

## Estimation of Hydrodynamic Infiltration Coefficients Using Optimization of SCS & Horton Equations

HADI ROSHANI<sup>1</sup>, MAJID HEYDARI<sup>2\*</sup>, ABBAS SOTOODEHNIA<sup>3</sup>

1. MSc Student of Water Science and Engineering Dept., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
  2. Assistant Professor of Water Science and Engineering Dept., Bualisina University, Hamadan, Iran.
  3. Associate Professor of Water Science and Engineering Dept., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
- (Received: Apr. 29, 2018- Revised: June. 24, 2018- Accepted: June. 30, 2018)

### ABSTRACT

Determination of infiltration equations coefficients with proper accuracy is one of the important issues in irrigation planning. For determination of these coefficients, double-ring test method is usually used which only involves the point and hydrostatic dimension of infiltration. In this research, a parabolic shape furrow was used for simulation of an irrigation furrow with 50 m length, 12 cm depth, and 0.20 m/m bed slope. Three experiments were performed with lengths of 4.7, 20 and 40 m, and inflow of  $0.6 \pm 0.02$  lit/s with three replicates. For each length, a test with the minimum measurement error was selected. To determine the infiltration equations coefficients, input and output hydrographs were measured using flow measurement flume and the output hydrographs were routed by Muskingum-Cunje, Zero-inertia and kinematic wave methods. Finally, the infiltration discharge values were obtained by considering the SCS and Horton infiltration equations and the average flow area in the proposed furrows. Computational hydrographs were obtained from the difference between routed output hydrographs and infiltration discharges. Finally, the objective function was derived using the least square method (LSM) for observational and computational output hydrographs. The results indicated that the mean value of the relative error between the observed and optimized output hydrographs of the proposed method is less than 5 percent. By increasing the length interval, the amounts of infiltration discharges decrease due to the reduction of static head water. The efficiency of the model for all lengths was more than 90 percent based on the Nash-Sutcliffe criterion which indicates that the simultaneous use of the Horton equation and the zero-inertia method provides the best results.

**Key words:** furrow irrigation, infiltration, optimization, flood routing

---

\* Corresponding Author's Email: mheydari\_ir@yahoo.com

## تخمین ضرایب هیدرودینامیکی نفوذ آب در خاک با استفاده از بهینه‌سازی معادلات نفوذ SCS و Horton

هادی روشنی<sup>۱</sup>، مجید حیدری<sup>۲\*</sup>، عباس ستوده نیا<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام

خمینی (ره)، قزوین

۲. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۳. دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۴/۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۴/۹)

## چکیده

تعیین ضرایب معادله‌های نفوذ با دقت مناسب، یکی از مسائل مهم در برنامه‌ریزی‌های آبیاری است. معمولاً برای تعیین این ضرایب از روش آزمایش استوانه‌های مضاعف استفاده می‌شود که این روش تنها بُعد هیدرواستاتیکی و نقطه‌ای نفوذ را در برمی‌گیرد. در این تحقیق، از جویچه‌ای با مقطع سهمی شکل، طول ۵۰ متر، عمق متوسط ۱۲ سانتی‌متر و شیب ۰/۰۲ به‌منظور شبیه‌سازی یک نهر آبیاری استفاده شد. سه آزمایش با بازه‌های طولی ۴/۷، ۲۰ و ۴۰ متر و دبی ورودی  $0.02 \pm 0.01$  لیتر بر ثانیه با سه تکرار انجام شد. از این میان برای هر یک از بازه‌های طولی، یک آزمایش با حداقل خطای اندازه‌گیری انتخاب شد. برای تعیین ضرایب معادلات نفوذ، پس از برداشت هیدروگراف‌های ورودی و خروجی آبراهه با استفاده از فلوم اندازه‌گیری جریان، هیدروگراف‌های خروجی از روش‌های هیدرولیکی ماسکینگام-کونز، اینرسی صفر و موج سینماتیک روندیابی شدند. در نهایت مقادیر دبی نفوذ با توجه به سطح مقطع متوسط جریان در بازه طولی موردبررسی و لحاظ کردن معادلات نفوذ SCS و هورتون تعیین شدند. هیدروگراف‌های محاسباتی از اختلاف بین هیدروگراف‌های خروجی روندیابی شده و دبی‌های نفوذ به‌دست‌آمد. در نهایت با استفاده از روش حداقل مربعات (LSM) برای هیدروگراف‌های خروجی مشاهداتی و محاسباتی، تابع هدف استخراج گردید. نتایج نشان داد که مقدار متوسط خطای نسبی بین هیدروگراف‌های خروجی مشاهداتی و محاسباتی از روش ارائه‌شده کمتر از ۵ درصد است. با افزایش طول بازه مورد بررسی، مقادیر دبی نفوذ به دلیل کاهش هد استاتیکی آب، کاهش می‌یابند. راندمان مدل بر اساس معیار نش-سانتکلیف در تمامی طول‌ها بیش از ۹۰ درصد بود که دلالت بر این دارد که استفاده هم‌زمان از معادله هورتون و روش روندیابی اینرسی صفر بهترین نتایج را ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای، نفوذ، بهینه‌سازی، روندیابی سیل

## مقدمه

آب از پارامترهای مهم در طراحی سیستم‌های آبیاری، مطالعات هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب، حفاظت خاک، طراحی و اجرای پروژه‌های زهکشی و کنترل فرسایش خاک در حوضه‌های آبخیز می‌باشد. انتخاب نوع سیستم‌های آبیاری در هر منطقه به ویژگی‌های نفوذ آب در منطقه‌ی مورد مطالعه بستگی دارد. از طرفی مدیریت سیستم‌های آبیاری و برنامه‌ریزی آبیاری در این سیستم‌ها نیز بر اساس سرعت نفوذ آب انجام می‌شود (Neshat and Parehkar, 2007).

از مدل‌های تجربی نفوذ می‌توان به مدل‌های کوستیاکوف-لوپیز، مدل هورتون، سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و کاستیاکوف اشاره نمود (Haverkamp et al, 1987). تعیین ضرایب نفوذ با دقت مناسب در این مدل‌ها کارآمدی آن‌ها را افزایش می‌دهد. به‌طورکلی مدل‌های نفوذ، شامل مدل‌های تخمینی فیزیکی و تجربی می‌باشند (Rawls, 1993).

تخمین مناسب ضرایب نفوذ آب در خاک یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در طراحی سامانه‌های توزیع آب و آبیاری است. نفوذ آب در خاک عموماً تحت تأثیر شرایط سطح خاک و مشخصات منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد. بافت، ساختمان، میزان مواد آلی، تراکم و هدایت هیدرولیکی خاک و نیز وجود لایه‌های غیرقابل نفوذ در نیم‌رخ خاک از جمله موارد تأثیرگذار بر میزان نفوذ آب در خاک است (Hillel, 1988). شیوه‌ی تأمین آب در سطح خاک و عواملی مانند شیب زمین، پوشش گیاهی و زبری مصالح بستر رودخانه از عوامل تأثیرگذار بر فرآیند نفوذ می‌باشد (Nasseri et al, 2004 Allen and Brand, 1968). سرعت نفوذ

دانستند. در واقع وجود جریان جانبی کاهنده در مسیر حرکت سیلاب عامل مهمی در تولید نتایج نامناسب در مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی است.

در تحقیق پیش رو با مدل کردن جریان جانبی کاهنده (نفوذ آب در خاک) هیدروگراف‌های خروجی با دقت مطلوبی تخمین زده می‌شوند.

در بررسی جریان سیلاب در مسیر با بستر نفوذپذیر می‌توان گفت که با توجه به تغییر مشخصات جریان با گذشت زمان و وجود پدیده‌ی نفوذ، جریان از نوع غیر ماندگار و غیریکنواخت با دبی کاهنده است.

