

آنالیز و تعیین میزان تراوش در کانال خاکی آبیاری با استفاده از مدل عددی مطالعه موردی: کانال اصلی شبکه آبیاری دشت مغان

سروش برخوردار^۱ و سید مهدی هاشمی شاهدانی^{۲*}

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، و دانشیار گروه مهندسی آبیاری، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۱۳

چکیده

بخش عمده‌ای از تلفات در امتداد کانال‌های انتقال و توزیع آب در شبکه‌های آبیاری، تلفات ناشی از تراوش است. تخمین دقیق میزان این تلفات کمک شایانی به بهبود بهره‌وری آب در شبکه‌های آبیاری می‌کند. در این پژوهش، میزان تراوش در کانال اصلی خاکی شبکه آبیاری مغان با استفاده از مدل SEEP/W ارزیابی شده است. نتایج مدل‌سازی نشان داد که انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده تراوش مدل از مقادیر اندازه‌گیری شده (CRM) کمتر از ۱/۰ واحد است. به منظور بررسی بیشتر و پیش‌بینی تغییر خصوصیات هیدرولیکی خاک در دراز مدت، با توجه به احتمال وجود شرایط ناهمگن و غیر ایزوتروپ در محیط خاک، آنالیزهای مستقلی روی ضریب نفوذپذیری صورت پذیرفت. نتایج این آنالیزها حاکی از آن است که با توجه به شدت وقوع پدیده‌های مختلف مانند رسوب‌گذاری و فرسایش در دراز مدت، می‌توان حداکثر میزان تراوش تا $10^3 \times 20828/6$ لیتر بر روز و حداقل میزان تراوش تا $10^3 \times 245/4$ لیتر بر روز را پیش‌بینی کرد. نتایج حاصل از این مدل پیرامون توزیع سایر پارامترها نشان داد که حداکثر مقدار گرادیان هیدرولیکی به میزان ۱/۴ تا ۱/۶ در کف و نیز در محل اتصال آن به جداره‌های کناری کانال و حداکثر مقدار فشار آب حفره‌ای نیز در فاصله‌ای به میزان ۳ تا ۴ برابر عمق آب موجود در کانال، نسبت به کف کانال و در امتداد قائم پروفیل خاک، به دست می‌آید.

واژه‌های کلیدی

تلفات تراوش، فشار آب حفره‌ای، گرادیان هیدرولیکی، نرم‌افزار SEEP/W

مقدمه

عنوان ابتدایی‌ترین نوع سامانه‌های اصلی، یک اصل اساسی در هر سیستم آبیاری است؛ از این کانال‌ها در سراسر نقاط جهان به ویژه استرالیا، آمریکا، ایران، هند، پاکستان و غیره استفاده می‌شود. از این رو باید همیشه از نظر آب ورودی و خروجی در کنترل باشند. تراوش از محیط کانال به‌ویژه کانال خاکی به عنوان فرآیندی غالب، اصلی‌ترین تلفات در حین انتقال آب کشاورزی در بسیاری از سیستم‌های آبیاری است که مشکلات مختلفی مانند تقلیل منابع آب شیرین در دسترس، کاهش آب تحویل یافته به مزارع و

منابع آبی از ارزشمندترین منابع طبیعی، جزء سرمایه‌های ملی هر کشور و نیز از مهمترین عوامل رشد و توسعه جوامع بشری محسوب می‌شوند. در واقع این عامل حیاتی و مهم در بخش‌های مختلف اقتصادی از جمله در بخش کشاورزی (به‌عنوان عمده‌ترین بخش مصرف‌کننده آب در میان سایر بخش‌ها) و به تبع آن در توسعه پایدار، نقش مهمی ایفا می‌کند (Tavakoli et al., 2016). در این زمینه، به‌کارگیری کانال‌های انتقال و توزیع خاکی به

پوشش‌های مختلف و با استفاده از مدل SEEP/W و میزان تلفات بهره‌برداری را با استفاده از مدل ICSS^۳ ارزیابی کردند و نشان دادند که پوشش کانال و خودکارسازی بهره‌برداری به ترتیب به میزان ۱۰ و ۱۵ درصد توانایی کاهش تلفات تراوش و بهره‌برداری را خواهند داشت. منصوری و سلماسی (Mansuri & Salmasi, 2016) به منظور بررسی میزان تراوش، گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار در یک کانال خاکی فرضی تحت تأثیر پارامترهای مختلفی مانند شیب جداره کانال و ضریب نفوذپذیری، از مدل SEEP/W استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش ضریب نفوذپذیری، دبی تراوش از بدنه کانال به طور خطی افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش شیب جداره کانال، مقدار دبی تراوش از بدنه کانال نیز به طور خطی افزایش می‌یابد. این محققان اضافه می‌کنند گرادیان هیدرولیکی و سرعت تراوش در وسط کف کانال کمترین مقدار را دارند. رضاپور طبری و مزک‌ماری (Mohammad Rezapour Tabari & Mazak Mari, 2016) پس از بررسی میزان حساسیت دبی تراوش نسبت به پارامترهای مؤثر با استفاده از مدل SEEP/W مناسب‌ترین رابطه رگرسیونی را برای تعیین میزان تراوش در کانال با استفاده از شبکه عصبی ANFIS بین پارامترهای مستقل و وابسته استخراج کردند. نتایج به دست آمده از مدل SEEP/W در تحقیق گفته شده با سایر روابط تجربی مقایسه شد و ضمن تأیید دقت بالای تخمین تراوش توسط آن، از آن به عنوان روشی دقیق‌تر در فرآیند بهینه‌سازی با هدف کمینه کردن تلفات آب از کانال استفاده کردند. آذری فرد چهرمی و همکاران (Azari Fard Jahromi et al., 2016) به منظور بررسی مناسب‌ترین روش برآورد تراوش در کانال‌ها، میزان تراوش از سه کانال پوشش داده شده در منطقه رودشت استان اصفهان را با استفاده از سه روش حوضچه‌ای، مدل‌های نرم‌افزاری SEEP/W و MSEEP و معادلات تجربی برآورد و مقایسه کردند. نتایج حاصل از تجزیه و

ورود آب به سفره آب زیرزمینی مرتفع‌تر را (که اغلب منجر به شوری و زهدار شدن اراضی مجاور و به تبع آن نصب سیستم‌های زهکشی پرهزینه می‌شود) برای مدیریت آب در کشاورزی به وجود می‌آورد (Martin & Gates, 2014; Ahuchaogu et al., 2015). بنابراین، دانش و اصول مورد نیاز برای برآورد این نوع تلفات در هر سیستم آبیاری برای بهبود مدیریت آبیاری (با تأکید بر توزیع عادلانه آب)، شناخت اثرهای لاینینگ، طراحی کانال و همچنین ارائه طرح کشت بهینه حیاتی است (Barkhordari et al., 2020). به منظور برآورد تلفات تراوش در کانال‌ها تاکنون از روش‌های متفاوتی از جمله روش‌های میدانی و مستقیم شامل روش ورودی-خروجی^۱ و روش حوضچه‌ای^۲، روش استفاده از مدل فیزیکی و تشابه ابعادی، روش‌های مبتنی بر مدلسازی عددی و تحلیلی و نیز معادلات تجربی مختلفی به عنوان روش‌های غیرمستقیم استفاده شده است.

به‌رغم روش‌های مختلف به کار گرفته شده برای برآورد میزان تراوش در کانال انتقال آب، وجود مشکلات و نواقص مختلفی مانند محدودیت استفاده در شرایط خاص بهره‌برداری (محدودیت در ابعاد، وجود شرایط ماندگار و عدم قطع جریان)، صرف هزینه، دقت و وقت زیاد، فرض شرایط ایده‌آل و همگن و ناممکن بودن ارائه در شرایط مختلف جغرافیایی، کاربرد این روش‌ها را تا حدود زیادی محدود می‌سازد (Akkuzu, 2012). علاوه بر روش‌های گفته شده برای برآورد تلفات آب، استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز تراوش در محیط خاک یکی دیگر از راهکارهای کاربردی در تحقیقات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

برخورداری و همکاران (Barkhordari et al., 2019) به منظور بررسی پتانسیل دو راهکار پوشش بتنی و اتوماسیون بهره‌برداری در کاهش تلفات سامانه انتقال و توزیع شبکه‌های آبیاری، میزان تراوش را به ازای

