



## A Simulation-Optimization Approach for Reducing Seepage Rate in Water Conveyance Canals

M. Mohammad Rezapour Tabari<sup>1\*</sup>  
and M. Mazak Mari<sup>2</sup>

### Abstract

The optimal design of water conveyance canal sections is one of the guidelines in management of water resources. Design of canal section with minimum loss of water is to consider minimizing seepage and evaporation under uniform flow condition. So far, the optimal design of canal sections was based on inaccurate estimates of seepage rate which needs to be revised. In this study, the seepage from a canal in miscellaneous conditions was modeled using SEEP/W software. The accurate soft model between input and output data was then extracted. Comparing the extracted soft model with other empirical equation, indicate the high accuracy of the selected soft model. This model were then used in optimization process with the aim of minimizing the canal water loss. The results are presented in terms of dimensionless graphs which made a simple design of canal dimensions possible. Comparing the results with other similar studies indicated the significant changes in optimal canal dimension.

**Keywords:** Optimal dimension, Canal, Water loss, Seepage, Optimization.

Received: December 14, 2014

Accepted: July 24, 2015

## رویکرد شبیه‌سازی و بهینه‌سازی جهت حداقل نمودن میزان نشت از کانال‌های انتقال آب

محمود محمد رضاپور طبری<sup>۱\*</sup> و محسن مزک ماری<sup>۲</sup>

### چکیده

از جمله دستورالعمل‌های مدیریت صحیح منابع آب، طراحی بهینه مقاطع کانال‌های انتقال آب است. طراحی مقطع کانال با کمترین میزان تلفات آب شامل کمینه کردن میزان نشت و تبخیر از کانال تحت شرایط جریان یکنواخت در کانال می‌باشد. تا کنون طراحی بهینه مقاطع کانال بر اساس روابطی با خطای بالایی در تخمین میزان نشت بوده که می‌بایست مورد بازنگری قرار گیرد. در این تحقیق به کمک بسته نرم‌افزاری SEEP/W، میزان نشت در کانال برای حالت‌های مختلف مدلسازی و پس از آن مناسب‌ترین مدل نرم بین داده‌های ورودی و خروجی استخراج خواهد شد. این مدل با سایر روابط تجربی مقایسه و ضمن تأیید صحت دقت بالایی تخمین نشت توسط آن، از آن به عنوان روشی دقیق‌تر در فرآیند بهینه‌سازی با هدف کمینه کردن تلفات آب از کانال مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج مطالعه در قالب نمودارهایی بی‌بعد ارائه می‌شود که امکان طراحی ساده ابعاد کانال را فراهم می‌نماید. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با سایر تحقیقات مشابه، نشان‌دهنده تغییرات قابل ملاحظه ابعاد بهینه کانال بین تحقیق حاضر با سایر تحقیقات به دلیل استفاده از روش پیشنهادی تخمین نشت می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** ابعاد بهینه، کانال، تلفات آب، نشت، بهینه‌سازی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۹/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۵/۲

1- Assistant Prof., Department of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, E-mail: mrtabari@eng.sku.ac.ir

2- M.Sc. Student in Civil Engineering - Hydraulic Structures, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

\*- Corresponding Author

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهرکرد.

\*- نویسنده مسئول

شبکه‌های آبیاری عموماً با هدف انتقال آب از رودخانه یا منبع ذخیره به دشت و توزیع آن بین کشاورزان ساخته می‌شوند. لذا باید همیشه از نظر آب ورودی و خروجی در کنترل باشند (سهرابی و همکاران، ۱۳۸۴). با این تفاسیر واضح است که با گسترش شبکه‌های آبیاری و افزایش سطح زیرکشت، مسأله کمبود آب و استفاده بهینه از آن نیز مطرح می‌گردد. در شبکه‌های آبیاری ایران، راندمان آبیاری بسیار پایین بوده و حتی کمتر از ۳۰ درصد است. لذا می‌بایست با تدوین سیاست‌های دقیق توزیع آب و آموزش کشاورزان بازده آبیاری را افزایش داد. تلفات آب در یک شبکه آبیاری به صورت‌های مختلف از جمله نشت رخ می‌دهد. برخی از روش‌های تجربی تخمین میزان نشت عبارتند از: معادله Ingham، معادله Oleswerth & Yennidumia، روش Misra، معادله Affengendon، معادله Davis Wilson، معادله Moritz، معادله Indian و رابطه‌ای که توسط Swamee در سال ۲۰۰۰ ارائه شده است (Kraatz, 1977, Swamee et al., 2002).

باید دانست که به منظور توجیه فنی پوشش انهار خاکی، باید میزان نشت مورد بررسی قرار گیرد. این امر در بعضی از شبکه‌های آبیاری مختلف کشور با استفاده از روابط تجربی انجام شده است. در حال حاضر طراحان و دست‌اندرکاران ساخت و ساز شبکه‌های مدرن آبیاری در کشور با استفاده از این معادلات، اقدام به محاسبه نشت آب از کانال می‌نمایند (سالمی و سپاسخواه، ۱۳۸۵). این معادلات برای مناطق خاصی به دست آمده‌اند که لازم است برای مناطق مختلف مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گیرند. باید توجه داشت که روابط فوق تنها راه حل جهت تخمین میزان نشت از کانال نبوده و روش‌های دیگری نیز وجود دارد که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. نوری محمدیه و همکاران (۱۳۸۹) به ارزیابی روش‌های تجربی Ingham، Davis Wilson، Moritz، Oleswerth & Yennidumia و روش Misra نسبت به روش ذخیره آب در کانال خاکی پرداخته و نتایج نشان داد که در بین روش‌های تجربی، روش‌های Misra و Moritz دقت قابل قبولی در تخمین نشت در دشت قزوین داشته است.

Swamee and Kashyap (2001) با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، میزان نشت از کانال‌های بی‌گوشه در حالتی که سطح آب زیرزمینی در عمق بی‌نهایت قرار دارد را به دست آوردند و تحقیقات آنها در این زمینه منجر به ارائه‌ی دیاگرام‌هایی شد که Kacimov (2003) با جزییات بیشتری این دیاگرام‌ها را توضیح داده است.

(Salemi and Sepaskhah 2000) معادلات تجربی تخمین نشت آب از کانال‌های خاکی در شبکه آبیاری دشت برخوار استان اصفهان را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که مناسب‌ترین معادلات برآورد نشت آب از کانال‌های این شبکه، معادله دیویس-ویلسون و پس از آن مولس ورث ینی‌دومیا می‌باشد. حیدری‌زاده (۱۳۸۷) با مقایسه مقادیر نشت کانال‌های خاکی منطقه رودشت با معادله تجربی Ingham و معادله تئوری نشت ودرینی‌کوف، به واسنجی ضرایب این دو معادله پرداخت. بهراملو در سال ۱۳۹۰ در مطالعه‌ای موردی در استان همدان اقدام به ارزیابی تلفات نشت در کانال‌های آبیاری با پوشش سنگی در مناطق سردسیر و تأثیر آن بر ذخایر منابع آب پرداخته است. همچنین ایشان در سال ۱۳۹۱ در تحقیقی دیگر تأثیر پوشش بتنی بر کنترل تلفات نشت آب از کانال‌های آبیاری استان مذکور را مورد بررسی قرار داده است. در این تحقیق تأثیر پوشش بتنی در کنترل تلفات آب نسبت به قبل از پوشش‌کاری ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین میانگین تلفات نشت از کانال‌های بتنی و بدون پوشش مشاهده نشده است. بر اساس تحقیقات فوق، واضح است که روابط ارائه شده در تخمین میزان نشت دارای دقت کافی نبوده و نقص‌شان عدم استفاده در موقعیت‌های مختلف جغرافیایی است، بنابراین تلاش برای تخمین دقیق‌تر میزان نشت از کانال منجر به ارائه تحقیقاتی گردید که در آنها از روش‌های نوینی برای محاسبه نشت استفاده شده است.

(Chahar 2007) از یک روش تحلیلی دقیق برای ارزیابی میزان نشت از یک کانال دوزنقه‌ای استفاده نمود. وی بیان کرد که روش پیشنهادی برای تعیین میزان نشت مؤثر بوده و بر اساس آن می‌توان مقدار تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی از کانال‌های چند ضلعی را به دست آورد. Kinzli (2010) با استفاده از داده‌های دستگاه ADCP<sup>۱</sup> به تخمین میزان نشت از کانال‌های آبیاری پرداخته و بر اساس مشخصات هندسی کانال و سرعت جریان، رابطه تخمین نشت از کانال‌ها را ارائه نمودند. Pognant (2013) به کمک روش القاء الکترومغناطیس<sup>۲</sup> اقدام به اندازه‌گیری میزان نشت از کانال‌های آبیاری نمود و نتایج، حاکی از مناسب بودن این روش در تخمین میزان نشت از کانال در کاوش‌های میدانی است.

(Rostamian and Abedi koupai 2012) به کمک مدل نرم‌افزاری SEEP/W میزان نشت آب در کانال‌های خاکی را مورد مطالعه قرار داده و به همین منظور میزان نشت توسط مدل SEEP/W شبیه‌سازی شده و با نتایج روش بیلان آبی مقایسه گردید. ملک‌پور و همکاران (۱۳۸۵)، به بررسی اثر سطح آب زیرزمینی و ضخامت لایه آبدار بر

میزان نشت معکوس به کانال با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W پرداختند. در خصوص بررسی بازده انتقال آب در شبکه‌های آبیاری و ارائه راهکارهایی نظیر مدیریت و طراحی بهینه، تحقیقات گسترده‌ای نیز صورت گرفته است.

