



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۱

صفحه‌های ۹۹-۱۱۹

DOI: 10.22059/jwim.2022.333952.944

مقاله پژوهشی:

مدیریت تغذیه مصنوعی آبخوان دشت شهریار با مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی چند هدفه

نیما صالحی شفا^۱، حسین بابازاده^{۲*}، فیاض آقایی^۳، علی صارمی^۴

۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. استاد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳. استادیار، گروه زراعت، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

۴. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۳

چکیده

رشد جمعیت و توسعه بخش کشاورزی و صنعت، باعث کاهش چشم‌گیر منابع آب زیرزمینی شده‌اند. با توجه به این موضوع یکی از راه‌حل‌های مفید و مؤثر به‌منظور بهره‌برداری بهینه از آبخوان‌ها، اجرای سیستم‌های تغذیه مصنوعی می‌باشد. در این پژوهش، با استفاده از مدل ریاضی (HEC- HMS)، روندیابی سیلاب در رودخانه کرج و مخازن سیستم تغذیه مصنوعی انجام شد. سپس حجم ذخیره در مخازن سیستم تغذیه مصنوعی توسط شبکه عصبی مصنوعی (ANN) شبیه‌سازی و در نهایت وارد الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II)، شد. از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) به‌منظور بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی با توجه به تغییرات سطح بهینه آب زیرزمینی استفاده شد. براساس نتایج حاصل‌شده، مجموع حجم تغذیه بهینه در سال آبی ۹۳ تا ۹۵ توسط سیستم تغذیه مصنوعی برابر ۹۷/۹۴ میلیون مترمکعب شده و نیز تغییرات سطح بهینه آب زیرزمینی به اندازه ۲/۶۲ متر افزایش یافته است. بنابراین با تخصیص حجم بهینه از سد انحرافی بیلقان به سیستم تغذیه مصنوعی، حجم تغذیه بهینه و نیز تغییرات سطح بهینه آب زیرزمینی در بازه زمانی موردنظر، نسبت به شرایط فعلی افزایش یافته‌اند. با توجه به این‌که، حجم تغذیه بهینه و تغییرات سطح بهینه آب زیرزمینی متناسب با یکدیگر می‌باشند، این عملکرد باعث بهبود شرایط آبخوان خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم ژنتیک چندهدفه، بهره‌برداری بهینه، تغییرات سطح بهینه آب زیرزمینی، شبکه عصبی مصنوعی.

Artificial Recharge Management of Shahriar Plain Aquifer with Multi-Objective Simulation-Optimization Model

Nima Salehi Shafa¹, Hossein Babazadeh^{2*}, Fayyaz Aghayari³, Ali Saremi⁴

1. Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3. Assistant Professor, Department of Agronomy, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

4. Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: November 14, 2021

Accepted: March 09, 2022

Abstract

Population growth and the development of agriculture and industry have led to a significant reduction in groundwater resources. According to this issue, one of the useful and effective solutions for the optimal operation of aquifers is the implementation of artificial feeding systems. In this research, using mathematical model (HEC-HMS), flood routing in Karaj River and artificial feeding system reservoirs was performed. In this study, considering to the mathematical model (HEC-HMS), flood routing was performed in Karaj River and artificial recharge system reservoirs. Then the storage volume in the artificial recharge system reservoirs was simulated by an artificial neural network and finally entered into a multi-objective genetic algorithm (NSGA-II). Multi-objective genetic algorithm (NSGA-II) was used for optimal utilization of the artificial recharge system. Considering to the optimal groundwater level changes. Based on the results, the total volume of optimal recharge in the desired time period by the artificial recharge system is equal to 97.94 million cubic meters and also optimal groundwater level changes have increased by 2.62 meters. Therefore, by allocating the optimal volume of the Bilqan diversion dam to the artificial recharge system, the optimal recharge volume and also optimal groundwater level changes in the desired time period have increased compared to the current conditions. considering that the optimal recharge volume and optimal groundwater level changes are proportional to each other, this performance will improve the aquifer conditions.

Keywords: Artificial Neural Network, Multi-objective Genetic Algorithm, Optimal Groundwater Level Changes, Optimal Utilization.

مقدمه

رخداد سیلاب خسارت‌های جبران‌ناپذیری برای محیط زیست در پی دارد ولی با جمع‌آوری رواناب حاصل از آن می‌توان از این منبع آب موقتی به صورت بهینه بهره‌برداری نمود. امروزه افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، منجر به افت و محدودیت استفاده از این منابع شده است. ادامه این روند پیامدهای ناگواری را به همراه دارد. مهار سیلاب و بهره‌وری از آن به منظور تغذیه منابع آب زیرزمینی می‌تواند یک راه حل مناسب جهت توسعه و احیای منابع آب‌های زیرزمینی باشد. با استفاده از طرح تغذیه مصنوعی، مشکلات زیست‌محیطی که تحت تأثیر منطقه طرح قرار دارند، کاهش می‌یابد (Zhang et al., 2015). به طور کلی، مناطق خشکی که پتانسیل مناسبی از نظر شدت بارندگی و پتانسیل کمی از نظر نفوذ و تغذیه آب‌های زیرزمینی دارند به منظور اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی مناسب می‌باشند (Makkawi, 2015; Xu et al., 2014). با توجه به این موضوع پژوهش‌های مدل‌سازی، به منظور تعیین میزان رواناب سطحی برای محدوده طرح‌های تغذیه مصنوعی و ارزیابی مکان مناسب برای اجرای طرح‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Ringleb et al., 2016).

Derdour et al. (2017) در حوضه Ain Sefr در کشور الجزایر با شرایط اقلیمی خشک، جهت محاسبه مقدار رواناب حاصل از بارش‌هایی با فراوانی وقوع مختلف، از مدل (HEC-HMS) و از مولفه‌های شماره منحنی (SCS) و آبنمود واحد (SCS) به ترتیب برای برآورد بارش مازاد و حجم رواناب استفاده نمودند. Mendes & Maia (2016) برای پیش‌بینی جریان سیلاب در حوضه رودخانه واقع در کشور پرتغال از مدل (HEC-HMS) استفاده کردند و نتایج واسنجی و صحت‌سنجی، دقت قابل قبول مدل را در پیش‌بینی سیل نشان داد.

Knebl et al. (2005) با تلفیق شبیه‌سازهای (HEC-HMS) و (HEC-RAS) در حوزه سن آنتونیو واقع در ایالات تگزاس آمریکا شبیه‌سازها را برای سیلاب ارائه نمودند، و کارایی شبیه‌سازها را در پیش‌بینی وقوع سیلاب متذکر شدند. Moreno et al. (2002) در پژوهشی تأثیر مخزن سد یسا روی رودخانه آراگون واقع در مرکز اسپانیا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که وقتی سطح مخزن پایین تر از ۵۰ درصد است، سیلاب‌ها به خوبی کنترل شده و بین ۵۰ تا ۷۰ درصد سیلاب‌های بزرگ مهار شده‌اند. Mohammadi & Motaghian (2011) در بررسی مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن و هیدروگراف خروجی از مخازن را به عنوان راه کار مناسب مدیریت و کاهش خسارات سیلاب مورد توجه قرار دادند. در سامانه‌های رودخانه-مخزن سدهای دز و بختیاری و شبیه‌سازی سیلاب‌های گذشته و هیدروگراف‌های ورودی به مخازن با دوره بازگشت‌های مختلف، میزان خسارت سیلاب با تعیین پهنه سیلاب با مدل هیدرولیکی و مشخص نمودن کاربری‌ها در دشت سیلابی محاسبه شده و با تعریف آن به عنوان تابع خسارت در مدل کوتاه مدت بهره‌برداری از مخزن، هیدروگراف خروجی از مخزن با حداقل نمودن میزان خسارت پایین‌دست، بهینه شد. Kawo et al. (2018) یک رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای بهینه‌سازی سیستم پمپاژ مصنوعی و شارژ برای تأمین آب سبو، فیلیپین ارائه نمودند. نتایج بهینه‌سازی حالت پایدار نشان می‌دهد که میزان مطلوب برداشت کل ۳۷/۵۴ مترمکعب در روز و شارژ مصنوعی به ۲۹۳۱۳ مترمکعب در روز افزایش می‌یابد. نتایج بهینه‌سازی گذرا برای افزایش ارتفاع سرریز به میزان ۱ و ۲ متر نشان می‌دهد که میانگین کل نرخ پمپاژ مطلوب به ترتیب به ۳۸/۷۷ و ۴۰/۴۶ مترمکعب در روز افزایش می‌یابد. Ebrahim et al. (2016) بیش‌ترین نرخ تغذیه و

همگن و ایزوتروپیک در شرایط متناوب تغذیه مصنوعی برای پایین‌دست رودخانه تریم در شمال‌غربی چین ساختند. نتایج نشان داد که مدل‌ها می‌توانند به‌طور مؤثر نوسانات سطح آب را تحت تغذیه گذرا منعکس کنند و شرایط تغذیه چندمرحله‌ای را گسترش دهند. Masetti *et al.* (2016)، تکامل زمانی نرخ‌های نفوذ در حوضه‌های پوشاننده سفره‌های زیرزمینی بسیار نفوذپذیر در منطقه‌ای در شمال ایتالیا را توسط مدل عددی غیراشباع- اشباع تجزیه و تحلیل نمودند. نتایج حاصل‌شده نشان داد هنگامی‌که حوضه نفوذ به درستی نگهداری شود (بدون گرفتگی خاک سطحی)، نرخ نفوذ تخمینی در پایین حوضه حدود پنجاه برابر بیش‌تر از تغذیه مجدد در شرایط طبیعی در همان منطقه است. هنگامی‌که حوضه نفوذ به درستی نگهداری نمی‌شود، گرفتگی زیستی به تدریج ظرفیت نفوذ حوضه را کاهش می‌دهد، که تأثیری بر تغذیه آبخوان ندارد. Alkhatib *et al.* (2021)، در مطالعه خود، برای منطقه‌ای در اردن یک رویکرد جدید ارائه نمودند که در آن از مدل‌سازی عددی آب زیرزمینی برای تولید نقشه‌های متناسب با مدیریت تغذیه آبخوان (MAR) استفاده نمودند. سپس با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، معادله تجربی تپه آب زیرزمینی را کالیبره کردند. هم‌چنین معادله تجربی (MAR) را در GIS برای محاسبه فضایی ارتفاع تپه آب زیرزمینی در زیر یک سایت فرضی تولید و براساس آن، نقشه‌های مناسب را برای اجرای (MAR) استفاده نمودند. نتایج اهمیت یکپارچه‌سازی ویژگی‌های آبخوان (هندسه و پارامترهای هیدرولیکی) و تغذیه‌های مورد انتظار را در تعیین مکان‌های مناسب برای (MAR) نشان داد. Jiang *et al.* (2021)، با هدف ارزیابی اثرات تغذیه مجدد آب‌های زیرزمینی، یک مدل عددی سه بعدی برای شبیه‌سازی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی برای منطقه‌ای در چین ساختند. نتایج نشان داد که تغذیه