1- Inflow-Outflow

3- Irrigation Canal Simulation System

2- Ponding

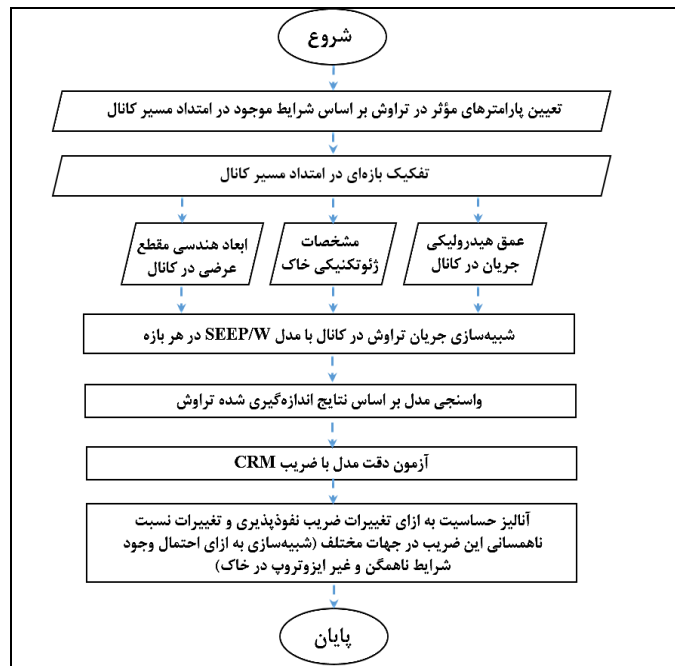
قابل اجرا خواهد بود. مدل‌های عددی می‌توانند به عنوان یک ابزار قدرتمند جهت سنجش اهمیت و تأثیر پارامترهای مختلف در میزان تراوش به کار روند. این در حالی است که استفاده از روش‌هایی مانند مدل‌های عددی در برآورد میزان تراوش، اگرچه توانایی زیادی در رفع محدودیت‌های روش‌های مذکور دارند، ولی بررسی خصوصیات پیچیده حاکم در خاک به‌ویژه در صورت وجود شرایط ناهمگن و غیر ایزوتروپ در خاک، به عنوان عاملی تأثیرگذار در محاسبه میزان تراوش، تاکنون در این مطالعات مد نظر قرار نگرفته است و بحث آنالیز حساسیت در فرآیند شبیه‌سازی با تمرکز بر تغییر پارامترهای مؤثر تنها در شرایط همگن و به دور از شرایط واقعی حاکم در خاک به‌میان آمده است.

در مطالعه حاضر، برای اولین بار با استفاده از مدل SEEP/W در شرایط مختلف ژئوتکنیکی (مثل وجود ناهمگنی و غیرایزوتروپی در محیط خاک) و در جهت رفع خلأ تحقیقاتی مطالعات قبل، از روش آنالیز حساسیت استفاده می‌شود. بر این اساس و با توجه به فلوجارت ارائه شده در شکل ۱، در گام اول این پژوهش، مدل‌سازی بر اساس مطالعات و اندازه‌گیری‌های میدانی در امتداد کانال است که در آن از مدل SEEP/W استفاده می‌شود. در گام بعدی به منظور بررسی نتایج با حاشیه اطمینان بیشتر و با توجه به احتمال وجود ناهمگنی و غیر ایزوتروپی در لایه‌بندی و موقعیت مصالح مدل‌سازی شده (در مقایسه با مطالعات و اندازه‌گیری‌های میدانی)، به آنالیز حساسیت میزان تراوش به ازای تغییرات ضریب نفوذپذیری و همچنین تغییرات نسبت ناهمسانی این ضریب در جهات مختلف پرداخته خواهد شد. سرانجام، برای ارزیابی آنالیز حساسیت و نیز کاربردی کردن نتایج به دست آمده، در صورت وقوع پدیده‌های مختلف مانند رسوب‌گذاری و فرسایش در امتداد کانال به‌ویژه در دراز مدت، نمودارهایی بر حسب شدت وقوع شرایط مذکور ارائه شده است.

تحلیل آماری روش‌های مذکور با استفاده از آزمون دانکن، حاکی از دقت و اعتبار مدل‌های نرم‌افزاری در تخمین میزان تراوش در منطقه مورد مطالعه بود. یائو و همکاران (Yao et al., 2012) به منظور بررسی تأثیر پوشش کانال با ساختارهای لایه‌ای متفاوت در میزان تراوش، شبیه‌سازی جریان برای مطالعه حساسیت میزان تراوش نسبت به نفوذپذیری‌های متفاوت را با استفاده از مدل HYDRUS-2D ارزیابی کردند. نتایج تحقیقات این محققان نشان داد که پوشش کانال تنها فاکتور مؤثر در کاهش تراوش نیست، بلکه پوشش رسی با فشردگی تنها در کف کانال بهترین عملکرد را در کاهش میزان تراوش فراهم می‌کند.

شمسائی و محمودی (Shamsai & Mahmoudi, 2005) برای تطبیق روش تجربی موریتس^۱ با روش تئوری تراوش آب از کانال با مدل SEEP-3D، مقدار ضریب ثابت C در معادله موریتس را برای ۱۹۲ حالت و برای سه میزان ارتفاع آب درون آن ارائه دادند. مشاهده شد که چنانچه مستقیماً روش تئوری با واسنجی ضریب نفوذپذیری استفاده شود، می‌تواند دقت بیشتری نسبت به روش‌های تجربی ارائه دهد. کتیبه (Katibeh, 2004) به منظور بررسی میزان حساسیت تراوش تحت تأثیر شرایط مختلف پوشش کانال (میزان نفوذپذیری و ضخامت‌های مختلف) و همچنین تراز سطح آب در زهکش‌ها، با به‌کارگیری روش اجزای محدود برای حل معادله حاکم بر تراوش، به این نتیجه رسید که در شرایطی که نسبت نفوذپذیری پوشش کانال نسبت به لایه‌های زیرین آن بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۱ باشد، میزان تراوش کاهش می‌یابد. همچنین، پوشش کانال زمانی در کاهش میزان تراوش مؤثر است که ضخامت پوشش مورد نظر کمتر از ۰/۲ اختلاف تراز سطح آب در کانال و سطح آب در زهکش باشد.

استفاده از مدل‌های عددی مختلف افزون بر راحتی و دستیابی سریع به نتایج، در مقایسه با روش‌های مستقیم و غیر مستقیم، برای گستره‌ای متنوع از شرایط مرزی نیز



شکل ۱- روندنمای تحقیق

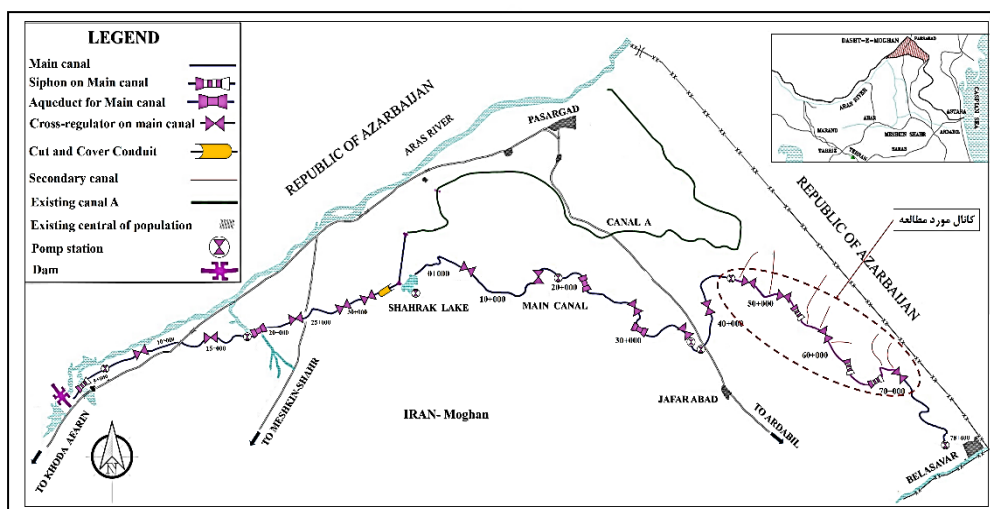
Fig. 1- Research Flowchart

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

بابک و بيله‌سوار به بالهارود تخلیه می‌گردد. مجموع طول کانال بعد و قبل دریاچه ۱۱۴ کیلومتر است که تنها ۱۴ کیلومتر از آن تا سال ۱۳۸۸ به صورت پراکنده دارای پوشش بتنی است. کانال مورد مطالعه در این پژوهش در مسیر بعد از دریاچه و در کیلومتر ۲۳۰+۴۶ تا ۳۴۰+۷۰ (تحت عنوان کانال اصلی بيله‌سوار) واقع است و نزدیک به ۲۸ درصد از سطح زیرکشت در شبکه از این کانال آبرسانی می‌شود. بر اساس گزارش‌ها در خصوص کانال مورد نظر، به دلیل بالا بودن میزان تراوش در مسیر کانال مشکلات متعددی از جمله زهدار شدن اراضی و رشد نی به‌ویژه در امتداد مسیر کانال مورد مطالعه به وجود آمده است. در شکل ۲، موقعیت کانال مورد نظر ارائه شده است. هدف‌های مورد نظر در این تحقیق روی کانال اصلی واقع در این امتداد ارزیابی می‌شوند.

شبکه آبیاری مغان با هدف تحت پوشش قرار دادن ۷۲۰۰۰ هکتار اراضی خالص با آبیاری از سد انحرافی میل و مغان در طول ۳۵ سال مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. کانال اصلی شبکه آبیاری دشت مغان از انتهای حوضچه‌های رسوب‌گیر سد انحرافی میل و مغان، با ۸ دریاچه کشویی با حداکثر دبی ۸۰ متر مکعب در ثانیه در شرایط گشودگی کامل تغذیه می‌شود. کانال مذکور که به عنوان کانال مادر عمل می‌کند عمدتاً دارای بدنه خاکی است و پس از مشروب کردن اراضی زراعی مسیر خود به طول ۳۵ کیلومتر، به دریاچه شهرک می‌ریزد. این کانال مجدداً از دیواره شمالی دریاچه ادامه می‌یابد و مسافتی بالغ بر ۷۸ کیلومتر می‌پیماید و در جنوب اراضی شهرستان



شکل ۲- موقعیت کانال مورد مطالعه

Fig. 2- The position of the studied canal

می‌شود، نرم‌افزار SEEP/W است. نرم‌افزار SEEP/W از برنامه‌های ژئوتکنیکی مبتنی بر المان محدود و یک مدلساز عددی از سری مجموعه‌های نرم‌افزار Geo-Studio است که توانایی مناسی در ترسیم گرافیکی شبکه جریان، توزیع پتانسیل فشار و سطح آزاد جریان داخل پروفیل خاک دارد.

