

مقیاس‌بندی و بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های نفوذ آب در خاک در مقیاس حوزه آبریز (مطالعه موردی: دشت باجگاه)

فاطمه مهرابی* و علیرضا سپاسخواه**

*نگارنده مسئول، نشانی: شیراز، باجگاه، دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، تلفن: ۰۷۲۲ - ۲۲۲۲۹۲۸،

پایم‌نگار: mehrabi_223@yahoo.com

** به ترتیب: کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی؛ و استاد بخش مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۲/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۶/۱۸

چکیده

به منظور تخمین پارامترهای نفوذ آب در مقیاس منطقه، مطالعه تغییرپذیری مکانی خصوصیات نفوذ آب در خاک ضروری است. بر پایه آزمایش‌هایی روی پساب تصفیه شده در حوضه آبریز باجگاه، این پژوهش به مقیاس‌بندی (scaling) پارامترهای نفوذ آب مدل دو جزئی فیلیپ و تحلیل تغییرپذیری مکانی خصوصیات نفوذ آب در خاک با استفاده از روش‌های مقیاس‌بندی و زمین‌آمار پرداخته است. سی آزمایش نفوذ آب در یک الگوی تصادفی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از استوانه‌های دوگانه اجرا شد. خصوصیات نفوذ آب منطقه، سرعت نفوذ پایه کمی را برای اکثر مکان‌ها نشان می‌دهد (0.01 تا 0.178 سانتی‌متر در دقیقه). مدل فیلیپ به عنوان یک مدل مناسب برای توصیف فرآیندهای نفوذ آب به داده‌های اندازه‌گیری شده برآزش شد. پارامترهای این مدل (ضریب جذب S و فاکتور انتقال A) تغییرات وسیعی در مکان‌های آزمایشی نشان دادند. فاکتور مقیاس‌بندی بر اساس ضریب جذب α_S و فاکتور انتقال α_A محاسبه و داده‌های نفوذ آب مقیاس‌بندی شدند. نتایج نشان می‌دهد که مقیاس‌بندی با α_A بهتر از مقیاس‌بندی با α_S است. سپس، فاکتورهای بهینه α_{opt} با استفاده از روش حداقل مربعات (گزینه Solver) به دست آمد و مقیاس‌بندی داده‌های نفوذ آب تکرار شد. مقیاس‌بندی با استفاده از میانگین‌های حسابی، هندسی، و هارمونیک فاکتورهای مقیاس‌بندی α_S و α_A نیز انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که α_{opt} و فاکتور مقیاس‌بندی α_A ، داده‌های نفوذ آب را از دیگر فاکتورها مقیاس‌بندی مؤثرتر (مجموع مربع خطاهای کمتر) می‌کنند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه تغییرپذیری مکانی وسیعی دارد و نقشه تغییرات مکانی فاکتور مقیاس‌بندی α_A با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نیز نشان می‌دهد که مقدار این فاکتور از مرکز به اطراف، با کم شدن مقدار رس خاک، افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

تغییرپذیری مکانی، ضریب جذب، فاکتور انتقال، فاکتور مقیاس‌بندی، مدل دو جزئی فیلیپ

مقدمه

راندمان و اتلاف آب می‌شود. دانستن خصوصیات نفوذ آب در خاک از اطلاعات پایه‌ای مورد نیاز برای طراحی سیستم‌های آبیاری است (Machiwal et al., 2006). بنابراین، ارزیابی دقیق نفوذپذیری خاک ضروری است و مهندس طراح باید به آن توجه داشته باشد.

مهم‌ترین مشخصه فیزیکی خاک از نظر آبیاری، نفوذ آب در خاک است. در آبیاری، کاربرد مؤثر آب بستگی به ظرفیت نفوذ آب در خاک دارد. دقیق نبودن اندازه‌گیری این فرآیند در خاک‌های آبیاری شده، باعث پایین آمدن

و ضریب جذب محاسبه شده و داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده با استفاده از آن‌ها مقیاس‌بندی شدند. فاکتور مقیاس‌بندی شده بر اساس فاکتور انتقال نتایج بهتری را نشان داد.

اهوجا و همکاران (Ahuja *et al.*, 2007) پارامترهای معادله نفوذ آب لوئیس-کوستیاکف را بر اساس روابط بین پارامترهای این معادله و هدایت هیدرولیکی اشباع مؤثر مقیاس‌بندی کردند و رسول‌زاده و سپاسخواه (Rasoulzadeh & Sepaskhah, 2003) با استفاده از روش تحلیل ابعادی برای مقیاس‌بندی، یک رابطه نفوذ مقیاس‌بندی شده را برای آبیاری جویچه‌ای برای شش سری خاک به دست آوردند.

اگر چه محققان زیادی تغییرپذیری مکانی را بر اساس خصوصیات هیدرولیکی پایه ارزیابی کردند، شارما و همکاران (Sharma *et al.*, 1980) پیشنهاد می‌کنند که تغییرپذیری هیدرولیکی سطح زمین با پارامترهای کلی ارزیابی شود که به آسانی اندازه‌گیری می‌شوند و در مزرعه قابل اطمینان هستند.

با توجه به این‌که استفاده از آب‌های با کیفیت پایین در شرایط مناسب و با مدیریت آگاهانه، قابل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری اقتصادی است (Hasan-Li & Javan, 2005) و از آن‌جا که نیاز به آب در کشورهای خشک و نیمه‌خشک پیوسته در حال افزایش است، پیشنهاد می‌شود که آب با کیفیت بالا برای مصارف خانگی نگهداری و از آب با کیفیت پایین برای آبیاری استفاده شود. از جمله این آب‌ها پساب شهری است.

تحقیقات نشان می‌دهد که می‌توان از پساب به عنوان آب آبیاری استفاده کرد بدون این‌که تغییر زیادی در کیفیت محصول و خاک ایجاد شود. با در نظر گرفتن این موضوع و با توجه به این‌که مدل فیلیپ به عنوان یک مدل مناسب برای توصیف

اهمیت فرآیندهای نفوذ آب باعث توسعه مدل‌های تحلیلی ساده، برای پیش‌بینی نفوذ شده است. این مدل‌های نفوذ از کاملاً تجربی (Kostiakov, 1932; Horton, 1940; Holtan, 1961) تا مدل‌های فیزیکی (Green & Ampt, 1911; Philip, 1957) تغییر می‌کنند. در بین مدل‌های پیشنهادی، تنها تعداد کمی در اغلب مطالعات، روی داده‌های مزرعه‌ای با موفقیت به کار برده شده‌اند (Machiwal *et al.*, 2006).

طراحی سیستم‌های آبیاری نیازمند اندازه‌گیری نفوذ است که به منظور نشان دادن رفتار نفوذ در هر منطقه، باید آزمایش‌های زیادی در مکان‌های مختلف به اجرا درآید تا تغییرپذیری مکانی آن را بیان کند (Bonsu, 1997).

مقیاس‌بندی روشی است ساده برای توصیف تغییرپذیری خصوصیات هیدرولیکی خاک (Ahuja *et al.*, 2007).

با توجه به فرض تیلتسون و نیلسون (Tillotson & Nielsen, 1984) دو روش اساسی برای به دست آوردن فاکتورهای مقیاس‌بندی وجود دارد: (۱) روش تحلیل ابعادی که بر پایه وجود تشابه فیزیکی در سیستم است (Miller & Miller, 1956) و (۲) روش تجربی که تابع نرمالیزه شده نامیده شده و بر پایه تحلیل رگرسیون‌گیری^۱ قرار دارد مانند روش واریک و همکاران (Warrick *et al.*, 1977). مقیاس‌بندی بر اساس مفهوم محیط متشابه میلر و میلر نمونه‌ای از روش اول است (Ahuja *et al.*, 2007) که در این پژوهش اتخاذ شده است.

مدل‌سازی نفوذ و تحلیل تغییرپذیری مکانی خصوصیات نفوذ را ماچیوال و همکاران (Machiwal *et al.*, 2006) نیز انجام دادند که در این پژوهش، مدل دو جزئی فیلیپ به عنوان مدل مناسب برای توصیف فرآیندهای نفوذ معرفی شد. پارامترهای این مدل (A و S) تغییرپذیری وسیعی را در مکان‌های آزمایشی نشان می‌دهد. فاکتور مقیاس‌بندی بر اساس فاکتور انتقال

مناطق نیمه‌خشک است. میانگین دمای سالانه ۱۳/۳۸ درجه سلسیوس و عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی، و ارتفاع منطقه از سطح دریا به ترتیب ۴۶° ۲۹'، ۳۸° ۵۲' و ۱۸۱۰ متر است. حداکثر میزان مرطوب ۱۰۰ درصد و میانگین رطوبت نسبی ۵۱ درصد است. میانگین باران سالانه (از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۸) حدود ۳۹۳ میلی‌متر است که حداکثر بارندگی در ماه‌های سرد سال می‌بارد. این منطقه دارای شش سری خاک است که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. نفوذ آب در خاک در همه‌ی بافت‌ها به جز بافت شکاربانی اندازه‌گیری شد. فعالیت‌های کشاورزی رایج در منطقه شامل کشت گندم، ذرت، و محصولات جالیزی است.

