

## کاربرد مدل‌سازی سری زمانی در پیش‌بینی نفوذ در بافت‌های مختلف خاک

شفیعه وزیرپور<sup>1</sup> - حامد ابراهیمیان<sup>2\*</sup> - حامد رفیعی<sup>3</sup> - فرهاد میرزایی اصل شیرکوهی<sup>4</sup>

تاریخ دریافت: 1393/04/20

تاریخ پذیرش: 1393/12/25

### چکیده

نفوذپذیری یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار در آبیاری است. به همین دلیل اندازه‌گیری و برآورد نفوذ اهمیت ویژه‌ای دارد. تحلیل سری‌زمانی یک روش کارآمد و ساده برای پیش‌بینی است، که در علوم مختلف به صورت گسترده استفاده شده است. در این مطالعه قابلیت سری‌زمانی در برآورد میزان نفوذ تجمعی در بافت‌های مختلف خاک بررسی شد. برای این منظور از داده‌های آزمایش نفوذسنج استوانه‌ای متحدالمرکز در دشت لالی خوزستان به مدت 60 و 120 دقیقه (با فواصل زمانی پیشنهادی برای این آزمایش) استفاده و پیش‌بینی تا انتهای آزمایش نفوذ انجام شد. همچنین در این تحقیق با استفاده از ضرایب پیشنهادی معادله کوستیاکوف-لوتیس توسط سازمان NRCS، داده‌های نفوذ تجمعی به مدت 24 ساعت برای مدل‌سازی سری‌زمانی برای شش بافت مختلف خاک استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل‌های سری‌زمانی  $ARX(p,x)$  و  $ARMAX(p,q,x)$  با درجات متفاوت 1، 2، 3 در خاک‌های مختلف سبک، متوسط و سنگین میزان نفوذ تجمعی را برای طول مدت آزمایش نفوذ به خوبی پیش‌بینی کرد. همچنین نتایج استفاده از نفوذ تجمعی به مدت 24 ساعت نشان داد که خطای استاندارد برای تخمین نفوذپذیری خاک از 2 تا 21 درصد برای بافت‌های مختلف خاک متغیر بود. تقریباً همبستگی کاملی بین داده‌های تخمینی و واقعی حاصل شد. همچنین با استفاده از مدل‌سازی سری‌زمانی امکان کاهش مدت زمان آزمایش نفوذسنج استوانه‌ای از چهار ساعت به یک ساعت در خاک‌های مختلف وجود دارد که منجر به کاهش هزینه‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** آزمایش استوانه مضاعف، سری‌زمانی، معادله کوستیاکوف-لوتیس، همبستگی

### مقدمه

این گونه معادلات می‌باشد (9). معادلات فیزیکی جزئیات نفوذ را نسبت به معادلات تجربی بهتر نشان می‌دهند (9). تغییرات مکانی خاک سبب تغییرات بسیار زیادی در نفوذپذیری خاک می‌گردد (10). از آن جا که ویژگی‌های خاک دارای تغییرات پیوسته زمانی و مکانی است، تعمیم نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری خالی از اشکال نخواهد بود.

نحوی‌نیا و همکاران (12) به پیش‌بینی متوسط میزان نفوذ در آبیاری جویچه‌ای توسط مدل‌های شبکه عصبی و عصبی-فازی به‌عنوان مدل‌های تجربی و مدل رگرسیونی به‌عنوان مدل آماری با استفاده از رطوبت اولیه‌ی خاک و دبی ورودی جویچه در شش مزرعه آزمایشی با بافت‌های مختلف پرداختند. دقت مدل رگرسیونی در خاک‌های سنگین بافت در مقایسه با خاک‌های متوسط و سبک بافت بیشتر بود. مدل شبکه‌های عصبی در خاک‌های متوسط دقت مناسبی و در خاک‌های سنگین تمایل به بیش برآورد داشت. در مطالعات صورت گرفته در زمینه کاربرد تحلیل سری‌های زمانی در رشته‌های مختلف علوم مانند ژئوفیزیک، اقتصاد، مهندسی، ارتباطات، هواشناسی و اقلیم‌شناسی، توانمندی این تکنیک اثبات شده است تجزیه و تحلیل

نفوذ آب به خاک به عنوان فرآیند اولیه ورود آب از سطح خاک به داخل ناحیه غیراشباع خاک می‌باشد. این فرآیند نقشی بسیار مهم در چرخه آبی طبیعت ایفا می‌نماید. نفوذ آب به خاک مهم‌ترین منبع تامین کننده آب برای ادامه حیات گیاهان می‌باشد (21). اهمیت فرآیند نفوذ سبب گردیده است معادلات فیزیکی و تجربی گوناگونی به منظور کمی نمودن آن ارائه گردد (1 و 21). از آن جا که فرضیه‌ها و پارامترهای به کار رفته در هر یک از این معادلات باهم متفاوت است، بنابراین کارایی هر یک به فرضیه‌های به کار رفته در استخراج آن‌ها و دسترسی به داده‌های مورد نیاز هر یک از این معادلات محدود می‌گردد (19). تأثیر گرفتن از شرایط زمانی، مکانی و نارسایی پارامترهای معادلات در تبیین مفاهیم فیزیکی از نقص‌های عمده

1، 2 و 4- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، استادیار و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران  
(\*)-نویسنده مسئول: (Email: ebrahimian@ut.ac.ir)  
3- استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه تهران

لازم است که از داده‌های جمع آوری شده معادلات نفوذ استخراج شود، که از این معادلات برای تخمین نفوذ آب در خاک در زمان بیش از زمان آزمایش نفوذ استفاده می‌شود. اهمیت نفوذپذیری خاک سبب می‌شود که طراحان و محققین وقت و هزینه زیادی را برای تخمین آن صرف کنند، قبل از اینکه بتوانند وارد مرحله طراحی سیستم‌های آبیاری گردند. از طرف دیگر مطالعات محدودی به بررسی مدل‌سازی سری زمانی در برآورد نفوذپذیری خاک پرداختند. بنابراین در این مطالعه، قابلیت مدل‌سازی سری زمانی در پیش‌بینی نفوذ در بافت‌های مختلف خاک و امکان کاهش مدت زمان انجام آزمایش نفوذ و پیش‌بینی نفوذ توسط مدل‌سازی سری زمانی مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### نفوذ

تاکنون روش استوانه مضاعف رایج ترین روش برای اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک بوده است (22). در آزمایش نفوذ به روش استوانه مضاعف، مطابق با استاندارد ASTM D3385-03 (2) از دو استوانه فلزی به ارتفاع حدود 50 سانتی متر و قطر 30 و 60 سانتی متر استفاده می‌شود. فواصل زمانی اندازه‌گیری نفوذ در این آزمایش ابتدا کم و با گذشت زمان فواصل اندازه‌گیری افزایش می‌یابد، تناوب اندازه‌گیری‌ها باید با سرعت نفوذ آب در خاک تناسب داشته باشد. برای بیشتر خاک‌ها فواصل زمانی 5، 10، 20، 30، 45، 60، 90، 120 دقیقه و سپس در هر ساعت ارقام خوبی از نفوذ به دست می‌دهد. پایان آزمایش نفوذ در خاک‌های سنگین بافت معمولاً 4 ساعت و در خاک‌های متوسط و سبک بافت کمی کمتر می‌باشد.

