

تدوین قوانین احتمالاتی برای بهره‌برداری بهینه تلفیقی کمی-کیفی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در زمان واقعی: کاربرد ماشین‌های بردار پشتیبان

محمد رضا بازرگان لاری^۱ رضا کراچیان^۲ حسین صدقی^۳
مهسا فلاح نیا^۴ ارمغان عابد علم دوست^۵ محمد رضا نیکو^۶

(دریافت ۸۸/۳/۱۱ پذیرش ۸۹/۱/۲۴)

چکیده

تعیین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی زمانی که تصمیم‌گیران و ذینفعان متفاوت با اهداف متضادی وجود دارند، مسئله‌ای پیچیده است. در این مقاله، یک روش جدید برای تدوین قوانین بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در زمان واقعی، ارائه شد. در روش پیشنهادی، برای تعیین منحنی‌های تعامل بین اهداف، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II و در رفع اختلاف بین تصمیم‌گیرندگان، از تئوری رفع اختلاف یونگ استفاده شد. همچنین برای برطرف نمودن مشکل زمان اجرای مدل بلند مدت در بهره‌برداری در زمان واقعی، استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان احتمالاتی که قابلیت ایجاد خروجی احتمالاتی و ارائه قوانین مدیریت منابع آب را دارا هستند، پیشنهاد گردید. مدل ارائه شده برای تدوین قوانین بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی تهران به کار گرفته شده است. ذینفعان در منطقه مورد مطالعه، دارای مطلوبیتهای متفاوت و بعضاً متضادی نظیر تأمین آب با کیفیت مناسب، کاهش هزینه‌های پمپاژ، بهبود کیفیت آب آبخوان و کنترل نوسانات سطح آب زیرزمینی هستند. در روش ارائه شده، مدل‌های شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی MODFLOW و پخش و انتقال آلاینده MT3D با مدل بهینه‌سازی NSGA-II تلفیق شدند تا منحنی‌های تعامل بین اهداف به دست آیند. بهترین نقطه روی منحنی تعامل به کمک مدل رفع اختلاف یونگ انتخاب شد. نتایج مدل پیشنهادی نشان دهنده اهمیت اعمال یک مدل رفع اختلاف یکپارچه و قابلیت مناسب ماشین‌های بردار پشتیبان در تدوین قوانین بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در زمان واقعی در منطقه مورد مطالعه است. نتایج نشان می‌دهند که میزان دقت قوانین تخصیص آب محاسبه شده در مرحله صحت‌سنجی بیش از ۸۰ درصد است. بر اساس این قوانین، تغییرات تجمعی تراز سطح آب زیرزمینی در آبخوان تهران در یک دوره برنامه‌ریزی ۱۵ ساله در حد ۸۰ سانتی‌متر محدود شده است.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری تلفیقی، آب زیرزمینی، NSGA-II، رفع اختلاف، ماشین‌های بردار پشتیبان (SVMS)، آبخوان تهران

Developing Probabilistic Operating Rules for Real-time Conjunctive Use of Surface and Groundwater Resources: Application of Support Vector Machines

Mohammad Reza Bazargan-Lari¹
Mahsa Fallahnia⁴

Reza Kerachian²
Armaghan Abed-Elmdoust⁵

Hossein Sedghi³
Mohammad Reza Nikoo⁶

(Received June 1, 2009 Accepted Apr. 13, 2010)

Abstract

Developing optimal operating policies for conjunctive use of surface and groundwater resources when different decision makers and stakeholders with conflicting objectives are involved is usually a challenging task. This problem would be more complex when objectives related to surface and groundwater quality are taken into account. In this paper, a new methodology is developed for real time conjunctive use of surface and groundwater resources. In the proposed methodology, a well-known multi-objective genetic algorithm, namely Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) is employed to develop a Pareto front among the objectives. The Young conflict resolution theory is also used for resolving the conflict of interests among decision makers. To develop the real time conjunctive use operating rules, the Probabilistic Support Vector Machines (PSVMs),

1. Graduated Ph.D. Student, Dept. of Water Sciences and Eng., Sciences and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran (Corresponding Author) (+98 21) 33594950 bazargan.lari@yahoo.com
2. Assoc. Prof., Center of Excellence for Eng. and Management of Infrastructures, Dept. of Civil Eng., University of Tehran
3. Prof., Dept. of Water Sciences and Eng., Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
4. Ph.D. Student, Dept. of Architectural Eng., Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
5. Ph.D. Student of Water Civil Eng., Dept. of Civil Eng., University of Tehran
6. Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng., University of Tehran

- ۱- دانش‌آموخته دکترا، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران (نویسنده مسئول) ۳۳۵۹۴۹۵۰ (۰۲۱) bazargan.lari@yahoo.com
- ۲- دانشیار قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
- ۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران
- ۴- دانشجوی دکترا، مهندسی معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران
- ۵- دانشجوی دکترا، مهندسی عمران-آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
- ۶- کاندیدای دریافت دکترا، مهندسی عمران-آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

which are capable of providing probability distribution functions of decision variables, are utilized. The proposed methodology is applied to Tehran Aquifer in Tehran metropolitan area, Iran. Stakeholders in the study area have some conflicting interests including supplying water with acceptable quality, reducing pumping costs, improving groundwater quality and controlling the groundwater table fluctuations. In the proposed methodology, MODFLOW and MT3D groundwater quantity and quality simulation models are linked with NSGA-II optimization model to develop Pareto fronts among the objectives. The best solutions on the Pareto fronts are then selected using the Young conflict resolution theory. The selected solution (optimal monthly operating policies) is used to train and verify a PSVM. The results show the significance of applying an integrated conflict resolution approach and the capability of support vector machines for the real time conjunctive use of surface and groundwater resources in the study area. It is also shown that the validation accuracy of the proposed operating rules is higher than 80% and based on these rules, the cumulative groundwater table variation is limited to 80 centimetres during a 15-year planning horizon.

Keywords: Conjunctive Use, Groundwater, NSGA-II, Conflict Resolution, Support Vector Machines, Tehran Aquifer.

۱- مقدمه

در ایران بهره‌برداری تلفیقی کمی-کیفی بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی، کمتر مورد توجه محققان و تصمیم‌گیران بخش آب قرار گرفته است. از دلایل محدود بودن این مطالعات، در کنار تعدد ذینفعان و تصمیم‌گیرندگان با مطلوبیتهای متفاوت و معمولاً متضاد، به مشکلات محاسباتی قابل توجه ناشی از زمان اجرای مدل‌های شبیه‌سازی کمی و کیفی آب و همچنین تعدد متغیرهای تصمیم در این نوع از مسائل می‌توان اشاره کرد. گرچه امروزه با پیشرفت سریع ابزارهای محاسباتی و به تبع آن ظهور مدل‌های نوین بهینه‌سازی و شبیه‌سازی، کاربرد نگرشهای سیستمی در برنامه‌ریزی و مدیریت کمی و کیفی سیستم‌های منابع آب گسترش یافته و این امکان فراهم شده است که سیستم‌های پیچیده از طریق شناخت اجزا و تحلیل ارتباطات بین آنها به صورت دقیق‌تری مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند، اما هنوز در سیستم‌های پیچیده به دلیل زمان‌بر بودن دو فرایند شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، استفاده از هوش مصنوعی برای برنامه‌ریزی به‌هنگام در زمان واقعی اجتناب‌ناپذیر است.

مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی به بهره‌برداری هماهنگ و بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی اطلاق می‌گردد که در جهت رفع نیازهای آبی و مدیریت کیفی سیستم برای دستیابی به توسعه پایدار به‌کار گرفته می‌شود. در چند دهه گذشته در زمینه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب، مدل‌های مختلفی توسعه داده شده‌اند. امک^۱ و یه^۲ در سال ۱۹۹۸ یک مدل چندهدفه را برای مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی در نواحی ساحلی توسعه دادند. ایشان، کاهش هزینه‌های تخصیص آب سطحی و زیرزمینی و جلوگیری از نفوذ آب شور را به‌عنوان اهداف این مدل در نظر گرفتند [۱]. ازاییز^۳ در سال ۲۰۰۲ یک مدل بهره‌برداری تلفیقی از آبهای سطحی و زیرزمینی را با توجه به پارامترهای

اقتصادی توسعه داد. وی در این تحقیق یک مدل تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای برای استفاده تلفیقی از آبهای سطحی و زیرزمینی با در نظر گرفتن تغذیه مصنوعی ارائه نمود. مدل پیشنهادی روی یک آبخوان فرضی اعمال گردید و سیاست‌های بهره‌برداری بهینه و حساسیت آنها به ضرایب و پارامترهای موجود در مدل، مورد بررسی قرار گرفت [۲]. کارآموز و همکاران در سال ۲۰۰۴ مدلی برای استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی جنوب تهران ارائه نمودند. هدف از این مدل، تدوین سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت‌های تهران و فشافویه در گام زمانی ماهانه بوده است. در این مدل اهداف مربوط به کیفیت آب در نظر گرفته نشده‌اند [۳]. همچنین، کارآموز و همکاران در سال ۲۰۰۷ یک روش بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی بر اساس ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی برای تأمین آب مورد تقاضای کشاورزان، کاهش هزینه پمپاژ و کنترل نوسانات سطح آب ارائه کردند [۴].

طبری و همکاران در سال ۱۳۸۸ مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ای برای مدیریت بهره‌برداری تلفیقی ارائه نمودند و به ارزیابی الگوریتم‌های NSGA-II و SGAs پرداختند [۵]. نتایج این تحقیق نشان دهنده سرعت بالای الگوریتم NSGA-II در ارائه مقادیر بهینه تخصیص بود. در تحقیق حاضر نیز از این الگوریتم استفاده شد. همچنین پورطبری و همکاران در سال ۱۳۸۸ مدیریت بهره‌برداری تلفیقی تحت شرایط عدم دقت در پارامترهای آبخوان را به کمک منطق فازی مورد بررسی قرار دادند. آنها کارایی مدل خود را با استفاده از اطلاعات دشت کرج ارزیابی نمودند [۶].

بازرگان‌لاری و همکاران در سال ۲۰۰۹ و همچنین کراچیان و همکاران در سال ۲۰۱۰ یک مدل رفع اختلاف برای بهره‌برداری کمی و کیفی از آبهای زیرزمینی پیشنهاد دادند. ایشان سیاست‌های بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی جنوب تهران را برای یک دوره برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت یکساله تدوین نمودند. در

¹ Emch

² Yeh

³ Azaeiz

تحقیقات مذکور قوانین بهره‌برداری در زمان واقعی تدوین نشده است [۷ و ۸].

