

# تخمین منحنی رطوبتی خاک نزدیک اشباع با استفاده از اطلاعات نفوذ سنج دیسک و مقایسه آن با روش آزمایشگاهی

ساره تنگسیر<sup>۱\*</sup>، حیدر علی کشکولی<sup>۲</sup> و هادی معاضد<sup>۳</sup>

\* - دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی Saretangsir@yahoo.com  
۲ و ۳ - استاد و دانشیار گروه آبیاری و زهکشی دانشکده ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۲۷

تاریخ دریافت: ۸۹/۶/۲۷

## چکیده

خصوصیات هیدرولیکی خاک مانند توزیع اندازه منافذ و مشخصات رطوبتی خاک در تفسیر مشخصات فیزیکی خاک و مدیریت روش های کشاورزی بسیار مهم می باشند. روش های استاندارد رایج از قبیل صفحات فشاری و سندی باکس اغلب زمان بر و پر هزینه هستند. در این مطالعه یک روش ساده با دقت کافی برای تخمین منحنی رطوبتی، با استفاده از اطلاعات نفوذ پایدار پیشنهاد شده است. ابتدا سرعت های نفوذ پایدار در مکش های متوالی به ترتیب ۱۵-۱۰-۶-۳ و صفر سانتی متر توسط نفوذ سنج دیسک در مزرعه اندازه گیری شدند. سپس جهت تخمین هدایت هیدرولیکی در مکش های ذکر شده از اطلاعات نفوذ سنج دیسک، از تحلیل پایدار الریک و رینولدز استفاده گردید. هدایت هیدرولیکی اشباع بهینه سازی شده حاصل از اندازه گیری های صحرائی، به عنوان پارامتر اولیه برای برازش مدل بروکز کوری جهت تخمین پارامترهای  $\alpha_{BC}$  و  $\alpha_{SPSS.11}$  در نظر گرفته شد. پارامترها با رگرسیون بالایی ( $> 0.9$ ) از طریق برازش شکل خطی معادله بروکز کوری توسط نرم افزار آماری SPSS.11، به جفت داده های هدایت هیدرولیکی و مکش، تخمین زده شدند. منحنی های رطوبتی تخمین زده شده به دو روش آزمایشگاهی (سندی باکس) و پیشنهادی، با یکدیگر مقایسه گشتند. مقادیر تخمین زده شده به روش پیشنهادی، کمتر از مقادیر تخمین زده شده به روش آزمایشگاهی بدست آمدند.

**کلید واژه ها:** نفوذ سنج دیسک، منحنی رطوبتی، سندی باکس، مدل رطوبتی بروکز و کوری

## مقدمه

خصوصیات هیدرولیکی خاک خواص فیزیکی می باشند که روابط آب - خاک را توصیف می نمایند. مهم ترین این ویژگی ها، تعریف رابطه ی بین مقدار رطوبت و مکش در خاک (منحنی رطوبتی) و هدایت هیدرولیکی و مکش (منحنی هدایت هیدرولیکی) است (۱).

خصوصیات هیدرولیکی خاک در مدل های آب - خاک، ورودی های ضروری می باشند. چنین مدل - هایی فرآیندهای فیزیکی-شیمیایی و بیولوژیکی موجود در خاک را شبیه سازی می نمایند و نتایج این مدل ها می توانند در پیش بینی رژیم آب-خاک به منظور اهداف آبیاری، انتقال آلاینده ها در ارزیابی

محیط زیست و تولید محصول در مدیریت کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند (۱۱).

منحنی های مشخصه خاک از قبیل منحنی رطوبتی و منحنی هدایت هیدرولیکی خاک نسبت به زمان و مکان متغیر هستند و اطلاعات لازم در مورد ویژگی های فیزیکی خاک همچون تخلخل، هدایت هیدرولیکی و ... را ارائه می کنند. از عوامل موثر بر منحنی های مشخصه رطوبتی خاک می توان به پدیده پس ماند، بافت و ساختمان خاک، تخلخل، شکل خلل و فرج خاک (ضریب اعوجاج<sup>۱</sup>)، تراکم خاک، درجه ی حرارت و نمک های موجود در خاک اشاره کرد (۱).

<sup>1</sup>-Tortuosity

رطوبتی در مکش‌های کمتر از ۱۰۰ سانتیمتر پیشنهاد داده شده است.

