

کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری (Meta-heuristic) در بهینه‌سازی مدیریت تلفیقی آب‌های سطحی و زیرزمینی

زهرا کی‌همایون^{۱*}

^۱گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران ZKayhomayoon@pnu.ac.ir

چکیده

استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته هوش مصنوعی یکی از موثرترین ابزارها در مدیریت منابع آب و بهره‌برداری تلفیقی بهینه در مناطق خشک و نیمه خشک است. تحقیق حاضر با هدف حداقل کردن کمبود نیاز آبی با استفاده از دو منبع آب سطحی (سد) و آب زیرزمینی (آبخوان) و با در نظر گرفتن شرایط آبخوان و پایداری آن انجام گردیده است. مدل بهره‌برداری تلفیقی بهینه با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی شکار نهنگ (Optimization Algorithm Whale: WOA) و کرم شبتاب (Firefly Algorithm: FA) اجرا شده است. به منظور کنترل تغییرات سطح ایستابی و بررسی وضعیت آب زیرزمینی در مدل تلفیقی، شرایط آبخوان توسط کد MODFLOW شبیه سازی گردیده است. نتایج اجرای مدل بهره‌برداری تلفیقی نشان می‌دهد که عملکرد الگوریتم FA نسبت به الگوریتم WOA مناسب‌تر است. الگوریتم FA در بدترین وضعیت منابع آب سطحی، حدود ۶۱ درصد نیازهای آبی را تامین کرده در حالی که این مقدار در الگوریتم WOA حدود ۵۲ درصد بوده است. همچنین با اعمال مدل بهینه تلفیقی در طول دوره مورد بررسی حدود ۴ و ۵ متر به ترتیب توسط الگوریتم WOA و FA خیز آب زیرزمینی ایجاد شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که عملکرد الگوریتم فراابتکاری FA در تخصیص بهره‌برداری تلفیقی مناسب تر از الگوریتم WOA است.

واژه‌های کلیدی

یادگیری ماشین، الگوریتم‌های فراابتکاری شکار نهنگ (WOA) و کرم شبتاب (FA)، بهینه‌سازی، مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی



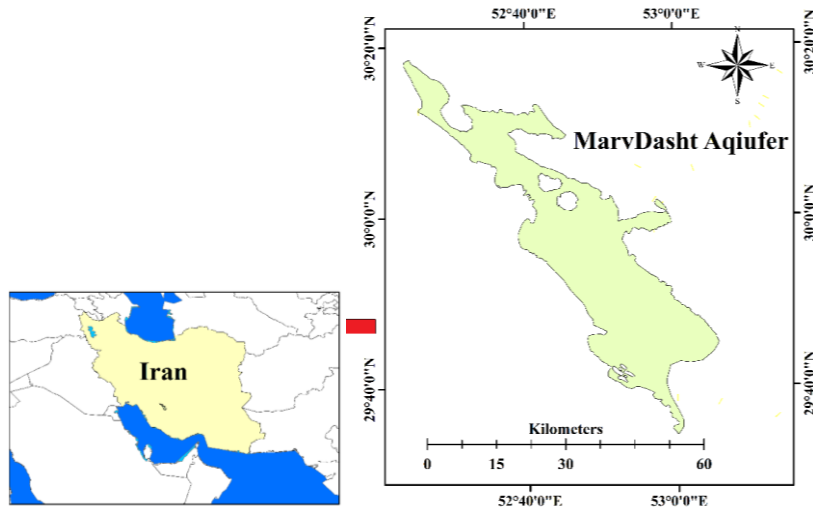
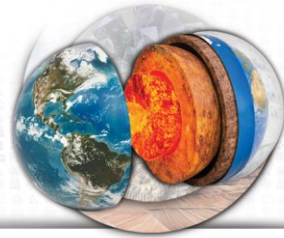
۱. مقدمه