(Swamee et al. 2000) با استفاده از روابط بیان شده توسط Har (1962) و Mori-Sytoks (1964)، موفق به یافتن رابطه‌ای صریح برای محاسبه نشت از کانال‌ها شدند که از آن در بهینه‌سازی غیرخطی مقطع کانال برای کمینه کردن تلفات نشت از کانال استفاده کرده‌اند. این گروه در سال ۲۰۰۲ طراحی اقتصادی کانال را بررسی کرده‌اند. در این تحقیق تلفات نفوذ و تبخیر در قالب هزینه تحلیل شده و بر اساس رابطه‌ای غیر از رابطه مانینگ اقدام به بهینه‌سازی نمودند (Swamee et al. 2002a).

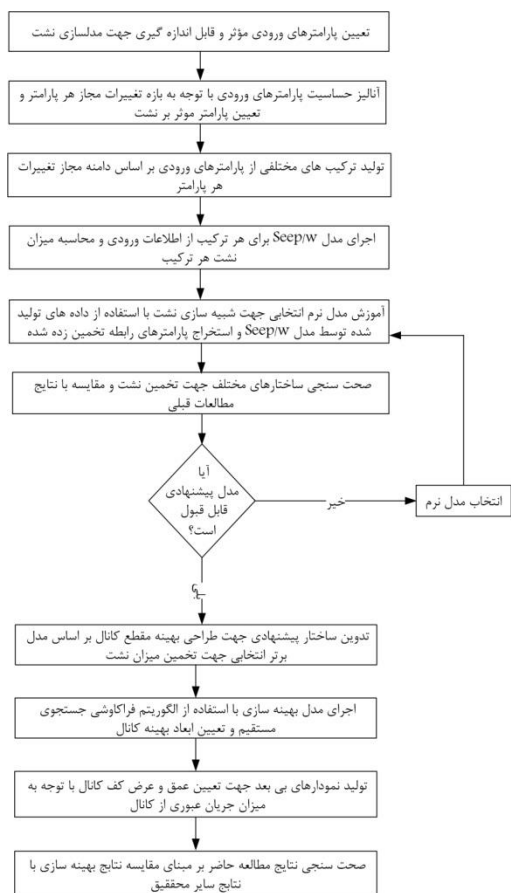
همچنین (Swamee et al. 2000) اقدام به طراحی بهینه کانال جهت کمینه کردن تلفات آب از کانال به دو صورت تبخیر و نفوذ نمودند. آنها علاوه بر دستاوردهای خود در خصوص نشت آب در سال ۲۰۰۰، با استفاده از روابطی میزان تبخیر از سطح آب را نیز در معادلات خود برای بهینه‌سازی به کار گرفته‌اند (Swamee et al. 2002b).

(Chahar 2007) نیز در اقدامی مشابه برای مقطع منحنی‌الخط بر اساس رابطه مانینگ و روابط موجود برای محاسبه تلفات نشت از کانال، بهینه‌سازی نشت را مورد مطالعه قرار داد. همچنین (Ghazaw 2011) با بیان اینکه نفوذ و تبخیر عامل اصلی تلفات آب در یک شبکه آبیاری هستند اصولی برای تعیین ابعاد بهینه برای یک دبی مشخص به دست آورده و نتایج را به کمک یک سری نمودار ارائه نمود. در پی تحقیقات (Ghazaw 2011)، Mohammad Reazpor Tabari et al. (2014) نیز در تحقیقی کامل‌تر و جامع‌تر نسبت به (Ghazaw 2011) اقدام به بهینه‌سازی مقطع کانال‌های آبیاری نموده‌اند. در این تحقیق علاوه بر کمینه کردن هزینه تلفات آب از کانال، اثرات هزینه‌های ساخت نیز در فرآیند بهینه‌سازی لحاظ گردید. با توجه به اینکه تاکنون تلاش‌های فراوانی جهت ارائه روشی مناسب در تخمین دبی نشت به عمل آمده، اما در این زمینه روش دقیقی از لحاظ صحت تخمین ارائه نشده است. باید توجه داشت که طراحی بهینه مقاطع کانال‌ها که به نوعی در فرآیند بهینه‌سازی آنها از روابط نشت مذکور استفاده شده است، خالی از اشکال نبوده و می‌بایست راه‌حل مناسبی جهت رفع ایراد وارده اتخاذ نمود. این در حالی است که نرم‌افزارهایی مانند Geo-Studio

زیر شاخه SEEP/W توانایی بالایی در تخمین میزان نشت آب از کانال را دارد ولی با توجه به زمان‌بر بودن شبیه‌سازی توسط این نرم‌افزار، در این تحقیق روشی ارائه گردید که بتواند با توجه به پارامترهای ورودی به مدل Geo-Studio، میزان نشت محاسبه شده در نرم‌افزار را به راحتی و با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرده و در نهایت با بکارگیری آن در مراحل بهینه‌سازی مقطع کانال با هدف کمینه کردن تلفات آب از مقطع آن، گام موثری در رفع مشکل وارده به نتایج تحقیقات قبلی برداشته شود. به عبارت دیگر، در این مطالعه با استفاده از یکی از ابزارهای نرم موجود که از دقت بالایی در تخمین میزان نشت تحت شرایط مختلف بهره‌برداری در کانال را دارد، شبیه‌سازی نشت به جای استفاده از روابط تجربی و تئوری موجود انجام گردید و در فرآیند بهینه‌سازی جهت تخمین ابعاد بهینه کانال‌ها مورد استفاده قرار گرفت. جهت کاربردی نمودن نتایج حاصله، نمودارهای بی‌بعد بر پایه مقادیر بهینه ابعاد کانال تهیه شده تا براساس آن بتوان مقادیر بهینه ابعاد کانال را بدون اجرای مجدد ساختار پیشنهادی تعیین و مورد استفاده قرار داد. بر اساس توضیحات ارائه شده فوق، می‌توان نوآوری تحقیق حاضر را در استفاده از مدل SEEP/W جهت شبیه‌سازی میزان نشت با دقت بالاتر (با توجه به در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر نشت همچون اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی با کف کانال که در مطالعات قبلی عمدتاً بر پایه روش‌های تجربی و نامحدود در نظر گرفتن این اختلاف استوار بوده است و منجر به تخمین کمتر میزان نشت محاسباتی می‌گردید)، کاهش زمان اجرای مدل تعیین ابعاد بهینه کانال با توجه به برقراری ارتباط بین مدل شبیه‌سازی نشت و ساختار مدل بهینه‌سازی و ارائه نمودارهای بی‌بعد جهت تعیین ابعاد بهینه بدون اجرای مجدد مدل پیشنهادی بهینه‌سازی ابعاد کانال دانست.

## ۲- مواد و روش اجرا

همانطور که در بخش قبل اشاره شده، عدم ارائه رابطه‌ای دقیق و کارا در شرایط مختلف جغرافیایی جهت تخمین میزان نشت از کانال از سوی محققین، نیاز به روشی مناسب در تخمین میزان نشت را ضروری نموده، تا ضمن رفع مشکل مذکور، تحقیقات وابسته چون بهینه‌سازی مقطع کانال را که با استفاده از آن صورت می‌گیرد، با دقت بیشتری انجام داد. این در حالی است که روش‌های نوینی چون مدل‌سازی در نرم‌افزارها می‌تواند فارغ از شرایط جغرافیایی منطقه، میزان نشت را با دقت بالاتری نسبت به روش‌های قدیمی مذکور تخمین بزنند. یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در این زمینه، Geo-Studio می‌باشد. لذا با توجه به رویکرد این تحقیق، از این نرم‌افزار جهت رسیدن به روشی



شکل ۱- الگوریتم رویکرد تحقیق

نحوه کار بدین صورت است که می‌بایست توسط نرم‌افزار Geo-Studio میزان نشت از کانال را به دست آورده و با مقدار واقعی اندازه‌گیری شده (جدول ۱)، مقایسه گردد. در صورتی که بین مقدار نشت تخمین زده شده و مقدار واقعی اندازه‌گیری شده تفاوتی منطقی وجود داشته باشد، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد نرم‌افزار قابل قبول بوده و میزان نشت دقیق تخمین زده می‌شود. لازم به ذکر است که در بررسی‌های صورت گرفت، به کمک شاخص آماری خطای میانگین مطلق باقی‌مانده (MAE)<sup>۳</sup> مقایسه‌ای بین میزان تخمین زده شده نشت با نرم‌افزار و سایر روابط موجود صورت گرفته که نتایج آن در شکل ۲ ارائه شده است.

