

Estimation of Hydraulic Parameters of Confined Aquifers by Artificial Fish Swarm Algorithm

SOMAYEH JANATROSTAMI^{*}, MINA HABIBPANAHI², MAHSA SHEIKHKAZEMI³

1. Department of Water Engineering, College of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

(Received: Nov 13, 2018- Revised: July. 23, 2019- Accepted: Sep. 7, 2019)

ABSTRACT

Groundwater modeling is essential in aquifer management and planning. Determination of hydraulic parameters in aquifer plays a key role in groundwater modeling, therefore choosing a suitable method for determination these parameters is very important. So far, various methods have been developed to estimate hydraulic parameters of aquifers using in situ pump test measurements. In this research, Artificial Fish Swarm Algorithm (AFSA) was evaluated for estimation of the hydraulic conductivity and storage coefficient parameters in three confined aquifers, using graphic method and Genetic Algorithm (GA). AFSA is one of the algorithms inspired both from the nature and swarm intelligence algorithms. The results obtained by AFSA, graphic method and GA were compared and it was found that the AFSA similar to GA is a proper method for estimation of aquifer hydraulic coefficients and it has a better performance as compared to the graphic method. As, AFSA is not sensitive to initial values of decision variables, it could be useful for estimation parameters of aquifers in which geological characteristics are unknown.

Keywords: Artificial Fish Swarm Algorithm, Hydraulic Parameters, Pumping Well, Optimization.

تخمین پارامترهای هیدرولیکی سفره‌های تحت فشار با استفاده از الگوریتم دسته ماهی‌های مصنوعی

سمیه جنت‌رستمی^{۱*}، مینا حبیب‌پناه^۲، مهسا شیخ‌کاظمی^۳

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۲۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۵/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۶/۱۶)

چکیده

در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب زیرزمینی تهیه مدل ریاضی ضروری است. در تهیه مدل‌های ریاضی آب زیرزمینی، تعیین مقادیر پارامترهای هیدرولیکی آبخوان نقش مهمی را ایفا می‌کند، بنابراین انتخاب روشی مناسب برای تعیین این مقادیر مهم و ضروری است. تاکنون روش‌های متفاوتی برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان با استفاده از نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایش پمپاژ مطرح شده است. در این تحقیق، روش بهینه‌سازی الگوریتم دسته ماهی‌های مصنوعی برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی سه آبخوان تحت فشار با روش گرافیکی و الگوریتم GA مورد ارزیابی قرار گرفت. الگوریتم دسته ماهی‌های مصنوعی (AFSA) یکی از الگوریتم‌های هوش جمعی است که از رفتارهای اجتماعی دسته ماهی‌ها در طبیعت الهام گرفته شده است. مقایسه نتایج بدست آمده در این روش و روش گرافیکی و GA نشان داد که AFSA همانند روشی مناسب برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان است و عملکرد بهتری نسبت به روش گرافیکی دارد. با توجه به اینکه این الگوریتم به انتخاب مقادیر اولیه متغیر تصمیم برای شروع حل حساس نیست، می‌تواند نسبت به GA، راه حل مناسب‌تری برای تخمین پارامترهای آبخوان‌هایی باشد که خصوصیات زمین‌شناسی آن ناشناخته است.

واژه‌های کلیدی: آزمایش پمپاژ، الگوریتم دسته ماهی‌های مصنوعی، بهینه‌سازی، پارامترهای هیدرولیکی.

مقدمه

در برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب، منابع آب زیرزمینی یکی از قابل اطمینان‌ترین منابع آب است که برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. تهیه مدل مناسب برای سیستم پیچیده آب زیرزمینی ضروری است. مقادیر پارامترهای هیدرولیکی مانند ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره و غیره در آبخوان نقش مهمی را در تهیه مدل ریاضی دارد بنابراین تعیین دقیق این پارامترها برای رسیدن به مدلی مناسب لازم است. این پارامترها را می‌توان در آزمایشگاه اندازه‌گیری کرد که بررسی‌ها نشان داد استفاده از این روش برای تعیین ضرایب آبخوان مناسب نیست (Bateni *et al.*, 2015; Jha *et al.*, 2006)، همچنین می‌توان مقادیر این پارامتر را از طریق آزمایشاتی که به صورت میدانی در مزرعه انجام می‌شود بدست آورد که بسیار پرهزینه است (Jha *et al.*, 2006).

یکی از روش‌های مورد استفاده برای تخمین پارامترها، روش مدلسازی معکوس است در این روش متغیرهایی مانند ارتفاع بار هیدرولیکی، که از طریق اندازه‌گیری سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای به صورت دقیق تعیین می‌شود را معلوم فرض می‌کنند و با توجه به مقادیر آن پارامترهای هیدرولیکی را به

صورت معکوس بدست می‌آورند. محققانی نظیر (Cooley (1977), Dagan and Rubin (1988), Carrera and Neuman (1986), Abbaspour *et al.* (1997) مطالعاتی در این زمینه انجام دادند. رایج‌ترین روش مورد استفاده در مدلسازی معکوس استفاده از آزمایش پمپاژ است که روش استاندارد برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان است (Jha *et al.*, 2006; Neuman, 1972). پارامترهای آبخوان در آزمایش پمپاژ با استفاده از داده‌های افت - زمان اندازه‌گیری شده در چاه پمپاژ از طریق روش‌های تحلیلی بدست می‌آید که با توجه به نوع آبخوان مورد مطالعه از روش تیس و هانتوش برای آبخوان تحت فشار و آزاد استفاده می‌شود (Theis, 1935; Hantush, 1959).

