

## تخمین پارامترهای موتور القایی با استفاده از بهینه‌سازی چرخه آب

علیرضا خسروی<sup>۱</sup>، محمد یزدانی اسرمی<sup>۲</sup> و آصف قابلی جویباری<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی بابل- بابل- ایران

Alireza\_khosravi@yahoo.com

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی بابل- بابل- ایران

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی - دانشگاه شاهد - تهران- ایران

**چکیده:** این مقاله کاربرد الگوریتم چرخه آب را که به تازگی معرفی شده است، به منظور تخمین دقیق پارامترهای موتور القایی از طریق اطلاعات پلاک آن نشان می‌دهد. با توجه به این حقیقت که از موتورهای القایی به طور گسترده‌ای در کاربردهای صنعتی استفاده می‌گردد، این پارامترها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر دقت و بازده این موتورها و در نهایت عملکرد کل سیستم دارند. بنابراین، ضروری است که الگوریتم‌ها به منظور تخمین پارامترهای موتور القایی، توسعه داده شوند. مفاهیم اصلی و ایده‌هایی که زمینه به وجود آمدن روش پیشنهادی گشته اند، از طبیعت و بر اساس مشاهده روند چرخه آب و اینکه چگونه رودخانه‌ها و جویبارها در دنیای واقعی جاری می‌شوند و به دریا می‌ریزند، الهام گرفته شده اند. توابع هدف، به صورت کمینه کردن مقادیر واقعی خطای نسبی بین گشتاورهای اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده ماشین، در لغزش‌های مختلف تعریف شده اند. روش ارائه شده، به دو موتور نمونه مختلف اعمال گشته و نتایج روش پیشنهادی، با دیگر روش‌های فرابتکاری که قبلاً به چاپ رسیده، مقایسه شده اند که نشان دهنده قابلیت و همگرایی سریع روش پیشنهادی است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم چرخه آب، تخمین پارامتر، موتور القایی، راندمان.

### ۱- مقدمه

موتورهای القایی شده است. در دهه‌های اخیر، یکی از بیشترین مطالعاتی که بر روی موتورهای القایی صورت گرفته، تخمین پارامترهای مدار معادل موتور القایی است. تخمین دقیق پارامترهای موتور امری ضروری برای بررسی شرایط عملکرد مختلف ماشین و پیش بینی رفتار آن است. بنابراین، در تمامی روش‌های کنترلی سرعت و یا گشتاور موتور القایی از سیستم‌های کنترلی اسکالر اولیه گرفته، تا کنترلهای جهت میدان و یا روش‌های کنترل برداری مدرن امروزی، اطلاع دقیق از پارامترهای موتور همواره یک موضوع اساسی بوده است. علاوه بر آن، مدار معادل موتورهای القایی، در بسیاری از تحقیقات مانند مطالعات خطایابی و بازده، افت ولتاژ ناشی از استارت موتورهای القایی، بهینه کردن مشخصه‌های سرعت-گشتاور موتور،

موتورهای القایی از پر کاربردترین موتورها در بخش صنعت هستند که عمده انرژی در حال تبادل در این بخش، توسط این موتورها مصرف می‌گردد. ویژگی‌هایی مانند کم هزینه بودن، استحکام، قدرت و اطمینان بالا، عمر طولانی، تعمیر و نگهداری اندک و غیره در مقایسه با دیگر انواع ماشین‌ها، توجهات بسیاری را به خود معطوف گردانیده و باعث انجام مطالعات گسترده‌ای در زمینه عملکردهای

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۱۳

نام نویسنده مسؤول: دکتر علیرضا خسروی

نشانی نویسنده مسؤول: ایران - بابل - خیابان شریعتی - دانشگاه صنعتی بابل - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

تخمین پارامترهای موتور القایی با استفاده از بهینه‌سازی چرخه آب

[۲۳]، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) [۲۴]، سیستم ایمنی مصنوعی [۲۵]، که هر کدام از این روش‌ها، پارامترها و مقادیر گشتاور را نزدیک مقدار واقعی خود نتیجه داده و بعلاوه سرعت همگرایی مناسبی دارند.

در این مقاله، از الگوریتم بهینه‌سازی جدید چرخه آب (Water Cycle Algorithm)، برای تخمین پارامترهای ماشین القایی استفاده شد. این الگوریتم که از طبیعت الهام گرفته شده است، بر اساس چگونگی جاری شدن جویبارها و رودخانه‌ها در سرآشویی‌ها به طرف دریا و حرکت برعکس آنها کار می‌کند. در این روش، ماتریس جمعیت که قطرات باران نامیده می‌شود، از دریا، رودخانه‌ها و جویبارها تشکیل شده است. در هر تکرار این جویبارها به درون یکدیگر می‌ریزند و به اکتشافات بزرگی در فضای جستجو منجر می‌شوند. مدل‌های تخمینی و دقیق موتور القایی برای نشان دادن عملی بودن این روش شبیه سازی شده اند؛ و به این منظور دو موتور نمونه با اندازه‌های متفاوت انتخاب شده اند. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب نتایج و کیفیت بهتری از بسیاری از روش‌های ابتکاری که قبلاً معرفی شدند، ارائه می‌دهد.

## ۲- فرمول‌سازی مسأله و مدل موتور القایی

مدل‌های مداری دقیق و تقریبی موتور القایی با استفاده از تابع هدف مینیمم کننده در زیر نشان داده شده‌اند:

### ۲-۱- مدل مداری تقریبی

شکل (۱)، شماتیک مدار معادل را برای مدلسازی تقریبی موتور القایی نشان می‌دهد. تابع هدف در این مدل از مقادیر واقعی سه انحراف گشتاور نسبی ماشین تشکیل شده است. مقادیر تقریبی و پلاک گشتاور راه اندازی، گشتاور بار کامل و گشتاور ماکزیمم باید حداقل مقدار انحراف را داشته باشند. بنابراین، تابع هدف تقریبی بصورت زیر به دست می‌آید [۲۵]:

کنترل برداری و اسکالر موتورهای القایی و طراحی کنترلرهای سیستم مورد نیاز است [۲ و ۱].