امروزه مدیریت جامع منابع آب با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و با تاکید بر بهره‌برداری مشترک یا تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، در دستورکار بسیاری از سازمان‌های بهره‌بردار در نقاط مختلف دنیا قرار گرفته است. مدل‌های شبیه‌ساز برپایه الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند کارایی و عملکرد سامانه‌های آب‌زیرزمینی و سطحی را به نحوه مطلوبی افزایش دهند. مدل‌های فراابتکاری یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌ساز تلفیقی هستند که ضمن بیان یک پدیده فیزیکی و واقعی به کمک روابط منطقی ریاضی می‌توانند با در نظر گرفتن هدفی خاص مانند حداکثر کردن تأمین نیاز آبی یا حداقل نمودن کمبود آب در طول بازه زمانی خاص، بهترین ترکیب ممکن را تولید نمایند. ویژگی‌های منحصربه‌فرد مدل‌های بهینه‌سازی، کاربرد آن‌ها را در منابع آب و بویژه برنامه‌ریزی منابع آب و سامانه‌های بهره‌برداری تلفیقی افزایش داده است. لازم بذکر است که در مدل‌های بهینه‌سازی نیز با توجه به پیچیدگی مدل و نیز به علت برخی فرضیات اعمال شده در برنامه رایانه‌ای، لزوماً جواب به‌دست‌آمده، بهینه واقعی نخواهد بود. در صورتی که ابعاد مسئله بزرگ باشد جهت رسیدن به نقطه بهینه سراسری و عدم به دام افتادن در نقاط بهینه محلی از الگوریتم‌های تکاملی استفاده می‌گردد. این الگوریتم‌ها قادر به یافتن نقاط بهینه سراسری هستند و توانایی بالایی در حل مسائل واقعی دارند [3, 4, 5]. تاکنون الگوریتم‌های مختلفی جهت حل مسائل بهینه توسط محققان مختلف در زمینه بهره‌برداری تلفیقی استفاده شده که مهم‌ترین آنها عبارتند از: الگوریتم ژنتیک [6, 7, 8]، الگوریتم مورچگان [9]، الگوریتم ازدحام ذرات [10, 11, 12]، الگوریتم گرانش زمین [13] و الگوریتم ژنتیک چند هدفه [14, 15, 16]، [17]. در تمامی تحقیقات ذکر شده عملکرد الگوریتم‌های مورد استفاده مناسب ارزیابی شده است. با این حال لازم است کارایی برخی الگوریتم‌های جدید در مسائل مختلف از جمله تخصیص منابع آب مورد ارزیابی قرار گیرد. روش‌های بهینه‌سازی جدیدتر کمتر آزمایش شده، الگوریتم کرم شب‌تاب (Firefly Algorithm: FA) [18, 19, 20] و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (Optimization Algorithm Whale: WOA) [21] هستند. این روش‌ها هنوز به اندازه کافی در مسائل هیدرولوژیکی و مدیریت آب مورد بررسی و ارزیابی قرار نگرفته است.

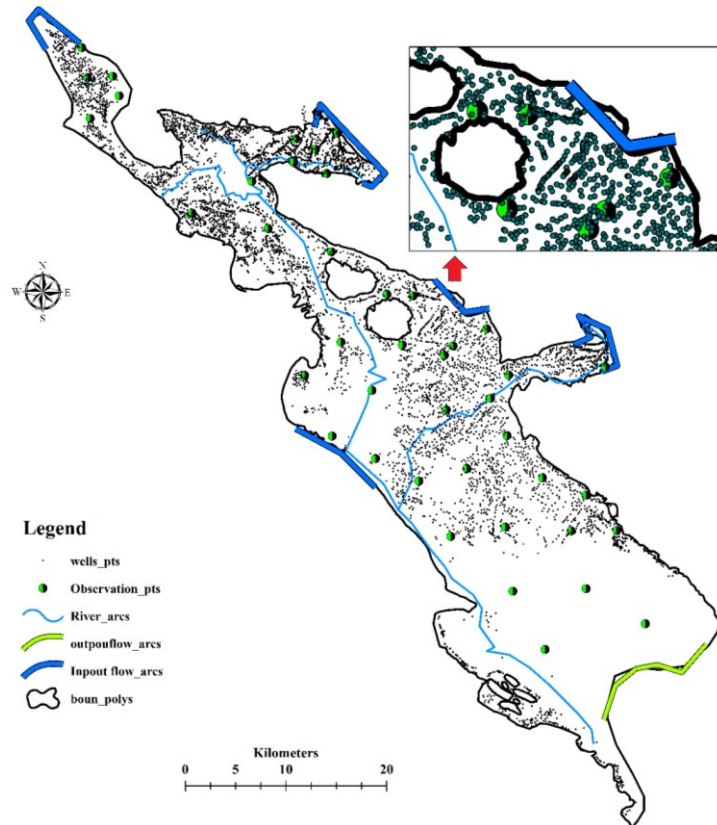
محدوده مطالعاتی مرودشت با آبخوانی به وسعت ۱۲۲۱ کیلومتر مربع در شمال غربی استان فارس واقع شده است (شکل ۱). از این آبخوان سالانه حدود ۴۸۰ میلیون متر مکعب آب زیرزمینی جهت تأمین نیاز آبی منطقه استخراج می‌گردد [1]. با وجود سد درودزن در محدوده مطالعاتی، آبخوان برداشت بی‌رویه صورت می‌گیرد. منابع تغذیه آبخوان عمدتاً شامل بارندگی، جریانات سطحی، آب‌های برگشتی از کشاورزی، شرب و صنعت و همچنین جریانات ورودی زیرزمینی است که از این طریق سالانه حجمی معادل ۴۰۰ میلیون مترمکعب آب وارد آبخوان می‌شود. بیشترین حجم تخلیه سالانه از آبخوان از طریق چاه‌های بهره‌برداری و قنات، تبخیر از آبخوان و زهکشی صورت می‌گیرد. هیدروگراف آبخوان در دهه‌های اخیر همواره روند نزولی داشته و در طول دوره ۱۶ ساله سطح ایستابی حدود ۱۲ متر افت نشان می‌دهد. سد درودزن با تنظیم حدود ۷۶۰ میلیون مترمکعب آب در سال، آب کشاورزی حدود ۷۶ هزار هکتار از اراضی منطقه را تأمین می‌نماید [2]. با این وجود در شرایط فعلی مدیریت ناصحیح منابع آب سطحی و زیرزمینی موجب شده است که آبخوان در وضعیت نامناسبی قرار گیرد. براین اساس بهینه‌سازی راهکارهای مدیریتی برای بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب در محدوده مطالعاتی ضروری است.