مطابق شکل ۲ مشاهده می‌گردد نرم‌افزار منتخب دارای کمترین میزان خطای میانگین مطلق باقی‌مانده در تخمین میزان نشت از کانال بوده که این موضوع دلیلی بر صحت عملکرد نرم‌افزار می‌باشد.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{mi} - x_{ci}|}{n} \quad (1)$$

مناسب در تخمین نشت استفاده شده است. برای رسیدن به اهداف تحقیق مطابق با فلوجارت رویکرد تحقیق در شکل ۱، لازم است ابتدا پارامترهای لازم مؤثر در تخمین نشت به کمک نرم‌افزار شناسایی و سپس به کمک آنالیز حساسیت از میزان و دامنه‌ی اثر هر پارامتر آگاهی کافی یافت. پس از آنالیز حساسیت ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای ورودی و بر اساس دامنه مجاز تغییرات هر پارامتر تهیه، و به دنبال آن هر ترکیب به کمک SEEP/W مدل‌سازی می‌گردد. در هر مدل‌سازی، ابعاد کانال و خصوصیات خاک بستر و اختلاف تراز آب زیرزمینی با کف کانال و عمق آب در کانال به عنوان پارامترهای ورودی و میزان نشت به عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شده است. هر ترکیب مدل شده نیز به عنوان یک نمونه یا حالت در نظر گرفته می‌شود. پس از مدل‌سازی نشت در حالت‌های مختلف و جمع‌آوری نتایج آنها به صورت پارامترهای مستقل و وابسته، آنها را در قالب داده‌های اولیه‌ی لازم جهت تعیین شکل رگرسیونی بین آنها در نظر گرفته شده، سپس به کمک یکی از نرم‌افزارهای نرم موجود، روش تخمین نشت تعیین و پس از آن در فرآیند بهینه‌سازی با هدف کمینه‌کردن تلفات آب از کانال استفاده شده و نتایج نهایی به صورت نمودارهایی بی‌بعد ارائه گردید. در پایان جهت نشان دادن اثر تخمین دقیق نشت در بهینه‌سازی، نتایج تحقیق حاضر با نتایج برخی تحقیقات قبلی مورد مقایسه قرار گرفته است.

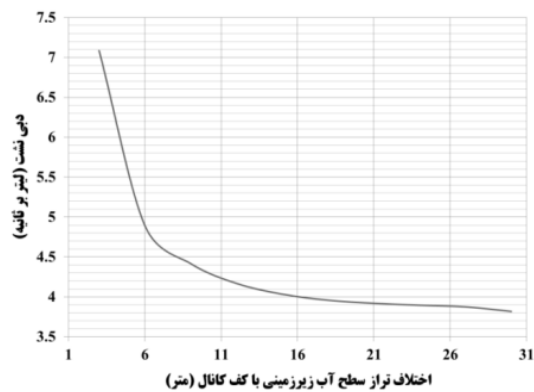
## ۱-۲- معرفی نرم‌افزار Geo-Studio

نرم‌افزار Geo-Studio از جمله برنامه‌های ژئوتکنیکی مبتنی بر المان محدود بوده که از طریق آن می‌توان آنالیزهایی از قبیل تنش-کرنش، جریان، تراوش، پایداری شیب‌ها و آنالیز دینامیکی را بررسی نمود. بخش SEEP/W از زیر شاخه‌های نرم‌افزار Geo-Studio است که در آن می‌توان شرایط تراوش و جریان آب در خاک را بررسی نمود (جوهری و پاک‌نیت، ۱۳۸۸).

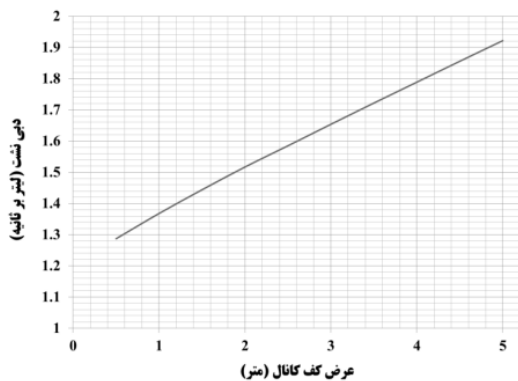
## ۲-۲- صحت‌سنجی عملکرد نرم‌افزار

در تحقیقاتی که با نرم‌افزارهای مدل‌سازی چون Geo-Studio صورت می‌گیرند، اطلاع از صحت عملکرد نرم‌افزار امری ضروری بوده که به آن در اصطلاح، صحت‌سنجی گفته می‌شود. در این راستا اطلاعات دقیقی از برخی از کانال‌های موجود در شبکه آبیاری استان اصفهان به دست آورده شد که جدول ۱ بخشی از این اطلاعات را نشان می‌دهد.

داشته‌اند، ولی تراز سطح آب زیرزمینی نسبت به کف کانال ابتدا سیری نزولی داشته و سپس اثر آن بر دبی نشت در اختلاف ترازهای بیش از ۱۰ متر تقریباً صفر بوده است. لذا در تعیین داده‌های ورودی این پارامتر سعی شده اعدادی برای مدل‌سازی انتخاب شوند که در محدوده نزولی قرار دارند.



شکل ۳- آنالیز حساسیت پارامتر اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی با کف کانال



شکل ۴- آنالیز حساسیت پارامتر عرض کف

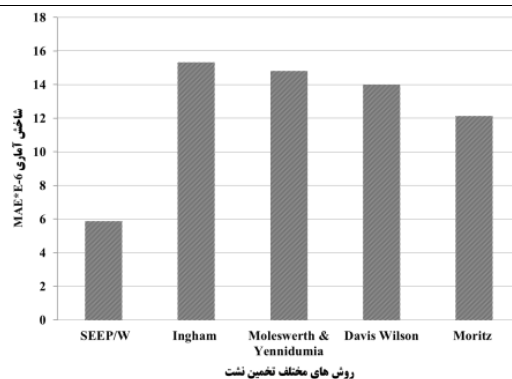
#### ۲-۴- تولید داده‌های ورودی به نرم‌افزار

بر اساس توضیحات ارائه شده، برای مدل‌سازی نشت از کانال، برای پارامترهای عمق، عرض کف و شیب جانبی کانال‌ها به ترتیب ۷، ۷ و ۳ حالت و برای اختلاف تراز بین کف کانال و سطح آب زیرزمینی ۳ حالت در نظر گرفته شد. علاوه بر موارد بیان شده تعدادی کانال مثلی که در آنها عرض کف کانال صفر است، نیز مدل‌سازی شده که در کل، تعداد حالات مدل شده توسط نرم‌افزار ۵۲۶ مورد بوده که جدول ۲ نمونه‌ای از حالات مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد. پس از تولید داده‌های ورودی به نرم‌افزار، برای هر حالت میزان دبی توسط نرم‌افزار تخمین زده می‌شود. این تخمین متناظر با داده‌های ورودی بوده و پس از تخمین دبی برای کلیه حالات، داده‌های ورودی و خروجی برای بررسی توسط مدل‌های نرم مورد استفاده قرار گرفت.

در معادله فوق متغیرهای  $X_{ci}$  و  $X_{mi}$  به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده بوده و  $N$ ، تعداد داده‌های مورد بررسی است. هر چه مقدار شاخص مذکور کمتر باشد دقت روش بالاتر خواهد بود.

جدول ۱- اطلاعات آماری مربوط به کانال‌های موجود در شبکه آبیاری استان اصفهان (Rostamian and Abedi koupai, 2012)

شماره کانال	سطح مقطع ( $m^2$ )	عرض سطح آب ( $m$ )	محیط تر شده ( $m$ )	نشت ( $m^3/m^2/day$ )	تبخیر ( $m^3/m^2/day$ )
۱	۰/۱۵۹	۱	۱/۱۶۳	۰/۴۶۴	۰/۰۰۹۲
۴	۰/۵۱۴	۲/۳۴	۲/۴۸۹	۰/۴۸۶	۰/۰۰۹۲
۶	۰/۹۷۶	۲/۹۹	۲/۹۹	۰/۴۵۶	۰/۰۰۸۴
۱۰	۰/۵۵۳	۲/۵۹۲	۲/۵۹۲	۰/۵۵۲	۰/۰۰۹
۱۱	۰/۹۰۲	۲/۶۱۲	۲/۶۱۲	۰/۵۹	۰/۰۰۹
۱۳	۰/۱۷۴	۱/۳۲۷	۱/۳۲۷	۱/۱۲۱	۰/۰۰۷۱
۱۶	۰/۵۹۲	۲/۳۴	۲/۳۴	۰/۹۵۴	۰/۰۰۷۱



شکل ۲- صحت‌سنجی مدل SEEP/W با استفاده از شاخص خطای MAE

#### ۲-۳- آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی به نرم‌افزار

بطور کلی برای بررسی و تعیین رابطه بین پارامترهای مستقل و وابسته لازم است از میزان اثر هر پارامتر مستقل در تعیین پارامتر وابسته آگاهی یافت. یکی از روش‌های مؤثر در این زمینه، آنالیز حساسیت است. این آنالیز در قالب شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است.

مطابق این شکل‌ها، پارامترهای ورودی همچون عمق، عرض و هدایت هیدرولیکی خاک بستر کانال در کل بازه‌های داده شده رابطه‌ای خطی

تقسیم شوند. سپس با مقایسه خطای نتایج شبیه‌سازی و مقدار اندازه‌گیری شده می‌توان مناسب‌ترین مدل را جهت شبیه‌سازی و تخمین نشت انتخاب نمود. جهت ارزیابی کارایی و برتری ساختار تدوین شده، از ۴ شاخص خطا که عمومیت بیشتری داشته، استفاده گردید که عبارتند از: شاخص توافق بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (IOA)<sup>۷</sup>، شاخص متوسط قدرمطلق خطاها (MAE)، شاخص مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE)<sup>۸</sup> و ضریب تبیین ( $R^2$ ). در معادلات ۲ تا ۴، متغیرهای  $x_{ci}$  و  $x_{mi}$  به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده بوده و  $\bar{x}_m$ ، متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده است. نحوه ارزیابی مدل‌ها بر اساس این شاخص‌ها به این صورت است که هر چه شاخص‌های IOA و  $R^2$  به ۱ و سایر شاخص‌ها به صفر نزدیک‌تر باشند آن مدل مطلوب‌تر است.