با توجه به این‌که تغییر در میزان حجمی آب موجود در خاک در شرایط اشباع و غیر اشباع، تابعی از تغییرات فشار آب حفره‌ای است (رابطه ۲).

$$\partial \theta = m_w \cdot \partial u_w \quad (2)$$

که در آن،
 m_w = شیب نمودار ذخیره رطوبت حجمی آب در خاک؛ و u_w = فشار آب حفره‌ای است. از طرفی دیگر، با توجه به هد هیدرولیکی کل، رابطه ۳ را داریم.

$$h = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (3)$$

که در آن،
 y = عمق آب در کف کانال؛ و γ_w = وزن مخصوص آب است. با جایگذاری رابطه‌های ۳ در ۲ و در نهایت استفاده از رابطه ریچاردز، رابطه ۴ را خواهیم داشت.

اساس محاسبات هیدرولیکی تراوش در نرم‌افزار SEEP/W

ریچاردز با استفاده از معادله‌های پیوستگی و دارسی که برای جریان در خاک‌های اشباع استفاده می‌شود، معادله خود را برای شبیه‌سازی جریان آب در محیط متخلخل، غیر اشباع و دو بعدی خاک به صورت زیر ارائه کرد که شکل تعمیم یافته معادله معروف لاپلاس است (Taran & Mahtabi, 2020).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = q + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن،

K_x و K_y = ضریب نفوذپذیری خاک در دو جهت به ترتیب افقی و قائم و قائم (m/s) ؛ h پتانسیل آب در خاک (m) ،
 $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ = تغییرات حجمی رطوبت نسبت به زمان؛ و q = دبی جریان ورودی (m^3/s) به واحد سطح توده خاک است. حل معادله‌های مذکور به‌ویژه برای مدل کردن جریان آب در خاک غیر اشباع با استفاده از روش‌های عددی می‌تواند بسیار پیچیده شود. این پیچیدگی‌ها استفاده از روش‌های عددی را برای آنالیز مسائل تراوش در همه موارد به جز مسائل ساده، لازم می‌سازد. از جمله نرم‌افزارهایی که برای حل این معادله‌ها با استفاده از روش اجزا محدود استفاده

منظور تخمین نفوذپذیری به عنوان تابعی از مکش ماتریک خاک در این تحقیق با استفاده از مدل SEEP/W، از تابع ون گنوختن (Van Genuchten, 1980) به صورت زیر استفاده شده است.

$$k_w = k_s \frac{[1 - (a\psi^{(n-1)})(1 + (a\psi^n)^{-m})]^2}{((1 + a\psi^n)^m)^2} \quad (5)$$

که در آن،

k_s = ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع، a, n, m پارامترهای برازش منحنی هستند که بر پایه تابع حجم آب مرتبط با خاک می‌تواند به صورت گرافیکی تخمین زده شوند، و ψ = محدوده مکش مورد نیاز است. محدوده تغییرات ضریب نفوذپذیری اشباع در انواع خاک‌ها بر اساس طبقه‌بندی Unified را می‌توان به شکل جدول ۱ زیر بیان کرد.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = q + m_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

رابطه دیفرانسیل فوق رابطه‌ای است که در نرم‌افزار SEEP/W به منظور شبیه‌سازی جریان آب در خاک حل می‌گردد.

در فرآیند شبیه‌سازی جریان آب در خاک، اندازه‌گیری نفوذپذیری روندی است هزینه‌بر و زمان‌بر. اندازه‌گیری نفوذپذیری می‌تواند به راحتی با یکی از چندین روش پیش‌بینی با استفاده از منحنی توزیع دانه‌بندی خاک و یا تابع میزان آب اندازه‌گیری شده به همراه ضریب نفوذپذیری خاک اشباع عملی شود. در این زمینه، نرم‌افزار SEEP/W از روش‌هایی برای تخمین و پیش‌بینی نفوذپذیری استفاده می‌کند که پس از مشخص شدن تابع میزان حجمی آب و ضریب نفوذپذیری خاک در حالت اشباع (k_s)، نفوذپذیری نمونه خاک را تخمین می‌زند. به

جدول ۱- محدوده تغییرات ضریب نفوذپذیری اشباع بر اساس نوع خاک و سیستم طبقه‌بندی Unified. (Bowles, 1996).

Table 1- Values of Saturation Permeability Coefficient Changes by Soil Type and Unified Classification System (Bowles, 1996)

ضریب نفوذپذیری (متر بر ثانیه)				
Permeability coefficient (m/s)				
10^0	10^{-2}	10^{-5}	10^{-9}	10^{-11}
Clean gravel GW, GP	Clean gravel and Sand mixtures GW, GP SW, SP GM	Sand- Silt mixture SM, SL, SC		Clays

است که زیر بار آب قرار گرفته‌اند، به این نقاط مقادیری از بار کلی برابر ارتفاع سطح آب داخل کانال نسبت به تراز سطح مبنا تعلق گرفت. شرط مرزی دوم مربوط به نقاط هم‌تراز سطح مبنا است که معادل تراز تحتانی مدل عددی مد نظر قرار گرفته است.

با عنایت به این موضوع که مشخصات هیدرولیکی جریان (مثل عمق آب)، مشخصات هندسی مقطع عرضی کانال و خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح در امتداد کانال از جمله پارامترهای تأثیرگذار در میزان تراوش به حساب

مدل‌سازی تراوش آب از کانال مغان

با توجه به قابلیت بالای نرم افزار SEEP/W، تراوش آب از بدنه کانال خاکی مورد نظر به کمک این نرم‌افزار مدل‌سازی شد. برای این کار، پس از جمع‌آوری اطلاعات اولیه بر اساس وضعیت موجود و حاکم بر شرایط هیدرولیکی و هندسی کانال و شرایط ژئوتکنیکی خاک در امتداد کانال مغان، مسئله در مدل تعریف گردید. پس از تعریف شبکه‌بندی و مصالح بستر، شرایط مرزی در مدل تعریف شد. شرایط مرزی اول مربوط به نقاط داخل کانال

مشابه تقسیم و مقادیر تراوش به تفکیک برای هر یک از بازه‌ها مدل‌سازی و محاسبه شد. مشخصات هندسی و هیدرولیکی بازه‌های ۷ گانه لحاظ شده در تحقیق حاضر که با مطالعات و اندازه‌گیری‌های میدانی در امتداد مورد نظر حاصل شدند، به تفکیک در جدول ۲ ارائه شده است.

می‌آیند و از طرفی نیز با توجه به اینکه بر اساس پروفیل-های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی تهیه شده در امتداد کانال مورد نظر، جنس خاک عمدتاً از نوع "CL" است، متناسب با تغییرات سایر پارامترها (هندسی و عمق کانال) در امتداد مسیر کانال، این مسیر به ۷ بازه با شرایط پیرامونی

جدول ۲- مشخصات هندسی و هیدرولیکی در هر بازه (Anon, 2014)

Table 2- Geometric and hydraulic characteristics at each reach

Reach	Geometric cross section	b (m)	y_n (m)	z	H (m) ($y_n + Fb^*$)	V (m/s)	λ (m/m)
1		4	1.73	1.5	2	1.11	0.00033
2		3	1.64	1.5	2	1.09	0.00033
3		3	1.54	1.5	2	1.00	0.00033
4		3	1.43	1.5	2	0.96	0.00033
5		3	1.38	1.5	2	0.92	0.00033
6		3	1.28	1.5	2	0.88	0.00033
7		3	1.20	1.5	2	0.85	0.00033

* Freeboard

** Average Velocity

*** Longitudinal Slope

گرفته شده است. بنابراین، محدوده تغییرات این مقادیر در مقاطع مختلف بسته به عمق هیدرولیکی و هندسی هر مقطع متفاوت است. یادآوری این نکته بسیار بااهمیت است که در فرآیند مدل‌سازی، چه در مرحله ترسیم هندسه مدل و چه در مرحله اختصاص شرایط مرزی به مدل، هر یک از پارامترها بر اساس یک مبدأ واحد (تراز سطح مبنا) با مختصات (۰ و ۰) مقداردهی شده است. با استناد به مطالعات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی در امتداد این مسیر و به منظور تخمین نفوذپذیری در مصالح مدل شده، مقادیر مربوط به مشخصات ژئوتکنیکی خاک در جدول ۳ ارائه شده است.

شکل ۳، مقطع مدل شده در بازه شماره ۲ را (به عنوان مقطعی نمونه از مدل‌سازی در امتداد کانال) با ابعاد و مشخصات مورد نظر نشان می‌دهد. مقطع مورد نظر در شکل با ابعاد المانی ۰/۵ متر، شامل ۲۴۵۵ گره^۱ و ۲۳۴۰ المان خاک به صورت دوبعدی برای شبیه‌سازی جریان تراوش مدل شده است.