یکی از معادلات کاربردی و نسبتاً ساده به کار رفته در آبیاری سطحی برای برآورد میزان نفوذ معادله کوستیاکوف-لوئیس است (8). معادله نفوذ کوستیاکوف-لوئیس به شکل زیر می‌باشد:

$$I = Kt^a + f_0t \quad (1)$$

که در آن I نفوذ تجمعی، t زمان و a ضرایب معادله نفوذ (بی بعد) و  $f_0$  شدت نفوذپذیری نهایی می‌باشد. در جدول 1 ضرایب معادله کوستیاکوف-لوئیس برای آبیاری سطحی طبق مقادیر پیشنهادی سازمان NRCS برای شش بافت خاک ارائه شده است (24). علیرغم این که معادلات فیزیکی جزئیات نفوذ را نسبت به معادلات تجربی بهتر نشان می‌دهند ولی به دلیل رایج بودن استفاده از معادله کوستیاکوف-لوئیس و نتایج مناسب و قابل قبول این معادله بهره‌گیری آن در طرح‌های آبیاری، در این مطالعه نیز از این معادله استفاده شد.

در این مطالعه امکان کاهش زمان آزمایش نفوذ استوانه مضاعف به یک و دو ساعت و برآورد نفوذ تا پایان آزمایش بر اساس الگوهای

سری‌های زمانی دو هدف را دنبال می‌کند. درک و مدل‌سازی ساز و کار تصادفی که منجر به رخداد مشاهدات یک سری می‌شود، و پیش‌بینی مقادیر آینده سری که بر مبنای گذشته آن صورت می‌گیرد. محققان مختلفی از سری زمانی برای تحلیل و پیش‌بینی پارامترهای مختلف در زمینه مهندسی آب استفاده نمودند. اسپچوانکل و همکاران (18) با انجام آزمایش نفوذ در جویچه با انتهای بسته از روش تحلیل سری زمانی برای تعیین ساختار زمانی و مکانی اطلاعات نفوذ و توسعه روشی برای پیش‌بینی طولانی مدت نفوذ با استفاده از اندازه‌گیری دوره‌های کوتاه مدت نفوذ در مزرعه استفاده کردند. تحلیل سری زمانی حداقل همبستگی مکانی را برای ویژگی‌های نفوذ فواصل انتخابی 5 متر را در طول جویچه نشان داد. روش سری زمانی در پیش‌بینی نفوذ در جویچه مناسب معرفی شد. تاکنون از روش سری زمانی برای پیش‌بینی ویژگی‌های خاک کمتر استفاده شده است و مطالعات محدودی در این زمینه صورت گرفته است. پولیدوکالوو و همکاران (16) از مدل ARIMA و شبکه عصبی برای پیش‌بینی نیاز روزانه آبیاری استفاده کردند. داده‌های مورد استفاده اطلاعات نیاز آب آبیاری برای سال‌های 1988 و 1989 به صورت روزانه بود. نتایج پیش‌بینی شبکه عصبی بهتر از سری زمانی گزارش شد. زو و همکاران (26) با استفاده از نوترون پروب و حسگرهای هدایت الکتریکی در عمق‌های مختلف رطوبت خاک و شوری خاک را به صورت ماهانه و در شش سال اندازه‌گیری کردند و با استفاده از مدل شبکه عصبی و سری زمانی مقادیر آینده رطوبت و شوری را به دست آوردند. از میان مدل‌های مختلف سری زمانی، مدل ARIMA بهترین مدل برای پیش‌بینی شوری و رطوبت خاک تشخیص داده شد. نتایج مدل ARIMA برای لایه سطحی خاک بهتر از شبکه عصبی و با افزایش عمق نتایج شبکه عصبی بهتر از سری زمانی بود. ناصری و همکاران (13) امکان مدل‌سازی نفوذ توسط تکنیک سری زمانی بر اساس داده‌های تجربی به دست آمده از اندازه‌گیری نفوذ در 56 شیار مسدود شده را مورد بررسی قرار دادند. برای مدل‌سازی نفوذ تجمعی مدل الگوی خودرگرسیون میانگین متحرک انباشته ARIMA(p,d,q) بکار گرفته شد. نتایج آن‌ها نشان داد که عملکرد مدل‌سازی سری زمانی بهتر از معادله‌های معمول مورد استفاده برای توصیف نفوذ در جویچه مانند معادله کوستیاکوف بود. لازم به ذکر است در مطالعات پدیده‌های مختلف کاربرد روش سری زمانی کارآمد و مناسب تشخیص داده شده است و امکان بهره‌گیری از این روش در پدیده‌های مختلف وجود دارد.

در طرح‌های آبیاری و زهکشی برای اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، منطقه مورد مطالعه شبکه‌بندی می‌گردد. معمولاً برای اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک از روش استوانه مضاعف در هر شبکه استفاده می‌شود. زمان آزمایش با توجه به نوع خاک ممکن است تا چهار ساعت ادامه پیدا کند. به علاوه بعد از اندازه‌گیری نفوذ

سری زمانی بررسی شد.

(1) تا دو ساعت ابتدایی از معادله کوستیاکوف-لوییس استخراج و سپس میزان نفوذ برای 22 ساعت بعد پیش‌بینی گردید.