۲. روش کار

با هدف حداقل کردن کمبود نیاز آبی حاصل از تأمین آب سطحی و زیرزمینی و با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی همچون کنترل افت و خیز آب زیرزمینی، ظرفیت کانال‌های انتقال آب و رابطه پیوستگی سد، مدل بهینه‌سازی تلفیقی اجرا شده است. به منظور دستیابی به حد مطلوب برداشت از آب زیرزمینی در ماه‌های مختلف در محدوده مطالعاتی، تراز آب زیرزمینی توسط کد MODFLOW 2000 در نرم افزار GMS شبیه‌سازی گردید [22]. با توجه به تغییرات ضخامت آبخوان مرودشت از ۵۰ تا ۲۵۰ متر، سلول‌های مدل در ابعاد ۵۰۰ متر طراحی شده است. شیب کلی آبخوان مرودشت از شمال غرب به جنوب شرق است. مرز تغذیه آبخوان از ارتفاعات در شکل ۲ نشان داده شده است. جریان‌های آب سطحی در محدوده مطالعاتی در مسیر خود سبب تخلیه و تغذیه آبخوان می‌شوند و مهم‌ترین آنها رودخانه سفیدرود است. شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان مرودشت از طریق ۴۲ چاه مشاهده‌ای موجود در دشت انجام شده است.



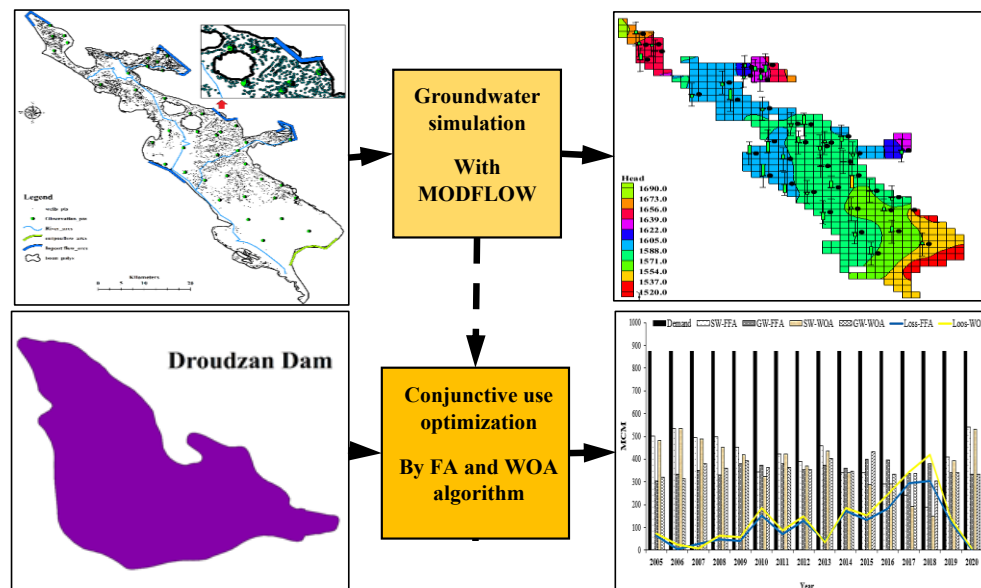
شکل ۱. موقعیت آبخوان مروودشت



شکل ۲. مدل مفهومی آبخوان مروودشت



پس از حصول نتایج مدل سازی مفهومی، تخصیص بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی با هدف حداقل کردن کمبود آب در هر ماه و در نظر گرفتن محدودیت برداشت از آب زیرزمینی و همچنین محدودیت هایی مربوط به سد انجام گردید. بدین منظور الگوریتم های فراابتکاری شکار نهنگ (WOA) و کرم شبتاب (FA) در نرم افزار متلب برای محدوده مطالعاتی کدنویسی شد. در نهایت مقادیر تخصیصی از منابع آب سطحی و زیرزمینی به همراه کمبود در هر ماه توسط هر دو الگوریتم تکاملی مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۳).



