نشریه دانش آب و خاک / جلد 26 شماره 2/2 صفحه‌های 13 تا 25/ سال 1395

بهینه‌سازی چند هدفه خصوصیات سدهای تأخیری پاره‌سنگی با لحاظ شرایط هیدرولیکی و کاربرد روش‌های گزینش اجتماعی بردا و چانه‌زنی نش- هرسنی

محمدرضا نیکو*[1]، نفیسه خرم‌شکوه[2]

تاریخ دریافت: 93/11/12 تاریخ پذیرش: 94/11/12

[1]- استادیار بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

[2]- دانش‌آموخته کارشناس ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: nikoo@shirazu.ac.ir

چکیده

در ایران، به‌دلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی و تخریب‌های زیست‌محیطی، همه ساله سیل باعث وارد آمدن خسارات فراوانی به جوامع و تأسیسات پایین‌دست می‌شود. سدهای تأخیری پاره‌سنگی ازجمله روش‌های سازه‌ای برای تسکین سیلاب می‌باشند. بدین‌روی لازم است که خصوصیات بهینه سدهای تأخیری پاره‌سنگی با در نظر گرفتن رفتار هیدرولیکی این سدها مورد ارزیابی قرار گیرد. در این پژوهش، روش‌شناسی جدیدی بر مبنای مدل شبیه‌سازی داده‌مبنا، مدل بهینه‌سازی چند هدفه NSGA-II و تئوری بازی‌ها برای یافتن خصوصیات بهینه سدهای تأخیری پاره‌سنگی ارائه شده است. مدل پیشنهاد شده، برمبنای مدل الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II) و فرامدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه (MLP) استوار می‌باشد. فرامدل MLP، رابطه بین متغیرهای طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی و پارامترهای هیدرولیکی جریان سیلاب عبوری از محیط متخلخل سد را شبیه‌سازی می‌نماید. مدل شبیه‌سازی با پایه MLP، با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده روی مدل فیزیکی محیط متخلخل پاره‌سنگی مورد آموزش و اعتبارسنجی قرار می‌گیرد. سپس، با اتصال مدل MLP صحت‌سنجی شده به الگوریتم قدرتمند بهینه‌سازی چند هدفه NSGA-II، منحنی تعامل بین اهداف متضاد بهینه‌سازی تعیین می‌گردد. جهت تعیین بهترین نقطه طراحی مورد توافق بین اهداف در منحنی تعامل اهداف بهینه‌سازی، مدل چانه‌زنی نش- هرسنی و روش گزینش اجتماعی امتیاز بردا به کار گرفته می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از دو مدل مذکور، مقادیر متغیرهای طراحی یعنی ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی و مقدار بهینه قطر میانگین سنگدانه موجود در بدنه سد، به‌ترتیب (27/1، 27/58) و (2/02، 4/52) سانتی‌متر حاصل گردیده‌اند. شباهت نتایج مربوط به مشخصات بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی حاصل از مدل چانه‌زنی نش- هرسنی و روش گزینش اجتماعی امتیاز بردا، حاکی از پایداری روش‌های مورد استفاده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: روش گزینش اجتماعی امتیاز بردا، سد تأخیری پاره‌سنگی، شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه، مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه NSGA-II، مدل چانه‌زنی نش- هرسنی

Multi-Objective Optimization of Detention Rockfill Dam Characteristics Considering Hydraulic Conditions and Application of Borda Count Social Choice and Nash- Harsanyi Bargaining Models

MR Nikoo[*1], N Khorramshokouh[2]

Received: 1 February 2015 Accepted: 1 February 2016
[1-] Assist. Prof., Dept. of Civil and Environmental Engin., School of Engin., Shiraz Univ., Iran
[2-] M.Sc. Graduate, Dept. of Water Engin., School of Engin., Shiraz Univ., Iran
[*] Corresponding Author, Email: nikoo@shirazu.ac.ir

Abstract

Floods inflict a large amount of loss on communities and installations in Iran due to the geological characteristics and environmental destructions. Detention rockfill dams are important structural methods to mitigate flood damages. So, it is necessary to assess the optimum characteristics of detention rockfill dams considering their hydraulic performance. In this paper, a novel methodology based on data-driven simulation model, NSGA-II multi-objective optimization model and game theory is suggested in order to find the optimum features of detention rockfill dams. The proposed model is on the basis of the multi-objective genetic algorithm model (NSGA-II) and the multilayer perceptron neural network meta-model (MLP). The MLP meta-model simulates the relationship between design variables of detention rockfill dams and the hydraulic parameters of flood hydrograph passing through the porous media of the dam. The MLP-based simulation model is trained and validated on the basis of experimental results of a physical model of detention rockfill dam. The validated MLP model is then coupled with a robust multi-objective optimization algorithm, NSGA-II, to determine the trade-off curve between the conflict objectives of the optimization. Nash- Harsanyi bargaining model and Borda count social choice method are used to find the best agreed-upon design point on the trade-off curve of the optimization objectives. Results indicate that the optimum design variables can be considered as [27.1, 27.58] cm and [2.02, 4.52] cm for the optimum thickness of detention rockfill dam and the optimum diameter of aggregates in the porous media, respectively, using both the mentioned methods. The similar optimum characteristics of detention rockfill dam using Nash bargaining model and Borda count social choice method depict the stability of the applied methods.

Keywords: Borda count social choice method, Detention rockfill dam, MLP, Nash-Harsanyi bargaining model, NSGA-II

مقدمه

اگرچه در بسیاری از نقاط ایران، میزان بارندگی کم است، اما در اغلب مناطق، ممکن است بیشتر بارندگی سالیانه، در چند شبانه‌روز متوالی رخ دهد. این عامل، در تلفیق با شیب‌های تند کوهستانی البرز و زاگرس، بر اهمیت بررسی و مهار پدیده سیلاب می‌افزاید. سدهای تأخیری پاره‌سنگی از جمله روش‌های کنترل سیلاب هستند که مقدار دبی اوج سیلاب عبوری از بدنه متخلخل سد را کاهش می‌دهند و همچنین بر میزان زمان تداوم سیلاب می‌افزایند.

به‌طور کلی در مصالح ریزدانه، سرعت جریان و عدد رینولدز در محدوده جریان آرام قرار می‌گیرند. در چنین جریانی، عامل مؤثر در مقاومت محیط در برابر عبور سیال، نیروی لزجت است و می‌توان از نیروی

اینرسی صرف‌نظر کرد. اما در محیط متخلخل درشت-دانه، سرعت جریان و عدد رینولدز افزایش می‌یابند و جریان از محدوده آرام خارج می‌شود. بنابراین شرایط جریان دارسی برقرار نیست. به‌منظور بررسی شرایط جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه، پژوهش‌های آزمایشگاهی فراوانی صورت پذیرفته است که به تعدادی رابطه غیرخطی بین سرعت و گرادیان هیدرولیکی، منجر شده است. از جمله این محققان می-توان به کینگ (1898)، وارد (1964) و احمد و سونادا (1965) اشاره کرد. در ادامه، پژوهش‌های متعددی پیرامون بررسی هیدرولیک جریان و انتقال رسوب از محیط متخلخل پاره‌سنگی صورت گرفت.