جدول 1- ضرایب معادله کوستیاکوف-لوییس برای شش بافت خاک

Table 1- Kostiakov-Lewis equation coefficients for six soil textures

بافت خاک Soil texture	a (-)	k (cm/min <sup>a</sup> )	f <sub>0</sub> (cm/min)
رسی Clay	0.198	0.2888	0.0121
لومی رسی Clay loam	0.334	0.5217	0.0300
سیلتی Silt	0.385	0.5768	0.0372
لومی سیلتی Silty loam	0.409	0.5992	0.0406
لومی شنی Sandy loam	0.468	0.6484	0.0490
شنی Sand	0.537	0.6957	0.0551

### سری زمانی

در سری‌های زمانی ویژگی مهم این است که معمولاً مشاهدات متوالی مستقل نیستند و دقیقاً این وابستگی است که بررسی شده و مدل می‌شود. برای بررسی این وابستگی از تابع خود همبستگی و تابع خود همبستگی جزئی استفاده گردید.

خود همبستگی در تاخیر k عبارت است از همبستگی بین مشاهداتی که k واحد زمانی با یکدیگر فاصله دارند. تابع خود همبستگی نظری را  $\rho_k$  با نشان داده، و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\rho_k = \frac{\text{cov}(x_t, x_{t+k})}{\text{var}(x_t)} \quad (2)$$

همبستگی بین  $x_t$  و  $x_{t+k}$  بعد از حذف اثر متغیرهای  $x_{t+1}, \dots, x_{t+k-1}$  را ضریب خود همبستگی جزئی می‌نامند (20).

در این مطالعه، جهت بررسی پایایی متغیرها از آزمون دیکی-فولر<sup>1</sup> (4) و آزمون فیلیپس و پرون<sup>2</sup> (15) استفاده شد. یک متغیر سری زمانی وقتی ایستا است که میانگین، پراش و ضریب خود همبستگی آن در طول زمان ثابت باقی بماند. معمولاً برای تخمین الگوی سری زمانی، از روش باکس-جنکینز استفاده شد که دارای چهار مرحله شناسایی، تخمین، کنترل تشخیصی و پیش‌بینی می‌باشد (3). مدل‌های سری زمانی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت در زیر بیان شده است:

### الگوی خودرگرسیون (Autoregressive (AR))

اگر متغیر وابسته یا متغیر مورد نظر برای پیش‌بینی  $Y_t$  باشد، آنگاه فرآیند خودرگرسیون در حالت کلی به صورت رابطه زیر خواهد بود (5):

$$(Y_t - \delta) = a_1(Y_{t-1} - \delta) + a_2(Y_{t-2} - \delta) + \dots + a_p(Y_{t-p} - \delta) + U_t \quad (3)$$

که در آن  $Y_t$  یک فرآیند خودرگرسیون مرتبه p،  $AR(p)$  است. به عبارت دیگر، متغیر  $Y_t$  از فرآیند خودرگرسیون مرتبه p پیروی می‌کند. در رابطه فوق،  $\delta$  میانگین  $Y$  و  $U_t$  جمله اخلاص خالص (باقیمانده تصادفی) است.

### الگوی میانگین متحرک (Moving Average (MA))

فرآیند میانگین متحرک در پیش‌بینی الگوی‌های سری زمانی به‌طور گسترده استفاده می‌شود. این الگو به‌صورت رابطه زیر است

برای این منظور از نتایج آزمایش نفوذ به روش استوانه مضاعف در سه نوع خاک با بافت سنگین، متوسط و سبک با فواصل زمانی پیشنهادی برای این آزمایش (0، 1، 3، 5، 10، 15، 20، 30، 45، 60، 80، 100، 120، 180، 210، 240 دقیقه) در دشت لالی خوزستان در سال 1382 استفاده شد (23). منظور از بافت‌های سبک، متوسط و سنگین به ترتیب خاک‌های شنی، لومی و رسی بود و در هر کلاس یک نمونه استفاده شد. از میزان نفوذ جمععی، یک بار داده‌های تا 60 دقیقه ابتدایی و بار دیگر تا 120 دقیقه ابتدایی برای مدل‌سازی سری زمانی استفاده و مقادیر نفوذ برای مدت زمان باقی‌مانده تا انتهای آزمایش پیش‌بینی شد. پایان آزمایش نفوذ در برای خاک سنگین بافت 240 دقیقه و برای متوسط و سبک بافت 210 دقیقه بود. با توجه به این که مدت زمان آزمایش نفوذ که 240 و 210 دقیقه بود و برای اینکه خصوصیات نفوذ در ابتدای آزمایش نشان داده شود و مدل‌سازی به خوبی صورت گیرد 60 و 120 دقیقه ابتدایی نفوذ برای مدل‌سازی سری زمانی در نظر گرفته شد. در مدل‌سازی سری زمانی هرچه فواصل اندازه‌گیری کمتر و تعداد داده‌های ورودی بیشتر باشد نتایج مطلوب تری حاصل می‌شود. مثلاً اگر آزمایش نفوذ با فواصل زمانی ثابت و کوتاه، انجام شود و آن داده‌ها برای مدل‌سازی استفاده گردد مطمئناً نتایج بهتر و دقیق‌تر خواهد بود. با توجه به اینکه یکی از اهداف بررسی کاهش مدت زمان آزمایش نفوذ بود از همان فواصل پیشنهادی این آزمایش برای مدل‌سازی استفاده شد.

در این تحقیق علاوه بر استفاده از داده‌های آزمایش استوانه مضاعف، از ضرایب معادله کوستیاکوف-لوییس (پیشنهاد شده توسط NRCS برای آبیاری سطحی، جدول 1) برای استخراج منحنی نفوذ جمععی تا 24 ساعت برای شش بافت خاک استفاده شد و سپس منحنی نفوذ جمععی برای توسعه و ارزیابی مدل‌سازی سری زمانی استفاده گردید. میزان نفوذ در فواصل زمانی پیشنهاد شده برای آزمایش نفوذ به روش استوانه مضاعف برای شش بافت خاک (جدول

1- Dickey – Fuller Test  
2- Philips And Perron

(17)

جمله خود رگرسیون و  $q$  مرتبه جمله میانگین متحرک باشد (به عبارت دیگر شامل  $p$  مرتبه جمله با وقفه از متغیر وابسته و  $q$  مرتبه جمله با وقفه از جملات اخلاخل باشد). همچنین اگر یک سری زمانی پس از  $d$  مرتبه تفاضل گیری ساکن و سپس توسط فرآیند خودرگرسیون مدل سازی شود، سری زمانی دارای فرآیند  $ARMA(p,q)$  است (5).

$$y_t = \mu + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + U_t - \theta_1 U_{t-1} - \theta_2 U_{t-2} - \dots - \theta_q U_{t-q}$$

برون نمونه ای و خطای درون نمونه ای و شاخص شوارتز بهترین مدل شناسایی شد. در مرحله چهارم جز خطا مورد آزمون پایایی قرار گرفت و بهترین مدل انتخاب شد. در مرحله آخر پیش بینی توسط بهترین مدل صورت گرفت.