معمولاً، اطلاعات پلاک موتورهای القایی شامل مقادیری از جمله انواع گشتاورهای ماشین، بازده، سرعت و توان خروجی نامی است. از این مقادیر نامی که توسط سازنده ارائه می‌شود، طی فرایند تخمین پارامترهای مدار معادل ماشین به دست می‌آید. این پارامترها معمولاً از طریق تست‌های استاندارد عملکرد موتور، مانند تست‌های بی‌باری، بار کامل و روتور قفل شده به دست می‌آیند. با این حال، اطلاعات تست‌های استاندارد، معمولاً برای کاربر نهایی در دسترس نیست. به جای آن، پارامترهای مدار معادل، ممکن است بر اساس اطلاعات عملکردی که برای موتور منتشر شده است، تخمین زده شوند.

روش‌هایی که پارامترهای ماشین را در هنگام توقف روتور تخمین می‌زنند، عبارتند از: روش حداکثر احتمال [۳] و [۴] و نیز روش برازش مدل که در [۵] معرفی شد و دارای مشکل فرایند تخمین طولانی با گام‌های زیاد است، و روش‌های ریاضیاتی دیگر مانند تکنیک‌های تخمین پارامتر خطی و غیر خطی [۶]، روش برنامه‌نویسی غیر خطی [۷] و [۸]، روش‌های بر پایه فیلتر کالمن [۹].

روش تخمین پارامتر آنالین با استفاده از قوانین سیستم سازگار مرجع و تکنیک فیلترینگ رزونانسی سنکرون، برای تعیین مقاومت موتور القایی در [۱۰] استفاده شده است. در [۱۱]، شرح کاملی از روش‌های مختلف تخمین پارامترهای موتور ارائه شده است. علاوه بر روش‌های کلاسیک و ریاضیاتی ذکر شده در بالا، روش‌های ابتکاری وجود دارند که به نظر می‌رسد استفاده از آنها در مقابل روش‌های کلاسیکی که برای تخمین پارامترها استفاده شده‌اند، انتخاب بهتر و امیدوارکننده‌تری باشند، مانند الگوریتم ژنتیک (GA) [۱۲-۱۵]، الگوریتم ژنتیک سازگار [۱۶]، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) [۱۷-۱۹]، الگوریتم تکثیر باکتری (BFA) [۲۰-۲۱]، الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) [۲۲-۲۳].

$$\frac{T_{\max}(C) - T_{\max}(mf)}{T_{\max}(mf)} \leq \pm 0.2 \quad (۶) \quad F = \min\left(\sum_{i=1}^3 |f_i|\right) \quad (۱)$$

که  $T_{\max}(C)$  ماکزیمم گشتاور تخمین زده شده است.

### ۲-۲- مدل مداری دقیق

شکل (۲)، مدار معادل دقیق را نشان می‌دهد. در مدل مداری دقیق، مقدار واقعی انحراف نسبی بین اطلاعات سازنده و ضریب قدرت تخمین زده شده هم به تابع هدف مینیمم کننده اصلی اضافه می‌گردد [۲۵]:

$$F = \min\left(\sum_{i=1}^4 |f_i|\right) \quad (۷)$$

$$f_1 = \frac{\frac{K_t R_2}{S \left[ (R_1 + \frac{R_2}{S})^2 + x_1^2 \right]} - T_{fl}(mf)}{T_{fl}(mf)} \quad (۸)$$

$$f_2 = \frac{\frac{K_t R_2}{(R_1 + R_2)^2 + x_1^2} - T_{lr}(mf)}{T_{lr}(mf)} \quad (۹)$$

$$f_3 = \frac{\frac{K_t}{2 \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \right]} - T_{\max}(mf)}{T_{\max}(mf)} \quad (۱۰)$$

$$f_4 = \frac{\cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{X}{R_{th} + \frac{R_2}{S}}\right)\right) - pf_{fl}(mf)}{pf_{fl}(mf)} \quad (۱۱)$$

$$X = X_2 + X_{th} \quad (۱۲)$$

$$K_t = \frac{3V_{th}^2}{\omega_s} \quad (۱۳)$$

$$X_{th} = \frac{X_1 X_m}{X_1 + X_m} \quad (۱۴)$$

$$R_{th} = \frac{R_1 X_m}{X_1 + X_m} \quad (۱۵)$$

$$V_{th} = \frac{V_{ph} X_m}{X_1 + X_m} \quad (۱۶)$$

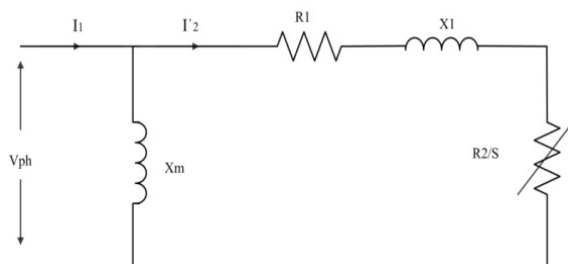
حدود حداقل و حداکثر پارامترها:

$$X_{i,\min} < X_i < X_{i,\max} \quad (۱۷)$$

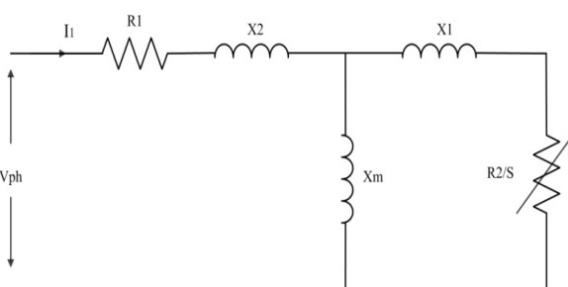
حد ماکزیمم گشتاور:

$$\frac{T_{\max}(C) - T_{\max}(mf)}{T_{\max}(mf)} \leq \pm 0.2 \quad (۱۸)$$

که در این روابط S لغزش بوده و  $R_{th}$  و  $X_{th}$  و  $X_m$



شکل (۱): مدار معادل تقریبی مدل موتور القایی



شکل (۲): مدار معادل دقیق مدل موتور القایی

$$f_1 = \frac{\frac{K_t R_2}{S \left[ (R_1 + \frac{R_2}{S})^2 + x_1^2 \right]} - T_{fl}(mf)}{T_{fl}(mf)} \quad (۲)$$

$$f_2 = \frac{\frac{K_t R_2}{(R_1 + R_2)^2 + x_1^2} - T_{lr}(mf)}{T_{lr}(mf)} \quad (۳)$$

$$f_3 = \frac{\frac{K_t}{2 \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \right]} - T_{\max}(mf)}{T_{\max}(mf)} \quad (۴)$$

که R مقاومت و X راکتانس پراکنندگی در رتور و استاتور هستند. همچنین  $T_{st}$  و  $T_{fl}$  و  $T_{\max}$  بترتیب گشتاورهای راه اندازی و بار کامل و ماکزیمم هستند. مقدار هر کدام از پارامترهای تخمین زده شده باید در محدوده حداقل و حداکثر تعیین شده باشد، که به صورت زیر هستند:

$$X_{i,\min} < X_i < X_{i,\max} \quad (۵)$$

که  $X_{i,\max}$  و  $X_{i,\min}$  به ترتیب حد پایین و حد بالای پارامتر  $X_i$  هستند.

حد ماکزیمم گشتاور:

تخمین پارامترهای موتور القایی با استفاده از بهینه‌سازی چرخه آب

$$\begin{aligned} \text{جمعیت قطرات باران} &= \begin{bmatrix} \text{Raindrops}_1 \\ \text{Raindrops}_2 \\ \text{Raindrops}_3 \\ \vdots \\ \text{Raindrops}_{N_{pop}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \chi_1^1 & \chi_2^1 & \chi_3^1 & L & \chi_{N_{var}}^1 \\ \chi_1^2 & \chi_2^2 & \chi_3^2 & L & \chi_{N_{var}}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \chi_1^{N_{pop}} & \chi_2^{N_{pop}} & \chi_3^{N_{pop}} & L & \chi_{N_{var}}^{N_{pop}} \end{bmatrix} \quad (21) \end{aligned}$$

که  $N_{pop}$  تعداد قطرات باران و  $N_{var}$  تعداد متغیرهاست. در یک ماتریس به صورت تصادفی تشکیل شده از قطرات باران با اندازه  $N_{pop} \times N_{var}$ ، هر کدام از مقادیر متغیر تعیین شده  $(\chi_1, \chi_2, \chi_3, \dots, \chi_N)$  می‌توانند به عنوان مقادیر واقعی یا به یک عنوان گروه از پیش تعیین شده به ترتیب برای مساله پیوسته یا گسسته انتخاب شوند. برازندگی یا ارزش هر سطر با استفاده از تابع هزینه (C) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$C_i = Cost_i = f(x_1^i, x_2^i, \dots, x_{N_{var}}^i) \quad (22)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop}$$

پس از تشکیل دادن  $N_{pop}$  قطره باران، تعداد  $N_{sr}$  تا از بهترین آنها (که دارای بهترین مقادیر برازندگی یا کمترین ارزش هستند) به عنوان رودخانه و دریا انتخاب می‌شوند. قطره‌ای که دارای بهترین مقدار تابع باشد، به عنوان دریا انتخاب می‌گردد. بقیه قطره‌ها به عنوان جویبارهایی که ممکن است به رودخانه یا مستقیماً به دریا بریزند، انتخاب می‌گردند.

$$N_{sr} = \text{Number of Rivers} + 1(\text{Sea}) \quad (23)$$

$$N_{Streams} = N_{pop} - N_{sr} \quad (24)$$

بسته به شدت جریان آب، که از معادله زیر محاسبه می‌گردد، جویبارها به عنوان رودخانه‌ها و دریاها تلقی می‌شوند:

$$NS_n = \text{round} \left\{ \left| \frac{Cost_n}{\sum_{i=1}^{NS_n} Cost_i} \times N_{Streams} \right| \right\} \quad (25)$$

$NS_n$  تعداد جویبارهاست، که به رودخانه یا دریای معینی می‌ریزد.

بترتیب مقاومت و راکتانس معادل تونن و راکتانس مغناطیس کنندگی هستند.

### ۳- الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب

این الگوریتم ابتکاری جدید از رفتار چرخه آب در طبیعت الهام گرفته شده است [۲۶]. آب به شکل جویبارها و رودخانه‌ها از بلندی‌های کوه‌ها به سمت دریاها حرکت می‌کند. در راه پایین آمدن، رودخانه‌ها و جویبارها، آب را از باران و دیگر جویبارها جمع آوری می‌کنند. آب رودخانه و دریاچه‌ها هنگامی که گیاهان در طی فرآیند تبخیر، آب را پس می‌دهند، بخار می‌گردد. هنگامی که آب بخار شده در اتمسفر بالا می‌رود، ابرها تشکیل می‌گردند. این ابرها در اتمسفر سردتری متراکم شده، آب را به شکل باران باز پس می‌دهند و جویبارها و رودخانه‌های جدید تولید می‌کنند.