### مواد و روش‌ها

#### آزمایشات صحرایی نفوذ سنج دیسک

آزمایش‌های صحرایی به تعداد ۶ تکرار در قطعه‌ای به وسعت ۶ متر مربع ( $6 \times 1m^2$ ) در مزرعه تحقیقاتی گروه باغبانی واقع در دانشگاه شهید چمران، به فواصل یک متر از همدیگر انجام شدند. به دلیل کوچک بودن وسعت ناحیه در نظر گرفته شده، جهت تعیین بافت خاک، یک نمونه از محل آزمایش تهیه گردید (تجزیه بافت خاک با استفاده از دستگاه مستر سایزر<sup>۱</sup> انجام شد).

تمامی آزمایش‌ها توسط یک دستگاه نفوذ سنج دیسک مدل (2805D20K1) انجام گرفت. در هر آزمایش، سرعت‌های نفوذ پایدار در ۵ مکش متوالی به ترتیب ۱۵-، ۱۰-، ۶-، ۳- و صفر سانتی‌متر اندازه‌گیری شدند، مقدار این مکش‌ها با توجه به بافت خاک و حداکثر مکش کاربردی توسط دستگاه نفوذ سنج دیسک تعیین شده است. در پایان هر آزمایش، یعنی پس از رسیدن به سرعت نفوذ پایدار در پتانسیل صفر، نمونه‌ای از زیر دیسک نفوذ سنج به منظور تعیین حداکثر تخلخل و مقدار رطوبت نهایی برداشته شد. هم‌چنین نمونه‌هایی از نزدیکی محل‌های آزمایش از سطح خاک جهت تعیین میزان رطوبت اولیه تهیه گردید. جرم مخصوص ظاهری به روش رایج، با تهیه نمونه‌های دست نخورده از محل آزمایش‌های صحرایی تعیین شد. به منظور تعیین درصد مواد آلی نمونه‌های تهیه شده در سه تکرار از روش اکسیداسیون سرد استفاده شد (۱۳).

میزان رطوبت باقی‌مانده در مکش‌های کمتر از ۱۰۰ سانتیمتر به روش آزمایشگاهی (سندی باکس<sup>۲</sup>) با تهیه نمونه‌های دست نخورده توسط استوانه‌های

اندازه‌گیری صحرایی هدایت هیدرولیکی غیر اشباع در تشخیص و فهم بسیاری از جوانب جریان آب - خاک غیر اشباع از جمله نفوذ بارندگی، رواناب، تغذیه لایه آبدار، انتقال مواد مغذی، آفت‌کش‌ها و آلاینده‌ها در سرتاسر پروفیل خاک و طراحی و ارزیابی سیستم‌های آبیاری و زهکشی مهم می‌باشند (۲).

به تازگی دستگاه نفوذ سنج دیسک توسط چندین محقق برای اندازه‌گیری در محل هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع به کار برده شده است (۳)، (۸)، (۱۲)، (۷).

این دستگاه به دلیل ارائه نتایج قابل قبول از مقادیر هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع و هم‌چنین کاربری آسان، به عنوان رایج‌ترین ابزار اندازه‌گیری صحرایی هدایت هیدرولیکی غیر اشباع شناخته شده است. هم‌چنین به طور مناسب قادر به اعمال شرایط صحرایی بوده و نتایج دقیقی از خصوصیات هیدرولیکی خاک که با زمان و مکان تغییرپذیرند، ارائه می‌دهد.

کاربردهای نفوذ سنج دیسک تنشی شامل تعیین هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع، مشخصات ساختمان خاک، مشخص ساختن ماکروپورها، تعیین مقدار آب در حال حرکت و آب ساکن، تعیین ایزوترم‌های جذب نمک‌ها و تخمین پارامترهای هیدرولیکی به روش معکوس می‌باشد.

با توجه به اینکه خصوصیات هیدرولیکی خاک از جمله منحنی‌های رطوبتی و هدایت هیدرولیکی نسبت به مکان و زمان بسیار تغییرپذیر بوده و اندازه‌گیری این منحنی‌ها با روش‌های رایج آزمایشگاهی بسیار زمان‌بر، خسته‌کننده و پرهزینه هستند و هم‌چنین به دلیل کوچک بودن نمونه‌ها در مقیاس آزمایشگاهی، احتمال خطای اندازه‌گیری و غیر واقعی بودن مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد. بنابراین در این تحقیق یک روش ساده برای اندازه‌گیری صحرایی منحنی‌های هدایت هیدرولیکی و

<sup>۱</sup>-Master Sizer

<sup>۲</sup>-Sandy Box

و در نهایت هدایت هیدرولیکی اشباع مطابق با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$k_{s(i+1/2)} = \frac{k_{i+1/2}}{\exp(\alpha_{g(i+1/2)} h_{i+1/2})} \quad (۵)$$

در روابط ارائه شده بالا،  $Q_n (L^3/T)$  برابر است با حاصل ضرب سرعت نفوذ پایدار اندازه گیری شده ( $q_n(L.T^{-1})$ )، در سطح مقطع مخزن تأمین آب نفوذ سنج دیسک ( $L^2$ ).