برای ارزیابی قابلیت مدل سازی نفوذ به روش سری زمانی از ضریب تعیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای استاندارد (SE) استفاده شد.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (10)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [O_i - P_i]^2} \quad (11)$$

در این آماره ها  $O_i$  مقدار مشاهده شده پارامتر مورد نظر،  $\bar{O}$  متوسط مقادیر مشاهده شده،  $P_i$  مقدار پیش بینی شده پارامتر مورد نظر،  $\bar{P}$  متوسط مقادیر پیش بینی شده و  $n$  تعداد اندازه گیری ها می باشد.

## نتایج و بحث

شکل 1 منحنی نفوذ تجمعی در سه بافت سبک، متوسط و سنگین خاک در دشت لالی خوزستان را نشان می دهد که نفوذ تجمعی در بافت سبک بیشتر از بافت های متوسط و سنگین خاک بود. به دلیل پایایی داده های نفوذ مورد استفاده برای مدل سازی، نیازی به برآورد الگوی ARIMA نبوده و به جای آن الگوی ARMA استفاده شد. ضمناً به دلیل استفاده از متغیر زمان در الگوهای مورد نظر، الگوی ARMA به ARMAX تبدیل شد. نتایج

$$Y_t = \mu + \beta_0 U_t + \beta_1 U_{t-1} + \beta_2 U_{t-2} + \dots + \beta_q U_{t-q} \quad (4)$$

در رابطه فوق؛  $\mu$  مقدار ثابت و  $U$  جمله اخلاخل است. در الگوی فوق  $Y_t$  از فرآیند  $MA(q)$  پیروی می کند.

## الگوی خود رگرسیون میانگین متحرک (Autoregressive Moving Average (ARMA))

به طور کلی فرآیندی را  $ARMA(p,q)$  گویند که شامل  $p$  مرتبه به طور کلی یک مدل عمومی  $ARMA(p,q)$  عبارت است از:

$$(5)$$

در رابطه فوق  $\mu$  مقدار ثابت،  $U$  جمله اخلاخل،  $\phi$  و  $\theta$  ضرایب معادله است.

موقعی که سری زمانی یک پدیده نتواند ویژگی های خود را بخوبی توصیف کند و یا به عبارت دیگر با تجزیه و تحلیل سری زمانی متغیر نتوان آن پدیده را توصیف نمود، می توان از مدل های سری زمانی همراه با متغیر خارجی ( $x$ ) استفاده نمود. مدل خودرگرسیونی میانگین متحرک انباشته  $ARIMAX(p, d, q, x)$ ، مدل توسعه یافته ARIMA است که با استفاده از رگرسیون خطی متغیر برونزا توصیف بهتر پدیده را امکان پذیر می سازد. مدل  $AR(p, x)$  نیز مدل توسعه یافته AR است که با استفاده از متغیر  $x$  فرآیند خود رگرسیونی حاکم بر پدیده را بهتر توصیف می کند.

به منظور مقایسه قدرت پیش بینی و انتخاب برترین الگوی سری زمانی، از معیارهای مختلف از جمله میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، میانگین مجذور خطا (MSE) و درصد میانگین مطلق خطا (MAPE) استفاده شد.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (6)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{e_i}{Y_i} \right| \cdot 100 \quad (8)$$

در روابط بیان شده،  $n$  تعداد پیش بینی ها و  $e_t$  خطای پیش بینی نام است که از تفاوت مقدار پیش بینی شده و مقدار واقعی بدست می آید (7).

در این مطالعه برای انجام مدل سازی داده های نفوذ از روش باکس-جنکینز (3) استفاده شد. در مدل سازی به روش باکس-جنکینز پس از آزمون ایستایی متغیرها در مرحله اول برای تمام حالت های مورد بررسی ضریب خودهمبستگی و ضریب خودهمبستگی جزئی محاسبه و نمودار آنها رسم شد. در مرحله دوم مدل های  $AR(p)$ ،  $MA(q)$  و  $ARMA(p,q)$  با درجات مختلف بر اساس نمودار ACF و PACF مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله سوم براساس خطای

اطلاعات 90 دقیقه نفوذ تجمعی با فواصل زمانی متغیر در خاک لومی رسی در جویچه‌های آبیاری و انجام مدل‌سازی سری زمانی، مقدار نفوذ را تا 390 دقیقه با دقت بالا و همبستگی بسیار خوب برآورد کردند. بعد از گذشت 90 دقیقه مقدار نفوذ در خاک‌های متوسط بافت نسبت به خاک‌های سنگین بافت کاهش یافت. در حالی که این پدیده منطبق بر واقعیت نیست. ولی در خاک متوسط شرایط نفوذ تا مدت طولانی‌تری از ابتدای آزمایش ثابت می‌شود اما شرایط نفوذ در خاک‌های سنگین زودتر ثابت می‌شود و این تفاوت بین خاک‌های سنگین و متوسط می‌تواند دلیل بروز این نتیجه شود که مدل‌سازی در خاک‌های متوسط نیاز به داده‌های ورودی بیشتری دارد و احتمالاً طول مدت 120 دقیقه ناکافی بود.

پیش‌بینی در حالت‌هایی که مدت زمان داده‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی 120 و 60 دقیقه با فواصل زمانی آزمایش نفوذ بسیار مناسب و مقادیر  $R^2$  و SE به ترتیب نزدیک به یک و صفر بود. شاخص‌های خطا مبین توانایی مدل در برآورد نفوذ برای طول مدت آزمایش نفوذ، با میزان ورودی کم دو ساعت و حتی یک ساعت بود. لازم به تأکید است کاهش داده‌های ورودی از دو ساعت به یک ساعت تأثیری بر پیش‌بینی نفوذ نداشت (جداول 2 و 3). خطای استاندارد برای تخمین نفوذپذیری خاک از 2 تا 5 درصد برای بافت‌های مختلف خاک متغیر بود. تقریباً همبستگی کاملی بین داده‌های تخمینی و واقعی حاصل شد. می‌توان با داده‌های اولیه به مدت یک ساعت نفوذ را برای طول مدت آزمایش پیش‌بینی نمود (شکل‌های 1 و 2). اسچوانکل و همکاران (18) نیز با استفاده از