در سال‌های اخیر تحقیقات مرتبط با مدل‌های هوش مصنوعی و شبیه‌ساز در زمینه طراحی سازه‌های هیدرولیکی و در راستای مقابله با سیلاب، رو به فزونی نهاده است. در این زمینه شایان نژاد (1386) به مقایسه دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون فازی در تحلیل هیدرولیکی جریان درون سدهای پاره‌سنگی پرداخت. پژوهش فوق بیان‌گر این نکته بود که نتایج روش شبکه عصبی مصنوعی به‌مراتب بهتر از روش رگرسیون فازی می‌باشد. همچنین می‌توان به کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در روندیابی هیدروگراف سیل از درون سدهای پاره‌سنگی و تعیین هیدروگراف خروجی حوضه (مظاهری 1386)، شبیه‌سازی هیدرولیک جریان درون سدهای سنگریزه‌ای به‌منظور کنترل سیلاب و مدیریت حوضه آبریز (سامانی و همکاران 2004) و مقایسه نتایج مدل عددی به روش اجزاء محدود و شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی جریان از یک سد پاره‌سنگی در لهستان (تیفور و همکاران 2005) اشاره نمود. پژوهشگران دیگری نیز در این زمینه، تحقیقاتی را انجام داده‌اند که از آن‌جمله می-توان به بررسی راهکارهای کاهش سیلاب در سطح حوزه آبریز با رویکرد فازی احتمالاتی و براساس مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی (یزدی و صالحی‌نیشابوری 2014a)، تدوین مدل یکپارچه جهت روندیابی هیدرولیکی و کاهش سیلاب با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه (پارک و همکاران 2011) و تدوین مدل بهینه‌سازی غیرخطی به‌منظور کنترل سیلاب با استفاده از روش-های عددی (دینگ و وانگ 2012) اشاره کرد. همچنین، یزدی و صالحی‌نیشابوری (2014b) از مدل‌سازی تطبیقی جایگزینی جهت کمینه‌سازی هزینه احداث سد تأخیری پاره‌سنگی با در نظر گرفتن تغییرات ارتفاع سد و نیز کمینه‌سازی صدمات ناشی از سیلاب استفاده نمودند؛ که در این امر داده‌های مربوط به احتمال آسیب‌پذیری رودخانه موردمطالعه، شماره منحنی‌های موجود در نقشه‌های کاربری اراضی و عمق آب رودخانه به کار رفتند. آنها به‌منظور بررسی کارآیی هدف موردنظر، کاربرد آزمایشگاهی مدیریت سیلاب را روی یک مطالعه موردی در ایران ارزیابی نمودند و به نتایج قابل‌قبول دست یافتند.

زمردیان و زاهد (1385) طی آزمایش‌هایی و با بهره‌گیری از برنامه احتمالی مونت‌کارلو، اثر تغییرات ضخامت محیط متخلخل بدنه سد تأخیری پاره‌سنگی را بر میزان گذردهی رسوبات غیرچسبنده از بدنه سد، مورد بررسی قرار دادند. در ادامه، خرم‌شکوه (1391) طی پژوهشی آزمایشگاهی، جهت تعیین ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی، اثر تغییر متغیرهای تصمیم و حالت یعنی قطر سنگدانه موجود در محیط متخلخل، ضخامت بدنه سد تأخیری پاره‌سنگی، قطر میانگین مخلوط رسوبات چسبنده و غیرچسبنده موجود در جریان، شاخص پلاستیسیته مخلوط رسوبات و دبی جریان را بر میزان کاهش دبی اوج سیلاب ورودی به سد تأخیری پاره‌سنگی و نیز میزان افزایش زمان تداوم آن مورد بررسی قرار داد. سپس ضخامت بدنه به کار رفته در حالتی از ترکیب متغیرهای تصمیم و حالت در آزمایش‌ها را که در آن بیشینه کاهش، در دبی اوج هیدروگراف سیل و کمینه افزایش، در زمان تداوم سیلاب حادث گردیده بود، از دیدگاه کنترل سیلاب به-

عنوان ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی انتخاب نمود. این پژوهش تنها به صورت آزمایشگاهی صورت پذیرفته است و در آن به برداشت داده و تحلیل دستی بسنده گردیده و هیچگونه عملیات بهینه‌سازی خاصی انجام نگرفته است.

به‌طور کلی در زمینه طراحی سازه‌های آبی، ذینفعان متعددی وجود دارند. از این‌رو در بسیاری از مدلهای شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تدوین‌شده در زمینه علوم آب، جهت تعیین نقطه توافق ذینفعان در منحنی تعامل به‌دست آمده از مدل‌های بهینه‌سازی چند هدفه، از روش‌های گزینش اجتماعی و مدل‌های رفع اختلاف گوناگونی استفاده شده است. در این زمینه، نیکو و همکاران (2014) به‌منظور تعیین ابعاد بهینه موج‌شکن دولایه با دیواره مشبک (DLPW[1])، مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه را به کار بردند. سپس جهت یافتن نقطه تعادل در منحنی تعامل بین اهداف بهینه-سازی این مدل، از مدل‌های چانه‌زنی استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که روش مطرح‌شده به‌طور مؤثری می‌تواند برای تعیین خصوصیات بهینه موج‌شکن‌های DLPW به کار برده شود. بیژنی‌منظر و مهجوری‌مجد (1392) برای تخصیص بار آلودگی تخلیه‌کننده‌ها در سیستم رودخانه‌ای براساس نظریه چانه‌زنی بازگشتی با بن‌بست، روشی را ارائه دادند. هدف آنها از این پژوهش، تعیین درصدهای تصفیه بهینه تخلیه‌کنندگان بار آلودگی در یک سیستم رودخانه‌ای، به گونه‌ای بوده است که ضمن درنظرگرفتن مطلوبیت‌های تخلیه‌کنندگان، کیفیت آب رودخانه نیز در حد قابل‌قبولی نگه‌داشته شود. سپس، از بین اعضای مجموعه توافق، گزینه برتر را با استفاده از قانون گزینش مدنی کاندورست انتخاب نمودند. از دیگر تحقیقات مرتبط در این‌زمینه می‌توان به تعیین درصدهای تصفیه بهینه فاضلاب تخلیه‌کنندگان بار آلودگی به رودخانه (عباسی و مهجوری مجد 1392)، کمینه‌سازی ریسک مربوط به مسائل کنترل کیفی آب در رودخانه‌ها (گاوش و مویومدار 2006)، تدوین مدل بازی غیرقطعی جهت تجارت مجوز تخلیه بار آلودگی در سیستم رودخانه‌ها (نیکو و همکاران 2011) و تدوین مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای مدیریت مناسب امنیت شبکه‌های توزیع آب شهری (بازرگان‌لاری و همکاران 1393) اشاره نمود.