برای روندیابی سیلاب دو رویکرد هیدرولوژیکی و هیدرولوژیکی وجود دارد. در روندیابی با رویکرد هیدرولوژیکی معادلات پیوستگی (رابطه‌ی ۱) و اندازه حرکت (رابطه‌ی ۲) در حالت غیر ماندگار که به معادلات سنت-ونانت مشهورند با فرضیات مختلف در نظر گرفته شده و با روش‌های اجزا محدود یا تفاضل محدود حل می‌شوند. این معادلات پس از تعدیل، به صورت زیر ارائه می‌شوند.

$$\frac{A\partial v}{\partial x} + \frac{Bv\partial y}{\partial x} + \frac{B\partial y}{\partial t} = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (\text{رابطه ۲})$$

که  $y$  عمق آب (متر)،  $t$  زمان (ثانیه)،  $v$  سرعت جریان آب (متر بر ثانیه)،  $x$  فاصله از ابتدای مسیر مورد بررسی (متر)،  $g$  شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)،  $A$  سطح مقطع جریان (مترمربع)،  $B$  عرض سطح آب در مجرا (متر) و  $S_0$  و  $S_f$  به ترتیب شیب بستر و شیب خط اصطکاکی می‌باشد.

در مدل هیدرودینامیک، روندیابی سیل با حل کامل معادلات سنت-ونانت انجام می‌شود. مدل اینرسی صفر زمانی کاربرد خواهد داشت که سرعت جریان آب در مجرا کم باشد و در این صورت از ترم‌های اندازه حرکت صرف نظر شده و رابطه‌ی (۲) به صورت رابطه‌ی (۳) خلاصه می‌شود.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (\text{رابطه ۳})$$

در مدل موج سینماتیک، گرادیان عمق جریان  $(\partial y / \partial x)$  و ترم‌های اینرسی در معادله‌ی اندازه حرکت (رابطه‌ی ۲)، اغلب در مقایسه با  $S_0$  و  $S_f$  کوچک می‌باشند، بنابراین می‌توان از ترم‌های اینرسی و گرادیان عمق جریان صرف نظر نمود. در این صورت رابطه‌ی (۲) برای مدل موج سینماتیک به صورت رابطه‌ی (۴) در نظر گرفته می‌شود:

$$S_0 = S_f \quad (\text{رابطه ۴})$$

با توجه به اینکه حل کامل معادلات هیدرودینامیکی

Neshat and Parezkar (2007) به مقایسه روش‌های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در خاک برای ۸۲ منطقه در استان کرمان پرداختند. در این تحقیق میزان نفوذ عمودی آب از روش آزمایش صحرایی استوانه‌های مضاعف برای تعیین ضرایب معادلات نفوذ کاستیاکف، گرین-آمپت، هورتون، SCS و فیلیپ استفاده شد. نتایج نشان داد که در درازمدت مدل‌های فیلیپ و SCS عملکرد بهتری داشته و بهتر است که از مدل‌های کاستیاکف و هورتون برای مدت‌زمان کوتاه انجام آزمایش استفاده شود.

Habibikhavah *et al* (2008) به بررسی تحلیل حساسیت روش‌های مختلف برآورد پارامترهای نفوذ در آبیاری شیاری پرداختند. آن‌ها با استفاده از هشت روش الیوت و واکر، شیارد، کریدل و همکاران، روش اصلاح‌شده کریدل و همکاران، ولیانتزاس، آپاده‌یایا و راگوانشی، مک کلی مونت و اسمیت و نرم‌افزار Matlab پارامترهای معادلات نفوذ را محاسبه کردند. نتایج آنالیز حساسیت بر روی داده‌های صحرایی نشان داد که تغییرات طول و دبی در تمامی روش‌ها سبب تغییرات ضرایب معادلات نفوذ شده و این ضرایب حساسیت بالایی به تغییرات طول و دبی دارند.

Ojaghloo *et al* (2008) در تحقیق خود به بررسی پارامترهای نفوذ برای شبیه‌سازی پیشروی جریان در آبیاری جویچه‌ای پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پارامترهای معادله نفوذ کاستیاکف به تغییرات طول حساس بوده و تقریباً در تمام حالات با افزایش طول جویچه، توان  $a$  در معادله کاستیاکف کاهش خواهد یافت.

Abasizadeh *et al* (2010) روش‌های روندیابی سیل ماسکینگام، کانوکس و آت-کین اصلاح‌شده را برای ۲۶ سیل اتفاق افتاده در رودخانه دز با یکدیگر مقایسه کردند و نشان دادند که روش کانوکس (گرافیکی) دارای بیشترین دقت است. Shayannejad *et al* (2014) روش ماسکینگام غیرخطی را برای رودخانه دوآب صمامی در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کرده و نشان دادند که نتایج مدل HEC-RAS همخوانی قابل قبولی با مدل ارائه‌شده دارد. Moradi *et al* (2007) نیز به روندیابی سیل با روش‌های ماسکینگام و ماسکینگام-کونژ در رودخانه ليقوان پرداختند و مشاهده کردند که نتایج حاصل از جریان روندیابی شده توسط دو مدل، اختلاف‌های معنی‌داری با نتایج مشاهداتی از ایستگاه-های هیدرومتری پایین‌دست دارد. آن‌ها دلیل این اختلاف را کوهستانی بودن منطقه و وجود زهکش‌های تحت‌الارضی در حفاصل دو ایستگاه هیدرومتری بالادست و پایین‌دست

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c_k \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در این رابطه  $c_k$  سرعت موج سینماتیک (متر بر ثانیه) است و مقدار آن از رابطه‌ی (۶) با مشتق‌گیری از رابطه‌ی مانینگ نسبت به سطح مقطع  $A$  محاسبه می‌گردد:

$$c_k = \frac{5\sqrt{S_0}}{3n} \left( \frac{A}{P} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$S_0$  شیب بستر آبراهه،  $n$  ضریب زبری مانینگ مصالح بستر،  $A$  سطح مقطع جریان (مترمربع) و  $P$  محیط خیس‌شده آبراهه (متر) می‌باشد.

برای تخمین ضریب زبری مانینگ در آبیاری جویچه‌ای مطالعاتی انجام شده است. Chow (1959) ضریب مانینگ را برای زمین‌های شخم‌خورده و بدون پوشش گیاهی در محدوده ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ توصیه می‌کند. Abbasi *et al.* (2003) در جویچه‌های انتها بسته و شیب کم با استفاده از مدل EVALU، مقدار ضریب زبری مانینگ را در محدوده ۰/۰۶۶ تا ۰/۰۸۱ تخمین زدند. به هر حال برای به دست آوردن یک عدد قابل‌اعتماد برای ضریب زبری مانینگ در آبراهه، بهتر است که از روابط تجربی استفاده شود.

رابطه (۷) معادله استریکلر برای تعیین ضریب زبری مانینگ مصالح و رسوبات یکنواخت و غیر شنی (شرایط منطقه انجام آزمایش‌ها) را بیان می‌کند.

$$n = 0.0474(d_{50})^{\frac{1}{6}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که  $n$  ضریب زبری مانینگ و  $d_{50}$  قطر منافذ الکی است که ۵۰ درصد ذرات از آن عبور می‌کنند. برای محاسبه ضریب زبری مانینگ با استفاده از رابطه (۷)، باید منحنی دانه‌بندی خاک ترسیم‌شده و سپس مقدار  $d_{50}$  مصالح تعیین گردد.

باید توجه داشت که مقادیر  $c_k$  تابعی از زمان و مکان است و برای معرفی یک عدد به عنوان سرعت موج سینماتیک، از مشخصات جریان برای زمان و مکان وقوع حداکثر دبی جریان استفاده می‌شود (Mahmoodian Shoushtari, 2008). برای تعیین  $c_k$  با استفاده از اشل‌های نصب‌شده در بستر آبراهه، مقادیر سطح مقطع جریان و محیط خیس‌شده در بازه‌های زمانی مشخص اندازه‌گیری شد. در نهایت بزرگ‌ترین مقدار  $c_k$  به عنوان سرعت موج سینماتیک انتخاب شد.

در روش موج پخشیدگی (اینرسی صفر) برای روندیابی سیل، معادله‌ی پیوستگی به صورت رابطه‌ی (۸) و معادله‌ی اندازه حرکت به صورت رابطه‌ی (۹) مدنظر است.

سنت-ونانت مشکل است، در روش بیلان حجم به صورت کلی از معادله‌ی اندازه حرکت صرف‌نظر می‌گردد و تنها از معادله‌ی پیوستگی در تحلیل جریان استفاده شده و جریان به صورت نرمال فرض می‌شود (Bahrami *et al.*, 2009).

پیشرفت‌های مختلف در زمینه سخت‌افزار و نرم‌افزار سبب ارائه‌ی مدل‌های کامپیوتری مانند HEC- HMS, HEC-RAS, MIKE11 و MIKE12 برای روندیابی سیلاب شده است.