به منظور تعیین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان در حل مسائل معکوس از دو روش گرافیکی و روش‌های ریاضی بر پایه گرادیان استفاده می‌شود. در روش گرافیکی پارامترهای هیدرولیکی آبخوان از طریق برهم‌نهی نمودارها و انطباق منحنی داده‌ها بر منحنی تیپ بدست می‌آید که در این روش، جواب مسئله قابل پیش‌بینی نیست و کاملاً تقریبی بدست می‌آید. برای رسیدن به جواب تقریباً درست در این روش‌ها لازم است زمان به

بر روی کاربردهای الگوریتم AFSA نشان داد که این الگوریتم در تخمین پارامترهای یک سیستم بهترین نتایج را ارائه می‌دهد. به عنوان مثال، (Sérgio and Steffen, 2014) در طراحی سیستم‌های مهندسی شیمی؛ (Yazdani et al., 2012) در تخمین پارامترهای چند مسئله مرجع مهندسی؛ (Cheng and Xiang, 2017)، در تخمین پارامترهای مدل کامپوزیت از الگوریتم AFSA استفاده کردند. با توجه به کاربردهای این الگوریتم در تخمین پارامترها، در این مطالعه سعی گردید نتایج حاصل از بکارگیری الگوریتم AFSA در تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان‌های تحت فشار در سه مجموعه داده‌های آزمایش پمپاژ مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

مدیریت صحیح منابع آب‌های زیرزمینی تا حد زیادی بستگی به تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان دارد، بنابراین تعیین دقیق‌تر این پارامترها دارای اهمیت زیادی است. در این راستا، آزمایش پمپاژ، روش شناخته‌شده‌ای برای تعیین خصوصیات هیدرولیکی یک آبخوان است. این آزمایش با استفاده از پمپاژ آب از یک چاه و مشاهده پاسخ آبخوان در چاه‌های مشاهده‌ای اطراف چاه پمپاژ انجام می‌شود. افت‌های ارتفاع بار هیدرولیکی بدست آمده در چاه‌های مشاهده‌ای این آزمایش می‌تواند در شناخت آبخوان و تخمین پارامترهایی مانند ضریب قابلیت انتقال، ضریب ذخیره، ضریب هدایت هیدرولیکی، ضریب نشت و آبدهی ویژه مورد استفاده قرار گیرد.

همانطور که ذکر گردید، تخمین پارامترها با استفاده از روش استاندارد تیس و هانتوش انجام می‌شود که معادلات مربوط به این روش، از طریق روش گرافیکی و روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی (الگوریتم‌های ریاضی و الگوریتم‌های تکاملی و فراکاشی) حل می‌شود. در این مطالعه، تخمین پارامترهای هیدرولیکی مربوط به سه آبخوان تحت فشار مورد بررسی قرار می‌گیرد. داده‌های صحرائی آزمایش پمپاژ (داده‌های زمان - افت) مربوط به سه چاه مشاهده‌ای W_1 (Todd and Mays, 2005)، W_2 (Kruseman and De Ridder, 1983) و W_3 (Batu, 1998) به همراه فاصله چاه‌های مشاهده‌ای از چاه‌های پمپاژ و مقادیر ثابت دبی پمپاژ در جدول (۱) آورده شده است.

در ادامه، برای تعیین پارامترهای هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان در مدل ریاضی تیس از روش گرافیکی و الگوریتم بهینه‌سازی AFSA استفاده می‌شود. همچنین، با توجه به کاربردهای موفقیت‌آمیز الگوریتم ژنتیک (GA) در بهینه‌سازی مسائل مهندسی، این الگوریتم کاربرد گسترده‌ای در بین محققان

نسبت زیادی صرف شود. روش‌های بر پایه گرادیان شامل روش‌های غیرخطی، گوس-نیوتن و ... هستند. با توجه به اینکه جواب‌های بدست آمده در روش‌های بر پایه گرادیان نسبت به روش‌های گرافیکی دقیق‌تر است اما مشکلاتی نیز در استفاده از این روش‌ها وجود دارد (Jha et al., 2006).

در مسائل بهینه‌سازی آب زیرزمینی، مدل‌های آبخوان معمولاً غیرمحدب و غیرخطی هستند. استفاده از روش‌های ریاضی کلاسیک در این گونه مسائل ممکن است منجر به مقادیر بهینه موضعی به جای بهینه سراسری شود، همچنین همگرایی جواب در این روش‌ها تا حد زیادی بستگی به انتخاب نقطه شروع اولیه دارد و در مسائل با تابع هدف قطعه‌ای و ناپیوسته ممکن است بهینه موضعی بدست آید. برای حل این مشکل در روش‌های ریاضی بر پایه گرادیان، استفاده از روش‌هایی مانند الگوریتم‌های تکاملی و فراکاشی پیشنهاد شد که این الگوریتم‌ها قابلیت تعیین جواب بهینه سراسری را در مسائل غیرخطی و ناپیوسته دارند. همچنین این الگوریتم‌ها در مسائل پیچیده و بزرگ به جای رسیدن به یک جواب بهینه موضعی، جواب نزدیک به بهینه سراسری را بدست می‌آورد. کاربر در اجراهای متوالی این الگوریتم‌ها با تعدادی از جواب‌های بهینه مواجه می‌شوند که می‌تواند نتایج را مورد ارزیابی قرار دهد و در پایان یکی از جواب‌ها را به عنوان جواب بهینه انتخاب کند (Bateni et al., 2015).

روش شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) یکی از روش‌هایی است که در تخمین پارامترهای آبخوان بکار برده شده است (Lin and Chen, 2006). (Bateni et al., 2015) برای تخمین پارامترهای آبخوان از الگوریتم GA و ACO برای آبخوان‌های تحت فشار، آزاد و نشتی استفاده کردند که نتایج آن‌ها نشان داد این الگوریتم‌ها نسبت به روش برنامه‌ریزی غیرخطی جواب‌های مناسب‌تری ارائه می‌دهد.