شکل ۳. روندنمای روش انجام تحقیق

الگوریتم بهینه سازی نهنگ (WOA) الگوریتمی الهام گرفته از طبیعت است که توسط میرجلیلی و لوئیس (۲۰۱۶) [21] پیشنهاد شده است. WOA یک روش بهینه سازی قوی است که در آن جستجو برای نقاط بهینه با استفاده از معادلات زیر انجام می شود:

$$D = |\vec{c}; X_t^* - X_t|$$

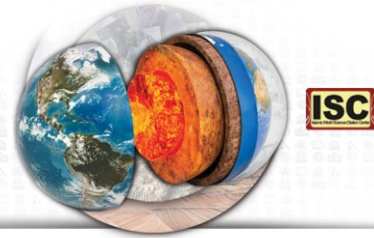
$$X_{t+1} = X_t^* - A \cdot D$$

در این روابط، t تعداد تکرار، A و D بردارهای ضریب، X^* بهترین بردار مکانی و X بردار مکانی است. بردارهای A و C از طریق روابط زیر بدست می آید:

$$A = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a}$$

$$C = 2 \cdot \vec{r}$$

A برداری است که در هر تکرار از ۲ به صفر کاهش می یابد و \vec{r} برداری تصادفی در محدوده ۰ و ۱ است [21]. الگوریتم کرم شبتاب (FA) برای اولین بار توسط یانگ در سال ۲۰۱۰ پیشنهاد شده است [20]. ایده اصلی این الگوریتم از ارتباط نوری بین کرم شبتاب الهام گرفته شده است. کرم های شبتاب نورهای موزون و کوتاه تولید می کنند. الگوی نوری هر کدام از کرم های شبتاب با یکدیگر متفاوت است. کرم های شبتاب از این نورها به دو منظور جذب جفت و شکار استفاده می کنند. فرض می شود n تعداد کرم های تابشی است و X_i امین موقعیت ذره است بنابراین میزان روشنایی هر کرم شبتاب برابر با مقدار تابع هزینه است:



$$I_i = f(x_i), \quad 1 \leq i \leq n$$

هر کرم شبتاب دارای یک ویژگی تابشی است که نشان دهنده قدرت آن است. این ویژگی مقداری نسبی است که با تغییر فاصله بین کرم شبتاب i و کرم شبتاب j تغییر می کند. تابع جاذبه عبارتست از:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2}$$

که در آن β_0 بیانگر بیشینه جذابیت با دامنه تغییرات $(0, 1)$ و γ بیانگر ضریب جذب با دامنه تغییرات $(0, \infty)$ است. r بیانگر فاصله حشره i ام از حشره j ام می باشد:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

حرکت حشره i ام به سمت حشره j ام از طریق رابطه زیر به دست می آید:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \beta_r (x_j - x_i)$$

۳. بحث

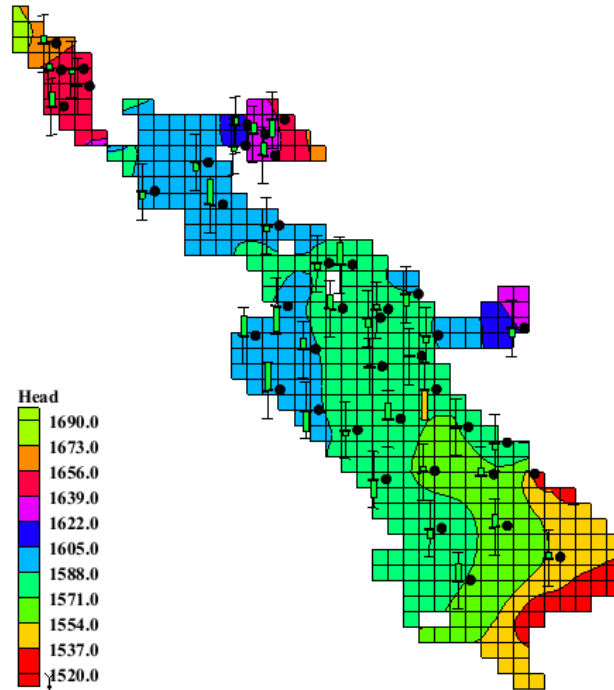
۳.۱. شبیه سازی جریان آب زیرزمینی

شبیه سازی جریان آب زیرزمینی در دو مرحله پایدار و ناپایدار (از مهر سال ۸۹ تا شهریور سال ۹۳) شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل (جدول ۱) و مقادیر RMSE برای حالت های پایدار (۰/۸۹ متر) و ناپایدار (۰/۹۰ متر) نشان دهنده دقت مناسب مدل در شبیه سازی جریان آب زیرزمینی است. همچنین جهت اطمینان از صحت شبیه سازی جریان آب زیرزمینی حدود ۱۲ گام دیگر به منظور صحت سنجی مدل اجرا گردیده که نتایج معیارهای ارزیابی خطا $RMSE=1.1$ ، $MAE=0.96$ و $R=0.98$ نشان از عملکرد مناسب مدل شبیه ساز جریان آب زیرزمینی است.