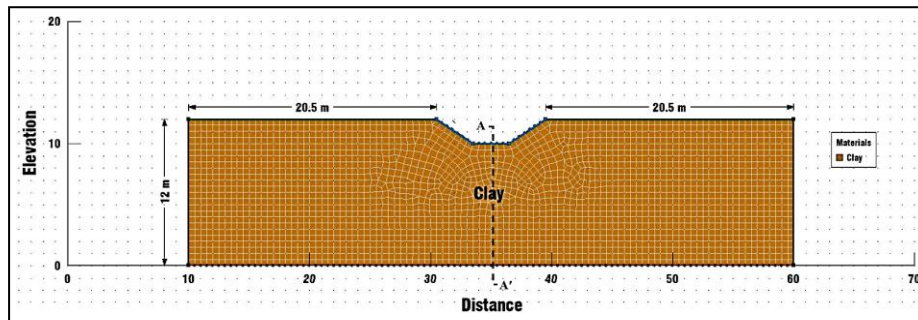
یادآوری می‌شود که به علت وضعیت خاص اراضی در دشت مغان، وجود زهکش‌های سطحی و ارتفاع کانال نسبت به اراضی مجاور، عمق سطح سفره آب زیرزمینی بسیار پایین‌تر از ترازهای مدل‌سازی است (بیشتر از ۵ برابر عمق کانال) و سفره آب زیرزمینی در محاسبه میزان تراوش برای این کانال عملاً تأثیرگذار نیست (Anon, 2004).

برای مدل‌سازی مقاطع عرضی در امتداد کانال مورد نظر و نیز به منظور کنترل تأثیر هندسه طرح و شرایط محیطی بر میزان تراوش (مانند موقعیت برم‌های کانال نسبت به سطح زمین، وجود جریان رودخانه و یا زهاب در پیرامون کانال و عمق آب زیرزمینی)، در ترسیم هندسه محدوده پیرامونی کانال مغان در مقاطع مختلف مدل شده، عرض مدل عددی و عمق آن به نحوی انتخاب گردید که در صورت وجود هریک از عوامل مذکور، تأثیر آن در میزان تراوش لحاظ گردد. بر این اساس، طول مدل در هر یک از طرفین کانال معادل ۴-۲ برابر سطح افقی آزاد کانال و عرض آن نیز معادل ۱۰-۷ برابر ارتفاع آب در کانال در نظر

جدول ۳- مشخصات ژئوتکنیکی خاک در امتداد مسیر کانال (Anon, 2014)

Table 3- Geotechnical characteristics of soil along the canal path

جنس Type	رطوبت اشباع خاک (متر مکعب بر متر مکعب) Saturated water content (m ³ /m ³)	مقدار آب باقی مانده (متر مکعب بر متر مکعب) Residual water content (m ³ /m ³)	ضریب نفوذپذیری (متر بر ثانیه) Permeability coefficient (m/s)	1
رسی	0.005	0.0005	5×10 ⁻⁷	



شکل ۳- مقطع عرضی مدل شده در بازه شماره ۲ و المان بندی

Fig. 3- Modeled cross section in reach No. 2 and elementing

نفوذپذیری اشباع برای نوع خاک مورد نظر در جدول (۱) به عنوان متغیر قابل تغییر در فرآیند مربوط به آنالیزهای مقایسه‌ای^۳ مد نظر قرار گرفت. برای سنجش توانایی نرم‌افزار SEEP/W در تخمین میزان تراوش در این کانال، از ضریب آماری جرم باقی مانده (CRM)^۴ به صورت رابطه^۶ استفاده شد.

$$CRM = \left(\sum_{i=1}^n o_i - \sum_{i=1}^n p_i \right) / \sum_{i=1}^n o_i \quad (۶)$$

که در آن،

o_i و p_i به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده تراوش هستند.

نتایج و بحث

نتایج مدل‌سازی تراوش آب از بستر کانال مورد

مطالعه

مسیر جریان، توزیع پتانسیل آبی، مرز جریان تراوش (خط فریاتیک) و میزان تراوش در پروفیل خاک مربوط به یک نمونه از مقطع مدل‌سازی شده (مقطع مربوط به بازه

واسنجی^۱

پس از محاسبه و مدل‌سازی تراوش در کانال مورد نظر، به منظور کنترل و آزمون مدل مذکور، ارزیابی مقادیر تراوش با مقادیر اندازه‌گیری شده به روش مستقیم و بر پایه حجم‌های ورودی و خروجی^۲ (در مطالعات شرکت آب منطقه‌ای اردبیل و دفتر مدیریت بهره‌برداری شبکه آبیاری دشت مغان) مد نظر قرار گرفته است. از مقادیر اندازه‌گیری شده تراوش در طول کانال اصلی استفاده شد که در مدت ۱۵ ماه جمع‌آوری شده بود. با هماهنگی مدیران بهره‌برداری شبکه در روز اندازه‌گیری، ضمن ثابت نگه‌داشتن جریان ورودی، حتی‌الامکان از آبیگری کانال‌های درجه ۲ در امتداد این کانال خودداری و سپس دبی کانال اندازه‌گیری شد. با توجه به ناچیز بودن مقدار تلفات تبخیر در مقایسه با تلفات تراوش در این امتداد، از محاسبه آن صرف نظر شد (Anon, 2004).

برای واسنجی مدل‌سازی و به عبارتی دیگر نزدیک شدن مقدار شبیه‌سازی شده تراوش در مسیر مورد نظر با مقدار اندازه‌گیری شده آن، تغییر ضریب نفوذپذیری اشباع مصالح مدل شده (بر اساس محدوده مجاز تغییرات ضریب

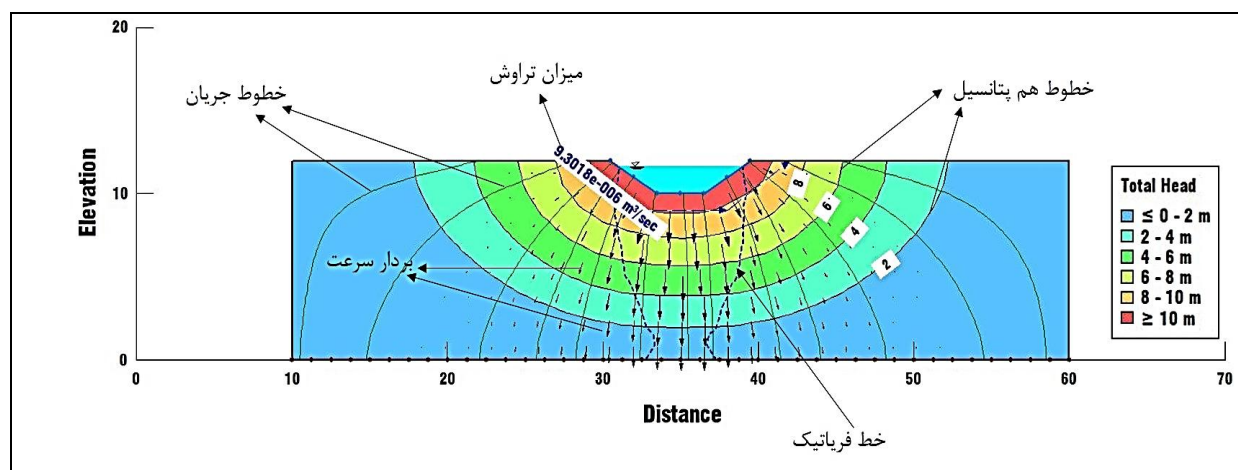
1- Calibration
3- Back Analysis

2- inflow-outflow
4- Coefficient of Remaining Mass

آنالیز و تعیین میزان تراوش در کانال خاکی آبیاری با استفاده از ...

تشریح شده، در جدول ۴ ارائه شده است. در مرحله واسنجی مدل و پس از پرداختن به آنالیزهای مقایسه‌ای، مقدار ضریب نفوذپذیری اشباع برای خاک در طول مسیر کانال به مقدار $6/5 \times 10^{-7}$ متر بر ثانیه تدقیق و انتخاب شد.

شماره ۲) در امتداد کانال مغان در شکل ۴ نشان داده شده است. مدلسازی برای سایر مقاطع در هر بازه (مشابه با روند مدلسازی در مقطع مربوط به بازه شماره ۲) اجرا شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در امتداد کل مسیر کانال مورد نظر و نیز بر حسب مقاطع ۷ گانه تفکیکی



شکل ۴- خطوط جریان، هم پتانسیل و میزان تراوش در مقطع شبیه‌سازی شده مربوط به بازه شماره ۲

Fig. 4- Flow and equivalent potential lines and Rate of seepage in simulated cross section for reach No. 2

جدول ۴- نتایج میزان تراوش با مدل SEEP/W در امتداد کانال مغان

Table 4- Seepage rate results simulated with the SEEP/W model along the Moghan Canal

بازه Reach	طول (کیلومتر) Length (km)	میزان تراوش ($\times 10^3$ لیتر بر روز) Seepage rate (L/day $\times 10^3$)
1	5/64	5097.6
2	3.50	1641.6
3	1.77	1382.4
4	2.72	1987.2
5	7.50	4492.8
6	1.62	1123.2
7	1.34	864
میزان تراوش کل Total seepage rate		16934.4

کانال مغان برخوردار است. از آنجا که مدل‌ها برای شبیه‌سازی واقعی تا حد ممکن از فرضیاتی استفاده می‌کنند، در این مدل نیز به علت در نظر نگرفتن میزان تعرق پوشش گیاهی و تلفات تبخیر، تخریب ساختمان خاک ناشی از حرکت ریشه گیاهان، خطای اندازه‌گیری انسان و تغییرات فضایی نفوذپذیری (به خصوص ناهمگونی در