جدول 2- نتایج مدل‌سازی سری‌زمانی با داده‌های ورودی به مدت 120 دقیقه با فواصل زمانی آزمایش نفوذ به روش استوانه مضاعف

Table 2- The results of time-series modeling with the input data for 120 minutes with time intervals of infiltration experiment of double ring method

بافت خاک Soil texture	مدت زمان داده‌های ورودی (دقیقه) Duration of input data (min)	مدت زمان پیش‌بینی (دقیقه) Duration of prediction (min)	مدل Model	خطای درون نمونه‌ای درصد Internal error (%)	خطای برون نمونه‌ای درصد External error (%)	$R^2$	RMSE (cm)	SE (-)
سنگین Heavy	120	120*	ARX(3,1)	0.97	1.05	0.999	0.134	0.037
متوسط Medium	120	90*	ARMAX(1,2,1)	0.23	2.79	0.998	0.156	0.045
سبک Light	120	90*	ARMAX(1,1,1)	0.27	0.93	1.000	0.088	0.019

\* مدت زمان باقی‌مانده تا انتهای آزمایش نفوذ

\* Remaining time until the end of the infiltration test

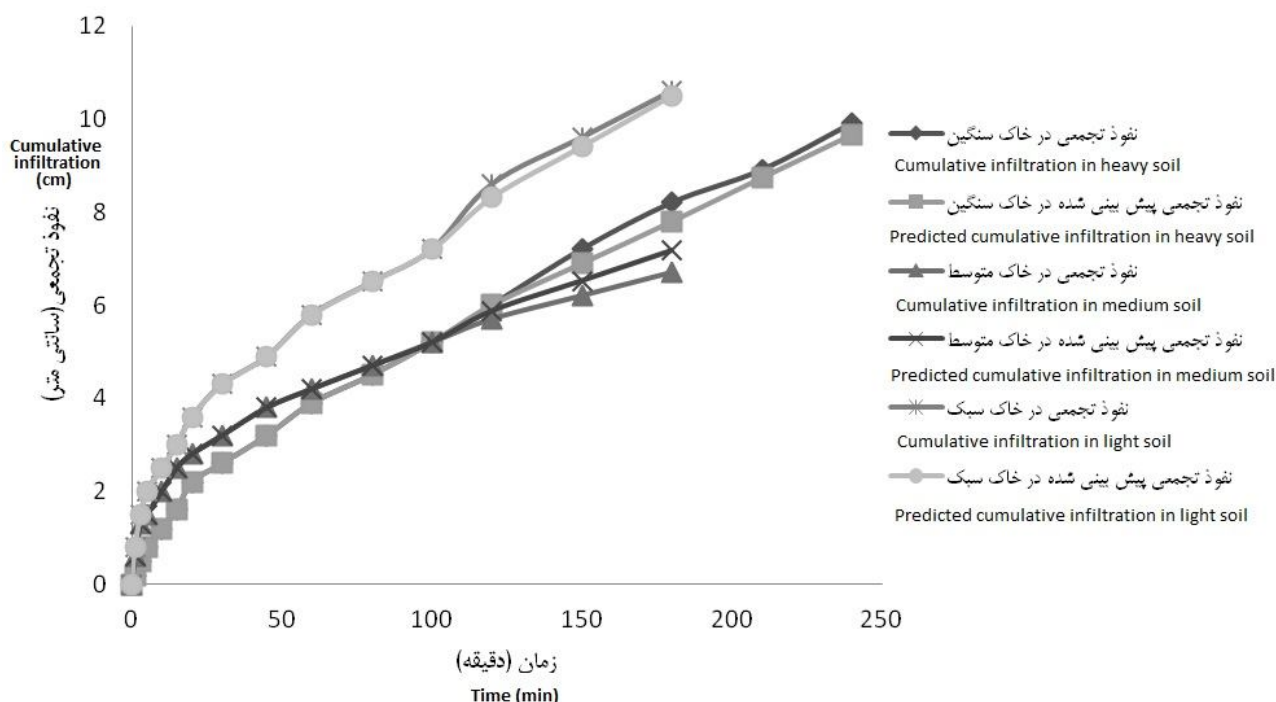
جدول 3- نتایج مدل‌سازی سری‌زمانی با داده‌های ورودی به مدت 60 دقیقه با فواصل زمانی آزمایش نفوذ به روش استوانه مضاعف

Table 3- The results of time-series modeling with the input data for 60 minutes with time intervals of infiltration experiment of double ring method

بافت خاک Soil texture	مدت زمان داده‌های ورودی (دقیقه) Duration of input data (min)	مدت زمان پیش‌بینی (دقیقه) Duration of prediction (min)	مدل Model	خطای درون نمونه‌ای درصد Internal error (%)	خطای برون نمونه‌ای درصد External error (%)	$R^2$	RMSE (cm)	SE (-)
سنگین Heavy	60	180*	ARX(1,1)	0.41	1.13	0.999	0.159	0.04
متوسط Medium	60	150*	ARX(3,1)	2.17	1.30	0.999	0.079	0.024
سبک Light	60	150*	ARMAX(1,2,1)	0.35	1.15	1.000	0.073	0.015