استخراج از آبخوان ساحلی در عمان را با شبیه‌سازی (SLP) و الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) بررسی کردند. مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی کل حجم آب برای چهار ماه تزریق بدون برگشت در بیش‌ترین حالت برابر 10.6×8 مترمکعب و کل حجم آب برای چهار ماه تزریق و هشت ماه برگشت برابر تقریباً 10.6×5.3 مترمکعب و کل بازده آب برگشتی تقریباً 66 درصد به‌دست آوردند. تاکنون در مورد تغذیه مصنوعی به‌منظور مدیریت تغذیه آبخوان پژوهش‌های متعددی در مناطق مختلف انجام شده است. با توجه به این موضوع، در منطقه‌ای در شمال غربی هیمالیا در هندوستان (Jasrotia *et al.*, 2019)، دشت گربایگان در ایران (Rahimi *et al.*, 2014)، منطقه‌ای در جنوب هندوستان (Aju *et al.*, 2021)، آبخوان حوضه آبریز شیراز در ایران (Mokarram *et al.*, 2020)، منطقه میرزاپور در اوتار پرادش هندوستان (Dhanaraj, 2021)، منطقه غمراسن در جنوب تونس (Yahiaoui *et al.*, 2021)، منطقه حمیرپور در شمال هندوستان (Kumari *et al.*, 2021)، مناطق مناسب را جهت تغذیه مصنوعی آبخوان برآورد نمودند. هم‌چنین Hashemi *et al.* (2015) محاسبات تعادل آب و مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی را برای بررسی عملکرد هیدرولوژیکی یک روش بهبود برداشت آب، به‌عنوان سیستم پخش سیلاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک در ایران، مورد استفاده قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که با پمپاژ متوازن، سیستم پخش سیلاب می‌تواند راهی کارآمد برای افزایش منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد. Liu *et al.* (2021)، با استفاده از تبدیل لاپلاس، یک راه حل تحلیلی از معادله خطی بوسینیسک یک بعدی برآورد نمودند. سپس مدل‌های تحلیلی بهبودیافته از تغذیه چند مرحله‌ای براساس اثر پخش آب و اثر تأخیری برای مدل‌سازی نوسانات چندساله سطح آب در یک سفره

بهینه‌ساز و یا ترکیب دو مدل مورد استفاده قرار گرفته است و تفاوت مهم دیگر، استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در مدل توسعه داده شده می باشد که این موضوع منجر به افزایش سرعت و دقت مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز شده است. هم‌چنین با تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی، حجم تغذیه در سیستم و تغییرات سطح آب زیرزمینی افزایش می‌یابند.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی شهریار در حاشیه غربی شهر تهران و در موقعیت جغرافیایی $35^{\circ} 22' 14''$ تا $50^{\circ} 22' 02''$ طول شرقی و $35^{\circ} 44' 32''$ تا $35^{\circ} 02' 25''$ عرض شمالی واقع شده است. مساحت تقریبی محدوده مورد نظر $897/214$ کیلومتر مربع می‌باشد و شهرهای شهریار، اسلامشهر، رباط کریم و هم‌چنین بخشی از شهر تهران و کرج و نیز حاشیه شمالی شهرستان ری را شامل می‌شود. شکل (۱) نیز موقعیت محدوده مطالعاتی و سیستم تغذیه مصنوعی را نشان می‌دهد.

آبخوان یک روش مؤثر برای حفظ سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه‌ای است که از آب‌های زیرزمینی بیش از حد برای آبیاری و صنعت استفاده می‌شود. MohammadZadeh-Habili & Khalili (2020) به منظور ارزیابی سدهای تغذیه، سدهای میمند و تانگریز واقع در جنوب ایران را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با توسعه نظریه جریان عمیق حوضچه در خاک‌های دو لایه با لایه فوقانی با نفوذپذیری پایین و مدل‌سازی عددی نشان دادند که گودال‌های جانبی عمودی در داخل مخزن سدهای تغذیه به‌عنوان یک روش جدید برای بهبود تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی مؤثر می‌باشند.

هدف از ارائه این تحقیق، بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی و افزایش تغییرات سطح آب زیرزمینی حاصل از آن می‌باشد. که به این منظور یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز تدوین شده است. مدل مورد نظر از دو مدل شبیه‌ساز (HEC-HMS) و شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه^۱ (ANN-MLP) و یک مدل بهینه‌ساز توسط الگوریتم ژنتیک چندمنظوره^۲ (NSGA-II) تشکیل شده است. در صورتی‌که در اکثر پژوهش‌ها یک مدل شبیه‌ساز یا

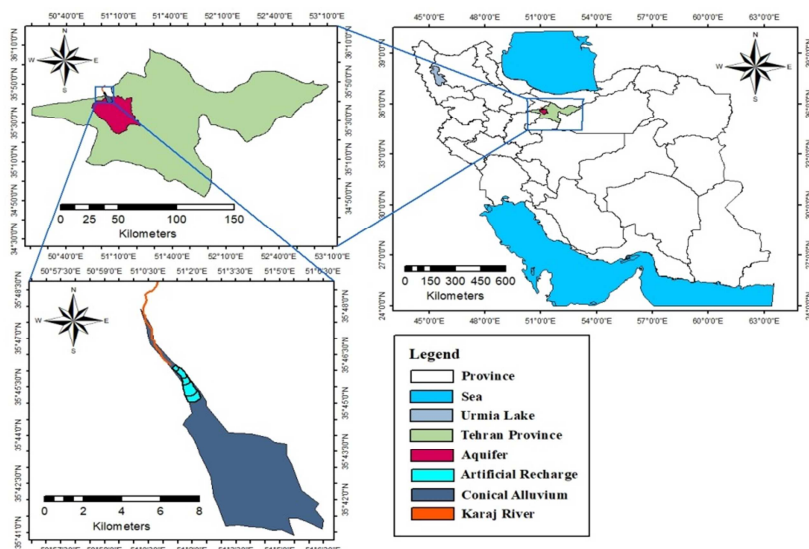


Figure 1. Situation of artificial recharge system in Shahriar plain

منابع آب زیرزمینی و تراوایی واحدهای سنگی در محدوده

کم‌وبیش تمام سازندهای زمین‌شناسی بلندی‌های پیرامون دشت شهریار از مجموعه سنگ‌های آتشفشانی هستند که بیش‌تر در محیط دریایی تشکیل و این واحدهای سنگی به‌طور کلی ناتراو هستند و آب در آن‌ها نفوذ نمی‌کند. اما در اثر فشارهای تکتونیکی، یخبندان و پدیده‌های شیمیایی خردشده و تخلخل پیدا می‌کنند و نزولات جوی می‌توانند در آن‌ها نفوذ کنند. در بین سنگ‌های سخت سازند کرج، لایه‌هایی از سنگ‌های ناتراوا مانند شیل وجود دارد به همین دلیل منابع آب تشکیل‌شده در تخلخل سطحی و درز و شکاف این سنگ‌ها به هم پیوسته نیست و به‌صورت تعدادی آبخوان محلی کوچک و جدا از هم به‌وجود آمده که در تراز مختلف تخلیه می‌شود. تراوایی واحدهای سنگی منطقه تا ژرفاهای زیاد ادامه پیدا نمی‌کند، بنابراین تأثیری بر تغذیه آبخوان آبرفتی دشت ندارد. آبرفت‌های جوان‌تر منطقه مانند آبرفت‌های بستر رودخانه‌ها و مسیل‌ها و آبرفت‌های دشت که از دانه‌های شن و ماسه به‌همراه سیلت به‌وجود آمده‌اند تراوایی زیادی داشته و آبخوان اصلی دشت شهریار در آن به‌وجود آمده است. به‌طوری که بخش بزرگی از دشت شهریار بر روی بادزن آبرفتی گسترده رودخانه کرج و کن قرار دارد. آبرفت‌های بالادست بادزن‌های آبرفتی از اجزای بسیار دانه درشت مانند قلوه‌سنگ، شن‌های درشت و ریز به‌وجود آمده و تراوایی خیلی زیاد داشته و بخش بزرگی از ریزش‌های آسمانی و رواناب‌های سطحی درون آن‌ها نفوذ می‌کند و این بخش‌ها را می‌توان مکان مناسب تغذیه آبخوان اصلی منطقه دانست. حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی در دوره زمانی موردنظر در جدول (۲) نمایش داده شده است.

سیستم تغذیه مصنوعی و منابع آب سطحی در محدوده

سیستم تغذیه مصنوعی در شمال محدوده مورد مطالعه و در مخروطه افکنه قرار گرفته است. طرح تغذیه مصنوعی شامل پنج حوضچه تغذیه متوالی بوده که در راستای محور طولی رودخانه قرار گرفته‌اند. ظرفیت آن‌ها حدود ۳۱۹۶۴۱۶ مترمکعب می‌باشد و خاکریز اول تا چهارم دارای یک سرریز می‌باشند، اما خاکریز پنجم دو سرریز دارد به‌دلیل این‌که آب مازاد در حوضچه آخر از دو سرریز و سازه مقسم بر روی خاکریز پنجم خارج شده و وارد رودخانه‌های کرج و شاد چای می‌شود. در گذشته رودخانه کرج در این محدوده به دو شاخه رودخانه کرج و شادچای تقسیم می‌شد. در حال حاضر رودخانه کرج از بالادست وارد سد انحرافی بیلقان شده و نیاز بخش شرب شهر تهران و نیاز بخش‌های شرب و کشاورزی شهر کرج را تأمین نموده و سپس وارد محدوده مطالعاتی شهریار می‌شود. هم‌چنین مقادیر سیلاب از سد انحرافی بیلقان به سمت پایین‌دست حرکت کرده و وارد مخروط‌افکنه و طرح تغذیه مصنوعی می‌شود. در این طرح، سرریزها از جنس بتن و قلوه سنگ با روکش بتن مسلح بوده و هم‌چنین نوع آن‌ها اوجی می‌باشد. با توجه به موقعیت طرح تغذیه مصنوعی، در پایین‌دست آن شن چاله‌های وسیع قرار دارند که در بخش انتهایی مخروط‌افکنه قرار گرفته‌اند. مساحت آبخوان مورد مطالعه برابر مساحت محدوده موردنظر می‌باشد. اطلاعات مربوط به حجم آب رودخانه کرج در دوره زمانی مطالعاتی در جدول (۱) مشخص شده است. تمام داده‌ها در مقیاس زمانی سه سال آبی ۹۳ تا ۹۵ و به‌صورت ماهانه مورد تحلیل قرار گرفتند.