در مقاله حاضر، روش پیشنهادی توسط بازرگان لاری و همکاران، برای تدوین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری تلفیقی بلندمدت با استفاده از قابلیت‌های ماشین‌های بردار پشتیبان بسط داده شد.

یک شیوه نسبتاً جدید برای تشخیص الگو (کلاس‌بندی)، استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان^۱ است، که برای نخستین بار توسط وپنیک^۲ در سال ۱۹۹۵ ارائه شدند [۹]. ماشین‌های بردار پشتیبان که مشابه دیگر روشهای مرسوم در هوش مصنوعی نیازمند آموزش هستند، ابزاری قوی در حوزه شناسایی الگو و رگرسیون به‌شمار می‌روند و در چند سال گذشته برای شناسایی اعداد دست‌نویس منفصل، شناسایی اشیاء، شناسایی و تشخیص هویت گوینده، کشف چهره‌ها در تصویر و شبیه‌سازی مشخصات کمی و کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی به‌کار رفته‌اند. بیون^۳ و لی^۴ در سال ۲۰۰۲ نشان دادند که ماشین‌های بردار پشتیبان، دقت زیادی در تشخیص الگو و کلاس‌بندی اطلاعات در شاخه‌های مختلف علوم دارند. ایشان کاربردهای SVMs در زمینه‌های بازیابی، تأیید و تشخیص چهره، بازیابی و تشخیص شی، تشخیص دست خط و اثر انگشت، تشخیص و طبقه‌بندی متن، تشخیص گفتگو و صدا را نشان دادند [۱۰].

تمکو^۵ و نادئو^۶ در سال ۲۰۰۶ به بررسی کلاس‌بندی ۱۶ نوع صدا شامل گفتگو و موسیقی در فضای داخل اتاق (مثل اتاق درس) پرداختند. ایشان چندین مجموعه از مشخصات صوتی را تعریف کرده و در آزمایش‌های کلاس‌بندی به کار گرفتند. آن‌ها نتایج کلاس‌بندی SVM را با خوشه‌بندی مدل مخلوط گوسی^۷ که در تشخیص صدا و گفتگو کاملاً رایج است، مقایسه کردند و نشان دادند که کلاس‌بندی SVM در مقایسه با خوشه‌بندی GMM از کارایی بهتری برخوردار است و در صورت داشتن اطلاعات آموزشی با تعداد کم، دقت کلاس‌بندی خوبی خواهد داشت [۱۱].

خلیلی و همکاران در سال ۲۰۰۵ چهار تکنیک شبکه‌های عصبی مصنوعی^۸، ماشین‌های بردار پشتیبان، روش رگرسیون وزن‌دار^۹ و ماشین‌های بردار ارتباطی^{۱۰} را برای پیش‌بینی میزان

نفوذ آلودگی سطحی به آب زیرزمینی به‌کار بردند. ایشان نشان دادند این مدل‌های هوشمند می‌توانند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای مدل‌های ریاضی نسبتاً پیچیده و زمان‌بر قبلی برای شبیه‌سازی غلظت نترات در آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرند. در این مطالعه از SVM با کرنل RBF^{۱۱} استفاده شده است و پارامترهای بهینه این کرنل توسط اعتبارسنجی پنج‌دسته‌ای^{۱۲} و ده‌دسته‌ای به‌دست آمده‌اند [۱۲]. آسفا و همکاران^{۱۳} نیز در سال ۲۰۰۵ از ماشین‌های بردار پشتیبان برای پیش‌بینی دبی جریان استفاده نمودند که نتایج مطلوب به‌دست آمده نشان از توانایی این تکنیک دارد [۱۳].

در مقاله حاضر، برای افزایش قابلیت نتایج، مدل یکساله پیشنهاد شده توسط بازرگان لاری و همکاران در سال ۲۰۰۹، به یک مدل بلندمدت بسط داده شد و برای نخستین بار، قوانین بهره‌برداری احتمالاتی تلفیقی کمی-کیفی از آبخوان توسط ماشین‌های بردار پشتیبان احتمالاتی تدوین شدند. کارایی مدل با استفاده از اطلاعات کمی و کیفی آبخوان تهران ارزیابی شد. اگرچه مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و شبکه‌های بی‌زی نیز می‌توانند خروجی احتمالاتی داشته باشند، ولی هدف از این مقاله ارزیابی کارایی ماشین‌های بردار پشتیبان احتمالاتی در تدوین قوانین بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی بود که برای نخستین بار انجام گرفت.

۲- ساختار کلی مدل پیشنهادی

شکل ۱ ساختار مدل پیشنهادی برای مدیریت بهره‌برداری کمی-کیفی تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی ساختار متدولوژی پیشنهادی را می‌توان در سه بخش بررسی نمود:

بخش اول شامل تدوین مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بهره‌برداری کمی و کیفی تلفیقی از آبخوان و آبهای سطحی است؛ بخش دوم به شناسایی بخش‌های تصمیم‌گیرنده و تأثیرپذیر، تشخیص اختلاف‌های موجود و ارائه یک مدل رفع اختلاف اختصاص دارد؛ در بخش سوم با تلفیق دو بخش قبل، سیاست‌های بهینه بهره‌برداری کمی و کیفی تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی ارائه می‌شوند. سپس قوانین بهره‌برداری کمی-کیفی، توسط ماشین‌های بردار پشتیبان تدوین می‌شوند. در ادامه، هر یک از اجزا متدولوژی پیشنهادی، با جزئیات بیشتری تشریح می‌شوند.

¹ Support Vector Machines (SVMs)

² Vapnik

³ Byun

⁴ Lee

⁵ Temko

⁶ Nadeu

⁷ Gaussian Mixture Model (GMM)

⁸ Artificial Neural Networks (ANNs)

⁹ Locally Weighted Projection Regression (LWPR)

¹⁰ Relevance Vector Machines (LVMs)

¹¹ Radial Basis Function

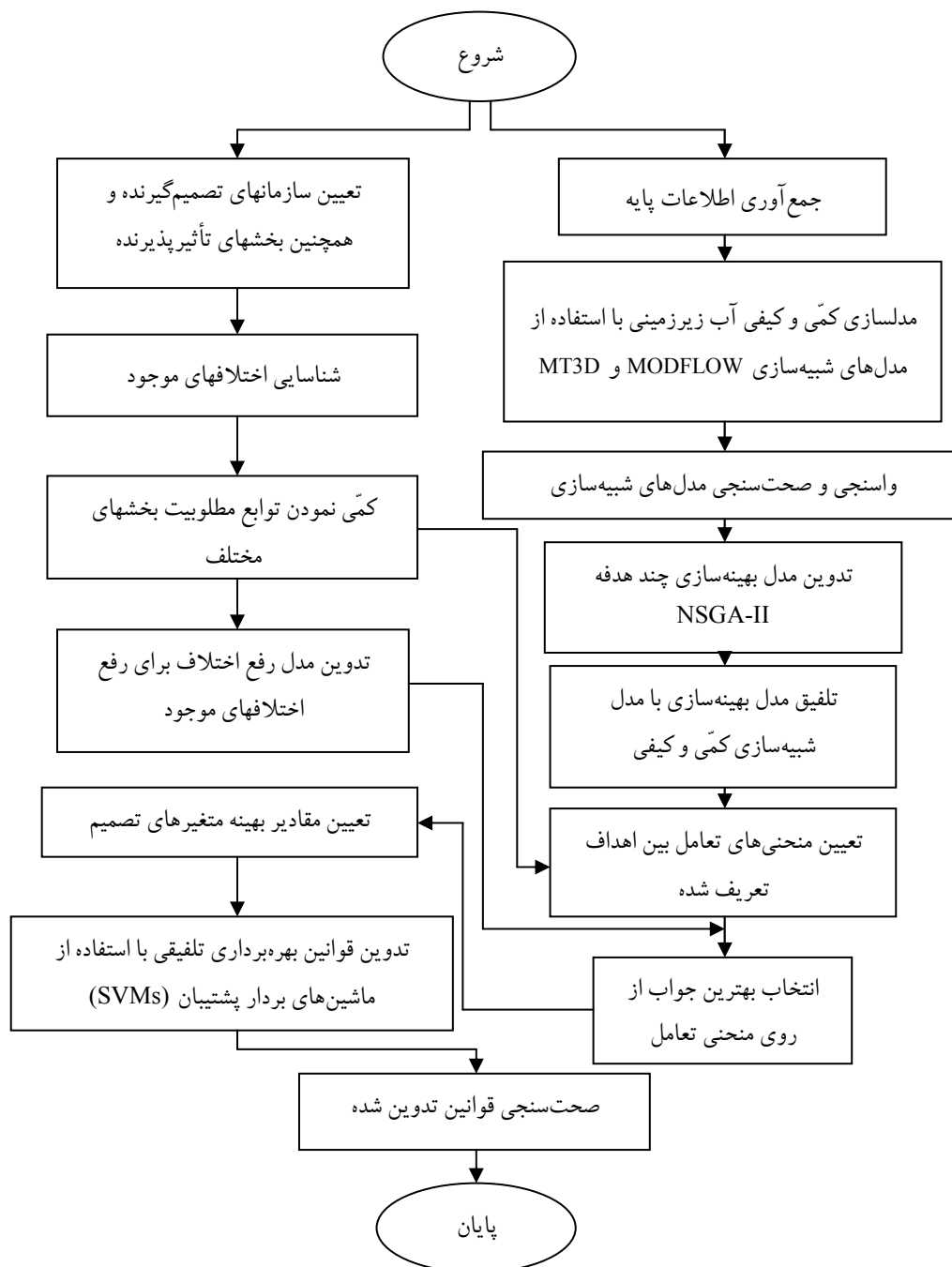
¹² Five-Fold Cross Validation

¹³ Asefā et al.