با توجه به کاربرد گسترده الگوریتم‌های تکاملی و فراکاشی در علوم مهندسی، استفاده از الگوریتمی که وابسته به مقادیر اولیه متغیر تصمیم نباشد در تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان با استفاده از نتایج آزمایش پمپاژ ضرورت پیدا می‌کند، به خصوص هنگامی که شناخت درستی از خصوصیات زمین‌شناسی آبخوان مورد مطالعه در دسترس نباشد. بنابراین در این مطالعه، به منظور تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان از یکی از الگوریتم‌های هوش مصنوعی به نام الگوریتم دسته‌ماهی‌های مصنوعی (AFSA) استفاده شده است. AFSA از رفتارهای اجتماعی دسته‌ماهی‌ها در طبیعت الهام گرفته شده که توسط Li et al. (2002) ارائه شده است. سرعت همگرایی بالا، غیرحساس بودن به مقادیر اولیه از ویژگی‌های مهم این الگوریتم است. نتایج بررسی‌های انجام گرفته

داده‌های (Asghari Moghaddam *et al.* (2008) است که آن‌ها از الگوریتم GA برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی استفاده نمودند، بنابراین نتایج این محققان می‌تواند معیاری برای ارزیابی AFSA در این مطالعه باشد.

علوم مختلف مهندسی داشته است. بنابراین در صورت استفاده از یک روش حل جدید برای مسائل بهینه‌سازی معمولاً از GA به عنوان معیار ارزیابی و تایید روش جدید استفاده می‌شود. از آنجا که مجموعه داده‌های مورد بررسی در این مطالعه مشابه مجموعه

جدول ۱- داده‌های صحرائی آزمایش‌های پمپاژ در چاه‌های موردنظر در این مطالعه

W ₁				W ₂				W ₃			
Q= ۲۵۰۰ m ³ /day , r = ۶۰ m				Q= ۷۸۸ m ³ /day , r = ۹۰ m				Q= ۵۴۰ m ³ /day , r = ۶۰ m			
t (min)	S _{obs} (m)	t (min)	S _{obs} (m)	t (min)	S _{obs} (m)	t (min)	S _{obs} (m)	t (min)	S _{obs} (m)	t (min)	S _{obs} (m)
۱	۰/۲	۸۰	۰/۹۳	۱/۵	۰/۰۱۵	۵۳	۰/۴۲۹	۳	۰/۰۲۲	۱۰۶	۰/۶۰۲
۱/۵	۰/۲۷	۱۰۰	۰/۹۶	۲	۰/۰۲۱	۶۰	۰/۴۴۴	۴	۰/۰۳	۱۲۰	۰/۶۲۲
۲	۰/۳	۱۲۰	۱	۲/۱۶	۰/۰۲۳	۷۵	۰/۴۶۷	۴/۳	۰/۰۳۳	۱۵۰	۰/۶۵۴
۲/۵	۰/۳۴	۱۵۰	۱/۰۴	۲/۶۶	۰/۰۴۴	۹۰	۰/۴۹۴	۵/۳	۰/۰۶۲	۱۸۰	۰/۶۹
۳	۰/۳۷	۱۸۰	۱/۰۷	۳	۰/۰۵۴	۱۰۵	۰/۵۰۷	۶	۰/۰۷۶	۲۲۰	۰/۷۱
۴	۰/۴۱	۲۱۰	۱/۱	۳/۵	۰/۰۷۵	۱۲۰	۰/۵۲۸	۷	۰/۱۰۵	۲۴۵	۰/۷۴
۵	۰/۴۵	۲۴۰	۱/۱۲	۴	۰/۰۹	۱۵۰	۰/۵۵	۸	۰/۱۲۶	۳۰۰	۰/۷۴۴
۶	۰/۴۸			۴/۳۳	۰/۱۰۴	۱۸۰	۰/۵۶۹	۸/۷	۰/۱۴۶	۳۶۰	۰/۷۹۵
۸	۰/۵۳			۵/۵	۰/۱۳۳	۲۴۸	۰/۵۹۳	۱۱	۰/۱۸۶	۵۰۰	۰/۸۳
۱۰	۰/۵۷			۶	۰/۱۵۳	۳۰۱	۰/۶۱۴	۱۲	۰/۲۱۴	۶۱۰	۰/۸۶
۱۲	۰/۶			۷/۵	۰/۱۷۸	۳۶۳	۰/۶۳۶	۱۵	۰/۲۵	۷۳۰	۰/۸۹
۱۴	۰/۶۳			۹	۰/۲۰۶	۴۲۲	۰/۶۵۷	۱۸	۰/۲۸۸	۸۵۰	۰/۹۲
۱۸	۰/۶۷			۱۳	۰/۲۵	۵۴۲	۰/۶۷۹	۲۷	۰/۳۵	۱۱۰۰	۰/۹۵
۲۴	۰/۷۲			۱۵	۰/۲۷۵	۶۰۲	۰/۶۸۸	۳۱	۰/۳۸۵		
۳۰	۰/۷۶			۱۸	۰/۳۰۵	۶۸۰	۰/۷۰۱	۳۵	۰/۴۲۷		
۴۰	۰/۸۱			۲۵	۰/۳۴۸	۷۸۵	۰/۷۱۸	۵۰	۰/۴۸۷		
۵۰	۰/۸۵			۳۰	۰/۳۶۴	۸۴۵	۰/۷۱۶	۶۰	۰/۵۱		
۶۰	۰/۹			۴۰	۰/۴۰۴			۸۰	۰/۵۶۶		

تیلور^۱ و به ازای $u > 1$ از کوادراتور گوس - لاگر^۲ محاسبه می‌شود (Tseng and Lee, 1998). در معادله ۳، s ضریب ذخیره بدون بعد و t زمان سپری شده از شروع پمپاژ است.