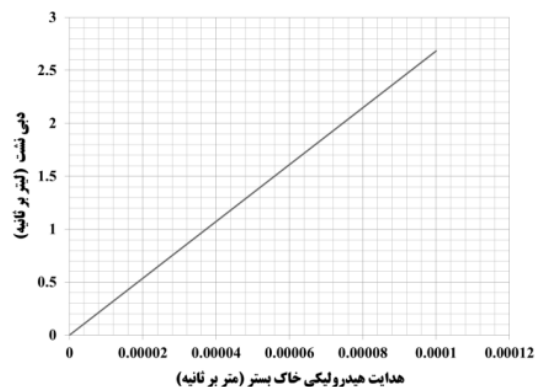
$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{mi} - x_{ci})^2}{\sum_{i=1}^n (|x_{mi} - \bar{x}_m| + |x_{ci} - \bar{x}_m|)^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{mi} - x_{ci})^2}{n}} \quad (3)$$

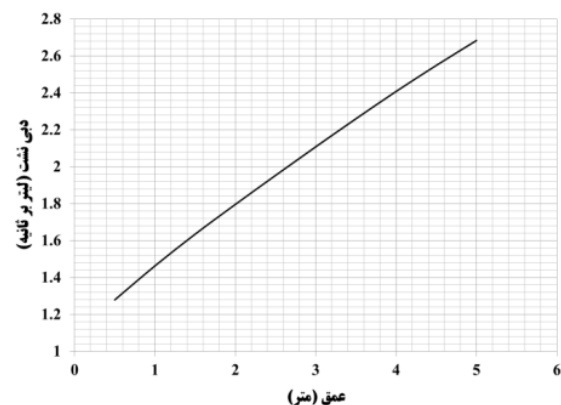
$$R^2 = \frac{n \left( \sum_{i=1}^n x_{ci} x_{mi} \right) - \left( \sum_{i=1}^n x_{ci} \right) \left( \sum_{i=1}^n x_{mi} \right)}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n x_{ci}^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_{ci} \right)^2 \right] \times \left[ n \sum_{i=1}^n x_{mi}^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_{mi} \right)^2 \right]}} \quad (4)$$

### ۳-۱- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان یکی از مدل‌های شبیه‌ساز نرم که از قابلیت استخراج روابط غیرخطی پیچیده بین داده‌ها برخوردار می‌باشد، در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. جهت استفاده از این مدل نرم، بر اساس محیط نرم‌افزاری MATLAB2013b، سه ساختار Feed. forward backprop، Elman backprop و Cascade forward backprop مورد توجه قرار گرفت. در هر ساختار تعداد ۱ تا ۱۰ نرون بررسی شده و به کمک شاخص خطای ضریب تبیین، نقاط قوت و ضعف این ساختارها در تخمین میزان نشت مورد مقایسه قرار گرفت. بنابر نتایج تحلیل مذکور روش Feed Forward Backprop با تعداد ۸ نرون بهترین نتیجه را با ضریب تبیین معادل ۰/۹۷۳ ارائه می‌دهد.



شکل ۵- آنالیز حساسیت پارامتر هدایت هیدرولیکی خاک بستر



شکل ۶- آنالیز حساسیت پارامتر عمق کانال

### ۳- بررسی مدل‌های نرم و ارائه مدل برتر

در این بخش بر اساس مدل‌های مختلف، مناسب‌ترین رابطه قابل استخراج بین مجموعه داده‌های ورودی و خروجی بررسی و در نهایت مدل برتر جهت شبیه‌سازی میزان نشت معرفی می‌گردد. مدل‌هایی که در این تحقیق به کار گرفته شده‌اند شامل رگرسیون خطی (با استفاده از نرم‌افزار SPSS)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)<sup>۹</sup>، شبکه عصبی مبتنی بر سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS)<sup>۵</sup> و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)<sup>۶</sup> می‌باشند که نتایج هر بخش بطور مجزا ارائه می‌گردد. مطابق مطالعات صورت گرفته توسط محمد رضاپور طبری و همکاران (۱۳۹۳)، جهت ارزیابی صحت مدل نرم انتخابی لازم است مجموعه داده‌های ورودی به سه دسته آموزش (۸۵ درصد داده)، آزمایش (۱۵ درصد داده) و صحت‌سنجی (۵ درصد داده)

جدول ۲- نمونه‌ای از حالات مدل‌سازی نشت در کانال

میزان نشت از کانال در واحد طول (lit/day)	عمق کانال (m)	محیط تر شده (m)	ضریب هدایت هیدرولیکی خاک بستر (m/s)	تراز سطح آب زیرزمینی نسبت به کف کانال (m)
۱۵/۷۵	۴	۹	۰/۰۰۰۰۰۰۷	۱
۱۹/۴۳	۳	۹/۴۹	۰/۰۰۰۰۰۰۱	۵
۱۴/۶۶	۲	۱۱/۲۱	۰/۰۰۰۰۰۰۷	۵
۰/۰۰۰۴۱	۰/۷۵	۳/۲	۰/۰۰۰۰۰۰۰۵۴	۳
۰/۰۰۰۲۷	۰/۲۵	۱/۴	۰/۰۰۰۰۰۰۰۵۴	۳

### ۲-۳- سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی

یا رابطه‌هایی جهت پیش‌بینی نشت ارائه می‌شود. در این مطالعه از شاخص آماری ضریب تبیین تصحیح شده برای مقایسه این روش‌ها در تخمین میزان نشت استفاده و نتایج نشان داد که تمامی روش‌ها دارای قدرت تخمین نشت یکسانی در مقایسه با یکدیگر بوده و ضریب تبیین دقت تخمین برابر ۰/۸۵ می‌باشد.

در طی دهه گذشته، تلاش‌های متعددی در زمینه کاربردهای منطق فازی و سیستم‌های شبکه عصبی در تحقیقات محققین مختلف مشاهده می‌گردد. سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی توسط Jang در سال ۱۹۹۳ پیشنهاد گردید (Jang, 1993, Jang et al., 1997). این ساختار، شبکه‌های تطبیقی چند لایه است که از عناصر اصلی و توابع سیستم‌های منطق فازی حاصل شده‌اند با بهره‌گیری از مفاهیم معماری شبکه و الگوریتم آموزش در مباحث شبکه عصبی در سیستم‌های فازی عصبی، موفقیت‌های زیادی در مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های پیچیده به‌دست آمده است. این روش بر اساس مفاهیم روش‌های شبکه عصبی در سیستم‌های فازی بسط یافته است. هدف اصلی در این روش آموزش شکل توابع عضویت برای سیستم فازی است که از خصوصیات تطابقی روش‌های شبکه عصبی حاصل می‌شود. در این تحلیل مشابه شبکه عصبی، داده‌ها توسط روش‌های مختلف موجود مورد بررسی قرار گرفتند. در این بررسی توابع عضویت مختلف از جمله gbellmf, gaussmf, gauss2mf, pimf, dsingmf و psingmf استفاده گردید. نتایج این بررسی توسط شاخص آماری ضریب تبیین با یکدیگر مقایسه شده و نتایج نشان داد که تابع عضویت gbellmf از دقت بالاتری برخوردار بوده و با ضریب تبیین ۰/۹۸۵، بیشترین مقدار این شاخص را به خود اختصاص داده است.

### ۳-۴- رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)

ماشین‌های بردار پشتیبان که بر اساس اصول تئوری یادگیری آماری استوار است، اولین بار توسط Vapnik در سال ۱۹۹۵ ارائه گردید و توسعه یافت (Vapnik, 1998). الگوریتم یادگیری این سیستم‌ها بر اساس تئوری بهینه‌سازی مقید استوار است و از اصل استقرایی کمینه‌سازی خطای ساختاری بهره می‌جوید. نکته قابل ذکر آن است که SVM قادر نیست شکل رگرسیونی داده‌های تحقیق حاضر را پیش‌بینی کند، زیرا این مدل قادر است داده‌ها را تنها در ۲ دسته جای دهند. برای تعیین شکل رگرسیونی بین داده‌ها از قالب دیگر ماشین بردار پشتیبان موسوم به SVR استفاده می‌گردد. در بررسی صورت گرفته پیش از شروع آموزش مدل، داده‌ها بین مقدارهای ۰/۱ تا ۰/۹ نرمالیزه شده‌اند. این کار موجب می‌شود اثر مقیاس واقعی کمینه شده و همه ورودی‌ها تقریباً در یک دامنه قرار گیرند (Goh and Goh, 2007). این در حالی است که به منظور گسترش مدل غیر خطی از تابع کرنل پایه شعاعی (rbf) استفاده شده و برای دستیابی به مدل بهینه، مدل ماشین بردار پشتیبان با ترکیب‌های گوناگونی از پارامترهای تعریف‌کننده مدل  $C$ ،  $\varepsilon$  و  $\sigma$  که به ترتیب پارامتر جریمه، پارامتر تنظیم‌کننده و عرض کرنل با پایه شعاعی می‌باشند) بر روی داده‌های آموزش، آموزش داده شده است. نتایج، بهترین مدل را به ازای  $C=0/16$ ،  $\varepsilon=10^{-9}$  و  $\sigma=3/38$  که بصورت سعی و خطا به‌دست آمده‌اند، نشان داده و شاخص‌های خطای مرتبط با این روش در جدول ۳ ارائه شده است.