۱-۲- مدل‌های شبیه‌سازی

شبیه‌سازی سفره‌های آب زیرزمینی شامل استفاده از روابط و پارامترهای فیزیکی و کیفی آبخوان است به طوری که به ازای مقادیر مختلف ورودی و خروجی سیستم، تراز و کیفیت آب در نقاط و بازه‌های زمانی مختلف مشخص شود. استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز MODFLOW و MT3D در مدل‌سازی جریان و پخش آلودگی بسیار مرسوم است که از آن جمله می‌توان به کار تحقیقاتی صفوی و

همکاران در سال ۱۳۸۶ اشاره کرد [۱۴]. از این رو، در این مقاله از مدل‌های MODFLOW و MT3D برای شبیه‌سازی آبخوان تهران در محدوده طرح استفاده شد. MODFLOW یک مدل شبیه‌سازی سه بعدی بر پایه روش تفاضل محدود است و مدل MT3D نیز معادلات پخش، انتقال، جذب و زوال آلاینده‌ها در آب زیرزمینی را به روش تفاضل محدود حل می‌نماید. لازم است که فایل‌های اجرایی دو مدل شبیه‌سازی فوق با مدل بهینه‌سازی تلفیق شوند به



شکل ۱- ساختار متدولوژی پیشنهادی برای تدوین قوانین بهره‌برداری کمی-کیفی تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در زمان واقعی

یک ابرصفحه جداساز خطی بهینه با حداکثر حاشیه را جستجو می‌کنند.

در حالت کلی، SVM برای خوشه‌بندی دو کلاسی طراحی شده است. در این حالت چنانچه l بردار آموزشی وجود داشته باشد، هر مشاهده به صورت یک دو تایی (x_i, y_i) که در آن $x_i \in \mathbb{R}^n, i=1,2,\dots,l$ و $y_i \in \{-1,1\}$ است، نشان داده می‌شود. به عبارتی برای هر ورودی یک خروجی (برچسب) برابر با ۱ یا -۱ وجود دارد. در کلاس‌بندی به وسیله ماشین‌های بردار پشتیبان، مسئله اولیه زیر حل می‌شود [۱۶ و ۱۷]

$$\text{Min } \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^l \xi_i \quad (1)$$

با توجه به محدودیت

$$y_i (w^T \phi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i \quad (2)$$

$$\xi_i \geq 0, i = 1, \dots, l$$

که مسئله دوگان آن برابر است با

$$\text{Min } \frac{1}{2} \alpha^T Q \alpha - e^T \alpha \quad (3)$$

$$0 \leq \alpha_i \leq C, i = 1, \dots, l \quad (4)$$

با توجه به محدودیت

$$y^T \alpha = 0 \quad (5)$$

که در این روابط

e برداری (ماتریسی) است که همه درایه‌های آن برابر ۱ هستند، $w \in \mathbb{R}^n$ ، ξ_i و α_i به ترتیب متغیرهای غیرمنفی کمبود^۴ و ضریب لاگرانژ و C حد بالای α_i و بزرگ‌تر از صفر است. Q یک ماتریس یک در یک مثبت نیمه‌معین است، به طوری که $K(x_i, x_j) \equiv \phi(x_i)^T \phi(x_j)$ و $Q_{ij} \equiv y_i y_j K(x_i, x_j)$ کرنل می‌باشد. در اینجا بردارهای آموزشی x_i ، توسط تابع ϕ به یک فضای داده با ابعاد بیشتر تصویر می‌شوند. در حالت کلی SVM برای کلاس‌بندی دو کلاسی طراحی شده است، اما می‌توان آن را برای حل مسائل چندکلاسی نیز تعمیم داد. برای این کار شیوه‌های مختلفی وجود دارد. در این مقاله، از شیوه یکی در برابر یکی^۵ استفاده شد. این شیوه در یک مجموعه k کلاسی، برای هر نمونه آموزشی تعداد $k(k-1)/2$ SVM دو کلاسی تشکیل می‌دهد که مقادیر آنها، مقادیر تصمیم نامیده می‌شود. در واقع هر یک از این مقادیر تصمیم، رأی آن SVM برای پیش‌بینی کلاس آن نمونه

گونه‌ای که دو مدل بالا، به صورت خودکار در داخل حلقه‌های بهینه‌سازی، اجرا شده و نتایج در مدل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. به این ترتیب، در مقایسه با مدل‌های تقریبی که شبیه‌سازی پی در پی در بدنه مدل بهینه‌سازی را با شبکه‌های عصبی مصنوعی جایگزین می‌کنند، دقت نتایج به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۲-۲- مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II

روشهای بهینه‌سازی چندهدفه کلاسیک در حل مسائل پیچیده دارای نقص‌های عمده‌ای مانند هزینه محاسباتی قابل توجه هستند. در مقابل، الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه مانند الگوریتم ژنتیک چند هدفه از قابلیت‌های ویژه‌ای در حل مسائلی با مقدار متغیرهای تصمیم زیاد، دارای فضای جواب گسسته و ساختار غیرخطی برخوردارند. دب و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۰، مدل الگوریتم ژنتیک چند هدفه NSGA-II را برای فائق آمدن بر ضعفهای مدل‌های چندهدفه قبلی مانند مشکلات مربوط به هزینه محاسباتی، پیشنهاد نمودند [۱۵]. الگوریتم چند هدفه NSGA-II بر اساس طبقه‌بندی غیرپست با پیچیدگی محاسباتی از درجه mN^2 کار می‌کند. عملگر انتخاب در این الگوریتم، یک ظرف آمیزش را از ترکیب جمعیت‌های والد و فرزند به وجود می‌آورد. برای جلوگیری از تمرکز جوابها، معیار فاصله شلوغی نیز در این الگوریتم به کار گرفته می‌شود تا بهترین جواب‌ها با توجه به برآزش، گسترش و پراکندگی جواب‌ها انتخاب گردد. بنابراین اصل نخبه‌گرایی کاملاً رعایت می‌شود. در مقاله حاضر با استفاده از روش بالا، منحنی تعامل بین اهداف به دست آمد.

۲-۳- کلاس‌بندی ماشین‌های بردار پشتیبان

ماشین‌های بردار پشتیبان، یک شیوه نسبتاً جدید و قدرتمند برای خوشه‌بندی (کلاس‌بندی) و تشخیص الگو هستند. در ساده‌ترین حالت ممکن کلاس‌بندی، ماشین‌های بردار پشتیبان یک ابرصفحه جداساز خطی با حداکثر حاشیه^۲ را جستجو می‌کنند. در مواردی که کلاس‌های داده شده اطلاعات، در فضای ورودی اولیه به شکل خطی جداپذیر نیستند، در ابتدا ماشین‌های بردار پشتیبان فضای ورودی اولیه را به فضای مشخصه با ابعاد بالاتر تبدیل می‌کنند. این تبدیل می‌تواند توسط توابع تصویرکننده (توابع کرنل^۳) مختلف غیرخطی مانند توابع RBF انجام شود. پس از مرحله تبدیل غیرخطی، ماشین‌های بردار پشتیبان در این فضای مشخصه جدید،

¹ Deb et al.

² Maximum Margin

³ Kernel Function

⁴ Slack Variables

⁵ One-Against-One

آموزشی است. سپس یک روش تصمیم‌گیری براساس رأی‌گیری برای پیدا کردن k کلاس استفاده می‌شود. در یک SVM باینری که کلاس نام را از کلاس نام تفکیک می‌کند، اگر مقدار تصمیم این SVM باینری بیانگر مشاهده x در کلاس نام باشد، آنگاه به آرای تعلق به کلاس نام، یکی اضافه می‌گردد در غیر این صورت یکی به آرای تعلق به کلاس نام، اضافه می‌شود. در نهایت این‌گونه پیش‌بینی می‌شود که مشاهده x در کلاسی واقع است که بیشترین آرای تعلق به آن کلاس را دارد. این شیوه مبتنی بر رأی‌گیری، روش بیشترین برنده‌ها^۱ نامیده می‌شود.

وو و همکاران^۲ در سال ۲۰۰۴، ماشین‌های بردار پشتیبان احتمالاتی را پیشنهاد دادند. آنها نشان دادند که اگر k کلاس از اطلاعات موجود باشد آنگاه برای هر بردار مشاهداتی x ، می‌توان احتمال تعلق داده‌ها به هر کلاس را محاسبه نمود [۱۸]

$$p_i = p(y = i | x), i = 1, \dots, k \quad (6)$$

در این روش، با به‌کارگیری شیوه یکی در برابر یکی در کلاس‌بندی چندکلاسی، ابتدا احتمالات کلاسی دوبه‌دو به‌شکل زیر تخمین زده می‌شوند

$$r_{ij} \approx p(y = i | y = i \text{ or } j, x) \quad (7)$$

لین و همکاران^۳ در سال ۲۰۰۳، احتمال بالا را به‌صورت زیر تخمین زدند [۱۹]

$$r_{ij} \approx \frac{1}{1 + e^{A\hat{f} + B}} \quad (8)$$

که در آن A و B به‌وسیله کمینه کردن تابع منفی لگاریتمی احتمال^۴، با به‌کارگیری اطلاعات آموزشی معلوم و مقادیر تصمیم (\hat{f}) آنها، تخمین زده می‌شوند. سپس برای به‌دست آوردن p_i از همه r_{ij} های محاسبه شده، از مسئله بهینه‌سازی زیر استفاده می‌شود

$$\text{Min} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j \neq i} (r_{ji} p_i - r_{ij} p_j)^2 \quad (9)$$

با توجه به محدودیت

$$\sum_{i=1}^k p_i = 1, p_i \geq 0, \forall i. \quad (10)$$

نکته قابل ذکر این است که روشهای کلاسیک یادگیری، برای حداقل کردن خطا بر روی مجموعه داده‌های آموزش^۵

(حداقل‌سازی خطای تجربی) طراحی شده‌اند. متداول‌ترین نمونه از این روشها، شبکه‌های عصبی مصنوعی هستند. برخلاف این روشها، ماشین‌های بردار پشتیبان مبتنی بر حداقل‌کردن خطای ساختاری هستند. به‌عبارت ساده‌تر ساختار سیستم مانند شبکه‌های عصبی از ابتدا مشخص نیست و در طول فرایند آموزش علاوه بر حداقل‌سازی خطای تجربی، خطای ساختاری نیز حداقل شده و بهینه‌ترین ساختار سیستم نیز تعیین می‌گردد. این ماشین‌ها دارای قدرت بالاتری نسبت به بقیه روشهای یادگیری برای داده‌های غیر آموزشی (داده‌های آزمایش)^۶ می‌باشند. در مدل‌های کلاسیک مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، ساختار شبکه قبل از آموزش مشخص است و عملاً بهینه نمی‌شود ولی در مدل‌های SVM ساختار شبکه نیز به‌همراه وزن‌ها، بهینه‌سازی می‌شود. علاوه بر آن SVMs می‌توانند خروجی‌های احتمالاتی نیز داشته باشند. جزئیات بیشتر در مورد ماشین‌های بردار پشتیبان قطعی و احتمالاتی در مراجع موجود است [۲۰].