#### ۳-۱- روند الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب

مثل دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، این روش با یک جمعیت اولیه که قطرات باران نامیده می‌شود، شروع می‌گردد، که از باران یا تگرگ به وجود می‌آید. بهترین قطرات باران به صورت دریا انتخاب می‌گردند، تعدادی از قطرات باران خوب به عنوان رودخانه و باقی آنها به صورت جویبارهایی که به رودخانه‌ها یا مستقیماً به دریا می‌ریزند انتخاب می‌شوند.

#### ۳-۲- ایجاد جمعیت اولیه

در الگوریتم‌های GA [۲۶] و PSO [۲۷]، آرایه‌هایی با نام‌های "کروموزوم" و "مکان ذرات"، مقادیر متغیرهای مسأله را تشکیل می‌دهند. در بهینه‌سازی چرخه آب هر آرایه "قطره باران" نامیده می‌شود، که برای یک مسأله بهینه‌سازی N بعدی و برای یک راه حل به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\text{قطره باران} = [\chi_1, \chi_2, \chi_3, \dots, \chi_N] \quad (20)$$

با در نظر گرفتن  $N_{pop}$  قطره، ماتریس قطرات باران به صورت زیر بسط داده می‌شود:

جدیدی تشکیل می‌دهند که دوباره به دریا جاری می‌شوند. شبه کد زیر، تعیین می‌کند که آیا فرآیند تبخیر و تشکیل باران رخ می‌دهد یا خیر.

$$\left| \chi_{Sea}^i - \chi_{River}^i \right| < d_{max} \quad (29)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, (N_{sr} - 1)$$

$d_{max}$  مقدار کوچکی نزدیک به صفر است و عمق جستجوی نزدیک دریا را کنترل می‌کند. هنگامی که مقدار بزرگی از  $d_{max}$  انتخاب می‌گردد، شدت جستجو کاهش می‌یابد، ولی مقدار کوچک آن، آن را تقویت می‌کند. هنگامی که مسافت بین رودخانه و دریا کمتر از  $d_{max}$  باشد، رودخانه به دریا متصل گشته است. بنابراین، فرآیند تبخیر انجام می‌گیرد و آنگاه فرآیند بارش رخ می‌دهد. در پایان هر تکرار، طبق معادله زیر مقدار  $d$  کاهش می‌یابد:

$$d_{max}^{i+1} = d_{max}^i - \frac{d_{max}^i}{\max \text{ iteration}} \quad (30)$$

### ۳-۵- فرآیند بارش

این فرآیند مشابه عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک است. قطره‌های باران جدیدی که به شکل تصادفی تشکیل شده‌اند، در نقاط مختلف جویبارهای جدیدی را تشکیل می‌دهند. مجدداً، قطره‌ای با بهترین مقدار تابع در میان دیگر قطرات جدید، به عنوان رودخانه‌ای که به دریا می‌ریزد، در نظر گرفته می‌شود. بقیه آنها به عنوان جویبارهای جدیدی که به رودخانه یا مستقیماً به دریا می‌ریزند، در نظر گرفته می‌شوند.

برای جویبارهایی که مستقیماً به دریا می‌ریزند، از معادله جدیدی که جستجو در نزدیکی دریا را افزایش می‌دهد استفاده می‌شود، که به بهتر شدن نرخ همگرایی و عملکرد محاسباتی الگوریتم برای مسائل مقید منجر می‌گردد:

$$\chi_{stream}^{new} = \chi_{sea} + \sqrt{U} \times randn(1, N_{var}) \quad (31)$$

که انحراف استاندارد را و  $U$  مفهوم واریانس را بیان می‌کند. در حقیقت، مقدار  $U$ ، رنج منطقه مورد جستجو در نزدیکی دریا را نشان می‌دهد و  $randn$  یک عدد تصادفی با توزیع نرمال است. مناسبترین مقدار پیدا شده برای  $U$ ، ۰/۱

### ۳-۳- چگونگی جاری شدن جویبارها به دریا یا رودخانه

حرکت یک جویبار به سمت یک رودخانه معین در امتداد خطوط ارتباطی بین آنها، توسط یک مسافت انتخاب شده تصادفی و به صورت زیر اعمال می‌گردد:

$$X \in (0, C \times d) \quad (26)$$

که  $C$  یک مقدار تعریف شده توسط کاربر و بین ۱ و ۲ است، و  $d$  مسافت حاضر بین رودخانه و جویبار است. مقدار  $X$  عددی بین صفر و  $C*d$  با هر نوع توزیعی است. اگر مقدار  $C$  بزرگتر از یک باشد، جویبارها این توانایی را پیدا می‌کنند که در جهات مختلف به سمت رودخانه‌ها جاری شوند. بنابراین، بهترین مقدار برای  $C$  مقدار ۲ است. این مفهوم همچنین می‌تواند برای جاری شدن رودخانه‌ها به سمت دریا استفاده گردد. بنابراین، وضعیت جدید برای جویبارها و رودخانه‌ها می‌تواند با استفاده از معادله زیر محاسبه گردد:

$$X_{Stream}^{i+1} = X_{Stream}^i + rand \times C \times (X_{River}^i - X_{Stream}^i) \quad (27)$$

$$X_{River}^{i+1} = X_{River}^i + rand \times C \times (X_{Sea}^i - X_{River}^i) \quad (28)$$

که  $rand$  یک عدد تصادفی توزیع شده به صورت یکنواخت بین صفر و یک است. اگر مقدار راه حل هر کدام از جویبارها بهتر از رودخانه متصل به آن باشد، وضعیت آنها تغییر می‌کند (جویبار تبدیل به رودخانه می‌گردد و رودخانه مربوطه به صورت جویبار در نظر گرفته می‌شود). همچنین وضعیت دریا و رودخانه، اگر رودخانه راه حل بهتری از دریا داشته باشد، جا به جا خواهد شد.