### تخمین پارامترهای مدل رطوبتی بروکز و کوری<sup>۳</sup> (۱۹۶۴)

کمپیل<sup>۴</sup> (۵) با تحلیل رگرسیونی چندگانه داده‌های نگه داشت آب - خاک، رابطه‌ای به صورت زیر برای توصیف منحنی رطوبتی خاک پیشنهاد داد:

$$h = h_e \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b} \quad (۶)$$

به این صورت که  $\theta$ ،  $\theta_s$ ،  $h$  و  $h_e$  به ترتیب مقادیر رطوبت حجمی ( $L^{-3} \cdot L^{-3}$ )، رطوبت حجمی اشباع ( $L^{-3} \cdot L^{-3}$ )، پتانسیل ماتریک ( $L$ ) و پتانسیل ورود هوا ( $L$ ) می‌باشند و  $b$  پارامتر نگه داشت آب می‌باشد که به توزیع اندازه منافذ نیز مربوط است (۴).

مشابه با تابع هدایت هیدرولیکی غیر اشباع پیشنهادی توسط بروکز و کوری (۱۹۶۴)، تابع هدایت هیدرولیکی زیر توسط کمپیل (۱۹۷۴) برای شرایط  $h < h_e$  پیشنهاد داده شد:

$$k = k_s \left( \frac{\theta(h)}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad (۷)$$

در رابطه‌ی (۷)،  $k_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع ( $L.T$ )<sup>۱</sup> می‌باشد. با فرض مقدار رطوبت باقی مانده برابر با صفر ( $\theta_r \cong 0$ )، اشباع موثر ( $L^3 \cdot L^{-3}$ ) ( $S_e(h)$ ) برابر با  $\theta(h)/\theta_s$  خواهد شد، در نتیجه می‌توان رابطه پتانسیل ماتریک را به صورت زیر تعریف کرد:

نمونه برداری از محل‌های آزمایش‌های صحرایی برداشته شدند.

### تحلیل اطلاعات نفوذ سنج دیسک تنشی

رینولدز و الریک<sup>۱</sup> (۱۰)، یک روش تحلیلی برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع و نزدیک اشباع از اطلاعات نفوذ پایدار برداشت شده به روش چندین مکش متوالی با استفاده از یک دیسک، پیشنهاد دادند.

این روش بر مبنای تابع نمای مرحله‌ای بین دو تنش متوالی پایه گذاری شده است و برای تخمین هدایت هیدرولیکی ( $k$ )، در نقطه وسط دو مکش متوالی، از درون یابی بین دو نقطه استفاده می‌نماید. در ابتدا یک سلسله مراتب از مقادیر سرعت نفوذ ( $Q_i(L^3/T)$ )، از طریق تنظیم یک سلسله مراتب از مقادیر مکش ( $h-L$ ) ( $i=1,2,3,\dots,n$ ) روی نفوذ سنج دیسک مکشی، اندازه گیری می‌شوند.

مقدار  $\alpha$  گاردنر<sup>۲</sup> بر حسب ( $L^{-1}$ )، به عنوان شیب خط مرحله‌ای بین زوج اطلاعات هم جوار ( $h_n$  و  $LnQ_n$ ) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_{g(i+1/2)} = \frac{Ln \frac{Q_i}{Q_{i+1}}}{h_i - h_{i+1}} \quad (۱)$$

و سپس محاسبه  $Q_{i+1/2}$  با استفاده از رابطه زیر:

$$h_{i+1/2} = \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \quad (۲)$$

$$Q_{i+1/2} = \exp \left[ \frac{LnQ_i + LnQ_{i+1}}{2} \right] \quad (۳)$$

و محاسبه  $k_{i+1/2}$  از رابطه زیر:

$$k_{i+1/2} = \frac{Q_{i+1/2}}{1 + \frac{4}{\pi r_o \alpha_{g(i+1/2)}}} \quad (۴)$$

<sup>۳</sup>Brooks and Corey

<sup>۴</sup>Campbell

<sup>۱</sup>Elrick and Reynolds

<sup>۲</sup>Gardner

بدست آمده از اندازه‌گیری‌های نفوذ سنج دیسک برازش یافت و متغیرهای  $\alpha_{BC}$  و  $b$  بدین صورت از اندازه‌گیری‌های نفوذ سنج دیسک تخمین زده شدند. بعد از تخمین پارامترهای مذکور، مقادیر رطوبت در همان مکش‌هایی که در آزمایشگاه با استفاده از سندی باکس اعمال شده بودند، از رابطه (۹)، محاسبه گردیدند.

