

توسعه مدل بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی با تأکید بر کمیت و کیفیت منابع آب

فاطمه حیدری^۱، مجید دلاور^{۲*}، بهرام ثقفیان^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استادیار گروه منابع آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

۳. استاد گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۳۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۲/۱۱)

چکیده

بسیاری از مسائل واقعی تخصیص بهینه منابع آب شامل اهداف متضادی هستند. در این تحقیق، الگوریتم ژنتیک NSGA-II، به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی چندهدفه از منابع آب و مدیریت بهینه عرضه و تقاضای آب در بخش کشاورزی توسعه یافته است. به منظور تخصیص بهینه منابع آب و زمین به محصولات غالب در واحد هیدرولوژیکی نجف‌آباد، دو مدل جایگزین برنامه‌ریزی ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی، با الگوریتم NSGA-II مرتبط شده‌اند. نتایج مدل بر اساس پارامترهای آماری خطا، کارایی مدل‌های جایگزین برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی و غلظت کل جامدات محلول در تعدادی چاه‌های مشاهده‌ای نمونه را تأیید می‌نمایند. با توجه به نتایج نهایی الگوریتم شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، مقدار متوسط افت تراز آب زیرزمینی در شرایط بهینه نسبت به شرایط موجود (۰/۶۵ متر) به ۰/۱۸ متر محدود شده است. بعلاوه، بر اساس الگوی بهینه، متوسط ماهیانه غلظت املاح در منطقه از ۱۲۵۸ به ۱۲۲۹ میلی‌گرم بر لیتر کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چندهدفه، تراز آب زیرزمینی، غلظت املاح.

مقدمه

یکی از راهکارهای نوین در دهه‌های اخیر در بحث مدیریت منابع آب، بهره‌برداری تلفیقی بهینه از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌باشد (Coe, 1990). یک روش مفید و قدرتمند در بررسی استراتژی‌های مدیریتی و توسعه‌ای طرح‌های آبی و همچنین بهره‌برداری بهینه تلفیقی از منابع آب، استفاده از تکنیک شبیه‌سازی-بهینه‌سازی^۱ (SO) است (Karamouz et al., 2004). تکنیک درونگذاری^۲ و روش ماتریس پاسخ^۳ دو روشی هستند که معمولاً برای ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی استفاده می‌شوند (Gorelick, 1983). Morel-Seytoux and Dally (1975) و Seytoux (1975) روش ماتریس پاسخ واحد را برای سیستم‌های رودخانه-آبخوان توسعه دادند. Peralta et al., (1995) یک مدل بهینه‌سازی را برای بهره‌برداری تلفیقی در دشت آبرفتی می‌سی‌سی‌پی ارائه نمودند. آنها از روش درونگذاری جهت حل مدل بهینه‌سازی و فرمول‌بندی آن استفاده کردند. همچنین، and Labadie.

Miller (2003) بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی را در مقیاس

منطقه‌ای انجام دادند. آنها برای محاسبه ضرایب ماتریس پاسخ واحد از مدل MODFLOW و از مدل MODSIM به‌عنوان مدل بهینه‌سازی سیستم استفاده کردند.

به‌طور کلی، رویکرد مدل‌سازی SO می‌تواند برای مسائل پیچیده تخصیص منابع آب به کار گرفته شود و بهترین برنامه مدیریتی تحت یک مجموعه شرایط و محدودیت‌های خاص را شناسایی نماید (Wagner, 1995). لیکن، ادغام مدل شبیه‌سازی به شدت غیرخطی در یک مدل مدیریتی، پیچیده و دشوار است و ممکن است زمان محاسباتی برای دستیابی به هر راه‌حل بهینه را طولانی نماید. زمان محاسباتی می‌تواند با استفاده از بعضی تقریب‌ها از مدل شبیه‌سازی یا با استفاده از متا-مدل^۴، به‌عنوان جایگزین برای مدل‌های عددی پیچیده کاهش یابد (Bhattacharjya and Datta, 2005).

محققان بسیاری، از مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۵ به‌عنوان مدل جایگزین^۶ برای مطالعات شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده کرده‌اند (Bhattacharjya and Datta, 2009; Dhar and

* نویسنده مسئول: m.delavar@modares.ac.ir

4. Meta-Model
5. Artificial Neural Network
6. Surrogate Model

1. Simulation-Optimization
2. Embedding Technique
3. Response Matrix

و محدودیت) یک مسئله چندهدفه را به یک مسئله تک‌هدفه تبدیل کرده و روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک و یا اکتشافی^۹ را به کار می‌گیرند (Vamvakieridou-Lyroudia *et al.*, 2005). این تکنیک‌ها، تنها یک راه‌حل بهینه به ازای هر بار اجرای مدل بهینه‌سازی شناسایی می‌کنند. در تحقیقی، Karamouz *et al.*, (2007) یک مدل بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را بر اساس ترکیب GA و ANN برای تأمین آب موردتقاضای کشاورزان، کاهش هزینه‌های پمپاژ و کنترل نوسانات سطح آب زیرزمینی در جنوب تهران ارائه نمودند. در این مطالعه، از روش وزن‌دهی برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه استفاده گردیده و نتایج، بیانگر کارایی مناسب مدل در بهره‌برداری بهینه تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد.

الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه می‌توانند بدون نیاز به تبدیل مسئله به یک مسئله تک‌هدفه، تمام اهداف را به‌طور هم‌زمان نشان دهند (Penn *et al.*, 2013). از جمله الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه توسعه‌یافته عبارتند از: الگوریتم ژنتیک پارتوی نیچد (NPGA)^{۱۰} (Horn *et al.*, 1994)، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA)^{۱۱} (Srinivas and Deb, 1995)، الگوریتم تکاملی قدرت پارتو (SPEA)^{۱۲} (Zitzler and Thiele, 1999) و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب II (NSGA-II)^{۱۳} (Deb *et al.*, 2002).

از جمله مطالعات انجام‌شده در خصوص کاربرد الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه در مسائل بهره‌برداری تلفیقی منابع آب می‌توان به مطالعه (Sreekanth and Datta, 2010) اشاره کرد. در این مطالعه برای بررسی استراتژی‌های مدیریت چندهدفه نفوذ آب شور در سفره‌های ساحلی از روش مبتنی بر ترکیب دو مدل جایگزین شبکه عصبی مدولار (MNN)^{۱۴} و GP با الگوریتم NSGA-II استفاده گردید. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که مدل GP عدم قطعیت کمتری نسبت به مدل‌های MNN دارد. همچنین مدل GP برای انجام بهینه‌سازی با استفاده از فضای جستجوی تطبیقی در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه مناسب‌تر است. در تحقیقی Mohamreza Pourtabari *et al.* (2009) یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه را به‌منظور مدیریت بهره‌برداری تلفیقی با استفاده از الگوریتم‌های NSGA-II

(Datta, 2009). Rao *et al.*, (2004) یک مدل بهره‌برداری تلفیقی منطقه‌ای را با هدف حداقل کردن هزینه‌های عملیاتی و حداکثر کردن ذخیره آبخوان توسعه دادند. برای حل مسئله، الگوریتم تبرید تدریجی (SA)^۱ و شبیه‌ساز SHARP (Essaid, 1990) به کار رفته است. در طول اجرای مدل، برای کاهش بار محاسباتی از مدل جایگزین ANN استفاده گردید. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که ترکیب الگوریتم SA و مدل‌های آموزش‌یافته ANN می‌تواند برای حل مسائل واقعی در اندازه متوسط، مفید باشد. Triana *et al.*, (2010) از ANNs در مدل‌سازی تعاملات آبخوان-رودخانه برای مدیریت حوضه رودخانه آرکانزاس^۲ استفاده کردند. نتایج بیانگر کارایی خوب مدل‌های ANN آموزش‌دیده در پیش‌بینی مقدار جریان بازگشتی و غلظت‌های شوری است. Safavi *et al.*, (2010) یک مدل SO با تلفیق مدل ANN و الگوریتم ژنتیک (GA)^۳ برای استفاده تلفیقی از منابع آب در حوضه زاینده‌رود را به کار بردند.

(Safavi and Esmikhani, 2013) در تحقیقی، بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان (SVMs)^۴ و GA در حوضه زاینده‌رود بررسی کردند. آنها از مدل تلفیقی، برای به حداقل رساندن کمبود آب در چهار منطقه کشاورزی مورد مطالعه، استفاده کردند.