Table 1. The volume of the Karaj River flow in the Bilaghan diversion dam (MCM)

| Condition of Karaj river flow | Water year | | |
|--------------------------------------|------------|--------|--------|
| | 2014 | 2015 | 2016 |
| Sum of Bilaghan | 580.94 | 384.56 | 304.24 |
| Flood of Bilaghan | 21.87 | 13.01 | 8.34 |
| Inflow from Bilaghan to Shahriar | 77.83 | 51.58 | 40.98 |
| Consumption of Tehran and Karaj city | 481.24 | 319.97 | 254.92 |

Table 2. Exploitation volume of ground water resources in the study period (MCM)

| Water year | Part of consumption | | | Total |
|------------|---------------------|----------|----------|--------|
| | Agriculture | Domestic | Industry | |
| 2014 | 501.8 | 192.54 | 50.07 | 744.41 |
| 2015 | 513.61 | 190.23 | 48.45 | 752.29 |
| 2016 | 524.71 | 207.75 | 52.48 | 784.94 |

روش انجام پژوهش

روندیابی سیلاب در رودخانه

سیستم تغذیه مصنوعی^۳ در این پژوهش شامل رودخانه و طرح تغذیه مصنوعی است که با توجه به این موضوع، کل حجم تغذیه بهینه در رودخانه و طرح تغذیه مصنوعی برآورد شده است. به دلیل این که طرح تغذیه مصنوعی فاقد ایستگاه هیدرومتری می باشد، داده های هیدرولیکی رودخانه مانند (مساحت خیس شده) توسط مدل هیدرولیکی (HEC-RAS) محاسبه شده سپس با استفاده از نرخ نفوذ مقادیر حجم تغذیه از بستر رودخانه محاسبه شده است. پس از این مرحله، جهت تعیین آبنمود سیلاب در محل ورود به طرح تغذیه مصنوعی و برآورد حجم نفوذ در بستر رودخانه، از مدل (HEC-HMS) استفاده شد. به این منظور از خروجی مدل هیدرولیکی (HEC-RAS) در مدل اول (HEC-HMS) جهت روندیابی سیلاب در رودخانه با استفاده از روش ماسینگهام-کانژ استفاده شد. در پژوهش موردنظر، ابتدا توسط مدل (HEC-HMS) روندیابی سیلاب در رودخانه و مخازن سیستم تغذیه مصنوعی، به صورت دو مدل مستقل شبیه سازی شدند. در مدل اول، به منظور روندیابی سیلاب در رودخانه کرج، میزان آبی که از بالادست وارد سد انحرافی بیلقان شده، به عنوان یک منبع آبی در نظر گرفته و با المان منبع شبیه سازی شده است. سد انحرافی بیلقان، مقادیر تخصیص داده شده به شهر تهران، کرج، شهریار و سیلاب تولید شده در بالادست را منحرف نموده و سیلاب را به سمت رودخانه کرج و سیستم تغذیه مصنوعی وارد می نماید. بنابراین با توجه به این موضوع، سد انحرافی

بیلقان و رودخانه کرج توسط المان انحراف آب و رودخانه شبیه سازی شده اند. در این مدل دبی تخصیص داده شده به شهر تهران، کرج، شهریار به عنوان ورودی به المان انحراف آب در نظر گرفته شده است و مدل توسط این المان دبی بالادست را از منبع دریافت نموده و دبی تخصیص داده شده را منحرف نموده و دبی سیلاب را به عنوان خروجی برآورد می کند. در مدل موردنظر، مقدار نفوذ و نشت در رودخانه توسط معادله ماسینگهام-کانژ^۴ محاسبه شد. هم چنین طول بازه رودخانه کرج که به عنوان بخشی از سیستم تغذیه مصنوعی در نظر گرفته شده و روندیابی سیلاب در آن برآورد شده ۸۳۵۶ متر می باشد که با ضریب ضبری مانینگ ۰/۰۴ و به شکل ذوزنقه شبیه سازی شده است. در محاسبات روندیابی سیلاب توسط مدل، رودخانه به صورت یکپارچه فرض شده است. مدل توسط المان رودخانه و روش روندیابی ماسینگهام-کانژ نرخ نفوذ، نسبت دبی نفوذ به دبی سیلاب و آبنمود سیلاب را دریافت می کند و در نهایت دبی سیلاب را روندیابی نموده و به عنوان خروجی برآورد می کند. مدل (HEC-HMS) رخداد سیلاب را به صورت تک واقعه شبیه سازی می کند، به همین دلیل آبنمود ۱۸ سیلاب در بازه زمانی مطالعاتی به صورت مستقل روندیابی شده است. هم چنین طول رودخانه تا ابتدای حوضچه اول طرح تغذیه مصنوعی برآورد شده است. بنابراین با محاسبه دبی نفوذ در رودخانه تا ابتدای حوضچه اول طرح تغذیه مصنوعی، دبی سیلاب ورودی به طرح برآورد شده است. هم چنین به منظور ارزیابی مدل اول (HEC-HMS) اختلاف حجم سیلاب در محل ورود به طرح تغذیه مصنوعی حاصل از دو مدل (HEC-RAS) و (HEC-HMS) برآورد شده و نتایج حاصل از این مدل با معیارهای آماری (MAE) و (RMSE) ارزیابی شدند. در نهایت از دبی سیلاب ورودی در روندیابی سیلاب در مخازن به صورت دستی و نیز در

روندیابی سیلاب در مخازن طرح تغذیه مصنوعی توسط مدل دوم (HEC-HMS)، داده‌های ورودی شامل دبی سیلاب ورودی حاصل از مدل اول و دبی ذخیره حاصل از محاسبات دستی برای حوضچه‌های طرح می‌باشند که به ترتیب با المان منبع و مخزن شبیه‌سازی شده‌اند. روندیابی حوضچه‌های طرح تغذیه مصنوعی، با روش نمودار جریان خروجی، محاسبه ذخیره‌سازی در مدل، با روش دبی-ذخیره و محاسبه شرایط اولیه با روش تعادل دبی ورودی-خروجی انجام شده‌اند. روش نمودار جریان خروجی با استفاده از الگوریتم پالس اصلاح شده، مخازن طرح را روندیابی می‌نماید. در محاسبه ذخیره‌سازی با روش منحنی تخلیه-ذخیره، روندیابی و محاسبه ذخیره با استفاده از منحنی موردنظر انجام می‌شود. شرط اولیه با استفاده از روش ورودی-خروجی در ابتدای شبیه‌سازی، ورودی را به مخزن می‌برد و از منحنی تخلیه-ذخیره برای تعیین میزان ذخیره موردنیاز برای تولید جریان خروجی از مخزن استفاده می‌کند. براساس رخدادهای هر سیلاب در رودخانه که با استفاده از مدل اول روندیابی شده است. و به دلیل این‌که مدل (HEC-HMS)، توانایی مناسب جهت محاسبه ذخیره و تخلیه تمام مخزن‌های طرح را به صورت هم‌زمان و با دقت مناسب دارد، در مدل دوم نیز دبی هر سیلاب ورودی به طرح تغذیه مصنوعی هم‌زمان در مخازن طرح و در بازه زمانی مورد مطالعه به صورت مستقل، روندیابی شده است. شکل (۳) مدل مفهومی روندیابی سیلاب در مخازن طرح تغذیه مصنوعی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور، در مدل دوم نیاز به اتصال مخازن به یکدیگر بود تا به این صورت مقادیر سیلاب به مخازن بعدی انتقال یابند. بنابراین مخازن طرح با استفاده از المان رودخانه (کانال) به یکدیگر متصل شدند. کانال‌های موردنظر روندیابی

مدل دوم، استفاده شد. شکل (۲) مدل مفهومی روندیابی سیلاب در رودخانه کرج را نمایش می‌دهد.

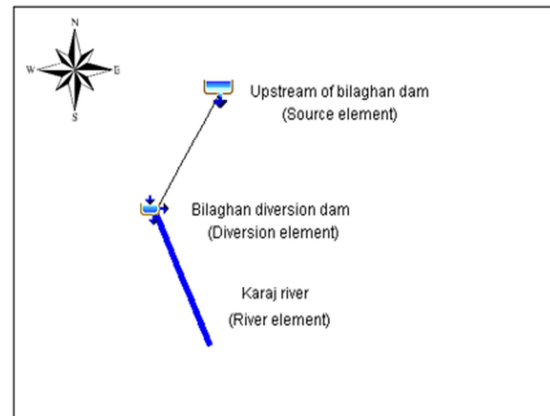


Figure 2. Conceptual Model of Flood routing in Karaj river

روندیابی سیلاب در مخازن طرح تغذیه مصنوعی

در مدل دوم، پس از محاسبه روندیابی دستی سیلاب در مخازن، مقادیر روندیابی شده دستی به صورت تجمعی وارد مدل (HEC-HMS) شدند. براساس محاسبات روندیابی دستی، زمانی که سیلاب وارد مخزن طرح تغذیه مصنوعی می‌شود نفوذ اولیه صورت می‌گیرد، که با توجه به آن، مقداری از سیلاب در طول مدت زمان ورود آن به مخزن، نفوذ می‌کند و بعد از گذشت از این مرحله، عمل ذخیره‌سازی تا لبه سرریز در مخزن انجام شده و بعد از مرحله ذخیره‌سازی در مخزن فعلی، سیلاب وارد مخزن بعدی شده و محاسبات موردنظر برای هر مخزن تکرار می‌شود و در آخرین حوضچه سیستم تغذیه مصنوعی، مازاد سیلاب از آن خارج می‌شود. زمانی که سیلاب وارد مخزن اول می‌شود دارای بار رسوب بیشتری است نسبت به زمانی که وارد مخزن‌های بعدی می‌شود. بنابراین مخزن اول به عنوان حوضچه رسوب‌گیر فرض شده و در محاسبات روندیابی دستی و مدل، شبیه‌سازی نشده است. در

سیلاب ورودی به طرح تغذیه و حجم سیلاب خروجی از طرح تغذیه، به عنوان ورودی و حجم سیلاب ذخیره شده در حوضچه های طرح تغذیه مصنوعی، به عنوان خروجی مورد محاسبه قرار گرفتند. به دلیل این که متغیرهای لایه ورودی با متغیر لایه خروجی هم جنس بوده و رابطه مستقیم با یکدیگر دارند، جهت تحلیل مدل شبکه عصبی انتخاب شده اند. بنابراین با توجه به مطالب بیان شده، برآورد حجم سیلاب ذخیره شده در مخازن طرح توسط مدل شبکه عصبی مصنوعی نیز از دقت بسیار بالایی برخوردار می باشد.

نرمال سازی داده ها در مدل شبکه عصبی مصنوعی

در ابتدا برای تحلیل حجم سیلاب ذخیره شده در حوضچه های طرح تغذیه مصنوعی، یکی از مهم ترین مراحل آماده سازی داده ها قبل از طراحی و آموزش شبکه عصبی مصنوعی هم مقیاس کردن و یا نرمالیزه کردن داده های ورودی و خروجی شبکه است. و با توجه به آن که وارد کردن داده ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می شود، لذا در آموزش شبکه، پیش پردازش یا نرمالیزه کردن داده ها قبل از محاسبه و آنالیز شبکه بسیار مهم است. بنابراین برای پیشگیری از کاهش سرعت و دقت شبکه و همچنین به لحاظ یکسان کردن ارزش داده ها برای شبکه، عمل نرمال سازی داده ها مطابق رابطه (۱) انجام شد.

$$X_n = \frac{(X - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، X ، داده های نرمال نشده، X_n داده های نرمال شده و X_{\min} و X_{\max} به ترتیب حداقل و حداکثر داده های ورودی می باشند.

ساختار مدل شبکه عصبی مصنوعی

ساختار شبکه به صورت چهار لایه شامل یک لایه ورودی،

نشوند زیرا در صورت روندیابی آن ها مقداری سیلاب در کانال ها به عنوان نفوذ برآورد شده و مابقیه سیلاب برای مخزن بعدی محاسبه می شد که این شرایط براساس واقعیت طرح تغذیه مصنوعی فعلی نبوده و مطلوب این پروژه نیست. در نهایت حجم سیلاب ورودی به طرح تغذیه حاصل از مدل اول، حجم نفوذ طی سیلاب در مخازن حاصل از محاسبات دستی، حجم سیلاب خروجی از طرح تغذیه مصنوعی و حجم ذخیره مخازن طرح تغذیه حاصل از مدل دوم به منظور شبیه سازی حجم ذخیره در مخازن، وارد مدل شبکه عصبی مصنوعی شدند.