روش‌های حل مدل ریاضی تیس

روش گرافیکی:

همانطور که در بخش مقدمه ذکر شد، روش گرافیکی یکی از اولین روش‌هایی است که برای تعیین مقادیر پارامترهای آبخوان مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تعیین پارامترهای آبخوان مانند قابلیت انتقال (T) و ضریب ذخیره (S)، آزمایش پمپاژ انجام می‌شود و افت‌ها در فواصل زمانی مشخص در چاه پمپاژ و چند چاه مشاهده‌ای در اطراف چاه پمپاژ اندازه‌گیری می‌شود. در ادامه، داده‌های زمان-افت اندازه‌گیری شده با استفاده از روش‌های گرافیکی استاندارد مربوط به آبخوان‌های آزاد و تحت فشار تجزیه و تحلیل می‌شود. در ادامه، با تطبیق منحنی‌های تیس با منحنی داده‌های میدانی، نقطه انطباقی بدست می‌آید که با توجه به مدل

مدل ریاضی تیس در آزمایش پمپاژ

مدل Theis، معروف‌ترین مدل ریاضی است که در آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، این مدل، جریان شعاعی را در چاه حفر شده در محیط همگن و یکنواخت و در یک آبخوان تحت فشار شبیه‌سازی می‌کند. مدل Theis به صورت معادله زیر است (Freeze and Cherry, 1979):

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

در این رابطه $s(r, t)$ افت در زمان t و در فاصله r از چاه پمپاژ، Q مقدار برداشت ثابت از چاه پمپاژ، T مقدار قابلیت انتقال سفره و $W(u)$ تابع چاه است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u} du}{u}$$

که:

$$u = \frac{r^2 \cdot s}{4Tt}$$

مقدار $W(u)$ به ازای $0 < u \leq 1$ با استفاده از بسط سری

ادامه می دهد. در این الگوریتم، Step حداکثر طول گام حرکت است و فاصله بین دو ماهی مصنوعی که در وضعیت های X_i و X_j هستند با $d_{ij} = \|X_i - X_j\|$ نشان داده می شود.

مدل ماهی مصنوعی شامل دو بخش از متغیرها و توابع است که متغیرها شامل X (موقعیت فعلی ماهی مصنوعی)، step (حداکثر طول گام حرکت)، visual، try_number (سقف تعداد آزمایش)، max_generation (حداکثر تعداد تکرارها یا تعداد نسل)، fish_number (تعداد ماهی های مصنوعی تولید شده در هر نسل) و فاکتور شلوغی δ ($0 < \delta < 1$) می باشد. همچنین توابع شامل حرکت آزادانه، رفتار جستجوی غذا، رفتار حرکت گروهی و رفتار دنباله روی (پیروی) می باشد.

رفتار حرکت آزادانه: در دنیای طبیعی اگر ماهی ها موفق به یافتن غذا نشوند، بصورت آزادانه حرکت می کنند. در الگوریتم AFSA هنگامی که ماهی مصنوعی نتواند خود را به موقعیتی با مقدار غذای بیشتری برساند، بصورت تصادفی یک گام در فضای مسئله حرکت می کند، که بصورت فرمول زیر است:

$$X(t+1) = X(t) + step \times rand(-1,1)$$

که در آن $rand(-1,1)$ یک بردار D بعدی از اعداد تصادفی در بازه $[-1,1]$ با توزیع یکنواخت است.

رفتار جست و جوی غذا: اگر X_i وضعیت فعلی ماهی مصنوعی باشد، X_j می تواند وضعیتی باشد که به صورت تصادفی در میدان دید ماهی مصنوعی انتخاب می شود.

$X_j = X_i + Visual \cdot rand(-1,1)$

اگر تراکم و غلظت غذا مقدار تابع هدف این الگوریتم باشد و به صورت تابع $Y = f(X)$ بیان شود، می توان رفتار جستجوی غذا به صورت زیر تعریف کرد. در این حالت تراکم غذایی در X_j را با تراکم غذایی در وضعیت فعلی (X_i) مقایسه می کنند، در صورتی که مسئله بیشینه سازی باشد و $Y_i < Y_j$ شود ماهی مصنوعی موردنظر از وضعیت فعلی خود در جهت X_j یک گام به جلو حرکت می کند که به صورت زیر محاسبه می شود:

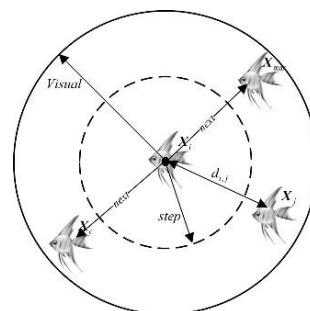
$$X_i^{t+1} = X_i^t + \frac{X_j - X_i^t}{\|X_j - X_i^t\|} \cdot step \cdot rand(0,1)$$

اما اگر $Y_i < Y_j$ نباشد، یک وضعیت X_j دیگر با استفاده از رابطه ۱ انتخاب نموده و دوباره تراکم غذایی آن ارزیابی می شود و بررسی می گردد که آیا شرط پیشروی را ارضا می کند یا نه؟ اگر پس از try_number تکرار موفق به تامین شرط پیشروی ($Y_i < Y_j$) نشود، رفتار حرکت آزادانه برای ماهی مصنوعی i اجرا می شود.

تیس مقادیر پارامترها محاسبه می شود. در این مطالعه، این فرآیند با استفاده از نرم افزار Aquifer Test انجام می شود که توسط شرکت هیدروژئولوژیکی واترلو (WHI) در کانادا توسعه داده شده است. این نرم افزار، ضرایب آبخوان را با استفاده از داده های میدانی آزمایش پمپاژ برای انواع آبخوان های تحت فشار، آزاد، نشتی و درز و شکافدار از طریق روش های تیس، کوپر-ژاکوب و چاو محاسبه می کند.

الگوریتم دسته ماهی های مصنوعی:

الگوریتم دسته ماهی های مصنوعی بر پایه توابعی است که از رفتارهای اجتماعی دسته ماهی ها برگرفته شده اند. ماهی ها با جستجوی فردی یا گروهی می توانند مناطقی را پیدا کنند که دارای غذای بیشتری است. با توجه به این ویژگی ماهی ها، مدل ماهی مصنوعی با رفتارهای حرکت آزادانه، جستجوی غذا، حرکت گروهی و دنباله روی ارائه شده است که از طریق آن ها فضای حل مسئله جستجو می شود. محیطی که ماهی مصنوعی در آن زندگی می کند فضای حل ماهی های مصنوعی دیگر نیز است. تابع هدف این الگوریتم درجه تراکم غذا در آب است و ماهی ها در پایان این الگوریتم به مکانی می رسند که درجه تراکم و غلظت غذا در آنجا بیشترین (بهینه سراسری) باشد. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می شود یک ماهی مصنوعی در میدان دید خود قادر است مفاهیم خارجی را از طریق حس بینایی درک کند.