مطالعات اندکی در زمینه منابع آب از مدل‌های برنامه‌ریزی ژنتیک^۵ (GP) استفاده کرده‌اند (Makkeasorn *et al.*, 2008; Parasuraman and Elshorbagy, 2008; Wang *et al.*, 2009). Zechman *et al.*, (2005) در یک مسئله شناسایی منبع آلاینده آب زیرزمینی، رویکرد مدل‌سازی SO را بکار بردند. آنها برای کاهش بار محاسباتی مسئله، مدل جایگزین GP را با بهینه‌ساز GA ادغام کردند.

اکثر مسائل بهینه‌سازی برای استفاده تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی شامل اهداف چندگانه هستند. برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش وزن‌دهی^۶، روش محدودیت^۷ و الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه^۸ اشاره نمود.

تکنیک‌های بهینه‌سازی چندهدفه سنتی (روش وزن‌دهی

1. Simulated Annealing Algorithm
2. Arkansas
3. Genetic Algorithm
4. Support Vector Machine
5. Genetic Programming
6. Weighted Sum Method
7. Epsilon-Constraint Method
8. Multi-Objective Evolutionary Algorithms (Moeas)

9. Heuristic

10. Niche Pareto Genetic Algorithm

11. Nondominated Sorting Genetic Algorithm

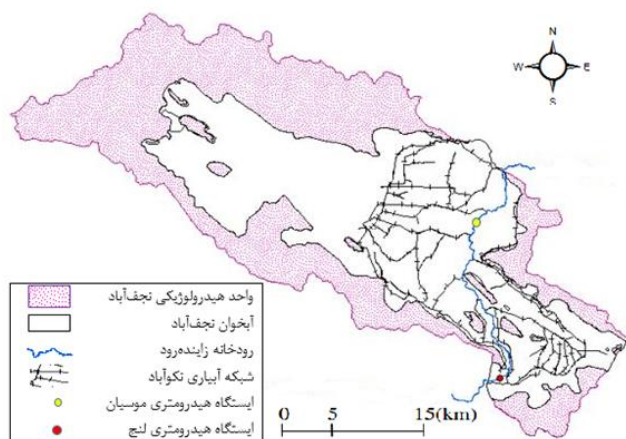
12. Strength-Pareto Evolutionary Algorithm

13. Modular Neural Network

شده است (Nagheli, et al., 2011). از سوئی عدم تصفیه صحیح و دفع غیراصولی فاضلاب کشتارگاه‌ها و مراکز صنعتی در این محدوده منجر به آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی شده که به شدت بر کیفیت محصولات کشاورزی در این منطقه تأثیرگذار بوده است.

مواد و روش‌ها

منطقه تحقیق، واحد هیدرولوژیکی نجف‌آباد است که در گستره-ای به وسعت ۱۷۴۲/۲۱ کیلومترمربع واقع در بخشی از زیر-حوضه مرغاب قرار گرفته و بر اساس تقسیمات حوضه‌ای کشور با کد ۴۲۰۶ در مختصات جغرافیایی ۵۷° ۵۰' تا ۴۴° ۵۱' طول شرقی و ۱۹° ۳۲' تا ۴۹° ۳۲' عرض شمالی واقع گردیده است. وسعت دشت و آبخوان آبرفتی نجف‌آباد با کسر سازندهای سخت (ارتفاعات)، به میزان ۱۰۶۵ کیلومترمربع می‌باشد و آبخوان از نوع آزاد است. بخشی از رودخانه زاینده‌رود از جنوب محدوده نجف‌آباد عبور می‌کند. بند انحرافی نکوآباد بر روی رودخانه در نزدیکی ورودی این رودخانه به محدوده نجف‌آباد احداث و شبکه آبیاری و زهکشی نکوآباد را تغذیه می‌نماید. (شکل ۱).



شکل ۱- آبخوان نجف‌آباد و موقعیت رودخانه زاینده‌رود و شبکه آبیاری و زهکشی نکوآباد

روش مورد مطالعه

مدل بهره‌برداری تلفیقی در این تحقیق از دو گام اصلی شبیه-سازی و بهینه‌سازی تشکیل شده است. هسته اصلی محاسبات در گام اول، شامل مدل‌های شبیه‌سازی جریان و انتقال آلاینده در آب زیرزمینی و جزء دوم شامل یک مدل تخصیص بهینه منابع آب است. مراحل مدل‌سازی تحقیق در شکل (۲) ارائه شده است.

II و SGAs^۱ ارائه نمودند. در این تحقیق مدل‌سازی به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که حداقل اطمینان‌پذیری سیستم، حداکثر و هزینه‌های کلی سیستم حداقل گردد. نتایج مدل تدوین‌شده نشان می‌دهد که مدل NSGA-II در مقایسه با SGA، در مدت زمان بسیار کمتری قادر به ارائه مقادیر بهینه تخصیص خواهد بود. (Peralta et al., 2014) برای حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی با هدف حداکثر کردن تولید برقی و تأمین آب و حداقل کردن هزینه‌های عملیاتی انتقال آب در یک سیستم هیدرولیکی غیرخطی شامل آبخوان، رودخانه و مخزن از الگوریتم NSGA استفاده کردند. نتایج این مطالعه حاکی از توانایی الگوریتم NSGA در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه غیرخطی است.

با توجه به آنچه در بالا اشاره شد، ارائه روش‌شناسی مناسب در زمینه بهره‌برداری تلفیقی بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی با در نظر گرفتن شرایط کمیت و کیفیت منابع آب از اهمیت بالایی برخوردار است. اما با توجه به طیف گسترده مطالعات در زمینه بهره‌برداری تلفیقی بهینه در بخش کشاورزی و به‌ویژه در جهت مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های دارای بیلان منفی، الگوهای بهینه ارائه‌شده در این زمینه، هنوز کارایی مناسبی ندارند. علت این امر می‌تواند مسائلی مانند عدم انتخاب توابع هدف مناسب، طبیعت غیر-قطعی متغیرهای تصمیم از جمله منابع و مصارف و عدم توجه به موانع اجرایی در تغییر و اصلاح الگوی کشت محصولات باشد. این مسئله بخصوص با توجه به بحران‌های شدید آبی در کشور و برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی که منجر به افت شدید تراز و کیفیت آبخوان در بسیاری از مناطق کشور شده است، اهمیت زیادی دارد. در این راستا، در تحقیق حاضر با لحاظ شرایط کمیت و کیفیت آبخوان، یک روش‌شناسی کارا در زمینه بهره‌برداری بهینه تلفیقی چندهدفه از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی ارائه می‌گردد. به‌منظور ارزیابی روش‌شناسی و ارائه نتایج حاصل، دشت نجف‌آباد در حوضه زاینده‌رود به‌عنوان منطقه تحقیق انتخاب گردید. این واحد هیدرولوژیکی از جمله محدوده‌های آسیب‌پذیر در کشور محسوب می‌گردد که به دلیل موقعیت خاص از لحاظ کشاورزی در استان اصفهان از پتانسیل بالایی برخوردار است. ولیکن در سال‌های اخیر، تمرکز چاه‌های بهره‌برداری با دبی پمپاژ بالا در بخش مرکزی دشت و برداشت بی‌رویه از آبخوان آبرفتی باعث افت بیش‌ازحد تراز آب زیرزمینی



شکل ۲- ساختار سیستم مدل‌سازی توسعه‌یافته در این تحقیق

که θ تخلخل مواد تشکیل‌دهنده آبخوان (بدون بعد)، C غلظت آلاینده محلول (ML^{-3})، t زمان (T)، ρ_b چگالی حجمی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان (ML^{-3})، \bar{C} غلظت آلاینده جذب‌شده بر روی مواد جامد (MM^{-1})، x_{ij} فاصله در راستای محورهای مختصات (L)، D_{ij} تانسور ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی (L^2T^{-1})، v_i سرعت آب در محیط متخلخل یا سرعت جریان داریسی (LT^{-1})، q_s نرخ جریان حجمی در واحد حجم آبخوان (T)، C_s غلظت آلاینده جریان چاه و چشمه (ML^{-3})، q_s' میزان تغییرات ذخیره آب زیرزمینی که برابر است با تغییرات تخلخل در واحد زمان (T^{-1})، λ_1 نرخ واکنش اول فاز محلول (T^{-1})، λ_2 نرخ واکنش اول فاز جامد (T^{-1}) می‌باشند.

مدل‌های عددی مختلفی برای حل معادلات حاکم بر حرکت آلاینده بر اساس روش‌های مختلف عددی نظیر تفاضل محدود و اجزا محدود گسترش داده شده‌اند که یکی از این مدل‌ها، مدل MT3D می‌باشد. مدل سه‌بعدی انتقال آلاینده MT3D در سال ۱۹۹۰ توسط زینگ توسعه داده شده است، قابلیت‌ها و مجموعه‌هایی از جمله واکنش‌های ژئوشیمی و بیولوژیکی در سال‌های اخیر به آن اضافه شده و با مدل MODFLOW هم تلفیق شده و با عنوان MT3DMS جهت استفاده کاربران عمومیت پیدا کرده است.