فرآیندهای نفوذ معرفی شده که پارامترهای آن به سادگی قابل اندازه‌گیری است، در این پژوهش، به مقیاس‌بندی بر اساس مفهوم محیط متشابه و بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های نفوذ آب در خاک با استفاده از پساب تصفیه شده پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقه مورد مطالعه

زمین‌های زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در ۱۶ کیلومتری شمال شرقی شیراز در دشت باجگاه برای اجرای این پژوهش انتخاب شد. این ناحیه جزء

جدول ۱- بعضی از خصوصیات فیزیکی خاک‌های باجگاه (Sepaskhah, 1996)

بافت	درصد ذرات			عمق (سانتی‌متر)	نام سری خاک
	رس	سیلت	شن		
لوم	۱۳	۴۷	۴۰	۰-۲۰	کوی اساتید
لوم	۲۴	۳۶	۴۰	۲۰-۵۵	
لوم	۱۳	۴۱	۴۶	۰-۱۵	بمو
لوم	۲۱	۳۰	۴۹	۱۵-۵۰	
لوم شنی	۸	۳۵	۵۷	۰-۲۰	شکاربانی
لوم شنی	بیش از ۷۵ درصد سنگریزه و قلوه سنگ			۲۰-۷۰	
لوم رسی	۳۰	۳۵	۳۵	۰-۳۰	دانشکده
لوم رسی	۳۹	۳۸	۲۳	۳۰-۵۴	
لوم رسی	۲۹	۴۷	۲۴	۰-۲۵	رامجردی
لوم رسی	۳۸	۳۹	۲۳	۲۵-۷۰	
لوم رسی	۳۲	۴۷	۲۱	۰-۲۰	پمپ نمازی
لوم رسی سیلتی	۳۹	۴۲	۱۹	۲۰-۸۰	

آزمایش‌های نفوذ انتخاب شد که مختصات محلی (UTM) هر نقطه با دستگاه GPS به دست آمد. سعی شد این نقاط در سطوح هموار زمین‌های زراعی باشد، و به دلیل این‌که اکثر زمین‌های منطقه کشت شده یا شخم خورده بودند، اندازه‌گیری‌ها اغلب در گوشه‌ها و اطراف قطعات

طرح آزمایشی و اندازه‌گیری نفوذ

آزمایش نفوذ با استفاده از استوانه‌های دوگانه با بار ثابت اجرا شد. آب مورد استفاده در این آزمایش‌ها پساب تصفیه شده بود که برخی خصوصیات آن در جدول ۲ آمده است. سی مکان از منطقه به صورت تصادفی برای

اراضی به انجام رسید. همچنین سعی شد اندازه‌گیری‌ها کل منطقه را پوشش دهند تا امکان تحلیل تغییرپذیری مکانی فرآیند نفوذ فراهم شود. استوانه‌های دوگانه ۱۵-۱۰ سانتی‌متر در زمین کوبیده شدند. بوته‌های گیاه در محل آزمایش از سطح زمین جدا شدند. استوانه‌ها روی سطوح بدون درز و ترک کوبیده شدند و سرعت پایین آمدن آب در استوانه داخلی اندازه‌گیری شد. مقدار آب در استوانه خارجی نیز در سطح تقریباً یکسانی با استوانه داخلی

نگه داشته شد تا واگرایی جریان آب در خاک به علت جریان جانبی غیر همگام، که بزرگترین منبع خطا در آزمایش نفوذ است کاهش یابد (Bouwer et al., 1999; Machiwal et al., 2006). عمق آب درون استوانه نیز که ممکن است باعث واگرایی شود در (Bouwer et al., 1999; Machiwal et al., 2006)، در طول آزمایش تا حد ممکن در ارتفاع ثابت نگه داشته شد (حدود ۱۰ سانتی‌متر).

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی پساب مورد استفاده

غلظت	پارامتر
۶/۷۷	PO ₄ ⁻² (میلی‌گرم بر لیتر)
۲/۰۸۹	P (میلی‌گرم بر لیتر)
۱۲/۶	NO ₃ ⁻¹ (میلی‌گرم بر لیتر)
۲۸/۲۳	BOD (میلی‌گرم بر لیتر)
۶۰/۸	COD (میلی‌گرم بر لیتر)
۶۸/۷	TSS (میلی‌گرم بر لیتر)
۱۰/۱۶	TDS (میلی‌گرم بر لیتر)
۱۸۶/۲۴	Na (میلی‌گرم بر لیتر)
۱۹/۹۴	K (میلی‌گرم بر لیتر)
۱۶۱	Cl (میلی‌گرم بر لیتر)
۲۵۵	SO ₄ ⁻² (میلی‌گرم بر لیتر)
۷/۷	pH
۲/۲۱۵	EC (دسی‌زیمنس بر متر)

مدل فیلیپ

نتایج تحقیقات بسیاری از محققان نشان می‌دهد که مدل فیلیپ بهترین مدل تطبیقی نفوذ آب برای توصیف خصوصیات مکانی نفوذ برای هر خاک خاص است. این مدل به دلیل سهولت در تخمین پارامترها و این‌که می‌تواند زمان را به صورت تابع ضمنی از نفوذ تجمعی و بالعکس بیان کند، انتخاب شده است (Machiwal et al., 2006).

مدل نفوذ فیلیپ به صورت رابطه ۱ است

که در آن،

$I =$ کل نفوذ آب در واحد سطح (میلی‌متر)؛ $S =$ ضریب جذب (میلی‌متر بر جذر دقیقه)؛ $A =$ فاکتور انتقال (میلی‌متر بر دقیقه) که به خصوصیات خاک و رطوبت اولیه و اشباع خاک بستگی دارد؛ و $t =$ زمان نفوذ (دقیقه) است. سرعت نفوذ بر حسب میلی‌متر بر دقیقه با رابطه ۲ ارائه می‌شود:

$$I(t) = St^{1/2} + At \quad (1)$$

$$i(t) = \frac{St^{-1/2}}{2} + A \quad (2)$$

(Philip, 1957)

ابعادی پارامترهای مدل فیلیپ، ضریب جذب S و فاکتور انتقال A می‌تواند به صورت روابط ۵ و ۶ مقیاس‌بندی شود (Philip, 1957, 1987):

$$S_j / \lambda_j^{1/2} = S_r / \lambda_r^{1/2} \quad (۵)$$

و

$$A_j / \lambda_j^2 = A_r / \lambda_r^2 \quad (۶)$$

که در آن‌ها،

λ به صورت طول مشخصه خاک در یک مکان مشخص تعریف شده است، اندیس j مکان آزمایش و اندیس r خاک مرجع با خصوصیات متوسط آب-خاک را نشان می‌دهد. اگر شرایط محیط کاملاً متشابه صدق کند، مقدار λ_j در روابط ۵ و ۶ یکسان است. فاکتور مقیاس‌بندی دیگری که بدون بعد است (α) می‌تواند به صورت رابطه ۷ تعریف شود:

$$\alpha_j = \lambda_j / \lambda_r = \lambda_j / \bar{\lambda} \quad (۷)$$

که در آن،

λ طول مشخصه خاک مرجع با خصوصیات آب خاک میانگین است و برای چنین خاک‌هایی فاکتور مقیاس‌بندی باید برابر واحد باشد. روش مقیاس‌بندی در مورد مدل فیلیپ به کار برده شده است (Machiwal *et al.*, 2006; Lei *et al.*, 1986). با توجه به این روش و با استفاده از روابط ۵ تا ۷، فاکتورهای مقیاس‌بندی بدون بعد برای A و S، یعنی α_A و α_S برای n آزمایش نفوذ می‌تواند به صورت روابط ۸ و ۹ محاسبه شود:

$$\alpha_{Sj} = (S_j / \bar{S})^2 \quad (۸)$$

و

$$\alpha_{Aj} = (A_j / \bar{A})^{1/2} \quad (۹)$$

که در آن‌ها میانگین ضریب جذب \bar{S} برابر است با:

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j \quad (۱۰)$$

که در آن،

i سرعت نفوذ آب در خاک است. پارامترهای مدل فیلیپ (S و A) پارامترهای کلی (Bulk parameters) نامیده می‌شوند، اول به این دلیل که در مقایسه با نمونه‌های دست‌خورده‌ای که معمولاً برای تعیین خصوصیات هیدرولیکی استفاده می‌شوند، در محل در حجم بزرگتری از خاک اندازه‌گیری می‌شوند و دوم این که تأثیر فاکتورهای دیگر مؤثر بر فرایند نفوذ از جمله سوراخ‌های درشت، میزان رطوبت اولیه، بافت خاک، و ساختمان خاک را در نظر می‌گیرد (Sharma *et al.*, 1980).

از سوی دیگر، در شرایطی که خاک ناهمگن باشد یا مقدار رطوبت اولیه‌ی خاک در عمق یکنواخت نباشد، مقدار A در رابطه ۱ ممکن است منفی به دست آید که غیر واقعی است. در این صورت، به کمک رابطه ۳ و رگرسیون خطی چند متغیره که در آن عدد ثابت صفر در نظر گرفته شود، می‌توان مقادیر C_1 ، C_2 و C_3 را به دست آورد، پس از آن از رابطه ۴، A تخمین زده خواهد شد و S برابر با C_1 می‌شود (Sepaskhah, 1996).

$$I = C_1 t^{1/2} + C_2 t + C_3 t^{3/2} \quad (۳)$$

$$A \approx (3C_1 C_3)^{1/2} + C_2 \quad (۴)$$

تئوری مقیاس‌بندی^۱

از روش مقیاس‌بندی برای تعیین تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به طور گسترده استفاده شده است (Nielsen *et al.*, 1998; Warrick & Nielsen, 1980). هدف اصلی روش مقیاس‌بندی این است که یک سری روابط تابعی را با استفاده از فاکتورهای مقیاس‌بندی، که همه سری‌ها را کامل توصیف می‌کند، به یک منحنی تبدیل کند. مفهوم روش مقیاس‌بندی از تئوری تشابه هندسی میکروسکوپی بسط داده می‌شود که میلر و میلر (Miller & Miller, 1956) ارائه داده‌اند. بر اساس تحلیل

و میانگین فاکتور انتقال \bar{A} برابر است با:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n A_j \quad (11)$$

نفوذ اندازه‌گیری شده $I(t)$ می‌تواند با استفاده از α_S یا α_A با توجه به رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ مقیاس‌بندی شود (Sharma et al., 1980):

$$I^* = \alpha I \quad (12)$$

و

$$t^* = \alpha^3 t \quad (13)$$

که در آن،

I^* و t^* به ترتیب نفوذ تجمعی و زمان مقیاس‌بندی شده هستند و α می‌تواند هر یک از فاکتورهای مقیاس‌بندی (α_{opt} ، α_A ، α_S) و میانگین‌های حسابی، هندسی و هارمونیک) باشد که بر اساس آن، نفوذ و زمان مقیاس‌بندی می‌شود. به منظور به دست آوردن فاکتور مقیاس‌بندی میانگین، از فاکتور مقیاس‌بندی α_A و α_S در هر نقطه میانگین حسابی، هندسی، و هارمونیک گرفته شد و سپس نسبت به این میانگین‌ها مقیاس‌بندی انجام گرفت. اگر نفوذ را بتوان در هر مکان به طور مناسب با مدل دو جزئی فیلیپ تقریب زد (رابطه ۱) و شرایط محیط کاملاً متشابه باشد، خصوصیت نفوذ همه مکان‌ها در شکل مقیاس‌بندی شده باید به صورت رابطه ۱۴ توصیف شود:

$$I^* = \bar{S} t^{*1/2} + \bar{A} t^* \quad (14)$$

در این مورد، مجموع مربع خطاهای (SSE) داده‌های اصلی (در جایی که منحنی میانگین با \bar{S} و \bar{A} توصیف شود) و داده‌های مقیاس‌بندی شده مقایسه شدند.