تاکنون پژوهش‌های متعددی درباره خصوصیات جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه انجام پذیرفته است، اما طبق نتایج محققان، ملاحظه گردید که تاکنون پژوهشی در رابطه با بهینه‌سازی چند هدفه مبنی بر شبیه‌سازی خصوصیات سدهای تأخیری پاره‌سنگی در حالت سیلابی و با وجود مخلوط رسوبات در جریان، با استفاده از روش‌های گزینش اجتماعی و مدل‌های حل اختلاف در یافتن نقطه توافق بهینه‌سازی صورت نگرفته است. همچنین به‌دلیل پیچیدگی‌های رفتاری رسوبات چسبنده، تا به حال، نقش آنها در تعیین ابعاد بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی مورد بررسی واقع نشده است و در بیشتر موارد اثر فرسایندگی رسوبات چسبنده مورد توجه بوده است. از این‌رو در این پژوهش، شاید برای اولین‌بار، روش‌شناسی جدیدی جهت تدوین یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تعیین ضخامت بهینه سدهای تأخیری پاره‌سنگی و قطر میانگین سنگدانه‌های به کار برده شده در محیط متخلخل پاره‌سنگی در حالت بهینه، ارائه شده است. روش‌شناسی پیشنهادی، برمبنای مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه، فرامدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه و مدل‌های چانه-زنی استوار می‌باشد. در تعیین نقطه توافق بین ذینفعان در منحنی تعامل اهداف بهینه‌سازی نیز، روش گزینش اجتماعی امتیاز بردا و مدل چانه‌زنی نش- هرسنی به - کار گرفته شده است. جهت نزدیک‌تر کردن شرایط آزمایش به حالت طبیعی، از مخلوط رسوبات چسبنده و غیرچسبنده با نسبت اختلاط 30% در جریان استفاده گردید. جزئیات روند انجام آزمایش‌های مربوطه و ساختار مدل پیشنهادی در ادامه بیان خواهد شد.

[1] Double-layer perforated-wall breakwaters

مواد و روش‌ها

ساختار مدل پیشنهادی

هدف از انجام این پژوهش، تدوین یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی چند هدفه، جهت تعیین مشخصات بهینه سدهای تأخیری پاره‌سنگی با در نظر گرفتن اهداف مؤثر در طراحی آنها می‌باشد. در واقع، هدف اساسی تحقیق حاضر، ارائه روندی مناسب جهت تعیین دو متغیر طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی یعنی ضخامت محیط متخلخل پاره‌سنگی بدنه سد و قطر میانگین سنگدانه‌های موجود در بدنه آن می‌باشد. در شکل 1 روندنمای روش‌شناسی پیشنهادی جهت بهینه-سازی چند هدفه مشخصات سد تأخیری پاره‌سنگی نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل 1 ملاحظه می‌شود، روش‌شناسی پیشنهادی شامل سه گام است. در گام نخست، داده‌ها و اطلاعات موردنیاز جهت طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی گردآوری و اهداف اصلی اجرای سد انتخاب می‌شوند. در گام دوم، فرامدل شبکه عصبی پرسپترون چند لایه با قابلیت اتصال به مدل بهینه‌سازی چند هدفه الگوریتم ژنتیک (NSGA-II[2])، برمبنای سری داده‌های حاصل از گام نخست، مورد آموزش و صحت‌سنجی قرار می‌گیرد. سپس یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی به‌منظور تعیین مشخصات بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی و با درنظر گرفتن عملکرد هیدرولیکی این سد و خصوصیات هیدروگراف سیل ورودی به مخزن آن، تدوین می‌گردد. در نهایت در گام سوم، جهت تعیین نقطه توافق در منحنی تعامل از لحاظ هیدرولیکی و زیست‌محیطی و از دیدگاه ذینفعان، از روش گزینش اجتماعی امتیاز بردا و مدل چانه‌زنی نش- هرسنی استفاده می‌شود. اجزای اساسی روش‌شناسی پیشنهادی در بخش‌های بعد به جزئیات مطرح خواهند شد.

مدل شبیه‌سازی شبکه عصبی پرسپترون چند لایه

در این تحقیق، از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP[3]) جهت شبیه‌سازی عملکرد هیدرولیکی سد تأخیری پاره‌سنگی در حالت سیلابی و با به کارگیری نرم‌افزار MATLAB استفاده گردیده است. شبکه پرسپترون چند لایه یکی از متداول‌ترین آرایش‌های شبکه عصبی و یک شبکه کاملاً مرتبط می‌باشد. بدین معنا که در این شبکه هر نرون در هر لایه، به تمامی نرون‌های قبل متصل می‌باشد و خروجی هر لایه، بردار ورودی لایه بعد را تشکیل می‌دهد. براساس پژوهش-های موجود، حدود 90 درصد شبکه‌های عصبی که در تحقیقات مرتبط با پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژی استفاده شده‌اند، از نوع پرسپترون چند لایه می‌باشند (کولیبالی و همکاران 2000). در پژوهش حاضر قطر میانگین رسوبات موجود درجریان و شاخص پلاستیسیته آنها، قطر میانگین سنگدانه‌های موجود در محیط متخلخل سد پاره‌سنگی، دبی سیل ورودی به سد تأخیری پاره‌سنگی و ضخامت بدنه آن، به‌عنوان پارامترهای ورودی به مدل شبکه عصبی مصنوعی و همچنین، درصد کاهش دبی اوج هیدروگراف سیل ورودی به سد تأخیری پاره‌سنگی و نیز درصد افزایش زمان تداوم سیلاب به‌عنوان پارامترهای خروجی مدل شبکه عصبی مصنوعی در نظر گرفته شدند. بنابراین، مدل شبکه عصبی پرسپترون چند لایه به‌منظور شبیه-سازی تغییرات هیدروگراف سیل، از یک لایه ورودی با پنج پارامتر به‌عنوان ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی با دو پارامتر تشکیل شده است. سپس برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه، از درصد میانگین قدرمطلق خطای نسبی (MARE[4]) و درصد میانگین مربعات خطا (MSE[5]) به شرح زیر استفاده گردید:

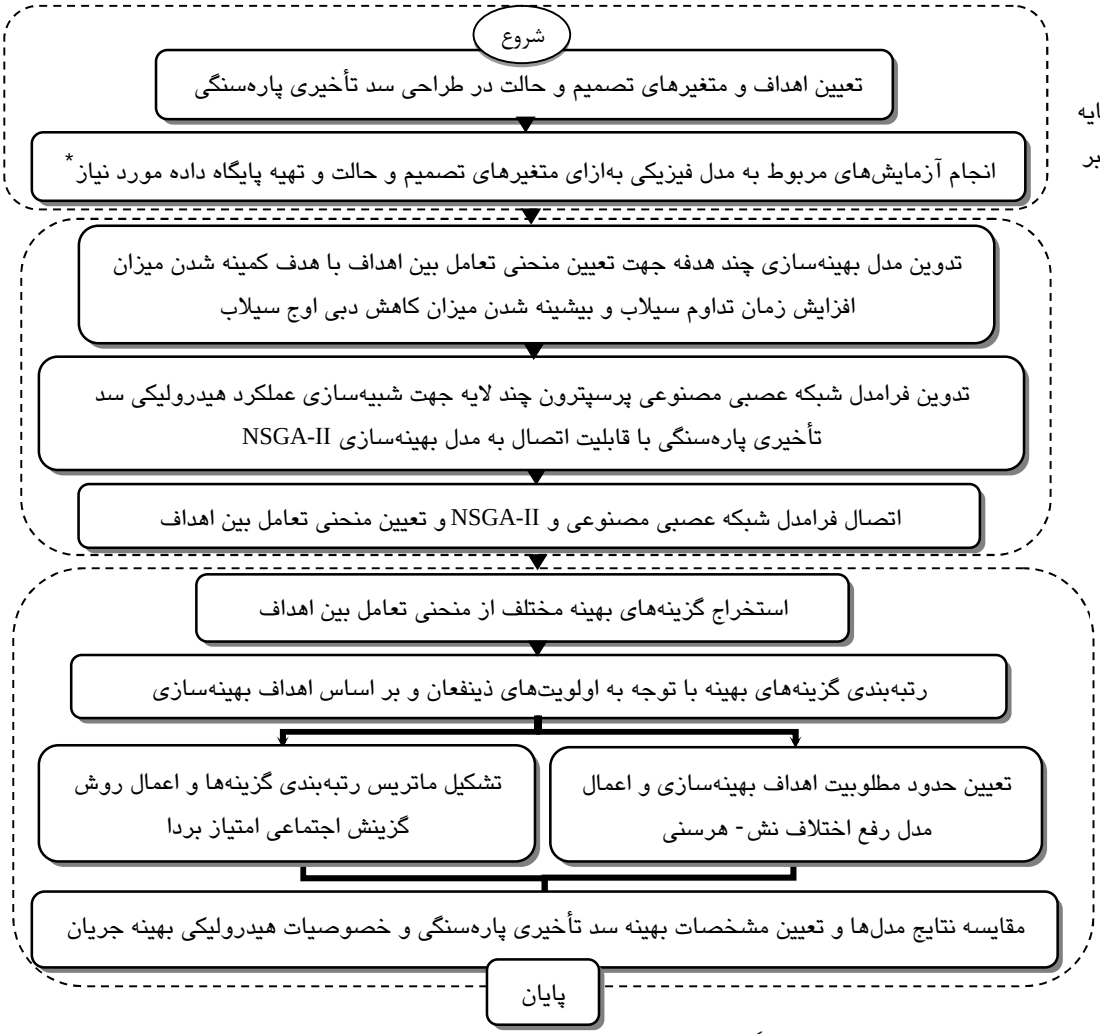
[2] Non-dominated sorting genetic algorithm-II

[3] Multilayer perceptron neural network
[4] Mean absolute relative error
[5] Mean square error

$$MARE\ (\%) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{o_i - p_i}{o_i}\right| \quad [1]$$

$$MSE\,(\%) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(o_i - p_i)^2 \quad [2]$$

که در روابط بالا n تعداد کل داده‌ها و o_i و p_i به‌ترتیب مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده تغییرات دبی اوج سیلاب و تغییرات زمان تداوم هیدروگراف سیل می‌باشند.



گام اول: جمع آوری داده‌های پایه و نتایج آزمایشگاهی بر اساس مدل فیزیکی

گام دوم: تدوین مدل شبیه-سازی- بهینه-سازی چند هدفه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه و NSGA-II

گام سوم: استفاده از مدل رفع اختلاف نش و روش گزینش اجتماعی امتیاز بردا جهت تعیین نقطه توافق در نمودار تعامل بین اهداف بهینه-سازی

داده‌های مربوط به خرم‌شکوه (1391) صرفاً به‌عنوان ورودی مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه تدوین‌شده در روش‌شناسی پیشنهادی در این تحقیق، بکار برده شدند.

شکل 1- روندنمای روش‌شناسی پیشنهاد شده جهت تدوین مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی چند هدفه مشخصات سد تأخیری پاره‌سنگی.

مدل بهینه‌سازی چند هدفه

طراحی سازه‌های هیدرولیکی به‌طور کلی جزء مسائل بهینه‌سازی چند هدفه با اهداف متضاد نهادهای مختلف ذینفع قرار می‌گیرد. اهداف متضاد در این تحقیق، بیشینه شدن میزان کاهش دبی اوج سیلاب عبوری از محیط متخلخل پاره‌سنگی و کمینه شدن میزان افزایش زمان تداوم آن می‌باشد. به‌عنوان مثال، این اهداف ممکن است موردنظر ذینفعان مختلفی همچون نهادهای مرتبط با کاهش خسارات سیلاب‌های شهری و آژانس‌های حفاظت از محیط‌زیست باشند. به -

این صورت که هدف ارجح موردنظر نهادهای مرتبط با کاهش خسارات سیلاب‌های شهری، بیشینه کردن میزان کاهش دبی اوج سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره-سنگی در جهت حفاظت از جان و مال انسان‌ها است؛ حال‌آنکه اولویت آژانس‌های حفاظت از محیط‌زیست، کمینه کردن میزان افزایش زمان تداوم سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی می‌باشد. بنابراین در این پژوهش، دو هدف متضاد در مدل بهینه‌سازی مشخصات سد تأخیری پاره‌سنگی مدنظر قرار گرفتند؛ که مدل بهینه‌سازی مذکور، میزان کاهش دبی اوج سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی را بیشینه نمود و همچنین میزان افزایش زمان تداوم سیلاب را کمینه کرد. ویژگی توابع هدف (h_1 وh_2) و قیود مربوط به متغیرهای تصمیم مسأله بهینه‌سازی طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی نیز، به صورت زیر لحاظ گردید:

$$\text{Min} \qquad [3]$$

$$h_1 = \sum_{ds=1}^{DS}\sum_{q=1}^{Q}\sum_{pi=1}^{PI} F_d^{\,ds,q,pi} = \sum_{ds=1}^{DS}\sum_{q=1}^{Q}\sum_{pi=1}^{PI} f(x_1,x_2)^{ds,q,pi}$$

$$\text{Max} \qquad [4]$$

$$h_2 = \sum_{ds=1}^{DS}\sum_{q=1}^{Q}\sum_{pi=1}^{PI} F_p^{\,ds,q,pi} = \sum_{ds=1}^{DS}\sum_{q=1}^{Q}\sum_{pi=1}^{PI} k(x_1,x_2)^{ds,q,pi}$$

$$F_d = h(x_1, x_2, q, d_s, PI) \qquad [5]$$

$$F_P = g(x_1, x_2, q, d_s, PI) \qquad [6]$$

$$x_L \le x_i \le x_u \quad \forall\, i = 1,2 \qquad [7]$$

در معادلات مذکور، x_i متغیر تصمیم iام ($i=1$ و $i=2$ به ترتیب مربوط به قطر میانگین سنگدانه موجود در محیط متخلخل (d, [L]) و ضخامت سد تأخیری پاره-سنگی (t, [L])) که x_L و x_u به‌ترتیب حدود پایین و بالای متغیرهای تصمیم می‌باشند، $f(x_1,x_2)^{ds,\,q,\,pi}$ و $k(x_1,x_2)^{ds,\,q,\,pi}$ فرامدل‌های غیر خطی که به‌ترتیب جهت تخمین ضرایب مربوط به تغییرات کاهش دبی پیک سیلاب عبوری از محیط متخلخل و افزایش زمان تداوم آن مورد استفاده واقع می‌شوند، $F_P=g(x_1, x_2, q, d_s, PI)$ تابعی که توسط فرامدل غیرخطی تخمین زده می‌شود و درصد تغییرات دبی پیک هیدروگراف سیل عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی را به‌دست می‌دهد، $F_d=h(x_1, x_2, q, d_s, PI)$ تابعی که توسط فرامدل غیرخطی تخمین زده می‌شود و درصد تغییرات زمان تداوم سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی را به‌دست می‌دهد، q دبی جریان [L^3T^{-1}]، d_s قطر میانگین مخلوط رسوبات موجود در جریان [L] و PI شاخص پلاستیسیته مخلوط رسوبات موجود در جریان می‌باشد.