### ۳-۳- رگرسیون خطی به کمک نرم‌افزار آماری SPSS

نرم‌افزار SPSS در واقع بسته آماری برای علوم اجتماعی است، اما باید توجه داشت که این نرم‌افزار در آزمون فرضیه‌های آماری و تحلیل رگرسیون و کواریانس بسیار توانمند است. در بررسی نهایی که توسط نرم‌افزار آماری SPSS صورت گرفت، داده‌ها توسط روش‌های مختلفی چون forward، enter، stepwise، remove، backward مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این روش‌ها بسته به روش انتخابی، رابطه

جدول ۳- نتایج مقایسه روش‌های مختلف رگرسیونی

IOA	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>	نام مدل نرم شاخص خطا
۰/۹۹۲۲	۰/۰۰۶۵	۰/۰۱۹۳	۰/۹۷	ANN
۰/۹۹۷۱	۰/۰۰۰۰۲۳۱	۰/۰۰۰۰۹۶	۰/۹۹	ANFIS
۰/۹۴۶۵	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۳۵	۰/۸۵	SPSS
۰/۴۶۹۲	۰/۰۱۲۵	۰/۱۰۳۴	۰/۸۳	SVR

### ۳-۵- تعیین مناسب‌ترین مدل نرم

در این بخش به کمک شاخص‌های خطای، مدل‌های نرم مورد استفاده با هم مقایسه می‌گردند. بر اساس جدول ۳ مشخص می‌شود که مدل ANFIS به لحاظ برخورداری از نزدیک‌ترین میزان R<sup>2</sup> و IOA به عدد ۱ و نیز کمترین میزان شاخص‌های آماری دیگر، بهترین شکل رگرسیونی است که می‌توان در فرآیند بهینه‌سازی استفاده شود.

### ۴- ساختار مدل پیشنهادی تعیین ابعاد بهینه کانال

در این تحقیق بر اساس رویکرد اشاره شده، لازم است ابعاد کانال به گونه‌ای طراحی شوند که علاوه بر کمینه کردن تلفات نشت در آن، شرایط هیدرولیکی لازم در طراحی نیز ارضا شود. از آنجا که مدل بهینه‌سازی به کار رفته در این تحقیق هدفمند و مقید می‌باشد، تابع هدف بهینه‌سازی، تعیین مقطع بهینه کانال بطوری که تلفات آب ناشی از نشت و تبخیر در کانال حداقل است در نظر گرفته و شرایط و محدودیت‌های هیدرولیکی طراحی کانال، قیود آن خواهند بود.

### ۴-۱- تابع هدف و محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی

با توجه به اینکه دو عامل تلفات آب و هزینه‌های مرتبط با عملیات خاکی در طراحی بهینه کانال‌ها حائز اهمیت می‌باشند و عامل دوم نیز به نوعی مرتبط با تلفات است، لذا در این مطالعه بررسی میزان تأثیر تلفات آب بر روی ابعاد بهینه کانال در مقایسه به حالتی که هر دو عامل در نظر گرفته شود (بر مبنای مطالعات قبلی)، مورد توجه قرار گرفته است. لازم به ذکر است در اکثر مطالعات قبلی نیز تنها عامل تلفات آب به عنوان پارامتر تأثیرگذار در طراحی کانال‌ها مطرح شده است. بر این اساس، تابع هدف تحقیق حاضر طراحی بهینه مقطع کانال با کمترین میزان تلفات آب در هر متر از طول کانال تحت شرایط جریان یکنواخت در کانال می‌باشد. بنابراین می‌توان تابع هدف را به صورت رابطه ۵ بیان نمود.

$$Z = \text{Minimize}(E \times T + Se) \quad (5)$$

محدودیت‌های مربوط به تابع هدف شامل سه قید رابطه مانینگ، سرعت کمینه و عدد فرود می‌باشند:

$$\emptyset(y_n, b, m) = A^{\frac{5}{3}} \cdot P^{\frac{-2}{3}} - S.F = 0 \quad (6)$$

$$V - 0.41y_n^{0.64} \geq 0 \quad (7)$$

$$0.12 \leq \frac{V}{\sqrt{gD}} \leq 0.35 \quad (8)$$

متغیرها در روابطه فوق عبارتند از:  $E$ : نرخ تبخیر از واحد سطح آزاد آب ( $m/s$ )،  $T$ : عرض سطح آب ( $m$ )،  $Se$ : نشت محاسبه شده در کانال به کمک مدل ANFIS  $m^2/s$  و  $\phi$ : قید مانینگ می‌باشد که به صورت یک تساوی غیرخطی بیان شده است و خود تابعی از  $y_n$  (عمق نرمال کانال)،  $b$  (عرض سطح آب) و  $m$  شیب جانبی کانال می‌باشد.  $A$ : سطح مقطع جریان ( $m^2$ )،  $P$ : محیط تر شده کانال ( $m$ )،  $S.F$ : فاکتور سطح بوده و برابر  $Q.n/\psi\sqrt{S_0}$  می‌باشد. در این رابطه  $Q$ : دبی جریان ( $m^3/s$ )،  $n$ : ضریب زبری مانینگ (بی بعد)،  $S_0$ : شیب طولی کف کانال (بی بعد) و  $\psi$ : ثابت سیستم اندازه‌گیری است.  $V$ : سرعت متوسط جریان یکنواخت ( $m/s$ )،  $y_n$ : عمق نرمال آب در کانال ( $m$ )،  $g$ : شتاب ثقل ( $m/s^2$ ) و  $D$ : عمق هیدرولیکی کانال ( $m$ ). در رابطه ۶، محدودیت دبی جریان با استفاده از رابطه مانینگ مورد بررسی قرار می‌گیرد (Ghazaw, 2011, Lewis and Torczon, 2002). رابطه ۷ که بیانگر قید مرتبط با سرعت جریان آب در کانال است، بر اساس رابطه هندوستان ارزیابی می‌شود. در واقع اگر سرعت آب کم باشد، رسوبی که توسط آب حمل می‌شود، فرصت ته نشین شدن را یافته و در نتیجه باعث افزایش تراز آب شده و در نهایت ظرفیت کانال را کاهش می‌دهد. از طرفی سرعت زیاد جریان می‌تواند کف و دیواره‌های کانال را فرسایش دهد. جهت دستیابی به طراحی بهتر و دقیق‌تر بهتر است که پارامترهای جریان توسط عدد فرود (رابطه ۸) نیز کنترل شود. در کانال‌های بتنی، عدد فرود می‌بایست بیشتر از ۰/۱۲ و کمتر از ۰/۳۵ باشد. در این تحقیق با توجه به مطالب ذکر شده هدف به دست آوردن عمق نرمال و عرض کف کانال برای شیب‌های جانبی متفاوت کانال‌ها، تحت قیود مسئله می‌باشد به گونه‌ای که هدف بهینه‌سازی محقق گردد.

### ۴-۲- ساختار ابزار بهینه‌سازی مورد استفاده

نحوه تعیین مقدار بهینه ابعاد کانال بر مبنای ساختار پیشنهادی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی تصادفی می‌باشد. این روش به دلیل سرعت اجرای بالا، دقت قابل توجه در دستیابی به جواب نزدیک به بهینه کلی و جستجوی تقریباً کامل فضای تصمیم موجه<sup>۹</sup> در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. در واقع این روش