۲-۴- تلفیق مدل بهینه‌سازی با مدل‌های شبیه‌سازی

ساختار مدل‌های بهینه‌سازی به گونه‌ای است که مدل شبیه‌سازی لازم است بارها در بدنه این مدل بر اساس سناریوهای مختلفی که توسط مدل بهینه‌سازی تولید می‌گردند، به‌طور خودکار اجرا شود. از این‌رو، در مدل پیشنهادی، نیاز به تهیه برنامه‌ای برای ایجاد شرایطی است که به‌طور خودکار ورودی مدل شبیه‌سازی، براساس سناریوی تعیین شده در بدنه مدل بهینه‌سازی تشکیل شود و پس از اجرای مدل‌های شبیه‌سازی، نتایج شبیه‌سازی توسط برنامه‌ای دیگر، برای تعیین مقادیر توابع هدف، قابل تجزیه و تحلیل باشد. چگونگی تلفیق مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی کمی و کیفی در شکل ۲ تشریح شده است. این شکل، تنها بخش تعیین تابع برازش هر کروموزم در NSGA-II را نشان می‌دهد.

۳- مطالعه موردی

دشت تهران در استان تهران قرار دارد. این دشت بین مختصات ۲۸' و ۳۵' تا ۴۹' و ۳۵° عرض شمالی و ۱۵' و ۵۱° تا ۳۶' و ۵۱° طول شرقی در جنوب رشته کوه البرز گرفته است. از شمال به بخش جنوبی ارتفاعات البرز، از شرق به تپه‌های هزار دره و کوه‌های سه پایه و رودخانه سرخه حصار، از غرب به رودخانه کن و از جنوب به کوه‌های بی‌بی‌شهربانو و دامنه شمالی ارتفاعات کهریزک محدود می‌گردد. وسعت این دشت ۶۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد. شیب

⁶ Empirical Risk Minimization

⁷ Test Data

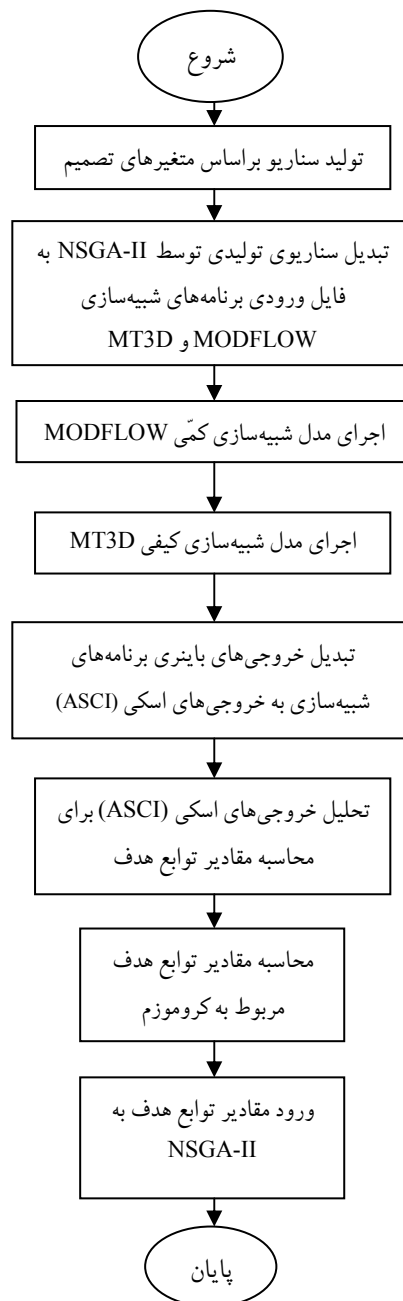
¹ Max Wins Strategy

² Wu

³ Lin et al.

⁴ Negative Log-Likelihood Function

⁵ Train Data



شکل ۲- چگونگی تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی کمی و کیفی با مدل بهینه‌سازی (فلوچارت تنها بخش تعیین برازش کروموزم‌ها را در NSGA-II نشان می‌دهد)

کرج تأمین می‌شود. در ماههایی که منابع سطحی توانایی تأمین نیازها را ندارند، کمبود موجود از آبخوان تهران تأمین می‌گردد. آبخوان تهران دارای خصوصیات زمین‌شناسی و تکتونیکی ویژه‌ای بوده و به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم می‌شود. بخش شمالی آبخوان (از خیابان شهید بهشتی تا تجریش) که شامل آبخوان‌های محلی است دارای میزان آبدهی کمی بوده و به‌طور نسبی پایدار و تغییرات تراز سطح آب در آن بسیار پایین است. بخش جنوبی

عمومی دشت از شمال به جنوب شرقی ادامه دارد. محدوده مورد نظر را می‌توان از نظر کاربری به دو بخش تقسیم کرد. در شمال محدوده مورد مطالعه، شهر تهران واقع شده است و در نیمه جنوبی دشت تهران، کاربری غالب اراضی به‌صورت کشاورزی است. شهر تهران یکی از بزرگ‌ترین شهرهای جهان به‌شمار می‌رود. سالانه بیش از یک میلیارد مترمکعب آب، برای مصارف شهری این شهر استفاده می‌شود. آب مصرفی تهران عمدتاً توسط سه سد لار، لتیان و

آبخوان که گسترش بیشتری دارد، به عنوان آبخوان اصلی تهران محسوب می‌گردد. بر اساس آزمایش‌های انجام شده، این بخش دارای نوسانات زیاد در تراز آب زیرزمینی است. متوسط عمق تراز سطح آب از ۱۲۰ متر در شمال تا ۳ متر در جنوب آبخوان متغیر است. رودخانه‌های محلی موجود، یک سیستم زهکشی طبیعی را در آبخوان تهران از شمال تا جنوب ایجاد نموده‌اند. کانال‌های یاخچی آباد و فیروزآباد که در بخشهای جنوبی شهر قرار دارند، فاضلابهای صنعتی و روانابهای شهری جنوب تهران را زهکشی می‌نمایند. ارزیابی‌های به عمل آمده از رودخانه سرخه حصار نشان‌دهنده این است که بخش مهمی از روانابهای شهری شمال تهران را زهکشی می‌نماید. دشت‌های کشاورزی که در پایین دست سدهای تهران قرار دارند بیش از ۴۵۰۰۰ هکتار اراضی را شامل می‌شوند که توسط آبهای با کیفیت نامناسب رودخانه‌های محلی آبیاری می‌شوند و این امر مشکلات زیست‌محیطی مختلف از جمله آلودگی محصولات کشاورزی را موجب شده است. یکی دیگر از عوامل موثر در وضعیت منطقه شمالی محدوده مورد مطالعه، برنامه‌ریزی و احداث شبکه جمع‌آوری فاضلاب در شهر تهران است که تکمیل فازهای مختلف آن، به دلیل تغییر در تغذیه آبخوان، تغییرات قابل توجهی در وضعیت آبخوان را در پی خواهد داشت. در این مقاله، محدوده‌ای که برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است، آبخوان اصلی دشت تهران می‌باشد. شکل ۳ محدوده آبخوان و اراضی کشاورزی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مرحله جمع‌آوری اطلاعات پایه شامل موارد زیر است و در این زمینه از مطالعات انجام شده قبلی چون مطالعات طرح جامع توسعه منابع آب تهران و مطالعاتی که توسط شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس و مهندسی مشاور یکم انجام گرفته است به‌طور مؤثری استفاده شده است:

- ۱- جمع‌آوری و بررسی اطلاعات هواشناسی محدوده مورد مطالعه
- ۲- جمع‌آوری و تحلیل اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی محدوده طرح
- ۳- جمع‌آوری و بررسی اطلاعات مربوط به مناطق کشاورزی، وضعیت آبیاری و نیازهای آبی کشاورزی
- ۴- جمع‌آوری و بررسی اطلاعات مربوط به طرحهای توسعه منطقه که می‌توانند بر وضعیت بهره‌برداری از آبهای سطحی و زیرزمینی منطقه مؤثر باشند (طرح جمع‌آوری فاضلاب تهران و طرح انتقال آبهای آلوده تهران).
- ۵- جمع‌آوری و بررسی اطلاعات مربوط به منابع آب سطحی و آمار برداری‌های انجام شده از منابع آب زیرزمینی مثل چاههای

بهره‌برداری شرب، صنعت و کشاورزی، چشمه‌ها و قنوت در محدوده مورد مطالعه

۶- جمع‌آوری آمار و اطلاعات پایه (هواشناسی، هیدرولوژی، کشاورزی و هیدروژئولوژی)، مطالعات صحرایی، تهیه مدل ریاضی آب زیرزمینی دشت تهران، کالیبراسیون و واسنجی مدل، پیش‌بینی و شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌ها، در جهت برنامه‌ریزی منابع آب و تدوین سیاست‌های بهره‌برداری تلفیقی در محدوده مورد مطالعه، انجام و مورد توجه قرار گرفته است. برای تعیین شرایط اولیه، شرایط مرزی و دیگر خصوصیات آبخوان که برای حل معادلات حاکم ضروری هستند، از نقشه‌های منابع آب دشت تهران که شامل نقشه‌های هم‌پتانسیل حداقل و حداکثر، هم‌عمق حداقل و حداکثر، هم‌قابلیت انتقال، هم‌ضخامت آبرفت، توپوگرافی و نقشه‌های بیلان استفاده شد.