### ۳-۴- شرایط تبخیر

این فرآیند نقش بسیار مهمی در الگوریتم، برای جلوگیری از گیر افتادن آن در بهینه محلی و همگرایی ناگهانی سریع دارد. مفهوم این پروسه از تبخیر آب دریا، از تفرق گیاهان در هنگام فتوسنتز اخذ شده است. آنگاه از آب تبخیر شده، ابرها تشکیل می‌گردند و آب دوباره به شکل باران به زمین بر می‌گردد و رودخانه‌ها و جویبارهای

تخمین پارامترهای موتور القایی با استفاده از بهینه‌سازی چرخه آب

گام ۴: جریان استاتور، ضریب قدرت و گشتاور بیشینه و گشتاور بار کامل و گشتاور راه اندازی را محاسبه کن. سپس مقدار تناسب را برای هر گونه، با استفاده از معادلات (۱) و (۱۹) به ترتیب برای مدل تقریبی و دقیق محاسبه کن. گام ۵: با استفاده از معادله (۲۵) شدت جریان رودخانه‌ها و دریاها را محاسبه کن.

گام ۶: جویبارها به رودخانه‌ها و رودخانه‌ها به دریاها به ترتیب با استفاده از معادلات (۲۷) و (۲۸) جاری می‌شوند.

گام ۷: موقعیت‌های رودخانه را با جویباری که بهترین راه حل را می‌دهد و موقعیت‌های دریا را با رودخانه‌ای که بهترین جواب را می‌دهد، عوض کن.

گام ۸: شرایط تبخیر را با استفاده از شبه کد در زیر بخش (۳-۴) چک کن و اگر با استفاده از قطرات تصادفی تازه تشکیل شده باران یا با استفاده از معادله (۳۱) ارضا شده باشد، فرایند بارش رخ خواهد داد.

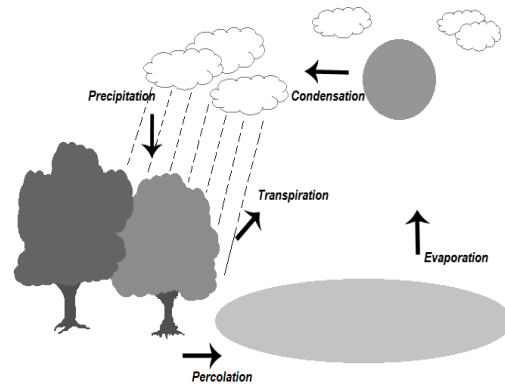
گام ۹: با استفاده از معادله (۳۰) مقدار  $d_{max}$  را کاهش بده.

گام ۱۰: ملاک‌های توقف را چک کن. اگر معیار توقف برآورده شده بود، الگوریتم متوقف خواهد شد، و گرنه به گام ۵ باز گرد! (در این تحقیق، حداکثر تعداد تکرارها به عنوان معیار توقف در نظر گرفته شده است).

#### ۴-۲- قیود مسأله

در این مقاله، محدودیت‌های مرزی مثل حدود حداقل و حداکثر پارامترها، در یگ گام تولید تصادفی اعمال می‌گردند، که به این معنی است که راه حل‌ها به صورت تصادفی از طریق رنج عملی تولید می‌شوند. سایر محدودیت‌های نابرابری شامل محدودیت گشتاور ماکزیمم و همچنین، محدودیت‌های تساوی مانند محدودیت بازده، با استفاده از روش معمول تابع جریمه به عنوان رایجترین روش برای اعمال چنین محدودیت‌هایی اداره می‌گردند.

است، در حالی که مقادیر بزرگتر، احتمال خارج شدن از منطقه امکان‌پذیر را زیاد می‌کند و مقادیر کوچکتر، فضای جستجو و اکتشاف نزدیک دریا را کاهش می‌دهند. در شکل (۳) شماتیکی ساده از عملکرد الگوریتم ارائه و مصور شده است.



شکل (۳): شماتیکی ساده از عملکرد الگوریتم چرخه آب

#### ۴- چگونگی کاربرد الگوریتم چرخه آب برای تخمین پارامتر موتور القایی

در مدل مداری، هر قطره باران شامل مقاومت استاتور، مقاومت روتور، راکتانس ناشی استاتور، راکتانس ناشی رتور و راکتانس مغناطیسی‌کنندگی است.

#### ۴-۱- گام‌های بهینه‌سازی چرخه آب برای تخمین پارامتر

گام‌های زیر، چگونگی تخمین پارامترهای موتور القایی را با استفاده از WCA نشان می‌دهند:

گام ۱: اطلاعات سازنده موتور القایی را که در جدول داده شده، وارد کن.

گام ۲: پارامترهای اولیه WCA را انتخاب کن:

$$U, C, d_{max}, N_{sr}, NS_n, N_{pop}$$

گام ۳: با تشکیل ماتریس اولیه قطرات باران به صورت تصادفی، دریاها و رودخانه‌ها و جویبارها را به وجود بیاور.

تقریبی و دقیق برای موتورهای ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. برای اثبات برتری روش پیشنهادی، مقایسه‌ای بین مقادیر به دست آمده از گشتاور ناشی از روش پیشنهادی و دیگر روش‌های اعمالی در مقالات منتشر شده پیشین برای موتورهای ۱ و ۲ به ترتیب در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. همچنین، شکل‌های ۴ و ۵ مشخصات همگرایی را به ترتیب برای مدل‌های دقیق موتورهای ۱ و ۲ نشان می‌دهند.

بنابراین، ضریب تخطی (جریمه) با معادلات (۳۲) و (۳۳) به ترتیب برای بازده و محدودیت‌های گشتاور ماکزیمم تعریف می‌شوند. هنگامی که از مدل‌های تقریبی و دقیق استفاده می‌گردد ضریب تخطی به تابع هزینه، به عنوان معادله افزاینده که در معادلات (۳۴) و (۳۵) داده شده‌اند، اضافه می‌گردد (معادله (۳۴) مربوط به مدل تقریبی و معادله (۳۵) مربوط به مدل دقیق است).  $\beta_1$  و  $\beta_2$  ضرایب تخطی (جریمه) هستند که توسط کاربر تعریف می‌گردند.