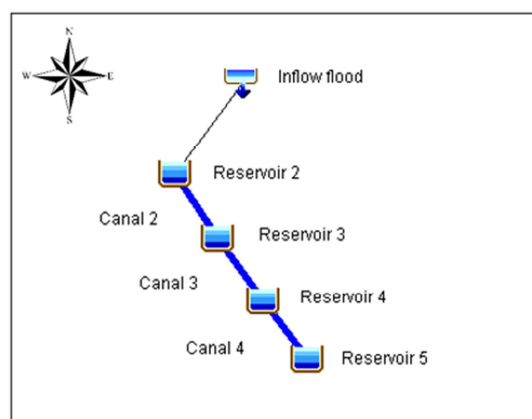


Figure 3. Conceptual model of flood routing in artificial recharge plan reservoirs

شبیه سازی حجم سیلاب ذخیره شده در طرح تغذیه

مصنوعی با شبکه عصبی مصنوعی

انتقال داده ها به محیط شبکه عصبی مصنوعی

پس از محاسبات مدل های (HEC-HMS)، به منظور محاسبه حجم سیلاب ذخیره شده در حوضچه های طرح تغذیه مصنوعی توسط مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه (ANN-MLP)، داده های حاصل از محاسبات دستی و داده های مربوط به برآورد مدل های (HEC-HMS)، وارد شبکه عصبی شدند. به این منظور داده های حجم نفوذ طی سیلاب در حوضچه ها، حجم

عصبی مصنوعی پرسپترون و در لایه خروجی آن نتایج مطلوب و قابل‌قبولی ارائه می‌دهد که با توجه به این موضوع در طی محاسبات و تکرارها تغییرات کم‌تری نسبت به توابع انتقال دیگر در لایه‌های پنهان داشته و به‌عنوان تابع انتقال لایه خروجی انتخاب شده است. یکی از معیارهای مهم در آموزش شبکه تعداد دوره‌ها یا تکرارهایی است که شبکه در حین آموزش انجام می‌دهد. به این دلیل که هرچه تعداد تکرار در آموزش شبکه بیشتر باشد، خطای شبیه‌سازی در شبکه کم‌تر خواهد شد. اما هنگامی که تعداد تکرار آموزش از یک مقدار تجاوز کند، خطای دسته آزمایشی نیز افزایش می‌یابد. با توجه به این موضوع، تعداد تکرار شبکه برابر ۱۰۰۰ دور در نظر گرفته شد. به‌منظور ارزیابی عملکرد شبکه، از معیارهای آماری ضریب همبستگی (r)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، استفاده شد.

بهینه‌سازی اهداف پژوهش با الگوریتم ژنتیک چندهدفه

در مرحله آخر محاسبات، حجم ذخیره سیلاب در مخازن طرح تغذیه مصنوعی حاصل از مدل شبکه عصبی به‌همراه حجم نفوذ در رودخانه حاصل از مدل اول (HEC-HMS)، حجم سیلاب خروجی از طرح تغذیه حاصل از مدل دوم (HEC-HMS)، حجم نفوذ طی سیلاب در حوضچه‌ها حاصل از برآورد دستی وارد محاسبات الگوریتم شدند. الگوریتم فرایند محاسبات مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به‌صورت شکل (۴) طراحی شده است.

اهداف موردنظر در تدوین مدل بهینه‌سازی شامل هدف اول، حداکثر نمودن حجم تغذیه سامانه تغذیه و هدف دوم، حداقل نمودن تغییرات تراز حاصل از حجم تغذیه توسط سیستم تغذیه مصنوعی، می‌باشد. در این مدل، اهداف دیگر مانند احیای آبخوان و کاهش مسائل زیست‌محیطی آب زیرزمینی نیز تأمین می‌شوند.

دو لایه پنهان و یک لایه خروجی، در نظر گرفته شد. لایه ورودی دارای بردار داده‌های ورودی می‌باشد و همچنین برای لایه اول پنهان پنج نرون، لایه دوم پنهان هشت نرون و لایه خروجی یک نرون، مورد محاسبه قرار گرفت. همچنین تابع انتقال نرون‌ها در لایه‌های پنهان اول و دوم، تابع انتقال tansig و در لایه خروجی، تابع انتقال purelin می‌باشند. در شبکه عصبی مصنوعی (ANN) موردنظر از تابع (feed forward backpropagation network) و با نام (newff)، استفاده شده است. که در واقع شبکه موردنظر یک شبکه پیش‌خور می‌باشد. همچنین شبکه عصبی موردنظر با استفاده از الگوریتم لونیگ-مارکوآرت^۵، آموزش داده شد. در ادامه، داده‌ها به‌منظور اختصاص به مراحل آموزش، صحت‌سنجی و آزمون، به سه دسته تقسیم می‌شوند. با توجه به این موضوع، ۷۰ درصد داده‌ها به مرحله آموزش، ۲۰ درصد داده‌ها به مرحله صحت‌سنجی و ۱۰ درصد دیگر داده‌ها به مرحله آزمون اختصاص داده شد.

انتخاب بهترین ساختار شبکه عصبی مصنوعی

انتخاب بهترین آرایش شبکه براساس آموزش شبکه‌های عصبی بر مبنای آزمون و خطا و همچنین معیارهای ارزیابی آماری می‌باشد. بنابراین در این مدل با تغییر تعداد لایه‌های پنهان و نرون‌های آن‌ها، توابع انتقال، الگوریتم آموزش و تعداد تکرار محاسبات جهت برآورد پارامتر خروجی موردنظر، مدل واسنجی شده و با استفاده از معیارهای ارزیابی آماری، بهترین آرایش شبکه ارائه شده است. شبکه برای لایه خروجی با توجه به تعداد داده‌های خروجی، نرون در نظر می‌گیرد. که در اکثر مواقع یک خروجی می‌باشد. بنابراین در لایه خروجی این مدل به‌دلیل داشتن یک پارامتر خروجی، یک نرون در نظر گرفته شده است. تابع انتقال خطی (purelin) در شبکه

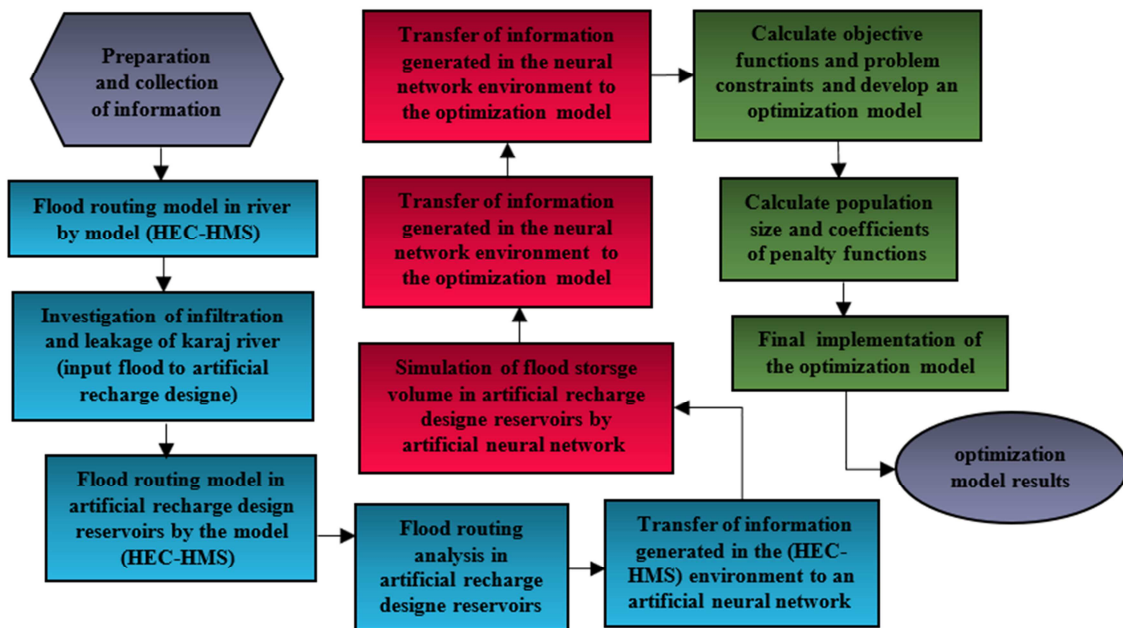


Figure 4. Calculation process of the simulation-optimization model

در این پژوهش اثر تغذیه مصنوعی بر تغییرات تراز آب زیرزمینی مورد آنالیز قرار می‌گیرد. بنابراین در صورت اعمال سیاست بهره‌برداری بهینه از منابع آب سطحی، مشکلات کمی، کیفی و زیست‌محیطی منابع آب سطحی کاهش یافته و همچنین با اتخاذ سیاست بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی، مدت زمان بهره‌برداری از منابع آب سطحی افزایش می‌یابد. در پژوهش موردنظر، منابع آب زیرزمینی به صورت مخزن در نظر گرفته شده است و محاسبات به صورت مکانی انجام نشده است. به همین دلیل تغییرات تراز آب زیرزمینی حاصل از حجم بهینه تغذیه مصنوعی به صورت گسترده در مدل بهینه‌سازی برآورد شده است.

ساختار مدل بهینه‌سازی

محاسبه حجم تغذیه بهینه توسط سیستم تغذیه مصنوعی در پژوهش حاضر، محاسبات مدل بهینه‌سازی موردنظر به صورت زیر می‌باشد که در آن Z_1 تابع هدف اول و

در پژوهش حاضر با توجه به شرایط موجود محدوده مورد مطالعه، محدودیت‌هایی به منظور تخصیص منابع آب سطحی به سیستم تغذیه مصنوعی و حجم نفوذ بهینه سامانه تغذیه و همچنین محدودیتی جهت تغییرات تراز بهینه حاصل از تغذیه مصنوعی در نظر گرفته شد. همچنین اولویت‌ها در تخصیص از منابع سطحی، ابتدا مصارف کشاورزی و تأمین نیاز کشاورزی بوده سپس از این منابع به سامانه تغذیه تخصیص می‌یابد. اولویت تخصیص‌ها به دلیل استفاده حداکثر از منابع آب قابل دسترس، تأمین نیازها و نیز کاهش مشکلات زیست‌محیطی پیچیده و هزینه بر منابع آب سطحی و زیرزمینی در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین با توجه شرایط منابع آب سطحی محدوده مورد مطالعه و با توجه به حجم تبخیر زیاد از این منابع، لازم است در مدت زمان کم‌تری مصرف شوند و یا به منظور تغذیه مصنوعی وارد آبخوان شوند و به این صورت، این منابع به صورت بهینه مورد استفاده قرار گیرند.

$$V_{rbi} = \begin{cases} \text{if } Q_m - shr \leq 0, & Q_m \\ \text{else } & shr \end{cases} \quad (9)$$

$$V_{shb} = \begin{cases} \text{if } (V_{rbi} + V_{sa}) - V_{bar} \leq 0, & 0 \\ \text{else } & (V_{rbi} + V_{sa}) - V_{bar} \end{cases} \quad (10)$$

$$Q_{pm} = \begin{cases} \text{if } Q_m = 0, & Q_{agr} \\ \text{else } & 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$Q_{bm} = \begin{cases} \text{if } Q_m - Q_{max} \leq 0, & 0 \\ \text{else } & Q_{bi} - Q_{max} \end{cases} \quad (12)$$

در روابط فوق، V_{input} حجم سیلاب ورودی به طرح تغذیه مصنوعی، V_{rit} حجم کل سیلاب ورودی به رودخانه، shr حجم باقی مانده سیلاب از نفوذ در حوضچه‌های سیستم تغذیه (کمبود)، V_{bar} حجم حوضچه‌های طرح تغذیه، Q_{bi} حجم آب ورودی از بیلقان به شهریار، Q_{agr} حجم مصارف کشاورزی، Q_m حجم آب تخصیص داده شده از بیلقان به شهریار، V_{shb} مقدار جریمه حجم تخصیص و ذخیره به اندازه حجم حوضچه‌ها، Q_{pm} مقدار جریمه حجم آب تخصیص داده شده از بیلقان، Q_{bm} مقدار جریمه حداکثر حجم آب ورودی از بیلقان به شهریار، می‌باشند. در روابط فوق، حجم آب ورودی از بیلقان به شهریار (Q_{bi})، متغیر تصمیم می‌باشد.