فاکتورهای مقیاس‌بندی همچنین با استفاده از بهینه‌سازی آماری محاسبه شده است. با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳، فاکتور مقیاس‌بندی بهینه α_{opt} برای هر آزمایش نفوذ با حداقل کردن تفاضل مجموع مربعات SSE بین نفوذ مقیاس‌بندی شده I^* و نفوذ میانگین (\bar{I}) بر پایه \bar{S} و

\bar{A}) انتخاب شده است (گزینه Solver). بنابراین، SSE با

رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود:

$$SSE = \sum_{t_j^*} (I_{t_j^*}^* - \bar{I}_{t_j^*})^2 \quad (15)$$

که در آن،

مجموع همه مقادیر t_j^* ، کل زمان آزمایش نفوذ را در بر می‌گیرد و اندیس زبازه‌های زمانی در هر آزمایش نفوذ را مشخص می‌کند.

تعیین میانگین و انحراف معیار هندسی ذرات خاک

برای رسیدن به رابطه‌ای ساده‌تر که طی آن بتوان تنها با داشتن پارامترهای زودیافت خاک فاکتور مقیاس‌بندی را به دست آورد، سعی شد رابطه‌ای بین α_A با پارامترهای زودیافت خاک به دست آید. با استفاده از پارامترهای زودیافت خاک می‌توان میانگین هندسی (d_g) و انحراف معیار هندسی (σ_g) را محاسبه کرد (Shirazi & Boersma, 1984). لذا روابط مورد نظر بین α_A با d_g و σ_g از طریق رگرسیون‌گیری به دست آمد.

نتایج و بحث

مشخصات نفوذ آب در خاک‌های منطقه

معادلات نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ برآزش شده به داده‌های اندازه‌گیری شده و همچنین تحلیل آماری آن در جدول ۳ ارائه شده است. میانگین سرعت نفوذ پایه برای کل ۳۰ آزمایش نفوذ ۰/۰۶۱۹ سانتی‌متر در دقیقه است و مقادیر حداکثر و حداقل به ترتیب ۰/۱۷۸ و ۰/۰۰۱ سانتی‌متر در دقیقه به دست آمد. مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و منحنی میانگین که نشان‌دهنده نفوذ تجمعی بر پایه میانگین ضریب جذب و فاکتور انتقال در منطقه است (شکل ۱)، نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌ها اطراف منحنی میانگین زیاد است که نشان‌دهنده تغییرپذیری زیاد خصوصیات نفوذ در منطقه است.

جدول ۳- معادلات نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ برازش داده شده به داده‌های اندازه‌گیری شده و پارامترهای آماری آن

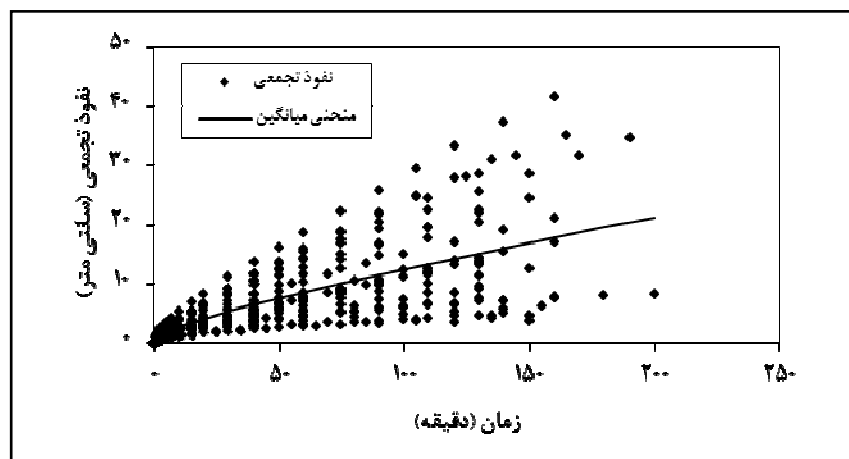
P*	SE**	n ^t	R ^{tt}	رابطه سرعت نفوذ (سانتی‌متر بر دقیقه)	رابطه نفوذ تجمعی (سانتی‌متر)	Y (متر)	X (متر)
۲/۲۹E-۱۷	۰/۱۳	۱۷	۰/۹۹	۰/۵۱۷t ^{-۱/۵} + ۰/۰۰۴	۱/۰۳۴t ^{-۱/۵} + ۰/۰۰۴t	۳۲۹۰۵۸۴	۶۵۲۹۸۵
۷/۰۱E-۱۷	۰/۱۱	۱۵	۰/۹۹	۰/۱۴۵t ^{-۱/۵} + ۰/۰۰۹	۰/۲۸۹t ^{-۱/۵} + ۰/۰۰۹t	۳۲۹۰۶۸۵	۶۵۲۹۵۹
۹/۰۳E-۲۰	۰/۰۶	۱۶	۰/۹۹	۰/۲۱۵t ^{-۱/۵} + ۰/۰۱۷	۰/۴۲۹t ^{-۱/۵} + ۰/۰۱۷t	۳۲۹۱۲۴۴	۶۵۲۴۱۴
۳/۱۸E-۲۴	۰/۰۴	۱۶	۰/۹۹	۰/۱۵۹t ^{-۱/۵} + ۰/۰۰۹	۰/۳۱۹t ^{-۱/۵} + ۰/۰۰۹t	۳۲۹۰۰۲۲	۶۵۲۴۴۹
۹/۴۷E-۲۵	۰/۰۵	۱۷	۰/۹۹	۰/۳۲۴t ^{-۱/۵} + ۰/۰۰۹	۰/۶۴۸t ^{-۱/۵} + ۰/۰۲۶t	۳۲۸۹۶۲۴	۶۵۲۸۳۳
۳/۱۹E-۲۴	۰/۱۳	۱۹	۰/۹۹	۰/۳۶۸t ^{-۱/۵} + ۰/۰۲۲	۰/۷۳۶t ^{-۱/۵} + ۰/۰۲۲t	۳۲۸۹۷۶۹	۶۵۰۰۱۵
۸/۶۷E-۳۲	۰/۱۴	۱۸	۰/۹۹	۰/۳۷۸t ^{-۱/۵} + ۰/۱۶۴	۰/۷۵۵t ^{-۱/۵} + ۰/۱۶۴t	۳۲۹۰۰۴۶	۶۵۳۶۷۹
۸/۹۶E-۲۶	۰/۰۶	۱۶	۰/۹۹	۰/۲۰۹t ^{-۱/۵} + ۰/۰۳۳	۰/۴۱۸t ^{-۱/۵} + ۰/۰۳۳t	۳۲۹۱۱۸۵	۶۵۳۹۵۱
۱/۱۳E-۲۶	۰/۲۱	۱۸	۰/۹۹	۰/۵۰۸t ^{-۱/۵} + ۰/۰۴۹	۱/۰۱۷t ^{-۱/۵} + ۰/۰۴۹t	۳۲۹۱۴۹۷	۶۵۳۶۷۷
۲/۹۰E-۲۹	۰/۱۱	۱۸	۰/۹۹	۰/۳۶۴t ^{-۱/۵} + ۰/۰۴۹	۰/۷۲۷t ^{-۱/۵} + ۰/۰۴۹t	۳۲۹۱۶۵۸	۶۵۲۷۶۶
۳/۰۴E-۳۰	۰/۰۶	۱۷	۰/۹۹	۰/۲۰۹t ^{-۱/۵} + ۰/۰۷۳	۰/۴۱۷t ^{-۱/۵} + ۰/۰۷۳t	۳۲۹۰۱۵۸	۶۵۴۱۵۰
۱/۳۹E-۳۴	۰/۱۶	۱۹	۰/۹۹	۰/۵۲۴t ^{-۱/۵} + ۰/۱۷۸	۱/۰۴۹t ^{-۱/۵} + ۰/۱۷۸t	۳۲۹۰۳۶۹	۶۵۴۲۷۳
۵/۷۷E-۲۷	۰/۰۶	۱۶	۰/۹۹	۰/۲۱۷t ^{-۱/۵} + ۰/۰۶۹	۰/۴۳۴t ^{-۱/۵} + ۰/۰۶۹t	۳۲۹۰۳۷۲	۶۵۳۹۹۵
۶/۲۲E-۲۷	۰/۱۲	۱۸	۰/۹۹	۰/۲۴۱t ^{-۱/۵} + ۰/۰۴۴	۰/۴۸۳t ^{-۱/۵} + ۰/۰۴۴t	۳۲۹۰۷۳۵	۶۵۲۵۶۸
۴/۱۰E-۳۲	۰/۱۹	۱۹	۰/۹۹	۰/۴۵۱t ^{-۱/۵} + ۰/۱۴۴	۰/۹۰۳t ^{-۱/۵} + ۰/۱۴۴t	۳۲۹۲۴۰۳	۶۵۲۱۰۲
۶/۱۱E-۲۴	۰/۱۰	۱۷	۰/۹۹	۰/۲۹۶t ^{-۱/۵} + ۰/۰۰۱	۰/۵۹۳t ^{-۱/۵} + ۰/۰۰۱t	۳۲۹۱۷۱۹	۶۵۱۵۶۶
۴/۳۰E-۲۶	۰/۱۱	۱۷	۰/۹۹	۰/۲۹۴t ^{-۱/۵} + ۰/۰۵۳	۰/۵۸۸t ^{-۱/۵} + ۰/۰۵۳t	۳۲۹۱۹۳۶	۶۵۱۷۳۰
۱/۳۱E-۳۷	۰/۱۲	۲۰	۱/۰۰	۰/۴۶۶t ^{-۱/۵} + ۰/۱۱۵	۰/۹۳۲t ^{-۱/۵} + ۰/۱۱۵t	۳۲۹۲۰۴۸	۶۵۰۸۷۹
۵/۱۶E-۲۲	۰/۲۰	۱۷	۰/۹۹	۰/۱۴۳t ^{-۱/۵} + ۰/۰۷۹	۰/۲۸۶t ^{-۱/۵} + ۰/۰۷۹t	۳۲۹۱۸۹۳	۶۵۲۳۷۰
۷/۴۴E-۲۹	۰/۰۷	۱۷	۰/۹۹	۰/۲۴۶t ^{-۱/۵} + ۰/۰۵۹	۰/۴۹۲t ^{-۱/۵} + ۰/۰۵۹t	۳۲۹۳۰۸۵	۶۵۰۳۴۴
۲/۰۳E-۲۷	۰/۱۴	۱۷	۰/۹۹	۰/۲۵۳t ^{-۱/۵} + ۰/۱۲۹	۰/۵۰۷t ^{-۱/۵} + ۰/۱۲۹t	۳۲۹۲۳۳۸	۶۵۰۷۴۰
۸/۸۲E-۲۷	۰/۰۹	۱۷	۰/۹۹	۰/۱۹۱t ^{-۱/۵} + ۰/۰۶۸	۰/۳۸۲t ^{-۱/۵} + ۰/۰۶۸t	۳۲۹۲۷۶۱	۶۵۱۴۵۳
۱/۴۶E-۲۸	۰/۱۸	۱۸	۰/۹۹	۰/۵۴۲t ^{-۱/۵} + ۰/۰۷۴	۱/۰۸۵t ^{-۱/۵} + ۰/۰۷۴t	۳۲۹۰۶۳۶	۶۵۴۱۲۸
۱/۶۰E-۲۵	۰/۲۴	۱۷	۰/۹۹	۰/۳۴۰t ^{-۱/۵} + ۰/۱۵۷	۰/۶۸۱t ^{-۱/۵} + ۰/۱۵۷t	۳۲۹۲۸۵۳	۶۵۰۱۳۲
۱/۱۸E-۲۰	۰/۱۲	۱۶	۰/۹۹	۰/۲۵۲t ^{-۱/۵} + ۰/۰۱۰	۰/۵۰۴t ^{-۱/۵} + ۰/۰۱۰t	۳۲۹۲۰۷۰	۶۵۰۵۳۹
۹/۹۸E-۲۶	۰/۱۶	۱۷	۰/۹۹	۰/۲۰۳t ^{-۱/۵} + ۰/۱۲۰	۰/۴۰۷t ^{-۱/۵} + ۰/۱۲۰t	۳۲۹۲۳۶۲	۶۵۰۱۶۷
۹/۰۵E-۲۲	۰/۱۳	۱۷	۰/۹۹	۰/۲۸۱t ^{-۱/۵} + ۰/۰۰۷	۰/۵۶۲t ^{-۱/۵} + ۰/۰۰۷t	۳۲۹۲۳۲۹	۶۵۱۲۶۱
۹/۱۹E-۲۸	۰/۰۸	۱۷	۰/۹۹	۰/۲۱۹t ^{-۱/۵} + ۰/۰۷۲	۰/۴۳۹t ^{-۱/۵} + ۰/۰۷۲t	۳۲۹۱۳۰۰	۶۵۱۱۳۹
۳/۸۱E-۱۸	۰/۳۰	۱۷	۰/۹۹	۰/۳۳۴t ^{-۱/۵} + ۰/۰۱۲	۰/۶۶۸t ^{-۱/۵} + ۰/۰۱۲t	۳۲۹۲۴۱۸	۶۵۰۸۸۰
۶/۳۴E-۱۶	۰/۱۵	۱۶	۰/۹۹	۰/۵۳۹t ^{-۱/۵} + ۰/۰۱۲	۱/۰۷۸t ^{-۱/۵} + ۰/۰۱۲t	۳۲۹۱۰۱۴	۶۵۲۲۴۲