ارائه نمودارها نیز به طور مشابه به دست آورده شده است تا ضمن یکسان بودن نحوه‌ی ارائه آنها، شرایط قیاس مناسب‌تر نتایج نیز مهیا گردد. فرآیند ارائه نتایج و تولید نمودارهای مذکور بدین صورت است که ابتدا با توجه به شرایط هیدرولیکی مورد نظر در کانال‌ها ابعاد بهینه را محاسبه و نمودارهای شکل ۸ و ۹ تولید می‌گردد، سپس طی محاسباتی که در ادامه به آن اشاره خواهد شد، می‌بایست نمودارها اولیه را به صورت بی‌بعد شده ارائه نمود. وجود چنین نمودارهایی باعث ایجاد یک ارتباط گرافیکی بین پارامترهای مطلوب و مجهول مسئله می‌گردد، در واقع با تقسیم مقادیر عمق و عرض کف کانال به دست آمده از بهینه‌سازی بر پارامتر بی‌بعدکننده  $\lambda$ ، که واحد آن طول بوده، نمودارهای بی‌بعد شده مربوطه ایجاد می‌گردد. به عبارت دیگر:

$$\lambda = SF^{3/8} \quad (9)$$

در این معادله  $\lambda$ ، عددی است بر حسب طول که دارای مقادیر مختلف می‌باشد و  $SF$ ، فاکتور سطح کانال است. بر اساس مطالب ذکر شده، جهت محاسبه مقادیر بی‌بعد شده عمق ( $y^*$ ) و عرض کف کانال ( $b^*$ ) خواهیم داشت که:

$$b^* = \frac{b}{SF^{3/8}} \quad (10)$$

$$y^* = \frac{y}{SF^{3/8}} \quad (11)$$

در معادلات ۱۰ و ۱۱ مقادیر  $y$  و  $b$  به ترتیب مقدار عمق و عرض کف کانال بهینه شده می‌باشند. روش استفاده از نمودارهای بی‌بعد به این صورت است که ابتدا با تعیین مقدار شیب جانبی ( $m$ )، دبی جریان ( $Q$ )، ضریب زبری کف کانال ( $n$ ) و در نهایت میزان شیب طولی کانال ( $S_0$ ) و با توجه به شکل ۱۰ و ۱۱، مقدار  $y^*$  و  $b^*$  بدست آورده و سپس با محاسبه  $SF$  به کمک معادلات ۱۰ و ۱۱، می‌توان مقدار بهینه طراحی برای کانال مورد نظر را بدست آورد. در این مرحله جهت آموزش نحوه استفاده از نمودارهای ارائه شده و مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیقات (Ghazaw 2011) و Mohammad Reazpor Tabari et al. (2014)، چندین کانال یکسان را طراحی و نتایج به دست آمده از آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. قابل ذکر است که تحقیقات مذکور به ترتیب مقاطع بهینه کانال را با هدف کمینه‌کردن تلفات آب از کانال و کمینه‌کردن هزینه احداث کانال تهیه کرده‌اند.

مثال اول: مطلوب است طراحی بهینه کانالی مستطیلی شکل با مشخصات زیر:

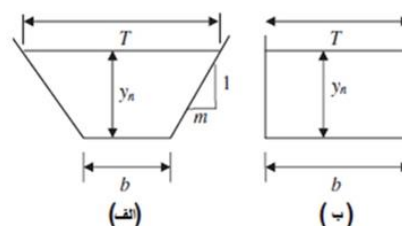
$$Q = 6.25 \frac{m^3}{s}, S_0 = 0.0004, n = 0.016,$$

$$E = 3.0 \frac{m}{year}, k = 1.5 \frac{m}{year}$$

با شروع از یک نقطه تصادفی در فضای موجه تصمیم آغاز شده و با استفاده از ضرایب انبساط و انقباض به سمت جواب بهینه کلی حرکت می‌نماید. در این روش ابتدا فضای موجه متغیرهای تصمیم، ضرایب انبساط و انقباض و تعداد تکرارهای لازم جهت دستیابی به جواب نزدیک به بهینه کلی مشخص می‌شود. سپس با توجه به محدودیت‌های مدل، جواب اولیه‌ای به صورت تصادفی تولید می‌شود. با توجه به نقطه اولیه و نوع روش جستجو، نقاطی حول جواب اولیه تولید می‌شود. از روش‌های جستجوی در این الگوریتم می‌توان به روش جستجوی الگوی تعمیم یافته (GPS) و روش جستجوی مستقیم شبکه هیبریدی (MADS) اشاره نمود که جزئیات این دو روش را می‌توان در مطالعه محمد رضا پور طبری و ایل‌بیگی (۱۳۹۳) یافت. جهت مطالعه بیشتر در خصوص الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی مستقیم می‌توان به مقاله (Lewis and Torczon 2002) مراجعه نمود. لازم به ذکر است در این مطالعه از توابع موجود در نرم‌افزار متلب به همراه تابع هدف و محدودیت‌های کد شده در این نرم‌افزار، جهت تهیه الگوریتم بهینه‌سازی مورد اشاره استفاده گردید.

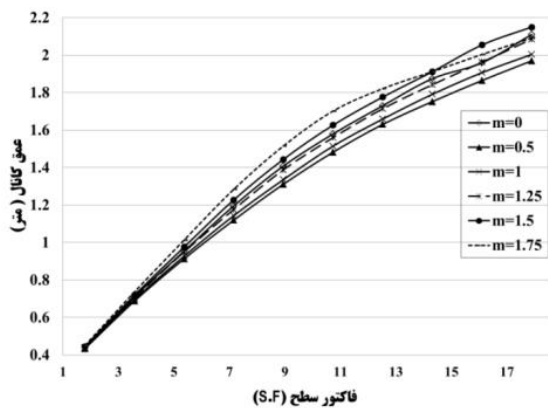
## ۵- ارائه نتایج

همانطور که پیش‌تر اشاره شد، در این تحقیق پس از مدل‌سازی نشت از کانال، با بکارگیری شکل رگرسیونی مناسب در بهینه‌سازی مقطع کانال با هدف کمینه‌کردن تلفات آب، اقدام به ارائه ابعاد بهینه کانال شده است. مقاطع مورد بررسی در بخش نتایج شامل مقطع دوزنقه‌ای و مقطع مستطیلی بوده که در شکل ۷ به آنها اشاره شده است.

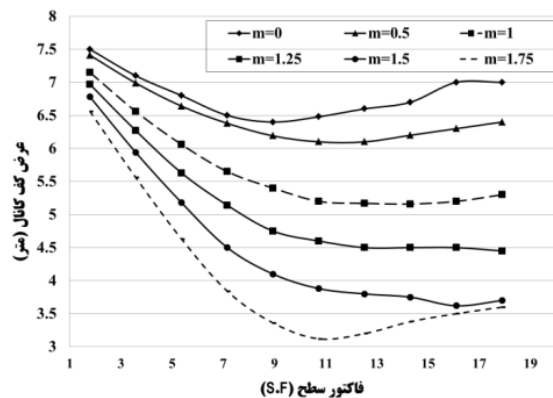


شکل ۷- مقاطع کانال‌های مورد بررسی (الف) مقطع دوزنقه‌ای، (ب) مقطع مستطیلی

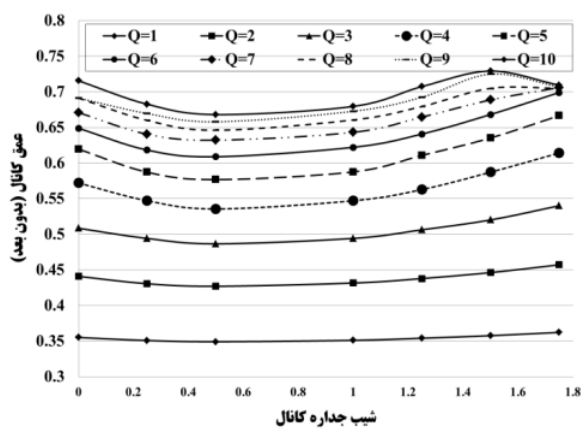
بهینه‌سازی در مقاطع مذکور، برای دبی‌های ۱ تا ۱۰ مترمکعب بر ثانیه و شیب‌های جانبی متعددی از صفر تا ۱/۷۵ صورت گرفته و در محدوده  $\frac{K}{E}$  از ۰/۵ الی ۵ صادق‌اند. نتایج بهینه‌سازی در قالب نمودارهای شکل ۸ تا شکل ۱۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که علاوه بر آنکه پارامترهای موجود در این نمودارها اقتباسی از پارامترهای موجود در نمودارهای ارائه شده توسط محققین پیشین بوده، نحوه‌ی تهیه و



شکل ۸- نمودار عمق آب در برابر فاکتور سطح به ازای شیب‌های جانبی مختلف



شکل ۹- نمودار عرض کف کانال در برابر فاکتور سطح به ازای شیب‌های جانبی مختلف



شکل ۱۰- نمودار عمق آب بی بعد شده در برابر شیب جانبی به ازای دبی‌های مختلف

حل به روش تحقیق حاضر:

با توجه به شکل‌های ۱۰ و  $k/E = 0.5, Q = 6.25 m^3/s, m = 0.0$

۱۱، مقادیر  $b^*, y^*$  به ترتیب برابر با  $2/6$  و  $0/66$  تعیین می‌شوند.

$$b^* = 2.6, y^* = 0.6, SF = \frac{6.25(0.016)}{\sqrt{0.0004}} = 5$$

$$b = b^* \times \left[ SF^{\frac{3}{8}} \right] = 2.6 \times 1.82 = 4.73 \approx 4.7 \text{ m}$$

$$y = y^* \times \left[ SF^{\frac{3}{8}} \right] = 0.66 \times 1.82 = 1.2 \text{ m}$$

مثال دوم: با توجه به اطلاعات مثال قبل، مطلوبست طراحی بهینه کانالی ذورنقه‌ای با شیب جانبی  $m=0.5$

حل به روش تحقیق حاضر:

با توجه به شکل‌های ۱۰ و  $k/E = 0.5, Q = 6.25 m^3/s, m = 0.5$

۱۱، مقادیر  $b^*, y^*$  به ترتیب برابر با  $2/45$  و  $0/62$  تعیین می‌شوند.

$$b^* = 2.45, y^* = 0.62, SF = \frac{6.25(0.016)}{\sqrt{0.0004}} = 5$$

$$b = b^* \times \left[ SF^{\frac{3}{8}} \right] = 2.45 \times 1.82 = 4.459 \approx 4.5 \text{ m}$$

$$y = y^* \times \left[ SF^{\frac{3}{8}} \right] = 0.62 \times 1.82 = 1.12 \approx 1.1 \text{ m}$$

با توجه به مقادیر به دست آمده به روش تحقیق حاضر و مقادیر محاسبه شده برای همین مسئله توسط دیگر محققین می‌توان مقایسه‌ای بین ابعاد محاسبه شده انجام داد. در جدول ۴ مقادیر محاسبه شده توسط محققین مختلف از جمله تحقیق حاضر نشان داده شده است. لازم به ذکر است که جدول ۵ سایر پارامترهای هیدرولیکی در مثال‌های مذکور را جهت مقایسه نتایج محققین با تحقیق حاضر نشان می‌دهد.