تخمین ضرایب هیدرودینامیکی نفوذ یکی از عوامل تأثیرگذار بر راندمان سیستم‌های آبیاری سطحی بوده و از طرفی کنترل جریان جانبی ناشی از پدیده نفوذ در اثر حرکت آب در یک آبراهه طبیعی نقش حائز اهمیتی را در افزایش دقت محاسبات هیدرولیکی جریان دارد. از این رو در تحقیق حاضر با استفاده از معادلات حاکم بر جریان غیرماندگار و تلفیق روش‌های روندیابی هیدرولیکی سیل با معادلات نفوذ تجربی SCS و هورتون و بهینه‌سازی این معادلات سعی شده تا اولاً کارایی روش‌های روندیابی هیدرولیکی سیل و معادلات نفوذ تجربی مذکور در شرایط حاکم بر آزمایش‌ها بررسی شود و ثانیاً با تغییر بازه طولی جویچه موردبررسی، تأثیر تغییر طول بر ضرایب هیدرودینامیکی این معادلات استخراج گردد.

## مواد و روش‌ها

### روندیابی سیل

همان‌طور که اشاره شد در روش پیشنهادی برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی نفوذ در ابتدا باید هیدروگراف خروجی با استفاده از روش‌های روندیابی و بدون در نظر گرفتن عامل نفوذ تخمین زده شوند. در نهایت بر اساس هیدروگراف روندیابی شده و مقادیر دبی نفوذ، ضرایب هیدرودینامیکی نفوذ با استفاده از یک الگوریتم طراحی‌شده که در بخش‌های بعد به طور کامل شرح داده می‌شود، به دست خواهد آمد. روش‌های روندیابی سیل، روش‌های تقریبی جهت تخمین هیدروگراف خروجی سیل در بازه‌ی مکانی مشخص از محل ورودی سیلاب، بر اساس هیدروگراف ورودی است. روندیابی سیل به دو روش هیدرولوژیکی و هیدرولیکی انجام می‌شود. در روش‌های هیدرولیکی روندیابی با استفاده از حل هم‌زمان معادلات پیوستگی و تمام یا بخشی از معادله اندازه حرکت انجام شده و روش‌های هیدرولیکی فیزیک مسئله را در نظر می‌گیرند. در روش موج سینماتیک، با تلفیق معادله‌ی پیوستگی و معادله‌ی ساده‌شده‌ی مومنوم (رابطه‌ی ۴) رابطه کلی روندیابی سیل به صورت زیر به دست می‌آید (Chaudhry, 2008):

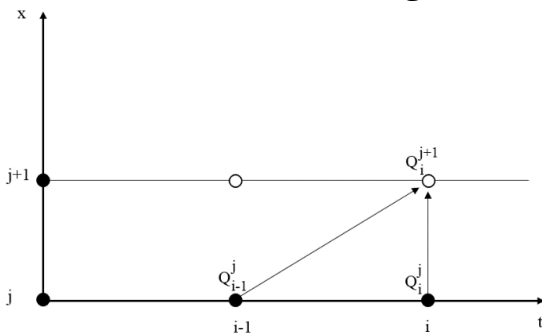
حداقل مربعات و یا سعی و خطا به صورت تقریبی برای یک رودخانه‌ی مشخص بدون در نظر گرفتن معادله‌ی اندازه حرکت تعیین می‌شوند. کونژ در سال ۱۹۶۹ نشان داد که مقدار  $K$  تقریباً برابر با زمان حرکت موج سیل در یک طول مشخص است. در روش ماسکینگام-کونژ مقادیر ضرایب  $X$  و  $K$  به ترتیب از روابط (۱۷) و (۱۸) به دست می‌آیند.

$$K = \frac{\Delta x}{c_k} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q_0}{c_k \Delta x T_0 S_0} \right) \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

### روش‌های عددی حل

برای حل رابطه‌ی (۵) که معادله‌ی روندیابی سینماتیکی سیل است، روش‌های مختلفی وجود دارد که با توجه به الگوریتم‌های حل موجود و شرایط مرزی و اولیه‌ی مسئله، روش upstream difference method به‌عنوان یک روش مناسب انتخاب شد. این روش، روشی مقید است بدین معنی که در صورت انتخاب گام زمانی و مکانی مناسب، این روش پایدار بوده و نتایج قابل قبولی را ارائه خواهد داد. شکل (۱) شبکه‌ی حل و سلول محاسباتی این روش را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شبکه‌ی حل عددی معادله‌ی روش موج سینماتیک

با استفاده از تقریب پس‌رو بر روی رابطه‌ی (۵) می‌توان

نوشت:

$$\frac{Q_i^j - Q_{i-1}^j}{\Delta t} = -c_k \frac{Q_i^{j+1} - Q_i^j}{\Delta x} \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

با داشتن هیدروگراف ورودی به‌عنوان شرط اولیه و در نظر گرفتن مقدار صفر برای تمامی دبی‌های با زمان صفر ثانیه به عنوان شرط مرزی و در نظر گرفتن رابطه‌ی (۶)، هیدروگراف خروجی سیل از طریق موج سینماتیک روندیابی می‌شود.

برای حل معادله‌ی روش موج پخشیدگی، آپولو و پوستون روشی را ارائه نمودند. آن‌ها با در نظر داشتن استقلال فیزیکی ترم‌های  $c_k \frac{\partial Q}{\partial x}$  و  $D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}$ ، رابطه‌ی (۱۰) را به دو رابطه‌ی (۲۰) و (۲۱) تقسیم کردند.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (\text{رابطه ۹})$$

با لحاظ کردن معادله‌ی اندازه حرکت در معادله‌ی پیوستگی و مشتق‌گیری از رابطه‌ی به‌دست‌آمده نسبت به  $x$  و  $t$  و فرض  $Q = k\sqrt{S_0}$  رابطه‌ی (۱۰) برای روندیابی به روش موج پخشیدگی استخراج می‌گردد.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{dQ}{dA} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q}{2TS_0} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

در جمله سمت راست معادله‌ی اخیر  $D = \frac{Q}{2TS_0}$  ضریب

پخشیدگی موج است که معرف میزان کشیدگی موج سیل در حین حرکت در آبراهه و در نتیجه افتادگی قله‌ی موج است.

همچنین موج پخشیدگی با سرعت  $c_k = \frac{dQ}{dA}$  حرکت

می‌کند (Mahmoodian Shoushtari, 2008).

در روش‌های هیدرولوژیکی، از معادله‌ی پیوستگی بدون در نظر گرفتن معادله‌ی اندازه حرکت استفاده می‌شود. فرم معادله‌ی پیوستگی با در نظر گرفتن مقادیر متوسط برای دبی‌های ورودی و خروجی، در یک‌فاصله‌ی زمانی  $\Delta t$  و استفاده از تقریب مرکزی، به‌صورت رابطه‌ی (۱۱) است.

$$I_1 + I_2 + \frac{2S_1}{\Delta t} - O_1 = O_2 + \frac{2S_2}{\Delta t} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که در آن  $I$  و  $O$  به ترتیب دبی‌های ورودی و خروجی سیلاب و  $s$  مقدار ذخیره است. برای محاسبه‌ی  $S$  از رابطه‌ی (۱۲) استفاده می‌شود.

$$S = K [XI + (1-X)O] \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که در آن  $X$  و  $K$  به ترتیب ضریب وزنی تعیین‌کننده میزان تأثیر دبی ورودی و خروجی بر ذخیره و ضریب مربوط به مشخصات خاک رودخانه می‌باشد. درنهایت فرم کلی رابطه‌ی روندیابی سیل با روش ماسکینگام به صورت رابطه‌ی (۱۳) استخراج می‌گردد.

$$O_2 = C_1 I_1 + C_2 I_2 + C_3 O_1 \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

که مقادیر  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$  به ترتیب از روابط (۱۴)، (۱۵) و

(۱۶) تعیین می‌شوند (Mahmoodian Shoushtari, 2008).

$$C_1 = \frac{KX + 0.5\Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$C_2 = \frac{0.5\Delta t - KX}{K - KX + 0.5\Delta t} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$C_3 = \frac{K - KX - 0.5\Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