شکل ۱- ماهی مصنوعی و محیط اطراف آن

وضعیت فعلی ماهی مصنوعی توسط بردار $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ نشان داده می شود. Visual میدان دید ماهی مصنوعی است و X_V نیز موقعیتی در میدان دید ماهی است که ماهی مصنوعی می خواهد به آنجا برود. اگر وضعیت X_V از نظر تراکم غذایی بهتر از وضعیت فعلی باشد، ماهی یک گام در جهت X_V به جلو می رود و در موقعیت جدید X_{next} قرار می گیرد، در غیر این صورت ماهی مصنوعی به گشت زنی در محدوده میدان دید

X_i^{swarm} می‌شود. پس از اجرای این دو رفتار که بر اساس موقعیت X_i^{t+1} اجرا شدند، موقعیت بعدی ماهی مصنوعی i یعنی X_i^{t+1} به صورت زیر بدست می‌آید:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^{follow} & \text{if } f(X_i^{follow}) \leq f(X_i^{swarm}) \\ X_i^{swarm} & \text{if } f(X_i^{follow}) > f(X_i^{swarm}) \end{cases}$$

برای ثبت بهترین نقطه‌ای که تاکنون در الگوریتم بدست آمده، از یک تخته سیاه استفاده می‌شود. در الگوریتم ماهی‌های مصنوعی، پس از اجرای رفتارهای موجود در الگوریتم در هر تکرار مقدار بهترین ماهی مصنوعی با مقدار ثبت شده بر تخته سیاه مقایسه می‌شود. در صورتی که بهترین مقدار بدست آمده از مقدار ثبت شده بر تخته سیاه بهتر بود موقعیت بهترین ماهی مصنوعی جایگزین ماهی مصنوعی ثبت شده بر تخته سیاه می‌شود. شبه کد الگوریتم AFSA در زیر آورده شده است.

$$Blackboard = \text{Arg} \max_{x_i} f(x_i)$$

repeat:

for each Artificial Fish $i \in [1, \dots, n]$

perform Swarm Behavior on X_i^t and Compute X_i^{swarm}

perform Follow Behavior on X_i^t and Compute X_i^{follow}

if $f(X_i^{swarm}) \geq f(X_i^{follow})$
then $x_i^{t+1} = X_i^{follow}$

else

$$x_i^{t+1} = X_i^{swarm}$$

end for

if $f(X_{Best-AF}) \leq f(Blackboard)$

Then $Blackboard = X_{Best-AF}$

until stopping criterion is met

فرمول‌بندی تابع هدف

اگر افت مشاهداتی در پی‌زومترهایی که به فاصله r از چاه پمپاژ و زمان t نسبت به شروع پمپاژ با S_{obs} نشان داده شود و S_{cal} افت محاسباتی محاسبه شده از مدل ریاضی Theis در همان فاصله و زمان باشد تابع خطا را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$E = S_{obs} - S_{cal}$$

با توجه به تابع خطای تعریف شده، تابع هدف به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$objective\ function = \sum_{k=1}^n [(S_{obs})_k - (S_{cal})_k]^2$$

برای محاسبه تابع هدف، پس از اینکه مقادیر معلوم r ، t ، Q و S_{obs} وارد شد، یک مقدار اولیه برای پارامترهای ضریب قابلیت

انتقال و ضریب ذخیره انتخاب می‌شود. در این مرحله با توجه به روابط موجود در مدل Theis و محاسبه مقدار S_{cal} تابع هدف محاسبه می‌گردد.

تحلیل نتایج

در این مطالعه، به منظور ارزیابی الگوریتم AFSA در تخمین

رفتار حرکت گروهی ماهی‌ها: X_c موقعیت مرکزی

ماهی‌ها را نشان می‌دهد که برابر مرکز ثقل بردارهای ماهی‌های مصنوعی است. فرض می‌شود n_f برابر با تعداد همسایه‌های موجود در میدان دید اطراف X_c ، n برابر تعداد کل ماهی‌های مصنوعی، Y_c تراکم غذا در موقعیت مرکزی و Y_i تراکم غذا در موقعیت فعلی باشد، اگر $Y_c > Y_i$ و $\delta > (n_f/n)$ باشد ماهی مصنوعی به صورت رابطه زیر یک گام به سمت میدان مرکزی پیش می‌رود.

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \frac{X_c - X_i^t}{\|X_c - X_i^t\|} \cdot step.rand(0,1)$$

در صورتی که $n_f = 0$ باشد یا شرط حرکت به موقعیت

مرکزی تامین نشود، رفتار جستجوی غذا اجرا می‌گردد.

رفتار دنباله روی: در حرکت گروهی ماهی‌ها، هنگامی که

یک ماهی یا تعدادی از آن‌ها غذا پیدا کنند، همسایه‌ها و ماهی‌های نزدیک به آن‌ها به دنبال آن‌ها می‌روند و به سرعت به غذا می‌رسند. اگر X_i وضعیت فعلی ماهی مصنوعی باشد و هنگامی که همسایه X_j را جستجو می‌کند ($d_{ij} \leq visual$) و Y_j را می‌بیند، اگر $Y_j > Y_i$ و $\delta > (n_f/n)$ باشد یعنی وضعیت X_j دارای تراکم غذایی بیشتری نسبت به وضعیت فعلی است و تراکم جمعیتی در نزدیکی آن زیاد نمی‌باشد، بنابراین ماهی یک گام به جلو و به سمت X_j می‌رود که به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود، در غیر این صورت رفتار جستجوی غذا را دوباره اجرا می‌کند.