جدول (۱): اطلاعات سازنده برای موتورهای مورد آزمایش

مشخصات	موتور نمونه ۱	موتور نمونه ۲
ظرفیت (HP)	۵	۴۰
ولتاژ (V)	۴۰۰	۴۰۰
جریان (A)	۸	۴۵
فرکانس (Hz)	۵۰	۵۰
تعداد قطب‌ها	۴	۴
لغزش بار کامل	۰/۰۷	۰/۰۹
گشتاور راه اندازی (Nm)	۱۵	۲۶۰
ماکزیمم گشتاور (Nm)	۴۲	۳۷۰
جریان راه اندازی (A)	۲۲	۱۸۰
گشتاور بار کامل (Nm)	۲۵	۱۹۰

جدول (۲): خلاصه‌ای از پارامترهای تخمینی مدل تقریبی و

دقیق برای موتورهای نمونه‌ای ۱ و ۲

پارامتر	موتور نمونه ۱		موتور نمونه ۲	
نوع مدل	تقریبی	دقیق	تقریبی	دقیق
$R_1 (\Omega)$	۲/۳۰	۱/۸۵۲	۰/۰۳۹۰	۰/۰۷۰۱۴
$R_2 (\Omega)$	۱/۸۹	۲/۴۷۳۳	۰/۴۴۴۲	۰/۳۴۴۷۳
$X_1, X_2 (\Omega)$	۷/۴۵	۶/۰۴۳	۱/۳۰۹	۱/۷۸۴۳
$X_m (\Omega)$	۲۶۰/۳۳	۳۸۳/۷۴۵	۳۶۷/۱۲	۳۶۵/۳۱۶۶
$T_{st} (Nm)$	۲۴/۹۸	۲۵/۰۵۴	۲۵۹/۸	۲۵۸/۸۳۳۴
$T_{max} (Nm)$	۲۱/۰۰۱	۱۵/۸۲	۳۷۴/۰۴	۳۶۳/۰۳۳۴۷
$T_{full} (Nm)$	۴۱/۹۹	۴۱/۱۵۹	۱۸۹/۹۸	۱۸۹/۹۷۵۹

$$v_1 = \left| \frac{P_{fl} - (I_{1fl}^2 R_1 + I_{2fl}^2 R_2 + P_{rot})}{P_{fl}} - \eta_{fl}(mf) \right| \quad (32)$$

$$v_2 = \max\{0, T_{max}(C) - 0.2\} + |\min\{0, T_{max}(C) + 0.2\}| \quad (33)$$

$$F = \min\left(\sum_{i=1}^3 |f_i|\right) (1 + \beta_1 v_1 + \beta_2 v_2) \quad (34)$$

$$F = \min\left(\sum_{i=1}^4 |f_i|\right) (1 + \beta_1 v_1 + \beta_2 v_2) \quad (35)$$

## ۵- نتایج شبیه سازی و بحث و بررسی

### پیرامون آن

روش پیشنهادی برای دو موتور القایی با اطلاعات سازنده آنها که در جدول ۱ داده شده، شبیه سازی شده است.

پارامترهای WCA به صورت  $N_{pop} = 100$ ،  $N_{sr} = 30$ ،  $d_{max} = 0.1$ ،  $C = 2$ ،  $U = 0.1$ ،  $\beta = 3$  برای تمام اجراهای برنامه تعیین شده‌اند. با اینکه ۴۰ آزمایش مستقل برای مشاهده تغییرات در طی فرایندهای تکاملی انجام شد و برای هر کدام از الگوریتم‌های تکاملی، کیفیت راه حل، مشخصه همگرایی و بازده محاسبات با هم مقایسه شد، ولی تقریباً در تمامی آزمایش‌ها، در تکرارهای ابتدایی؛ یعنی در حدود تکرار دهم، همگرایی اتفاق افتاده است. روش پیشنهادی در MATLAB 7.8 در یک پردازشگر Pentium IV، ۳ گیگاهرتز، با ۳ گیگابایت حافظه، اجرا گردید. جدول ۲ پارامترهای تخمین زده شده برای دو مدل

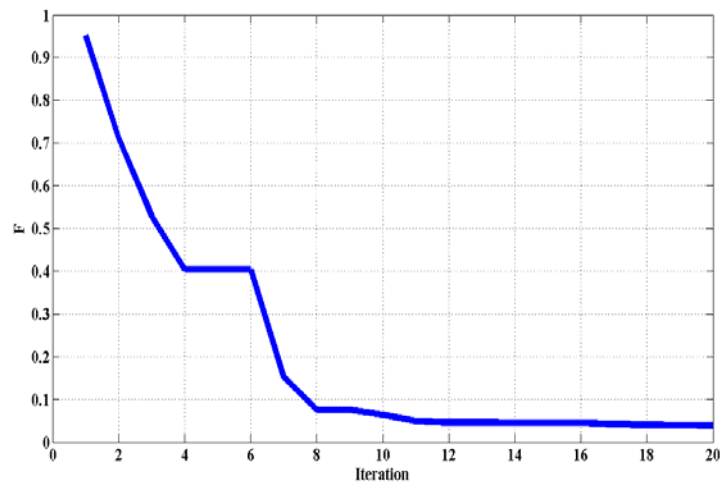
تخمین پارامترهای موتور القایی با استفاده از بهینه‌سازی چرخه آب

جدول (۳): مقایسه نتایج حاصله برای انواع گشتاور توسط روش‌های بهینه‌سازی مختلف برای موتور نمونه‌ای ۱