با توجه به ضریب جرم باقی‌مانده (CRM) محاسبه شده (جدول ۵) در راستای واسنجی مدل تراوش و مقایسه میزان برآورد شده تراوش در دو حالت شبیه‌سازی با استفاده از مدل مذکور و مقدار اندازه‌گیری شده، می‌توان گفت که مدل SEEP/W با حداکثر انحراف ۱۰ درصد (۰/۱ واحد)، از توانایی بالایی در تخمین میزان تراوش در

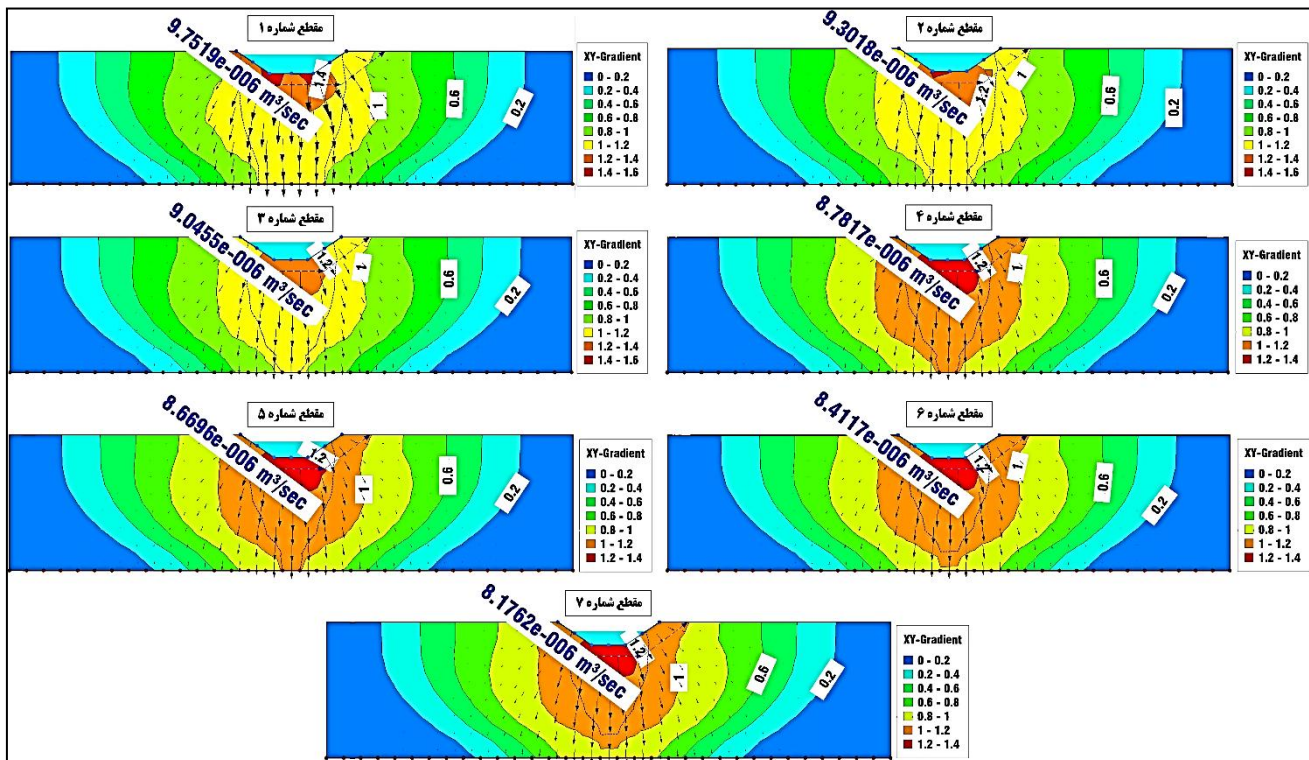
فضای سه بعدی و خاصیت غیر ایزوتروپ بودن خاک) در پروفیل خاک‌های لایه‌بندی شده، قبول ۱۰ درصد خطا در شبیه‌سازی منطقی به نظر می‌رسد که البته با وجود خطای موجود در فرآیند اندازه‌گیری تا میزان $\pm 5\%$ درصد وجود این مشکل (اختلاف) اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

جدول ۵- نتایج حاصل از مقایسه میزان شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده تراوش در کانال مغان ($\times 10^3$ لیتر بر روز)
Table 5- Results of comparing the simulated and measured seepage rates in the Moghan Canal ($L/day \times 10^3$)

نتایج اندازه‌گیری شده ($\times 10^3$ لیتر بر روز) Measured results ($L/day \times 10^3$)	نتایج شبیه‌سازی شده ($\times 10^3$ لیتر بر روز) Simulated Results ($L/day \times 10^3$)	CRM
18662.4	16934.4	0.09

پارامترهای مرتبط و همچنین از دیدگاه‌هایی متفاوت مانند مقدار گرادیان هیدرولیکی پیرامون هر یک از مقاطع در شکل ۵ ارائه شده است.

آنالیز شبیه‌سازی تراوش پیرامون توزیع گرادیان هیدرولیکی نتایج حاصل از تحلیل تراوش و مدلسازی در کانال مورد نظر، در ارتباط با توزیع سایر



شکل ۵- توزیع گرادیان هیدرولیکی در مقاطع شبیه‌سازی شده در هر بازه
Fig. 5- Distribution of hydraulic gradients in simulated sections at each reach

اتصال این قسمت به جداره‌های کناری بیشتر است و بنابراین پتانسیل خروج آب در این ناحیه نسبت به جداره‌های کناری مقطع کانال بیشتر خواهد بود (Taran

همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است، با توجه به اینکه گرادیان هیدرولیکی متأثر از بار هیدرولیکی است، این پارامتر به‌خصوص در محدوده کف کانال و در محل

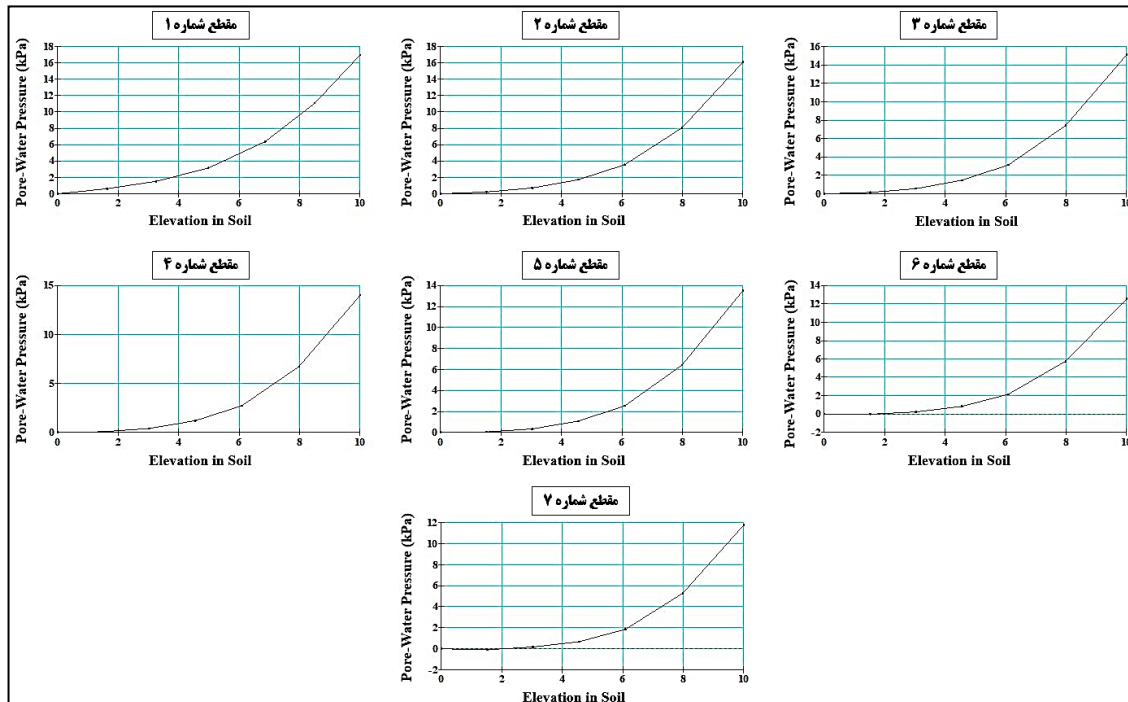
اقتصادی در کشور کمک خواهد کرد هزینه‌های پروژه‌های لاینینگ به حداقل برسد.

آنالیز شبیه‌سازی تراوش پیرامون توزیع فشار آب حفره‌ای

نتایج حاصل از تحلیل شبیه‌سازی تراوش در کانال مورد مطالعه، به منظور بررسی توزیع فشار آب حفره‌ای و شدت تأثیرگذاری جریان تراوش یافته در عمق مدلسازی شده از پروفیل خاک و در امتداد محور AA' (شکل ۳) در هر یک از مقاطع مدل شده، در نمودارهای شکل ۶ ارائه شده است.

