

برآورد توابع انتقالی به منظور تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های شور و شور - سدیمی

میثم رضانی^{۱*}، بهزاد قنبریان علویجه^۲، عبدالمجید لیاقت^۳ و شکوفه صالحی خشکرودی^۴

(E-mail: me.ramezani@gmail.com)

(تاریخ دریافت: ۸۹/۷/۱۰ - تاریخ پذیرش: ۹۰/۳/۴)

چکیده

منحنی مشخصه رطوبتی از جمله مشخصه‌های مهم هیدرولیکی خاک می‌باشد که اندازه‌گیری مستقیم آن وقت گیر و هزینه‌بر می‌باشد. از این رو روش‌های غیرمستقیم مانند توابع انتقالی به منظور پیش‌بینی این خصوصیت با استفاده از داده‌های سهل‌الوصول ارائه می‌گردد. در این مطالعه، از روش رگرسیون خطی چندمتغیره به منظور توسعه توابع انتقالی نقطه‌ای برای خاک‌های شور و شور - سدیمی استفاده شده است. بدین منظور ۶۸ نمونه خاک که هدایت الکتریکی آنها بیشتر از چهار دسی‌زیمنس بر متر بوده و بیش از نیمی از آنها ESP بیشتر از ۱۵ درصد داشته‌اند انتخاب شدند. به منظور توسعه توابع انتقالی و استفاده از روش Cross-validation داده‌ها در ۱۰ گروه مجزا تقسیم شدند و سپس هر گروه به صورت تصادفی به نسبت ۱:۳ به دو قسمت آزمون و صحت‌سنجی جدا گردید. در نرم‌افزار SPSS پارامترهای انحراف معیار هندسی اندازه ذرات (d_g)، میانگین هندسی اندازه ذرات (d_g)، نسبت جذبی سدیم (SAR)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e)، کربنات کلسیم ($CaCO_3$)، جرم مخصوص ظاهری (BD)، مواد آلی (OM)، درصد ذرات رس، سیلت و شن به عنوان متغیرهای مستقل و ورودی مدل انتخاب شده و توابع انتقالی نقطه‌ای در مکش‌های ۱۰، ۳۳، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال توسعه یافتند. توابع انتقالی به دست آمده برای ۱۰ گروه صحت‌سنجی با مدل H3 از نرم‌افزار Rosetta مقایسه گردیدند. پارامترهای RMSE، ME و R^2 برای توابع انتقالی به ترتیب بین (cm^3/cm^3) ۱/۶۱-۴/۱۷، (cm^3/cm^3) ۰/۱۸۱-۰/۶۶، (cm^3/cm^3) ۰/۵۲-۰/۷۶ در صورتی این مقادیر برای مدل رزتا بین (cm^3/cm^3) ۲/۸۲-۴/۲۷، (cm^3/cm^3) ۲/۶۵-۰/۹۴، (cm^3/cm^3) ۰/۳۷-۰/۷۴ به دست آمد. مقایسه پارامترهای RMSE، ME و R^2 نشان داد که توابع انتقالی توسعه یافته، رطوبت را در مکش‌های ۱۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال به طور قابل توجهی بهتر از مدل رزتا تخمین می‌زند، اگرچه مدل رزتا رطوبت را در مکش ۳۳ کیلوپاسکال بهتر از توابع انتقالی پیش‌بینی می‌کند.

کلمات کلیدی: توابع انتقالی نقطه‌ای، مدل رزتا، منحنی مشخصه رطوبتی، صحت‌سنجی متقاطع

۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، البرز - ایران

(نویسنده مسئول مکاتبه^{*})

۲ - دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، البرز - ایران

۳ - استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، البرز - ایران

۴ - دانش‌آموخته کارشناسی، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران - ایران

مقدمه

منحنی مشخصه رطوبتی از جمله مشخصه‌های مهم فیزیکی و هیدرولیکی خاک و بیان‌گر رابطه بین مکش ماتریک و رطوبت خاک است. این ویژگی هیدرولیکی در مسائل آب و خاک مانند آبیاری و زهکشی، حفاظت خاک و حرکت املاح در خاک از اهمیت بسیاری برخوردار است، هرچند که اندازه‌گیری مستقیم آن وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشد. در همین راستا، روش‌های غیرمستقیمی مانند روش‌های رگرسیونی خطی (۸ و ۲۵)، شبکه‌های عصبی (۲۷ و ۲۸)، روش‌های غیرپارامتریک (۱۹)، روش بررسی گروهی داده‌ها (۳۳ و ۳۵) و روش بردار به منظور توسعه توابع انتقالی و تخمین ویژگی‌های دیریافت خاک همچون منحنی مشخصه رطوبتی به‌کار گرفته می‌شوند (۱۴ و ۳۴).