بر مبنای نمودارهای بی‌بعد نتایج زیر ارائه می‌شود:

● با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌گردد که عمق کانال با افزایش مقدار فاکتور سطح افزایش یافته است. نکته حائز اهمیت آن است که شیب جانبی کانال‌ها تأثیر نسبتاً کمی در روند صعودی افزایش عمق داشته است. این در حالی است که با افزایش مقدار فاکتور سطح کانال مقدار عرض کف کانال ابتدا کاهش یافته و پس از آن بطور کلی روند کاهش متوقف گردیده است (شکل ۹). در تغییرات مذکور، مقادیر مختلف شیب جانبی کانال، نقش موثری را ایفا کرده‌اند، بطوری که برای کانال مستطیلی ( $m = 0$ ) بیشترین مقدار عرض کف طراحی شده را به خود اختصاص داده و کانال ذورنقه‌ای با شیب جانبی  $m = 1.75$  کمترین عرض کف را به خود اختصاص داده است. به عبارت دیگر با افزایش میزان شیب جانبی کانال مقدار عرض کف کانال کاهش داشته است.

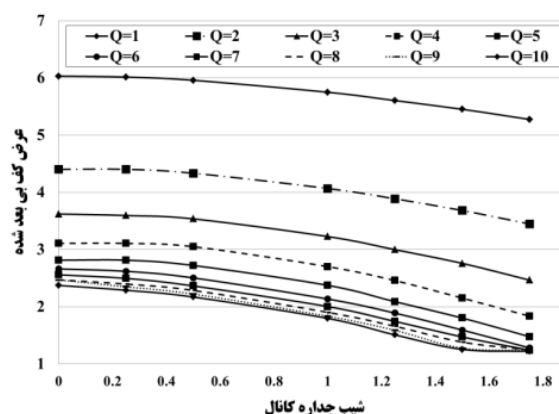
Mohammad Reazpor Tabari et al. (2014) و تحقیق حاضر در مثال‌های یکسان حل شده، می‌توان گفت:

● با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌گردد که برای کلیه روش‌های مذکور مقدار عرض کف در کانال مستطیلی بیشتر از مقدار عرض کف کانال دوزنقه‌ای می‌باشد و این در حالی است که در روش پیشنهادی مقادیر به طور نسبی از دو روش دیگر بیشتر بوده و این اختلاف می‌تواند به دو دلیل ذیل نسبت داد:

اولاً: در مطالعات (Ghazaw (2011) به دلیل استفاده از روابط تجربی مقدار نشت کمتر تخمین زده شده و لذا ابعاد کمتری نیز جهت طراحی پیشنهاد گردیده است. دوماً: در تحقیق Mohammad Reazpor Tabari et al. (2014)، به دلیل در نظر گرفته اثر هزینه، علی‌رغم در نظر گرفتن اثر نشت، این ابعاد نسبت به مطالعه فعلی کمتر پیشنهاد شده‌اند.

● در خصوص مقدار عمق آب در کانال‌های طراحی شده (جدول ۴)، کانال‌های دوزنقه‌ای نسبت به کانال مستطیلی به سبب دارا بودن شیب جانبی، دارای عمق جریان کمتری بوده‌اند. این در حالی است که روش پیشنهادی به طور نسبی برای هر دو کانال عمق کمتری را پیشنهاد می‌کند. دلیل بیشتر بودن میزان عمق توسط دیگر محققین را می‌توان به عدم محاسبه دقیق میزان نشت در روند بهینه‌سازی و طراحی آنها نسبت داد.

● با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که به طور نسبی سرعت‌های به‌دست آمده برای کانال مستطیلی کمتر از سرعت در کانال دوزنقه‌ای می‌باشد. علت این امر را می‌توان به وجود شیب جانبی در کانال دوزنقه‌ای که باعث کاهش سطح مقطع کانال شده است نسبت داد. اما به هر حال میزان سرعت‌های به‌دست آمده در روش پیشنهادی در محدوده مجاز بوده و این پارامتر به سبب اختلاف ناچیز در قیاس با نتایج تحقیقات دیگر قابل قبول است.



شکل ۱۱- نمودار عرض کف کانال بی بعد شده در برابر شیب جانبی به ازای دبی‌های مختلف

بر اساس شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش دبی طراحی، میزان عمق بی‌بعد کانال نیز افزایش یافته و در مقابل، مقدار عرض کف بی‌بعد کانال دچار کاهش شده است. به عبارت دیگر برای شیب‌های جانبی یکسان، طراحی کانال با دبی ۱ مترمکعب بر ثانیه دارای کمترین مقدار عمق بی‌بعد و بیشترین عرض کف بی‌بعد بوده و برای طراحی کانال با دبی ۱۰ متر مکعب بر ثانیه و با شیب جانبی یکسان، کمترین عرض کف بی‌بعد و بیشترین عمق بی‌بعد بدست خواهد آمد.

● باید توجه داشت که برای شیب جانبی اختلاف مقادیر بی‌بعد از دبی‌های کمتر به بالا، نزولی است بگونه‌ای که در دبی‌های بیش از ۷ متر مکعب بر ثانیه تغییرات مقادیر بی‌بعد چندان محسوس نیست. علت این امر نحوه کمینه کردن میزان تلفات آب توسط روش بهینه‌سازی می‌باشد. زیرا با افزایش عمق کانال میزان نشت و با افزایش عرض سطح آب، میزان تبخیر افزایش می‌یابد.

با توجه به نتایج روش‌های (Ghazaw (2011)

جدول ۴- مقادیر محاسباتی کانال‌های مثال‌های اول و دوم توسط تحقیقات مختلف

Mohammad Reazpor Tabari et al. (2014)	Ghazaw (2011)	تحقیق حاضر				مشخصات کانال
		مستطیلی	دوزنقه‌ای	مستطیلی	دوزنقه‌ای	
۶/۲۵	۶/۲۵	۶/۲۵	۶/۲۵	۶/۲۵	۶/۲۵	دبی کانال (متر مکعب بر ثانیه)
۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	ضریب زبری
۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	شیب طولی کانال
۳	۳	۳	۳	۳	۳	نرخ تبخیر (متر بر سال)
۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	هدایت هیدرولیکی کانال (متر بر سال)
۰	۰/۵	۰	۰/۵	۰	۰/۵	شیب جانبی کانال
۴/۳	۳/۳۷	۲/۴۴	۱/۵	۴/۷	۴/۵	عرض کف کانال (متر)
۱/۳۲	۱/۳۷	۲/۳۵	۲/۱۳	۱/۲	۱/۱	عمق کانال (متر)

جدول ۵- مقایسه پارامترهای هیدرولیکی کانال‌های مثال‌های اول و دوم توسط تحقیقات مختلف

نتایج	مقطع	پیرامون مرطوب (متر)	سطح مقطع (متر مربع)	سرعت متوسط (متر بر ثانیه)	عرض سطح آب (متر)	عمق هیدرولیکی (متر)	عدد فرود
تحقیق حاضر	مسطحی	۷/۱	۵/۶۴	۱/۱	۴/۷	۱/۲	۰/۳۲
	دو زنگه‌ای	۶/۹۵	۵/۵۶	۱/۱۲	۵/۶	۱	۰/۳۵
Ghazaw (2011)	مسطحی	۷/۱۴	۵/۷۳	۱/۰۹	۲/۴۴	۲/۳۵	۰/۲۳
	دو زنگه‌ای	۶/۳	۵/۴۶	۱/۱۴	۳/۶۳	۱/۵۱	۰/۳
Mohammad Reazpor Tabari et al. (2014)	مسطحی	۶/۹۴	۵/۶۸	۱/۱	۴/۳	۱/۳۲	۰/۳۱
	دو زنگه‌ای	۶/۴۳	۵/۵۶	۱/۱۳	۴/۷۴	۱/۱۷	۰/۳۳

است. از سوی دیگر با توجه به اعداد فرود موجود در جدول ۵ پیشنهاد می‌گردد در صورتی که میزان رسوبات حامل در جریان کانال زیاد باشد، در شرایط هیدرولیکی یکسان بهتر است از کانال دوزنگه‌ای برای انتقال آب استفاده نمود، زیرا بالاتر بودن عدد فرود در کانال دوزنگه‌ای نسبت به کانال مستطیلی نشان‌دهنده فراهم بودن شرایط حمل رسوبات می‌باشد. بر مبنای رویکرد ارائه شده در این تحقیق پیشنهاد می‌شود مواردی همچون: بررسی نحوه محاسبه میزان تبخیر آب جاری، که کمتر از آب ساکن است، و لحاظ نمودن آن در ساختار پیشنهادی، بررسی وضعیت ضخامت بستر کانال و اثرات آن بر روی نشست از کانال و محدودیت‌های شیب جهت اجرا در کانال‌های خاکی جهت مطالعات آینده مورد توجه قرار گیرد.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Acoustic Doppler Current Profilers
- 2- Electromagnetic Induction
- 3- Mean Absolute Error
- 4- Artificial Neural Network
- 5- Adaptive Neural Fuzzy Inference System
- 6- Support Vector Regression
- 7- Index of Agreement
- 8- Root Mean Square Error
- 9- Feasible Decision Space
- 10- Generalized Pattern Search
- 11- Mesh Adaptive Direct Search

#### ۷- مراجع

امین جواهری، ا. پاک‌نیت، (۱۳۸۸) تحلیل استاتیکی و دینامیکی سدهای خاکی با استفاده از GeoStudio. انتشارات علم عمران، چاپ اول، ۳۱۳ صفحه.