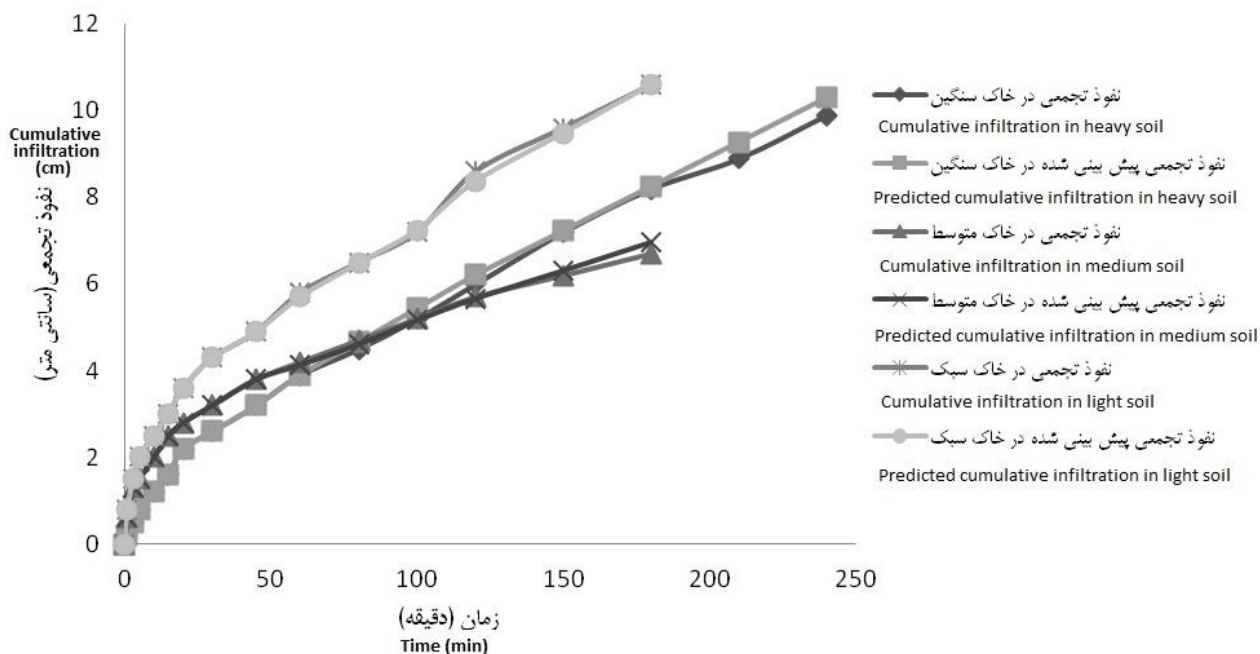
\* مدت زمان باقی‌مانده تا انتهای آزمایش نفوذ

\* Remaining time until the end of the infiltration test



شکل 1- منحنی نفوذ تجمعی آزمایش نفوذ استوانه مضاعف و پیش بینی شده توسط مدل های سری زمانی (داده های ورودی مدل 120 دقیقه با فواصل زمانی آزمایش نفوذ)

Figure 1- Cumulative infiltration curve of double ring test and predicted with time-series models (input data of model is equal to 120 minutes with time intervals of infiltration test)



شکل 2- منحنی نفوذ تجمعی آزمایش نفوذ استوانه مضاعف و پیش بینی شده توسط مدل های سری زمانی (داده های ورودی مدل 60 دقیقه با فواصل زمانی آزمایش نفوذ)

Figure 2- Cumulative infiltration curve of double ring test and predicted with time-series models (input data of model is equal to 60 minutes with time intervals of infiltration test)

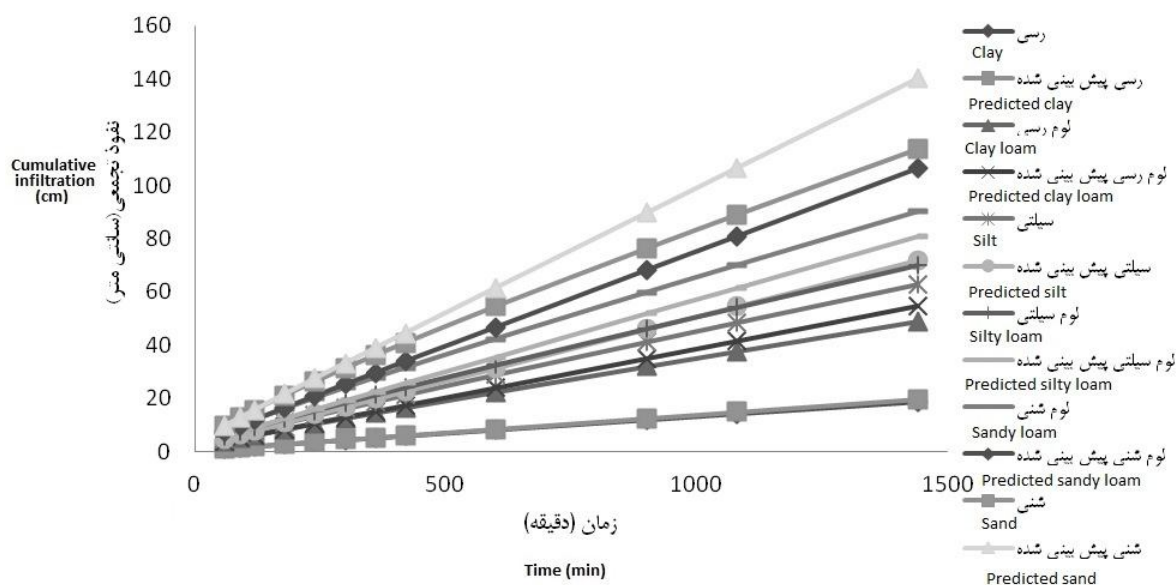
لوم‌رسی قابل اطمینان است (شکل 3). خطای استاندارد برای تخمین نفوذپذیری خاک بین 2 تا 21 درصد برای بافت‌های مختلف خاک محاسبه گردید. مشابه حالت قبل، همبستگی بسیار خوبی بین داده‌های تخمینی و واقعی بدست آمد. بدیهی است خطای استاندارد به دلیل افزایش مدت زمان پیش‌بینی نفوذ از 4 ساعت (جدول 2) به 24 ساعت (جدول 4) افزایش یافت.

در این مطالعه، با استفاده از معادله کوستیاکوف-لوئیس برای بافت‌های مختلف خاک (جدول 1) در فواصل زمانی آزمایش نفوذ، منحنی نفوذ تجمعی استخراج و از داده‌های دو ساعت ابتدایی برای برآورد نفوذ در 22 ساعت بعد استفاده شد. با وجود مدل‌سازی موفقیت‌آمیز در این حالت (جدول 4)، اندکی تمایل به بیش برآورد در خاک‌های سبک و متوسط مشاهده شد. همچنین نتایج برآورد مدل‌ها تا ساعات طولانی‌تر، به خصوص برای خاک‌های سنگین مثل رسی و

جدول 4- نتایج مدل‌سازی سری‌زمانی با داده‌های ورودی به مدت 120 دقیقه با فواصل زمانی آزمایش نفوذ به روش استوانه مضاعف در بافت‌های مختلف خاک

Table 4- The results of time-series modeling with the input data for 120 minutes with time intervals of infiltration experiment of double ring method for different soil textures