در هر یک از نمودارهای شکل ۶ دیده می‌شود که از رقوم ارتفاعی ۶ متر به بعد در عمق پروفیل خاک مدل شده در هر مقطع، مقدار فشار آب حفره‌ای با شدت بیشتری افزایش می‌یابد و بنابراین تأثیر جریان بر نقاط (ذرات خاک) قرارگرفته در این موقعیت محسوس است. به عبارتی دیگر، با توجه به قرارگیری کف کانال در رقوم ارتفاعی ۱۰ متر، بیشترین تأثیر جریان در عمق پروفیل خاک و در امتداد محور AA' از کانال حداکثر تا ۴ متر پایین‌تر از کف کانال خواهد بود. مشابه با همین روند نیز در سایر مقاطع شبیه‌سازی شده در هر بازه مشاهده شده است. به عبارتی دیگر، شدت تأثیرگذاری جریان در عمق‌های مختلف به نسبت عمق آب موجود در کانال، در تمامی مقاطع تقریباً یکسان است. از مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که در فاصله‌ای در حدود ۳-۴ برابر عمق آب موجود در کانال در هر مقطع، نسبت به کف کانال و در امتداد محور AA' کانال، تأثیر جریان بر محیط و ذرات خاک ناچیز خواهد بود، در صورتی که با نزدیک شدن به منبع تراوش (کانال) تأثیر جریان بر محیط اطراف به تدریج افزایش می‌یابد.

(Mahtabi, 2020; Bakhtiari et al., 2011). مقدار این پارامتر با توجه به بیشتر بودن عمق در سه مقطع شماره ۱، ۲ و ۳ دارای حداکثر مقدار ۱/۶ در کف کانال و ۱/۲ در محل اتصال آن به جداره‌های کانال است و با کاهش تدریجی عمق آب در کانال در مقاطع پایین دست (مقاطع شماره ۴، ۵، ۶ و ۷)، مقدار مذکور برای این پارامتر به ۱/۴ در کف کانال و ۱ در محل اتصال آن به جداره‌های کانال کاهش می‌یابد. نتایج گویای این واقعیت است که راهکار لاینینگ یکنواخت کف و جداره بازه‌های کانال انتقال آب زمانی می‌تواند راهکاری موفق تلقی شود که صرفاً مبتنی بر نتایج مدلسازی باشد. لازم است توضیح داده‌شود که لاینینگ یکنواخت کف و جداره، در اکثر پروژه‌های نگهداری از تأسیسات سیستم‌های توزیع آب کشاورزی، اولین و اصولی‌ترین راهکار در کاهش تلفات تراوش برشمرده می‌شود و عمدتاً منطبق بر تجربیات شخصی مدیران شبکه‌های توزیع است. در تحقیقات مختلف (Barkhordari et al., 2019; Yao et al., 2012)، با این‌که عملکرد پایین استفاده از راهکار لاینینگ بتن در کاهش تلفات تراوش کانال خاکی به اثبات رسیده است، ولی متأسفانه همچنان در بسیاری از پروژه‌های لاینینگ به‌ویژه با بتن، این نکته مد نظر قرار نگرفته است و با اتخاذ تصمیم‌های غلط هزینه‌های گزاف برای این امر صرف می‌شود. بنابراین، اتخاذ مناسب‌ترین رویکردهای مدیریتی به‌ویژه به‌کارگیری لاینینگ در پیاده‌سازی پروژه‌های بهسازی و مدرن‌سازی شبکه‌های توزیع و انتقال آب خاکی، نیازمند تحلیل‌های بیشتر از جمله تحلیل‌های فنی، اقتصادی و ملاحظات اجرایی به منظور دستیابی به بهترین پتانسیل راهکار مذکور در کاهش معضل تراوش خواهد بود. در نظر گرفتن این نکته با توجه به محدودیت‌های



شکل ۶- نمودار توزیع فشار آب حفره‌ای در امتداد محور AA' در پروفیل خاک

Fig. 6- Graph of Pore-Water Pressure along the AA' axis in the soil profile

مصلح معادل با مقادیر مشخص شده در محدوده 10^{-7} تا 10^{-8} متر بر ثانیه (با توجه به بررسی سایر نمونه‌های مختلف اخذ شده در امتداد مسیر کانال) به تحلیل‌های مستقلی پرداخته شده است. به منظور ارزیابی تأثیر ناهمسانی مصالح بستر کانال نیز کلیه تحلیل‌ها به ازای k_y/k_x های ۱، ۰/۷، ۰/۵، ۰/۳ و ۰/۱ صورت پذیرفته است (Barkhordari et al., 2020). یادآوری می‌شود تغییر متغیرهای k_x و k_y/k_x به‌هنگام بهره‌برداری به دلایل متفاوت از جمله وجود درصد‌های مختلفی از ذرات درشت‌دانه و ریزدانه خاک، وجود انواع عوارض زمین‌شناسی (خرد شدگی و یا زون‌های خرد شده)، فعالیت موجودات زنده و... وجود دارد که به دلیل محدودیت در کیفیت و کمیت مطالعات زمین‌شناسی (به‌طور مثال، تعداد و نوع نمونه‌برداری‌ها) شناسایی کامل آنها و تعیین مشخصات واقعی حاکم در خاک مقدور نیست و باعث ایجاد تغییرات در دبی تراوش (نسبت به دبی حاصل از شبیه‌سازی اصلی) در امتداد کانال خواهد

آنالیز شبیه‌سازی تراوش به ازای تغییرات ضریب نفوذپذیری

به منظور تحلیل تراوش پیرامون کانال در برآورد میزان تراوش آب، شبیه‌سازی اصلی مدل تراوش در امتداد کانال مورد نظر بر اساس نتایج حاصل از مطالعات و اندازه‌گیری‌های هیدرولیکی، هندسی، ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی کانال دنبال شد. اما به منظور بررسی بیشتر و در نظر گرفتن احتمال وجود ناهمگنی و غیر ایزوتروپی در جنس، لایه‌بندی و موقعیت مصالح در شرایط واقعی، در مقایسه با مدل‌سازی اصلی، نیاز خواهد بود حساسیت پارامترهای با اهمیت بیشتر (به‌ویژه ضریب نفوذپذیری) در مدل تراوش کانال مغان تحلیل شود. برای این کار و به منظور نتیجه‌گیری با حاشیه اطمینان مناسب و ارزیابی شرایط ژئوتکنیکی واقعی حاکم بر خاک، نسبت به شرایط مدل‌سازی شده در امتداد مسیر کانال مورد نظر، و بنابراین کسب اطمینان نسبی از میزان تراوش در شرایط پیش‌بینی شده، با در نظر گرفتن ضریب نفوذپذیری اشباع

شده در امتداد کانال و نیز تخمین میزان تراوش در هر بازه به ازای ترکیب حالت‌های مختلف از مقادیر در نظر گرفته شده برای ضریب نفوذپذیری (بر اساس حدود ۱۴۰ مرحله مدلسازی)، در جدول ۶ به عنوان تراوش کل در امتداد مسیر کانال مغان ارائه شده است.

شد. بنابراین، به منظور ارائه آنالیز جامع برآورد میزان تراوش از کانال مورد مطالعه در این تحقیق، شبیه‌سازی تراوش برای گستره‌های وسیع از تغییرات محتمل در متغیرهای k_x و k_y/k_x صورت گرفت. نتایج حاصل از مجموعه آنالیزها، با توجه به تعداد بازه‌های در نظر گرفته

جدول ۶- نتایج میزان تراوش به ازای تغییرات k_x و نسبت k_y/k_x در خاک

Table 6- Seepage rate results for k_x and the ratio of k_y/k_x

میزان تراوش ($10^3 \times$ لیتر بر روز)
Seepage rate (L/day $\times 10^3$)

k_x (m/s)	k_y/k_x	1	0.7	0.5	0.3	0.1
5×10^{-8}		1302.4	981.6	758.1	520.7	245.4
6×10^{-7}		15629.2	11779	9097.2	6233.1	2944.9
6.5×10^{-7}		16931.6	12760.5	9855.2	6752.5	3190.2
8×10^{-7}		20838.6	15705.2	12129.5	8310.8	3926.4

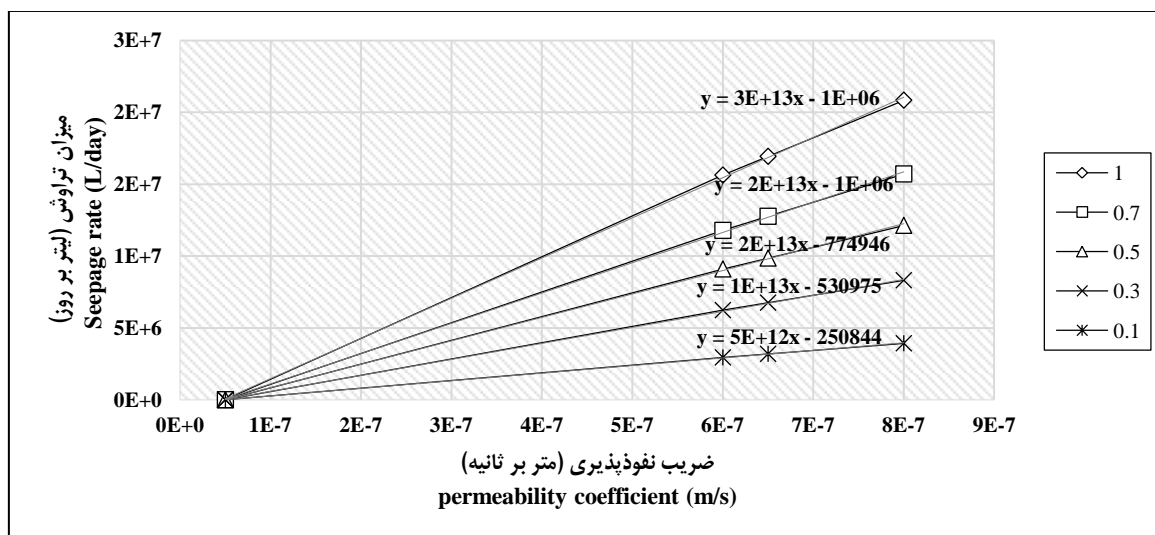
تا چندین برابر (حدود ۵ برابر) افزایش دهد که با استفاده از آنالیز صورت گرفته این تغییرات قابل پیش‌بینی خواهد بود.

