r$ ), saturated water content ( $\theta_s$ ) and  $\alpha$  parameter (reciprocal of air-entry suction) in the weighted method were lower than the unweighted method, however the  $n$  parameter values obtained by the weighted method were higher than unweighted method. The extraction of SWRC based on hydraulic parameters

\* Corresponding Author; Email: [h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir](mailto:h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir)

estimated by both unweighted and weighted methods showed that the weighted method increases the accuracy of the estimation and reduces the percentage of point error in lower moisture contents (higher suctions) compared to the unweighted method. Although, the weighting method generally increased the error of SWRC estimation and decreased the correlation between estimated and observed moisture content. Comparison of two methods of averaging of soil hydraulic parameters in the replicates showed that in both unweighted and weighted regression, the method II (averaging of volumetric water contents at different suctions and estimating hydraulic parameters) had a lower error in comparison to method I (averaging of hydraulic parameters). However, in estimation of SWRC in lower moisture contents, the method I had lower point error than that of method II. The method I reduced the error percentage in the weighting method.

**Conclusion:** Assigning proper weight to SWRC data points improves curve fitting in lower moisture range, which is very important in simulating redistribution of moisture or transfer of contaminants transport in the soil processes, particularly in arid and semi-arid conditions.

**Keywords:** RETC code, Soil hydraulic parameters, Unweighted least squares, van Genuchten model, Weighted least squares