در روش ماسکینگام ضرایب  $X$  و  $K$  با استفاده از روش

روندیابی هیدروگراف خروجی در ابتدا عملیات روندیابی بدون در نظر گرفتن عامل نفوذ انجام می‌شود. با کم کردن مقادیر دبی نفوذ در هر ثانیه از مقادیر دبی روندیابی شده (در صورت تعیین مناسب دبی‌های نفوذ) می‌توان هیدروگراف خروجی را با دقت مناسبی تعیین نمود. لازم به ذکر است که برای محاسبه دبی‌های نفوذ از معادلات تجربی نفوذ SCS و هورتون استفاده خواهد شد. برای تعیین مقادیر دبی نفوذ، فاصله‌ی طولی بین اشل‌های متوالی نصب‌شده (که به میزان ۰/۱ طول کل مورد بررسی است) به عنوان بازه‌های بررسی دبی نفوذ در نظر گرفته شدند. در هر یک از بازه‌ها مقادیر محیط خیس شده با استفاده از اعداد قرائت‌شده از اشل‌های هر ردیف محاسبه شد. برای تعیین مقادیر سرعت نفوذ در هر ثانیه از معادله‌ی نفوذ سازمان حفاظت خاک آمریکا (رابطه‌ی ۲۴) و رابطه‌ی هورتون (رابطه‌ی ۲۵) استفاده شد (Alizadeh, 2002).

$$i = at^b + c \quad (\text{رابطه ۲۴})$$

$i$ ، عمق نفوذ تجمعی (سانتی‌متر)،  $t$  زمان تجمعی از آغاز آزمایش (دقیقه) و  $a$ ،  $b$  و  $c$  ضرایب تجربی می‌باشند.

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (\text{رابطه ۲۵})$$

که  $f$ ، سرعت نفوذ در لحظه (میلی‌متر بر ساعت)،  $f_0$ ، سرعت اولیه‌ی نفوذ (میلی‌متر بر ساعت)،  $f_c$ ، سرعت نهایی نفوذ (میلی‌متر بر ساعت) و  $k$  عددی وابسته به نوع خاک ( $\text{min}^{-1}$ ) و  $t$  زمان از آغاز آزمایش برحسب دقیقه است.

مقادیر دبی نفوذ در هر ثانیه با ضرب کردن سرعت نفوذ در سطح مقطع نفوذ آب، از رابطه‌ی (۲۶) به دست خواهد آمد.

$$Q_{inf} = v_{inf} (\bar{P} \times L_i) \quad (\text{رابطه ۲۶})$$

که  $Q_{inf}$ ، مقدار دبی نفوذ در بازه‌های ۱۰ درصدی از کل طول بازه‌ی مورد مطالعه (مترمکعب بر ثانیه)،  $v_{inf}$  مقدار سرعت نفوذ برای کل طول مورد بررسی که با استفاده از روابط (۲۴) و (۲۵) به دست می‌آید (متر بر ثانیه)،  $\bar{P}$  متوسط مقادیر محاسبه‌شده محیط خیس شده در دو نقطه‌ی ابتدا و انتهای هر یک از بازه‌ها (متر) و  $L_i$  طول هر یک از بازه‌ها (متر) است.

پس از تعیین مقادیر دبی نفوذ در هر ثانیه و روندیابی هیدروگراف خروجی، با استفاده از روش حداقل مربعات، تابع هدف به‌صورت رابطه‌ی (۲۷) تولید می‌شود.

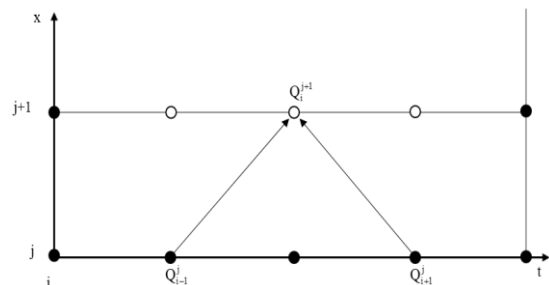
$$FF = \text{average} \left( \sum_{t=0}^n (Q_{obs} - (Q_{rou} - Q_{inf}))^2 \right) \times 100$$

که  $FF$  تابع هدف،  $Q_{obs}$  دبی خروجی اندازه‌گیری شده (مترمکعب بر ثانیه)،  $Q_{rou}$  دبی خروجی روندیابی شده (مترمکعب بر ثانیه) است.

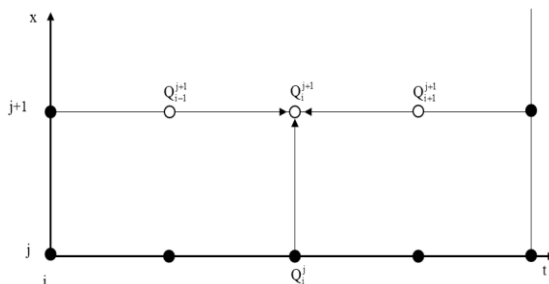
$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -c_k \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

که در ابتدا تمامی شبکه‌ی حل با استفاده از روش عددی مناسب برای معادله‌ی (۲۰) حل شده و نتایج به‌دست‌آمده به‌عنوان شرط اولیه در حل معادله‌ی (۲۱) لحاظ می‌شود. در این تحقیق برای حل معادله‌ی (۲۰) از روش لکس و برای حل معادله‌ی (۲۱) از روش لاسنن استفاده شد. شکل (۲) شبکه‌ی حل روش لکس و شکل (۳) شبکه‌ی حل روش لاسنن را نشان می‌دهد.



شکل ۲. شبکه‌ی حل روش لکس برای حل معادله‌ی (۲۰)



شکل ۳. شبکه‌ی حل روش لاسنن برای حل معادله‌ی (۲۱)

در روش لکس با استفاده از تقریب مرکزی یک روش صریح به صورت رابطه‌ی (۲۲) ارائه می‌شود.

$$Q_i^{j+1} = \left( \frac{1-m}{2} \right) Q_{i+1}^j + \left( \frac{1+m}{2} \right) Q_{i-1}^j \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

$$m = \frac{\Delta x}{c_k \Delta t}$$

که در آن است.

در روش لاسنن با استفاده از تقریب مرکزی یک روش ضمنی به صورت رابطه‌ی (۲۳) ارائه می‌شود.

$$Q_i^j = -r Q_{i-1}^{j+1} + (1+2r) Q_i^{j+1} - r Q_{i+1}^{j+1} \quad (\text{رابطه ۲۳})$$

$$r = \frac{\Delta x^2}{D \Delta t}$$

که در آن است.

### تئوری روش پیشنهادی

در روش روندیابی هیدرولیکی، از عامل نفوذ که به عنوان یک جریان جانبی کاهنده است صرف‌نظر می‌شود. با توجه به اینکه آبراهه مورد بررسی یک آبراهه نفوذپذیر است، برای

است. برای انتقال آب از یک منبع با حجم تقریبی ۱۰۰۰۰ لیتر استفاده شد. با توجه به اختلاف ارتفاع منبع نسبت به محل انجام آزمایش، آب به صورت ثقلی به محل ورودی جویچه منتقل می‌شد. در محل ورودی جویچه و در مسیر خط لوله انتقال، از دو شیر متوالی برای تأمین دبی ثابت در تمام آزمایش‌ها استفاده شد به طوری که یکی از شیرها ثابت نگه‌داشته شده و دبی ورودی را تنظیم می‌کند و شیر دیگر به صورت کامل باز و بسته می‌شود. با ثابت شدن تقریبی مقادیر دبی ورودی، تنها عامل متغیر در انجام آزمایش‌ها، طول مورد بررسی است. اندازه‌گیری هیدروگراف‌های ورودی و خروجی با استفاده از دو پارشال فلوم ۱ و ۲ اینچی به ترتیب در مقاطع ورودی و خروجی انجام شد.

برای روندیابی هیدرولیکی سیل، پارامترهای محیط خیس شده، ضریب زبری مانینگ، سرعت موج سینماتیک و شیب طولی آبراهه باید تعیین شود. شیب طولی جویچه در هنگام حفر و اصلاح جویچه با استفاده از دوربین نیوای نقشه‌برداری و مقدار آن ۰/۰۲ تعیین شد.

سرعت موج سینماتیک و محیط خیس شده در حین انجام آزمایش، با استفاده از نه ردیف اشل با فواصل ۰/۱ از کل طول جویچه، به صورت کاملاً عمودی جانمایی شد به طوری که در هر ردیف به تعداد سه اشل وجود داشت.