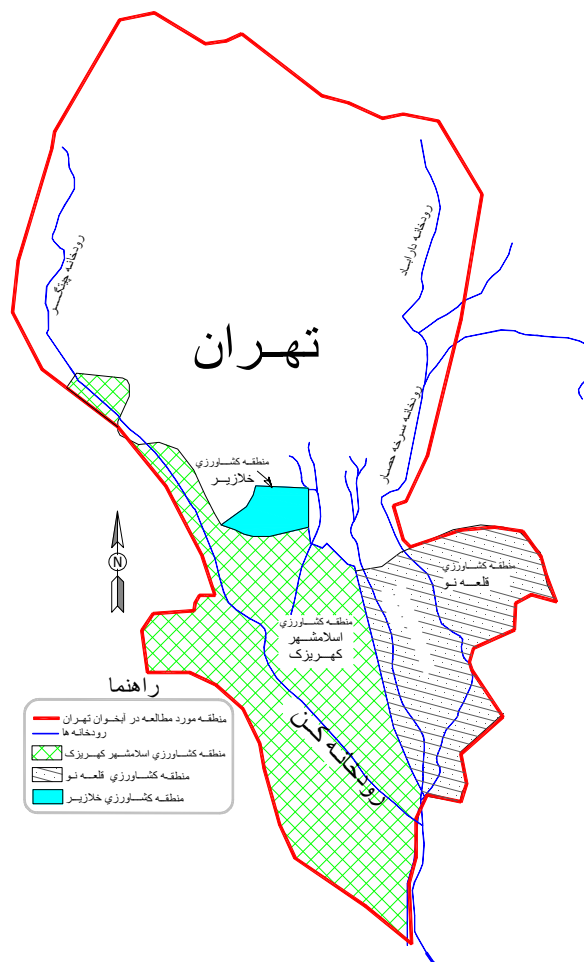
۴- نتایج

۴-۱- مدل ریاضی کمی- کیفی آبخوان تهران

همانگونه که اشاره گردید در تحقیق حاضر، از مدل‌های MODFLOW و MT3D که توسط بازرگان‌لاری و همکاران در سال ۲۰۰۹، برای آبخوان تهران در محدوده طرح کالیبره و واسنجی شده است، استفاده شد. در این مدل‌ها شبکه‌بندی صورت گرفته برای دشت تهران به ابعاد ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر و حاوی ۵۰ ستون و ۶۰ ردیف بود. مرز آبخوان نیز که از نقشه بیلان استخراج شد، بر روی شبکه‌بندی پیاده گردید و سلول‌هایی که خارج از مرز آبخوان در محدوده طرح قرار داشتند، به عنوان سلول‌های غیرفعال^۱ و سلول‌های داخل محدوده بیلان به عنوان سلول‌های فعال^۲ در نظر گرفته شدند.

برای شبیه‌سازی آبخوان، برآورد تغذیه کل که شامل نفوذ از کف کانال‌ها، نهرها و رودخانه‌ها، نفوذ مازاد آب کشاورزی و نفوذ پساب فاضلابهای خانگی و صنعتی است و تخمین تخلیه کل شامل چاههای بهره‌برداری و زهکش، قناتها و چشمه‌ها ضروری است که این موارد با توجه به اطلاعات موجود در نظر گرفته شد. نیازهای اطلاعاتی دیگر مدل ریاضی شامل ضریب هدایت هیدرولیکی، تراز سطح زمین و کف آبخوان، ضریب ذخیره، محل‌های تغذیه و تخلیه، تبخیر و تعرق، و غیره برآورد گردید. برای انتخاب آلاینده‌های مورد نظر برای شبیه‌سازی عددی در مرحله اول با استفاده از اطلاعات چاههای مشاهداتی کیفی، وضعیت آلاینده‌های مختلف در محدوده مورد مطالعه بررسی و در مقایسه با مقادیر مجاز هر آلاینده، نیترات (NO_3) به عنوان آلاینده بحرانی تشخیص داده شد و

¹ Inactive
² Active



شکل ۳- رودخانه‌ها، کانال‌ها و محدوده دشت‌های کشاورزی تهران

ضروری است. اگر چه در دشت تهران آماربرداری از سطح آب زیرزمینی برای مدت طولانی موجود است ولی اطلاعات و اندازه‌گیری‌های مربوط به سیستم پیچیده تخلیه و تغذیه آبخوان، محدود می‌باشد. به‌عنوان مثال، آمار بهره‌برداری از چاه‌های کشاورزی در جنوب تهران بسیار محدود است. بنابراین برای کالیبره کردن مدل و تعیین ضرایب K و S، از اطلاعات سه ماهه از سال آبی ۷۲-۷۳ (ماه‌های مهر، آبان و آذر) استفاده شد و برای صحت‌سنجی مدل از اطلاعات ماه‌های دیگر این سال آبی استفاده گردید. به‌عنوان نمونه برای آذرماه ۱۳۷۲، نتیجه صحت‌سنجی در مقاله بازرگان لاری و همکاران در سال ۲۰۰۹ ارائه شده است. اختلاف کم بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در ماه‌های مختلف نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل‌های تهیه شده برای شبیه‌سازی آبخوان تهران است. با توجه به اینکه طول دوره آماری مدون برای شبکه چاه‌های مشاهداتی کیفی تنها به یک‌سال و نیم محدود می‌شود، از یک بازه زمانی شش ماهه برای کالیبراسیون مدل عددی و از یک بازه یکساله برای تصدیق مدل عددی استفاده شد. با نهای

مدل‌سازی وضعیت این آلاینده در آبخوان مد نظر قرار گرفت. عامل اصلی ورود نیترات به آبخوان مورد مطالعه، تزریق فاضلاب‌های شهری از طریق چاه‌های جذبی است. مقادیر غلظت هر آلاینده برای هر سلول تعیین و با معرفی پارامترهای مدل‌سازی نظیر ضریب پخش در آبخوان، مدل عددی شبیه‌سازی کیفی آبخوان تکمیل شد. در فرایند کالیبراسیون و صحت‌سنجی، با توجه به اطلاعات موجود از تغذیه و تخلیه آبخوان، دوره اجرای مدل، یک سال آبی ۳۶۵ روزه از آبان ۷۲ الی آبان ۷۳ در نظر گرفته شد. این زمان به ۱۲ گام زمانی تقسیم می‌گردد تا سطح آب در پایان هر بازه زمانی (ماه) مشخص شود. فرایند کالیبراسیون مدل برای تعیین دقیق ضرایب K و S از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای صحت‌سنجی^۱ مدل کالیبره‌شده، آماربرداری و مشخص بودن مقادیر تخلیه و تغذیه آبخوان برای یک دوره زمانی قابل قبول که حتی الامکان تغییرات بلندمدت ورودی و خروجی را نشان می‌دهد،

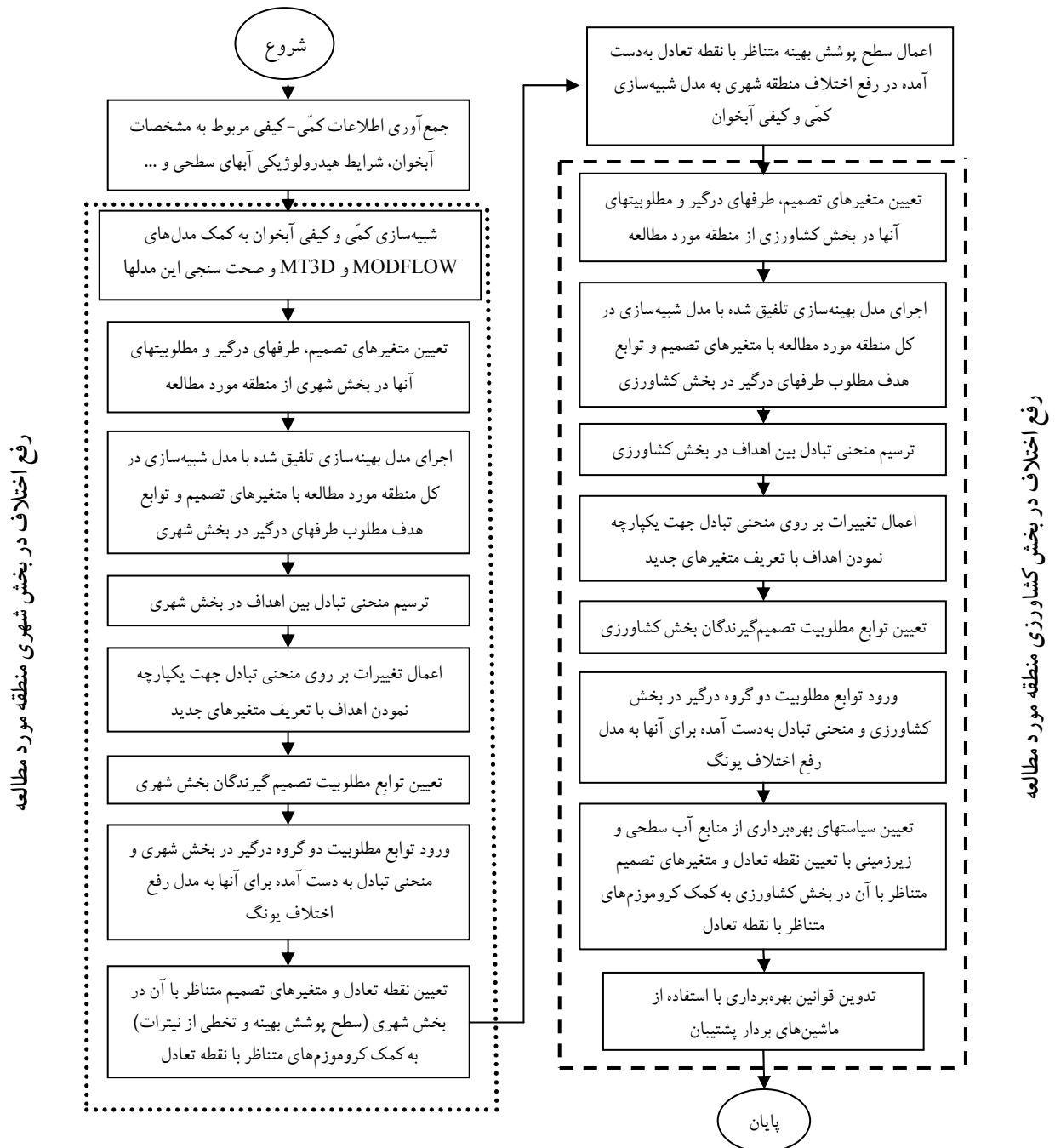
^۱Verification

۲۰۰۹، که در این مقاله برای تدوین قوانین بهره‌برداری تلفیقی مورد استفاده قرار گرفت، شامل دو مدل رفع اختلاف در بخش شهری و کشاورزی است. فلوچارت گامهای انجام مطالعات در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق این فلوچارت، ابتدا اطلاعات و داده‌های منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری گردیده و پس از مدل‌سازی کمی و کیفی آبخوان در منطقه مورد مطالعه و صحت‌سنجی اطلاعات، از این مدل در بدنه مدل بهینه‌سازی

شدن مدل عددی کمی و کیفی برای آبخوان، امکان شبیه‌سازی توأمان وضعیت کمی و کیفی آبخوان فراهم شده و از این مدل می‌توان برای بهینه‌سازی وضعیت برداشت منابع آب زیرزمینی و محدوده مورد مطالعه استفاده کرد.