*Probability Level

**Standard Error

t Observation Number

tt Coefficient of Determination



شکل ۱- منحنی‌های نفوذ تجمعی و منحنی میانگین ۳۰ مکان آزمایشی در منطقه‌ی مورد مطالعه.

تخمین پارامترهای مدل نفوذ

داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف به مدل فیلیپ برازش شد و با روش حداقل مربعات، پارامترهای مدل (A و S) به دست آمد. پارامترهای به دست آمده از ۳۰ آزمایش نفوذ در جدول ۴ آمده است. حدود پارامتر S (سانتی‌متر بر جذر دقیقه) بین ۰/۲۸۶ تا ۱/۰۸۵ و مقدار پارامتر A (سانتی‌متر بر دقیقه) بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۱۷۸ تغییر می‌کند که به تغییرپذیری مکانی خصوصیات هیدرولیکی خاک در منطقه مورد مطالعه اشاره دارد.

پارامتر A مدل نفوذ فیلیپ در پنج مکان آزمایشی (۱، ۳، ۵، ۶، و ۳۰) منفی به دست آمد. این یافته‌ها اشاره به این موضوع دارد که مدل فیلیپ به داده‌های نفوذ مشاهده شده در این پنج مکان به خوبی تطابق داده نشده است. این مقادیر منفی می‌تواند به دلیل ناهمگنی خاک یا غیر یکنواختی رطوبت اولیه خاک در عمق باشد. از آن‌جا که نقاط انتخابی در کنار زمین‌های که کشت قرار داشتند، مقادیر منفی می‌تواند به دلیل غیریکنواختی رطوبت اولیه خاک در عمق باشد زیرا ممکن است به دلیل آبیاری مزارع در روزهای

گذشته، رطوبت در عمق بیشتر از رطوبت در سطح خاک باشد. در این نقاط مقادیر پارامتر A مدل نفوذ با استفاده از رابطه‌های ۳ و ۴ اصلاح، و در جدول ۴ ارائه شدند.

خصوصیات پارامترهای مدل (A و S)

تغییرات پارامترهای S و A در ۳۰ مکان آزمایشی در منطقه مورد مطالعه از الگوی مشخصی پیروی نمی‌کنند (شکل ۲) و رابطه بین S و A معنی‌دار نیست (ضریب همبستگی $r=0/21$). رابطه بین این دو پارامتر و تحلیل آماری آن نشان‌دهنده رابطه ضعیف بین پارامتر S و A است (رابطه ۱۶).

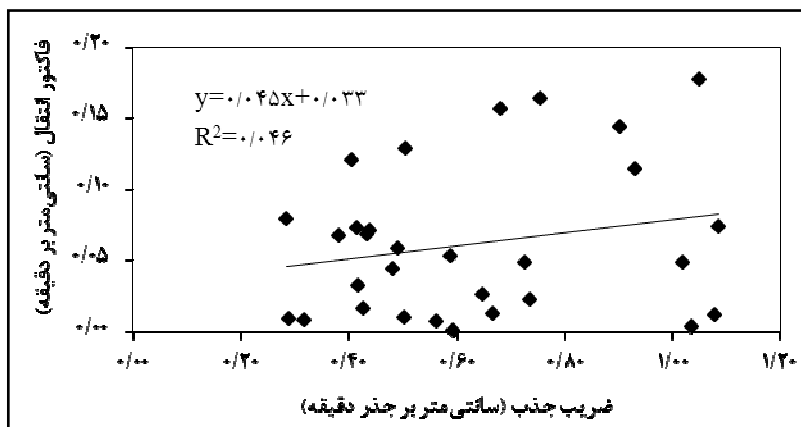
$$A = 0/045 S + 0/033 \quad (16)$$

$$r^2 = 0/046, n = 30, SE = 0/0525, P = 0/255$$

تالسما (Talsma, 1969) نیز رابطه ضعیفی بین ضریب جذب و هدایت هیدرولیکی گزارش کرده است. در حالی که شارما و همکاران (Sharma et al., 1980) و ماچیوال و همکاران (Machiwal et al., 2006) تمایل به افزایش مقدار S با افزایش مقدار A را گزارش کرده‌اند.

جدول ۴- پارامترهای مدل نفوذ فیلیپ برای ۳۰ مکان آزمایشی

نقاط اندازه‌گیری شده	A (سانتی‌متر بر دقیقه)	S (سانتی‌متر بر جذر دقیقه)
۱	۰/۰۰۴	۱/۰۳۴
۲	۰/۰۰۹	۰/۲۸۹
۳	۰/۰۱۷	۰/۴۲۹
۴	۰/۰۰۹	۰/۳۱۹
۵	۰/۰۲۶	۰/۶۴۸
۶	۰/۰۲۲	۰/۷۳۶
۷	۰/۱۶۴	۰/۷۵۵
۸	۰/۰۳۳	۰/۴۱۸
۹	۰/۰۴۹	۱/۰۱۷
۱۰	۰/۰۴۹	۰/۷۲۷
۱۱	۰/۰۷۳	۰/۴۱۷
۱۲	۰/۱۷۸	۱/۰۴۹
۱۳	۰/۰۶۹	۰/۴۳۴
۱۴	۰/۰۴۴	۰/۴۸۳
۱۵	۰/۱۴۴	۰/۹۰۳
۱۶	۰/۰۰۱	۰/۵۹۳
۱۷	۰/۰۵۳	۰/۵۸۸
۱۸	۰/۱۱۵	۰/۹۳۲
۱۹	۰/۰۷۹	۰/۲۸۶
۲۰	۰/۰۵۹	۰/۴۹۲
۲۱	۰/۱۲۹	۰/۵۰۷
۲۲	۰/۰۶۸	۰/۳۸۲
۲۳	۰/۰۷۴	۱/۰۸۵
۲۴	۰/۱۵۷	۰/۶۸۱
۲۵	۰/۰۱۰	۰/۵۰۴
۲۶	۰/۱۲۰	۰/۴۰۷
۲۷	۰/۰۰۷	۰/۵۶۲
۲۸	۰/۰۷۲	۰/۴۳۹
۲۹	۰/۰۱۲	۰/۶۶۸
۳۰	۰/۰۱۲	۱/۰۷۸



شکل ۲- رابطه بین ضریب جذب و فاکتور انتقال منطقه مورد مطالعه.

مقیاس‌بندی پارامترهای مدل

بهتر با α_{opt} به دست می‌آید. پس از آن، α_A با مقدار SSE کمتر، فاکتور مناسبی برای مقیاس‌بندی است. در جدول ۶ مقادیر S^* و A^* به دست آمده از روش حداقل مربعات برای منحنی‌های خوب برازش داده شده نیز ارائه شده است.