با توجه به مقادیر به دست آمده در جدول ۶، امکان وقوع حداکثر و حداقل دبی تراوش به ازای افزایش و کاهش ضریب نفوذپذیری مصالح بستر خاک تا چند برابر مقادیر لحاظ شده در مدل اصلی (مدلسازی با ضریب نفوذپذیری برابر با $10^{-7} \times 6/5$ و k_y/k_x برابر با مقدار عددی ۱) نیز قابل برآورد است. این موضوع نشان می‌دهد به دلیل وجود شرایط ناهمگن و غیر ایزوتروپ حاکم و به-ویژه احتمال تحقق نیافتن پیش‌فرض‌های طراحی در حین اجرا در پروفیل خاک (Movahedan *et al.*, 2010) وقوع چنین شرایطی نیز چندان دور از انتظار هم نیست و منطقی به نظر می‌رسند. از طرفی هم به دلیل تغییر در خصوصیات ژئوتکنیکی و محیطی خاک در دراز مدت، مانند افزایش ضریب نفوذپذیری و بازشدگی مجاری و خلل و فرج موجود در خاک در اثر افزایش شدت جریان و نیز کاهش ضریب نفوذپذیری و بسته شدن خلل و فرج در اثر عواملی مانند رسوب‌گذاری در جریان کانال، امکان تخمین

با توجه به جدول ۶، برای مصالح خاک با ضریب نفوذپذیری $10^{-8} \times 5$ متر بر ثانیه (یعنی وجود درصد بیشتری از ذرات ریزدانه در امتداد پروفیل خاک)، مقدار تراوش محاسبه شده از $10^3 \times 245/4$ لیتر بر روز به ازای نسبت ناهمسانی ۰/۱ به مقدار $10^3 \times 20838/6$ لیتر بر روز به ازای نسبت ناهمسانی ۱ رسیده است. یعنی افزایش یا کاهش نسبت ناهمسانی تا ۱۰ برابر (به علت هر یک از عوامل مذکور) می‌تواند باعث تغییر در میزان تراوش این کانال تا حدود ۳/۷۵ برابر شود. به عبارتی دیگر، تغییرات نسبت نفوذپذیری در نفوذپذیری‌های کمتر، تاثیرگذاری محدودی در دبی تراوش خواهد داشت. این در حالی است که افزایش نسبت ناهمسانی در نفوذپذیری بیشتر (یعنی $10^{-7} \times 8$) در رشد مقدار تراوش محسوس‌تر خواهد بود. مطابق با جدول ۶، در ضریب نفوذپذیری $10^{-7} \times 8$ متر بر ثانیه و به ازای تغییر مقدار نسبت ناهمسانی از ۰/۱ به ۱، میزان تراوش با افزایش حدود ۵ برابر، از $10^3 \times 3926/4$ به $10^3 \times 20838/6$ لیتر بر روز رسیده است. وجود لایه‌هایی با درصدهای متفاوت از مصالح درشت‌دانه مثل شن در مسیر احداث کانال ممکن است میزان تراوش را

به منظور ارزیابی میزان تأثیرگذاری تغییرات ضریب نفوذپذیری و نسبت ناهمسانی این ضریب در جهت‌های مختلف بر میزان تراوش، شکل ۷ تدوین و ارائه شده است.

حداکثر و حداقل میزان تراوش (به عنوان یک برآورد اولیه و بدون نیاز به مدلسازی) برای ضرایب نفوذپذیری متفاوت در این کانال قابل پیش‌بینی خواهد بود.



شکل ۷- تغییرات مقدار تراوش به ازای تغییرات ضریب نفوذپذیری در خاک

Fig. 7- Seepage rate changes for permeability coefficient in soil

مختلف (فرسایش و رسوب‌گذاری) به وجود آمده در دراز مدت، بدون نیاز به مدلسازی و تا حدودی با پذیرش درصدی از اختلاف به عنوان یک برآورد اولیه تخمین زد.

نتیجه‌گیری

به منظور برآورد میزان تراوش در قسمتی از کانال خاکی اصلی آبیاری دشت مغان با طول تقریبی ۲۴ کیلومتر، از مدل SEEP/W به عنوان شبیه‌ساز عددی استفاده شد. نتایج مدلسازی مبتنی بر ضریب آماری CRM نشان می‌دهد با پذیرش انحرافی به میزان ۱۰ درصد (۰/۱ واحد) به عنوان منبع خطای اجتناب‌ناپذیر، مدل مذکور در تخمین میزان تراوش از کانال مورد مطالعه قابلیت بالایی دارد. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در مدل SEEP/W پیرامون سایر پارامترها، مانند گرادیان هیدرولیکی و فشار آب حفره‌ای، نشان داد به دلیل اینکه گرادیان هیدرولیکی متأثر از بار هیدرولیکی است، این پارامتر به‌خصوص در محدوده کف

مطابق با شکل ۷ و همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شده است، با توجه به تغییرات شیب در هر نمودار می‌توان گفت که تغییرات نسبت ناهمسانی ضریب نفوذپذیری در جهت‌های طولی و عرضی (k_y/k_x) در نفوذپذیری‌های کم، تأثیرگذاری محدودی در دبی تراوش دارد. در حالی که افزایش تغییرات در این نسبت در نفوذپذیری‌های زیاد در رشد میزان تراوش محسوس‌تر خواهد بود. به منظور تعیین میزان تأثیرگذاری این نسبت در میزان تراوش، معادله‌های مربوط به هر نسبت در نمودار شکل ۷ ارائه شده است که به طور عمومی ضریب همبستگی هر معادله ۱ است. بنابراین بر اساس شکل ۷ و نیز با توجه به معادله‌های ارائه شده می‌توان تنها با اندازه‌گیری مقادیر نفوذپذیری در منطقه مورد نظر و تعیین نسبت تغییرات ناهمسانی این ضریب در جهت‌های مختلف (که با توجه به مطالعات و آزمایش‌های صحرائی بر نمونه‌های اخذ شده قابل دسترسی است)، دبی تراوش را در صورت وقوع پدیده‌های

مطالعه در این تحقیق، نشان می‌دهد با توجه به شدت وقوع پدیده‌های مختلف مانند رسوب‌گذاری و فرسایش و بنابراین تغییر ضریب نفوذپذیری (k_x) به ازای مقادیر مختلف k_y/k_x (در مقایسه با مقدار در نظر گرفته شده در برآورد تراوش کانال این تحقیق) در دراز مدت، امکان تخمین حداکثر و حداقل میزان تراوش (به عنوان یک برآورد اولیه، بدون نیاز به انجام مدلسازی) در این کانال قابل پیش‌بینی است که البته با وجود خصوصیات پیچیده ژئوتکنیکی خاک به ویژه در فضای سه بعدی در امان خاک، در نظر گرفتن چنین مقادیری به عنوان بازه‌های احتمالاتی میزان تراوش چندان دور از انتظار هم نخواهد بود.

برای کاهش احتمال وقوع چنین شرایطی، مطالعه دقیق ژئوتکنیکی در امتداد مسیر کانال به منظور شناخت بیشتر ناهمگنی یا غیر ایزوتروپی به‌ویژه در بعد سوم در محیط خاک، احداث کانال در مسیر مناسب، در نظر گرفتن تمهیدات لازم مثل فشردن بستر خاک با غلتک (در ضخامت‌های کم)، تثبیت بیولوژیک خاک (در ضخامت‌های زیاد)، تزیق سیمان در صورت وجود عوارض زمین‌شناسی و استفاده از پوشش‌های کم‌هزینه مثل قیر و جوت مات و ژئوممبران (Bahramloo et al., 2017) مد نظر خواهد بود.

کانال و در محل اتصال این قسمت به جداره‌های کناری بیشتر است و بنابراین پتانسیل خروج آب در این ناحیه نسبت به جداره‌های کناری مقطع کانال بیشتر خواهد بود. بنابراین، به‌کارگیری لاینینگ یکنواخت کف و جداره کانال خاکی به‌ویژه با بتن، زمانی عملکرد بهتری دارد که صرفاً بر مبنای نتایج مدلسازی و تحلیل بیشتر پارامترهای فنی و اقتصادی و ملاحظات اجرایی باشد. در نظر است با توسعه مدل شبیه‌ساز استفاده شده در این تحقیق، برای رتبه‌بندی و بررسی راهکارهای مناسب برای کاهش تلفات تراوش از دیدگاه شاخص‌های فنی، اقتصادی و ملاحظات اجرایی گام‌هایی برداشته شود.

نتایج تحقیق نشان داد که حداکثر مقدار فشار آب حفره‌ای نیز به میزان ۳ تا ۴ برابر عمق آب موجود در کانال، نسبت به کف کانال و در امتداد قائم پروفیل خاک حاصل می‌شود. بنابر توضیح ارائه شده، یکی از نتایج کاربردی تحقیق حاضر به‌کارگیری روش ارائه شده در تعیین موقعیت سیستم‌های زهکشی در اطراف کانال‌های آبیاری، به‌منظور دستیابی به مناسب‌ترین عملکرد زهکشی می‌باشد.