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \frac{X_j - X_i^t}{\|X_j - X_i^t\|} \cdot step.rand(0,1)$$

روند اجرای الگوریتم دسته ماهی‌های مصنوعی: برای

ماهی‌های مصنوعی، رفتارهای جستجوی غذا و حرکت آزادانه، رفتارهای انفرادی هستند. رفتار دنباله‌روی، یک رفتار گروهی است که هر یک از ماهی‌های مصنوعی به صورت محلی براساس موقعیت همسایه‌های خود آن را اجرا می‌کنند و رفتار حرکت گروهی یک رفتار گروهی است که تمام ماهی‌های مصنوعی به صورت سراسری آن را اجرا می‌کنند. در صورتی که یک ماهی مصنوعی با اجرای رفتار دنباله‌روی و یا حرکت گروهی موفق به حرکت به سمت موقعیت بهتر نشود رفتار جستجوی غذا اجرا می‌گردد و در صورتی که یک ماهی مصنوعی در یافتن موقعیت بهتر با رفتار جستجوی غذا موفق نبود، رفتار حرکت آزادانه اجرا می‌شود.

اگر موقعیت ماهی مصنوعی i در زمان t برابر X_i^t باشد، ماهی مصنوعی i یک بار رفتار دنباله‌روی را از X_i^t اجرا می‌کند و باعث تغییر مکان ماهی به X_i^{follow} می‌شود. ماهی مصنوعی i پس از انجام رفتار دنباله‌روی، از همان موقعیت X_i^t رفتار حرکت گروهی را اجرا می‌کند که باعث حرکت ماهی مصنوعی i به مکان

پارامترهای ورودی الگوریتم AFSA، در نتایج این الگوریتم نقش مهمی دارد، برای یافتن مقادیر بهینه این پارامتر آنالیز حساسیت انجام شد که نتایج آن به صورت جدول (۲) آورده شده است.

پارامترهای هیدرولیکی آبخوان، برنامه کامپیوتری این الگوریتم برای سه مجموعه داده‌های آزمایش پمپاژ توسعه داده شد که برای مقایسه نتایج این الگوریتم با روش‌های دیگر، از روش گرافیکی و الگوریتم بهینه‌سازی GA استفاده شد. از آنجا که مقادیر

جدول ۲- مقادیر بهینه پارامترهای مورد نیاز در AFSA

Fish_number	max_generation	try_number	visual	step
50	500	10	2.5	0.1

پس از تعیین پارامترهای ورودی الگوریتم AFSA و تشکیل ساختار مدل بهینه‌سازی اعم از تابع هدف و محدودیت‌ها در مسئله مورد بررسی، با اجرای مدل تهیه شده مقادیر متغیرهای تصمیم (مقادیر ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره) و تابع هدف بدست آمد که نتایج در جدول (۲) آورده شده است. همچنین، با وارد نمودن مجموعه داده‌های زمان - افت آزمایش پمپاژ در نرم‌افزار Aquifer Test و اجرای آن، مقادیر ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره به روش گرافیکی محاسبه شد که نتایج آن نیز در جدول (۳) آورده شده است. مقادیر پارامترهای هیدرولیکی آبخوان به همراه مقدار تابع هدف بدست آمده از روش GA ارائه شده در این جدول، با توجه به مطالعه (Asghari Moghaddam et al. (2008 ذکر شده است.

جدول ۳- مقادیر تابع هدف، ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره

چاه پمپاژ	روش حل	T (m ^۲ / min)	S	تابع هدف	R ²
W ₁	گرافیکی	۰/۷۷۹	۲/۰۳×۱۰ ^{-۴}	۰/۰۰۱۰	۰/۹۹۹۷
	الگوریتم GA	۰/۷۹۳۱	۱/۰۹۰۰×۱۰ ^{-۴}	۷/۱۹۳۰×۱۰ ^{-۴}	۰/۹۹۹۶
	الگوریتم AFSA	۰/۷۸۸۶	۱/۹۳۳۸×۱۰ ^{-۴}	۷/۰۱۵۲×۱۰ ^{-۴}	۰/۹۹۹۷
W ₂	گرافیکی	۰/۳۳۲	۲/۱۶×۱۰ ^{-۴}	۰/۰۲۲۵	۰/۹۹۰۳
	الگوریتم GA	۰/۳۴۷۹	۲/۰۰۰×۱۰ ^{-۴}	۰/۰۱۸۲	۰/۹۹۱۳
	الگوریتم AFSA	۰/۳۴۸۲	۲/۰۰۰×۱۰ ^{-۴}	۰/۰۱۸۰	۰/۹۹۱۵
W ₃	گرافیکی	۰/۱۲۹۲	۴/۳۴×۱۰ ^{-۴}	۰/۱۴۲۹	۰/۹۸۹۳
	الگوریتم GA	۰/۱۶۴۲	۳/۰۲۱۷×۱۰ ^{-۴}	۰/۰۲۷۲	۰/۹۹۳۵
	الگوریتم AFSA	۰/۱۶۴۸	۳/۰۳۵۳×۱۰ ^{-۴}	۰/۰۲۷۲	۰/۹۹۳۵

آورده شده است. مقایسه این منحنی‌ها نشان می‌دهد افت مربوط به AFSA و GA نسبت به روش گرافیکی تطابق بیشتری با افت مشاهداتی دارد. مجموعه داده‌های W₁ نسبت به W₂ و W₃ دارای R² بهتری هستند. به طور کلی می‌توان بیان نمود که مقادیر ضریب همبستگی بین مقادیر افت مشاهده‌ای و افت محاسبه شده دو روش AFSA و GA نسبت به روش گرافیکی بیشتر است.