فاکتورهای مقیاس‌بندی α_A و α_S به طور معنی‌داری با هم متفاوت‌اند که همبستگی ضعیف بین این دو فاکتور این موضوع را ثابت می‌کند (شکل ۵). این نتیجه در مقایسه با خط یک به یک نشان داده شده است (شکل ۵) و پارامترهای آماری معادله‌ی برازش شده به آن نیز بیانگر این موضوع است. رابطه و تحلیل آماری آن به صورت رابطه ۱۷ ارائه شده است:

$$\alpha_A = 0.073 \alpha_S + 0.0811 \quad (17)$$

$$r^2 = 0.021, \quad n=30, \quad SE=0.455, \quad P=0.443$$

مفهوم محیط متشابه اشاره دارد به این‌که خاک‌ها در موقعیت‌های مختلف در یک منطقه داده شده باید تداخل یکسان و توزیع اندازه منافذ مشابهی باشند و نباید با زمان و درجه اشباع تغییر کنند (Miller & Miller, 1956). ولی در عمل، خاک‌ها از نظر تداخل متفاوت‌اند و در نتیجه، بعید است که خاک‌های مزرعه مورد پژوهش شرایط مورد نیاز برای تئوری محیط متشابه را به طور کامل داشته باشد.

از لحاظ تئوری، اگر همه شرایط محیط متشابه صادق باشند، هر یک از پارامترهای S و A می‌تواند در محاسبات فاکتورهای مقیاس‌بندی استفاده شود و نتایج یکسانی ارائه کند. بنابراین، تفاوت معنی‌دار α_A و α_S (شکل ۵) را می‌توان به تفاوت در تداخل و توزیع اندازه منافذ خاک‌ها نسبت داد.

بهینه‌سازی پارامترهای مقیاس‌بندی

داده‌های نفوذ مقیاس‌بندی شده بر اساس α_{opt} کاهش قابل توجهی در پراکندگی نقاط اطراف منحنی‌های

از داده‌های ۳۰ سری اندازه‌گیری مقادیر S و A در مکان‌های آزمایشی، فاکتورهای مقیاس‌بندی (α_A و α_S) با استفاده از روابط ۸ و ۹ محاسبه شد (جدول ۵) و داده‌های اندازه‌گیری شده (نفوذ اندازه‌گیری شده I در زمان t) بر طبق رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ مقیاس‌بندی شدند. مقایسه‌ی داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده (شکل ۱) با داده‌های مقیاس‌بندی شده (شکل‌های ۳ و ۴) اشاره به این دارد که پراکندگی داده‌ها اطراف منحنی میانگین در داده‌های مقیاس‌بندی شده در مقایسه با داده‌های اصلی خیلی کمتر است. همچنین، واضح است که منحنی میانگین بر اساس \bar{S} و \bar{A} میانگین نفوذ مقیاس‌بندی شده را با α_S توصیف نمی‌کند (شکل ۳)، ولی در مقیاس‌بندی با α_A تقریباً منحنی میانگین نفوذ (بر اساس \bar{S} و \bar{A}) را توصیف می‌کند (شکل ۴).

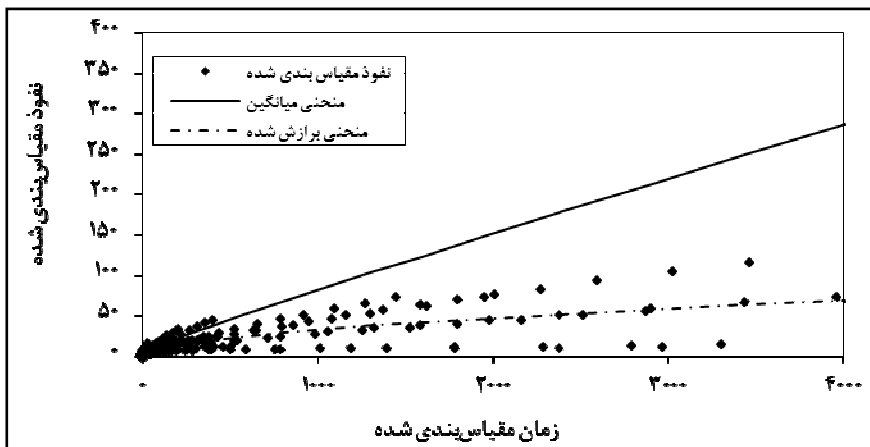
نقاط مقیاس‌بندی شده بر اساس α_A به اندازه خیلی کم بالای منحنی میانگین قرار می‌گیرد در حالی که در مقیاس‌بندی بر اساس α_S ، نقاط کاملاً در زیر منحنی میانگین قرار می‌گیرد (شکل ۳ و ۴). ماچیوال و همکاران (Machiwal et al., 2006) نیز شبیه این نتیجه را گزارش کرده‌اند با این تفاوت که در نتایجی که ارائه داده‌اند، مقادیر نفوذ مقیاس‌بندی بر اساس α_A کاملاً در بالای منحنی میانگین قرار می‌گیرد.

تطابق تقریبی نفوذ مقیاس‌بندی بر اساس α_A با منحنی میانگین در این پژوهش می‌تواند در تفاوت نوع آب کاربردی در اندازه‌گیری باشد. از آن‌جا که پساب دارای املاح است، این املاح می‌توانند تا اندازه‌ای باعث کاهش مقادیر فاکتور انتقال (A) شود (Amindin & Sepaskhah, 2011) و در نتیجه در مقدار فاکتور مقیاس‌بندی α_A مؤثر باشد.

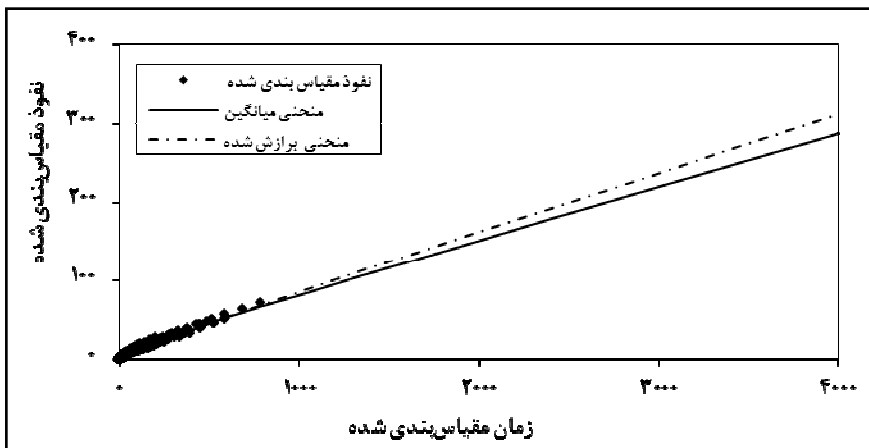
مقادیر SSE بر پایه منحنی‌های میانگین و خوب برازش شده (جدول ۶) اشاره دارد به این‌که مقیاس‌بندی

بیشترین همبستگی α_{opt} با α_A و پس از آن با α_{SA}^H و α_{SA}^G دیده می شود. مقایسه خصوصیات آماری به دست آمده برای فاکتور مقیاس بندی α_A (جدول ۷) با خصوصیات به دست آمده از تحقیقات ماچیوال و همکاران (Machiwal et al., 2006) برای آب معمولی نشان می دهد که تفاوت بارزی بین مقادیر میانگین ها و انحراف معیار و ضریب تغییرات وجود دارد. میانگین به دست آمده برای فاکتور مقیاس بندی α_A در آزمایش های ماچیوال و همکاران (Machiwal et al., 2006)، برابر ۰/۸۵۷ و در این پژوهش برای پساب تصفیه شده ۰/۸۹۶ است که این تفاوت می تواند ناشی از تعداد اندازه گیری ها و نوع آب کاربردی باشد.

میانگین و خوب برازش شده نشان می دهند (شکل ۶) و مقادیر SSE آن به طور معنی داری کاهش یافت. مقادیر α_{opt} به دست آمده (جدول ۵) نشان می دهد که به جز در نقاط ۳، ۵، و ۶، در بقیه نقاط α_{opt} بین α_S و α_A قرار می گیرد. بنابراین، داده های نفوذ با استفاده از میانگین های حسابی، هندسی، هارمونیک (به ترتیب α_{SA}^a ، α_{SA}^G ، و α_{SA}^H) به عنوان فاکتورهای مقیاس بندی، مقیاس بندی شدند. کاربرد α_{SA}^a در مقایسه با α_S کاهش قابل توجهی در SSE نشان داد (جدول ۶). با استفاده از α_{SA}^H و α_{SA}^G نیز در مقدار SSE کاهش دیده شد ولی با استفاده از α_{SA}^H نتایج بهتری به دست آمد. همه فاکتورهای مقیاس بندی به جز α_S همبستگی خوبی با α_{opt} دارند (جدول ۷) که



شکل ۳- نفوذ و زمان مقیاس بندی شده با استفاده از فاکتور مقیاس بندی α_S .



شکل ۴- نفوذ و زمان مقیاس بندی شده با استفاده از فاکتور مقیاس بندی α_A .