بهراملو ر (۱۳۹۰) ارزیابی تلفات نشست در کانال‌های آبیاری با پوشش سنگی در مناطق سردسیر و تأثیر آن بر ذخایر منابع آب (مطالعه

● با مقایسه مقادیر مرتبط با سطح مقطع و پیرامون مرطوب (جدول ۵) بدست آمده توسط سه تحقیق، می‌توان دریافت که تغییرات قابل ملاحظه‌ای در سطح مقطع بهینه کانال‌های مستطیلی و دوزنگه‌ای مشاهده نمی‌شود اما پیرامون مرطوب کانال دوزنگه‌ای در تحقیق حاضر به ترتیب به میزان ۱۰ و ۸ درصد بیشتر از تحقیقات (Ghazaw (2011) و Mohammad Reazpor Tabari et al. (2014) به دست آمده است. علت این امر را می‌توان در دقت پایین محاسبه میزان نشست در تحقیق (Ghazaw (2011) و لحاظ نمودن پارامترهای هزینه‌ایی در تحقیق (Mohammad Reazpor Tabari et al. (2014) دانست. همچنین همانطور که از عرض و عمق بهینه کانال‌ها (جدول ۴) برمی‌آید، نادیده گرفتن مؤلفه‌های مرتبط با هزینه عملیات خاکی در طراحی بهینه کانال عمدتاً در کانال دوزنگه‌ایی منجر به تغییرات قابل توجه در ابعاد بهینه کانال می‌شود.

● مقادیر اعداد فرود بدست آمده که در جدول ۵ نشان داده شده‌اند، همگی در محدوده‌ی مجاز عدد فرود بوده و میزان آن در کانال مستطیلی عموماً کمتر از کانال دوزنگه‌ای می‌باشد. علت این امر نیز مربوط به بیشتر بودن مقدار عمق هیدرولیکی در کانال مستطیلی نسبت به عمق هیدرولیکی در کانال دوزنگه‌ای می‌باشد.

#### ۶- جمع‌بندی

در این مطالعه با استفاده از روشی دقیق در تخمین میزان نشست اقدام به طراحی بهینه کانال آبیاری شده‌است. از نتایج چنین بر می‌آید که میزان نشست عامل موثری در طراحی ابعاد بهینه کانال‌ها بوده چرا که اگر میزان آن دقیق تخمین زده نشود ابعاد بهینه کانال دستخوش تغییرات محسوسی خواهد شد. به هر حال با در نظر گرفتن موارد بیان شده در بخش نتایج، پیشنهاد می‌گردد که در صورتی که در مسیر احداث کانال محدودیت اجرای وجود داشته باشد، در شرایط هیدرولیکی یکسان، بهتر است از کانال مستطیلی بجای کانال دوزنگه‌ای استفاده گردد، زیرا بر خلاف کمتر بودن عرض کف کانال دوزنگه‌ای نسبت به کانال مستطیلی، کانال مستطیلی از عرض سطح آب کمتری برخوردار

- Goh ATC, Goh SH (2007) Support vector machines: Their use in geotechnical engineering as illustrated using seismic liquefaction data. *Computers and Geotechnics* 34(5):410-421.
- Jang JSR (1993) ANFIS: Adaptive-network based fuzzy inference systems. *IEEE Trans. On Systems, Management and Cybernetics* 23(3):665-685.
- Jang JSR, Sun CT, Mizutani E (1997) *Neuro-fuzzy and soft computing*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. USA.
- Kacimov AR (2003) Discussion on 'Design of minimum seepage loss non-polygonal canal sections' by Prabhata K. Swamee and Deepak Kashyap. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE*, 129(1):68-70.
- Kinzi KD, Martinez M, Oad R, prior A, Gensler D (2010) Using an ADCP determine canal seepage loss in an irrigation district. *Agric. Water Manage.* 97(6):801-810.
- Kraatz DB (1977) *Irrigation canal lining*. FAO Land and Water Development Series, No. 1, Rome, 199.
- Lewis RM, Torczon V (2002) A globally convergent augmented lagrangian pattern search algorithm for optimization with general constraints and simple bounds. *SIAM Journal on Optimization*, 12(4):1075-1089.
- Mohammad Reazpor Tabari M, Tavakoli SH, Mazak Mari M (2014) Optimal design of concrete canal section for minimizing costs of water loss, lining and earthworks. *Water Resources Management* 28(10):3019-3034.
- Pognant D, Canone D, Previati M, Ferraris S (2013) Using EM equipment to verify the presence of seepage losses in irrigation canals. *Procedia Environmental Sciences* 19:836-845.
- Rostamian R, Abedi koupai J (2012) Assessment of SEEP/W model to estimate seepage from earth canals (case study: Irrigation network of down stream Zayandehrud). *Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and natural Resources)* 15(58):13-22.
- Salemi HR, Sepaskhah AR (2000) Modification of empirical equation for seepage loss estimation in small earth canals. *Iran. J. Sci. Technology* 25(B4):661-668.
- Swamee P, Mishra G, Chahar B (2000) Design of minimum seepage loss canal sections. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126(1):28-32.
- موردی در استان همدان). *مجله پژوهش آب ایران*، ۹(۵): ۱۴۱-۱۵۰.
- بهراملو ر (۱۳۹۱) تأثیر پوشش بتنی بر کنترل تلفات نشت آب از کانال- های آبیاری در استان همدان. *مجله پژوهش آب ایران*، ۱۱(۶): ۸۳-۷۵.
- حیدری زاده م (۱۳۸۷) مقایسه نتایج کاربرد معادله تئوری با تجربی نشت آب از کانال‌های منطقه رودشت اصفهان. اولین همایش مدیریت جامع حوضه آبخیز زاینده‌رود، اصفهان.
- سالمی ح، سپاسخواه ع (۱۳۸۵) اصلاح معادلات تجربی نشت آب از کانال در منطقه رودشت اصفهان. *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۰(۱): ۲۹-۴۲.
- سهرابی م ی ت، رحیمی ح، سلامت ع (۱۳۸۴) بررسی بازده کانال‌های انتقال و توزیع آب در شبکه آبیاری گیلان و فومنات. *مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۲(۱): ۷۱-۸۲.
- محمد رضاپور طبری م، ایل‌بیگی م (۱۳۹۳) کالیبراسیون خودکار پارامترهای آبخوان با استفاده از مدل ریاضی گسترده آبخوان و الگوریتم مبتنی بر جستجوی مستقیم. *مجله علمی و پژوهشی آب و فاضلاب*، ۳(۲۵): ۹۸-۱۰۹.
- محمد رضاپور طبری م، عبادی ت، مکنون ر (۱۳۸۹) ارائه مدل هوشمند تعیین رفتار تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی با لحاظ نمودن وضعیت دینامیکی سیستم آبخوان. *مجله علمی و پژوهشی آب و فاضلاب*، ۲۱(۴): ۷۰-۸۰.
- ملک‌پور ا، رحیمی ح، احمدی ح (۱۳۸۵) بررسی اثر سطح آب زیرزمینی و ضخامت لایه آبدار بر میزان جریان نشت معکوس به کانال. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز. *دانشکده مهندسی علوم آب*.
- نوری محمدیه م، سهرابی ت، رحیمی ح (۱۳۸۹) ارزیابی روش‌های تجربی تعیین نشت در کانال‌های خاکی (مطالعه موردی: دشت قزوین). *مجله پژوهش آب ایران*، ۷(۴): ۱۲۵-۱۲۸.
- Chahar B (2007) Optimal design of a special class of curvilinear bottomed canal section. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 133(5):571-576.
- Chahar BR (2007) Seepage analysis from polygonal canals. *Journal of the Hydraulics Division ASCE* 133(4):451-460.
- Ghazaw Y (2011) Design and analysis of a canal section for minimum water loss. *Alexandria Engineering Journal* 50(4):337-344.

Swamee PK, Kashyap D (2001) Design of minimum seepage loss non-polygonal canal sections. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE 127(2):113-117.

Vapnik VN (1998) Statistical Learning Theory. John Wiley, New York, 768 page.

Swamee P, Mishra G, Chahar B (2002) Design of minimum water-loss canal sections. Journal of Hydraulic Research 40(2):215-220.

Swamee P, Mishra G, Chahar B (2002a) Optimal design of transmission canal. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 128(4):234-243.

Swamee P, Mishra G, Chahar B (2002b) Design of minimum water-loss canal sections. Journal of Hydraulic Research 40(2):215-220.