مقدار رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) مورد نیاز در رابطه‌ی (۹)، در پایان هر آزمایش یعنی بعد از رسیدن به شرایط پایدار در پتانسیل صفر، با تهیه نمونه‌ای از زیر دیسک به روش وزنی در آزمایشگاه مشخص شده بود.

### نتایج و بحث

#### خصوصیات فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه

خصوصیات فیزیکی از جمله درصد ذرات تشکیل دهنده خاک، جرم مخصوص ظاهری، درصد مواد آلی، در آزمایشگاه به روش‌های رایج، اندازه‌گیری شدند.

بافت خاک بر اساس طبقه‌بندی USDA، مشخص گردید. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها در جدول (۱)، آورده شده است.

$$s_e(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \cong \frac{\theta(h)}{\theta_s} \quad (8)$$

با بازنویسی رابطه (۶)، اشباع موثر  $(s_e(h) \cong \theta(h) / \theta_s)$  از رابطه‌ی زیر بدست خواهد آمد:

$$s_e(h) = \frac{\theta(h)}{\theta_s} = |\alpha_{BC} h|^{-1/b} \quad (9)$$

به طوریکه  $(\alpha_{BC}^{-1}, L^{-1}, h_e^{-1})$  عکس پتانسیل ورود هوا می‌باشد. با جایگزینی رابطه (۹) در رابطه (۷)، رابطه‌ی بین  $K$  و  $h$  را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$k(h) = k_s |\alpha_{BC} h|^{-2-3/b} \quad (10)$$

به منظور تخمین پارامترهای رابطه‌ی (۱۰)، ابتدا رابطه مذکور به شکل خطی به صورت زیر نوشته شد:

$$\text{Ln}k(h) = \text{Ln}k_s - (2 + \frac{3}{b}) (\text{Ln}\alpha_{BC} + \text{Ln}h) \quad (11)$$

رابطه (۱۱) دارای سه متغیر  $K_s$ ،  $\alpha_{BC}$  و  $b$  می‌باشد که مقدار  $K_s$  برابر با مقدار بدست آمده از اطلاعات نفوذ سنج دیسک در نظر گرفته شد و جهت تخمین دو متغیر دیگر، با استفاده از نرم افزار SPSS.11، رابطه‌ی (۱۱)، به جفت داده‌های  $(k, h)$

### جدول (۱) - خصوصیات فیزیکی خاک مورد مطالعه

درصد مواد آلی	جرم مخصوص ظاهری ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	بافت خاک	درصد سیلت	درصد رس	درصد شن
۰/۶۸	۱/۵۷	لوم	۳۶/۱۴	۱۳/۸۵	۵۰/۰۱

خاک شرکت خواهند کرد. از سوی دیگر با کاهش مکش، تعداد منافذ شرکت کننده در جریان نیز افزایش می‌یابد.

مقادیر هدایت هیدرولیکی تخمین زده شده از اندازه-گیری‌های نفوذ سنج دیسک در مکش‌های متفاوت به روش تحلیل ذکر شده، در جدول (۳)، ارائه شده-اند. مطابق با نتایج ارائه شده، در اینجا نیز با کاهش مکش، هدایت هیدرولیکی (k) افزایش یافته است.

### تخمین هدایت هیدرولیکی در مکش‌های متفاوت به روش تحلیل الریک و رینولدز (۱۹۹۱) از اندازه‌گیری‌های صحرائی

سرعت‌های نفوذ پایدار اندازه‌گیری شده در مکش‌های متوالی توسط دستگاه نفوذ سنج دیسک، به طور نمونه در سه تکرار آزمایش در جدول (۲)، ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در این جدول، با کاهش مکش، سرعت نفوذ افزایش یافته است زیرا با کاهش مکش، طبق نظریه خیز کاپیلاری، منافذی با شعاع بزرگ‌تر در جریان آب در

جدول (۲)- سرعت‌های نفوذ پایدار اندازه‌گیری شده در ۵ مکش متوالی اعمال شده توسط نفوذ سنج