آزمایش با باز کردن شیر قطع و وصل جریان آغاز و داده‌های دبی در مقاطع ورودی و خروجی و همچنین تراز آب در مقاطع مختلف از مسیر برداشت شد.

آزمایش‌ها در سه طول ۴/۷، ۲۰ و ۴۰ متر انجام شد. شکل (۴) روند آزمایش‌ها در طول‌های مختلف و تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش‌های صحرائی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. الف) عملیات احداث شیب ۲ درصد در بستر آبراهه، ب) شیرهای استفاده‌شده برای تولید دبی ورودی یکسان، ج) اشل‌های نصب‌شده برای برداشت محیط خیس شده و سرعت موج سینماتیک، د) انجام آزمایش در طول ۴/۷ متر، ه) انجام آزمایش در طول ۲۰ متر و و) انجام آزمایش در طول ۴۰ متر.

در نهایت با استفاده از ابزار بهینه‌سازی Solver در نرم‌افزار Excel و حداقل کردن رابطه‌ی (۲۷) بر اساس تغییر ضرایب نفوذ، مقادیر ضرایب معادلات نفوذ به دست خواهند آمد.

#### ضریب راندمان نش-ساتکلیف

آماره نش-ساتکلیف یکی از پارامترهای ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی است و از رابطه‌ی (۲۸) تعیین می‌شود.

$$NS = \left( 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \right) \times 100 \quad (\text{رابطه ۲۸})$$

که  $Q_m^t$  دبی به دست آمده از مدل در گام زمانی  $t$  ثانیه،  $Q_o^t$  دبی مشاهداتی در گام زمانی  $t$  ثانیه،  $\bar{Q}_o$  میانگین دبی‌های مشاهداتی و  $T$  بازه‌ی زمانی انجام آزمایش می‌باشد.

#### آزمون آماری من - وینتی

آزمون من-وینتی یک آزمون آماری ناپارامتریک برای تعیین وجود یا عدم وجود تأثیر یک پارامتر بر دو گروه مستقل از داده‌ها در سطح اطمینان مورد بررسی است. بررسی آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد. در صورتی که مقادیر  $p$ -value محاسبه‌شده برای هر آزمون کمتر از ۰/۰۵ باشد فرض صفر که برابر بودن تغییرات داده‌های دو گروه است رد می‌شود. برای انجام این آزمون از نرم‌افزار Minitab استفاده شد.

#### نیکیوی برازش

آماره MAPE ارزیابی مدل رگرسیونی را بدون در نظر داشتن واحد داده‌ها و به صورت درصد بیان می‌کند و مقدار آن از رابطه‌ی (۲۹) محاسبه می‌شود.

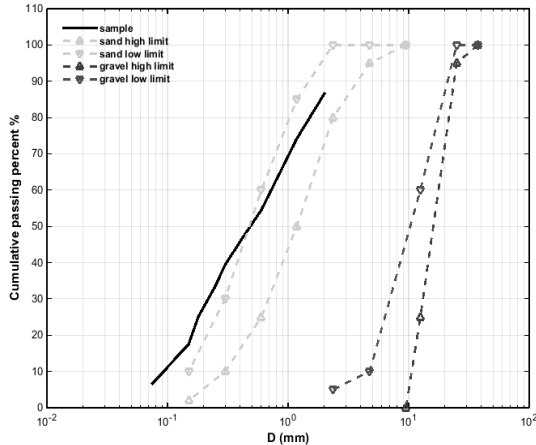
$$MAPE = \frac{\sum |(Q_t - \hat{Q}_t) / Q_t|}{n} * 100 \quad (\text{رابطه ۲۹})$$

که در آن  $Q_t \neq 0$  است و  $Q_t$  مقادیر دبی مشاهداتی و  $\hat{Q}_t$  مقادیر دبی برآورد شده است.

#### آزمایش‌های صحرائی

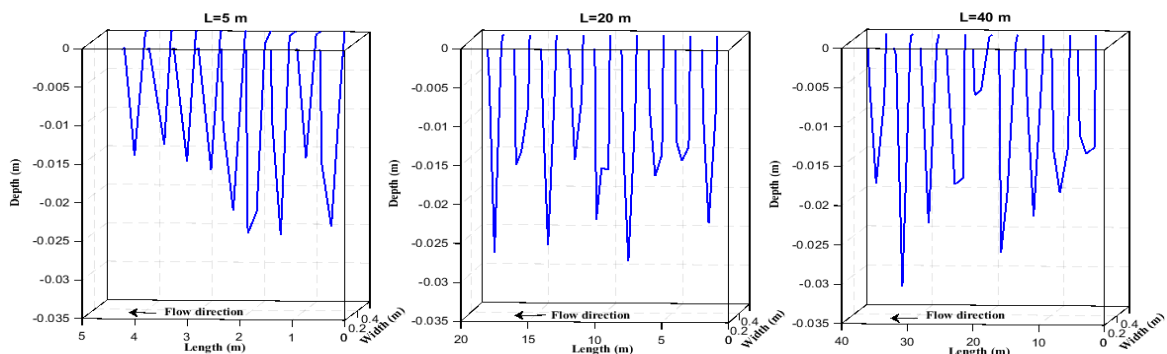
به منظور انجام آزمایش‌ها نه‌ری به طول ۵۰ متر، عمق متوسط ۱۲ سانتی‌متر، شیب بستر ۰/۰۲ و مقطع سهمی شکل در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی سینا حفر شد. برای یکسان‌سازی شرایط آزمایش از همین نهر برای طول‌های مختلف استفاده شد. در تحقیقات انجام‌شده توسط Ebrahimian and Liaghat (2011)، مقدار دبی آبیاری جویچه‌ای در مزرعه آموزشی و پژوهشی دانشگاه تهران با توجه به شیب و شرایط فیزیکی جویچه‌ها در محدوده ۰/۲۲ تا ۰/۶۴ لیتر بر ثانیه قرار دارد. از این‌رو در تحقیق انجام‌شده با توجه به تشابه فیزیکی جویچه‌ها، مقدار دبی ورودی  $0.02 \pm 0.06$  لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده

محدوده سیلت و رس قرار می‌گیرد ۶/۶۳ درصد است. از طرفی با استفاده از مثلث بافت خاک و درصدهای رس، سیلت و ماسه به‌دست‌آمده از منحنی دانه‌بندی، خاک مورد مطالعه دارای بافت ماسه‌ای است.



شکل ۵. منحنی دانه‌بندی خاک

مقاطع عرضی جویچه در نُه مقطع و با استفاده از ۲۷ اشل به‌صورت سه‌نقطه‌ای برداشت شدند. در شکل (۶) نمودارهای اعماق آب در برابر فاصله از پارشال فلوم ورودی برای آزمایش‌های مختلف آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۶) دیده می‌شود، مقاطع آبراهه نامنظم بوده و مدل فیزیکی مورد استفاده برای شبیه‌سازی جویچه آبیاری به واقعیت نزدیک است. لازم به ذکر است که مقدار عمق جویچه برای شبیه‌سازی یک جویچه آبیاری در حدود ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. این در حالی است که با توجه به مقدار دبی ورودی  $(0.2 \pm 0.6)$  لیتر بر ثانیه، اعماق آب در بیشترین حالت به  $3/2$  سانتی‌متر خواهد رسید.



شکل ۶. تغییرات عمق جریان در آزمایش‌های با طول‌های مختلف

(۲) آورده شده است. با توجه به متغیر بودن مقاطع رودخانه، با این روش محاسبه نمی‌توان مقادیر سرعت‌های موج سینماتیک را در طول‌های مختلف با هم مقایسه نمود اما می‌توان از نتایج به‌دست‌آمده در روندیابی سیل استفاده کرد.

معادلات پارشال فلوم‌های ۱ و ۲ اینچی در سیستم متریک در جدول (۱) آورده شده است (USBR, 2001).