جدول ۵- فاکتورهای مقیاس بندی محاسبه شده از پارامترهای

α_{opt} و A و S فاکتور مقیاس بندی بهینه			
α_{opt}	α_S	α_A	نقاط اندازه گیری شده
۰/۵۴۲	۲/۷۰۵	۰/۲۵۳	۱
۰/۲۷۱	۰/۲۱۲	۰/۳۸۲	۲
۰/۳۱۳	۰/۴۶۵	۰/۵۱۷	۳
۰/۳۰۲	۰/۲۵۷	۰/۳۷۱	۴
۰/۴۷۶	۱/۰۶۴	۰/۶۴۶	۵
۰/۵۹۰	۱/۳۷	۰/۵۹۹	۶
۱/۶۰۴	۱/۴۴۱	۱/۶۲۷	۷
۰/۶۲۵	۰/۴۴۱	۰/۷۲۷	۸
۱/۱۴۹	۲/۶۱۹	۰/۸۸۹	۹
۰/۹۷۶	۱/۳۳۶	۰/۸۸۸	۱۰
۰/۹۳۱	۰/۴۴۰	۱/۰۸۸	۱۱
۱/۷۸۹	۲/۷۸۶	۱/۶۹۶	۱۲
۰/۹۰۱	۰/۴۷۷	۱/۰۵۵	۱۳
۰/۷۷۴	۰/۵۹۰	۰/۸۴۷	۱۴
۱/۵۸۲	۲/۰۶۱	۱/۵۲۷	۱۵
۰/۴۹۳	۰/۸۸۹	۰/۱۰۴	۱۶
۰/۹۱۲	۰/۸۷۶	۰/۹۲۴	۱۷
۱/۴۵۰	۲/۱۹۵	۱/۳۶۲	۱۸
۰/۸۶۱	۰/۲۰۷	۱/۱۳۲	۱۹
۰/۸۸۰	۰/۶۱۲	۰/۹۷۵	۲۰
۱/۳۰۶	۰/۶۴۹	۱/۴۴۳	۲۱
۰/۸۵۸	۰/۳۷۰	۱/۰۴۷	۲۲
۱/۳۳۱	۲/۹۷۸	۱/۰۹۳	۲۳
۱/۵۳۷	۱/۱۷۲	۱/۵۹۳	۲۴
۰/۵۰۷	۰/۶۴۳	۰/۴۰۰	۲۵
۱/۲۰۲	۰/۴۲۰	۱/۳۹۵	۲۶
۰/۵۳۸	۰/۷۹۹	۰/۳۳۷	۲۷
۰/۹۲۷	۰/۴۸۷	۱/۰۷۶	۲۸
۰/۶۷۷	۱/۱۲۹	۰/۴۴۶	۲۹
۰/۵۲۵	۲/۹۴۰	۰/۴۳۶	۳۰

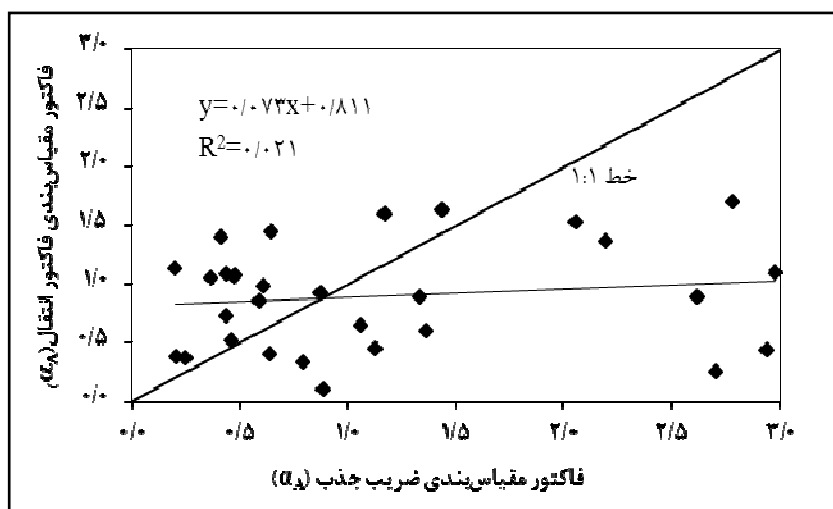
جدول ۶- جمع مربع خطاهای فاکتورهای مقیاس بندی به روش های مختلف و پارامترهای مقیاس بندی شده برای ضریب جذب و فاکتور انتقال خاک

پارامترهای نفوذ مقیاس بندی شده		SSE بر پایه منحنی برزاش شده	SSE بر پایه منحنی میانگین	فاکتور مقیاس بندی
A*	S*			
۰/۰۰۲	۰/۹۵۸	$3/67 \times 10^4$	$5/92 \times 10^5$	α_S
۰/۰۷۰	۰/۵۰۱	$1/10 \times 10^3$	$1/19 \times 10^3$	α_A
۰/۰۳۱	۰/۷۰۴	$1/10 \times 10^3$	$3/40 \times 10^4$	α_{SA}^a
۰/۰۳۶	۰/۷۸۰	$3/11 \times 10^3$	$1/25 \times 10^4$	α_{SA}^G
۰/۰۳۷	۰/۸۵۵	$1/69 \times 10^3$	$6/30 \times 10^3$	α_{SA}^H
۰/۰۶۱	۰/۶۳۶	$1/04 \times 10^3$	$1/04 \times 10^3$	α_{opt}

S^* ضریب جذب مقیاس بندی شده

A^* فاکتور انتقال مقیاس بندی شده

مقیاس بندی و بررسی تغییرات مکانی ویژگی های نفوذ...



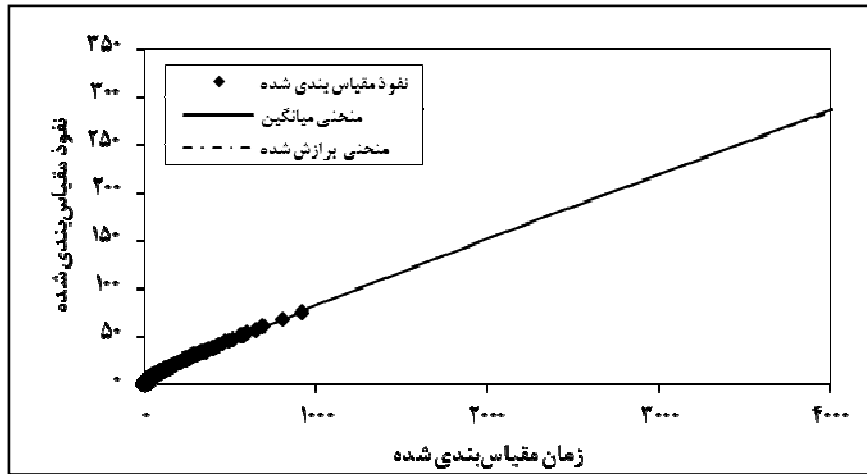
شکل ۵- رابطه بین فاکتور مقیاس بندی ضریب جذب و فاکتور مقیاس بندی فاکتور انتقال در منطقه مورد مطالعه.

جدول ۷- خصوصیات آماری فاکتورهای مقیاس بندی و همبستگی آن ها با فاکتور مقیاس بندی بهینه α_{opt} مربوط به کاربرد پساب و آب معمولی

خصوصیات آماری مربوط به کاربرد پساب					
ضریب همبستگی	میانگین هندسی	ضریب تغییرات	انحراف معیار	میانگین	فاکتور مقیاس بندی
۰/۴۱	۰/۸۵	۰/۸۹	۰/۸۹	۱/۱۵	α_S
۰/۹۲	۰/۷۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۸۹	α_A
۰/۷۴	۰/۸۹	۰/۵۱	۰/۵۳	۱/۰۲	α_{SA}^a
۰/۸۴	۰/۸۰	۰/۵۳	۰/۴۹	۰/۹۲	α_{SA}^G
۰/۸۶	۰/۷۲	۰/۵۷	۰/۴۸	۰/۸۴	α_{SA}^H
۱	۰/۷۹	۰/۴۷	۰/۴۲	۰/۸۹	α_{opt}

خصوصیات آماری مربوط به کاربرد آب معمولی (Machiwal et al., 2006)

ضریب همبستگی	میانگین هندسی	ضریب تغییرات	انحراف معیار	میانگین	فاکتور مقیاس بندی
۰/۷۷	۰/۵۳	۱/۱۴۳	۱/۶۲۲	۱/۴۱۹	α_{SA}^G
۰/۹۶	۰/۶۱	۰/۶۲۰	۰/۵۳۱	۰/۸۵۷	α_{SA}^H
۰/۸۸	۰/۷۱	۰/۸۷۷	۰/۹۹۸	۱/۱۳۸	α_{opt}
۰/۹۸	۰/۵۷	۰/۸۴۱	۰/۸۵۵	۱/۰۱۷	α_{SA}^G
۰/۹۴	۰/۴۵	۰/۸۱۶	۰/۷۵۳	۰/۹۲۳	α_{SA}^H
۱	۰/۵۳	۰/۶۸۷	۰/۶۰۳	۰/۸۷۸	α_{opt}



شکل ۶- نفوذ و زمان مقیاس بندی شده بر اساس α_{opt} .

تعداد نمونه با استفاده از رابطه ۱۸ به دست می آید:

$$N = X_{\alpha}^2 \sigma^2 / d^2 \quad (18)$$

تعداد مشاهدات در نمونه در سه سطح معنی داری ۹۵، ۹۰، و ۸۰ درصد و مقدار خطای ۵، ۱۰، و ۱۵ درصد در منطقه مورد مطالعه با استفاده از رابطه ۱۶ محاسبه شد (جدول ۸). نتایج نشان داد تعداد نمونه در α' و d های مختلف، بسیار متغیرند. همچنین، نشان داده شد که تعداد نمونه در این پژوهش (۳۰ اندازه گیری) با الزامات اندازه گیری $\alpha' = 0/1$ و $d = 0/15 \mu$ مطابقت دارد.

تعیین تعداد مشاهدات نمونه گیری

نمونه گیری، مشاهدات و آزمایش ها در مزرعه برای پژوهش نظری و کاربرد آن به منظور مطالعه روند تغییر پذیری مکانی خصوصیات نفوذ در خاک در مقیاس منطقه ای بسیار مهم است. به دلیل تغییر پذیری مکانی خاک، تعداد آزمایش های نفوذ نباید خیلی کم باشد و گرنه دقت پایین آمده و حتی اشتباه می شود، و همین طور نمی تواند خیلی زیاد باشد زیرا وقت گیر است. بنابراین، تعداد نمونه گیری منطقی باید با هدف معتبر بودن و مناسب بودن، مشخص شود.