بافت خاک Soil texture	مدل Model	خطای درون نمونه‌ای درصد Internal error (%)	خطای برون نمونه‌ای درصد External error (%)	R <sup>2</sup>	RMSE (cm)	SE (-)
رسی Clay	ARX(3,1)	0.07	0.34	0.999	0.496	0.026
لومی‌رسی Clay loam	ARX(3,1)	0.1	0.54	0.999	2.624	0.117
سیلتی Silt	ARX(3,1)	0.1	0.6	0.999	4.082	0.139
لوم‌سیلتی Silty loam	ARX(3,1)	0.1	0.6	0.999	4.937	0.149
لوم شنی Sandy loam	ARMAX(2,2,1)	0.22	0.94	0.999	7.509	0.172
شنی Sand	ARX(2,1)	0.26	0.88	0.998	11.805	0.206



شکل 3- منحنی نفوذ تجمعی و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های سری‌زمانی (ورودی مدل 120 دقیقه با فواصل زمانی آزمایش نفوذ)  
Figure 3- Cumulative infiltration curve and predicted with time-series models (input data of model is equal to 120 minutes with time intervals of infiltration test)

در خاک های سبک به خوبی نشان نمی دهد در این پیش بینی اندکی بیش برآورد مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد، مدت زمان داده های ورودی پارامتر موثری در بهبود پیش بینی بود. به عبارت دیگر هرچه مدت زمان داده های ورودی بیشتر بود نتایج پیش بینی برای مدت زمان طولانی تری با داده های واقعی همخوانی پیدا کرد. دلیل این امر این است که با افزایش داده های ورودی خصوصیات نفوذ آب در خاک در انواع خاک ها بهتر نشان داده شد. بنابراین برای مدل سازی نفوذ به روش سری زمانی باید مدت زمان داده های ورودی به میزانی باشد که ماهیت فرآیند نفوذ در هر بافت خاک را نشان دهد. در مدل سازی سری زمانی هرچه رفتار گذشته پدیده رفتار آینده آن را بهتر نشان دهد پیش بینی بهتری صورت می گیرد. با توجه به نتایج مناسب الگوهای سری زمانی و درصد خطای بسیار اندک آن ها در این مطالعه، می توان به منظور پیش بینی نفوذ در بافت های مختلف خاک از این الگوها استفاده نمود.

نتایج مدل سازی داده های آزمایش نفوذ برای خاک های سنگین و متوسط نسبت به نتایج مدل سازی داده های مستخرج از معادله کوستیاکوف-لوتیس برای خاک های سنگین و متوسط تفاوت مشاهده شد که برای نتیجه گیری کلی باید نتایج تعداد بیشتری از نتایج آزمایش نفوذ برای مدل سازی استفاده شود و طبق هدف این مطالعه که بررسی امکان کاربرد این روش بود و از آزمایش های محدودی استفاده شد نمی توان نتیجه گیری قطعی انجام داد و باید بررسی های بیشتری صورت گیرد.

نتایج مطالعات ناصری و همکاران (13) و اسچوانکل و همکاران (18) نشان داد که کاربرد روش سری زمانی در پیش بینی نفوذ مناسب و این روش قابل استفاده است. به طور کلی در آبیاری معمولی با نیاز آبی 7 میلی متر در روز و دور آبیاری 10 روز، مدت زمان آبیاری برای بافت های مختلف خاک تقریباً کمتر از 12 ساعت است. بنابراین طبق نتایج این مطالعه با توجه به اینکه نتایج الگوهای سری زمانی در برآورد نفوذ تا 12 ساعت اولیه به واقعیت بسیار نزدیک است می توان از این مدل سازی سری زمانی در برآورد نفوذ در بافت های مختلف خاک استفاده کرد.

### نتیجه گیری کلی

در این پژوهش، کاربرد مدل سازی سری زمانی در پیش بینی نفوذ پذیری در بافت های مختلف خاک مورد بررسی قرار گرفت. با کاهش مدت زمان داده های ورودی آزمایش اندازه گیری نفوذ به روش استوانه مضاعف به 120 و حتی 60 دقیقه نتایج قابل اطمینانی برای پیش بینی نفوذ در طول مدت آزمایش حاصل شد. به عبارت دیگر امکان برآورد نفوذ با داده های اولیه کم برای طول مدت آزمایش توسط الگوهای سری زمانی وجود داشت. به علاوه با داده های اولیه با فواصل زمانی آزمایش نفوذ به مدت 120 دقیقه برآورد مطلوبی از نفوذ تا 12 ساعت بعد حاصل شد. به دلیل اینکه داده های ورودی با فواصل زمانی پیشنهاد شده برای آزمایش نفوذ به روش استوانه مضاعف فرآیند غیر خطی نفوذ در ساعات ابتدایی را در انواع خاک ها بخصوص

### منابع

- 1- Argyrokastritis I., and Kerkides P. 2003. A note to the variable sorptivity infiltration equation. *Water Resour Manage*, 17: 133-145.
- 2- ASTM. 2003. D3385-03 Standard test method for infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer. 2-Annual Book of ASTM Standards 04,08. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- 3- Box G.E.P. , and Jenkins G.M. 1976. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco.
- 4- Dickey D.A., and Fuller W.A. 1979. Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root. *the American Statistical Association*, 74 (366): 427-431.
- 5- Gujarati D. N. 1999. *Basic econometrics*. New York Graw Hill International Edition, 838.
- 6- Horton R.E. 1940. Approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science. Society of . America Proceedings*, 5: 399-417.
- 7- Haykin S. 1994. *Neural Networks: a Comprehensive Foundation*. Macmillan. New York, 340.
- 8- Kostiaikov A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity for studying it from a dynamic point o view for purpose of amelioration. *Trans. Int. Congr. Soil Science*, (A): 17-21.
- 9- Loaiciga H.A., and Huang A. 2007. Ponding analysis with Green-Ampt infiltration. *Hydrologic Engineering*, 12(1):109-112.
- 10- Machiwal D., Jha M.K., and Mal B.C. 2006. Modelling Infiltration and quantifying Spatial Soil Variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering*, 95(4): 569-582.
- 11- Mohammadi M.H., and Refahi. H. 2005. Estimating parameters of infiltration equations using soil physical properties. *Agricultural Science Iran*, 36(6): 1391-1398. (in Persian with English abstract)
- 12- Nahvinia M.J., Liaghat A., Parsinejad. M. 2010. Prediction of Depth of Infiltration in Furrow Irrigation Using Tentative and Statistical Models. *Water and Soil*, 24 (4): 769-780. (in Persian with English abstract)