جدول ۱. معادلات حاکم بر پارشال فلوم‌های ۱ و ۲ اینچی

شماره‌ی معادله	معادله‌ی در سیستم متریک	عرض گلوگاه (اینچ)
(۳۰)	$Q = 0.060358(H)^{1.54996}$	۱
(۳۱)	$Q = 0.120718(H)^{1.55002}$	۲

## نتایج

### تعیین ضریب زبری مانینگ

برای تعیین ضریب زبری مانینگ از رابطه تجربی استریکلر (رابطه‌ی ۷) استفاده شد. مقدار  $d_{50}$  خاک بستر و دیواره جویچه با استفاده از آزمایش الک و ترسیم منحنی دانه‌بندی خاک تعیین شد. شکل (۵) منحنی دانه‌بندی خاک را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۵) مقدار  $d_{50}$  خاک منطقه  $0.5$  میلی‌متر بوده و مقدار ضریب زبری مانینگ با استفاده از رابطه استریکلر  $0.42$  محاسبه شد.

درصد ماسه، سیلت و رس خاک منطقه با استفاده از آزمایش دانه‌بندی و محدوده معرفی‌شده برای اندازه ذرات ماسه ( $0.075-0.425$  میلی‌متر)، سیلت ( $0.0075-0.075$  میلی‌متر) و رس (کوچک‌تر از  $0.0075$  میلی‌متر) که توسط USDA ارائه شده است (Salahzadeh, 2010)، تعیین شد.

نتایج نشان می‌دهد که ذرات در محدوده اندازه ماسه  $93/37$  درصد و ذرات کوچک‌تر از  $0.075$  میلی‌متر که در

با استفاده از مقاطع عرضی برداشت‌شده و سطح مقطع جریان، مقادیر سرعت موج سینماتیک برای بازه‌های زمانی مشخص محاسبه و مقادیر حداکثر آن برای هر آزمایش انتخاب شد. نتایج محاسبات سرعت حداکثر موج سینماتیک در جدول



نفوذ نتایج متفاوتی را ارائه خواهند کرد.

در جدول (۴)، نتایج ارزیابی مدل‌های تلفیقی (تلفیق مدل نفوذ در روندیابی سیل) با استفاده از معادلات نفوذ و روش‌های روندیابی سیل آورده شده است. لازم به ذکر است که در هر طول، مدل تلفیقی که دارای حداکثر مقدار آماره نش-ساتکلیف و حداقل مقدار RMSE است به‌عنوان روش تلفیقی منتخب برگزیده شد تا تحلیل‌های آماری بر روی آن انجام شود. مدل‌های تلفیقی منتخب در جدول (۴) با رنگ مجزا مشخص شده است. همان‌طور که در جدول (۴) دیده می‌شود، در تمام حالات معادله هورتون عملکرد بهتری را در مدل‌سازی نفوذ داشته و مدل SCS عملکرد ضعیف‌تری را از خود نشان می‌دهد. تحقیقات Neshat and Porehkar (2007) نشان می‌دهد که عملکرد مدل هورتون در مدت‌زمان کوتاه انجام آزمایش بیشتر از عملکرد مدل SCS است.

با توجه به اینکه مدت زمان انجام آزمایش در حدود ۲۰ دقیقه است، می‌توان عملکرد بهتر مدل هورتون را به مدت زمان انجام آزمایش نسبت داد. همان‌طور که دیده می‌شود، معادله هورتون در تمام طول‌ها راندمان مناسبی را ارائه می‌کند. این در حالی است که مدل SCS نسبت به تغییرات طول حساس است به‌طوری‌که در طول‌های ۴/۷ و ۴۰ متر مقادیر راندمان مدل مبتنی بر معادله نفوذ SCS به ترتیب در حدود ۶۰ و ۷۷ درصد بوده و این مقدار برای طول ۲۰ متر در حدود ۸۶ درصد است. از طرفی در تمام آزمایش‌ها، روش روندیابی اینرسی صفر نتایج بهتری را ارائه می‌کند.

هیدروگراف‌های خروجی مشاهداتی و بهینه‌سازی شده بر اساس روش‌های تلفیقی منتخب در بازه زمانی یکسان ۱۱۴۱ ثانیه از آغاز انجام آزمایش در شکل (۷) آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، هیدروگراف‌های بهینه‌سازی شده و مشاهداتی بر یکدیگر منطبق شده‌اند که با توجه به مقادیر آماره نش-ساتکلیف و RMSE روش‌های تلفیقی منتخب در جدول (۴) انطباق هیدروگراف‌های خروجی مشاهداتی و بهینه‌سازی شده قابل‌انتظار است.

از طرفی با افزایش طول، مقادیر دبی‌های نفوذ کاهش می‌یابند و هیدروگراف‌های خروجی مشاهداتی و بهینه‌سازی شده به دلیل کاهش هد هیدرواستاتیکی آب در سطوح بالاتری قرار می‌گیرند.

نمودارهای همگرایی خطای نسبی بهینه‌سازی برای روش‌های تلفیقی منتخب در بازه زمانی یکسان ۱۲۰۰ ثانیه از آغاز آزمایش در شکل (۸) ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل (۸) دیده می‌شود در روش‌های تلفیقی منتخب، مقادیر

جدول ۲. مقادیر حداکثر سرعت موج سینماتیک

طول (متر)	Ck <sub>max</sub> (m/s)
۴/۷	۰/۲۳۶
۲۰	۰/۲۹۹
۴۰	۰/۲۹۴

برای هر یک از روش‌های روندیابی، مقادیر ضرایب نفوذ در معادلات SCS و هورتون در طول‌های مختلف انجام آزمایش، بهینه یابی شد. در جدول (۳) مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی نفوذ معادلات SCS و هورتون آورده شده است.

جدول ۳. ضرایب بهینه‌یابی شده معادلات نفوذ

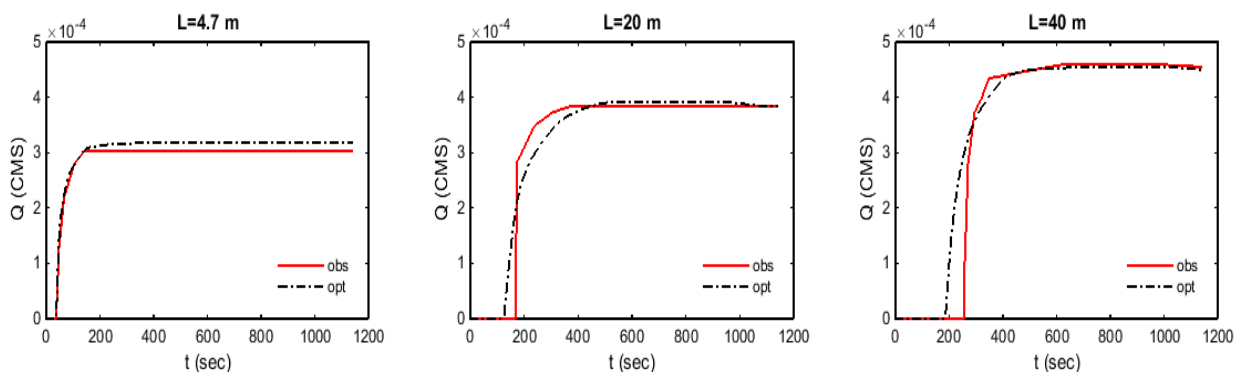
SCS			
طول (m)	a	B	C
۴/۷	۰/۹۶۴	۰/۹۷۸	۰/۶۹۸۵
۲۰	۰/۴۲	۰/۸۴۷	۰/۶۹۸۵
۴۰	۰/۱۷	۰/۷۸۱	۰/۶۹۸۵
Horton			
طول (m)	F <sub>0</sub> (mm/hr)	F <sub>c</sub> (mm/hr)	K (min <sup>-1</sup> )
۴/۷	۷۰۸	۵۸۲	۰/۷۵
۲۰	۷۸۷	۱۴۳	۰/۷۵
۴۰	۹۰۵	۴۴	۰/۷۵

به‌منظور ارزیابی دقت روش‌های روندیابی، ضرایب معادلات نفوذ برای تمام روش‌ها یکسان در نظر گرفته شد. با توجه به جدول (۳) دیده می‌شود که با افزایش طول مقادیر ضرایب معادله SCS کاهش می‌یابند.