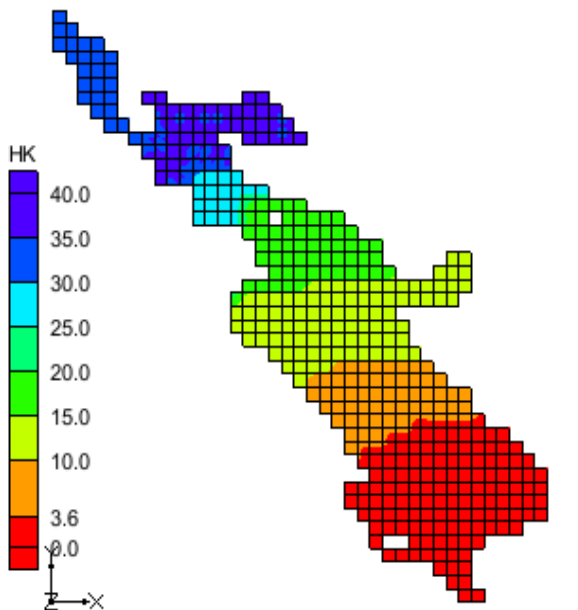
جدول ۱- نتایج معیارهای ارزیابی خطا برای شبیه سازی آب زیرزمینی

State	R ²	RMSE (m)	MAE (m)
Steady State	0.99	0.89	0.76
Transient	0.99	0.96	0.89
Validation	0.98	1.12	0.93

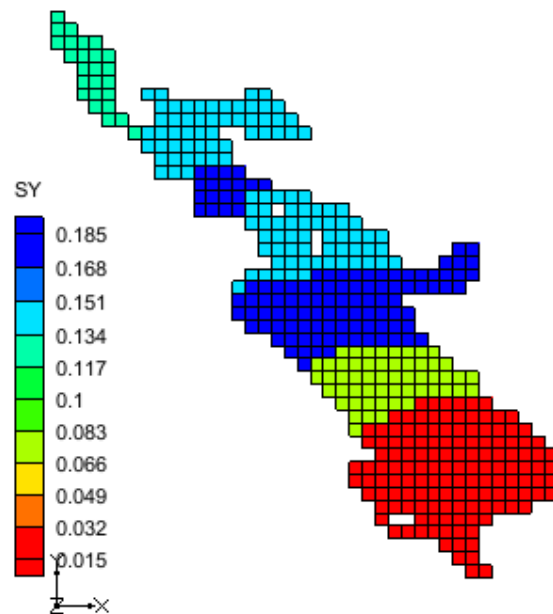
علاوه بر نتایج جدول ۱ وضعیت چاه های مشاهداتی در شکل ۴ نشان می دهد که تطابق قابل قبولی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده در هر چاه مشاهده ای وجود دارد که حاکی از خطای کمتر و ناچیز بین مقادیر ذکر شده می باشد. همچنین تغییرات تراز آب زیرزمینی از ۱۶۹۰ متر تا ۱۵۲۰ متر در محدوده مطالعاتی متفاوت است و از شمال آبخوان به طرف جنوب آن از تراز آب زیرزمینی کاسته می شود. مقادیر کالیبره شده هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره به ترتیب در حالت های پایدار و ناپایدار در شکل ۵ قابل مشاهده است.



(الف)



(ب)



(ج)

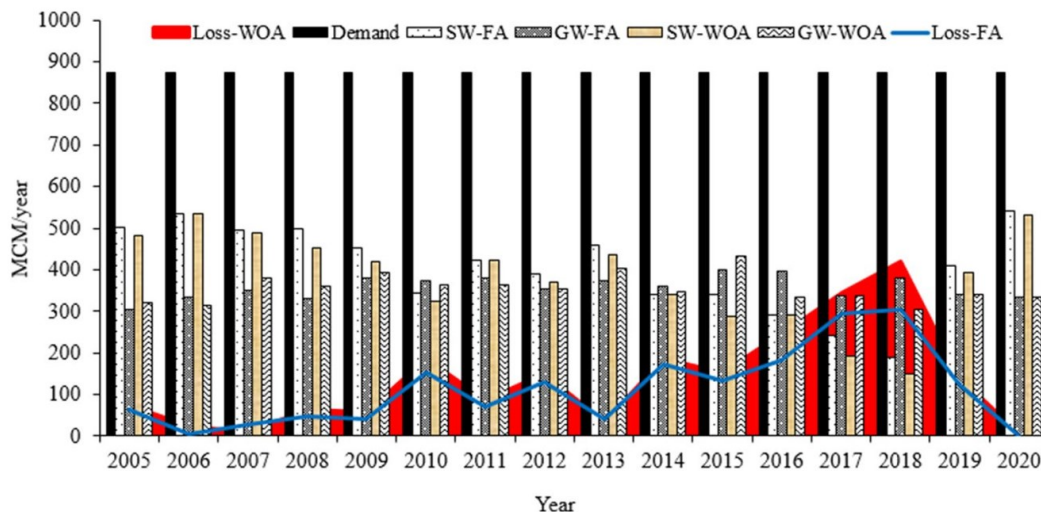
شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی تراز آب‌یرزمینی، الف: تراز آب‌یرزمینی شبیه‌سازی شده و چاه‌های مشاهداتی کالیبره‌شده ب: مقادیر هدایت هیدرولیکی کالیبره‌شده آبخوان، ج: مقادیر آبدهی ویژه کالیبره‌شده آبخوان