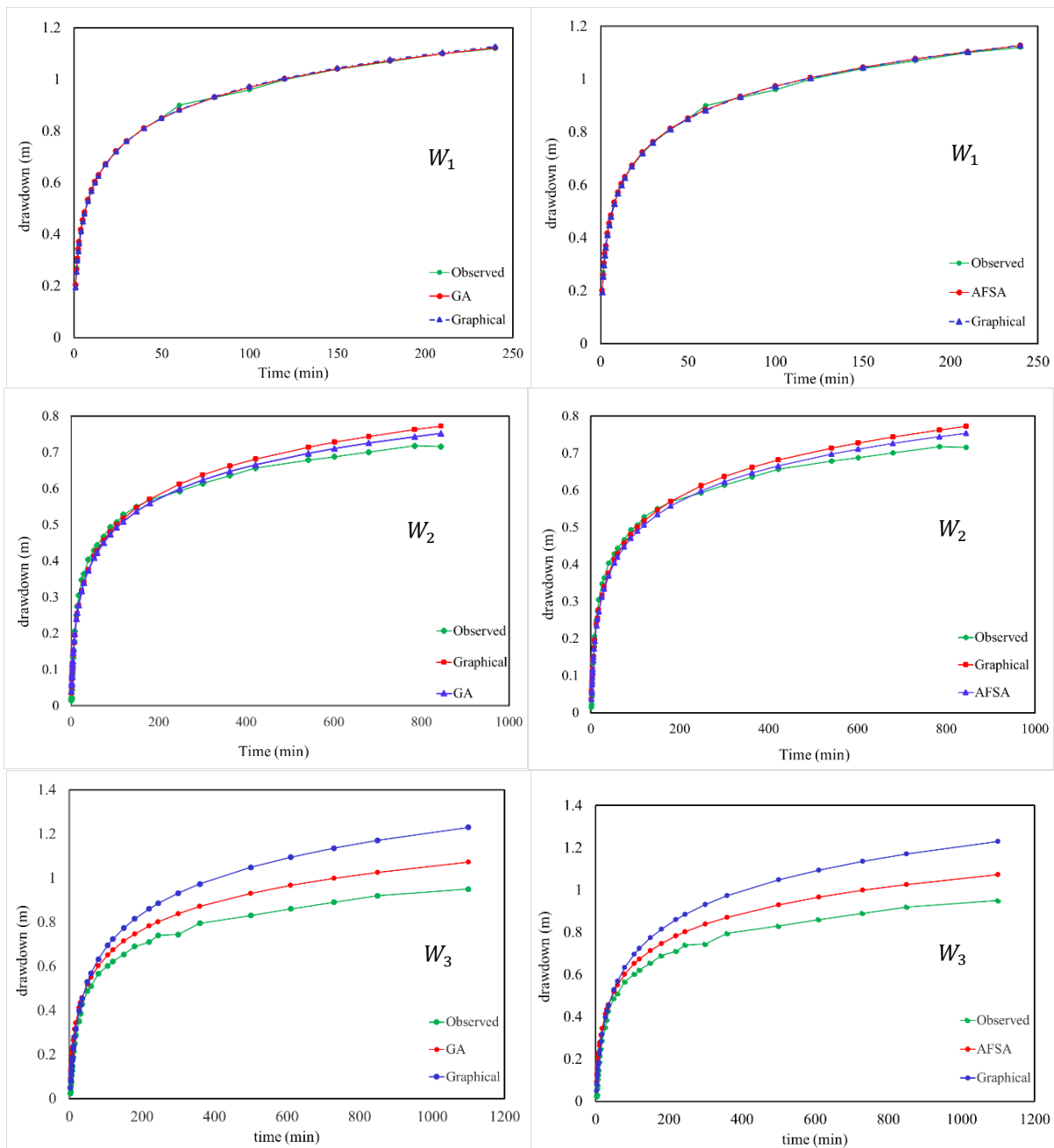
همانطور که در مقدمه ذکر گردید، (Batani et al. (2015 از الگوریتم‌های فراکاوشی GA و ACO برای تعیین مقادیر پارامترهای هیدرولیکی آبخوان تحت فشار استفاده کردند، نتایج آن‌ها نشان داد که این الگوریتم‌ها به نتایج بهتری نسبت به روش گرافیکی می‌رسد و برتری این دو الگوریتم نسبی است، به طوری - که در بعضی از آبخوان‌ها GA نتیجه بهتری می‌دهد و در بعضی

مقایسه مقادیر ضرایب هیدرولیکی آبخوان حاصل از سه روش گرافیکی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی GA و AFSA در جدول (۳) نشان می‌دهد مقادیر ضرایب T و S در دو روش GA و AFSA تقریباً یکسان است و همچنین مقایسه مقادیر تابع هدف در این دو الگوریتم نشان می‌دهد که الگوریتم AFSA نتایج تقریباً بهتری نسبت به الگوریتم GA داشته است. در مجموعه داده‌های چاه‌های پمپاژ W₁ و W₂ مقادیر تابع هدف در AFSA بهتر از GA بوده و در مجموعه داده‌های چاه پمپاژ W₃ این مقادیر یکسان بوده است.

در شکل (۲) منحنی زمان - افت مشاهده‌ای (داده‌های صحرائی) و منحنی‌های حاصل از پارامترهای تخمین زده شده با AFSA، GA و روش گرافیکی برای سه مجموعه داده چاه پمپاژ

موارد ممکن است چنین شناختی از آبخوان مورد مطالعه در دسترس نباشد، بنابراین در چنین مواردی استفاده از روشی که وابسته به مقادیر اولیه متغیر تصمیم برای شروع حل نباشد بسیار مفید خواهد بود. در معرفی الگوریتم AFSA ذکر شد که یکی از مزایای این الگوریتم حساس نبودن به مقادیر اولیه متغیر تصمیم است که این ویژگی باعث می‌شود کاربرد AFSA در مسائل تخمین پارامترهای آبخوان موثر و مفید باشد.