اصطلاح تابع انتقالی نخستین بار توسط بوما برای بیان وابستگی بین منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی هدایت هیدرولیکی با پارامترهای اساسی خاک ارائه شده است (۴). در توابع انتقالی پارامتریک ابتدا فرض می‌شود که رابطه بین مقدار رطوبت و مکش ماتریک براساس یک مدل منحنی مشخصه رطوبتی خاص مانند ون گنوختن که تعداد معینی پارامتر دارد، قابل توصیف است (۳۷). سپس با استفاده از رگرسیون خطی چندمتغیره یا شبکه عصبی مصنوعی پارامترهای آن برآورد می‌شوند (۱). تاکنون توابع انتقالی پارامتریک زیادی به منظور تخمین پارامترهای موردنیاز مدل ون گنوختن ارائه شده‌اند (۱۰، ۲۴، ۲۶، ۲۸، ۲۹، ۳۲، ۳۳، ۳۶، ۳۸ و ۳۹). مدل رزتا یکی از کاربردی‌ترین توابع انتقالی توسعه یافته بر مبنای شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد که برای تخمین پارامترهای مدل منحنی مشخصه ون گنوختن و مدل هدایت هیدرولیکی غیراشباع ون گنوختن - معلم به‌طور وسیعی به‌کار برده می‌شود (۵، ۶، ۹، ۱۶، ۱۷، ۲۳، ۲۸، ۳۰، ۳۱ و ۳۷). توابع انتقالی نقطه‌ای روابط رگرسیونی هستند که به‌طور معمول مقدار رطوبت را در مکش‌های ماتریک

معین برآورد می‌کنند. در مطالعه‌ای، توابع انتقالی برای پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی در خاک‌های آهکی به‌دست آورده و نتایج آن را با مدل رزتا مقایسه شد (۱۳). این نتایج نشان داد توابع انتقالی به‌دست آمده مقدار رطوبت را در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی بهتر از مدل رزتا تخمین می‌زند. همچنین خنار و همکاران در یک مطالعه، اثر شور و سدیمی بودن آب آبیاری را بر روی منحنی مشخصه رطوبتی خاک بررسی نمودند (۱۲). نتایج نشان داد کاهش شوری و افزایش سدیمی بودن آب آبیاری به‌دلیل افزایش ضخامت لایه پخشیده دوگانه اطراف ذرات خاک و پراکندگی و تخریب ساختمان خاک تأثیر قابل‌توجهی بر روی منحنی مشخصه رطوبتی این خاک‌ها داشته است. همچنین در مطالعه‌ای برای مقایسه دقت ۱۳ تابع انتقالی در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی برای خاک‌های شور و شور - سدیمی انجام شد (۲). نتایج نشان داد که مدل سکستن و همکاران و مدل کمپبل به‌ترتیب منحنی مشخصه رطوبتی و کل آب قابل استفاده گیاه را بهتر از سایر مدل‌ها پیش‌بینی می‌نمایند (۲).

به منظور مشخص شدن پارامترهای ورودی ضروری از روش گام به گام برای تعیین معادلات رگرسیونی در گسترش توابع انتقالی استفاده می‌شود. به‌طور معمول، برای به‌دست آوردن توابع انتقالی داده‌ها در یک اسپلیت به دو دسته آزمون و صحت‌سنجی تقسیم می‌گردند، در صورتی‌که استفاده از یک اسپلیت برای به‌دست آوردن معادلات رگرسیونی کافی نبوده و گاهی باعث می‌گردد نتایج دور از واقعیت و به‌صورت تصادفی به‌دست آیند. برای جلوگیری از بروز این مشکل استفاده از روشی موسوم به Cross validation پیشنهاد می‌گردد (۲۱). هدف از این تحقیق، ارائه توابع انتقالی نقطه‌ای (معادلات خطی چندمتغیره) به منظور تخمین رطوبت در هفت مکش ماتریک خاک برای خاک‌های شور و شور - سدیمی و مقایسه آن با مدل رزتا می‌باشد.

مواد و روشها

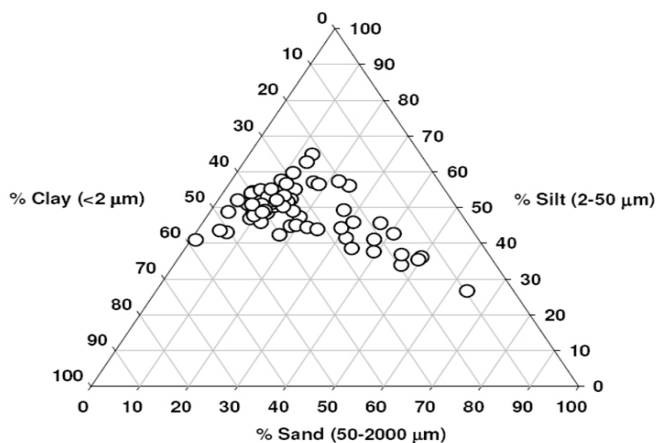
در این مطالعه، از بانک اطلاعاتی خالق‌پناه (۲۰۰۶) با ۶۸ نمونه خاک شور و شور - سدیمی جمع‌آوری شده از جنوب و جنوب شرقی تهران با EC بزرگتر از چهار دسی‌زیمنس بر متر که نیمی از آنها ESP بزرگتر از ۱۵ درصد داشته‌اند، استفاده شده است (۱۱). شکل (۱) توزیع نمونه خاک مورد مطالعه را در مثلث بافت خاک نشان می‌دهد.

در این بانک اطلاعاتی، برای اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی نمونه‌های دست‌خورده در مکش‌های ماتریک ۱۰، ۳۳، ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال از دستگاه

صفحات فشاری و در مکش‌های ماتریک ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال از دستگاه غشاء فشاری استفاده شده است. برای نمونه خاک‌های مذکور پارامترهای انحراف معیار هندسی اندازه ذرات (δ_g)، میانگین هندسی اندازه ذرات (d_g)، نسبت جذبی سدیم (SAR)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (E_c)، کربنات کلسیم ($CaCO_3$)، جرم مخصوص ظاهری (BD)، مواد آلی (OM)، درصد ذرات رس، سیلت و شن به‌عنوان متغیر مستقل در معادلات رگرسیونی انتخاب شدند. در جدول (۱) خصوصیات کلی متغیرهای مستقل و همبستگی میان آنها ارائه شده است.