مقدار جریمه (V_{shb}) به این دلیل است که حجم آب سطحی اختصاص داده شده از بیلقان به سامانه تغذیه به همراه حجم آب سیلاب ذخیره شده در سامانه بیش تر از حجم حوضچه‌های سیستم تغذیه مصنوعی نشود. هم‌چنین براساس مقادیر آبی سطحی بیلقان و با توجه به مصارف کشاورزی پایین دست، مقادیر حجم آب به سیستم تغذیه اختصاص یابد و الگوریتم از این محدودیت تخطی نکرده و آن را رعایت کند و هم‌چنین برای این که الگوریتم از مقدار حداکثر حجم آب ورودی از بیلقان تخطی نکرده و آن را رعایت کند، برای آن نیز به اندازه Q_{bm} جریمه اختصاص داده شده است. حجم ذخیره

penalty function تابع جریمه مطابق معادلات (۲) و (۴) ارائه شده‌اند.

$$Z_1 = \text{Maximize } \sum_t^{nt} (R_{rech} - \text{penalty function}) \quad (2)$$

$$R_{rech} = ((V_{sa}) + (V_{rbi}) + (V_{output}) + (V_{ri}) + (V_{inf})) \quad (3)$$

$$\text{Penalty function} = \quad (4)$$

$$((V_{shb})^2 \times \alpha) + ((Q_{pm})^2 \times \beta) + ((Q_{bm})^2 \times \gamma)$$

هم‌چنین جریمه تخصیص داده شده (penalty function)

به دلیل عدم رعایت منابع سطحی تخصیص داده شده به تغذیه مصنوعی، عدم رعایت حداکثر منابع سطحی موجود و عدم رعایت تخصیص منابع سطحی به اندازه حجم حوضچه‌ها و آب قابل دسترس، می‌باشد. مقادیر جریمه بی بعد می‌باشند. هم‌چنین R_{rech} میزان حجم تغذیه بینه توسط کل سیستم تغذیه مصنوعی (سامانه تغذیه و رودخانه) می‌باشد. R_{rech} شامل V_{sa} حجم ذخیره سیلاب در مخازن طرح تغذیه حاصل از شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، V_{rbi} تخصیص منابع سطحی بیلقان به اندازه حجم حوضچه‌ها و آب قابل دسترس، V_{output} حجم سیلاب خروجی از طرح تغذیه حاصل از مدل دوم (HEC-HMS)، V_{ri} حجم نفوذ در رودخانه حاصل از مدل اول (HEC-HMS)، V_{inf} حجم نفوذ طی سیلاب در حوضچه‌ها حاصل از برآورد دستی، می‌باشد. واحد حجم تمام منابع آبی میلیون مترمکعب، در دوره زمانی ماهانه و در سال‌های آبی ۹۳، ۹۴ و ۹۵، می‌باشد. ضرایب ثابت α و β و γ در تابع جریمه اول برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده‌اند.

$$V_{input} = V_{rit} - V_{ri} \quad (5)$$

$$V_{output} = V_{input} - (V_{inf} + V_{sa}) \quad (6)$$

$$shr = \begin{cases} \text{if } V_{bar} - V_{sa} > 0, & V_{bar} - V_{sa} \\ \text{else } & V_{bar} - V_{sa} = 0, \quad 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$Q_m = \begin{cases} \text{if } Q_{bi} - Q_{agr} \leq 0, & 0 \\ \text{else } & Q_{bi} - Q_{agr} \end{cases} \quad (8)$$

که در آن input و output به ترتیب حجم ورودی و خروجی آب زیرزمینی در مرزهای محدوده، Rra حجم نفوذ از بارندگی، Rcon حجم نفوذ از مصارف شرب، صنعت و کشاورزی، Rri حجم نفوذ توسط رودخانه‌ها، w حجم مصارف توسط چاه‌های بهره‌بردار، A مساحت آبخوان (کیلومتر مربع) و Sy آبدهی ویژه^۱ (بی‌بعد)، می‌باشند. ضریب ثابت جریمه در تابع جریمه دوم λ برابر ۱۰۰۰ محاسبه شد. واحد مورد استفاده جهت محاسبه wrchb (متر) می‌باشد. در این پژوهش با توجه به شرایط پروژه سیستم تغذیه مصنوعی، محدوده و آبخوان، حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی ΔL_{MAX} برابر ۰/۰۴ (متر در ماه) در نظر گرفته شد.

دلیل حداقل نمودن تغییرات تراز حاصل از حجم تغذیه بهینه و محاسبه محدودیت مربوط به آن، این است که حجم تغذیه با توجه به منابع آب در دسترس و همچنین تغییرات تراز در بازه زمانی ماهانه بهینه شده و با توجه به این موضوع تغییرات تراز خیلی افزایش نمی‌یابد، زیرا در این صورت بعضی از مکان‌ها در محدوده دشت شهریار ماندابی نمی‌شوند و همیشه فضا در لایه‌های زمین جهت تغذیه مصنوعی وجود دارد. بنابراین به‌طور ثابت می‌توان عمل تغذیه را انجام داد. همچنین در این حالت برنامه‌ریزی برای آب زیرزمینی و مصارف مختلف و به‌ویژه مصارف کشاورزی که بیش‌ترین مصرف آب زیرزمینی در این بخش بوده، مناسب‌تر انجام می‌شود و نیز رفتار آبخوان تا حد قابل‌قبولی مورد پیش‌بینی قرار می‌گیرد. بنابراین تغییرات تراز آب زیرزمینی، با توجه به این موضوع، محاسبه و بهینه می‌شود.

$$Z_2 = \text{Minimize } \sum_t^{nt} (\text{wrchb} + \text{Penalty function}) \quad (13)$$

$$\text{wrchb} = \left(\frac{(|\text{input} - \text{output}|) + (R_{ra} + R_{con} + R_{ri} + R_{rech}) - (w)}{A \times S_y} \right) \quad (14)$$

$$\text{Penalty function} = ((\text{rchs})^2 \times \lambda) \quad (15)$$

$$\text{rchs} = \begin{cases} \text{if } |\text{wrchb}| - \Delta L_{MAX} \leq 0, & 0 \\ \text{else } |\text{wrchb}| - \Delta L_{MAX} \end{cases} \quad (16)$$

سیلاب، حجم آب سیلاب است که در حوضچه‌های طرح تغذیه مصنوعی ذخیره می‌شود. همچنین در روابط shr، اگر حجم حوضچه‌ها کم‌تر از حجم ذخیره سیلاب که توسط شبکه عصبی، شبیه‌سازی شده است، باشد و پاسخ معادله بیش‌تر از صفر شود، مقدار کمبود ذخیره یا آب در حوضچه‌ها به اندازه اختلاف حجم ذخیره سیلاب و حجم حوضچه‌ها خواهد بود، اما اگر حجم حوضچه‌ها برابر حجم ذخیره سیلاب باشد و پاسخ معادله برابر صفر شود، کمبود آب در حوضچه‌ها در ماه‌های سیلابی وجود ندارد و در واقع مقدار آن صفر محاسبه می‌شود. در ماه‌های غیره سیلابی نیز به اندازه حجم حوضچه‌ها کمبود آب در حوضچه‌ها وجود خواهد داشت. بنابراین کمبود مقادیر آب جهت تغذیه مصنوعی بستگی به حجم آب ماه‌های سیلابی و همچنین ماه‌هایی که سیلاب وجود ندارد و حجم حوضچه‌های سامانه تغذیه، دارد. و در واقع Vrbi نیز مقدار برداشت از منابع آب سطحی بیلقان، به اندازه کمبود سیلاب در حوضچه‌ها در ماه‌های سیلابی، کمبود آب در ماه‌های غیره سیلابی و با توجه به حجم حوضچه‌ها می‌باشد. به‌دلیل این‌که حجم سیلاب‌های خروجی از سیستم تغذیه Voutput، بعد از خروج از طرح تغذیه مصنوعی وارد شن چاله‌های وسیع در بخش انتهایی مخروط‌افکنه شده و در آن‌جا به آبخوان نفوذ می‌کنند، به‌عنوان تغذیه بخش خروجی سیستم تغذیه مصنوعی در حجم تغذیه کل توسط سیستم، برآورد شده است.

محاسبه تغییرات تراز بهینه آب زیرزمینی

در روابط زیر، Z_2 تابع هدف دوم و نیز Penalty function جریمه تخصیص داده‌شده به‌دلیل عدم رعایت حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی، می‌باشند. در ادامه به‌منظور محاسبه تغییرات تراز آب زیرزمینی، مقدار wrchb محاسبه شده است. wrchb به‌صورت رابطه (۱۴) محاسبه شده است.

به‌طور کلی در این پژوهش، متغیر تصمیم برای هر ماه در مدت زمان تغذیه مصنوعی، حجم آب ورودی از بیلقان به شهریار بوده که برای مدت زمان سه سال، تعداد کل متغیرهای تصمیم برابر با ۳۶ خواهد بود. در این پژوهش اندازه جمعیت کروموزم‌ها ۴۰۰^۷ و تعداد تکرارها ۱۰۰۰ دور در نظر گرفته شد. در مطالعه حاضر جهت تعیین اندازه جمعیت کروموزم‌ها، الگوریتم با چهار جمعیت ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ و هر جمعیت با ۴۰۰ تکرار اجرا شد سپس با بررسی نتایج هر اجرا، بهترین جمعیت انتخاب شد. شکل (۵) ساختار مدل بهینه‌سازی را نمایش می‌دهد.

مطابق با جدول (۳) حجم سیلاب، حجم نفوذ سیلاب در رودخانه و حجم سیلاب ورودی به طرح تغذیه برای هر سیلاب مشخص شده است. براساس نتایج این مدل، کل حجم تغذیه توسط رودخانه در بازه زمانی مطالعاتی برابر شش درصد برآورد شده است.