#### دیسک

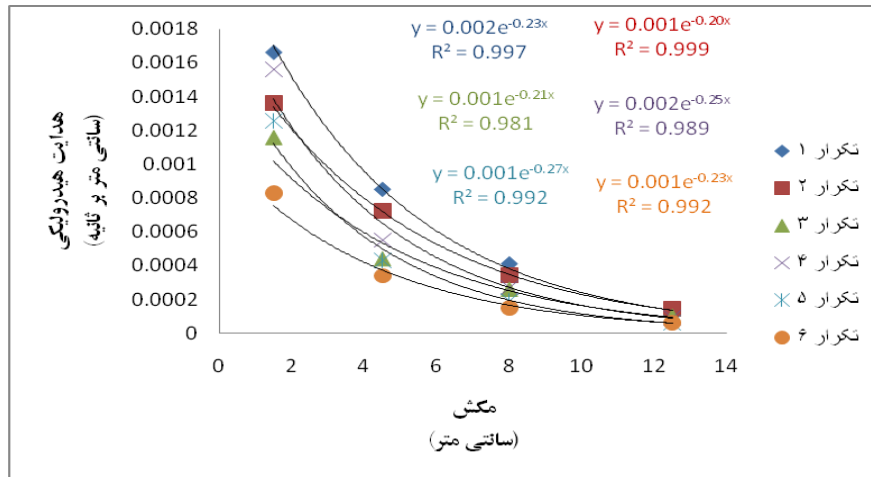
تکرار	مکش (cm)	رطوبت حجمی اولیه ( $cm^3 cm^{-3}$ )	مدت زمان اعمال	
			مکش (min)	سرعت نفوذ پایدار ( $cm \cdot sec^{-1}$ )
۱	-۱۵	۰/۱۲۰۷	۱۲	۰/۰۰۰۸۳
	-۱۰		۱۰	۰/۰۰۳۳
	-۶		۸	۰/۰۰۹۲
	-۳		۱۸	۰/۰۱۷
	۰		۱۴	۰/۰۳۲
۲	-۱۵	۰/۱۱۵۹	۸	۰/۰۰۱۷
	-۱۰		۲۲	۰/۰۰۳۳
	-۶		۱۰	۰/۰۰۷۵
	-۳		۱۲	۰/۰۱۴
	۰		۱۸	۰/۰۲۷
۳	-۱۵	۰/۱۴۷۵	۱۲	۰/۰۰۲۵
	-۱۰		۱۰	۰/۰۰۳۳
	-۶		۱۰	۰/۰۰۵۸
	-۳		۸	۰/۰۰۹۲
	۰		۱۸	۰/۰۳۲
۴	-۱۵	۰/۱۴۰۲	۱۴	۰/۰۰۱۷
	-۱۰		۱۸	۰/۰۰۲۵
	-۶		۱۴	۰/۰۰۵۸
	-۳		۲۰	۰/۰۱۱
	۰		۱۶	۰/۰۳۲
۵	-۱۵	۰/۰۹۶۸	۳۱	۰/۰۰۱۱
	-۱۰		۱۶	۰/۰۰۱۷
	-۶		۸	۰/۰۰۴۲
	-۳		۸	۰/۰۰۸۳
	۰		۲۶	۰/۰۲۷

ادامه جدول (۲)

تکرار	مدت زمان اعمال			
	مکش (cm)	رطوبت حجمی اولیه ( $cm^3 cm^{-3}$ )	مکش (min)	سرعت نفوذ پایدار ( $cm.sec^{-1}$ )
۶	-۱۵	۰/۰۴۱۱	۱۲	۰/۰۰۱۲
	-۱۰		۸	۰/۰۰۱۷
	-۶		۱۰	۰/۰۰۳۳
	-۳		۱۶	۰/۰۰۶۷
	۰		۱۴	۰/۰۰۱۷

جدول (۳)- مقادیر هدایت هیدرولیکی تخمین زده شده در نقطه وسط دو مکش متوالی به روش تحلیل الریک و رینولدز (۱۹۹۱)