مدل تخصیص بهینه منابع آب

مدل تخصیص منابع آب در این مطالعه بر اساس رویکرد مدل‌سازی SO استوار است. در این رویکرد ابتدا از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی سیستم منابع آب و پاسخ‌ها به

مدل شبیه‌سازی جریان و انتقال آلاینده

مدل شبیه‌سازی آبخوان-رودخانه از جمله مهمترین اجزاء یک مدل بهره‌برداری تلفیقی محسوب می‌گردد. به‌طورکلی، یک سیستم تلفیقی منابع آب، از دو زیرسیستم آب سطحی و آب زیرزمینی تشکیل می‌شود. در این میان، مدل‌سازی زیرسیستم آب زیرزمینی به دلیل ناهمگنی، ورودی‌ها و خروجی‌های متعدد آن، به‌مراتب پیچیده‌تر از مدل‌سازی زیرسیستم آب سطحی است. به همین دلیل، بخش اصلی یک مدل تلفیقی، ساختار مدل آب زیرزمینی آن است (Alimohammadi and Hosseinzadeh, 2010).

مدل‌های عددی مختلفی در زمینه شبیه‌سازی جریان ارائه گردیده‌اند. در این تحقیق مدل MODFLOW (McDonald and Harbough, 1988) که با کمک چندین بسته نرم‌افزاری، معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی و در نهایت شبیه‌سازی جریان (تعیین تراز سفره آب زیرزمینی) را بر اساس روش عددی تفاضل محدود حل می‌نماید، به کار گرفته شده است (Ghodrati, and Sabany, 2012).

در منطقه مورد مطالعه منبع آب سطحی، منبع اصلی تأمین‌کننده نیاز آبی بخش کشاورزی می‌باشد، یعنی ابتدا برداشت از منبع آب سطحی صورت گرفته و در صورت کمبود آب سطحی، مابقی نیاز از منبع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. به‌منظور لحاظ تغییرات کمی و کیفی آب سطحی در مدل بهره‌برداری تلفیقی، میزان حجم آب قابل‌برداشت از منبع آب سطحی بر اساس سری زمانی جریان و TDS رودخانه در سال شبیه‌سازی تعیین و به‌عنوان محدودیت در ساختار الگوریتم بهینه‌سازی اعمال می‌شود. همچنین تغییرات تراز آب در رودخانه به‌عنوان یک شرط مرزی داخلی در مدل‌سازی آب زیرزمینی به منظور شبیه‌سازی اندرکنش آبخوان و رودخانه در نظر گرفته شد و وضعیت دقیق اندرکنش منابع بر یکدیگر در خلال مدل‌سازی با استفاده از مدل MODFLOW مشخص می‌گردد.

به‌طورکلی برای شبیه‌سازی حرکت آلاینده در سیستم‌های هیدرولوژیکی نیاز است که معادلات حاکم بر حرکت آلاینده با استفاده از روش‌های مختلف تحلیلی یا عددی حل گردند. معادله حاکم بر حرکت آلاینده در سفره آب زیرزمینی مطابق رابطه ۱ می‌باشد (Zheng, 1990):

(رابطه ۱)

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\theta v_j C) + q_s C_s - q_s' C - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \bar{C}$$

و وابسته را با بررسی نحوه ارتباط متغیرها با توجه به ترکیب عملگرهای مناسب ریاضی ارائه می‌نماید.

الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II

الگوریتم NSGA-II یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه نخبه‌گرا می‌باشد که توسط (Deb et al., 2002) معرفی گردید. در این روش از مفاهیم مرتب‌سازی نامغلوب، نخبه‌گرایی و همچنین عملگرهای الگوریتم ژنتیک استفاده شده و الگوریتم قدرتمندی جهت حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده است (Kanooni, 2013).

در این تحقیق، به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب فرض می‌گردد که نیاز آبی محصولات، ثابت و برابر با نیاز آبی ناخالص هر محصول می‌باشد. همچنین، منبع آب سطحی به‌عنوان منبع اصلی تأمین‌کننده نیاز آبی بخش کشاورزی در نظر گرفته شده است، یعنی ابتدا برداشت از منبع آب سطحی صورت گرفته و در صورت کمبود آب سطحی، مابقی نیاز از منبع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. فرم کلی توابع هدف بهینه‌سازی به صورت رابطه ۲ خواهد بود:

$$\text{Minimize } \left\{ \begin{array}{l} Z_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{X_{1ij} + X_{2ij} - demand_{ij}}{demand_{ij}} \\ Z_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \frac{\Delta L_i(k)}{\Delta L_{max}} \left(\frac{a_k}{A} \right) \\ Z_3 = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \frac{C_i(k)}{C_{max}} \left(\frac{a_k}{A} \right) \end{array} \right. \quad (\text{رابطه } 2)$$

Z_1 اولین تابع هدف و برابر با کمبود نسبی آب (تفاضل نیاز آبی ناخالص و حجم آب تأمین‌شده برای محصولات نسبت به نیاز آبی ناخالص آن‌ها) در طول همه دوره‌ها و برای همه محصولات کشاورزی (بدون‌بعد)، $i=1, \dots, 12$ اندیس ماه شبیه‌سازی، $j=1, \dots, 8$ اندیس تعداد محصولات کشاورزی غالب در منطقه، X_{1ij} میزان آب برداشت‌شده از منبع آب سطحی در ماه i و برای محصول j ($m^3/month$)، X_{2ij} میزان آب زیرزمینی برداشت‌شده از چاه‌های پمپاژ در ماه i و برای محصول j ($m^3/month$)، $demand_{ij}$ نیاز آبی ناخالص محصول j در ماه i ($m^3/month$) می‌باشد. Z_2 دومین تابع هدف و برابر است با متوسط سالیانه تغییرات تراز آب زیرزمینی (بدون‌بعد)، $k=1, \dots, 7$ اندیس چاه مشاهده‌ای نماینده، $\Delta L_i(k)$ میزان تغییرات تراز آب زیرزمینی در ماه i و چاه مشاهده‌ای k (m)، ΔL_{max} حداکثر تغییر مجاز سالانه تراز آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی در سال تحقیق (m)، a_k مساحت چندضلعی‌های تیسس مربوط به هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای (ha) و A مساحت کل آبخوان (ha) می‌باشد. Z_3 سومین تابع هدف و برابر است با

مجموعه‌های مختلف از محرک‌های هیدرولیکی فرضی (استراتژی‌های مدیریتی) استفاده می‌شود. سپس استراتژی‌ها و پاسخ‌هایشان برای آموزش مدل‌های جایگزین به کار رفته و نهایتاً مدل‌های جایگزین آموزش‌یافته برای استنتاج استراتژی‌های بهینه مدیریتی در ساختار یک الگوریتم بهینه‌سازی بکار گرفته می‌شوند.

مدل‌های جایگزین

اکثر مدل‌های SO از مدل‌های عددی محدود (المان یا اجزاء) جایگزین شده برای پیش‌بینی پاسخ سیستم فیزیکی به هرگونه استراتژی توسعه‌یافته توسط الگوریتم بهینه‌سازی استفاده می‌کنند (Peralta and Kalwij, 2012). در یک سیستم فیزیکی غیرخطی و بسیار پیچیده، استفاده از شبیه‌ساز مبتنی بر معادلات اصلی حاکم بر جریان آب زیرزمینی دارای مشکلات عمده‌ای ناشی از تلفیق^۱ این برنامه‌ها با الگوریتم بهینه‌سازی است. در کنار این مشکل، زمان اجرای برنامه نیز از مشکلات چنین برخوردی است. جهت حل این مشکل، استفاده از یک برنامه شبیه‌سازی ریاضی-آماري برای ارتباط ورودی‌های مختلف یک سیستم به خروجی‌های آن مناسب به نظر می‌رسد (Karamouz et al., 2004). در این تحقیق، مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) نقش دو مدل جایگزین شبیه‌سازی آب زیرزمینی را به عهده دارند.

شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدل‌های محاسباتی هستند که توانایی تعیین رابطه میان ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم فیزیکی را توسط شبکه‌ای از گره‌ها دارند. شبکه گره‌ها همگی به هم متصل هستند و در آن میزان فعالیت هر یک از این اتصالات توسط اطلاعات تاریخی تنظیم می‌شود (فرآیند یادگیری) و در نهایت مدل قادر خواهد بود قوانین مرتبط میان ورودی‌ها و خروجی‌ها را کشف نماید (Delavar, 2005).