نتایج و بحث
با اجرای مدل اول (HEC-HMS)، محاسبه حجم نفوذ در

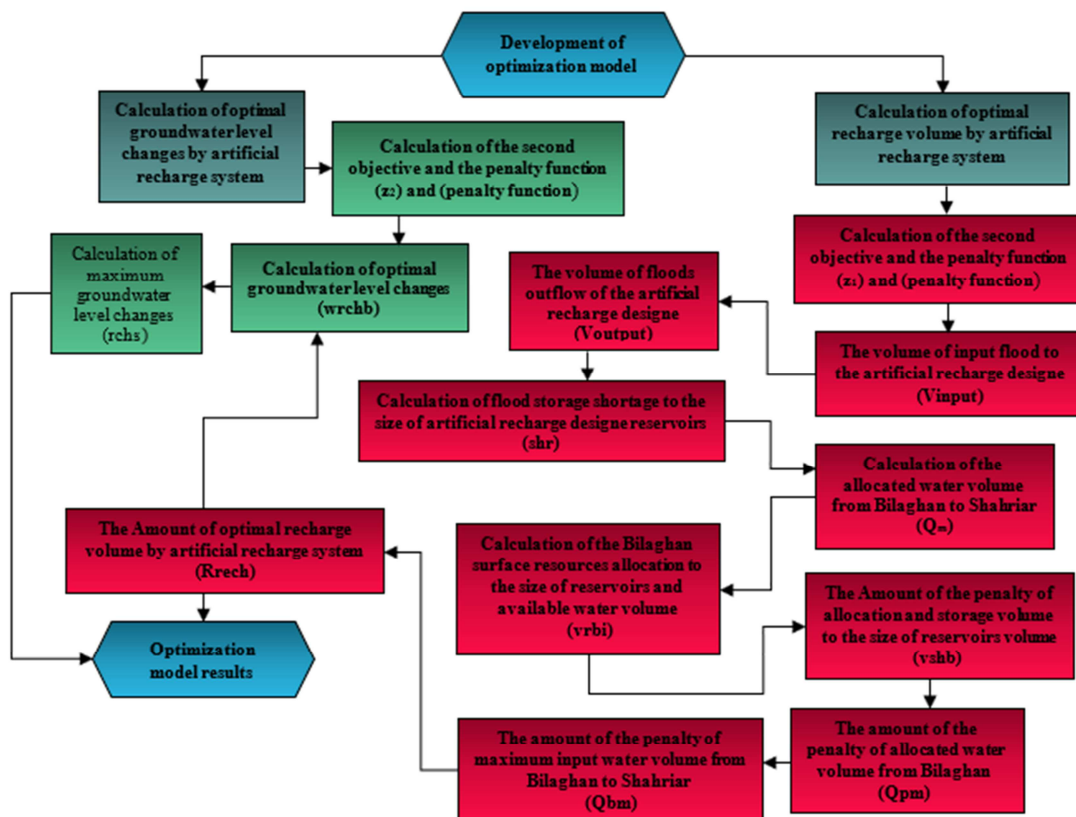


Figure 5. Structure of optimization model of the artificial recharge system

حجم نفوذ و ذخیره سیلاب در مخازن طرح تغذیه مصنوعی نسبت به حجم سیلاب ورودی به طرح در دوره زمانی مورد مطالعه به ترتیب ۳۵ و ۵۴ درصد و حجم سیلاب خروجی از طرح ۱۱ درصد برآورد شد. Martín-Rosales *et al.* (2007) در پژوهشی مشابه در مورد سدهای کنترلی در جنوب شرقی اسپانیا با تمرکز بر تغذیه ناشی از تعدادی از سازه‌های مهندسی (سدهای چک) با بستر نفوذپذیر به منظور برآورد حجم نفوذ ناشی از رواناب ورودی به سدهای کنترلی نفوذپذیر، مدل هیدرولوژیکی با استفاده از روش عدد منحنی (CN) با استفاده از کد (HEC-HMS)، اجرا نمودند. نتایج پژوهش نشان داد که حجم نفوذ ناشی از رواناب‌های ورودی به سدهای مورد نظر از سه تا ۵۰ درصد می‌باشند.

جدول (۴) حجم نفوذ و ذخیره سیلاب در طرح تغذیه مصنوعی و حجم سیلاب خروجی از طرح را نشان می‌دهد. با توجه به جدول مذکور حداکثر حجم نفوذ و ذخیره در سال ۹۳ اتفاق افتاده، اما حجم سیلاب‌های خروجی کم‌تر از سال ۹۴ می‌باشد. زیرا دبی سیلاب‌ها در سال ۹۳ نسبت به دبی سیلاب‌های سال ۹۴ تناسب بیشتری با ظرفیت مخازن طرح تغذیه مصنوعی دارند.

هم‌چنین مقادیر حداکثر حجم سیلاب، حجم نفوذ سیلاب در رودخانه و حجم سیلاب ورودی به طرح تغذیه در بازه زمانی مورد مطالعه به ترتیب برابر ۸/۸۵، ۰/۳۸ و ۸/۴۷ میلیون مترمکعب می‌باشند که مربوط به سیلاب ۴۸ ساعته شماره چهار سال آبی ۹۴ می‌باشد. هم‌چنین حداقل مقدار متغیرهای مورد نظر به ترتیب برابر ۰/۹۴، ۰/۰۷ و ۰/۸۷ میلیون مترمکعب مربوط به سیلاب ۲۴ ساعته شماره سه سال آبی ۹۵ می‌باشد. با توجه به این موضوع مقادیر حداکثر و حداقل پارامترهای برآورد شده، مربوط به حداکثر و حداقل سیلاب رخ داده می‌باشند. این موضوع بیانگر این است که حجم سیلاب ورودی به طرح تغذیه رابطه مستقیم با حجم سیلاب دارد و با توجه به این موضوع هرچه قدر حجم سیلاب افزایش یابد، با این‌که حجم نفوذ سیلاب در رودخانه افزایش می‌یابد، حجم سیلاب ورودی به طرح تغذیه نیز افزایش می‌یابد و عکس این موضوع نیز صادق است. بنابراین می‌توان حجم سیلاب ورودی به طرح تغذیه را با توجه به حجم منابع آب بالادست، حجم سیلاب، حجم مخازن و حجم نفوذپذیری سیستم تغذیه مصنوعی کنترل و مدیریت نمود. براساس نتایج حاصل از مدل دوم (HEC-HMS)،

Table 3. Volume of flood and infiltration calculated in Karaj river using the (HEC-HMS) first model (MCM)

| Water year | Flood number | Time (hr) | Volume of inflow flood to the river | Volume of infiltration in the river | Volume of inflow flood to the recharge design |
|------------|--------------|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| 2014 | 1 | 48 | 2.3 | 0.19 | 2.11 |
| | 2 | 24 | 1.57 | 0.14 | 1.43 |
| | 3 | 72 | 5.61 | 0.34 | 5.27 |
| | 4 | 24 | 2.52 | 0.11 | 2.41 |
| | 5 | 24 | 3.07 | 0.12 | 2.95 |
| | 6 | 24 | 3.89 | 0.2 | 3.69 |
| | 7 | 24 | 2.41 | 0.15 | 2.25 |
| | 8 | 24 | 1.27 | 0.08 | 1.19 |
| 2015 | 1 | 24 | 2.06 | 0.12 | 1.94 |
| | 2 | 24 | 1.12 | 0.1 | 1.02 |
| | 3 | 24 | 1.35 | 0.1 | 1.25 |
| | 4 | 48 | 8.85 | 0.38 | 8.47 |
| 2016 | 1 | 24 | 0.96 | 0.09 | 0.87 |
| | 2 | 24 | 1.66 | 0.11 | 1.55 |
| | 3 | 24 | 0.94 | 0.07 | 0.87 |
| | 4 | 24 | 1.45 | 0.1 | 1.35 |
| | 5 | 24 | 1.55 | 0.13 | 1.42 |
| | 6 | 24 | 2.14 | 0.07 | 2.07 |

Table 4. Volume of infiltration ,storage and output flood calculated for the artificial recharge plan using the (HEC-HMS) second model (MCM)

| Water year | Volume of infiltration in the artificial recharge plan reservoirs | Volume of storage in the artificial recharge plan reservoirs | Volume of output from the artificial recharge plan |
|------------|---|--|--|
| 2014 | 8.32 | 12.30 | .68 |
| 2015 | 3.43 | 5.35 | 3.91 |
| 2016 | 3.18 | 4.94 | 0 |

سنجش دقت مدل برای کل داده ها نیز محاسبه شده است. خطاهای (RMSE) و (MSE) شبکه مربوط به حجم ذخیره سیلاب در سیستم تغذیه مصنوعی، برای کل داده‌ها و سه مرحله آموزش، آزمایش و صحت‌سنجی بسیار کم بوده و ضریب همبستگی نیز در تمام مراحل محاسبه شده توسط شبکه عصبی مصنوعی، برابر یک می‌باشد. همچنین داده‌های مرحله آموزش نسبت به مراحل آزمایش و صحت‌سنجی از دقت بالاتری برخوردار هستند و معیار ضریب همبستگی (R) در سطح (۰/۰۵) برای کل داده‌ها و نیز در سه وضعیت برای مقادیر مشاهداتی (لایه خروجی) و محاسباتی (خروجی شبکه) معنی‌دار است. جهت اطمینان از نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی تحلیل کفایت داده‌ها نیز انجام شد. به این منظور از آزمون (کایزر- میر- الکین) در مدل آماری (SPSS) استفاده شده و داده‌های حجم نفوذ طی سیلاب در حوضچه‌ها، حجم سیلاب ورودی به طرح تغذیه و حجم سیلاب ذخیره شده در حوضچه‌های طرح وارد مدل مربوطه شدند. براساس نتایج، معیار (کایزر- میر- الکین) برابر ۰/۷۳ برآورد شد. و به دلیل این‌که این معیار در بازه ۰/۷ تا ۰/۷۹ قرار دارد کفایت داده‌ها قابل قبول ارزیابی شدند. بنابراین نتایج مدل شبکه عصبی قابل اطمینان بوده و از دقت مناسبی برخوردار است. با توجه به این موضوع، مدل شبکه عصبی مصنوعی در پژوهش موردنظر به‌عنوان یک ابزار قدرتمند و کاربردی، متغیر مورد مطالعه را مناسب پیش‌بینی نموده است.

با توجه به جدول (۳) دبی سیلاب ۴۸ ساعته شماره چهار سال آبی ۹۴ بزرگ بوده و بیش‌تر از ظرفیت مخازن طرح می‌باشد و این موضوع منجر به خروج حجم سیلاب قابل‌توجه از طرح تغذیه شده است. بنابراین در صورتی‌که دبی طرح و با دبی سیلاب متناسب باشد تغذیه بیش‌تری صورت می‌گیرد و حجم آب کم‌تری از طرح تغذیه مصنوعی خارج می‌شود. Kaboosi & Jelini (2017) با استفاده از روندیابی جریان در مخزن با مدل (HEC-HMS)، مطالعه‌ای بر روی مخازن تأخیری حوضه رودخانه جعفرآباد در استان گلستان با هدف ارزیابی دو شاخص نرخ تسکین سیل و نسبت ذخیره، صورت گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که بهره‌وری مخازن تأخیری در مهار سیل به حجم مخازن و سیلاب مرتبط است. در پژوهش حاضر، پس از شبیه‌سازی حجم ذخیره سیلاب در حوضچه‌های طرح تغذیه مصنوعی توسط مدل دوم (HEC-HMS)، مقدار این متغیر توسط شبکه عصبی مصنوعی (MLP) شبیه‌سازی شد. با توجه به شکل (۶) حجم ذخیره سیلاب در طرح تغذیه که توسط شبکه عصبی پیش‌بینی شده است بسیار نزدیک به پیش‌بینی مدل دوم (HEC-HMS) می‌باشد. بنابراین با توجه به ساختار مناسب شبکه عصبی به‌منظور پیش‌بینی حجم ذخیره سیلاب در طرح تغذیه، مقادیر خطاها و ضریب همبستگی آن، مطابق با جدول (۵) از دقت بسیار بالایی برخوردار است. به‌منظور محاسبه دقت مدل و پیش‌بینی آن در حالت کلی، پارامترهای