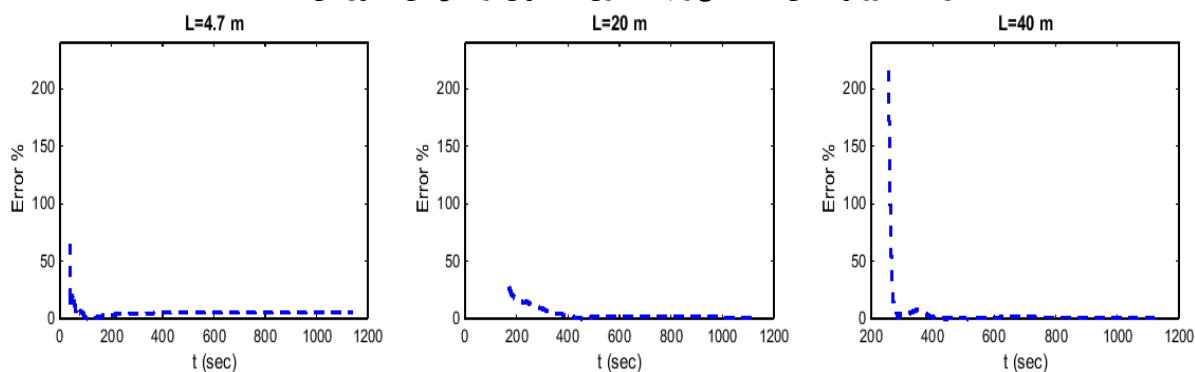
از طرفی در معادله هورتون، سرعت نفوذ نهایی با افزایش طول تغییرات بیشتری را نسبت به سرعت نفوذ اولیه از خود نشان می‌دهد. در حالت کلی می‌توان به این نکته اشاره نمود که تغییرات طول جویچه تأثیر معنی‌داری را بر مقدار ضرایب معادلات نفوذ هورتون و SCS می‌گذارد. به بیانی دیگر حساسیت مدل‌های نفوذ مورد استفاده با تغییر طول از ۵ متر به ۲۰ و ۴۰ متر سبب ایجاد تغییرات زیادی در ضرایب معادلات نفوذ می‌شود.

همان‌طور که اشاره شد در تحقیق انجام‌شده توسط Habibikhavah *et al.* (2008)، مقدار ضرایب هیدرودینامیکی نفوذ در آبیاری جویچه‌ای حساسیت بالایی به تغییرات طول و تغییرات دبی از خود نشان دادند. همچنین در تحقیق Ojaghloo *et al.* (2008) بررسی معادلات نفوذ به‌منظور پیش‌بینی فاز پیشروی در آبیاری جویچه‌ای نشان داد که ضرایب نفوذ به تغییرات طول حساس هستند و در طول‌های مختلف، معادلات

خطای مدل با سرعت بالایی به صفر همگرا می‌شوند. مناسب استفاده شود. با توجه به اینکه داده‌های دبی نفوذ در هریک از طول‌ها مستقل هستند، آزمون من-ویتنی در سطح ۹۵ درصد برای این قضاوت انتخاب شد. طول بر تغییرات دبی نفوذ، لازم است که از یک آزمون آماری برای قضاوت در خصوص معنی‌دار بودن تأثیر تغییرات طول بر تغییرات دبی نفوذ، لازم است که از یک آزمون آماری



شکل ۷. هیدروگراف‌های مشاهداتی و بهینه‌سازی شده برای آزمایش‌های با طول‌های مختلف



شکل ۸. نمودارهای همگرایی خطا برای روش‌های تلفیقی منتخب

جدول ۴. ارزیابی روش‌های تلفیقی تخمین هیدروگراف خروجی

طول (m)	روش تلفیقی	NS%	Ea%	RMSE (cms)
۴/۷	SCS-KW	۶۰/۲۴	۱۳/۹۲	$\times 10^{-3}$ ۳/۸۱
	SCS-DW	۶۱/۰۹	۱۳/۶۰	$\times 10^{-3}$ ۳/۷۷
	SCS-MC	۶۰/۸۲	۱۳/۷۴	$\times 10^{-3}$ ۳/۷۰
	Horton-KW	۹۴/۲۵	۵/۱۰	$\times 10^{-3}$ ۱/۴۵
	Horton-DW	۹۴/۵۴	۴/۸۸	$\times 10^{-3}$ ۱/۴۱
	Horton-MC	۹۳/۲۱	۵/۶۸	$\times 10^{-3}$ ۱/۵۸
۲۰	SCS-KW	۸۶/۸۴	۴/۱۶	$\times 10^{-3}$ ۴/۹۰
	SCS-DW	۸۷/۲۶	۴/۱۹	$\times 10^{-3}$ ۴/۸۴
	SCS-MC	۸۶/۹۶	۴/۱۷	$\times 10^{-3}$ ۴/۹۰
	Horto-KW	۹۴/۶۶	۳/۵۴	$\times 10^{-3}$ ۳/۱۴
	Horton-DW	۹۴/۷۹	۳/۵۶	$\times 10^{-3}$ ۳/۱۰
	Horton-MC	۹۴/۷۱	۳/۵۵	$\times 10^{-3}$ ۳/۱۳
۴۰	SCS-KW	۷۷/۵۳	۴/۷۵	$\times 10^{-3}$ ۸/۹۰
	SCS-DW	۷۸/۵۹	۴/۷۲	$\times 10^{-3}$ ۸/۷۵
	SCS-MC	۷۷/۸۳	۴/۷۴	$\times 10^{-3}$ ۸/۹۰
	Horton-KW	۹۱/۴۲	۳/۵۷	$\times 10^{-3}$ ۵/۵۴
	Horton-DW	۹۱/۸۲	۲/۹۴	$\times 10^{-3}$ ۵/۴۱
	Horton-MC	۹۱/۵۳	۲/۹۶	$\times 10^{-3}$ ۵/۵۰

هر یک از این ضرایب نسبت به طول انجام آزمایش به دست آمد. معادلات خطوط رگرسیون به دست آمده در جدول (۷) آورده شده است.

جدول ۷. خطوط رگرسیون ضرایب نفوذ و بررسی همبستگی

ضریب	معادله رگرسیونی	R <sup>2</sup>
f <sub>0</sub>	f <sub>0</sub> = ۶۷۹/۳ + ۵/۵۹۲L	۹۹/۸
f <sub>c</sub>	$\frac{1}{\sqrt{f_c}} = ۰/۰۹۸۲ + ۰/۰۰۴۶L$	۱۰۰

به نظر می‌رسد که با توجه به ضرایب L در معادله رگرسیونی f<sub>c</sub>، خط رگرسیونی مناسب نباشد اما باید توجه داشت که اولاً این معادله برای متغیر وابسته به صورت غیرخطی است و ثانیاً با قرار دادن طول‌های بلند در معادله مذکور، تأثیر طول بر ضریب f<sub>c</sub> معنی‌دار خواهد شد.

آزمون‌های فرض برای بررسی خطوط رگرسیون نتایج جدول (۸) را تولید می‌کنند. یادآوری می‌شود که فرض صفر در آزمون خط رگرسیون، مناسب نبودن خط رگرسیون است. از طرفی فرض صفر در آزمون ضرایب خط رگرسیون به این معنی است که ضرایب خط رگرسیون باید برابر با صفر باشند.

جدول ۸. آزمون‌های فرض روی خطوط رگرسیون

ضریب	P ضریب ثابت	P ضریب متغیر مستقل
f <sub>0</sub>	۰/۰۰۵	۰/۰۲۴
f <sub>c</sub>	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳

با توجه به مقادیر p-value به دست آمده، خط رگرسیون خط مناسبی است و ضرایب آن به درستی تعیین شده است. از طرفی میانگین باقی‌مانده‌ها برای تمامی خطوط رگرسیون برابر با صفر بوده و مقدار p-value برای آزمون نرمال بودن توزیع باقی‌مانده‌ها برای هر سه معادله برابر با ۰/۱۱۱ است و باقی‌مانده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. باقی‌مانده‌ها دارای واریانس ثابت و استقلال هستند. با توجه به تمامی ارزیابی‌های انجام شده خطوط رگرسیون قابل اعتماد هستند. برای ارزیابی خطوط رگرسیون ارائه شده، مقدار ضریب نیکویی برازش MAPE در روش‌های تلفیقی منتخب محاسبه و نتایج آن در جدول (۹) آورده شد.