مدل برنامه‌ریزی ژنتیک برای اولین بار توسط Koza در سال ۱۹۹۲ ارائه شده است. روش برنامه‌ریزی ژنتیک جزء روش‌های الگوریتم گردشی محسوب می‌شود که مبنای آنها بر اساس نظریه تکامل داروین استوار است (Shiri et al., 2014).

برنامه‌ریزی ژنتیک روشی مبتنی بر تعیین بهترین ساختار ارتباطی بین متغیرهای ورودی و هدف بر مبنای تعریف عملگرهای مختلف ریاضی می‌باشد. بدین منظور الگوریتم مذکور، با تعریف یک تابع هدف به‌عنوان معیار مطلوبیت، در یک فرآیند گام‌به‌گام ساختار مناسب ارتباطی بین متغیرهای مستقل

درون محدوده مدل باید توسط شرایط مرزی نمایش داده شوند. در این تحقیق، اندرکنش آبخوان و رودخانه به عنوان یک شرط مرزی داخلی در مدل سازی آب زیرزمینی در نظر گرفته شده و وضعیت دقیق اندرکنش منابع بر یکدیگر در خلال مدل سازی مشخص می گردد. شرایط مرزی در محل ارتباط آبخوان با آبخوان های مجاور نیز در مدل اعمال می گردد. واسنجی مدل جریان در شرایط ماندگار، با استفاده از داده های تراز آب زیرزمینی در چاه های مشاهداتی طی دوره ۸۹-۱۳۸۸ صورت پذیرفت. برای واسنجی مدل، اصلاحاتی بر روی میزان پارامترهای تغذیه و هدایت هیدرولیکی افقی با روش PEST^۳ (Doherty, 1994) صورت پذیرفت. مقادیر پارامترها بعد از واسنجی مدل جریان، در جدول (۱) ارائه گردیده است.

جدول ۱- پارامترهای مدل جریان بعد از واسنجی در حالت ماندگار

پارامترها	مقادیر
هدایت هیدرولیکی (m/day)	۰/۶ - ۱/۱
ضریب قابلیت انتقال بستر (m ² /day)	۲۱/۴
تغذیه سطحی (m/day)	۱/۱۸ e-۴ - ۰/۰۰۲۱
ضخامت بستر رودخانه (m)	۱/۳۸

برای شبیه سازی جریان آب زیرزمینی در حالت غیر-ماندگار و تعیین ضریب ذخیره آبخوان، مدل واسنجی شده در حالت ماندگار، به عنوان مدل پایه مورد استفاده قرار گرفت. برای این کار، با توجه به وسعت زیاد منطقه، محدوده به ۱۱ چند-ضلعی بسته برای پارامتر ضریب ذخیره شکسته شد و ضریب هر منطقه با روش PEST، واسنجی شد. مقدار ضریب ذخیره بعد از واسنجی مدل بین ۴-۸/۵ درصد متغیر است. میانگین خطای مطلق برابر با ۱/۸ متر و ضریب تبیین ۰/۹۷ در مرحله اعتبارسنجی (۹۰-۱۳۸۹) بیانگر دقت نسبتاً خوب مدل در شبیه سازی جریان آب زیرزمینی است.

بررسی تغییرات کمیت آبخوان نشان می دهد که تراز سطح آب در آبخوان نجف آباد بین ۱۴۰۰ تا ۱۸۶۵ متر متغیر است و از سمت شمال غرب و جنوب شرق به مرکز آبخوان کاهش می یابد. نقشه خطوط هم پتانسیل آب زیرزمینی در آبخوان نجف آباد بعد از واسنجی مدل در شکل (۳) ارائه شده است. میزان افت تراز آب در بخش مرکزی دشت در سال تحقیق، برابر با ۱/۳۴ متر می باشد و با توجه به افت و خیزهایی که در تراز آب در نقاط مختلف دشت وجود دارد، سطح آب در سال شبیه سازی، به طور متوسط ۰/۶۵ متر افت دارد.

میانگین ماهیانه غلظت املاح در آب زیرزمینی (بدون بعد)، $C_i(k)$ میزان غلظت کل جامدات محلول (TDS)^۱ در آب زیرزمینی در ماه i و چاه مشاهده ای k (mgr/lit) و حداکثر غلظت مجاز TDS در آب زیرزمینی در کل منطقه مطالعاتی (mgr/lit) می باشد.

به منظور حل مسئله بهینه سازی، مجموعه محدودیت های مربوط به سطوح زیر کشت محصولات و منابع آب سطحی و زیرزمینی در نظر گرفته شد. برای حل مسئله بهینه سازی از کد بهینه سازی MOGA متلب که در واقع نوعی NSGA-II است، استفاده شد و به منظور اعمال محدودیت ها در الگوریتم بهینه سازی، توابع جریمه فازی (Cheng and Li, 1998) اعمال گردید. نیاز آبی گیاهان متأثر از عواملی همچون بارندگی، درجه حرارت، تبخیر و ضریب استفاده از آب توسط گیاه می باشد. نیاز خالص آبی محصولات زراعی و باغی در واحد هیدرولوژیکی نجف آباد به تفکیک ماه از جهاد کشاورزی استان اصفهان تهیه و با اعمال راندمان آبیاری (۳۰/۱ درصد)، نیاز آبی خالص محصولات تعیین گردید.

در الگوریتم بهینه سازی، بر اساس استاندارد سازمان جهانی سلامت^۲ (WHO)، حداکثر مقدار مجاز غلظت TDS برای بخش کشاورزی برابر با ۴۵۰ میلی گرم بر لیتر می باشد. حداکثر افت مجاز سالانه برای آبخوان نجف آباد برابر با ۰/۸۶ متر است (Ab and Tosee Paydar Consulting Engineering Co., 2010).

نتایج و بحث

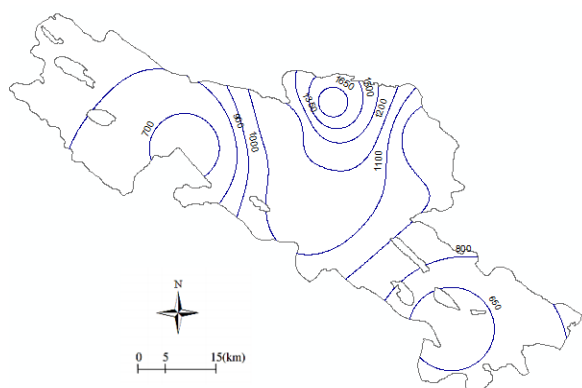
همان گونه که قبلاً بیان شد، در این تحقیق یک الگوریتم بهینه سازی بهره برداری تلفیقی به منظور استفاده پایدار از منابع آب سطحی و زیرزمینی و مدیریت بهینه عرضه و تقاضای آب در بخش کشاورزی توسعه یافته است. نتایج روش ها و مراحل مختلف این تحقیق، در ادامه بیان می گردد.

شبیه سازی آب زیرزمینی

مدل شبیه سازی آب زیرزمینی از دو جزء اصلی شامل مدل شبیه سازی جریان آب زیرزمینی MODFLOW و مدل شبیه سازی انتقال آلاینده MT3DMS تشکیل شده است.

شبیه سازی جریان آب زیرزمینی

برای شبیه سازی جریان آب زیرزمینی، رویکرد مدل مفهومی استفاده شده است. همچنین خصوصیات هیدرولوژیکی مجاور و



شکل ۴- نقشه خطوط هم‌غلظت TDS (میلی‌گرم بر لیتر) در سال ۸۹-۱۳۸۸

توسعه مدل تخصیص بهینه منابع آب

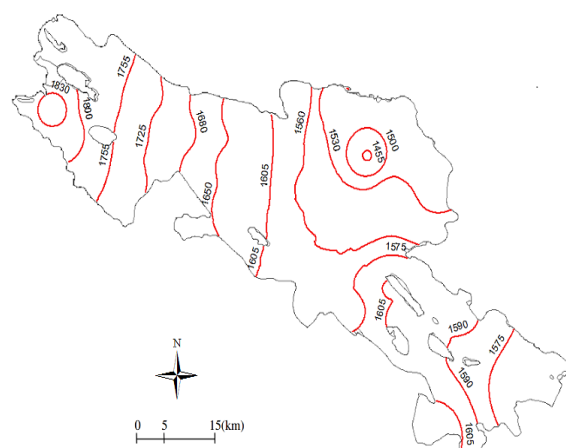
توسعه مدل‌های جایگزین

برای آموزش مدل‌های جایگزین، محدوده آبخوان بر اساس معیارهایی چون میزان تغذیه، موقعیت مناطق کشاورزی، رودخانه و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای به ۷ منطقه تقسیم‌بندی شد و در هر منطقه، یک چاه مشاهده‌ای تراز آب و یک چاه مشاهده‌ای برای کیفیت آب زیرزمینی انتخاب گردید. تا حد امکان سعی گردید که چاه‌های مشاهده‌ای تراز و کیفیت به لحاظ موقعیت مکانی به هم نزدیک باشند.