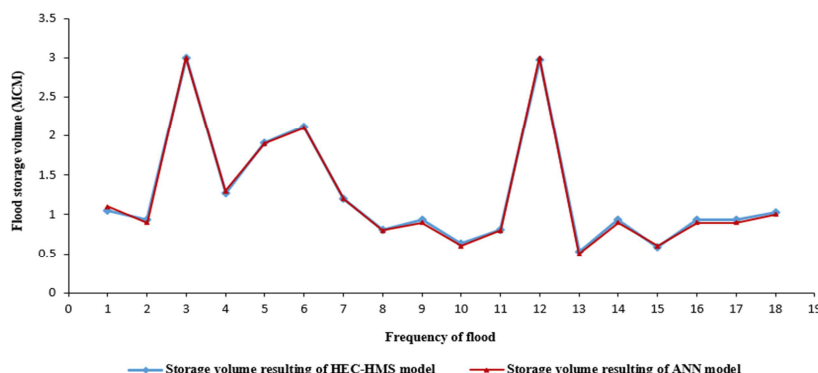


Figure 6. Storage volume in artificial recharge plan reservoirs resulting of the (HEC-HMS) second model and (ANN)

Table 5. Results of evaluation of neural network analysis steps by statistical criteria

| Subject of the study | Evaluation criteria | Status of data analysis | | | |
|--|---------------------|-------------------------|----------|----------|------------|
| | | All data | Train | Test | Validation |
| Volume of Storage in artificial recharge plan reservoirs | RMSE | 1.70E-04 | 9.93E-05 | 1.75E-04 | 2.93E-04 |
| | MSE | 2.90E-08 | 9.87E-09 | 3.08E-08 | 8.58E-08 |
| | R | 1 | 1 | 1 | 1 |

علاوه بر توابع هدف، محدودیت‌های مربوط به حجم بهینه آب سطحی بیلقان، تخصیص حجم بهینه و حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی، مورد محاسبه قرار می‌گیرند که تأثیر مهمی در تعیین این پارامتر مهم دارند. همچنین، با توجه به تابع هدف تغییرات تراز، حجم تغذیه بهینه و محدودیت مربوط به حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی در تعیین تغییرات تراز بهینه تأثیر مهمی داشته و آن را برآورد می‌نمایند. و نیز محدودیت حداکثر مجاز تغییرات سطح آب زیرزمینی علاوه بر تأثیر در تعیین تغییرات تراز بهینه، در برآورد حجم تغذیه بهینه نیز تأثیرگذار است. بنابراین حجم تغذیه و تغییرات تراز بهینه در ارتباط مستقیم با یکدیگر برآورد می‌شوند. با توجه به نتایج حاصل شده، حداقل حجم تغذیه بهینه برابر صفر و حداکثر ۱۵/۰۹ و به‌طور میانگین برابر ۲/۷۲ میلیون مترمکعب در ماه می‌باشد و همچنین حجم تغذیه بهینه به اندازه ۱۱۹ درصد نسبت به تغذیه سیلاب افزایش یافته است.

همان‌طورکه در شکل (۸) مشخص است در اکثر طول بازه زمانی موردنظر حجم تغذیه بهینه نسبت به حجم تغذیه سیلاب در سیستم تغذیه مصنوعی بیش تر می‌باشد.

در مدل بهینه‌سازی، حجم آب سطحی بیلقان (دشت شهریار) به‌عنوان متغیر تصمیم محاسبه شده است. زیرا این حجم به پایین‌دست در بخش کشاورزی و در سیستم تغذیه مصنوعی جهت تغذیه آبخوان اختصاص یافته و مابقیه آن از محدوده خارج شده و وارد سد فشافویه و اراضی پایاب آن می‌شود. بنابراین مقدار حجم اختصاص یافته به پایین‌دست بیلقان باید یک مقدار برنامه‌ریزی شده و بهینه باشد تا بتوان از آن در تغذیه مصنوعی و مصارف کشاورزی استفاده نموده و سپس مابقیه آن را به خارج از محدوده منتقل نمود.

شکل (۷) حجم بهینه آب سطحی بیلقان و تخصیص حجم بهینه از آب سطحی بیلقان به سیستم تغذیه مصنوعی در دوره زمانی مورد مطالعه و به‌صورت ماهانه را نشان می‌دهد. در شکل مذکور حداقل و حداکثر حجم بهینه آب سطحی بیلقان برابر ۰/۸۲ و ۱۴/۴۲ و حداقل تخصیص حجم بهینه از آب سطحی بیلقان برابر صفر و حداکثر ۲/۹۸ میلیون مترمکعب در ماه می‌باشد، که با توجه به این موضوع، حجم بهینه آب سطحی بیلقان و تخصیص حجم بهینه از آن به‌طور میانگین برابر ۴/۲۷ و ۱/۴۸ میلیون مترمکعب در ماه می‌باشد. در محاسبه تخصیص حجم بهینه از آب سطحی بیلقان

مدیریت تغذیه مصنوعی آبخوان دشت شهریار با مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی چند هدفه

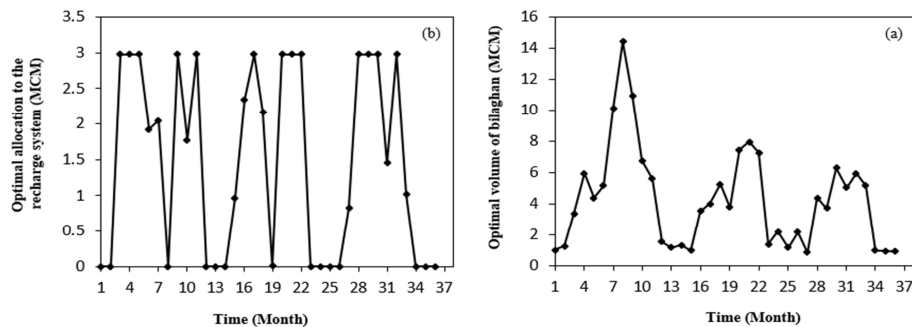


Figure 7. a) Optimal volume of Bilaghan surface water b) Allocation of the optimal volume of Bilaghan surface water to the artificial recharge system

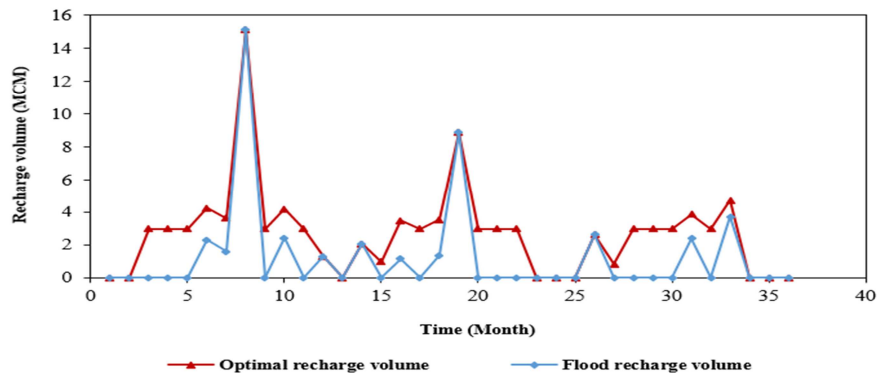


Figure 8. Flood recharge volume and optimal recharge volume in artificial recharge system

سیستم‌های تغذیه مصنوعی، افزایش حجم تغذیه و نیز حجم ذخیره آب زیرزمینی اتفاق خواهد افتاد. در این پژوهش، تغییرات تراز دستی و بهینه محدوده مطالعاتی با توجه به اعمال حجم تغذیه سیلاب و حجم تغذیه بهینه توسط رودخانه و طرح تغذیه مصنوعی محاسبه شده‌اند. براساس جدول (۶)، تغییرات تراز بهینه افزایش یافته و بیش‌تر از تغییرات تراز دستی می‌باشد و با توجه به این‌که حجم مصارف بخش‌های مختلف از منابع آب زیرزمینی تأثیر قابل‌توجهی در کاهش حجم منابع آب زیرزمینی دارد، اما بهره‌برداری بهینه از منابع آب سطحی در دسترس و سیستم تغذیه مصنوعی باعث کاهش تأثیر مصارف بر آبخوان شده است، که با توجه به این شرایط، کاهش تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی مطالعاتی به میزان ۱۳/۶۸ درصد کاهش می‌یابد.

بنابراین براساس نتایج، با بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی، ذخیره آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. که با توجه به این موضوع، Hao *et al.* (2018) یک روش بهینه‌سازی برای عملکرد سیستم‌های تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی در یک فن آبرفتی^۸ در پکن، چین استفاده نمودند. آن‌ها عملکرد تأسیسات را با توجه به نرخ‌های تغذیه به‌عنوان یک برنامه‌ریزی غیرخطی برای به حداکثر رساندن حجم آب سطحی تغذیه شده به سفره‌های زیرزمینی تحت محدودیت‌های خاص، فرموله نمودند. براساس نتایج پژوهش‌ها، مقدار آب تغذیه‌شده در سفره‌های زیرزمینی افزایش یافته و هم‌چنین عملکرد بهینه این سیستم تغذیه مصنوعی منجر به بازیابی مؤثرتر ظرفیت ذخیره آب زیرزمینی می‌شود. بنابراین با بهره‌برداری بهینه از

Table 6. Manual and optimal level changes (m)

| Year | Annual manual level changes | Annual optimal level changes | Difference between the optimal and manual annual level changes |
|------|-----------------------------|------------------------------|--|
| 2014 | -9.81 | -8.75 | 1.06 |
| 2015 | -4.92 | -4.08 | 0.85 |
| 2016 | -4.42 | -3.7 | 0.71 |

می‌شود و بخشی دیگر در تغذیه مصنوعی جهت تغذیه آبخوان مورد استفاده قرار می‌گیرد، سپس مازاد آن وارد سد فشافویه و اراضی پایاب آن می‌شود.

در پژوهش حاضر، به منظور تدوین سیاست بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی، یک مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز ارائه شد. که در آن روندیابی سیلاب در رودخانه و مخازن سیستم تغذیه مصنوعی، به صورت دو مدل مستقل توسط مدل (HEC-HMS) شبیه‌سازی شدند. کل حجم تغذیه رودخانه حاصل از برآورد مدل اول (HEC-HMS) در بازه زمانی مطالعاتی شش درصد برآورد شد. هم‌چنین حجم نفوذ و ذخیره سیلاب در مخازن طرح نسبت به حجم سیلاب ورودی به طرح در دوره زمانی مورد نظر به ترتیب ۳۵ و ۵۴ درصد و حجم سیلاب خروجی از طرح ۱۱ درصد برآورد شد. سپس حجم ذخیره در مخازن طرح تغذیه توسط شبکه عصبی مصنوعی (ANN) شبیه‌سازی شده و در نهایت به همراه سایر اطلاعات دیگر وارد الگوریتم شده و مورد محاسبه قرار گرفته است.

حجم تغذیه بهینه براساس حجم بهینه آب سطحی بیلقان و تخصیص حجم بهینه از آب سطحی بیلقان و با توجه به محدودیت‌های مربوط به حجم بهینه آب سطحی بیلقان و تخصیص از آب سطحی بیلقان و نیز حداکثر مجاز تغییرات سطح آب زیرزمینی تعیین شده است. هم‌چنین تغییرات تراز آب بهینه آب زیرزمینی با توجه به تغذیه بهینه و محدودیت مربوط به حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی برآورد شد. محدودیت حداکثر مجاز تغییرات سطح آب زیرزمینی علاوه بر این‌که در تعیین

با توجه به این موضوع، (Karamouz *et al.* 2021) یک روش برای ارزیابی تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی^۹، شامل انتخاب محل، کریجینگ غیر ثابت، مدل‌سازی عددی و پایداری عرضه و تقاضای بلندمدت توسعه دادند. براساس نتایج پژوهش‌ها، با اعمال تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی در منطقه، میزان کاهش سطح آب‌های زیرزمینی حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. در پژوهش دیگری Sayit & Yazicigil (2012) حوضه رودخانه مندرس را در کشور ترکیه برای ارزیابی پتانسیل اجرای طرح تغذیه مصنوعی به دو روش حوضچه‌ای و سد زیرزمینی به منظور بهبود شرایط منابع آب زیرزمینی، بررسی نمودند. نتایج پژوهش مشخص نمود که اجرای سیستم تغذیه مصنوعی به دو روش مورد نظر، باعث افزایش سطح آب زیرزمینی می‌شود. بنابراین با اتخاذ سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی، علاوه بر افزایش حجم تغذیه، تغییرات تراز آب زیرزمینی نیز افزایش یافته که این امر منجر به بهبود شرایط آبخوان می‌شود.