$T_{full}(Nm)$	$T_{max}(Nm)$	$T_{si}(Nm)$	نوع گشتاور	
۲۵	۴۲	۱۵	اطلاعات سازنده	
۲۰/۰۹	۳۵/۹۸	۱۶/۷۳	مقدار	الگوریتم ژنتیک
۱۹/۶۴	۱۴/۳۳	۱۱/۵۳	خطا	
۲۲/۱۱	۴۰/۹۷	۱۷/۶	مقدار	الگوریتم تجمعی ذرات
۱۱/۵۶	۲/۵۸	۱۷/۳۳	خطا	
۲۷/۴۴	۴۱/۸	۱۶/۰۳	مقدار	الگوریتم ایمنی
۹/۷۶	۰/۴۸	۶/۸۷	خطا	
۲۶/۲	۳۷/۲	۱۳/۹۳	مقدار	الگوریتم تکثیر باکتری
۴/۸	۱۱/۴۳	۷/۱۳	خطا	
۲۵/۰۵	۴۱/۱۵	۱۵/۸۲	مقدار	الگوریتم چرخه آب
۰/۲	۲/۰۲	۵/۴۶	خطا	

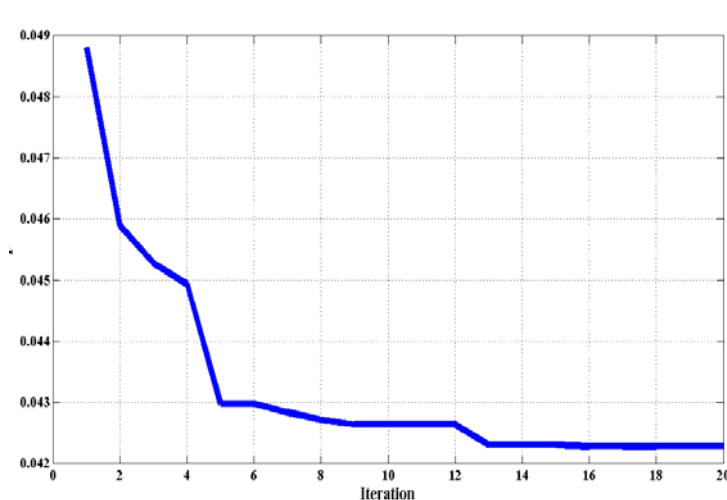
جدول (۴): مقایسه نتایج حاصله برای انواع گشتاور توسط روش‌های بهینه‌سازی مختلف برای موتور نمونه‌ای ۲

$T_{full}(Nm)$	$T_{max}(Nm)$	$T_{si}(Nm)$	نوع گشتاور	
۱۹۰	۳۷۰	۲۶۰	اطلاعات سازنده	
۲۰۰/۹۹	۳۵۵/۴۸	۲۵۸/۷	مقدار	الگوریتم ژنتیک
۵/۷۸	۳/۹۲	۰/۵	خطا	
۲۲۲/۷۸	۳۸۱/۶۳	۲۵۵/۵۵	مقدار	الگوریتم تجمعی ذرات
۱۷/۲۵	۳/۱۴	۱/۷۱	خطا	
۱۷۸/۵۶	۳۷۷/۹	۲۵۵/۹۳	مقدار	الگوریتم ایمنی
۶/۰۲	۲/۱۳	۱/۵۷	خطا	
۱۸۱/۱۱	۳۸۷/۶۱	۲۶۶/۸۵	مقدار	الگوریتم تکثیر باکتری
۴/۶۸	۴/۷۶	۲/۶۳	خطا	
۱۸۹/۸۷۶	۳۶۳/۰۳۳	۲۵۸/۸۳۳	مقدار	الگوریتم چرخه آب
۰/۰۷	۱/۹	۰/۴۴۸	خطا	



شکل (۴): مشخصه همگرایی الگوریتم چرخه آب برای مدل دقیق موتور القایی ۱





شکل (۵): مشخصه همگرایی الگوریتم چرخه آب برای مدل دقیق موتور القایی ۲

بخاری آزمایش شد و نتایج با دیگر روش‌های تخمین که قبلاً بر موتورها اعمال شده بود، مقایسه گردید، که نشان می‌دهد روش پیشنهادی دارای همگرایی سریع بوده و نتایج با کیفیت بالاتری با حداقل انحراف بین پارامترهای پلاک و پارامترهای به دست آمده می‌دهد.

### سپاسگزاری

نویسندگان، از همراهی‌های آقای مهندس مانی عاشوری در تهیه و تحریر این مقاله صمیمانه سپاسگزار می‌کنند.

### مراجع

- [1] Haque, M. H., "Estimation of three-phase induction motor parameters", *Electric Power Systems Research*, Vol. 26, No. 3, pp. 187-193, 1993.
- [2] Chapman, S., *Electric Machinery Fundamentals*, New York, NY: McGraw-Hill Education, 2005.
- [3] Moon, S. I., Keykani, A., "Estimation of induction machine parameters from standstill time-domain data", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 30, No. 6, pp. 1609-1615, 1994.
- [4] Karayaka, H. B., Marwali, M. N., Keyhani, A., "Induction machine parameter tracking from test data via PWM inverters", In *Proceedings of 1997 IEEE 32nd IAS annual meetings*, Vol. 1, No.1, pp. 227-233, 1997.