در این تحقیق، تراز آب زیرزمینی در هر چاه مشاهده‌ای، توسط یک مدل ANN شبیه‌سازی می‌شود. پارامترهای ورودی در شبیه‌سازی تراز آب توسط مدل‌های جایگزین، شامل نرخ پمپاژ در کل منطقه، تراز آب رودخانه در محل ایستگاه‌های هیدرومتری، تغذیه سطحی و بارش و متغیرهای خروجی شامل تراز آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای نماینده برای مدل جریان می‌باشد. برای آموزش و اعتبارسنجی مدل‌های ANN، ۳۸۴ استراتژی به‌عنوان ورودی به مدل MODFLOW داده شد و نتایج مدل شبیه‌سازی (تراز آب زیرزمینی در هر چاه مشاهده‌ای) ثبت گردیدند. کارایی یک مدل ANN به‌طور عمده‌ای، به معماری مدل شبکه بستگی دارد که در این تحقیق از یک مدل شبکه عصبی مصنوعی پیشرو^۱ با الگوریتم آموزش پس انتشار استاندارد^۲ استفاده شد. بعد از اعتبارسنجی چندین معماری مختلف، یک معماری ۱-۵-۵ با تابع محرک تانژانت سیگموئید^۳ برای لایه ورودی و تابع محرک خطی^۴ برای لایه خروجی به‌عنوان بهترین معماری برای شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در هر موقعیت چاه مشاهده‌ای مورد استفاده قرار گرفت.

شبیه‌سازی انتقال آلاینده

شبیه‌سازی انتقال آلاینده، یکی دیگر از اجزاء اصلی مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی محسوب می‌گردد. این مدل، با شبیه‌سازی غلظت TDS در آب زیرزمینی، به‌منظور برآورد پتانسیل آب زیرزمینی قابل استخراج، با لحاظ حداکثر مقدار مجاز غلظت کل جامدات محلول در آب، دارای اهمیت می‌باشد.



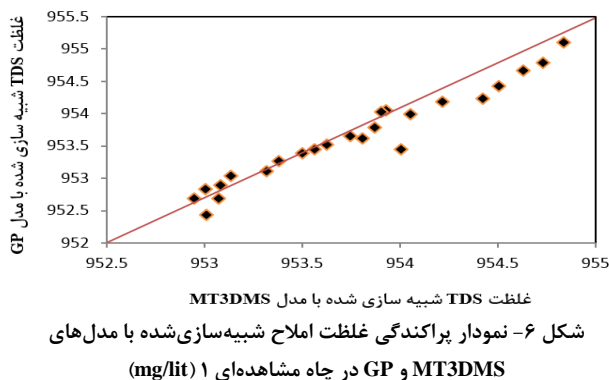
شکل ۳- نقشه خطوط هم‌پتانسیل آب زیرزمینی (متر) در سال ۸۹-۱۳۸۸

در این تحقیق، فرض شده است که ضریب پخشیدگی طولی از پارامترهای ناشناخته مدل انتقال است. با توجه به اینکه مدل‌های معکوس، توانایی واسنجی پارامترهای کیفیت را ندارند، برای واسنجی غیرمستقیم پارامترهای کیفیت، روش سعی و خطا برای تخمین ضریب پخشیدگی طولی به کار گرفته شد. بعد از انجام واسنجی، مشخص شد که مقادیر ضریب پخشیدگی بین ۷/۲ تا ۱۶/۳ متر متغیر است. همچنین مقادیر متوسط میانگین خطای مطلق برابر با ۲/۶ میلی‌گرم بر لیتر و ضریب تبیین ۰/۹۷ در مرحله اعتبارسنجی بیانگر کارایی مناسب مدل انتقال در شبیه‌سازی غلظت TDS است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی کیفیت آب زیرزمینی نشان می‌دهد که غلظت TDS بین ۵۵۰ تا ۱۷۰۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. غلظت املاح از سمت شمال غرب و جنوب شرق به مرکز آبخوان افزایش می‌یابد. بر اساس استاندارد WHO، حداکثر مقدار مجاز غلظت TDS برای بخش کشاورزی برابر با ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر است که با توجه به نتایج مدل شبیه‌سازی، غلظت املاح در برخی نقاط بخصوص در مرکز آبخوان بیش از ۳ برابر حد استاندارد می‌باشد. نقشه خطوط هم‌غلظت بعد از واسنجی مدل انتقال، در شکل (۴) ارائه گردیده است.

1. Feed-Forward Back Propagation Network
2. Standard Back-Propagation
3. Tangent Sigmoid(Tansig)
4. Pure Linear(Purelin)

GP در شبیه‌سازی غلظت TDS در مقایسه با مدل MT3DMS بیانگر این است که مدل برنامه‌ریزی ژنتیک توسعه‌یافته، با دقت نسبتاً خوبی و با ضریب هم‌بستگی متوسط ۰/۹۷ و میانگین مربع خطا یک میلی‌گرم بر لیتر در مرحله اعتبارسنجی، قادر به شبیه‌سازی غلظت TDS در منطقه می‌باشد. به عنوان نمونه، غلظت TDS شبیه‌سازی‌شده توسط مدل MT3DMS و GP در چاه مشاهده‌ای ۱ در مرحله اعتبارسنجی در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶- نمودار پراکنندگی غلظت املاح شبیه‌سازی‌شده با مدل‌های MT3DMS و GP در چاه مشاهده‌ای ۱ (mg/lit)

توسعه مدل بهینه‌سازی چندهدفه

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه یکی از اجزاء کلیدی مدل تخصیص منابع آب محسوب می‌گردد. مهمترین ورودی اصلی برای آماده‌سازی مدل NSGA-II شامل: نوع تابع و احتمال جهش، نوع تابع و احتمال تزویج، اندازه جمعیت و حداکثر تعداد تولید نسل می‌باشد. از آنجاکه عملکرد مدل NSGA-II تا حدود زیادی به انتخاب این مقادیر بستگی دارد، لذا در گام اول با انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای فوق، همگرایی مدل، مورد بررسی قرار گرفت و بهترین نتایج برای این پارامترها عبارتند از: تابع Uniform با احتمال ۰/۰۱ برای عملگر جهش، تابع Intermediate با احتمال ۱ برای عملگر تزویج و حداکثر تعداد تولید نسل برابر با ۳۰۰۰۰. با توجه به اینکه اندازه جمعیت اثر عمده‌ای بر روی نتایج دارد، در این بخش از روش پیشنهادی (Mahfoud (1995) در تعیین اندازه جمعیت برای الگوریتم چندهدفه NSGA استفاده گردید. (Mahfoud (1995) برای الگوریتم NSGA، رابطه ۳ و ۴ را برای محاسبه حد پائین اندازه جمعیت موردنیاز برای حفظ تعدادی پیک ثابت برای انواع مدل‌های sharing ارائه کرده است:

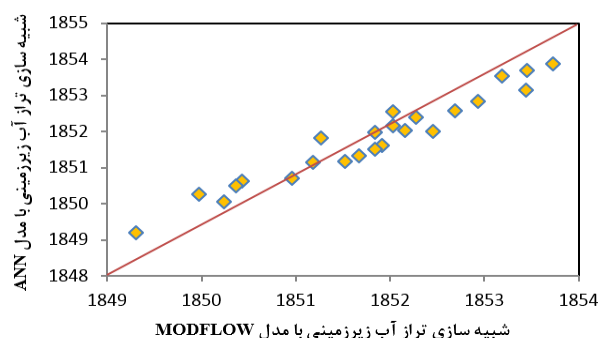
(رابطه ۳)

$$\text{Population size lower bound} = \ln\left(\frac{1 - \gamma^{1/G}}{c}\right) / \ln\left(\frac{c-r}{c}\right)$$

(رابطه ۴) $r = \text{minimum fitness}/\text{maximum fitness}$ $0 \leq r \leq 1$

در این رابطه G تعداد تولید، c تعداد پیک‌ها در فضای

نتایج حاصل از اعتبارسنجی عملکرد مدل ANN در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در مقایسه با مدل MODFLOW بیانگر این است که مدل شبکه عصبی مصنوعی توسعه‌یافته، با دقت نسبتاً خوبی و با ضریب هم‌بستگی متوسط ۰/۹۵ و میانگین مربع خطا ۰/۱۹ متر در مرحله اعتبارسنجی، قادر به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در منطقه می‌باشد. به عنوان نمونه، تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل MODFLOW و شبکه عصبی مصنوعی در چاه مشاهده‌ای ۱ در مرحله اعتبارسنجی در شکل (۵) نشان داده شده است.