نتیجه‌گیری

سیستم تغذیه مصنوعی در پژوهش حاضر شامل رودخانه و طرح تغذیه مصنوعی می‌باشد و با توجه به این موضوع، کل حجم تغذیه بهینه در رودخانه و طرح تغذیه مصنوعی محاسبه شده است. در پژوهش مورد نظر، مقدار حجم اختصاص یافته به پایین دست (دشت شهریار)، از سد انحرافی بیلقان به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. با توجه به حجم بهینه آب سطحی بیلقان، بخشی از آن در مصارف کشاورزی محدوده مورد مطالعه استفاده

هم‌چنین پیشنهاد می‌شود در مورد استفاده از پساب به‌منظور تغذیه مصنوعی و اثرات زیست‌محیطی آن بر آبخوان‌های کشور و افزایش تعداد طرح تغذیه مصنوعی با توجه به شرایط هر محدوده مطالعاتی و هم‌چنین تحلیل ارزش‌گذاری اقتصادی- زیست‌محیطی روش‌های تغذیه مصنوعی جهت مدیریت تغذیه آبخوان مناطق مختلف، موردبررسی قرار گیرد. در نهایت روش ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند برای مناطق با شرایط مشابه محدوده مورد مطالعه به‌منظور افزایش پایداری سیستم آب زیرزمینی اعمال شود.

پی‌نوشت‌ها

1. Multilayer perceptron Artificial neural network
2. Multi-objective genetic algorithm
3. Artificial recharge system
4. Muskingum-cunge
5. Levenberg-Marquardt
6. Specific yield
7. Population of chromosomes
8. Alluvial fan
9. Artificial groundwater recharge

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Aju, C. D., Achu, A. L., Raicy, M. C., & Reghunath, R. (2021). Identification of suitable sites and structures for artificial groundwater recharge for sustainable water resources management in Vamanapuram River Basin, South India. *HydroResearch*, 4, 24-37.
2. Alkhatib, J., Engelhardt, I., & Sauter, M. (2021). Identification of suitable sites for managed aquifer recharge under semi-arid conditions employing a combination of numerical and analytical techniques. *Environmental Earth Sciences*, 80(17), 1-14.
3. Dourdour, A., Bouanani, A., & Babahamed K. (2017). Hydrological modeling in semi-arid region using HEC-HMS model, case study in Ain Sefra Watershed, Ksour Mountains (SW-Algeria). *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9(2), 1027-1049.

تغییرات تراز بهینه تأثیرگذار بوده در برآورد حجم تغذیه بهینه نیز تأثیرگذار است.

براساس نتایج حاصل‌شده، مجموع حجم تغذیه فعلی و بهینه در دوره زمانی موردنظر توسط سیستم تغذیه مصنوعی برابر $44/72$ و $97/94$ میلیون مترمکعب و نیز تغییرات تراز فعلی و بهینه آب زیرزمینی $19/15$ - و $16/53$ - متر می‌باشد. سیاست بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیه مصنوعی منجر به افزایش تغییرات سطح آب زیرزمینی به میزان $2/62$ متر در بازه زمانی مطالعاتی شده است. بنابراین با تخصیص حجم بهینه از آب سطحی بیلقان به سیستم تغذیه مصنوعی، حجم تغذیه بهینه نسبت به حجم تغذیه سیلاب و نیز تغییرات سطح آب زیرزمینی بهینه نسبت به وضعیت فعلی آن در بازه زمانی موردنظر، افزایش یافته‌اند. با توجه به این موضوع و نیز تناسب عملکرد بین حجم تغذیه و تغییرات تراز بهینه، شرایط آبخوان نسبت به وضعیت فعلی بهبود خواهد یافت.

در پژوهش حاضر با توجه به روش محاسبات پلتفرم مدل‌سازی چندهدفه، زمانی که مقادیر حجم آبی در بالادست (سد انحرافی بیلقان) در اثر خشک‌سالی کم باشد تغذیه مصنوعی صورت نمی‌گیرد و یا کم‌تر از حالت عادی و ترسالی انجام می‌شود. و در سه حالت، تغذیه مصنوعی براساس حجم سیلاب، حجم مقادیر آبی اختصاص داده‌شده از بالادست (بیلقان) و حجم مخازن طرح تغذیه مصنوعی صورت می‌گیرد. بنابراین روش ارائه‌شده به‌عنوان یک روش جامع برای تمام حالت‌ها و مناطق مشابه قابل استفاده می‌باشد. بنابراین آمار و اطلاعات قدیمی و یا به‌روز تأثیری در نتایج پژوهش و نیز عملکرد سیستم تغذیه مصنوعی ندارد. پلتفرم مدل‌سازی چندهدفه ارائه‌شده شامل دو مدل شبیه‌ساز و یک مدل بهینه‌ساز چندهدفه با روش برنامه‌ریزی نوین می‌باشد که بر این اساس روش کار ارائه‌شده نیز نوین و به‌روز می‌باشد.

4. Dhanaraj, G. (2021). Study of selected influential criteria on groundwater potential storage using geospatial technology and multi-criteria decision analysis (MCDA) approach: A case study. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*.
5. Ebrahim, G.Y., Andreja J., Al-Maktoumi A., Mushtaque A., & Mynett, A. (2016). Simulation-Optimization Approach for Evaluating the Feasibility of Managed Aquifer Recharge in the Samail Lower Catchment, Oman. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142 (2), 5015007.
6. Hao, Q., Shao, J., Cui, Y., Zhang, Q., & Huang, L. (2018). Optimization of groundwater artificial recharge systems using a genetic algorithm: a case study in Beijing, China. *Hydrogeology Journal*, 26(5), 1749-61.
7. Hashemi, H., Berndtsson, R., & Persson, M. (2015) Artificial recharge by floodwater spreading estimated by water balances and groundwater modelling in arid Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 60(2), 336-50.
8. Jasrotia, A.S., Kumar, R., Taloor, A.K., & Saraf, A.K. (2019). Artificial recharge to groundwater using geospatial and groundwater modelling techniques in North Western Himalaya, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(24), 1-23.
9. Jiang, A., Liu, Y., Yi, S., Guo, Z., Cui, Y., Huang, Q., Li, J., Liu, K., Qiu, M., & Jin, X. (2021). Impact of artificial recharge on groundwater and springs: Jinan, China, case study. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(2), 1-0.
10. Kaboosi, K., & Jelini, R. (2017). The efficiency of detention reservoirs for flood control on the Jafar Abad River in Golestan Province (Iran). *Russian Meteorology and Hydrology*, 42(2), 129-134.
11. Karamouz, M., Teymoori, J., & Olyaei, M.A. (2021). A Spatial Non-Stationary Based Site Selection of Artificial Groundwater Recharge: a Case Study for Semi-Arid Regions. *Water Resources Management*, 35(3), 963-78.
12. Kawo, N.S., Zhou, Y., Magalso, R., & Salvacion, L. (2018). Optimization of an artificial-recharge-pumping system for water supply in the Maghaway Valley, Cebu, Philippines. *Hydrogeology Journal*, 26(3), 963-77.
13. Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K., & Maidment, D. R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75(4), 325-336.
14. Kumari, S., Poddar, A., Kumar, N., & Shankar, V. (2021). Delineation of groundwater recharge potential zones using the modeling based on remote sensing, GIS and MIF techniques: a study of Hamirpur District, Himachal Pradesh, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 21, 1-2.
15. Liu, Q., Hanati, G., Danierhan, S., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2021). Modeling of multiyear water-table fluctuations in response to intermittent artificial recharge. *Hydrogeology Journal*, 1-4.
16. Makkawi, M.H. (2015). Geostatistics as a groundwater exploration planning tool: case of a brackish-saline aquifer. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(5), 3311-9.
17. Martín-Rosales, W., Gisbert, J., Pulido-Bosch, A., Vallejos, A., & Fernández-Cortés, A. (2007). Estimating groundwater recharge induced by engineering systems in a semiarid area (southeastern Spain). *Environmental Geology*, 52(5), 985-995.
18. Masetti, M., Pedretti, D., Sorichetta, D., Stevenazzi, S., & Bacci, F. (2016), Impact of a Storm-Water Infiltration Basin on the Recharge Dynamics in a Highly Permeable Aquifer, *Water Resources Management*, 1, 149-165.
19. Mendes, J. & Maia, R. (2016). Hydrologic modelling calibration for operational flood forecasting. *Water Resources Management*, 30(15), 5671-5685.
20. Mohammadi, J., & Motaghian, M.H. (2011). Spatial Prediction of Soil Aggregate Stability and Aggregate-Associated Organic Carbon Content at the Catchment Scale Using Geostatistical Techniques. *Pedosphere*, 21(3), 399-389.
21. Mohammadzadeh-Habili, J., & Khalili, D. (2020). Assessment of artificial recharge dams and improvement of their groundwater-recharge capacity. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(5), 04020011.
22. Mokarram, M., Saber, A., Mohammadzadeh, P., & Abdolali, A. (2020). Determination of artificial recharge location using analytic hierarchy process and Dempster-Shafer theory. *Environmental Earth Sciences*, 79(10), 1-15.
23. Moreno, J., Begueria, S. & Ruiz, J.M.T. (2002). Influence of the Yasa reservoir of the Aragon River. Central Spanish Pyrenees. *Hydrology and Earth system sciences*, 6(4), 753-762.

24. Rahimi, S., Roodposhti, M.S., & Abbaspour, R.A. (2014). Using combined AHP-genetic algorithm in artificial groundwater recharge site selection of Gareh Bygone Plain, Iran. *Environmental earth sciences*, 72(6), 1979-92.
25. Ringleb, J., Sallwey, J., & Stefan, C. (2016). Assessment of managed aquifer recharge through modeling-A review. *Water*, 8(12), 579.
26. Sayit, A. P., & Yazicigil, H. (2012). Assessment of artificial aquifer recharge potential in the Kucuk Menderes River Basin, Turkey. *Hydrogeology Journal*, 20(4), 755-766.
27. Xu, W., & Du, S. (2014). Information entropy evolution for groundwater flow system: a case study of artificial recharge in Shijiazhuang City, China. *Entropy*, 16(8), 4408-19.
28. Yahiaoui, B., Agoubi, B., & Kharroubi, A. (2021). Groundwater potential recharge areas delineation using groundwater potential recharge index (GPRI) within arid areas: Ghomrassen, south Tunisia. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(11), 1-13.
29. Zhang, W., Huan, Y., Yu, X., Liu, D., & Zhou, J. (2015). Multi-component transport and transformation in deep confined aquifer during groundwater artificial recharge. *Journal of environmental management*, 152, 109-19.