شایان‌ذکر است که با اتصال فرامدل شبیه‌سازی شبکه عصبی پرسپترون چند لایه به مدل بهینه‌سازی چند هدفه الگوریتم ژنتیک، منحنی تعامل مربوط به مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم ایجاد گردید. در بخش بعد، جزئیات استفاده از منحنی تعامل در یافتن نقطه توافق و قابل‌قبول از دیدگاه ذینفعان، با توجه به اهداف بهینه‌سازی، شرح داده می‌شود.

مدل‌های چانه‌زنی و چند تصمیم‌گیرنده[6]

در این تحقیق، جهت یافتن نقطه توافق برروی منحنی تعامل بین اهداف طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی، از روش گزینش اجتماعی بردا و مدل چانه‌زنی نش-هرسنی استفاده می‌گردد؛ به‌طوری که مشخصه‌های طراحی در نقطه توافق، موجب تأمین بیشینه مقدار ممکن اهداف متضاد ذینفعان می‌شود. قابل‌ذکر است که روش-های مذکور از نظریه بازی‌های کلاسیک[7]، کارآمدتر و ساده‌تر می‌باشند.

مدل چند تصمیم‌گیرنده گزینش اجتماعی امتیاز بردا[8]

در این پژوهش، ذینفعان طراحی سد تأخیری (به‌عنوان مثال از دیدگاه کاهش خسارات سیلاب‌های شهری و حفاظت محیط‌زیست) با رأی دادن به گزینه-

[6] Bargaining and multi-person decision-making models
[7] Classic game theory
[8] Borda count multi-person decision making social choice method

های دلخواه، در تصمیم‌گیری گروهی شرکت می‌کنند. سپس با اعمال قوانین روش گزینش اجتماعی بردا بر این آرا، راهبرد بهینه شناسایی می‌شود. در روش امتیاز بردا، درابتدا هر گزینه تصمیم بر اساس رتبه‌های اختصاص یافته برای آن در ماتریس رتبه‌بندی گزینه‌ها، به تعداد نفرات رأی‌دهنده، امتیاز اولیه‌ای کسب می‌کند. این امتیاز اولیه برابر است با تفاضل تعداد کل گزینه‌ها و رتبه‌ای که یک رأی‌دهنده به آن گزینه اختصاص داده‌است. بنابراین در صورت داشتن n گزینه، بهترین گزینه یک تصمیم‌گیرنده، امتیازی برابر با n-1، گزینه دوم امتیاز n-2 و به همین ترتیب گزینه آخر یعنی غیر مقبول‌ترین گزینه، امتیاز اولیه‌ای برابر با صفر خواهد گرفت. در نهایت امتیاز بردای هر گزینه، جمع امتیازات اولیه کسب شده توسط آن گزینه خواهد بود. درانتها گزینه‌ای به‌عنوان برنده بردا انتخاب می‌شود که امتیاز بردای آن از دیگر گزینه‌ها بیشتر باشد. جزئیات بیشتر در زمینه روش گزینش اجتماعی امتیاز بردا در شیخ‌محمدی و مدنی (2008) و عباسی و مهجوری‌مجد (1392) موجود می‌باشد.

مدل چانه‌زنی نش- هرسنی[9]

در یک فرآیند تصمیم‌گیری، چنانچه تعداد تصمیم‌گیرندگان بیش از یک نفر باشد، تصمیم‌گیری با مشکلاتی همراه خواهد بود. چرا که افراد مختلف اهداف، دیدگاه‌ها و اولویت‌های متفاوتی دارند و تصمیم نهایی باید به‌گونه‌ای باشد که کلیه این اختلاف نظرات در آن، لحاظ شده باشد. مدل چانه‌زنی نش، از میان مجموعه مشخصی از شرایطی که جواب‌ها باید آنها را ارضا نمایند، فقط یک جواب را که گزینه انحصاری حل اختلاف می‌باشد، انتخاب می‌نماید. اگر f_i تابع هدف یا تابع مطلوبیت تصمیم‌گیرنده iام و n، تعداد تصمیم‌گیرنده‌های موجود در فضای تصمیم‌گیری X باشد، آنگاه فضای هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H = \{u_i = f_i(x), \quad x \hat{I} X\} \qquad [8]$$

همچنین فرض می‌شود که کلیه تصمیم‌گیرندگان در بیان تابع مطلوبیت خود، یک کمینه مطلوبیت را تعیین می‌نمایند؛ که مقادیر کمتر از آن برای آن تصمیم‌گیرنده به هیچ‌وجه قابل قبول نمی‌باشد. این مقدار از تابع هدف، نقطه عدم توافق نامیده می‌شود. اگر d_i، نقطه عدم توافق برای تصمیم‌گیرنده iام باشد، $d=(d_1, d_2,..., d_n)$ بردار عدم توافق تصمیم‌گیرندگان نامیده می‌شود. این تابع هدف، به تابع نش حاصل‌ضربی معروف می‌باشد. در واقع در این روش، فاصله هندسی جواب، از محل نقطه عدم توافق بیشینه می‌گردد. در بسیاری از مسائل عملی حل اختلاف، تصمیم‌گیرندگان دارای قدرت‌های متفاوتی می‌باشند. همچنین، نش ثابت می‌کند که اگر H محدب، بسته و محدود باشد، در این صورت تنها یک جواب ($\varphi(H,d)$) برای مسأله رفع اختلاف وجود خواهد داشت، که از حل مسأله بهینه‌سازی زیر و با درنظرگرفتن قیود، به‌دست می‌آید:

$$\text{Max} \quad (f_1 - d_1)^{c_1}(f_2 - d_2)^{c_2}...(f_n - d_n)^{c_n} \qquad [9]$$

$$f_i \geq d_i \quad \forall i = 1,2....,n \qquad [10]$$

$$f = (f_1,.., f_n) \hat{I} H \qquad [11]$$

در رابطه فوق، $c_1, c_2,..., c_n$ نشان دهنده قدرت نسبی تصمیم‌گیرنده‌ها می‌باشند. این مسأله به مسأله چانه‌زنی غیرمتقارن نش- هرسنی معروف است. جزئیات بیشتر در رابطه با مدل چانه‌زنی نش، در بیگی و همکاران (2014) و بازرگان‌لاری و همکاران (1393) قابل بررسی است.