بیشترین مقادیر هدایت هیدرولیکی در حدود ۳۵ متر در روز و مربوط به نواحی شمال آبخوان می باشد در صورتی که در جنوب آبخوان به علت ته نشین شدن رسوبات دانه ریز کمترین مقادیر هدایت هیدرولیکی وجود دارد. مقادیر آبدهی ویژه رسوبات آبخوان بین ۲ درصد تا ۱۹ درصد متغیر است و مرکز آبخوان تغییرات آبدهی ویژه بین ۶ تا ۱۲ درصد دارد. پس از اعمال سناریوهای مختلف برداشت از آبخوان و اجراهای مختلف مدل مفهومی و محاسبه افت حاصل، مقادیر حداکثر برداشت از آب زیرزمینی برای هر ماه تعیین شده و در مدل بهینه ساز تلفیقی اعمال گردیده است.

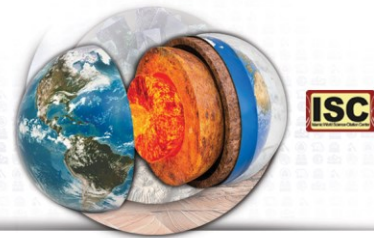
۳.۲. اجرای مدل بهینه ساز تلفیقی

مدل بهینه ساز تلفیقی برای دوره ۱۶ ساله توسط دو مدل FA و WOA اجرا گردیده است. در الگوریتم FA و در ابتدای سال های دوره آماری (۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸) به دلیل وجود منابع آب سطحی زیاد و حجم زیاد پشت مخزن سد، بیشتر نیازهای آبی به سد تخصیص داده شد. به طوری که در مدت سه سال ابتدای دوره مورد بررسی حدود ۵۰۰ تا ۵۵۰ میلیون متر مکعب از ۸۷۰ میلیون متر مکعب نیاز آبی را آب سطحی تامین کرده است (شکل ۵). لازم به ذکر است که میزان تخصیص در ابتدای سال آماری برای الگوریتم WOA مشابه با الگوریتم FA بوده است. در بررسی روند تخصیص توسط دو الگوریتم مشاهده می گردد که الگوریتم FA بر خلاف WOA از منابع آب زیرزمینی بیشتر برداشت کرده است (شکل ۵). از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ عمده نیازهای آبی توسط منابع آب سطحی در هر دو الگوریتم تامین گردیده است اما از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ به دلیل کاهش بارندگی و کاهش جریان ورودی به سد، عمده نیازهای آبی توسط آب زیرزمینی در هر دو الگوریتم تامین شده است. بیشترین کمبود در سال ۲۰۱۸ است که در الگوریتم WOA این کمبود در حدود ۴۱۰ میلیون متر مکعب و در الگوریتم FA در حدود ۳۳۰ میلیون متر مکعب می باشد. این موضوع نشان می دهد که عملکرد FA در تخصیص بهره برداری تلفیقی مناسب تر از WOA است. در سال های ۲۰۰۶، ۲۰۰۷ و ۲۰۲۰ کمترین کمبود آب مشاهده می شود. در حالت کلی تخصیص هر دو الگوریتم مشابه هم بوده اما در الگوریتم FA سعی شده است تا تخصیص بیشتر از منابع آب سطحی انجام شود. همین عامل موجب شده است که مقادیر برداشت از آب زیرزمینی کمتر از WOA باشد.



شکل ۵- نتایج تخصیص منابع آب سطحی و زیرزمینی توسط دو الگوریتم پیشنهادی (دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰)

پس از اجرای مدل تلفیقی بهینه، بیشترین درصد تامین آب در سال ۲۰۲۰ صورت گرفته که در آن حدود ۱۰۰ درصد نیازها توسط الگوریتم FA و ۹۹ درصد نیازهای آبی توسط WOA تامین شده است. سپس در سال های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ حدود ۹۹ و ۹۷ درصد نیازهای توسط الگوریتم FA تامین گردیده است. در این سال ها به ترتیب حدود ۹۷ و ۹۹ درصد نیازهای آبی تامین شده است. در سال ۲۰۰۸ که منابع آب سطحی دارای کاهش شدید بوده و عمده نیازهای آبی توسط منابع آب زیرزمینی تامین گردیده است، در الگوریتم FA حدود ۶۵