تکرار ۱				تکرار ۲		
$h_{i+1/2}$ (cm)	$\alpha_{i+1/2}$ ( $cm^{-1}$ )	$k_{i+1/2}$ ( $cm.sec^{-1}$ )	$k_s$ ( $cm.sec^{-1}$ )	$\alpha_{i+1/2}$ ( $cm^{-1}$ )	$k_{i+1/2}$ ( $cm.sec^{-1}$ )	$k_s$ ( $cm.sec^{-1}$ )
۱۲/۵	۰/۲۲۷	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۴۱	۰/۱۳۹	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۸
-۸	۰/۲۵۳	۰/۰۰۰۴۱	۰/۰۰۰۳۱	۰/۲۰۳	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۱۷
-۴/۵	۰/۱۹۹	۰/۰۰۰۸۵	۰/۰۰۰۲۱	۰/۲۱۲	۰/۰۰۰۷۲	۰/۰۰۰۱۹
-۱/۵	۰/۲۲۳	۰/۰۰۱۶۶	۰/۰۰۰۲۳	۰/۲۱۱	۰/۰۰۱۳۶	۰/۰۰۰۱۹
میانگین	۰/۲۳	-	۰/۰۰۰۲	۰/۲۰	-	۰/۰۰۰۱
تکرار ۳				تکرار ۴		
۱۲/۵	۰/۰۵۸	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۸۱	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۲
-۸	۰/۱۴	۰/۰۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۰۸	۰/۲۱۲	۰/۰۰۰۰۲۷	۰/۰۰۰۱۵
-۴/۵	۰/۱۵۱	۰/۰۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۰۹	۰/۲۰۶	۰/۰۰۰۰۵۵	۰/۰۰۰۱۴
-۱/۵	۰/۳۱۱	۰/۰۰۱۱۶	۰/۰۰۰۱۹	۰/۳۶۶	۰/۰۰۱۵۶	۰/۰۰۰۲۷
میانگین	۰/۲۱	-	۰/۰۰۰۱	۰/۲۵	-	۰/۰۰۰۲
تکرار ۵				تکرار ۶		
۱۲/۵	۰/۰۸۱	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۸۱	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۲
-۸	۰/۲۲۹	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۱۲	۰/۱۷۳	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۶
-۴/۵	۰/۲۳۱	۰/۰۰۰۰۴۳	۰/۰۰۰۱۲	۰/۲۳۱	۰/۰۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۰۱
-۱/۵	۰/۳۸۸	۰/۰۰۱۲۶	۰/۰۰۰۲۳	۰/۳۰۵	۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۰۰۰۰۱
میانگین	۰/۲۷	-	۰/۰۰۰۱	۰/۲۳	-	۰/۰۰۰۱

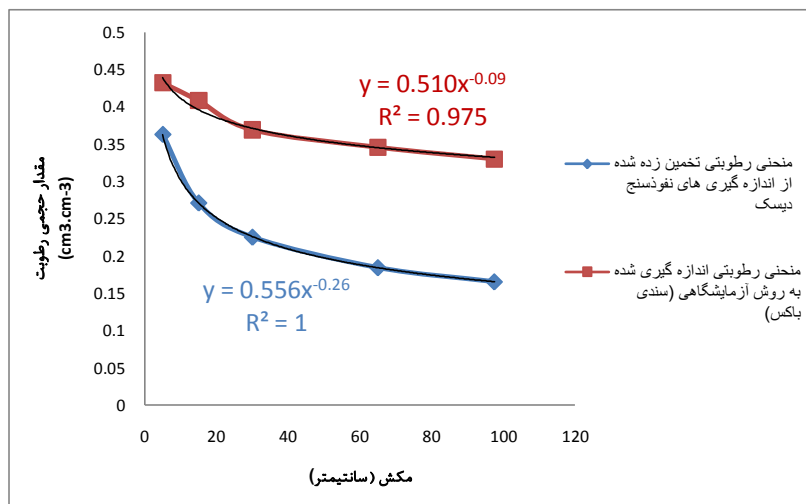


شکل (۱)- برازش تابع نمایی گادنر به جفت داده‌های مکش و هدایت هیدرولیکی

جدول (۴)- پارامترهای  $\alpha_{BC}$  و  $b$  تخمین زده شده حاصل از برازش معادله بروکز و کوری به جفت داده‌های اندازه‌گیری شده  $(k, h)$  با استفاده از نرم افزار آماری SPSS.11

تکرار	$\alpha_{BC}$ (1/cm)	$b$	$K_s$ (cm/sec)	$R^2$
۱	۰/۶۵ (۰/۳۵۲) <sup>*</sup>	۳/۴۲ (۰/۲۷۶)	۰/۰۰۲	۰/۸۹۲
۲	۰/۴۱ (۰/۲۲۶)	۳/۰۸ (۰/۲۱۳)	۰/۰۰۱	۰/۹۲
۳	۰/۵۳ (۰/۱۹۱)	۳/۳ (۰/۱۶۴)	۰/۰۰۱	۰/۹۵۶
۴	۰/۷۲ (۰/۲۴۲)	۴/۱۶ (۰/۲۰۳)	۰/۰۰۲	۰/۹۵۲
۵	۰/۵ (۰/۱۹۷)	۴/۷۵ (۰/۲۲۱)	۰/۰۰۱	۰/۹۵۱
۶	۰/۶۸ (۰/۲۲۹)	۳/۷۴ (۰/۱۸۶)	۰/۰۰۱	۰/۹۵۴