جدول ۱ - خصوصیات کلی متغیرهای مستقل و همبستگی میان آنها

CaCO ₃	SAR	E _c	δ_g	d _g	OM	BD	شن	سیلت	رس	
(meq/lit)	(---)	(dS/m)	(mm)	(mm)	(درصد)	(g/cm ³)	(درصد)	(درصد)	(درصد)	
۱۵/۳	۵۰/۷	۲۸/۹	۹/۹	۰/۰۳	۰/۷	۱/۵	۱۷/۸	۴۸/۸	۳۳/۴	میانگین
۴/۹	۶۷/۴	۳۱/۴	۲/۳	۰/۱	۰/۳	۰/۱	۱۳/۱	۶/۹	۹/۷	انحراف معیار
۳/۰	۱/۰	۴/۱	۵/۴	۰/۰۰۴	۰/۱	۱/۲	۱/۱	۲۶/۶	۹/۶	کمینه
۱۵/۶	۱۳/۴	۹/۸	۹/۳	۰/۰۱	۰/۷	۱/۵	۱۲/۳	۵۰/۳	۳۵/۵	میانه
۲۸/۷	۲۵۶/۴	۱۱۰/۵	۱۵/۱	۰/۴	۱/۵	۱/۸	۶۳/۸	۶۴/۸	۵۸/۰	پیشینه
همبستگی										
									۱	رس
								۱	۰/۲۳	سیلت
							۱	-۰/۷۰	-۰/۸۶	شن
						۱	۰/۱۵	-۰/۴۸	۰/۱۳	BD
					۱	۰/۱۰	-۰/۲۵	۰/۰۲	۰/۳۶	OM
				۱	-۰/۲۶	۰/۱۱	-۰/۵۷	-۰/۳۴	-۰/۵۳	d _g
			۱	۰/۴۱	-۰/۰۳	۰/۲۲	۰/۸۱	۰/۶۳	-۰/۶۵	δ_g
		۱	-۰/۰۳	-۰/۰۴	-۰/۴۱	-۰/۲۷	۰/۰۶	۰/۱۲	-۰/۱۷	E _c
	۱	۰/۸۲	-۰/۰۳	-۰/۰۱	-۰/۴۶	-۰/۲۳	۰/۰۶	۰/۰۸	-۰/۱۳	SAR
۱	-۰/۲	-۰/۳۰	-۰/۲۶	-۰/۳۵	۰/۲۰	-۰/۰۸	-۰/۴	۰/۳۴	۰/۲۹	CaCO ₃



شکل ۱ - توزیع نمونه خاک استفاده شده در مثلث بافت خاک

(رطوبت اشباع خاک) و Θ_r (رطوبت باقیمانده خاک) با استفاده از ذرات رس، سیلت، شن و جرم مخصوص ظاهری (مدل H3) تخمین زده شد و سپس میزان رطوبت در مکش‌های ۱۰، ۳۳، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال برای داده‌های صحت‌سنجی از ۱۰ گروه مذکور تعیین شده و نتایج با توابع انتقالی ارائه شده مقایسه گردید.

به منظور مقایسه عملکرد توابع انتقالی ارائه شده و مدل رزتا در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک، از پارامترهای مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)،

متوسط خطا (ME) و r^2 استفاده گردید:

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

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (3)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2}} \quad (4)$$

در این فرمول‌ها، \bar{O}_i و \bar{P}_i میانگین آنها و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

به منظور استانداردسازی متغیرهای مستقل از رابطه زیر استفاده گردید (۲۰):

$$X^* = \frac{X - \mu}{\delta} \quad (1)$$

در این فرمول، μ و δ به ترتیب میانگین و انحراف معیار آن دسته از داده‌ها می‌باشند که مقادیر آنها در جدول (۱) برای متغیرهای مستقل ارائه شده‌اند و همچنین X و X^* به ترتیب متغیر مستقل استاندارد نشده و استاندارد شده می‌باشند. به منظور آزمون و صحت‌سنجی معادلات رگرسیونی از روش Cross-validation استفاده گردید.

در این روش، ابتدا داده‌ها به صورت تصادفی به ۱۰ گروه همسان تقسیم‌بندی شده و سپس در هر گروه داده‌ها به نسبت ۱:۳ به دو دسته آزمون و صحت‌سنجی مجزا می‌گردند.

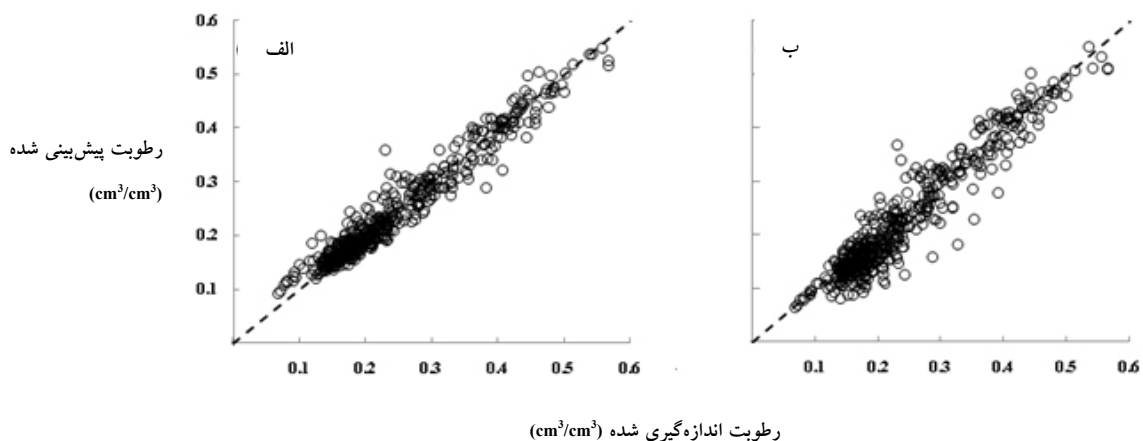
به منظور توسعه توابع انتقالی جهت پیش‌بینی رطوبت در مکش‌های ۱۰، ۳۳، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال از روش رگرسیون‌گیری خطی چندمتغیره و روش گام به گام استفاده گردید. کلیه آنالیزها با نرم‌افزار SPSS انجام شد. همچنین با استفاده از مدل رزتا پارامترهای مجهول مدل ون گنوختن مشتمل بر α ، n ، Θ_s