جدول ۸- نتایج آماری نمونه گیری منطقی

$d=0/15 \mu$			$d=0/1 \mu$			$d=0/0.5 \mu$			α'
۰/۲	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲	۰/۱	۰/۰۵	
۱۹	۳۱	۴۳	۴۲	۶۹	۹۸	۱۶۷	۲۷۵	۳۹۱	تعداد نمونه برداری

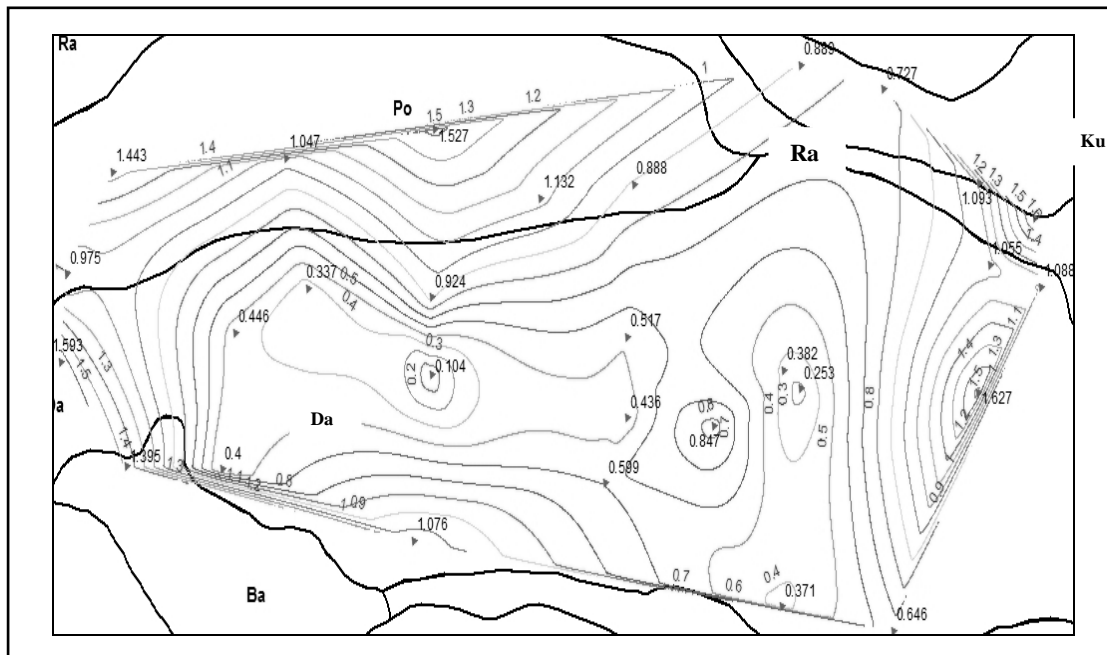
نقاط تحت پوشش به دست آورد. بدین منظور، با استفاده از نرم افزار ArcGIS با در نظر گرفتن مناسب ترین روش میان یابی، نقشه فاکتور مقیاس بندی α_A در منطقه مورد مطالعه رسم شد (شکل ۷). نتایج نشان می دهد که تغییر پذیری مکانی فاکتور مقیاس بندی α_A یک روند

بررسی تغییر پذیری مکانی فاکتور مقیاس بندی α_A با توجه به تحلیل های قبل مشخص شد که پارامتر α_A با روش مقیاس بندی به مدل نفوذ بهتر منطبق می شود. اگر روند تغییر پذیری مکانی فاکتور مقیاس بندی α_A مشخص شود، می توان پارامترهای نفوذ منطقه را از بسط

سری رامجردی، که نسبت به سری دانشکده و نمازی به مراتب رس کمتری دارد، نیز به همین ترتیب مقادیر بیشتری به خود می‌گیرد.

برای ارزیابی فاکتور مقیاس‌بندی پیش‌بینی شده با نرم‌افزار ArcGIS در منطقه مورد مطالعه، از مقادیر به دست آمده فاکتور مقیاس‌بندی α_A در ۳۰ مکان استفاده شد (جدول ۹). مقایسه بین فاکتورهای مقیاس‌بندی و اندازه‌گیری نشان داد که درصد خطای نسبی در بیشتر نقاط، بالا و میانگین خطا در ۲۷ نقطه، ۳۹/۱- است که این مقدار خطا منطقی نیست.

مشخص دارد. مقادیر α_A از مرکز منطقه مورد مطالعه به سمت اطراف در حال افزایش است و با دور شدن از مرکز، این مقدار افزایش می‌یابد. نگاهی به بافت خاک منطقه نشان می‌دهد که خاک اطراف، بیشتر از نوع لوم است (سری کوی اساتید و بمو) که درصد رس در آن‌ها به مراتب کمتر از بافت لوم‌رسی است (سری دانشکده و پمپ نمازی) و این موضوع ثابت می‌کند که مقدار رس خاک تأثیر زیادی در خصوصیات نفوذ خاک دارد (جدول ۱). بنابراین فاکتور مقیاس‌بندی α_A در این نواحی با کمتر شدن رس خاک، مقادیر بیشتری به خود می‌گیرد.



شکل ۷- نقشه فاکتور مقیاس‌بندی α_A در منطقه باجگاه.

Da: سری دانشکده، Po: سری نمازی، Ba: سری بمو، Ra: سری رامجردی، Ku: کوی اساتید

خوبی پیش‌بینی نکرده است (رابطه ۱۹). بالا بودن میانگین خطای به دست آمده بین داده‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده نیز نشان‌دهنده این موضوع است. این داده‌ها با خط یک به یک نیز مقایسه شدند. پراکندگی داده‌ها اطراف خط یک به یک نشان داد که تطابق مناسبی بین داده‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده وجود ندارد.

به منظور ارزیابی بیشتر فاکتور مقیاس‌بندی α_A ، مقایسه‌ای بین مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از تابع تحلیلی ArcGIS، به روش kriging، و مقادیر اندازه‌گیری شده با خط یک به یک در شکل ۸ نشان داده شده است. رابطه به دست آمده و تحلیل آماری نشان می‌دهد که نرم‌افزار ArcGIS فاکتور مقیاس‌بندی منطقه‌ای α_A را به

خاک از رگرسیون گیری چند متغیره با استفاده از نرم افزار Excel به صورت رابطه ۲۰ است.

$$\alpha_A = -164/67 d_g - 12/33 \sigma_g - 0/330 OM + 179/7 \quad (20)$$

$$r^2 = 0/34, \quad p(\text{Intercept}) = 0/24$$

$$p(d_g) = 0/25 \quad p(\sigma_g) = 0/35 \quad p(OM) = 0/23$$

پایین بودن r^2 نشان می دهد که علاوه بر میانگین و انحراف معیار هندسی، پارامترهای دیگر مثل رطوبت اولیه، رطوبت اشباع و یا چگالی ظاهری خاک بر فاکتور مقیاس بندی α_A مؤثرند که با قرار دادن آنها احتمالاً نتیجه بهتری به دست می آمد.

$$y = 0/115x + 0/817 \quad (19)$$

$$r^2 = 0/12, \quad SE = 0/45, \quad P = 0/57$$

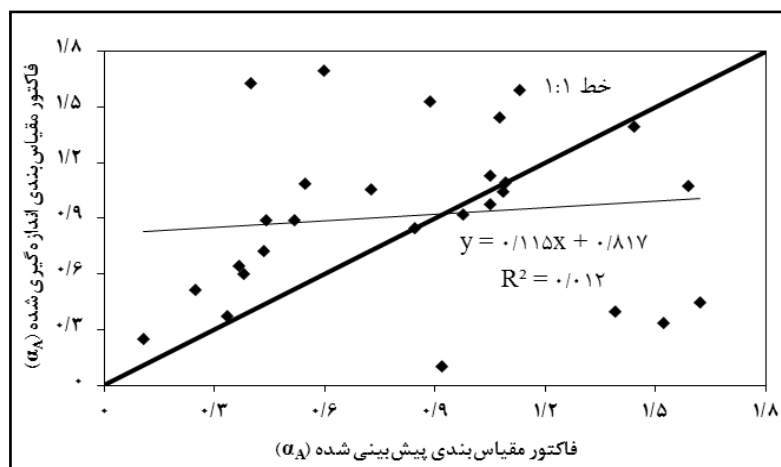
رابطه بین فاکتور مقیاس بندی α_A و میانگین و انحراف معیار هندسی ذرات خاک

از آن جا که فاکتور مقیاس بندی α_A بهترین فاکتور شناخته شد، بین این فاکتور و پارامترهای زودیاخت خاک رابطه ای به دست آمد تا علاوه بر دستیابی به رابطه ای ساده تر، اثر این پارامترها روی فاکتور مقیاس بندی بررسی شود. از این رو، با داشتن پارامترهای زودیاخت خاک (درصد رس، درصد سیلت، و درصد شن) از روابط ۱۷ و ۱۹، d_g و σ_g برای پنج سری خاک مورد مطالعه به دست آمد. رابطه بین پارامتر مقیاس بندی با d_g و σ_g و ماده آلی

جدول ۹- مقایسه بین فاکتور مقیاس بندی α_A اندازه گیری و پیش بینی شده با استفاده از نرم افزار ArcGIS.

شماره مکان ها	پیش بینی شده در ArcGIS	اندازه گیری شده	خطا (درصد)
۱	۰/۱۰	۰/۲۵۳	۵۸/۴
۲	۰/۲۵	۰/۵۱۷	۵۲
۳	۰/۳۳	۰/۳۷۱	۹/۷
۴	۰/۳۶	۰/۶۴۶	۴۳/۳
۵	۰/۳۷	۰/۵۹۹	۳۶/۸
۶	۰/۳۹	۱/۶۲۹	۷۵/۶
۷	۰/۴۳	۰/۷۲۷	۴۰/۲
۸	۰/۴۴	۰/۸۸۹	۵۰/۴
۹	۰/۵۱	۰/۸۸۸	۴۱/۹
۱۰	۰/۵۴	۱/۰۸۸	۴۹/۸
۱۱	۰/۵۹	۱/۶۹۶	۶۴/۹
۱۲	۰/۷۲	۱/۰۵۵	۳۱/۲
۱۳	۰/۸۴	۰/۸۴۷	۰/۳۰
۱۴	۰/۸۸	۱/۵۲۷	۴۱/۹
۱۵	۰/۹۱	۰/۱۰۴	-۷۸۳/۶
۱۶	۰/۹۷	۰/۹۲۴	-۵/۵
۱۷	۱/۰۵	۰/۱۳۲	۷/۳
۱۸	۱/۰۵	۰/۹۷۵	-۷/۶
۱۹	۱/۰۷	۱/۴۴۳	۲۵/۶
۲۰	۱/۰۸	۱/۰۴۷	-۳/۸
۲۱	۱/۰۹	۱/۰۹۳	-/۰
۲۲	۱/۱۳	۱/۵۹۳	۲۹/۰
۲۳	۱/۳۹	۰/۴۰۰	-۲۴۷/۷
۲۴	۱/۴۴	۱/۳۹۵	-۳/۳
۲۵	۱/۵۲	۰/۳۳۷	-۳۵۱/۴
۲۶	۱/۵۸	۱/۰۷۶	-۴۷/۷
۲۷	۱/۶۲	۰/۴۴۶	-۲۶۳/۴
			-۳۹/۱