\* مقادیر درون پرانتز برابر با میزان انحراف استاندارد (Std.error)<sup>۱</sup> می‌باشند



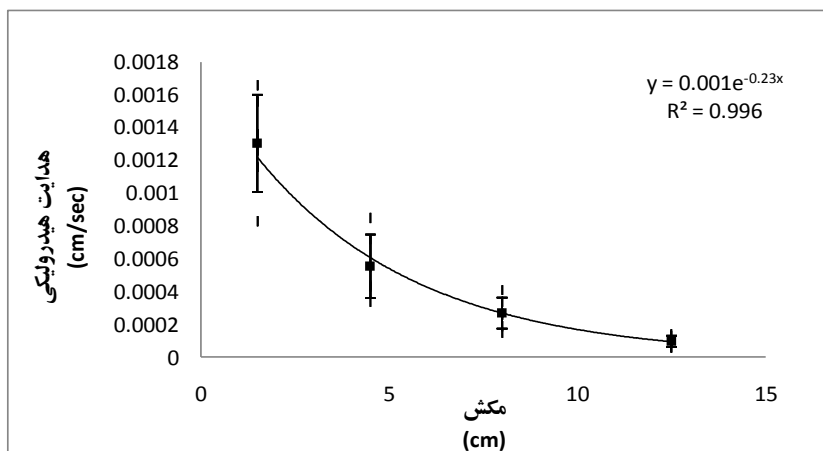
شکل (۲)- منحنی‌های رطوبتی تخمین زده شده از اندازه گیری‌های نفوذ سنج دیسک و بدست آمده به روش آزمایشگاهی (سندی باکس)

<sup>۱</sup>Standard Deviation

شکل (۱)، برازش تابع نمایی گاردنر (۱۹۵۸)، به جفت داده‌های مکش و هدایت هیدرولیکی در ۶ تکرار آزمایش را نشان می‌دهد. ضریب ثابت رابطه برازش یافته، برابر با هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) و ضریب مکش ( $h$ )، معادل پارامتر  $\alpha_g$  گاردنر شکل (۳)، منحنی هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک مورد مطالعه در این تحقیق که با استفاده از اطلاعات نفوذ سنج دیسک و حل تحلیلی رابطه وودینگ به روش الریک و رینولدز (۱۹۹۱) تعیین شده است را نشان می‌دهد. در این منحنی، نقاط اطلاعاتی، میانگین تکرارها هستند و در این شکل هم چنین انحراف استاندارد از میانگین بین اندازه‌گیری‌ها، توسط میله‌های خطا نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۳)، حداقل انحراف استاندارد در بیشترین مکش و حداکثر انحراف

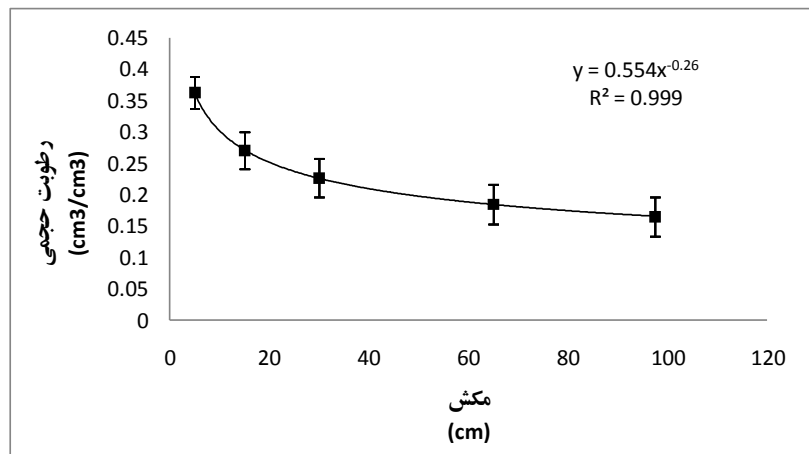
(پارامتر توزیع اندازه منافذ) می‌باشد. پارامترهای  $\alpha_{BC}$  و  $b$  تخمین زده شده برای ۶ تکرار آزمایش در جدول (۴)، ارائه شده است. شکل (۲)، منحنی‌های رطوبتی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده از اندازه‌گیری‌های نفوذ سنج دیسک را نشان می‌دهد. استاندارد در کم‌ترین مکش مشاهده می‌شود. هم چنین تابع نمایی گاردنر با رگرسیون بالا به نقاط میانگین برازش داده شده است.