توسعه مدلسازی تراوش به منظور برآورد حداقل و حداکثر میزان تراوش در دراز مدت در کانال مورد

مراجع

- Ahuchaogu, I., Etim, I., & Anwana, E. (2015). Evaluation of seepage losses in an earth line canal: A case study of university of Uyo Farm, Uyo, Nigeria. *International Journal of Engineering Sciences and Management Research*, 2(2), 2349-6193.
- Akkuzu, E. (2012). Usefulness of empirical equations in assessing canal losses through seepage in concrete-lined canal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(5), 455.
- Anon. 2004. Studies of main canal coverage and modification of main network structures, Ardebil Regional Water Company, Office of Operation Management of Moghan Plain Irrigation Network, Yekom Consultant Engineers. *Research Rep.* (in Persian)
- Anon. 2014. Geotechnical modeling of the embankment section of Moghan channel in the channel path, Ardebil Regional Water Company, Office of Operation Management of Moghan Plain Irrigation Network, Yekom Consultant Engineers. *Research Rep.* (in Persian)

- Azari Fard Jahromi, H., Shahrokhnia, M. A., & Sanaee Jahromi, S. (2016). Estimation of seepage in lined irrigation channels of Marvdasht plain using SEEP/W and MSEEP models. *Iranian journal of irrigation and drainage*, 6 (9), 948-959. (in Persian)
- Bahramloo, R., Abbasi, N., Mamanpoush, A.R., Akhavan, k., & Riahi, A. (2017). Evaluation of conveyance efficiency and water seepage loss in irrigation canals with HDPE geomembrane lining in plains of Zaiandeh-rood, Moghan and Kerman. *Iranian journal of soil and water research*, 4, 725-735. (in Persian)
- Bakhtiari, Z., Liaghat, A., & Rahimi, H. (2011). Laboratory and numerical assessment of Geocompsite filter application under the bed of a laboratory canal model. *Iranian journal of irrigation and drainage*, 4 (3), 350-358. (in Persian)
- Barkhordari, S., Hashemy Shahdany, M., & Bagherzadeh Khalkhali, A.. (2019). Performance Evaluation of Two Strategies of “Lining” and “Automated Operation” in Reducing the Water Conveyance and Distribution Losses within the Main Canals, Case Study of Moghan Main Canal. *Journal of Water and Soil Science*, 23 (3), 141-155. (in Persian)
- Barkhordari, S., Shahadany, S. H., Taghvaeian, S., Firoozfar, A., & Maestre, J. (2020). Reducing losses in earthen agricultural water conveyance and distribution systems by employing automatic control systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168, 105122.
- Bowles, L. (1996). *Foundation analysis and design*. McGraw-hill.
- Katibeh, H. (2004). Seepage from lined canal using finite-element method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130 (5), 441-444.
- Mansuri, B., & Salmasi, F.. (2016). Effect of canal slope and hydraulic conductivity of soil on seepage with Seep/w software. *Iranian Water Research Journal*, 10 (21), 191-189. (in Persian)
- Martin, C. A., & Gates, T. K. (2014). Uncertainty of canal seepage losses estimated using flowing water balance with acoustic Doppler devices. *Journal of Hydrology*, 517, 746-61.
- Mohammad Rezapour Tabari, M., & Mazak Mari, M. (2016). A Simulation-Optimization Approach for Reducing Seepage Rate in Water Conveyance Canals. *Journal of Iran-water resources research*, 3, 17-30. (in Persian)
- Movahedan, M., Mamanpoush, A.R., & Abbasi, N. (2010). *Assessment seepage rate from irrigation canals and water resources with geosynthetic covers*. In *Second national seminar on geotechnical issues for irrigation and drainage networks*. May. 23. Agricultural Technical and Engineering Research Institute of Karaj. Iran. (in Persian)
- Shamsai, A., & Mahmoudi, A. A. (2005). *Three-dimensional seepage analysis in water conveyance canals*. 5th *Iran hydraulic conference*, Iranian hydraulic association. Nov. 8-10. Faculty of engineering Shahid Bahonar of Kerman University. Iran. (in Persian)
- Taran, F., & Mahtabi, G.. (2020). Optimum layout of weep holes in concrete irrigation canals to control uplift pressure and hydraulic gradient. *Arabian Journal of Geosciences*, 13 (2), 88.
- Tavakoli, E., Ghorbani, B., Samadi Borujeni, H., Radfar, M., & Ghahraman, B. (2016). Modifying empirical equations of seepage estimation using dimensional analysis (Boldaji earth canal, Chaharmahal and Bakhtiari province). *Journal of Water and Soil Conservation*, 2, 106-118. (in Persian)
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*, 44 (5), 892-898.
- Yao, L., Feng, S., Mao, X., Huo, Z., Kang, S., & Barry, D. A.. (2012). Coupled effects of canal lining and multi-layered soil structure on canal seepage and soil water dynamics. *Journal of hydrology*, 430, 91-102.

Research Paper

Analysis and Determine of Seepage Rate in Irrigation Earthen Canal Using Numerical Model (Case Study: Main Canal of Moghan Plain Irrigation Network)

S. Barkhordari and S. M. Hashemi-Shahedani*

* Corresponding Author: Associate Professor, Department. of Irrigation and Drainage, College of Aburaihan, Univ. of Tehran, Pakdasht, Iran. Email: Mehdi.hashemy@ut.ac.iran.

Received: 14 November 2019, Received: 2 June 2020

Extended Abstract

Introduction

Seepage losses are a significant portion of losses along the main earthen canals in irrigation networks. The correct estimation of these losses will greatly help improve water productivity in the irrigation network. Due to the high capability of numerical models such as SEEP/W to estimate seepage rates in the canals, this method has been used as one of the most widely used in various researches (Barkhordari et al., 2019; Mohammad Rezapour Tabari & Mazak Mari, 2016). Despite various investigations in this regard, the seepage rate was not evaluated for the presence of heterogeneous and non-isotropic conditions in the canal bed. Therefore, in the first step of this study, Seepage rate in the earthen canal of Moghan irrigation network was evaluated using the SEEP/W model. In the second step, in order to further investigate and predict the possibility of changing the hydraulic properties of the soil in the long-term, a comprehensive assessment was carried out on the permeability coefficient.

Methodology

After collecting field data and measurements based on the existing and governing conditions (hydraulic, geometrical data and soil geotechnical) along the Moghan canal, and also based on changes in some of these parameters, the problem is defined in the SEEP/W model based on 7 reaches. In order to calibrate the model, evaluation of simulated values with measured values of seepage using the CRM statistical coefficient was considered. Then, in order to further investigate and predict the possibility of heterogeneous and non-isotropic conditions in the soil system, a separate seepage analysis was conducted in the Moghan canal by changing the values of k_x and k_y k_x^{-1} . To achieve this objective, a reasonable range of 5×10^{-8} to 8×10^{-7} m/s was determined for k_x based on the canal bottom and side walls materials. The range of 0.1 to unity was selected for k_y k_x^{-1} .

Results and Discussion

The results of the main simulated showed that the deviation of the simulated values by model seepage from the measured values (CRM) is less than 0.1. Considering the distribution of other parameters such as the

hydraulic gradient and pore-water pressure, concluded that due to the higher hydraulic gradient in the canal bottom than its side walls (equal to 1.6 and 1.2 at reaches 1, 2 and 3, and also 1.4 and 1 at reaches 4, 5, 6 and 7, on the bottom and its junction with the side walls in the canal, respectively), the water outlet potential is greater in this area. Therefore, the uniform lining of the bottom and side walls in water canal reaches can be considered as a successful solution that is based only on modelling results. Also, the maximum amount of pore-water pressure is at a distance of 3-4 times of the water depth in the canal, relative to the bottom of the canal and along the vertical profile of the soil. Further, the results of seepage analysis indicate that considering the severity of each of the long-term sedimentation and erosion conditions, it is possible to estimate a maximum seepage rate to 20838.6×10^3 L/day and a minimum to 245.4×10^3 L/day as an initial estimate, without the need for modelling in this canal, is predictable.

Conclusions

In this study, seepage rate in the earthen canal of Moghan irrigation network was evaluated using the SEEP/W model. The modelling results showed that the deviation of the simulated values by model seepage from the measured values (CRM) is less than 0.1. Then, in order to further investigate and predict the possibility of changing the hydraulic properties of the soil in the long-term, due to the possibility of heterogeneous and non-isotropic conditions in the soil system, a comprehensive assessment was carried out on the permeability coefficient. The results of this analysis indicate that considering the severity of each of the long-term sedimentation and erosion conditions, it is possible to estimate a maximum seepage rate to 20838.6×10^3 L/day and a minimum to 245.4×10^3 L/day as an initial estimate, without the need for modelling in this canal, is predictable. Also, the results of this model regarding the distribution of other parameters such as hydraulic gradient and pore-water pressure, showed that the maximum amount of hydraulic gradient was 1.4 to 1.6 in the bottom and also at the junction with the side walls of the canal. Also, the maximum amount of pore-water pressure is at a distance of 3-4 times of the water depth in the canal, relative to the bottom of the canal and along with the vertical profile of the soil.

Keywords: Hydraulic Gradient, Pore-Water Pressure, Seepage Losses, SEEP/W Software.