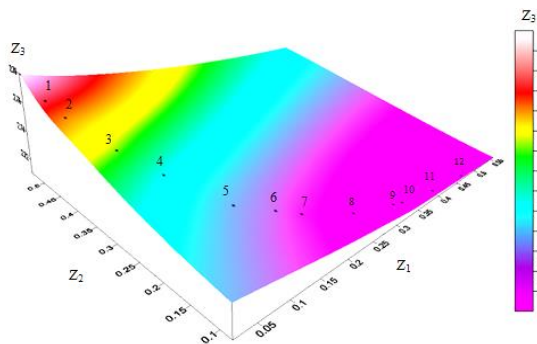


شکل ۵- نمودار پراکنندگی تراز آب شبیه‌سازی‌شده با مدل‌های MODFLOW و ANN در چاه مشاهده‌ای ۱ (متر)

برای شبیه‌سازی غلظت TDS در هر چاه مشاهده‌ای، در ابتدا مدل‌های ANN، آموزش یافته و کارائی‌شان مورد ارزیابی قرار گرفت. اما با توجه به افزایش بار محاسباتی در توسعه مدل بهینه‌سازی و همچنین خطای قابل توجه مدل ANN در برآورد غلظت آلاینده‌ها در برخی چاه‌ها، مدل GP برای حصول نتایج بهینه و همچنین کاهش بار محاسباتی مورد توجه قرار گرفت. برای آموزش و اعتبارسنجی مدل، ۳۸۴ استراتژی شامل ترکیبات مختلفی از برداشت از آبخوان، تغذیه سطحی، تراز آب رودخانه، بارش، غلظت املاح در رودخانه و تراز آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای به‌عنوان ورودی به مدل MT3DMS داده شد و نتایج مدل شبیه‌سازی (غلظت TDS در چاه‌های مشاهده‌ای) برای آموزش مدل‌های جایگزین استفاده گردید. اندازه جمعیت (تعداد کروموزوم‌ها) و تعداد ژن‌های هر کروموزوم، پارامترهای مهمی هستند که باید برای اجرای مدل GP، تعیین گردند.

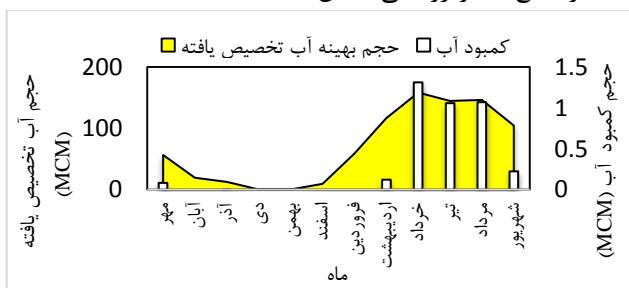
در این تحقیق، مدل‌های GP بر اساس ترکیبات مختلف از داده‌های ورودی، آموزش یافته‌اند. نتایج حاصل از اعتبارسنجی کارایی الگوهای مختلف برای شبیه‌سازی غلظت املاح نشان می‌دهد که الگویی که در آن غلظت TDS، تابعی از تراز آب زیرزمینی است، کارآمدترین الگو در مقایسه با سایر الگوها می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از اعتبارسنجی عملکرد مدل

بیشترین کاهش سطح زیر کشت مربوط به محصول برنج است که در مقایسه با سایر محصولات، نیاز آبی بالایی دارد و سطح زیرکشت آن در حدود ۳۰ درصد کاهش یافته است. یکی از دلایل کاهش سطح زیرکشت محصولات زراعی تابستانه، کمبود منابع آب سطحی و محدودیت در برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی می‌باشد. همچنین نتایج بیانگر این است که بیشترین کمبود نسبی آب برای محصول برنج با درصد اطمینان‌پذیری ۱۶/۶ و کمترین کمبود نسبی آب برای محصول جو با سطح اطمینان‌پذیری ۱۰۰ درصد می‌باشد.



شکل ۸- رویه پارتوی حاصل از اجرای الگوریتم بهینه‌سازی ۳ هدفه

حجم ماهیانه آب تخصیص‌یافته به کل محصولات به تفکیک منبع آب سطحی و زیرزمینی و درصد تأمین نیاز آبی محصولات از منابع آب سطحی و زیرزمینی به ترتیب در شکل (۹) و شکل (۱۰) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که طی فصول بهار تا اوایل پائیز با توجه به موجودیت کم منابع آب سطحی و تمرکز بر استفاده بیشتر از منابع آب زیرزمینی، میزان آب زیرزمینی استخراج‌شده بیشتر از میزان آب سطحی اختصاص‌یافته به محصولات می‌باشد. به طوری که از کل حجم بهینه آب اختصاص‌یافته به محصولات در طی این فصول، به طور متوسط ۸۴٪ از منبع آب زیرزمینی و حدود ۱۶٪ از منبع آب سطحی تأمین شده است. همچنین در طی فصول پائیز تا زمستان، به دلیل دسترسی بیشتر به منابع آب سطحی، به طور متوسط ۷۱٪ از نیاز آبی محصولات از منبع آب سطحی و حدود ۲۹٪ از منبع آب زیرزمینی تأمین شده است.

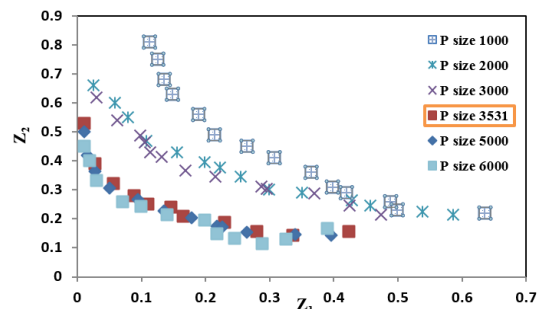


شکل ۹- مقادیر بهینه آب سطحی و زیرزمینی تخصیص‌یافته و نیاز ناخالص آبی

جستجو، γ حد اطمینان برای نگهداری c پیک برای حداقل G تولید می‌باشد.

برای بررسی کارایی معادله Mahfoud در انتخاب اندازه جمعیت، آزمونی با استفاده از حل الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه و مقایسه همگرایی دو تابع هدف اول، اجرا گردید. با فرض تعداد تولید نسل برابر با ۲۵۰۰۰، پیک برابر با ۱۰۰، حد اطمینان برابر با ۰/۹۵ و γ برابر با ۰/۵، معادله (۳) اندازه جمعیت برابر با ۳۵۳۱ را پیشنهاد می‌دهد. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم با اندازه جمعیت مختلف که در شکل (۷) ارائه گردیده، بیانگر این است که با استفاده از اندازه جمعیت پیشنهادی Mahfoud نتایج خوبی حاصل می‌شود، البته نتایج برای اجرای الگوریتم با اندازه جمعیت بزرگتر، کمی بهتر ولی زمان اجرای مدل به طور قابل ملاحظه‌ای بزرگتر می‌شود. بنابراین پیشنهاد Mahfoud برای انتخاب اندازه جمعیت در این مطالعه استفاده می‌شود.

مقادیر بهینه تخصیص منابع آب و سطح زیرکشت محصولات بعد از تعیین پارامترهای موردنیاز مدل، الگوریتم چندهدفه ANN-GP-MOGA در محیط MATLAB اجرا می‌شود.