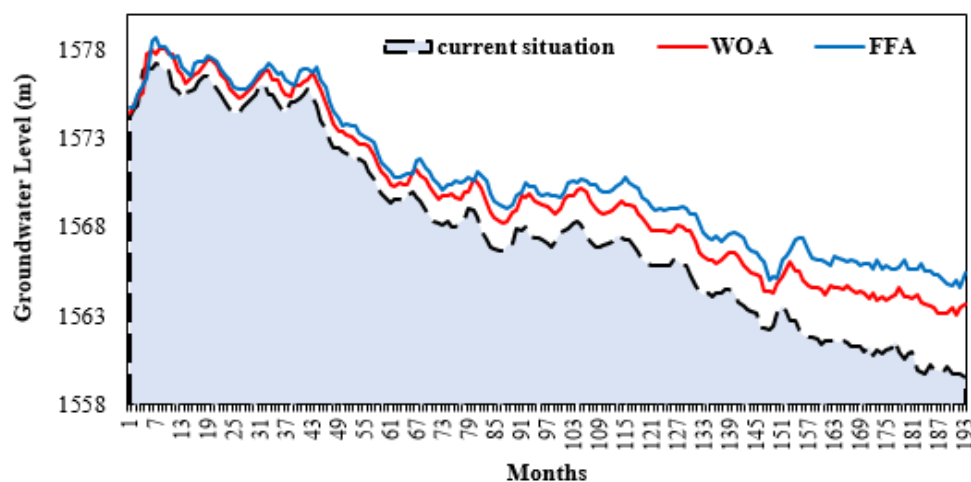


درصد نیازها و در الگوریتم WOA حدود ۵۲ درصد نیازها تامین شده است. براین اساس با استفاده از الگوریتم FA می توان به حداکثر تامین نیازهای آبی دست یافت. در بررسی درصدهای تامین نیازها در جدول ۶ ملاحظه می گردد که در بیشتر سالها درصد بیشتری از نیازها توسط الگوریتم FA تامین شده است (جدول ۲).

جدول ۲- درصد تامین نیاز آبی سالانه توسط الگوریتم های پیشنهادی

درصد تامین			درصد تامین		
year	FA	WAO	year	FA	WOA
2005	92.5	91.6	2013	95.3	96.0
2006	99.3	97.3	2014	80.17	78.7
2007	96.7	99.0	2015	84.8	82.7
2008	94.7	92.7	2016	79.1	71.9
2009	95.2	93.3	2017	66.4	60.7
2010	82.4	78.7	2018	65.2	51.8
2011	91.9	90.2	2019	84.3	83.8
2012	85.3	83.6	2020	100	99.0

اثر تخصیص از منابع آب زیرزمینی حاصل از اجرای مدل بهره برداری تلفیقی بر روی عملکرد آبخوان مثبت ارزیابی شد. در شکل ۶ نتایج تخصیص توسط هر دو الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است. از آنجایی که در طول دوره بهینه سازی در مجموع حدود ۱۲ متر افت آب زیرزمینی حاصل گردید، با اجرای رویکرد تلفیقی حدود ۴ تا ۵ متر خیز آب زیرزمینی اتفاق افتاده است. خیز آب زیرزمینی در اجرای مدل تلفیقی توسط الگوریتم نهنگ حدود ۴ متر و در الگوریتم کرم شبتاب در حدود ۵ متر است. در نتیجه عملکرد الگوریتم FA را می توان مثبت تر از WOA ارزیابی نمود. در سال ۲۰۱۸ با توجه به کاهش شدید بارندگی و مقدار جریان ورودی به سد از منابع آب زیرزمینی در بیشترین حالت ممکن برداشت انجام شده است به همین سبب در گام ماه های ۱۳۸ تا ۱۴۲ روند نزولی شدید تراز آب زیرزمینی مشاهده می شود. در چند سال ابتدای دوره به دلیل استفاده کمتر از منابع آب زیرزمینی مقادیر افت آب زیرزمینی با روند بسیار کمتری و در وضعیت ثابتی قرار دارد اما در ادامه روند نزولی با شدت بیشتری ادامه می یابد، با این وجود و روند تغییرات تراز آب زیرزمینی نشان می دهد که در طول دوره مورد بررسی پایداری نسبی در آبخوان مورد نظر ایجاد شده است. اما برای آنکه در وضعیت مناسبی برسد نیاز است روند برداشت در سال های آینده نیز حفظ گردید (شکل ۶).



شکل ۶- تغییرات تراز آب زیرزمینی در طول دوره مورد بررسی (۲۰۲۰-۲۰۰۵)



۴. نتایج

در این تحقیق، به منظور بهره‌برداری بهینه تلفیقی آب‌زیرزمینی و آب سطحی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری FA و WOA استفاده گردید. بدین منظور ابتدا، شبیه‌سازی تراز آب‌زیرزمینی توسط مدل مفهومی کد MODFLOW انجام گردید. مقادیر RMSE حاصل از شبیه‌سازی برای حالت‌های پایدار (۰/۸۹ متر) و ناپایدار (۰/۹۰ متر) بوده است که نشان از دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی جریان آب-زیرزمینی دارد. مدل بهینه تلفیقی توسط الگوریتم شکار نهنگ و الگوریتم کرم شبتاب اجرا و نتایج برای سال‌های مختلف مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی نشان می‌دهد که میزان تخصیص در ابتدای سال آماری توسط الگوریتم WOA مشابه با الگوریتم FA است. بررسی روند تخصیص حاکی از آن است که الگوریتم FA بر خلاف WOA از منابع آب زیرزمینی بیشتر برداشت کرده است. از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ در هر دو الگوریتم عمده نیازهای آبی توسط منابع آب سطحی تامین گردیده است. از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ به دلیل کاهش بارندگی و کاهش جریان ورودی به سد عمده نیازهای آبی توسط آب‌زیرزمینی در هر دو الگوریتم تامین شده است. در اجرای مدل تلفیقی توسط الگوریتم نهنگ حدود ۴ متر و در الگوریتم کرم شبتاب در حدود ۵ متر خیز آب زیرزمینی ایجاد گردیده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که عملکرد FA در تخصیص بهره‌برداری تلفیقی مناسبتر از WOA است.