رمضانی و همکاران: برآورد توابع انتقالی به منظور تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های شور و شور - سدیمی

ارائه شده‌اند. مقادیر p-value به دست آمده ($p > 0.05$) در مرحله آزمون و مرحله صحت‌سنجی نشان می‌دهند که در مکش‌های ماتریک مختلف، اختلاف آماری معنی‌داری در سطح پنج درصد بین مقادیر RMSE از ۱۰ گروه و مقدار متوسط آن وجود ندارد.

شکل (۲) مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط هر دو روش را در تمامی مکش‌ها و برای تمامی داده‌ها ($n = 476$) نشان می‌دهد. همچنین مقادیر RMSE به دست آمده از ۱۰ گروه برای مکش‌های ماتریک مختلف و مراحل آزمون و

صحت‌سنجی توابع انتقالی توسعه یافته در جدول (۲)



شکل ۲ - مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده، الف) توابع انتقالی پیشنهادی و ب) مدل رزتا

جدول ۲ - مقادیر مجذور میانگین مجموع مربعات خطا (RMSE) محاسبه شده برای ۱۰ گروه

صحت‌سنجی							آزمون							گروه
مکش (kpa)							مکش (kpa)							
۱۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۳۰۰	۱۰۰	۳۳	۱۰	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۳۰۰	۱۰۰	۳۳	۱۰	
۱/۴	۱/۴	۱/۷	۱/۹	۲/۷	۵/۴	۲/۳	۱/۳	۱/۴	۱/۶	۱/۹	۲/۸	۳/۵	۳/۲	۱
۱/۲	۲/۹	۲/۶	۳/۲	۳/۵	۵/۳	۲/۸	۱/۳	۲/۹	۳/۰	۳/۲	۳/۷	۳/۲	۲/۲	۲
۱/۴	۱/۵	۱/۸	۲/۲	۳/۳	۴/۱	۲/۸	۱/۳	۱/۳	۱/۵	۱/۸	۲/۵	۳/۲	۲/۲	۳
۲/۵	۱/۷	۲/۹	۲/۹	۳/۲	۴/۱	۲/۵	۳/۲	۲/۱	۳/۵	۳/۷	۴/۰	۳/۷	۲/۳	۴
۱/۲	۱/۲	۱/۵	۱/۶	۲/۱	۳/۸	۲/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۷	۲/۰	۲/۹	۳/۶	۲/۴	۵
۱/۶	۱/۷	۲/۲	۲/۷	۳/۸	۵/۴	۲/۷	۱/۲	۱/۲	۱/۴	۱/۷	۲/۴	۲/۴	۲/۲	۶
۱/۶	۱/۷	۲/۰	۲/۲	۳/۰	۳/۳	۲/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۵	۱/۸	۲/۷	۳/۵	۲/۴	۷
۱/۵	۱/۶	۱/۹	۲/۲	۳/۵	۳/۷	۲/۴	۱/۳	۱/۴	۱/۶	۱/۹	۲/۷	۳/۶	۲/۳	۸
۱/۴	۱/۵	۱/۸	۲/۳	۳/۳	۳/۲	۴/۷	۱/۳	۱/۳	۱/۵	۱/۸	۲/۵	۳/۴	۴/۷	۹
۲/۳	۲/۲	۲/۸	۳/۰	۳/۷	۵/۴	۲/۹	۲/۸	۲/۹	۳/۱	۳/۲	۳/۵	۲/۴	۲/۲	۱۰
۱/۶	۱/۷	۲/۱	۲/۴	۳/۲	۴/۲	۲/۷	۱/۶	۱/۷	۲/۰	۲/۳	۳/۰	۳/۲	۲/۶	میانگین
۰/۹۶	۰/۹۷۴	۰/۹۹۶	۰/۹۷۶	۰/۹۹۹	۱/۰	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۶	۰/۹۹۴	۰/۹۹۶	۱/۰	P value

کیلوپاسکال بیان‌گر این است که توابع انتقالی توسعه یافته مقدار رطوبت را اندکی کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی می‌نمایند. همچنین، مقادیر متوسط منفی ME در مرحله صحت‌سنجی نشان می‌دهد که توابع انتقالی توسعه یافته مقدار رطوبت را در مکش‌های بالاتر (۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی نموده‌اند. بررسی متوسط پارامترهای خطای ارائه شده نشان می‌دهد هرچند دقت مقدار رطوبت تخمین زده شده با استفاده از مدل رزتا در مکش ۳۳ کیلوپاسکال (۳/۹۴ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) کمی بهتر از توابع انتقالی توسعه یافته (۴/۱۷ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد، ولیکن خطای مدل رزتا در مقایسه با توابع انتقالی توسعه یافته در سایر مکش‌های ماتریک به میزان قابل توجهی بیشتر بوده است (جدول ۳). علاوه بر این، در تمامی مکش‌های ماتریک، متوسط مقادیر ضرایب همبستگی (R^2) برای توابع انتقالی توسعه یافته در مرحله صحت‌سنجی بالاتر از مدل رزتا می‌باشد.