از مهمترین ویژگی‌های الگوریتم چرخه آب رسیدن به مقدار بهینه در تعداد تکرارهای کم است و این امر موجب برتری این روش نسبت روش‌های بهینه‌سازی قدیمیتری همچون الگوریتم ژنتیک می‌گردد. بعلاوه، نکته قابل توجه دیگر، خطای اندک روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی متداول بخصوص بهینه‌سازی تکثیر باکتری است. لذا پیشنهاد می‌شود برای مسائلی، همچون تخمین پارامترهای موتورهای الکتریکی یا طراحی ساختمان ماشین‌های الکتریکی از الگوریتم چرخه آب بهره برده شود.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای تخمین پارامترهای موتور القایی، الگوریتم جدید چرخه آب، به صورت یک روش برپایه تکرار به کار گرفته شد. استفاده از اطلاعات پلاک مزیتی بر روش‌های قبلی است، چرا که این روش‌ها به اطلاعات عملکرد اضافه نیز نیاز داشتند. بنابراین، مسأله به صورت یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی فرمول بندی گردید که این امر ناشی از تعدادی از پارامترها همچون ضریب قدرت و خطاهای گشتاور بین اطلاعات پلاک و مقدار تخمین زده شده است. روش پیشنهادی به دو موتور القایی نمونه‌ای اعمال شده است و پارامترهای مدل‌های مداری تقریبی و دقیق موتور القایی به دست آمده‌اند. برای تست عملی بودن این روش، روش WCA بر روی موتورهای ۵ و ۴۰ اسب

- [15] Renmu, H., Jin, M., Hill, D. J., "Composite load modeling via measurement approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 2, pp. 663-672, 2006.
- [16] Abdelhadi, B., Benoudjit, A., Nait Said, N., "Identification of induction machine parameters using a adaptive genetic algorithm", Electric Power Components and Systems, Vol. 32, No.8, pp. 767-784, 2004.
- [17] Lin, W. M., Su, T. J., Wu, R. C., "Parameter identification of induction machine with a starting no-load low voltage test", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 1, pp. 352-360, 2012.
- [18] Karimi, A., Choudhry, M. A., Feliachi, A., "PSO-based evolutionary optimization for parameter identification of an induction motor", In Proceedings of IEEE 39<sup>th</sup> North American Power Symposium, pp. 659-664, 2007.
- [19] Sakthivel, V. P., Bhuvaneswari, R., Subramanian, S., "Multi-objective parameter estimation of induction motor using particle swarm optimization", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 23, No.3, pp. 302-312, 2010.
- [20] Sakthivel, V. P., Subramanian, S., "Determination of Induction Motor Double-Cage Model Parameters Based on Bacterial Foraging Optimization Algorithm", International Review of Electrical Engineering, Vol. 5, No. 4, pp. 1529-1537, 2010.
- [21] Ursem, R. K., Vadstrup, P., "Parameter Identification of Induction Motors Using Differential Evolution", The IEEE 2003 Congress on Evolutionary Computation, Vol. 2, pp. 790-796, 2003.
- [22] Nangsue, P., Pillay, P., Conry, S. E., "Evolutionary Algorithms for Induction Motor Parameter Determination", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 447-453, 1999.
- [23] Wishart, M. T., Harley, R. G., "Identification and Control of Induction Machines Using Artificial Neural Networks", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 3, pp. 612-619, 1995.
- [24] Sakthivel, V. P., Bhuvaneswari, R., Subramanian, S., "Artificial immune system for parameter estimation of induction motor", Expert Systems with Applications, Vol. 37, No. 8, pp. 6109-6115, 2010.
- [25] Eskandar H, Sadollah, A., Bahreininejad, A., Hamdi, M., Water cycle algorithm – A novel metaheuristic optimization method for
- [5] Willis, J. R., Brook, G. J., Edmonds, J. S., "Derivation of induction motor models from standstill frequency responses test", IEEE Transactions on Energy Conversion and Management, Vol. 4, No. 4, pp. 608-615, 1989.
- [6] Wang, K., Chiasson, J., Bodson, M. Tolbert, L. M., "A Nonlinear Least Squares Approach for Identification of The Induction Motor Parameters", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 50, No. 10, pp. 1622-1628, 2005.
- [7] Coirault, P., Trigeassou, J. T., Kerignard, D., Gaubert, J., "Recursive parameter identification of an induction machine using a non-linear programming method", In Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications, pp. 644-649, 1996.
- [8] Rasouli, M., Westwick, D. T., Rosehart, W. D., "Reducing induction motor identified parameters using a nonlinear Lasso method", Electric Power Systems Research, Vol. 88, pp. 1-8, 2012.
- [9] Barut, M., "Bi Input-extended Kalman filter based estimation technique for speed-sensorless control of induction motors", Energy Conversion and Management, Vol. 51, No. 10, pp. 2032-2040, 2010.
- [10] Vukadinovic, D., Basic, M., Kulisic, L., "An An IRFO System with Stator and Rotor Resistance Identification for the Induction Motor", International Review of Electrical Engineering, Vol. 3, No. 4, pp. 709-720, 2008.
- [11] Toliyat, H. A., Levi, E., Raina, M., "A Review of RFO Induction Motor Parameter Estimation Techniques", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, No. 3, pp. 271-283, 2003.
- [12] Huang, K. S., Wu, Q. H., Turner, D. R., "Effective identification of induction motor parameters based on fewer measurements", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 1, pp. 55-60, 2002.
- [13] Kwon, C., Sudhoff, S. D., "Genetic algorithm-based induction machine characterization procedure with application to maximum torque per amp control", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No. 2, p. 405-415, 2006.
- [14] Alonge, F., D'Ippolito, F., Ferrante, G., Raimondi, F. M., "Parameter identification of induction motor model using genetic algorithms", IEE Proceedings on Control Theory Applications, Vol. 145, No. 6, pp. 587-593, 1998.

- pp. 97-105, 2003.
- [27] Gaing, Z. L., "Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 3, pp. 1187-95, 2003.
- [26] Abido, M. A., "A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective environmental/economic dispatch", Electric Power and Energy Systems, Vol. 25, No. 2, solving constrained engineering optimization problems, Computers and Structure, Vol. 110, No. 111, pp. 151-166, 2012.

تخمین پارامترهای موتور القایی با استفاده از بهینه‌سازی چرخه آب