جدول ۹. نتایج ارزیابی خطوط رگرسیون بر اساس MAPE

طول (متر)	MAPE%
۴/۷	۰/۱۳
۲۰	۱/۴۷
۴۰	۰/۸۶

### آزمون آماری من ویتنی

با توجه به روش‌های تلفیقی انتخاب شده بر اساس جدول (۴)، برای طول‌های مختلف ۴/۷، ۲۰ و ۴۰ متر، مقادیر دبی ورودی یکسان ۰/۰۲ ± ۰/۰۶ و بازه‌های زمانی یکسان ۱۱۴۱ ثانیه، دبی‌های نفوذ برآورد شده به ازای هر ثانیه در آزمون آماری من ویتنی شرکت داده شدند. نتایج این آزمون برای طول‌های مختلف در جدول (۵) آورده شده است. نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که در تمام حالات مقایسه‌ای، مقادیر p-value کمتر از ۰/۰۵ بوده و با رد فرض صفر، تغییر طول تأثیر معنی‌داری بر تغییرات دبی نفوذ دارد. در واقع با تغییر طول، مقادیر دبی نفوذ در کل بازه، علی‌رغم ثابت بودن تمام پارامترهای دبی ورودی، در بازه زمانی مورد بررسی تغییر می‌کنند.

جدول ۵. نتایج آزمون آماری من ویتنی برای دبی‌های نفوذ

p-value	برآورد نقطه‌ای میانها (cms)	طول‌های مورد بررسی (m)
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۶	۴/۷-۲۰
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱۵	۴/۷-۴۰
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۹	۲۰-۴۰

برای بررسی تأثیر طول بر مقادیر دبی نفوذ در کل بازه مورد مطالعه، پارامترهای آماری پارامتریک و ناپارامتریک معرف مرکز ثقل داده‌ها محاسبه شد. نتایج این محاسبات در جدول (۶) آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، داده‌ها دارای چولگی بوده و معیار میانگین توانایی لازم در معرفی مرکز ثقل داده‌ها را ندارد. از این رو معیار باثبات میانگین هندسی به عنوان معیار مرکزی داده‌ها در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۶. آماره‌های معرف مرکز دبی‌های نفوذ

طول (m)	میانگین هندسی (cms)	میانگین (cms)	میانگین (cms)
۴/۷	۰/۰۰۰۳۰۴	۰/۰۰۰۲۹۹	۰/۰۰۰۳۰۴
۲۰	۰/۰۰۰۳۰۹	۰/۰۰۰۲۳۵	۰/۰۰۰۲۸۱
۴۰	۰/۰۰۰۳۴۴	۰/۰۰۰۱۴۷	۰/۰۰۰۲۲۱

با توجه به جدول (۶)، با افزایش طول به دلیل کاهش هد آب، مقادیر دبی نفوذ کاهش خواهند یافت.

### استخراج مدل‌های رگرسیونی

با استفاده از اصول آماری برای ارائه‌ی خط رگرسیون مناسب، داده‌های ضریب f<sub>0</sub> و f<sub>c</sub> در معادله هورتون (معادله منتخب روش‌های تلفیقی) در نظر گرفته شده و خطوط رگرسیون برای

در روندیابی هیدرولیکی جریان دارد.

مقایسه‌ی آماره‌های معرف مرکز داده‌های دبی نفوذ نشان می‌دهد که با افزایش بازه طولی موردبررسی، مقادیر دبی نفوذ به دلیل کاهش مقدار هد هیدرواستاتیکی آب کاهش می‌یابند. مدل‌های رگرسیونی ارائه‌شده برای تعیین ضرایب معادلات نفوذ بر اساس طول‌های موردبررسی با مقادیر MAPE کمتر از ۲ درصد، مدل‌هایی دقیق هستند اما باید با استفاده از آزمایش‌های بیشتر این مدل‌ها را بهبود بخشید.

#### نمادها:

KW : مدل موج سینماتیک،  
 DW : مدل اینرسی صفر،  
 MC : مدل ماسکینگام-کونژ،  
 Ea : متوسط خطای نسبی،  
 RMSE : ریشه میانگین مربعات خطا.

#### REFERENCES

Abasizadeh, M., Mahdavi, M. and Salajghe, A. (2010). Evaluation of hydrologic routing methods in DEZ river. *Natural geographic journal*. (In Farsi)

Abbasi, F., Simunek, J., van Genuchten, M. T., Feyen, J., Adamsen, F. J., Hunsaker, D. J., Strelkoff, T. S. and Shouse, P. (2003). Overland water flow and solute transport: model development and field-data analysis. *Irrigation and Drainage Engineering journal*. 129(2), 71-81. (In Farsi)

Alizadeh, A. (2002). Applied hydrology. RAZAVI publication. (In Farsi)

Allen, JB. And Brand, HJ. (1968). How cracks and initial moisture content affect infiltration in Sharkey clay. *Agric Engin* (49), 589-594.

Bahrami, M., Boroomand Nasab, S. and Naseri, A. (2009). Comparison of Muskingum – Cunge model with irrigation hydraulic models in estimation of furrow irrigation advance phase. *Iranian Journal of Irrigation and drainage*. 2(3), 40-49. (In Farsi)

Chaudhry, M.H. (2008). Open\_Channel Flow. New York: Springer Science.

Chow, V. T. (1959). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill. New York.

Ebrahimiyan, H., and Liaghat, A. (2011). Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. *Soil and Water Research*, 6(2), 91-101. (In Farsi)

Habibikhavah, M., Montazer, AA. and Behbahani, MR. (2008). Sensitivity analysis of infiltration parameters with different estimation methods in furrow irrigation. Second seminar on improvement of surface irrigation systems, Karaj, Iran. (In Farsi)

Haverkamp, R., Rendon, L. and Vachaud, G. (1987). Infiltration equations and their applicability for

همان‌طور که در جدول (۹) دیده می‌شود، مقدار آماره MAPE برای خطوط رگرسیون در تمام آزمایش‌ها کمتر از ۲ درصد بوده و می‌توان از خطوط رگرسیون برای تخمین هیدروگراف‌های خروجی و مقادیر نفوذ استفاده نمود.

#### نتیجه‌گیری

با توجه به خروجی‌های مدل پیشنهادی و نتایج آزمایش‌های صحرایی، به‌صورت کلی نکات زیر قابل بیان است:  
 در آزمایش‌های انجام‌شده معادله نفوذ هورتون بهترین نتایج را ارائه می‌کند که با توجه به سایر تحقیقات انجام‌شده در این زمینه، می‌توان دلیل آن را در کوتاه بودن مدت‌زمان انجام آزمایش‌ها دانست.  
 روش روندیابی موج پخشیدگی (اینرسی صفر) با توجه به اینکه فیزیک مسئله را بهتر مدل می‌کند دارای نتایج بهتری نسبت به روش‌های ماسکینگام-کونژ و موج سینماتیک است.  
 انتخاب حداکثر سرعت موج سینماتیک نتایج مطلوبی را

predictive use. In: Fok Y. (ed). International Conference on Infiltration Development and Application, 6-8 January, Honolulu, Hawaii, USA, pp. 142- 152.

Hillel, D. (1988). Environmental soil physics Acad. Press. UK.

Mahmoodian shoushtari, M. (2008). Open channel flow principles. chamran university publication. (In Farsi)

Moradi, H., Vafakhah, M. and Akbari, A. (2007). Evaluation of routing by Muskingum and Muskingum-cunge method in LIGHVAN River. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*. 41(b). (In Farsi)

Nasseri, A., Neyshabouri, MR., Fakherifard, A., Mogaddam, M. and Nazem, AH. (2004). Fieldmeasured furrow infiltration function. *Turk. J Agric* 28, 93-99 (In Farsi)

Neshat, A. and PAREHKAR, M. (2007). The comparison of methods for determining the vertical infiltration rate. *J. Agric. Sci. Natur. Resour*. 14(3). (In Farsi)

Ojaghloo, H., Ghobadina, M., Majdzadeh, B., Sohrabi, T. and Abbasi, F. (2008). Estimation of infiltration parameters for flow simulation in furrow irrigation. Second seminar on improvement of surface irrigation systems, Karaj, Iran. (In Farsi)

Rawls, WJ. (1993). Infiltration and soil water movement. In: Maidment D.R. (ed). Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, New York, USA, Chapter 5, pp. 1/5- 51/5.

Shayannejad, M., Akbari, N. and Honarbakhsh, A. (2014). Comparing of linear Muskingum method with HEC-RAS model for flood routing in rivers.

*Journal of ecology*, 2. (In Farsi)  
Salahzadeh, H. (2010). Principles of geotechnical engineering, 2nd ed. Iran University of science and technology publishing center. (In Farsi)

U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2001). water measurement manual, Washington DC: U.S. Government printing Office.