۴-۲- اعمال مدل رفع اختلاف پیشنهادی

متدولوژی ارائه شده توسط بازرگان لاری و همکاران در سال



شکل ۴- فلوچارت مدل رفع اختلاف برای بهره‌برداری تلفیقی کمی و کیفی از منابع آب سطحی و زیرزمینی

الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده گردید. خروجی این برنامه، منحنی تعامل میان اهداف مورد نظر در دو بخش شهری و کشاورزی به ترتیب در مراحل اول و دوم است. برای این منظور، لازم است که از تصمیم‌گیرندگان بخشهای مختلف درگیر در بهره‌برداری تلفیقی کمی-کیفی از منابع آب سطحی و زیرزمینی، خواسته شود که منحنی‌های مطلوبیت خود را مشخص کنند. با داشتن منحنی مطلوبیت گروه ذینفعان و ترکیب هر کدام از این منحنی‌ها با منحنی تعامل، تابع مطلوبیت هر یک از طرفهای درگیر مشخص می‌شود. این توابع مطلوبیت، ورودی‌های مدل رفع اختلاف یونگ محسوب می‌شوند. پس از اجرای مدل یونگ، با توجه به خروجی این مدل و منحنی تعامل و همچنین میزان بهینه درصد پوشش شبکه فاضلاب در بخش شهری و سپس با توجه به سطح پوشش حاصل شده، سیاست برداشت ماهانه از آب زیرزمینی در مناطق کشاورزی به دست می‌آید.

در این مقاله، مدل پیشنهاد شده توسط بازرگان لاری و همکاران در سال ۲۰۰۹، برای بازه زمانی بلند مدت پانزده ساله در مورد آبخوان تهران، توسعه داده شد. در این مدل بلندمدت، برای به دست آوردن منحنی‌های تعامل میان اهداف ذینفعان، منطقه مورد مطالعه به دو بخش شهری و کشاورزی تقسیم شد و دو مدل رفع اختلاف در این مناطق در دو حالت مذکور توسعه داده شد.

از آنجا که در نظر گرفتن یک دوره برنامه‌ریزی بلند مدت، قابلیت اطمینان نتایج را افزایش می‌دهد، در این تحقیق مدلی بلندمدت بسط داده شد. در مدل بلند مدت، بازه برنامه‌ریزی محدود به پانزده سال (۱۳۷۲ تا ۱۳۸۶) و یا به عبارت دیگر ۱۸۰ گام زمانی ماهانه است که در دو منطقه شهری و کشاورزی به شرح زیر انجام گرفت.

۴-۲-۱- رفع اختلاف در محدوده شهری

مدل رفع اختلاف اول، اهداف سازمان حفاظت محیط زیست و سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور را در محدوده شهری منطقه مورد مطالعه لحاظ می‌کند و منحنی تعامل بین متوسط غلظت نیترات و هزینه توسعه شبکه فاضلاب، حاصل از آن است. در این مسئله روابط ۱۱ و ۱۲ به عنوان توابع هدف برای مدل رفع اختلاف اول در یک بازه ۱۸۰ ماهه مطرح هستند.

$$\text{Minimize: } \text{MNC} = \frac{\sum_{m=1}^{\text{MN}} \sum_{i=1}^n \text{NC}_{im}}{n} \quad (11)$$

$$\text{Minimize: } C \quad (12)$$

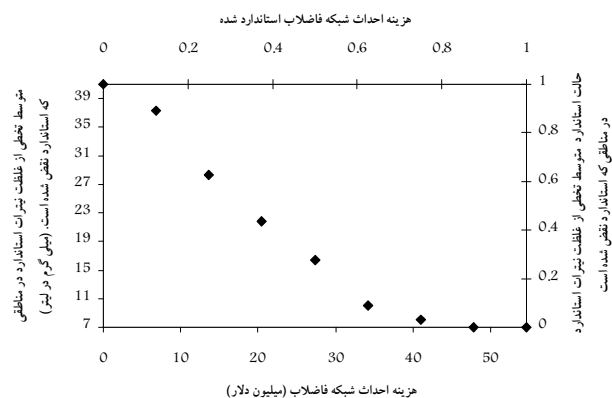
که در این روابط

MNC عبارت است از غلظت متوسط آلاینده‌ها در مناطقی که استاندارد نقض می‌شود. NC_{im} تمرکز متوسط نیترات در سلول i در ماه m ، MN تعداد ماههای دوره برنامه‌ریزی (۱۸۰ ماه) و n تعداد سلول‌هایی است که غلظت نیترات در آنها از مقدار استاندارد بیشتر است. در این تحقیق، غلظت استاندارد نیترات برابر ده میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شد. در رابطه ۱۲، C هزینه احداث شبکه فاضلاب است. متغیر تصمیم در این مرحله درصد پوشش شبکه فاضلاب در منطقه شهری است که بین صفر تا صد می‌تواند تغییر کند. با اعمال مدل یونگ بر این منحنی تعامل، پوشش بهینه شبکه فاضلاب تهران مشخص می‌گردد. بنابراین در مدل رفع اختلاف دوم، درصد پوشش و مناطق تحت پوشش شبکه فاضلاب معلوم است. در ادامه، منحنی تعامل بین اهداف در مدل رفع اختلاف محدود شهری تعیین شد و مدل چانه‌زنی یونگ بر این منحنی تعامل، اعمال گردید (شکل ۵). در تئوری یونگ لازم است مقادیر تابع $R(x)$ که به صورت رابطه ۱۳ تعریف می‌گردد، بر اساس سهم بازیگر اول (x_1)، ترسیم شود. نقطه توافق، نقطه‌ای است که در آن $R(x)$ بیشینه باشد.

$$R(x) = \min \left\{ \min_{j \in I_1} \frac{\partial u_j(x)}{\partial x}, \min_{k \in I_2} \frac{\partial v_k(1-x)}{\partial x} \right\} \quad (13)$$

که در این رابطه

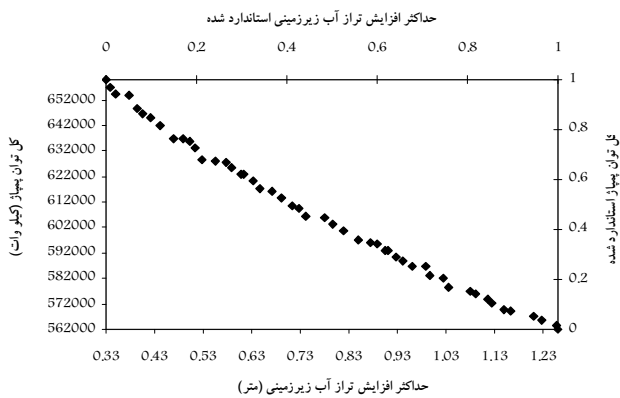
u و v توابع مطلوبیت طرفهای درگیر است. جزئیات و نحوه کاربرد تئوری یونگ در تحقیقات بازرگان لاری و شیرنگی^۱ و همکاران موجود است [۲۱ و ۲۲]. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، حداکثر $R(x)$ در $x_1 = 0.54$ است. به ازای این سطح، متوسط غلظت در سلول‌هایی که غلظت نیترات از استاندارد تخطی می‌کند، برابر ۲۴/۱۴ است.



شکل ۵- منحنی تعامل بلند مدت بین هزینه احداث شبکه فاضلاب و متوسط غلظت نیترات

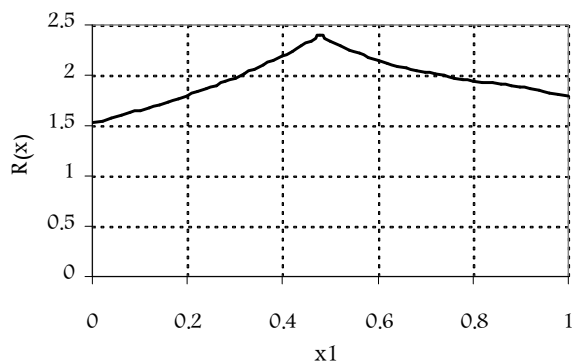
¹ Shirangi

قید به مقدار حداکثر نیم میلی گرم در لیتر محدود شد. در ادامه، منحنی تعامل بین اهداف در مدل رفع اختلاف محدوده کشاورزی تعیین شد و مدل چانه زنی یونگ بر این منحنی تعامل اعمال گردید (شکل ۷).



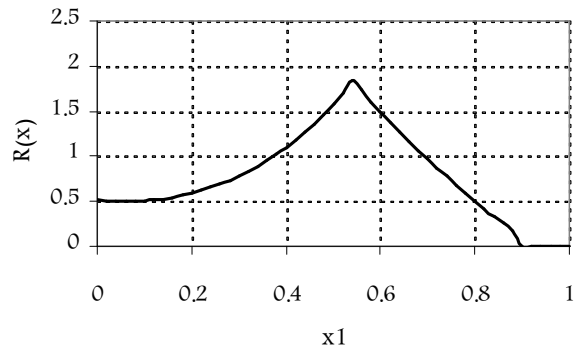
شکل ۷- منحنی تعامل بلند مدت بین اهداف کشاورزان و شرکت آب منطقه‌ای

در مدل رفع اختلاف ارائه شده در منطقه کشاورزی، متغیر x_1 مربوط به کشاورزان و متغیر x_2 مربوط به آب منطقه‌ای تهران بود. با توجه به اینکه مطلوبیت نمایندگان سازمان حفاظت محیط زیست و سازمان برنامه و بودجه ثابت است، نقطه بهینه‌ای که $R(x)$ آن بیشینه است مطابق شکل ۸ در نقطه $x_1 = 0.48$ رخ خواهد داد.