دیگر ACO. بنابراین، به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم‌های فراکاوشی در مقایسه با روش‌های ریاضی و گرافیکی نتایج بهتری در تخمین پارامترهای آبخوان می‌دهد. اما، اغلب این الگوریتم‌ها نیاز به مقادیر اولیه متغیرهای تصمیم برای شروع فرآیند حل دارند و جواب نهایی به مقادیر اولیه بستگی دارد در حالی که نتایج حاصل از الگوریتم AFSA به مقادیر اولیه متغیر تصمیم حساس نیست. تعیین مقادیر اولیه منطقی نیاز به شناخت صحیح خصوصیات زمین شناسی آبخوان دارد، در حالی که برخی



شکل ۲- مقایسه منحنی زمان-افت محاسبه شده در سه چاه پمپاژ W_1 ، W_2 و W_3 با استفاده از روش گرافیکی و الگوریتم بهینه‌سازی GA و AFSA

تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان‌های تحت فشار مورد بررسی قرار گرفت که مقایسه نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از این روش در تعیین مقادیر پارامترهای آبخوان قابل توصیه است. الگوریتم AFSA و GA عملکرد تقریباً مشابهی نسبت به روش گرافیکی دارند، اما در الگوریتم GA برای ایجاد جمعیت اولیه هر پارامتر لازم است از حدود استاندارد هر یک از پارامترها استفاده کرد در حالی که در روش AFSA الگوریتم وابسته به مقادیر اولیه نیست که این ویژگی می‌تواند در تعیین مقادیر پارامترهای آبخوان‌هایی که خصوصیات زمین‌شناسی آن‌ها چندان شناخته شده نیستند، بسیار مفید باشد.

نتیجه‌گیری کلی

در بخش برنامه‌ریزی و مدیریت آب زیرزمینی، تعیین مقادیر پارامترهای هیدرولیکی آبخوان برای تهیه مدل ریاضی آبخوان‌ها لازم و ضروری است. برای رسیدن به این هدف در بعضی از نقاط منطقه مورد بررسی آزمایش پمپاژ انجام می‌دهند و با توجه به داده‌های بدست آمده در این آزمایش مقادیر پارامترهای هیدرولیکی را با روش گرافیکی بدست می‌آورند. با توجه به اینکه مقادیر بدست آمده با استفاده از روش گرافیکی تقریبی است استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مانند GA و AFSA می‌تواند موثر باشد. در این تحقیق کاربرد روش بهینه‌سازی AFSA در

REFERENCES

- Asghari Moghaddam, A. Norani, V. and Kord, M. (2008). Estimation of Hydraulic Parameters of Confined Aquifers Using Genetic Algorithm Optimization Technique. *Iran-Water resources Research*, 3(3), 30-41. (In Farsi)
- Abbaspour, K.C. Van Genuchten, M.T. Schulin, R. and Schlappi, E. (1997). A sequential uncertainty domain inverse procedure for estimating subsurface flow and transport parameters. *Water Resources Research*, 33(8), 1879-1892.
- Bateni, S.M. Mortazavi-Naeini, M. Ataie-Ashtiani, B. Jenga, D.S. and Khanbilvardifi, R. (2015). Evaluation of methods for estimating aquifer hydraulic parameters. *Applied Soft Computing*, 28, 541-549.
- Batu, V. (1998). Aquifer hydraulics: a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis. *John Wiley & sons, inc.*, 728p.
- Carrera, J. and Neuman, S.P. (1986) Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. Maximum likelihood method incorporating prior information. *Water Resources Research*, 22(2), 199-210.
- Cooley, R.L. (1977) A method of estimating parameters and assessing reliability for models of steady state ground water flow 1. Theory and numerical properties. *Water Resources Research*, 13(2), 318-324.
- Dagan, G. and Rubin, Y. (1988) Stochastic identification of recharge, transmissivity, and storativity in aquifer transient flow: A quasi-steady approach. *Water Resources Research*, 24(10), 1698- 1710.
- Freeze, A.R. and Cherry, J.A. (1979) Groundwater. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey*, 603p.
- Hantush, M.S. (1959) Non steady flow to flow wells in leaky aquifers. *Journal of Geophysical Research*, 64(8), 1043-1052.
- Jha, M. Kumar, A. Nanda, G. and Bhatt, G. (2006) Evaluation of traditional and non-traditional optimization techniques for determining well parameters from step-drawdown test data. *Journal of Hydrology Engineering*, 11, 617-630.
- Kruseman, G.P. and De Ridder, N.A. (1983) Analysis and evaluation of pumping test data. *ILRT, Wageningen, Netherlands*, 200p.
- Li, L.X. Shao, Z.J. and Qian, J.X. (2002) An Optimizing Method based on Autonomous Animals: Fish Swarm Algorithm. *Proceedings of Systems Engineering Theory & Practice*.
- Lin, G.F. and Chen, G.R. (2006) An improved neural network approach to the determination of aquifer parameters. *Journal of Hydrology*, 316(1-4), 281-289.
- Neuman S.P. (1972) Theory of flow in unconfined aquifers considering delay response of the water table. *Water Resources Research*, 8, 1031-1045.
- Theis C.V. (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of well using groundwater storage. *American Geophysical Union*, 16, 519-524.
- Todd, D.K. and Mays, L.W. (2005) Groundwater hydrology. *Wiley, International edition*, 636p.
- Tseng, P.H. and Lee, T.C. (1998) Numerical evaluation of exponential integral: Theis well function approximation. *Journal of Hydrology*, 205, 38-51.
- Yazdani, D. Akbarzadeh-Totonchi, M.R. Nasiri, B. and Meybodi, M.R. (2012) A new artificial fish swarm algorithm for dynamic optimization problems. p. 472-479. *IEEE World Congress on Computational Intelligence*. June, 10-15, 2012. Brisbane, Australia.
- Cheng, M. and Xiang, M. (2017) Parameter estimation of a composite production function model based on improved artificial fish swarm algorithm and model application. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 10, 8218-8232.
- Sérgio, L.F. and Steffen, V. (2014) Fish swarm optimization algorithm applied to engineering system design. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11, 143-156.