۵. منابع

- [1] شرکت آب منطقه‌ای فارس، ۱۴۰۱. گزارش بیالان منابع آب حوضه آبریز مرودشت.
- [2] شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۸. گزارش منابع آب، گروه مطالعات آبهای زیرزمینی.
- [3] Afshar, A., Zahraei, A., Mariño, M. A., 2010. Large-scale nonlinear conjunctive use optimization problem: decomposition algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136, 59-71.
- [4] Mirjalili, A., 2016. SCA: A Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems, *Knowledge-Based Systems*, 96, 120-133.
- [5] Heidari, A., Mirjalili, A., Faris, H., Ibrahim Aljarah, I., Mafarja, M., Chen, H., 2019. Harris hawks optimization: Algorithm and applications, *Future Generation Computer Systems*, 97, 849-872.
- [6] Karamouz M, Tabari MMR, Kerachian, R., 2007. Application of genetic algorithms and artificial neural networks in conjunctive use of surface and groundwater resources. *Water Int.*, 32, 163–176.
- [7] Karamouz, M., Zahraie, B., Kerachian, R., Eslami, A., 2010. Crop pattern and conjunctive use management: a case study. *Irrig Drain.*, 59, 161–173.
- [8] Safavi, H.R., Darzi, F., Mariño, M.A., 2010. Simulation-optimization modeling of conjunctive use of surface water and groundwater, *Water Resour Manage.*, 24, 1965–1988.
- [9] Safavi, H.R., Enteshari, S., 2016. Conjunctive use of surface and groundwater resources using the ant system optimization, *Agric. Water Manag.*, 173, 23–34.
- [10] Rezaei, F., Safavi, H.R., Zekri, M., 2017a. A hybrid fuzzy-based multiobjective PSO algorithm for conjunctive water use and optimal multi-crop pattern planning, *Water Resour Manage.*, 31, 1139–1155.
- [11] Rezaei, F., Safavi, H.R., Mirchi, A., Madani, K., 2017b. f-MOPSO: an alternative multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use management, *J. Hydro-Environ. Res.*, 14, 1–18.



- [12] Yousefi, M, Banihabib, M.E., Soltani, J., Roozbahani, A., 2018. Multiobjective particle swarm optimization model for conjunctive use of treated wastewater and groundwater, *Agric. Water Manag.*, 208, 224–231.
- [13] Mehrabi, A., Heidarpour, M., Safavi, H.R., Rezaei, F., 2021. Assessment of the optimize scenarios for economic-environmental conjunctive water use utilizing gravitational search algorithm, *Agric. Water Manag.*, 246, 106688.
- [14] Bazargan-Lari, M.R., Kerachian, R., Mansoori, A., 2009. A conflict resolution model for the conjunctive use of surface and groundwater resources that considers water-quality issues: a case study. *Environ. Manage.*, 43, 470.
- [15] Yang, C.C., Chang, L.C., Chen, C.S., Yeh, M.S., 2009. Multi-objective planning for conjunctive use of surface and subsurface water using genetic algorithm and dynamics programming. *Water Resour. Manage.*, 23, 417–437.
- [16] Rafipour-Langeroudi, M., Kerachian, R., Bazargan-Lari, M.R., 2014. Developing operating rules for conjunctive use of surface and groundwater considering the water quality issues, *KSCE J. Civ. Eng.*, 18, 454–461.
- [17] Sepahvand, R., Safavi, H.R., Rezaei, F., 2019. Multi-Objective Planning for Conjunctive Use of Surface and Ground Water Resources Using Genetic Programming, *Water Resour. Manage.* 33, 2123–2137.
- [18] Wang, H., Wang, W., Cui, Z., Zhou, X., Zhao, J., Li, Y., 2018. A new dynamic firefly algorithm for demand estimation of water resources, *Inf. Sci.*, 438, 95–106.
- [19] Wu, J., Wang, Y.G., Burrage, K., Tian, Y.C., Lawson, B., Ding, Z., 2020, An improved firefly algorithm for global continuous optimization problems, *Expert. Syst. Appl.*, 149, 113340.
- [20] Yang, X. S., 2010. Firefly algorithm, Levy flights and global optimization. In: *Research and development in intelligent systems XXVI*, Springer, London, pp. 209–218.
- [21] Mirjalili, S, Lewis, A., 2016. The whale optimization algorithm, *Adv. Eng. Softw.*, 95, 51–67.
- [22] Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., McDonald, M.G., 2000. Modflow-2000, the U.S. Geological Survey modular groundwater model-user guide to modularization concepts and the groundwater flow process, Open-file Rep. U. S. Geol. Sur., 92, pp. 134.