شکل ۸- منحنی نحوه تغییرات $R(x)$ به ازای مقادیر مختلف x_1 محدوده کشاورزی

این نقطه با توجه به منحنی تعامل نشان داده شده در شکل ۷، متناظر است با کل توان پمپاژ ۶۰۵ MW، که چنین پمپاژی، میزان حداکثر افزایش تراز آب زیرزمینی را به ۰/۷۸ متر محدود خواهد کرد. این نقطه در ازای سیاست بهره‌برداری از منابع آب موجود در هر منطقه کشاورزی، تعیین شده و افزایش فصلی تراز سطح آب



شکل ۹- منحنی نحوه تغییرات $R(x)$ به ازای مقادیر مختلف x_1 محدوده شهری

۴-۲-۲- رفع اختلاف در محدوده کشاورزی

اهداف مورد نظر در محدوده کشاورزی، شامل حداقل کردن هزینه پمپاژ و حداقل کردن میزان بالا رفتن سطح آب زیرزمینی است. روابط ۱۴ و ۱۵، اهداف متضاد مدل رفع اختلاف دوم هستند و متغیرهای تصمیم در این مرحله دبی ماهانه آب استحصال از چاهها است.

$$\text{Minimize: MGTR} \quad (14)$$

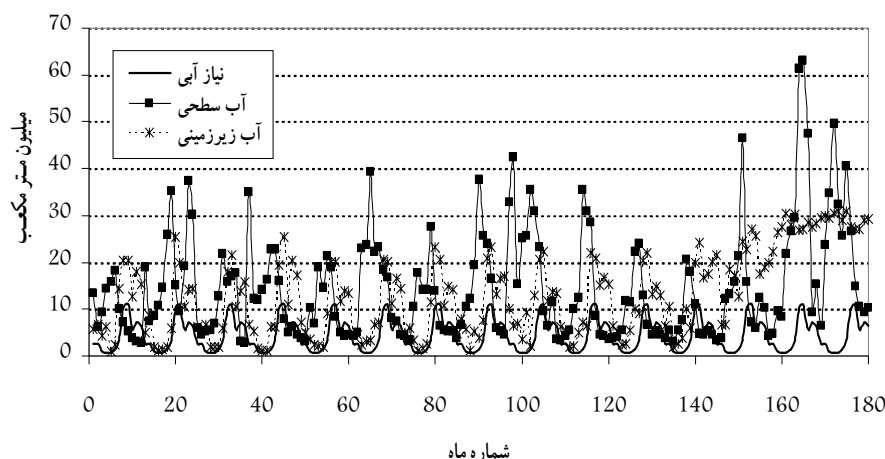
که در آن MGTR ماکسیمم مقدار بالارفتن آب در طول ماههای دوره برنامه‌ریزی است.

$$\text{Minimize: TPP} = \sum_{m=1}^{MN} \sum_{z=1}^3 P_{zm} \quad (15)$$

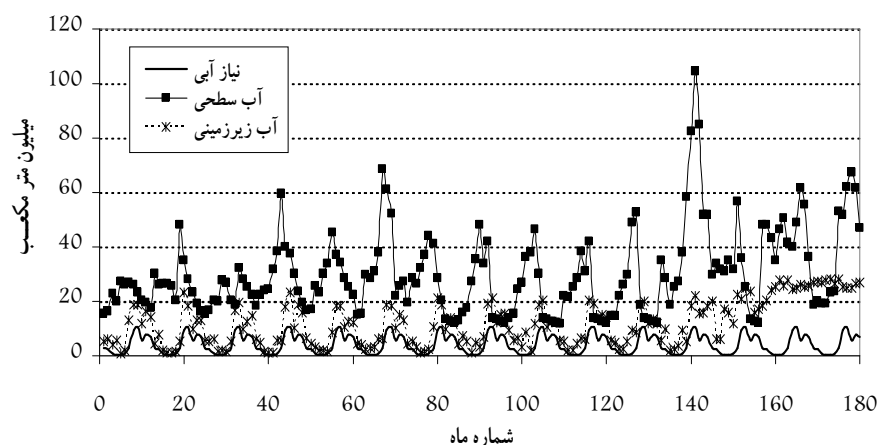
$$P_{zm} = \frac{G_{zm} \cdot H_{zm}}{0.102\eta} \quad (16)$$

که در این روابط TPP کل توان لازم بر حسب P_{zm} ، kW، توان پمپ در منطقه کشاورزی شماره z در ماه m ، G_{zm} کل آب برداشت شده از منطقه کشاورزی شماره z در ماه m ، H_{zm} متوسط سطح آب زیرزمینی در منطقه کشاورزی شماره z در ماه m و η کارایی پمپ است.

دامنه تغییرات دبی ماهانه آب استحصال از چاهها، توسط پمپاژ محدود به صفر تا یکصد میلیون متر مکعب در ماه در نظر گرفته شده است که با توجه به امکانات موجود در برداشت ماهانه از چاهها انتخاب گردید. از آنجا که آب در دسترس در مقایسه با نیازها قابل توجه است و مشکل بالا آمدن سطح آب نیز وجود دارد، فرض شد که نیاز آبی ماهانه کشاورزی به‌طور کامل تأمین می‌گردد. این موضوع به‌عنوان قید در مدل در نظر گرفته شد. همچنین غلظت دترجنت در آب تخصیصی به اراضی کشاورزی نیز به‌صورت یک



شکل ۹- مقادیر بهینه تخصیص یافته از منابع آب به نیاز منطقه اسلامشهر- کهریزک بر اساس روش رفع اختلاف یونگ



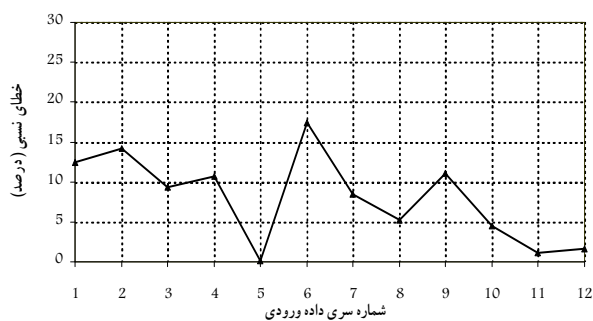
شکل ۱۰- مقادیر بهینه تخصیص یافته از منابع آب به نیاز منطقه قلعه نو بر اساس روش رفع اختلاف یونگ

میزان برداشت ماهانه از منابع آب زیرزمینی را توسط SVM احتمالاتی آموزش داده شده، تعیین نمود و نهایتاً مقدار تخصیص را مشخص کرد. برای ورود اطلاعات به ماشین‌های بردار پشتیبان و آموزش آن، به سری زمانی نیاز آبی ماهانه، سری زمانی منابع آب سطحی و مقدار متوسط ماهانه سطح آب زیرزمینی در هر منطقه کشاورزی و نیز تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در هر سه منطقه، به عنوان اطلاعات ورودی و سری زمانی مقدار برداشت ماهانه از منابع آب زیرزمینی (پمپاژ) در مناطق کشاورزی، به عنوان خروجی مدل نیاز است. این سری اطلاعات در بخش قبل و از مدل‌های بهینه‌سازی و رفع اختلاف به دست آمده‌اند. ماشین بردار پشتیبان آموزش داده شده، قادر است تابع توزیع احتمالاتی میزان برداشت ماهانه از منابع آب زیرزمینی را به دست دهد. بهترین ماشین بردار پشتیبان برای هر یک از مناطق، با استفاده از صحت‌سنجی باید به شکلی تعیین شود که حداقل اختلاف بین نتایج مدل ماشین بردار

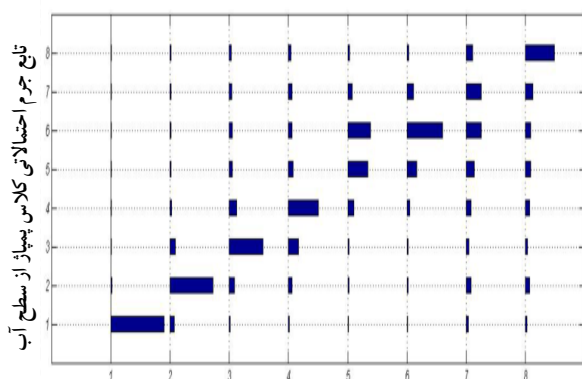
زیرزمینی متناظر با این سیاست بهره‌برداری کنترل خواهد شد. نمونه‌ای از این سیاست‌های بهینه بهره‌برداری در شکل‌های ۹ و ۱۰ برای دو منطقه از مناطق کشاورزی ناحیه مورد مطالعه نشان داده شده است.

۳-۴- تدوین قوانین بهره‌برداری به کمک ماشین‌های بردار پشتیبان

در این مقاله برای تدوین قوانین بهره‌برداری در زمان واقعی از منابع آب سطحی و زیرزمینی محدوده طرح، برای نخستین بار از ماشین‌های بردار پشتیبان احتمالاتی استفاده شد. به ازای سری‌های زمانی بهینه متناظر با نقطه تعادل یونگ، برای هر کدام از مناطق کشاورزی، ماشین‌های بردار پشتیبان جداگانه‌ای آموزش داده شد. به این ترتیب در هر زمان به ازای ترکیبی از نیاز آبی ماهانه، سطح آب زیرزمینی در ابتدای ماه و منابع آب سطحی موجود، می‌توان



شکل ۱۲- درصد خطای نسبی مدل ماشین بردار پشتیبان برای تخمین میزان پمپاژ بهینه از سطح آب زیرزمینی در دوره صحت‌سنجی در منطقه اسلامشهر- کهریزک



کلاس پمپاژ از سطح آب زیرزمینی

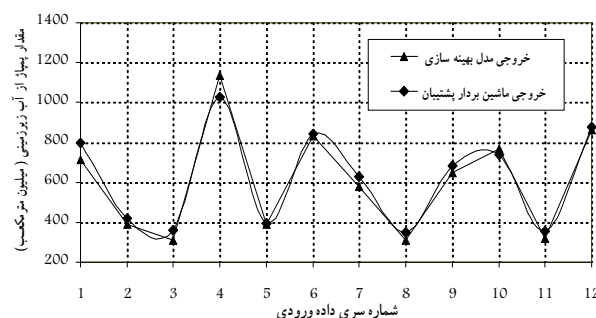
شکل ۱۳- تابع توزیع جرم احتمالاتی مدل ماشین بردار پشتیبان برای تخمین میزان پمپاژ بهینه از سطح آب زیرزمینی در دوره صحت‌سنجی در منطقه اسلامشهر- کهریزک

آبی، متوسط سطح آب زیرزمینی در هر منطقه کشاورزی در ابتدای ماه، مقدار نوسانات سطح آب زیرزمینی در هر منطقه کشاورزی در ابتدای ماه و مقدار آب سطحی موجود به ماشین بردار پشتیبان آموزش داده شده، خروجی‌های احتمالاتی آن که توابع توزیع چگالی احتمال برداشت از آب زیرزمینی دشت است، را به‌دست آورد. مزیت اصلی قوانین بهره‌برداری پیشنهاد شده بر مبنای ماشین بردار پشتیبان آموزش داده شده این است که بسیار سریع سیاست‌های بهره‌برداری را به‌صورت احتمالاتی به گونه‌ای به‌دست می‌دهد که امکان مدیریت در زمان واقعی فراهم می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق، ایجاد یک روش جدید برای تدوین قوانین بهره‌برداری تلفیقی بهینه کمی و کیفی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در زمان واقعی توسط ماشین‌های بردار پشتیبان بود. در ابتدا پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز، از آنها برای شبیه‌سازی

پشتیبان و مدل بهره‌برداری تلفیقی کمی و کیفی از منابع آب سطحی و زیرزمینی وجود داشته باشد. به‌منظور صحت‌سنجی ماشین بردار پشتیبان آموزش داده شده، داده‌های ۱۶۸ ماه، مورد استفاده قرار گرفته و داده‌های ۱۲ ماه که در دوره آموزش مدل بردار پشتیبان احتمالاتی به کار گرفته نشده‌اند، پیش‌بینی گردیدند. این عملیات برای هر سه منطقه مورد مطالعه انجام گرفت. در هر مرحله، خروجی‌ها به ازای مقادیر مختلف ورودی مدل از طریق محاسبه امید ریاضی (متوسط حاصلضرب میانگین دسته‌ها در مقدار احتمال آنها) آنها محاسبه گردید. مقادیر محاسبه شده به‌روش بالا با نتایج به‌دست آمده از مدل ارائه شده برای بهره‌برداری تلفیقی کمی و کیفی از منابع آب سطحی و زیرزمینی مقایسه شد و شبکه‌ای که بالاترین تطابق را داشت، انتخاب شد. برای نمونه در شکل ۱۱ نتایج صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز احتمالاتی توسعه داده شده به‌منظور تخمین میزان پمپاژ از سطح آب زیرزمینی در منطقه اسلامشهر- کهریزک نشان داده شده است. مقادیر دقت صحت‌سنجی با توجه به محتمل‌ترین مقدار پمپاژ، متناظر با سری داده‌های ورودی محاسبه شد.