مقادیر متوسط پارامترهای آماری محاسبه شده از ۱۰ گروه تقسیم‌بندی شده در مرحله آزمون و صحت‌سنجی توسعه توابع انتقالی در جدول (۳) ارائه شده‌اند. مقادیر متوسط RMSE مراحل آزمون و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که خطای توابع انتقالی در مکش‌های ماتریک بالاتر (شاخه خشک منحنی مشخصه رطوبتی) که بیشتر تابعی از بافت خاک بوده نسبت به مکش‌های ماتریک کم (شاخه تر منحنی مشخصه رطوبتی)، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر می‌باشد. این بدین علت است که پارامترهای ورودی توابع انتقالی مانند درصد رس، سیلت و شن، میانگین هندسی قطر ذرات و انحراف معیار هندسی اندازه ذرات تابعی از بافت خاک می‌باشند.

همچنین مقادیر متوسط نزدیک به صفر و مثبت ME برای مرحله آزمون توابع انتقالی توسعه یافته نشان می‌دهد که این توابع مقدار رطوبت را در مکش‌های ماتریک ۳۳، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال اندکی بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی می‌نمایند. مقادیر متوسط منفی ME برای مکش‌های ماتریک ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰

جدول ۳ - متوسط پارامترهای آماری ۱۰ گروه در مراحل آزمون و صحت‌سنجی توابع انتقالی و مدل رزتا

$\Theta_{1500 \text{ kpa}}$	$\Theta_{1000 \text{ kpa}}$	$\Theta_{500 \text{ kpa}}$	$\Theta_{300 \text{ kpa}}$	$\Theta_{100 \text{ kpa}}$	$\Theta_{33 \text{ kpa}}$	$\Theta_{10 \text{ kpa}}$		
۱/۶۱	۱/۷۲	۲/۰۴	۲/۲۸	۲/۹۷	۳/۲۵	۲/۶۰	RMSE	آزمون
۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۲	-۰/۰۰۴	-۰/۰۰۵	-۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۴۹	ME	
۰/۶۴	۰/۶۳	۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۶۲	۰/۶۵	۰/۷۸	R^2	
۱/۶۱	۱/۷۴	۲/۱۰	۲/۴۰	۳/۱۹	۴/۱۷	۲/۷۵	RMSE	صحت‌سنجی
-۰/۱۸	۰/۱۱	-۰/۱۴	-۰/۱۴	۰/۰۳۴	۰/۶۶۴	۰/۲۲۰	ME	
۰/۷۰	۰/۷۱	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۶۲	۰/۵۲	۰/۷۶	R^2	
۳/۴۳	۳/۵۷	۳/۷۴	۳/۹۳	۴/۲۷	۳/۹۴	۲/۸۲	RMSE	مدل رزتا
-۲/۶۵	-۲/۶۵	-۲/۴۵	-۲/۳۳	-۱/۳۰	۰/۰۹۴	-۰/۱۶	ME	
۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۴۴	۰/۴۲	۰/۳۷	۰/۵۰	۰/۷۴	R^2	

مشخصات دیده می‌شود. درحقیقت مدل رزتا براساس ۵۵۴ نمونه خاک جمع‌آوری شده از خاک‌های اروپا و ایالات متحده آمریکا توسعه یافته است و می‌توان انتظار داشت که قادر به پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی برای نمونه خاک‌هایی با مشخصات شور و شور - سدیمی با دقت بالایی نباشد.

ب - با کاهش رطوبت در خاک تأثیر شوری و شور - سدیمی بودن خاک در نگهداری آب توسط ذرات خاک محسوس‌تر خواهد بود، به طوری که با کاهش رطوبت، شوری نسبی افزایش یافته و آب موجود در خاک با نیروی بیشتری نسبت به خاک‌های غیرشور نگهداری می‌شود، به همین دلیل مدل رزتا میزان رطوبت را در خاک‌های شور و شور - سدیمی به طور قابل توجهی کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند.

ج - خاک‌های مورد استفاده در این مطالعه، به لحاظ مقدار ماده آلی نیز با نمونه خاک‌هایی که به منظور توسعه مدل رزتا استفاده شده‌اند، متفاوت می‌باشند. محدوده تغییرات ماده آلی در بانک اطلاعاتی خالق پناه ۰/۱-۱/۵۱ درصد می‌باشد، در صورتی که درصد ماده آلی در نمونه خاک‌های بانک اطلاعاتی UNSODA در محدوده ۰-۱۴/۵ درصد تغییر می‌نماید (۱۱ و ۱۵).

از آنجایی که در مکش‌های ماتریک مختلف اختلاف آماری معنی‌داری در سطح پنج درصد میان مقادیر RMSE از ۱۰ گروه و متوسط RMSE به دست آمده وجود ندارد، توابع انتقالی توسعه یافته در گروه هشت به عنوان نمونه و کاربرد در جدول (۴) ارائه می‌شوند. نتایج نشان داد که پارامترهای ورودی همچون جرم مخصوص ظاهری (BD)، درصد ذرات رس (Clay)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e)، نسبت جذبی سدیم (SAR) و انحراف معیار هندسی اندازه ذرات (δg) مؤثرترین عوامل در تخمین رطوبت در تمامی مکش‌ها می‌باشند (جدول ۴).