مقدار میانگین خطا



شکل ۸- مقایسه بین فاکتور مقیاس‌بندی (α_A) پیش‌بینی شده در روش Kriging و اندازه‌گیری شده.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به تحلیل تغییرپذیری مکانی فرآیند نفوذ با استفاده از پساب تصفیه شده در زمین‌های دانشکده کشاورزی شیراز واقع در باجگاه پرداخته شده است. ۳۰ اندازه‌گیری به صورت تصادفی در منطقه‌ی مورد مطالعه با استفاده از استوانه‌های دوگانه انجام گرفت. داده‌های نفوذ مشاهده شده از مکان‌های آزمایشی با مدل فیلیپ برازش شد. مشخص شد که سرعت نفوذ پایه خاک در اغلب مکان‌ها کم است (میانگین $0/0619$ سانتی‌متر در دقیقه) و از $0/001$ تا $0/178$ سانتی‌متر در دقیقه تغییر می‌کند. پارامترهای مدل نفوذ در پنج نقطه از ۳۰ مکان، منفی به دست آمد که نشان‌دهنده ناهمگنی خاک و یکنواخت نبودن رطوبت خاک عمقی در آن نقاط است. رابطه بین پارامترهای مدل فیلیپ (S و A) معنی‌دار نشد (ضریب همبستگی $r=0/21$). پارامترهای مدل فیلیپ (S و A) از طریق فاکتورهای α_S و α_A مقیاس‌بندی شدند. بر اساس مجموع مربع خطاها (SSE) برای منحنی‌های میانگین و خوب برازش شده، مشخص شد که مقیاس‌بندی با α_A بهتر است. تفاوت بین فاکتورهای مقیاس‌بندی (α_S و α_A) معنی‌دار شد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که چون بافت خاک‌ها با هم متفاوت‌اند،

شرایط محیط متشابه در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد. فاکتورهای مقیاس‌بندی با کاهش مجموع مربع خطاها بهینه شد و فاکتور مقیاس‌بندی بهینه α_{opt} برای مقیاس‌بندی به دست آمد. پارامترهای مقیاس‌بندی شده ضرایب مدل فیلیپ (S و A) به روش حداقل مربعات (Solver) برای منحنی خوب برازش شده، به داده‌های مقیاس‌بندی شده با α_{opt} به ترتیب $0/636$ و $0/061$ به دست آمد. داده‌های نفوذ همچنین بر اساس سه میانگین (حسابی، هندسی، و هارمونیکی) فاکتورهای مقیاس‌بندی α_S و α_A مقیاس‌بندی شدند. فاکتورهای مقیاس‌بندی جز α_S همبستگی نسبتاً خوبی با α_{opt} داشتند و همبستگی بیشتر (ضریب همبستگی $r=0/925$) با فاکتور مقیاس‌بندی α_A به دست آمد. تعداد مشاهدات در نمونه با استفاده از روش آماری در سه سطح معنی‌داری و سه میزان خطا محاسبه شد و نتایج نشان داد که این مقادیر بسیار متغیرند و همچنین تعداد مشاهدات در نمونه‌های این پژوهش (۳۰ عدد) با سطح معنی‌داری $\alpha' = 0/1$ و $d = 0/15 \mu$ مطابقت دارد.

با توجه به این‌که فاکتور مقیاس‌بندی α_A بهترین فاکتور برای مقیاس‌بندی شناخته شد، روند تغییرپذیری مکانی آن در منطقه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS مورد

مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که این فاکتور در منطقه روند مشخصی دارد و از مرکز منطقه به سمت اطراف، افزایش می‌یابد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقدار رس خاک از مرکز به سمت خارج رو به کاهش است و این کاهش تأثیری بسزا در خصوصیات نفوذ خاک دارد. اما محاسبه مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و مقایسه آن با داده‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهد که این نرم‌افزار تحلیل تغییرپذیری مکانی خوبی نداشته است. همچنین، رابطه‌ای بین فاکتور مقیاس‌بندی α_A و میانگین و انحراف معیار هندسی ذرات خاک به دست آمد. پایین بودن r^2 در این رابطه نشان می‌دهد که علاوه بر میانگین و انحراف معیار هندسی ذرات خاک، پارامترهای دیگری نیز بر فاکتور مقیاس‌بندی مؤثرند. اگر این پارامترها در رابطه وارد می‌شدند ممکن بود رابطه بهتری به دست آید که بتوان از آن برای تخمین فاکتور مقیاس‌بندی استفاده کرد.

مراجع

- Ahuja, L. R., Kozak, J. A., Andales, A. A. and Ma, L. 2007. Scaling parameters of the Lewis-Kostiakov water infiltration equation across soil textural classes and extension to rain infiltration. T. ASABE. 50(5): 1525-1541.
- Amindin, E. and Sepaskhah. A. R. 2011. Effects of treated waste water on hydraulic conductivity, hydraulic diffusivity and soil water retention curve. Research Project Report. Irrigation Department. Shiraz University. Shairaz. Iran. (in Farsi)
- Bonsu, M. 1997. Scaling infiltration using parameters of Philip infiltration equation. J. App. Sci. Technol. 2(1-2): 1-6.
- Bouwer, H., Back, J. T. and Oliver, J. M. 1999. Predicting infiltration and ground-water mounds for artificial recharge. J. Hydrol. Eng. 4(4): 350-357.
- Green, W. H. and Ampt, G. A. 1911. Studies of soil physics: I. Flow of air and water through soils. J. Agric. Sci. 4(1): 1-24.
- Hassan-Li, A. M. and Javan, M. 2005. Evaluation of municipal treated wastewater and its application in landscape (Case study: Marvdasht wastewater treatment plant). J. Environ. Study. 38, 23-30. (in Farsi)
- Holtan, H. N. 1961. A Concept for Infiltration Estimates in Watershed Engineering. U. S. Department of Agriculture (USDA). Agricultural Research Service. Bulletin 41-51.
- Horton, R. E. 1940. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 5, 399-417.
- Kostiakov, A. N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for the purposes of amelioration. Transactions of 6th Congress of Inter-national Society of Soil Science. Moscow. Russian. 17-21.
- Lei, Z. D., Yang, S. X. and Xie, S. C. 1986. One-step method of scaling the soil hydraulic properties in the field. J. Hydraulic Eng. 12, 1-10.
- Machiwal, D., Madan, K. J. and Mal, B. C. 2006. Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India. Biosyst. Eng. 95(4): 569-582.
- Miller, E. E. and Miller, R. D. 1956. Physical theory for capillary flow phenomena. J. Appl. Phys. 27, 324-332.

- Nielsen, D. R., Hopmans, J. W. and Reichardt, K. 1998. An Emerging Technology for Scaling Field Soil-Water Behavior. In: Sposito, G. (Ed.) Scale Dependence and Scale Invariance in Hydrology. Cambridge University Press. Cambridge. U. K.
- Philip, J. R. 1957. The theory of infiltration-3: moisture profiles and relation to experiment. *Soil Sci.* 84(2): 163-178.
- Philip, J. R. 1987. The infiltration joining problem. *Water Resour. Res.* 23(12): 2239-2245.
- Rasoulzadeh, A. and Sepaskhah, A. R. 2003. Scaled infiltration equations for furrow irrigation. *Biosyst. Eng.* 86(3): 375-383.
- Sepaskhah, A. R. 1996. Application of three points Philip equation in estimation of saturated hydraulic conductivity. Second National Congress on Soil and Water Issues. Tehran. Iran (in Farsi)
- Sharma, M. L., Gander, G. A. and Hunt, C. G. 1980. Spatial variability of infiltration in a watershed. *J. Hydrol.* 45(1-2): 101-122.
- Shirazi, M. A. and Boersma, L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48(1): 142-147.
- Talsma, T. 1969. In situ measurement of sorptivity. *Aust. J. Soil Res.* 7, 269-276.
- Tillotson, P. M. and Nielsen, D. R. 1984. Scale factors in soil science. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48(5): 953-959.
- Warrick, A. W. and Nielsen, D. R. 1980. Spatial variability of Soil Physical Properties in the Field. In: Hillel, D. (Ed.) *Applications of Soil Physics*. Academic Press. New York.
- Warrick, A. W., Mullen, G. J. and Nielsen, D. R. 1977. Prediction of the soil-water flux based upon field-measured soil-water properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41(1): 4-19.

Spatial Variability of Infiltration Characteristics at Watershed Scale: A Case Study of Bajgah Plain

F. Mehrabi* and A. R. Sepaskhah

* Corresponding Author: M. Sc. Irrigation and Drainage Engineering. Shiraz University, College of Agriculture, Department of Water Engineering. Bajgah, Shiraz, Iran. E-mail: mehrabi_223@yahoo.com

Received: 11 March 2012, Accepted: 8 September 2012

Study of the spatial variability of infiltration characteristics is essential to estimating infiltration parameters on a local scale. The objectives of the present study were to scale the parameters of a Philip two-term model for infiltration and survey the variability of infiltration characteristics geostatistically using wastewater in the Bajgah catchment. Infiltration was measured at 30 points in a random pattern over the study area using double rings. Infiltration characteristics in the area showed a low basic infiltration rate for most sites ($0.001\text{-}0.178\text{ cm/min}^{-1}$). The Philip infiltration model, the best model to describe infiltration characteristics, was fitted to the data. The parameters (sorptivity, hydraulic conductivity) showed wide variation across the sites. The sorptivity-based scaling factor (α_s) and the hydraulic-based scaling factor (α_A) were computed and the observed infiltration data were scaled based on these values. Results showed that scaling achieved using α_A was better than that obtained using α_s . The optimum scaling factors (α_{opt}) were determined using the least squares method (Solver option) and scaling was repeated using α_{opt} . Scaling factors based on the arithmetic, geometric and harmonic means of α_s and α_A were also computed. It was found that α_{opt} and α_A scaled the infiltration data more effectively (with lowest sum of squares error) than the other scaling factors. The results showed that the study area has high spatial variability. A map of α_A developed using ArcGIS software showed that α_A increased from the center to the surrounding areas as soil clay content decreased.

Keywords: Hydraulic Conductivity, Philip Model, Scaling Factor, Sorptivity, Spatial Variability