شکل ۱۱- نتیجه صحت‌سنجی مدل ماشین بردار پشتیبان برای تخمین میزان پمپاژ بهینه از منابع آب زیرزمینی در منطقه اسلامشهر- کهریزک (این داده‌ها در آموزش SVM استفاده نشده‌اند)

در شکل ۱۱، توانایی ساختار آموزش دیده با انتخاب تصادفی ماهها نشان داده شده است. نتایج صحت‌سنجی، نشان‌دهنده کارایی مناسب شبکه ماشین بردار پشتیبان آموزش داده شده است. همچنین در شکل ۱۲، مقدار خطای نسبی مدل توسعه داده شده در تخمین مقدار پمپاژ بهینه از منابع آب زیرزمینی نشان داده شده است.

همچنین می‌توان تابع جرم احتمالاتی خروجی‌های مدل شبیه‌سازی احتمالاتی ماشین بردار پشتیبان را ارائه نمود. برای مثال، در شکل ۱۳ نتایج مدل توسعه داده شده برای تخمین مقدار بهینه پمپاژ در منطقه اسلامشهر- کهریزک در دوره صحت‌سنجی نشان داده شده است.

در هر زمان این امکان وجود دارد که با وارد نمودن میزان نیاز

معمولاً برای بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی، از قوانین بهره‌برداری در زمان واقعی استفاده می‌شود. در این مقاله، کارایی ماشین‌های بردار پشتیبان احتمالاتی در تدوین این قوانین، با استفاده از اطلاعات آبخوان تهران مورد ارزیابی قرار گرفت. در هر زمان این امکان وجود دارد تا با وارد نمودن میزان نیاز آبی، متوسط سطح آب زیرزمینی در هر منطقه کشاورزی در ابتدای ماه، مقدار نوسانات سطح آب زیرزمینی در هر منطقه کشاورزی در ابتدای ماه و مقدار آب سطحی موجود و وارد نمودن آنها به ماشین بردار پشتیبان آموزش داده شده، خروجی‌های احتمالاتی آن که توابع توزیع چگالی احتمال برداشت از آب زیرزمینی دشت است، را به دست آورد. مزیت اصلی قوانین بهره‌برداری پیشنهاد شده بر مبنای ماشین بردار پشتیبان آموزش داده شده این است که بسیار سریع سیاست‌های بهره‌برداری را به صورت احتمالاتی به گونه‌ای به دست می‌دهد که امکان مدیریت در زمان واقعی فراهم می‌گردد. نتایج نشان می‌دهند میزان دقت قوانین تخصیص آب محاسبه شده در مرحله صحت‌سنجی بیش از ۸۰ درصد است و بر اساس این قوانین، تغییرات تجمعی تراز سطح آب زیرزمینی در آبخوان تهران در یک دوره برنامه‌ریزی ۱۵ ساله در حد ۸۰ سانتی‌متر محدود شده است.

کمی و کیفی آبخوان استفاده شد. مدل شبیه‌سازی کمی-کیفی تهیه شده با مدل بهینه‌سازی NSGA-II تلفیق گردید و با تعیین هر یک از ذینفعان و کمی نمودن مطلوبیتهای هر یک از طرفهای درگیر، منحنی تعامل بین اهداف به دست آمد. با استفاده از اطلاعات پایه اقلیمی، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، کیفی و شرایط فیزیکی حاکم بر آبخوان و منابع آب سطحی و کاربری‌های منطقه مورد مطالعه، مدل کالیبره و صحت‌سنجی شد. بسیاری از مدل‌های معتبر شبیه‌سازی کمی و کیفی موجود، امکان تلفیق با مدل‌های بهینه‌سازی را ندارند. در این تحقیق، مدل‌های MODFLOW و MT3D که از مشهورترین مدل‌های کمی و کیفی شبیه‌سازی آبخوان هستند، ویرایش شده و با مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه NSGA-II تلفیق شدند. در مرحله بهینه‌یابی، مدل پیشرفته NSGA-II قادر به تعیین منحنی تعامل بین اهداف با سرعت بالایی بود. حال آن‌که همین مدل شبیه‌سازی سریع در مدل‌سازی مسائلی با پیچیدگی آبخوان تهران با مشکل زمان اجرا روبه‌رو است. مشکل زمان اجرا در برنامه‌ریزی کوتاه مدت کمی و کیفی قابل قبول است در حالی که این مشکل با بزرگ شدن مسئله برای برنامه‌ریزی‌های بلند مدت، با توجه به افزایش قابل توجه متغیرهای تصمیم، اجتناب‌ناپذیر و قابل توجه است. از این رو، استفاده از مدل در بهره‌برداری در زمان واقعی با مشکل مواجه می‌گردد.

۶- مراجع

- 1- Emch, P.G., and Yeh, W.W-G., (1998). "Management model for conjunctive use of coastal surface water and groundwater." *J. of Water Resources Planning and Management*, 124 (3), 129-139.
- 2- Azaeiz, M.N.(2002). "A model for conjunctive use of ground and surface water with opportunity costs." *European j. of Operation Research*, 143, 611-624.
- 3- Karamouz, M., Kerachian, R., and Zahraie, B. (2004) "Monthly water resources and irrigation planning: Case study of conjunctive use of surface and groundwater resources." *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, 130, 93-98.
- 4- Karamouz, M., Rezapour Tabari, M. M., and Kerachian, R. (2007) "Application of genetic algorithm and artificial neural networks in conjunctive use of surface and groundwater resources." *Water International*, 32, 163-176.
- 5- Rezapour Tabari, M. M., Maknoon, R., and Ebadi, T. (2009). "Multi-objective optimal model for surface and groundwater conjunctive use management using SGAs and NSGA-II." *J. of Water and Wastewater*, 69, 2-12. (In Persian)
- 6- Rezapour Tabair, M. M., Maknoon, R., and Ebadi, T. (2009). "Conjunctive use management under uncertainty in aquifer parameters." *J. of Water and Wastewater*, 72, 2-15. (In Persian)
- 7- Bazargan-Lari, M. R., Kerachian, R., and Mansoori, A. (2009). "A conflict-resolution model for the conjunctive use of surface and groundwater resources that considers water-quality issues: A case study." *Environmental Management*, 43, 470-482.
- 8- Kerachian, R., Fallahnia, M., Bazargan-Lari, M. R., Mansoori, A., and Sedghi, H. (2010). "A fuzzy game theoretic approach for groundwater resources management: Application of rubinstein bargaining theory." *Resources Conservation and Recycling*, 54 (10), 673-682.

- 9- Vapnik, V. (1995). *The nature of statistical learning theory*, Springer-Verlag, NewYork.
- 10- Byun, H., and Lee, S. W. (2002). "Applications of support vector machines for pattern recognition: A survey." In: Lee, S. W., and Verri, A., (Eds.), *Pattern Recognition with Support Vector Machines*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 213-236.
- 11- Temko, A., and Nadeu, C. (2006). "Classification of acoustic events using SVM-based clustering schemes." *In Pattern Recognition*, 39, 682-694.
- 12- Khalil, A., Almasri, M. N., McKee, M., and Kaluarachchi, J. J. (2005). "Applicability of statistical learning algorithms in groundwater quality modeling." *Water Resources Research*, 41, 1-16.
- 13- Asefa, T., Kemblowski, M., McKee, M., and Khalil, A. (2005). "Multi-time scale stream flow predictions: The support vector machines approach." *J. of Hydrology*, 318, 7-16.
- 14- Safavi, H. R., Afshar, A., Ghaheri, A., Abrishamchi, A., and Tajrishi, M. (2007). "A quality-quantity simulation mode for stream-aquifer interaction." *J. of Water and Wastewater*, 61, 2-14. (In Persian)
- 15- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., and Meyarivan, T. (2000). *A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II*, KANGAL Rep. No. 200001, Indian Institute of Technology, Kanpur, India.
- 16- Cortes, C., and Vapnik, V. (1995). "Support-vector network." *Machine Learning*, 20, 273-297.
- 17- Burges, C. J. C. (1998). "A tutorial on support vector machines for pattern recognition." *J. Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2), 1-47.
- 18- Wu, T. F., Lin, C. J., and Weng, R. C. (2004). "Probability estimates for multi-class classification by pairwise coupling." *J. Machine Learning Research*, 5, 975-1005.
- 19- Lin, H. T., Lin, C. J., and Weng, R. C. (2003). *A note on Platt's probabilistic outputs for support vector machines*, Technical Report, Department of Computer Science, National Taiwan University, URL <<http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/plattprob.ps>> (May 19, 2009).
- 20- Assgari, H. (2008). "River water quality zoning using support vector machines (SVMs)." M.Sc. Thesis, Dept. of Civil Eng., Tehran University. (In Persian)
- 21- Bazargan Lari, M. R. (2009). "A conflict resolution model for conjunctive use of surface and groundwater resources: Considering the water quality issues." Ph.D Thesis, Dept. of Water Sciences and Eng., Sciences and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran. (In Persian)
- 22- Shirangi, E., Kerachian R., and Bajestan, M.S. (2008). "A simplified model for optimal reservoir operation considering the water quality issues: Application of the Young conflict resolution theory." *Environmental Monitoring Assessment*, 146 (1-3), 77-89.