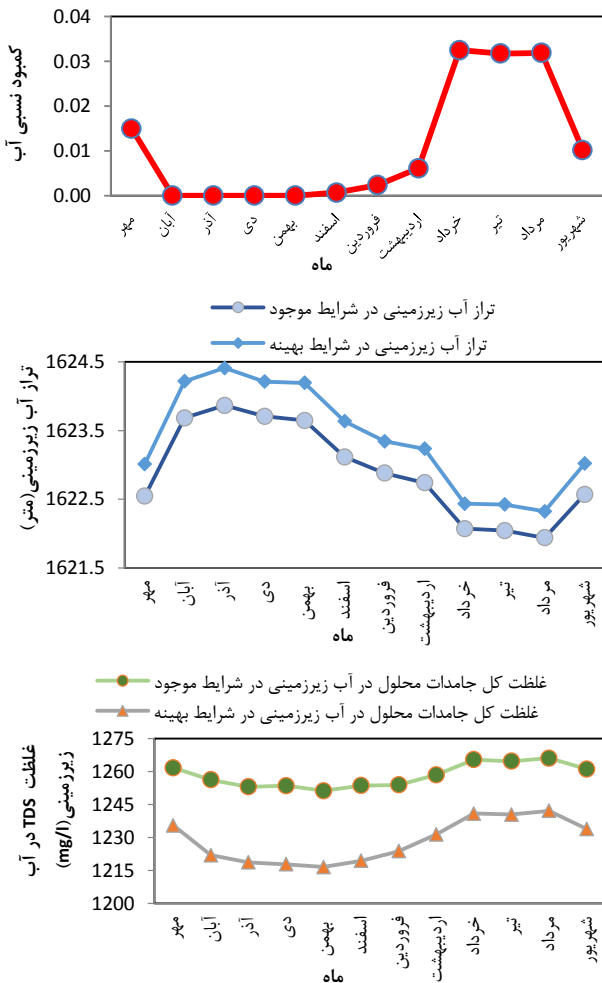
شکل ۷- اعتبارسنجی معادله Mahfoud در تعیین اندازه جمعیت NSGA-II

شکل (۸) جبهه پارتوی سطح ۱ که دربرگیرنده بهینه-ترین راه‌حل‌های نامغلوب در طول اجرای الگوریتم می‌باشد را نشان می‌دهد. این منحنی با استفاده از تعداد نسل برابر با ۳۰۰۰۰ و جمعیت برابر با ۳۵۶۷ با حل همزمان ۳ تابع هدف حاصل می‌شود. هر حل بهینه با استفاده از یک دایره نشان داده شده است.

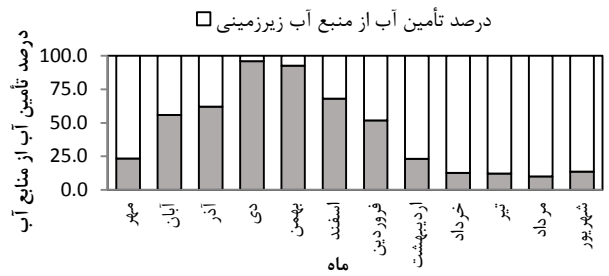
نتایج حاصل از اجرای الگوریتم به ازای یکی از حل‌های نامغلوب در جبهه پارتوی سطح ۱ (نقطه ۵) نشان می‌دهد که سطح زیر کشت بهینه برای محصولات زراعی تابستانه شامل برنج، چغندر قند و سیب‌زمینی، محصولات زراعی سالانه شامل یونجه و محصولات باغی نسبت به حالت موجود کاهش یافته است در حالی که سطح زیر کشت محصولات گندم، جو و پیاز نسبت به الگوی کشت موجود تا حدودی افزایش یافته است.

منطقه، غلظت املاح در آب زیرزمینی، در سراسر آبخوان نسبت به شرایط موجود کاهش قابل توجهی داشته است. تأثیر به-کارگیری الگوی بهینه بر بهبود کیفیت آبخوان در مرکز و جنوب شرق آبخوان نسبت به سایر مناطق محسوس تر است. به طوری که در صورت اعمال الگوی بهینه حاصل از حل نامغلوب (نقطه ۵)، غلظت TDS در مناطق منطبق بر نواحی کشاورزی تقریباً به اندازه ۳۶ میلی گرم بر لیتر نسبت به وضع موجود کاهش می یابد که با تداوم این الگو بر اساس روش پیشنهادی، انتظار بهبود شرایط کیفیت آبخوان می رود.

بررسی تغییرات ماهیانه مقادیر کمبود نسبی آب، تراز آب زیرزمینی و غلظت TDS در آب زیرزمینی (شکل ۱۲) بیانگر این است که بیشترین کمبود آب، در اواخر فصل بهار تا اوایل فصل پاییز رخ می دهد و در ماه های آبان تا بهمن ماه، هیچ کمبودی در تأمین نیاز آبی محصولات وجود ندارد. هم چنین کمترین تغییرات تراز آب زیرزمینی و تغییرات غلظت TDS در شرایط بهینه نسبت به وضعیت موجود مربوط به ماه های خرداد، تیر و مرداد می باشد.

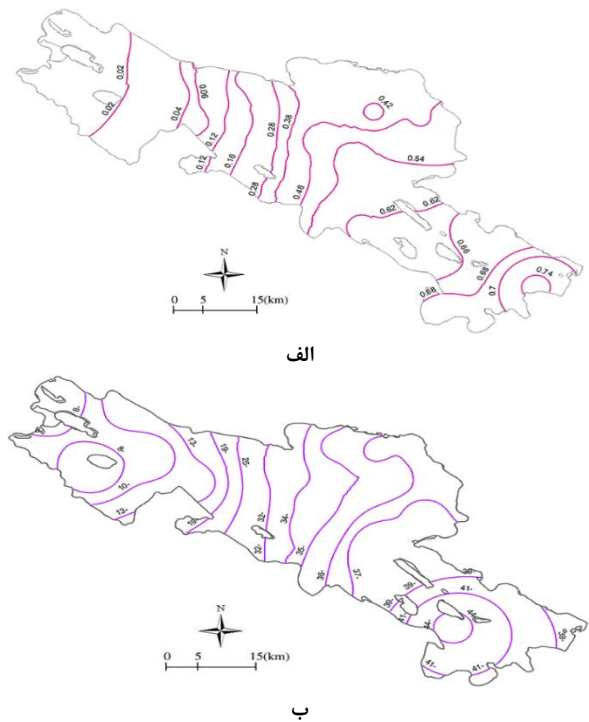


شکل ۱۲- سری زمانی کمبود آب، تراز آب زیرزمینی و غلظت TDS در شرایط موجود و بهینه



شکل ۱۰- درصد تأمین نیاز آبی محصولات از منابع آب سطحی و زیرزمینی در الگوریتم بهینه سازی

نقشه تغییرات تراز آب زیرزمینی و غلظت املاح در آبخوان نجف آباد، بعد از اعمال الگوی بهینه کشت و تخصیص از منابع آب نسبت به شرایط موجود در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- الف) تغییرات تراز آب زیرزمینی و ب) تغییرات غلظت TDS در شرایط بهینه نسبت به وضع موجود

همان طور که در شکل (۱۱-الف) نشان داده شده است در نتیجه اعمال الگوی بهینه در منطقه، تراز آب زیرزمینی در سراسر آبخوان نسبت به شرایط موجود افزایش می یابد. همچنین تأثیر کاربرد الگوی بهینه بر بهبود وضعیت آبخوان در نواحی مرکزی و جنوب شرق محدوده به خاطر وجود مناطق غالب کشاورزی، نسبت به سایر مناطق محسوس تر است. به طوری که در صورت به کارگیری الگوی حاصل از حل نامغلوب نقطه ۵، تراز آب زیرزمینی در مناطق منطبق بر نواحی کشاورزی تقریباً به اندازه ۷۷٪ نسبت به وضع موجود بهبود می یابد. همچنین شکل (۱۱-ب) حاکی از آن است که در نتیجه اعمال الگوی بهینه در

مدل‌های جایگزین ANN و GP برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و غلظت TDS به ترتیب، اعتبارسنجی گردید و نتایج، بیانگر کارایی نسبتاً خوب متامدل‌های توسعه‌یافته برای شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی و غلظت TDS در منطقه تحقیق می‌باشد. در گام بعدی متامدل‌های آموزش‌یافته، برای استنتاج استراتژی‌های بهینه مدیریتی در ساختار یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II قرار می‌گیرند.

با توجه به نتایج نهایی الگوریتم بهینه‌سازی، مقدار متوسط افت تراز آب زیرزمینی در شرایط بهینه، برابر با ۰/۱۸ متر می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار افت گزارش‌شده از دفتر مطالعات پایه منابع آب استان اصفهان در سال مورد مطالعه برابر با ۰/۶۵ متر است، بنابراین افت تراز آب زیرزمینی بر اساس الگوی بهینه ارائه‌شده، تقریباً به یک‌سوم حالت موجود رسیده و متوسط تراز آب از مقدار ۱۶۲۲/۸ متر به مقدار ۱۶۲۳/۵ متر افزایش یافته است. همچنین بر اساس الگوی حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی در نقطه بهینه انتخابی، متوسط ماهیانه TDS در منطقه برابر با ۱۲۲۹ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که در مقایسه با شرایط موجود تقریباً به میزان ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی با تأکید بر کمیت و کیفیت منابع آب، به منظور تخصیص بهینه منابع آب و زمین به محصولات غالب در واحد هیدرولوژیکی نجف‌آباد صورت گرفت. در گام شبیه‌سازی، مدل MODFLOW برای شبیه‌سازی جریان در شرایط ماندگار و غیرماندگار به کار رفته و ضریب هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار و ضریب ذخیره آبخوان در شرایط غیرماندگار واسنجی گردید. برای شبیه‌سازی انتقال آلاینده در شرایط غیرماندگار از مدل سه‌بعدی MT3DMS استفاده شد. از آنجایی که برای شبیه‌سازی کیفیت سیستم‌های هیدروژئولوژیکی با استفاده از مدل‌های عددی توسعه‌یافته به مقادیر پارامتر ضریب پخشیدگی نیاز است، به همین دلیل این ضریب به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر برای حل معادلات حاکم بر حرکت آلاینده واسنجی و اعتبارسنجی گردید. بررسی پارامترهای آماری خطا و ضریب هم‌بستگی نشان‌دهنده آن است که مدل‌های شبیه‌سازی جریان و انتقال آلاینده، عملکرد واقعی و رفتار سیستم رودخانه-آبخوان را به خوبی شبیه‌سازی کرده‌اند.