با مقایسه متوسط مقادیر RMSE به دست آمده در مرحله صحت‌سنجی توابع انتقالی و مدل رزتا، به‌طور کلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که توابع انتقالی توسعه یافته و مدل رزتا در مکش‌های ماتریک ۱۰ و ۳۳ کیلوپاسکال که رطوبت موجود در خاک بیشتر تحت تأثیر ساختمان خاک بوده نتایج نسبتاً مشابهی داشته، ولیکن در مکش‌های بالاتر که رطوبت موجود در خاک بیشتر تابعی از بافت خاک است توابع انتقالی نقطه‌ای رطوبت را با دقت بالاتری پیش‌بینی نموده‌اند. به طوری که پیش‌بینی‌های توابع انتقالی به ترتیب در مکش‌های ماتریک ۳۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال ۶۳ و ۱۱۳ درصد بهتر از مدل رزتا بوده است. همچنین بررسی متوسط مقادیر ME به دست آمده از مدل رزتا نشان می‌دهد که این مدل مقدار رطوبت خاک را در تمامی مکش‌های ماتریک به جز ۳۳ کیلوپاسکال به‌طور قابل توجهی کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده رطوبت پیش‌بینی می‌نماید (جدول ۲). این نتایج با دیگر نتایج به دست آمده مبنی بر این که مدل رزتا مقدار رطوبت را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌نماید مطابقت دارد (۸ و ۲۸).

در مطالعه‌ای برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، از مدل شبکه عصبی مصنوعی آموزش داده شده با داده‌های محدود در مقیاس مزرعه استفاده و نتایج با مدل رزتا مقایسه شد (۲۲). نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی که در مقیاس مزرعه توسعه پیدا کرده کارایی بیشتری نسبت به مدل رزتا داشته است. علت این امر مربوط به فرایند آموزش شبکه حتی با داده‌های محدود ولی با شرایط نزدیک به واقعیت می‌باشد. از دلایل زیاد بودن خطا در مدل رزتا نسبت به توابع انتقالی توسعه یافته در این مطالعه، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف - اغلب نمونه خاک‌هایی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت، نمونه خاک‌های شور و شور - سدیمی بودند که کمتر در بانک‌های اطلاعاتی خاک‌های اروپا و ایالات متحده آمریکا، نمونه خاک‌هایی با این

جدول ۴ - توابع انتقالی گسترش داده شده در گروه هشت برای پیش‌بینی نقطه‌ای منحنی مشخصه رطوبتی خاک

رطوبت (درصد)	توابع انتقالی	RMSE	ME	R ²
Θ 10 kpa	$0.82^* \text{Clay}^* + 4.74^* \text{BD}^* - 43.34^*$	2.37	0.31	0.85
Θ 33 kpa	$31.89^* - 2.94^* \text{BD}^* + 1.78^* \text{SAR}^*$	3.64	-0.07	0.59
Θ 100 kpa	$24.73^* - 2.02^* \text{BD}^* + 1.99^* \text{EC}_e^* - 0.92^* \delta g^*$	3.08	0.48	0.68
Θ 300 kpa	$20 - 1.42^* \text{BD}^* + 1.62^* \text{EC}_e^* + 1.27^* \text{Clay}^*$	2.02	0.23	0.80
Θ 500 kpa	$18.3^* - 1.21^* \text{BD}^* + 1.41^* \text{EC}_e^* + 1.33^* \text{Clay}^*$	1.73	0.19	0.82
Θ 1000 kpa	$16.59^* - \text{BD}^* + 1.26^* \text{EC}_e^* + 1.5^* \text{Clay}^*$	1.46	0.13	0.83
Θ 1500 kpa	$15.72^* - 0.88^* \text{BD}^* + 1.15^* \text{EC}_e^* + 1.5^* \text{Clay}^*$	1.40	0.06	0.83

نکته: δg^* ، SAR^* ، EC_e^* ، Clay^* ، BD^* با استفاده از رابطه (۱) و مقادیر ارائه شده در جدول (۱) محاسبه می‌گردند.

الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e) اهمیت آنها کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، توابع انتقالی نقطه‌ای به منظور تخمین منحنی مشخصه رطوبتی در هفت نقطه برای خاک‌های شور و شور - سدیمی ارائه گردید. بدین منظور اطلاعات مربوط به ۶۸ نمونه خاک به روش تصادفی به ۱۰ گروه تقسیم‌بندی شده و به نسبت ۱:۳ برای آزمون و صحت‌سنجی جدا گردید. نتایج به‌دست آمده با پیش‌بینی‌های انجام شده توسط مدل رزتا با استفاده از داده‌های مرحله صحت‌سنجی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که توابع انتقالی نقطه‌ای ارائه شده رطوبت را در تمامی مکش‌های ماتریک به‌جز ۳۳ کیلوپاسکال بهتر از مدل رزتا تخمین می‌زند. بنابراین پیشنهاد می‌گردد در خاک‌های شور و شور - سدیمی مانند خاک‌های منطقه ایران برای تخمین منحنی مشخصه رطوبتی به‌ویژه در مکش‌های زیاد از توابع انتقالی ارائه شده استفاده گردد.