- 13- Nasser A., Neyshabori M.R., and Fakheri fard A. 2013. Time series analysis of furrow infiltration. *Irrigation. and Drainage*, 62: 640-648.
- 14- Niromand H.A., and Bozorgnia, A. (translators), 1993. Introduction for Time Series Analysis, C. Chetfil, Published by Mashhad Ferdowsi University, 290 pp. 16.
- 15- Philips P.C.B., Perron P. 1988. Testing for unit root in time series regression. *Journal of Biometrika*, 75: 335-346.
- 16- Pulido-Calvo I., Roldán J., López-Luque R., Gutiérrez-Estrada J.C. 2003. Demand Forecasting for Irrigation Water Distribution Systems. *Irrigation and Drainage Engineering*, 129(6): 422-431.
- 17- Sadorsky P. 2006. Modeling and forecasting petroleum futures volatility, *Energy Economics*, 28: 467-488.
- 18- Schwankl L., Raghuwanshi N., Wallender W. 2000. Time series modeling for prediction spatially variable infiltration. *Irrigation and Drainage Engineering*, 126: 283-287.
- 19- Sy N.L. 2006. Modelling the infiltration process with a multi-layer perceptron artificial neural network. *Hydrological Sciences*, 51(1): 3-20.
- 20- Tisu P., Guitjens J., 1986. Predicting EC for drainage water management. *Irrigation and Drainage Engineering*, 112: 274-281.
- 21- Turner E.R. 2006. Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation. M.Sc. Thesis, University of Maryland, USA, 202.
- 22- Unkown. 2001. Instructions of soil infiltration rate measurement using double ring. Iran Planning and Budget Organization, Publication No. 243. (in Persian)
- 23- Unkown. 2003. Infiltration report in Lali plain. Soil and Water Consulting Engineers. No. 25-6. (in Persian)
- 24- Walker W. R. 1998. SIRM0D – Surface Irrigation Modeling Software. Utah State University.
- 25- Weiler M. 2005. An infiltration model based on flow variability in macropores: development, sensitivity analysis and applications. *Hydrology*. 310: 294-315.
- 26- Zoua P., Yanga J., Fub J., Liu G., Li D. 2010. Artificial neural network and time series models for predicting soil salt and water content. *Agricultural Water Management*, 97: 2009– 2019.

## Application of Time-series Modeling to Predict Infiltration of Different Soil Textures

S. Vazirpour<sup>1</sup> - H. Ebrahimian<sup>2\*</sup> - H. Rafiee<sup>3</sup> - F. Mirzaei Asl Shirkoohi<sup>4</sup>

Received: 11-07-2014

Accepted: 16-03-2015

**Introduction:** Infiltration is one of the most important parameters affecting irrigation. For this reason, measuring and estimating this parameter is very important, particularly when designing and managing irrigation systems. Infiltration affects water flow and solute transport in the soil surface and subsurface. Due to temporal and spatial variability, Many measurements are needed to explain the average soil infiltration characteristics under field conditions. Stochastic characteristics of the different natural phenomena led to the application of random variables and time series in predicting the performance of these phenomena. Time-series analysis is a simple and efficient method for prediction, which is widely used in various sciences. However, a few researches have investigated the time-series modeling to predict soil infiltration characteristics. In this study, capability of time series in estimating infiltration rate for different soil textures was evaluated.

**Materials and methods:** For this purpose, the 60 and 120 minutes data of double ring infiltrometer test in Lali plain, Khuzestan, Iran, with its proposed time intervals (0, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210, 240 minutes) were used to predict cumulative infiltration until the end of the experiment time for heavy (clay), medium (loam) and light (sand) soil textures. Moreover, used parameters of Kostiakov-Lewis equation recommended by NRCS, 24 hours cumulative infiltration curves were applied in time-series modeling for six different soil textures (clay, clay loam, silty, silty loam, sandy loam and sand). Different time-series models including Autoregressive (AR), Moving Average (MA), Autoregressive Moving Average (ARMA), autoregressive integrated moving average (ARIMA), ARMA model with eXogenous variables (ARMAX) and AR model with eXogenous variables (ARX) were evaluated in predicting cumulative infiltration. Autocorrelation and partial autocorrelation charts for each variable time-series models were investigated. The evaluation indices were the coefficient of determination ( $R^2$ ), root of mean square error (RMSE) and standard error (SE).

**Results and discussion:** The results showed that the AR(p), ARX(p,x) and ARMAX(p,q,x) time series models with various degrees 1, 2, 3 successfully predicted infiltration rates for duration of the test in different soils. Significant correlation between actual and estimated values of cumulative infiltration was almost obtained. The values of SE varied between 2 and 5 percent for three soil textures in Lali plain. Reducing input data from two hours to one hour did not have major impact on infiltration prediction. The results of 24 hours cumulative infiltration also indicated standard error of estimated infiltration varied between 2 and 21% for six different soil textures. Similarly, there was a very good correlation between the actual and predicted values of 24 hours cumulative infiltration. The prediction error increased with increasing prediction time (4 hours vs. 24 hours). The time-series models had accurate performances to predict cumulative infiltration until 12 hours, therefore, they would be as a useful tool to predict soil infiltration characteristics for irrigation purposes. The RMSE values for predicting 24 hours cumulative infiltration were 0.5, 2.6, 4.1, 4.9, 7.5 and 11.8 cm for clay, clay loam, silt, silty loam, sandy loam and sand, respectively. The SE values also were 2.6, 11.7, 13.9, 14.9, 17.2 and 21.6 % for clay, clay loam, silt, silty loam, sandy loam and sand, respectively. Time-series modeling showed better performance in heavy and moderate soils than in light soils. However, the performance of the time-series modeling for predicting infiltration for the double ring test with four hours experiment time was better for light soil textures as compared to heavy and moderate soil textures. Therefore, more studies are needed to investigate the capability of time series modeling to predict infiltration with more experiment data, particularly for heavy and moderate soil textures.

1, 2, 4- Graduate student of Irrigation and Drainage, Assistant Professor and Associate professor Department of Irrigation and Reclamation Engineering ., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

3- Assistant Professor, Department of Economic Engineering., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

(\* - Corresponding Author Email: ebrahimian@ut.ac.ir)

**Conclusion:** The results indicated that the experiment time of the double ring test could be reduced from four to one hour by using time series models in various soil textures and consequently the cost of soil infiltration measurements would be decreased. Using initial 120 min infiltration data, the time-series models could successfully predict the 12 hours cumulative infiltration. Comparison between the results of times-series models and actual data indicated the application of time-series models in predicting soil infiltration characteristics was efficient.

**Keywords:** Cumulative infiltration; Double ring test; Kostiakov-Lewis equation; Time series