گام دوم این تحقیق، گام بهینه‌سازی بوده که بر اساس رویکرد مدل‌سازی SO استوار است. در این مرحله، ابتدا کارایی

REFERENCES

- Delavar, M. (2005). Assessment and modeling of Urmia lake level fluctuation and risk analysis of coastal areas. Master's thesis, Tarbiat Modares University, Tehran.
- Alimohammadi, S. And Hosseinzadeh, H. (2010). Optimization of conjunctive operation of surface and groundwater resources of Abhar river basin. *Journal of Water and Wastewater*, 20 (3), 75-87.
- Ghodrati, M. And Sabany, A. (2012). *Mathematical models of groundwater*. Tehran, Simaye Danesh Publication.
- Karamouz, M., Mohamreza Pourtabari, M. And Kerachian, R. (2004). Conjunctive use of surface and groundwater resources in southern of Tehran: Application of genetic algorithms and artificial neural network models. *Annual conference of Iran Water Resources Management*.
- Kanooni, A. (2013). Development of integrated model of optimal water allocation and distribution in irrigation networks. Ph. D. dissertation, Tarbiat Modares University, Tehran.
- Mohamreza Pourtabari, M., Maknoon, R. And Ebadi, T. (2009). Multi-objective optimization model for conjunctive use management using NSGA-II and SGAs algorithms. *Journal of Water and Wastewater*, 20 (1), 2-12.
- Ab and Tosee Paydar Consulting Engineering Co. (2010). Updating Studies on water resources and demand balance of Zayandehrood basin.
- Nagheli, S, Samani, N. and Pasandi, M. (2011). Assessment of balances and sustainable development of the Najaf Abad aquifer. *30th meeting of earth sciences*.
- Bhattacharjya, R.K., and Datta, B. (2005). Optimal management of coastal aquifer using linked simulation optimization approach. *Water Resources Management*, 19(3), 295-320.
- Bhattacharjya, R.K., and Datta, B. (2009). ANN-GA-based model for multiple objective management of coastal aquifers. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, 135(5), 314-322.
- Cheng, F.Y., and Li, D. (1998). Genetic algorithm development for multiobjective optimization of structures. *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. J*, 36(6):1105-1112.
- Coe, J.J. (1990). Conjunctive use-advantages, constraints and examples. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116(3), 427-443.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyerivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, 6, 182-197.

- Dhar, A. and Datta, B. (2009). Multi-objective management of saltwater intrusion in coastal aquifers using linked simulation optimization-methodology development and performance evaluation. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, 14(12), 1263-1272.
- Doherty, J. (1994). PEST: a unique computer program for model-independent parameter optimisation. *Water Down Under 94: Groundwater/Surface Hydrology Common Interest Papers; Preprints of Papers*, 551.
- Essaid, H. I. (1990). A multilayered sharp interface model of coupled freshwater and saltwater flow in coastal systems: model development and application. *American Geophysical Union*.
- Gorelick, S.M. (1983). A review of distributed parameter groundwater management modelling methods. *Water Resources Research*, 19(2), 305-319.
- Horn, J., Nafpliotis, N., and Goldberg, D.E. (1994). A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. In: Proc. 1st IEEE Conf. Evolutionary Computation, IEEE World Congr. Computational Computation, Piscataway, 1, 82-87.
- Karamouz, M., Kerachian, R., and Zahraie, B. (2004). Monthly water resources and irrigation planning: case study of conjunctive use of surface and groundwater resources. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(5), 391-402.
- Karamouz, M., Rezapour Tabari, M., and Kerachian, R. (2007). Application of genetic algorithm and artificial neural networks in conjunctive use of surface and groundwater resources. *Water International*, 32(1), 163-176.
- Mahfoud, S.W. (1995). Population size and genetic drift in fitness sharing. In Whitley, D., Vose, M.D. (Eds.), *Foundations of Genetic Algorithms 3*. Morgan Kaufmann, San Francisco, 85-224.
- Makkeasorn, A., Chang, N.B., and Zhou, X. (2008). Short-term streamflow forecasting with global climate change implications – a comparative study between genetic programming and neural network models. *Journal of Hydrology*, 352(3-4), 336-354.
- McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 6, Chapter A1, 586 p.
- Miller, S., and Labadie, J. (2003). A decision support system for optimal planning of conjunctive use progress. *American Water Resources Association*, 39(3), 517-528.
- Morel-Seytoux, H. J. (1975). A simple case of conjunctive surface-groundwater management. *Journal of Groundwater*, 13(6), 506-515.
- Morel-Seytoux, H. J., and Dally, C. J. (1975). A discrete kernel generator for stream aquifer studies. *Water Resour. Res*, 11(2), 253-260.
- Parasuraman, K., and Elshorbagy, A. (2008). Toward improving the reliability of hydrologic prediction: model structure uncertainty and its quantification using ensemble-based genetic programming framework. *Water Resources Research*, 44(12).
- Penn, R., Friedler, E. and Ostfeld, A. (2013). Multi-objective evolutionary optimization for greywater reuse in municipal sewer systems. *Water Resources*, 47(15), 5911-5920.
- Peralta, R. C., Contiller, R. A., and Terry, J. E. (1995). Optimal large-scale conjunctive water-use planning: Case study. *J. Water Res. Plan. Manag*, 121(6), 471-478.
- Peralta, R.C., and Kalwij, I. (2012). *Groundwater Optimization Handbook: Flow, Contaminant Transport, and Conjunctive Management*. International Water Association and CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 539p.
- Peralta, R.C., Forghani, A., and Fayad, H. (2014). Multiobjective genetic algorithm conjunctive use optimization for production, cost, and energy with dynamic return flow. *Journal of hydrology*, 511, 776-785.
- Rao, S.V.N., Murthy, S.B., Thandaveswara, B.S., and Mishra, G.C. (2004). Conjunctive use of surface and groundwater for Coastal and Deltic systems. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 130(3), 255-267.
- Safavi, H.R., and Esmikhani, M. (2013). Conjunctive use of surface water and groundwater: Application of support vector machines (SVMs) and genetic algorithms. *Water Res Manage*, 27, 2623-2644.
- Safavi, H.R., Darzi, F., and Marino, M.A. (2010). Simulation-optimization modeling of conjunctive use of surface water and groundwater. *Water Resources Management*, 24(10), 1965-1988.
- Shiri, J., Sadraddini, A. A., Nazemi, A. H., Kisi, O., Landaras, G., Fakheri Fard, A., and Marti, P. (2014). Generalizability of Gene Expression Programming-based approaches for estimating daily reference evapotranspiration in coastal stations of Iran. *Journal of Hydrology*, 508, 1-11.
- Sreekanth, J., and Datta, B. (2010). Multi-objective management of saltwater intrusion in coastal aquifers using genetic programming and modular neural network based surrogate models. *Journal of hydrology*, 393, 245-256.
- Srinivas, N., and Deb, K. (1995). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *J. Evol. Comput*, 2(3), 221-248.
- Triana, E., Labadie, J., Gates, T., and Anderson, C. (2010). Neural network approach to stream-aquifer modeling for improved river basin management. *Journal of Hydrology*, 391, 235-247.
- Vamvakieridou-Lyroudia, L., Walters, G. and Savic, D. (2005). Fuzzy multiobjective optimization of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(6), 467-476.
- Wagner, B. J. (1995). Recent advances in simulation-optimization groundwater management modelling. *Rev Geophys*, 33(2), 1021-1028.

- Wang, W.C., Chau, K.W., Cheng, C.T., and Qiu, L. (2009). A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series. *Journal of Hydrology*, 374(3-4), 294-306.
- Zechman, E., Mirghani, B., Mahinthakumar, G., and Ranjithan, S. (2005). A genetic programming-based surrogate model development and its application to a groundwater source identification problem. ASCE Conference Proceeding, 173, 341.
- Zheng, C. (1990). {MT3D}, A modular three-dimensional transport model.
- Zitzler, E., and Thiele, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, 3, 257-271.