رطوبت در مکش ۱۰ کیلوپاسکال که نزدیک‌ترین نقطه به نقطه اشباع می‌باشد، تنها تابعی از جرم مخصوص ظاهری (BD) و درصد ذرات رس (Clay) بوده که با دیگر نتایج مطابقت دارد (جدول ۴) (۳۸). این محققین رابطه مشابهی برای تخمین رطوبت اشباع پیشنهاد نمودند. پارامتر نسبت جذبی سدیم (SAR) که تأثیر مهمی در پراکندگی ذرات خاک داشته و به عبارت دیگر ساختمان خاک را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد تنها در پیش‌بینی رطوبت در مکش ماتریک ۳۳ کیلوپاسکال به عنوان پارامتر ورودی تابع انتقالی لحاظ شده است. در مکش‌های ماتریک بالاتر که رطوبت موجود در خاک بیشتر تحت تأثیر بافت خاک می‌باشد، همواره می‌توان پارامترهای درصد ذرات رس (Clay)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e)، جرم مخصوص ظاهری (BD) که به ترتیب نماینده بافت، شوری و ساختمان خاک می‌باشند را مشاهده نمود. با توجه به ضرایب این پارامترها، هرچه به سمت مکش‌های بالاتر پیش می‌رویم اهمیت درصد ذرات رس (Clay) افزایش یافته، در صورتی که با کاهش ضریب جرم مخصوص ظاهری (BD) و هدایت

References

- 1 . Abbasi F (2007) Advanced soil physics, 1th Ed. University of Tehran press. 250 p (In Persian).
- 2 . Abbasi Y, Ghanbarian Alavijeh B, Liaghat AM and Shorafa M (2009) Predicting Soil moisture retention curve for saline and salin-alkali soils, The 10th National Conference on Irrigation & Evaporation Reduction.
- 3 . Ahuja LR, Cassel DK, Bruce RR and Barnes BB (1989) Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. Soil Sci. 148: 404-411.
- 4 . Bouma J (1989) Using soil survey data for quantitative land evaluation. Advances in Soil Science 9: 177-213.
- 5 . Frey MP, Schneider MK, Dietzel A, Reichert P and Stamm C (2009) Predicting criticalsource areas for diffuse herbicide losses to surface waters: Role of connectivity and boundary conditions. Hydrol. 365: 23-36.
- 6 . Fritton DD (2008) Evaluation of pedotransfer and measurement approaches to avoid soil compaction. Soil Till. Res. 99: 268-278.
- 7 . Ghanbarian-Alavijeh B and Liaghat AM (2009) Evaluation of pedotransfer functions and effect of organic matter in prediction of saturated water content. J. Agric. Eng. Res. (In Persian).
- 8 . Ghorbani Dashtaki Sh and Homae M (2004) Using geometric mean particle diameter to derive point and continuous pedotrasfer functions. In: EuroSoil. 10: 30 (1-10). Whrle. N., and M. Sheurer (Eds.). International Conference, September, 4th to 12th, Freiburg, Germany.
- 9 . González-Dugo MP and Mateos L (2008) Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops. Agric. Water Management 95: 48-58.
- 10 . Hodnett MG and Tomasella J (2002) Marked differences between van Genuchten soil water retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. Geoderma 108: 155-180.
- 11 . Khaleghpanah N (2006) Determination of Pedotransfer functions for estimation of moisture retention curve in some saline soils. M.Sc. Thesis, Department of Soil Science, University of Tehran (In Persian).
- 12 . Khatar M, Mosadeghi M and Mahbubi A (2007) Effect of irrigation water salinity and salinity alkali on Soil moisture retention curve, 10th Soil Science Congres of Iran, Karaj (In Persian).
- 13 . Khodaverdiloo H and Homae M (2004) PedoTransfer Functions of some Calcareous Soils. In: Eurosoil. 10: 27(1-11). Whrle. N., and M. Sheurer (Eds.). International Conference, September, 4th to 12th, Freiburg, Germany.
- 14 . Lamorskia K, Pachepsky Y, Slawinski C and Walczak RT (2008) Using support vector machines to develop pedotransfer functions for water retention of soils in Poland. Soil Sci. Soc. Am. 72: 1243-1247.
- 15 . Leij FJ, Alves WJ, Van Genuchten M Th and Williams JR (1996) Unsaturated soil hydraulic database, UNSODA 1.0 User's Manual. Rep. EPA/600/R96/095. USEPA, Ada, OK.
- 16 . Li Q, Unger AJA, Sudicky EA, Kassenaar D, Wexler EJ and Shikaze S (2008) Simulating the multi-seasonal response of a large-scale watershed