داده‌های آزمایشگاهی

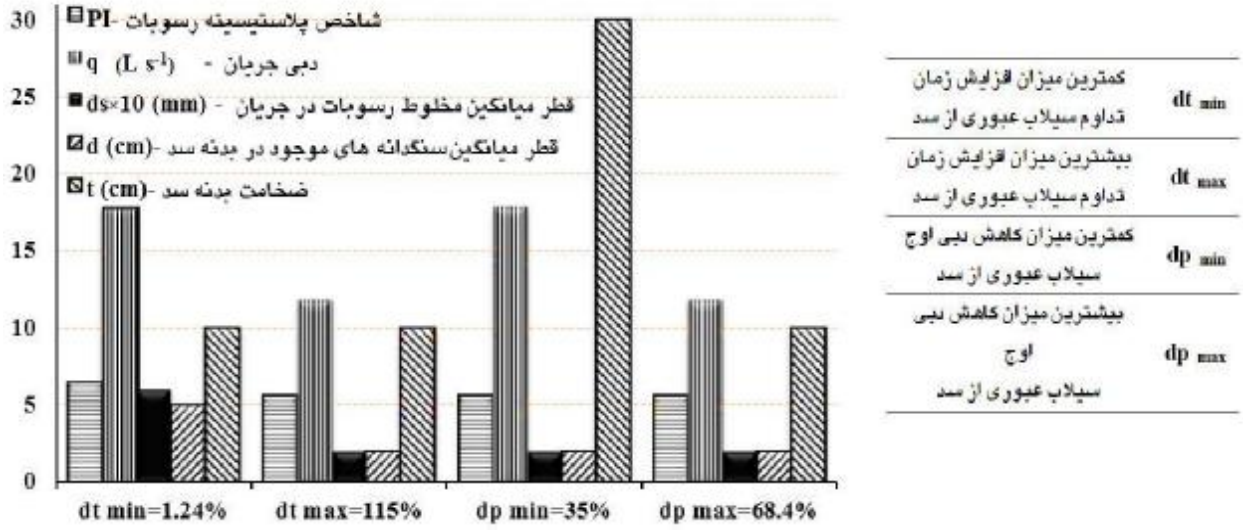
در این پژوهش، از داده‌های آزمایش‌های خرم-شکوه (1391)، به‌عنوان داده‌های ورودی مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه استفاده شده است. این آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز و در یک کانال مستطیلی با مقطع

[9] Nash-Harsanyi bargaining model

مستطیلی و با عرض کف و عمق به ترتیب 50 و 70 سانتی‌متر صورت پذیرفت. برای تغذیه کانال از یک مخزن به حجم 4/63 مترمکعب استفاده شد که توسط یک دریچه کشویی فلزی، از کانال اصلی جدا می‌گردید. لازم به‌ذکر است که دریچه کشویی فلزی به‌منظور شبیه‌سازی سیلاب در آزمایش‌ها استفاده گردید. همچنین جهت شبیه‌سازی محیط متخلخل سد سنگریزه‌ای، از سبد توری حاوی سنگریزه در 3 ضخامت مختلف استفاده شد. شبکه توری‌های به کاررفته، به اندازه کافی بزرگ بودند تا تأثیر آنها بر جریان آب عبوری قابل چشم‌پوشی باشد. در سری داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌ها، اثر تغییرات متغیرهای تصمیم وحالت مدل شبیه‌سازی، یعنی ضخامت محیط متخلخل و قطر میانگین سنگدانه موجود در بدنه متخلخل سد، دبی جریان، قطر میانگین مخلوط رسوبات و شاخص پلاستیسیته رسوبات موجود در جریان بر دبی پیک و زمان تداوم سیلاب عبوری از نمونه سد تأخیری پاره‌سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 2، مقادیر حدی تغییرات دبی اوج سیلاب و تغییرات زمان تداوم سیلاب به‌دست آمده از آزمایش‌ها با وجود مخلوط رسوبات در جریان، ارائه گردیده است.

نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش ساختار مدل عنوان شد، فرامدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه، بر اساس داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام‌شده برروی مدل فیزیکی سد تأخیری پاره‌سنگی، مورد آموزش و صحت‌سنجی قرار گرفت.



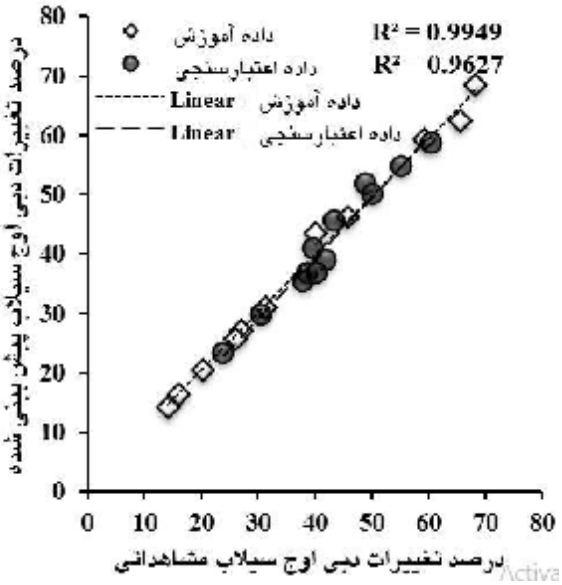
شکل 2- مقادیر حدی تغییرات دبی پیک سیلاب عبوری از مدل فیزیکی سد تأخیری پاره‌سنگی و زمان تداوم آن حاصل از آزمایش‌ها با وجود مخلوط رسوبات در جریان.

به‌منظور آموزش و صحت‌سنجی فرامدل شبکه عصبی به‌ترتیب از 70% و 30% داده‌ها استفاده شد. این فرامدل علاوه بر مدت‌زمان اجرای قابل‌قبول، قابلیت اتصال به مدل NSGA-II را نیز داراست. در واقع فرامدل مذکور، جهت شبیه‌سازی ضرایب اهداف بهینه‌سازی مشخصات سد تأخیری پاره‌سنگی، مورد آموزش قرار گرفته است. برای مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل شبکه عصبی مصنوعی با داده‌های آزمایشگاهی، از شاخص‌های آماری MARE و MSE استفاده گردید. مقادیر قابل قبول شاخص‌های مذکور در جدول 1 ارائه شده است.

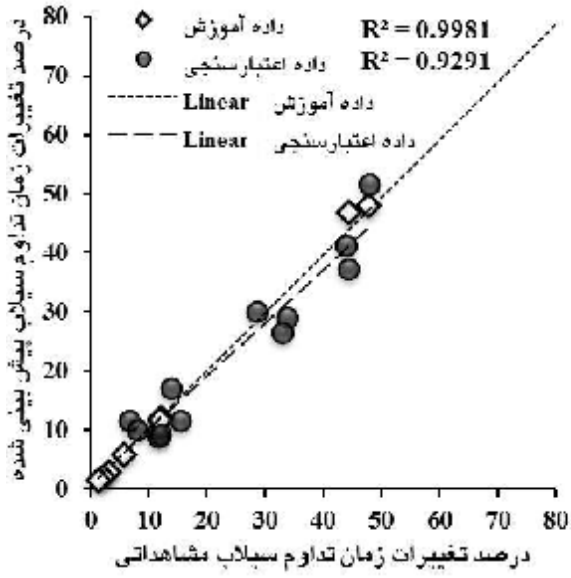
جدول 1- مقادیر شاخص‌های آماری مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه.

شاخص آماری	مقدار شاخص آماری (%)
MARE	7
MSE	18/61

نتایج اعتبارسنجی فرامدل شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه عصبی در تخمین ضرایب مربوط به تغییرات دبی اوج و زمان تداوم سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی، به‌ترتیب در شکل‌های 3 و 4 ارائه شده است. در شکل‌های 3 و 4 مشاهده می‌شود که این مدل در پیش‌بینی عملکرد هیدرولیکی سد تأخیری پاره-سنگی با مقادیر R^2 (ضریب همبستگی) قابل قبول، دارای دقت زیادی می‌باشد.