شکل (۴)، منحنی رطوبتی تخمین زده شده از اندازه‌گیری‌های نفوذ سنج دیسک و میزان انحراف استاندارد از میانگین، بین اندازه‌گیری‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل نیز همانند شکل (۳)، نقاط اطلاعاتی، میانگین تکرارها می‌باشند. مدل توانی با رگرسیون بالا به نقاط میانگین برازش یافته است.



شکل (۳) - منحنی هدایت هیدرولیکی بدست آمده از اندازه‌گیری‌های نفوذ سنج دیسک و میزان انحراف استاندارد از میانگین، بین اندازه‌گیری‌ها در هر مکش





شکل (۴)- منحنی رطوبتی تخمین زده شده از اندازه‌گیری‌های نفوذ سنج دیسک و میزان انحراف استاندارد از میانگین، بین اندازه‌گیری‌ها در هر مکش

سانتیمتر استفاده شود زیرا در این روش، از اندازه‌گیری‌های صحرایی جهت تخمین منحنی رطوبتی استفاده شده است و مقادیر بدست آمده نسبت به مقادیری که با استفاده از روش آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های کوچک دست نخورده بدست می‌آیند واقعی‌تر و نزدیک‌تر به شرایط صحرایی می‌باشند

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج این تحقیق نشان داد که مقادیر رطوبتی بدست آمده از داده‌های صحرایی نفوذ سنج دیسک در تمامی مکش‌ها کمتر از مقادیر بدست آمده به روش آزمایشگاهی می‌باشند که این نتایج دقیقاً مشابه نتایج بودیمان میناسنی<sup>۱</sup> (۹) در سال (۲۰۰۰) است. وی در تحقیقی تحت عنوان روش‌های موثر برای پیش‌بینی خصوصیات هیدرولیکی خاک به این نتیجه رسید که منحنی‌های رطوبتی تخمین زده شده از داده‌های صحرایی، کاملاً کوچک‌تر از منحنی‌های بدست آمده به روش‌های آزمایشگاهی می‌باشند.

هم‌چنین نتایج این تحقیق نشان داد که مدل رطوبتی بروکز و کوری (۱۹۶۴)، مدل بسیار مناسبی برای توصیف منحنی رطوبتی نزدیک اشباع خاک می‌باشد.

با توجه با اینکه در مکش‌های کمتر از ۱۰۰ سانتیمتر، مقدار رطوبت باقی‌مانده در خاک بسیار متأثر از ساختمان خاک می‌باشد، توصیه می‌گردد از روش پیشنهاد شده در این مقاله، جهت تخمین منحنی رطوبتی در مکش‌های کمتر از ۱۰۰

<sup>۱</sup>Boodiman Minasny

## منابع

۱. عباسی، ف، ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیش رفته. انتشارات دانشگاه تهران. ص ۱۸.
2. Bagarello, V., Castellini, M., Iovino, M. 2005. Influence of the pressure head sequence on the soil hydraulic conductivity determined with tension infiltrometer. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(3):383-391.
3. Bodhinayake, W., Si, B.C. and Xiao, C. 2004. New method for determining water-conducting macro – and mesoporosity from tension infiltrometer. *Soil Science Society of America*, 68:760 – 769.
4. Brooks, R.H., Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper No.3. Colorado State Univ., Fort Collins, Co, USA.*
5. Campbell, G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci*, 117: 311-314.
6. Gardner, W.R. 1958. Some steady-state solution of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci*, 85:228-232.
7. Hu, W., Shao, M., Wang, Q., Fan, J. and Horton, R. 2009. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses. *Geoderma*, 149: 355-366.
8. Lee, D. 2005. Comparing the inverse parameter estimation approach with pedo-transfer function method for estimating soil hydraulic conductivity. *Geoscience Journal*, 9(3): 269-276.
9. Minasny, B. 2000. Efficient method for predicting soil hydraulic properties. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. The University of Sydney.
10. Reynolds, W.D., and D.E., Elrick. 1991. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Sci. Am. J*, 55: 633-639.
11. Verhagen, J. 1997. Site specific fertilizer application for potato production and effects on N-Leaching using dynamic simulation modeling. *Agriculture, Ecosystems and Enviroment*, 66: 165-175.
12. Yoon, Y., Kim, J.G. and Hyun, S. 2007. Estimating soil water retention in a selected range of soil pores using tension disc infiltrometer data. *Soil & Tillage Research*, 97:107–116.
13. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Sci. Total Environ*, 185:27-44.