- with a 3D physicallybased hydrologic model. Hydrol. 357: 317-336.
- 17 . Lü H, Zhu Y, Skaggs TH and Yu Z (2009) Comparison of measured and simulated water storage in dryland terraces of the Loess Plateau, China. Agric. Water Management 96: 299-306.
 - 18 . Nemes A, Schaap MG and Wösten JHM (2003) Functional Evaluation of Pedotransfer Functions Derived from Different Scales of Data Collection. Soil Sci. Soc. Am. J. 67: 1093-1102.
 - 19 . Nemes A, Rawls WJ and Pachepsky Ya A (2006) Use of the Nonparametric Nearest Neighbor Approach to Estimate Soil Hydraulic Properties. Soil Sci. Soc. Am. 70: 327-336.
 - 20 . Nemes A, Timlin DJ, Pachepsky Ya A and Rawls WJ (2009) Evaluation of the Rawls *et. al.* (1982) Pedotransfer Functions for their Applicability at the U.S. National Scale. Soil Sci. Soc. Am. 73: 1638-1645.
 - 21 . Pachepsky Ya A and Rawls WJ (1999) Accuracy and Reliability of Pedotransfer Functions as Affected by Grouping Soils. Soil Sci. Soc. Am. 63: 1748-1757.
 - 22 . Parasuraman K, Elshorbagy and Si BC (2006) Estimating saturated hydraulic conductivity in spatially variable fields using neural network in ensembles. Soil Sci. Soc. Am. 70: 1851-1859.
 - 23 . Peters A and Durner W (2008) Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. Hydrol. 356: 147-162.
 - 24 . Rajkai K, Kabos S, Van Genuchten M Th (2004) Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. Soil Till. Res. 79: 145-152.
 - 25 . Rawls WJ, Brakensiek DL and Saxton KE (1982) Estimation of soil water properties. Trans. ASAE. 25: 1316-1320.
 - 26 . Santra P and Sankar Das B (2008) Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India. Geoderma 146: 439-448.
 - 27 . Schaap MG and Leij FJ (1998) Database-Related Accuracy and Uncertainty of Pedotransfer Functions. Soil Sci. 163: 765-779.
 - 28 . Schaap MG, Leij FJ and Van Genuchten M Th. (2001) Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Hydrol. 251: 163-176.
 - 29 . Scheinost AC, Sinowski W and Auerswald K (1997) Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape: I. Developing a new pedotransfer function. Geoderma 78: 129-143.
 - 30 . Schoul J, Abbaspour KC, Srinivasan R and Yang H (2008) Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic Model. Hydrol. 352: 30-49.
 - 31 . Singh R, Helmers MJ and Qi Z (2006) Calibration and validation of DRAINMOD to design subsurface drainage systems for Iowa's tile land Scapes. Agric. Water Management 85: 221-232.
 - 32 . Tomasella J, Hodnett MG and Rossato L (2000) Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 327-338.
 - 33 . Tomasella J, Pachepsky Y, Crestana S and Rawls WJ (2003) Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. Soil Sci. Soc. Am. 67: 1085-1092.

- 34 . Twarakavia NKC, Simunek J and Schaap MG (2009) Development of pedotransfer functions for estimation of soil hydraulic parameters using support vector machines. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1443-1452.
- 35 . Ungaro F, Calzolari C and Busoni E (2005) Development of pedotransfer functions using a group method of data handling for the soil of the Pianura Padano – Veneta region of North Italy: water retention properties. *Geoderma* 124: 293-317.
- 36 . Van den Berg M, Klamt E, Van Reeuwijk LP and Sombroek WG (1997) Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma* 78: 161-180.
- 37 . 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.
- 38 . Vereecken H, Feyen J, Maes J and Darius P (1989) Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Sci.* 148: 389-403.
- 39 . Zacharias S and Wessolek G (2007) Excluding Organic Matter Content from Pedotransfer Predictors of Soil Water Retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 43-50.

Developing Pedotransfer Functions for Saline and Saline-Alkali Soils

M. Ramezani ^{*1}, B. Ghanbarian-Alavijeh ², A. M. Liaghat ³ and Sh. Salehi khoshkroudi ⁴

(E-mail: me.ramezani@gmail.com)

Abstract

Soil moisture retention curve is one of the soil hydraulic prosperities which its direct measurement is time consuming and expensive. Therefore, indirect methods such as developing pedotransfer functions have been used to predict this characteristic from soil readily available or easily measurable data. In this study, multiple linear regression method was used to develop point pedotransfer functions (PTFs) for saline and saline-alkali soils of Iran. For this purpose, 68 soil samples with EC values greater than 4 dS/m of which more than half of them had ESP values greater than 15% were selected. Using Cross validation method, the random splitting of data into the development and validation subsets was repeated 10 times. A ratio of 3:1 was used to split data into development and validation sets in each replication. In the SPSS software, parameters such as geometric standard deviation (δg), geometric mean diameter (dg), sodium adsorption ratio (SAR), electrical conductivity (ECe), carbonate calcium (CaCO₃), bulk density (BD), organic matter (OM), clay and sand content were applied as the independent variables, and volumetric water content was determined at matric potentials of 10, 33, 100, 300, 500, 1000, 1500 kPa. The derived PTFs were compared with the H3 model of Rosetta software for 10 splits of validation data set. Comparison of the mean RMSE and R² values showed that the developed PTFs resulted in more accurate estimation than the Rosetta software at matric potentials of 100, 300, 500, 1000, 1500 kPa. Whereas, Rosetta model resulted in slightly better estimation than derived PTFs at matric potential of, 33 kPa. For the PTFs developed in this study, the RMSE, ME and R² values ranged from 1.61 to 4.17 (cm³.cm⁻³), -0.181 to 0.66 and 0.52 to 0.76, respectively. While for the Rosetta model, RMSE, ME and R² values ranged from 2.82 to 4.27 (cm³.cm⁻³), -2.65 to 0.094 and 0.37 to 0.74, respectively.

Keywords: Cross validation, Point Pedotransfer Function, Rosetta model, Soil water retention curve

1 - M.Sc. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources Sciences, University of Tehran, Alborz - Iran (**Corresponding Author***)

2 - Ph.D. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources Sciences, University of Tehran, Alborz - Iran

3 - Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources Sciences, University of Tehran, Alborz - Iran

4 - B.Sc. Graduated Student, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aboureihan, University of Tehran, Tehran - Iran