شکل 3- نتایج اعتبارسنجی فرامدل شبکه عصبی جهت تخمین ضرایب تغییرات دبی اوج سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی.



شکل 4- نتایج اعتبارسنجی فرامدل شبکه عصبی جهت تخمین ضرایب تغییرات زمان تداوم سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در متدولوژی مطرح شده در این پژوهش، از مدل NSGA-II جهت به-دست آوردن منحنی تعامل بین اهداف بهینه‌سازی یعنی بیشینه شدن میزان کاهش دبی اوج و کمینه شدن میزان افزایش زمان تداوم سیلاب، استفاده گردید؛ که در هر نسل مدل بهینه سازی NSGA-II، مقادیر آن‌ها با اتصال فرامدل شبکه عصبی مصنوعی به مدل بهینه‌سازی به-ازای کروموزم‌های مختلف محاسبه گردیده است. منحنی تعامل به‌دست آمده، در شکل 5 نمایش داده شده است که این نمودار بیان‌گر تضاد میان معیار کاهش دبی اوج سیلاب عبوری از محیط متخلخل پاره‌سنگی و افزایش زمان تداوم آن می‌باشد.

در ادامه، به‌منظور یافتن نقطه توافق در منحنی تعامل، از مدل چانه‌زنی نش- هرسنی و روش گزینش اجتماعی بردا استفاده گردید. جدول 2 خصوصیات نقطه توافق منتخب از منحنی تعامل بین اهداف بهینه‌سازی را که توسط مدل چانه‌زنی نش- هرسنی و روش گزینش اجتماعی بردا به‌دست آمده است، نمایش می‌دهد. خصوصیات نقطه توافق شامل ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی، مقدار بهینه قطر میانگین سنگدانه -

موجود در بدنه سد و همچنین مقدار کاهش دبی اوج سیلاب عبوری از محیط متخلخل و میزان افزایش زمان تداوم آن در حالت بهینه است.

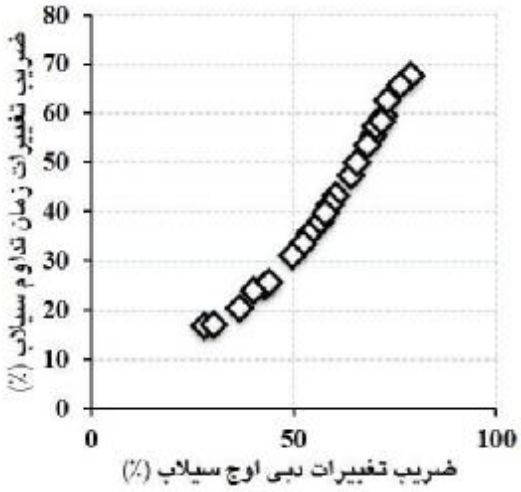
همان‌طور که در جدول 2 ملاحظه می‌شود، حدود منتخب بالا و پایین مقادیر کاهش دبی اوج سیلاب عبوری از سد تأخیری پاره‌سنگی و افزایش زمان تداوم آن در حالت بهینه با استفاده از مدل چانه‌زنی نش- هرسنی و روش گزینش اجتماعی بردا، به‌ترتیب عبارت از (30/38، 68/51) و (17/15، 53/57) درصد می‌باشند. همچنین در جدول 2 مشاهده می‌شود که میزان کاهش دبی اوج سیلاب و میزان افزایش زمان تداوم آن، از روش مدل چانه‌زنی نش- هرسنی، بیشتر از مقادیر مربوط به روش گزینش اجتماعی امتیاز بردا است؛ حال‌آنکه شباهت نتایج مربوط به ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی و مقدار میانگین قطر سنگدانه موجود در بدنه سد، حاصل از دو مدل متفاوت مذکور، حاکی از پایداری و کارآیی روش‌های استفاده شده می‌باشد. بنابراین با توجه به جدول 2، نقطه غیرپست منتخب (27/1، 27/58) و (2/02، 4/52) سانتی‌متر را می‌توان به‌ترتیب برای ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی و مقدار بهینه قطر میانگین سنگدانه موجود در بدنه سد با استفاده از دو مدل مذکور، درنظر گرفت.

جدول 2- خصوصیات نقطه توافق در منحنی تعامل با استفاده از مدل چانه‌زنی نش- هرسنی و روش گزینش اجتماعی امتیاز بردا.

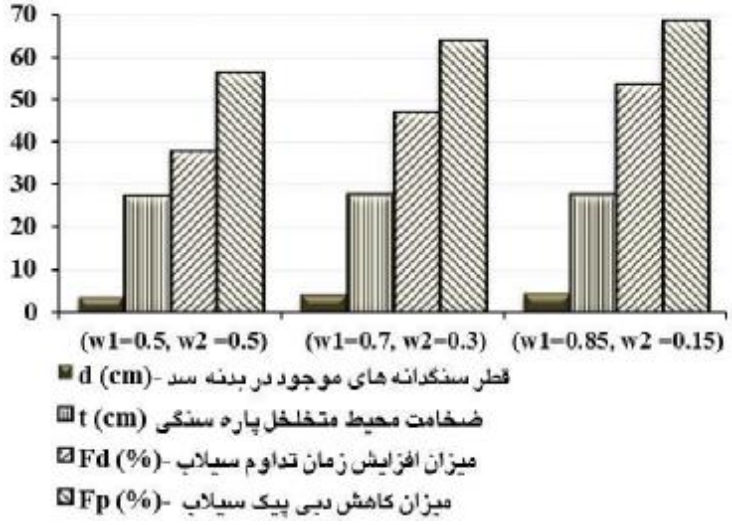
	درصد کاهش دبی اوج سیلاب	درصد افزایش زمان تداوم سیلاب	مشخصات بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی در نقطه توافق	
روش	F_P	F_d	ضخامت بهینه سد (cm)	قطر بهینه سنگدانه در بدنه سد (cm)
مدل چانه‌زنی نش- هرسنی	68/51	53/57	27/58	4/52
روش گزینش اجتماعی امتیاز بردا	30/38	17/15	27/1	2/02

به‌منظور تحلیل حساسیت نتایج مدل چانه‌زنی نش- هرسنی نسبت به تغییر وزن اعمال شده به اهداف بهینه‌سازی یعنی میزان کاهش دبی اوج سیلاب و افزایش زمان تداوم آن، بررسی‌هایی صورت گرفت. W_1، وزن اختصاص داده شده به تغییرات دبی اوج سیلاب عبوری از بدنه سد و W_2، وزن مربوط به تغییرات زمان تداوم سیلاب می‌باشد. طبق شکل 6، خصوصیات نقطه توافق منتخب، با تغییر مقدار وزن اهداف، قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل 6 دیده می‌شود، با افزایش- دادن وزن اختصاص‌یافته به تغییرات دبی اوج سیلاب، مقادیر دبی اوج سیلاب عبوری از محیط متخلخل به‌میزان بیشتری کاهش یافته است. به‌علاوه، با کاهش- دادن وزن مربوط به تغییرات زمان تداوم سیلاب عبوری از محیط متخلخل، مقادیر زمان تداوم سیلاب به‌میزان کمتری افزایش یافته‌است.

در انتها وزن‌های انتخابی مناسب در این تحقیق، W_1 برابر با 0/85 و W_2 برابر با 0/15 در نظر گرفته شده‌اند که به‌ازای آنها میزان افزایش زمان تداوم سیلاب، کمینه گردید و میزان کاهش دبی اوج سیلاب، بیشینه شد.



شکل 5- منحنی تعامل بین اهداف مدل بهینه‌سازی NSGA-II.



شکل 6- نتایج تحلیل حساسیت خروجی مدل چانه‌زنی نش- هرسنی نسبت به تغییر وزن اهداف بهینه‌سازی (W_1 و W_2 به‌ترتیب وزن‌های اختصاص داده شده به کاهش دبی اوج سیلاب و افزایش زمان تداوم سیلاب هستند).

نتیجه‌گیری کلی

سدهای تأخیری پاره‌سنگی با کاهش دادن مقدار دبی اوج سیلاب و افزایش دادن زمان تداوم آن تا حدی مشخص، باعث کاهش خسارات سیل در پایین‌دست می‌شوند. بنابراین بهینه‌سازی مشخصات طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی و نیز مدنظر قرار دادن خصوصیات هیدرولیکی جریان در حالت بهینه طراحی، از اهمیت به سزایی برخوردار می‌باشد. در این پژوهش، یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی چند هدفه جهت تعیین خصوصیات بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی تدوین شد. ابتدا فرامدل شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه، درجهت پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی سد تأخیری پاره‌سنگی به کار گرفته شد. فرامدل مذکور، برمبنای نتایج آزمایش برروی مدل فیزیکی سد تأخیری پاره‌سنگی، مورد آموزش و صحت‌سنجی قرار گرفت. سپس این فرامدل به مدل بهینه‌سازی دوهدفه NSGA-II اتصال یافت و منحنی تعامل بین اهداف بهینه‌سازی رسم گردید. درنهایت از مدل چانه‌زنی نش- هرسنی و روش گزینش اجتماعی امتیاز بردا، جهت یافتن نقطه توافق برروی منحنی تعامل بین اهداف بهینه‌سازی استفاده شد. نقطه بهینه منتخب، ضخامت بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی و مقدار بهینه قطر سنگدانه موجود در محیط متخلخل بدنه سد را در حالتی مشخص می‌نماید که اهداف بهینه‌سازی محقق گردیده‌اند. بدین معنا که میزان کاهش دبی اوج سیلاب در اثر احداث سد تأخیری پاره‌سنگی، بیشینه گردیده است و همچنین مقدار افزایش زمان تداوم سیلاب، به کمینه مقدار ممکن تغییر یافته است. همچنین در این تحقیق، تحلیل حساسیت بر روی وزن‌های مدل چانه‌زنی نش- هرسنی صورت پذیرفت تا اثر تغییرات وزن‌های اختصاص داده‌شده به اهداف بهینه‌سازی، در نتایج مدل مشخص گردد.

در راستای مطالعات آتی، پیشنهاد می‌شود که جهت تعیین نقطه توافق بر منحنی تعامل بین اهداف بهینه‌سازی، از مدل‌های چانه‌زنی گروهی نیز استفاده شود.

منابع مورد استفاده

بازرگان‌لاری م، مدیری ف و نیکو م، 1393. مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای مدیریت مناسب امنیت شبکه‌های توزیع آب شهری. مجله پژوهش آب ایران، شماره 14، صفحه‌های127 تا 135.

بیژنی‌منظر م و مهجوری‌مجد ن، 1392. کاربرد چانه‌زنی بازگشتی با بن‌بست در تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان، 13 و 14 اردیبهشت.

خرم‌شکوه ن، 1391. ضخامت بهینه و ظرفیت انتقال مخلوط رسوبات چسبنده و غیرچسبنده در سدهای تأخیری پاره-سنگی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز.

زمردیان مع و زاهد م، 1385. بهینه‌سازی ضخامت سدهای پاره‌سنگی با روش احتمالی مونت‌کارلو. هفتمین سمینار بین-المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز، 24 تا 26 بهمن.

شایان‌نژاد م، 1386. مقایسه روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون فازی در تحلیل هیدرولیکی جریان از میان سدهای پاره‌سنگی. مجله پژوهش آب ایران، شماره 1، صفحه‌های 11 تا 16.

عباسی م و مهجوری‌مجد ن، 1392، تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها: کاربرد روش‌های گزینش اجتماعی. سومین کنفرانس بین‌المللی برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، 5 آذر.

مظاهری م، 1386. کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در روندیابی هیدروگراف سیل از درون سدهای پاره‌سنگی و تعیین هیدروگراف خروجی حوضه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد تأسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

Ahmad N and Sunada DK, 1965. Nonlinear flow in porous media. Journal of Hydraulic Division 6(95): 1848-1857.

Beygi S, Haddad O, Fallah-Mehdipour E and Mariño M, 2014. Bargaining models for optimal design of water distribution networks. Journal of Water Resources Planning and Management 140(1): 92–99.

Coulibali P, Anctil F and Bobee B, 2000. Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural network with stopped training approach. Journal of Hydrology 230(3): 244-257.

Ding Y and Wang SSY, 2012. Optimal control of flood diversion in watershed using nonlinear optimization. Advances in Water Resources 44: 30-48.

Ghosh S and Mujumdar PP, 2006. Risk minimization in water quality control problems of a river system. Advances in Water Resources 29(3): 458–470.

King FH, 1898. Principles and conditions of the movement of groundwater. U. S. Geol. Survey, 91th. Ann. Report, Part 2, pp. 59-294.

Nikoo MR, Kerachian R, Nikosokhan MH and Hatami bahman beiglou P, 2011. A game theoretic model for trading pollution discharge permits in river systems. International Journal of Environmental Science and Development 2(2): 162-166.

Nikoo MR, Varjavand I, Kerachian R, Pirooz MD and Karimi A, 2014. Multi objective optimum design of double-layer perforated-wall breakwaters: Application of NSGA-II and barngaining models. Applied Ocean Research 47: 47-52.

Park CH, Joo JG and kim JH, 2011. Integrated washland optimization model for flood mitigation using multi-objective genetic algorithm. Journal of Hydro-Environment Research 6 (2): 119-126.

Samani JMV, Samani HMV and Shaiannejad M, 2004. Reservoir routing with outflow through rockfill dams. IAHR Journal of Hydraulic Research 42(4): 435-439.

Sheikhmohammadi M and Madani K, 2008. Bargaining over the Caspian Sea-the largest lake on the earth. Pp. 316, Proceeding of the World Environmental and Water Resources Congress, Honolulu, Hawaii, 10(40976).

Tayfur G, Swiatek D, Wita A and Singh VP, 2005. Case study: Finite element method and artificial Neural network models for flow through Jeziorsko earthfill dam in Poland. Journal of Hydraulic Engineering 131(6): 431-440.

Ward JK, 1964. Turbulent flow in porous media. Journal of Hydraulic Division, ASCE 5(90): 1-12.

Yazdi J and Salehi Neyshabouri SAA, 2014a. Identifying low impact development strategies for flood mitigation using a fuzzy-probabilistic approach. Environmental Modelling & Software 60: 31-44.

Yazdi J and Salehi Neyshabouri SAA, 2014b. Adaptive surrogate modeling for optimization of flood control detention dams. Environmental Modelling & Software 61: 106-120.