

بهینه‌سازی طرح تطبیقی شبکه حسگر بی‌سیم با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی باینری کوانتومی

مینا میرحسینی، فاطمه بارانی و حسین نظام‌آبادی‌پور

اصلی^۱ منتقل گردد.

حسگرها عموماً توسط باتری تغذیه می‌شوند که این باتری‌ها از نظر اندازه و هزینه محدودیت دارند و برای کاربردهای با مصرف انرژی محدود طراحی شده‌اند. این باتری‌ها قادرند تنها برای بازه زمانی محدودی حسگر را فعال نگه دارند و از طرف دیگر شارژ مجدد و جایگذاری آنها دشوار است. از این رو مدیریت مصرف انرژی یک از موضوعات چالش‌برانگیز در طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم محسوب می‌شود که به شدت روی طول عمر شبکه (مدت زمانی که شبکه قادر است عملیات خود را انجام دهد) و کارایی آن تأثیرگذار است [۵] تا [۹].

موضوع مورد بحث دیگر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، نیازمندی‌های ارتباطی شبکه است که با نوع پروتکل ارتباطی شبکه ارتباط مستقیم دارد. پروتکل ارتباطی که عموماً در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به کار می‌رود، ساختار مبتنی بر سرگروه^۲ است که در آن حسگرهای عادی^۳ با یک سرگروه از طریق یک اتصال تک‌گامی^۴ ارتباط برقرار می‌کنند. در این نوع پروتکل دو موضوع حایز اهمیت است. موضوع اول، محدودیت سرگروه‌ها در مدیریت تعداد محدودی حسگر است و موضوع دوم محدودیت‌های حسگرهای عادی در برقراری ارتباط با سرگروه‌ها است.

اگرچه مسئله ارتباط و انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، مسایل بسیار مهم و چالش‌برانگیزی هستند اما موضوع مهم دیگری که اغلب در طراحی شبکه‌های حسگر بی‌سیم نادیده گرفته می‌شود، توجه به پارامترهای کاربرد خاص است. از آنجا که جمع‌آوری و مدیریت داده‌ها در برخی کاربردهای خاص متفاوت است، لذا توجه به ویژگی‌های کاربرد خاص حایز اهمیت است. اگرچه توجه به این نوع پارامترها طراحی شبکه بهینه را پیچیده‌تر می‌سازد اما قطعاً منتهی به نتایج دقیق‌تر و کاربردی‌تری می‌گردد [۸] و [۹].

یکی از زمینه‌های کاربردی شبکه‌های حسگر بی‌سیم، کشاورزی نظارت‌شده و اصولی است که در زمین‌های کشاورزی بزرگ بسیار ضروری و کارا خواهد بود. با استفاده از این فناوری، با پایش شرایط خاک و رشد گیاه، هزینه تولید و میزان استفاده از آب و کودهای شیمیایی کاهش یافته و در نتیجه، منتهی به افزایش تولید محصول می‌گردد و بنابراین، شبکه‌های حسگر نقش به‌سزایی در کنترل و مدیریت کشاورزی دارند که این کنترل از طریق پایش مستقیم شرایط زیست‌شناسی، شیمیایی و محیطی توسط حسگرهای کم‌هزینه، کارا و قابل اطمینان صورت می‌پذیرد. اطلاعات استخراج‌شده توسط این حسگرها در کاربرد کشاورزی شامل اطلاعات مربوط به دما، رطوبت هوا، رطوبت خاک، نور و مواد معدنی محلول مانند علف‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها، نیتروژن و فسفر و غیره

چکیده: افزایش طول عمر، کارایی و کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم یک مسئله چندهدفه است که یکی از موضوعات چالش‌برانگیز در تحقیقات اخیر شده است. در این مقاله به منظور افزایش کارایی و طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم، با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی باینری کوانتومی روشی پیشنهاد شده که علاوه بر کمینه‌کردن مصرف انرژی، محدودیت‌های ارتباطی شبکه و نیازمندی‌های کاربرد خاص آن نیز برآورده می‌گردد. این الگوریتم روی یک شبکه حسگر بی‌سیم در کاربرد کشاورزی و به منظور نظارت دقیق و اصولی شرایط محیطی استفاده شده است. نتیجه به کارگیری این الگوریتم روی شبکه حسگر بی‌سیم، یک طرح بهینه خواهد بود که در آن حالت عملیاتی هر حسگر شامل سرگروه، حسگر فعال با محدوده حسگری بلند، حسگر فعال با محدوده حسگری کوتاه و غیر فعال را با توجه به محدودیت‌های مسئله مشخص می‌نماید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این الگوریتم در شبکه حسگر بی‌سیم در مقایسه با الگوریتم وراثتی و الگوریتم ازدحام جمعیت نتایج بهتری را ارائه می‌دهد و متعاقباً قادر است که طول عمر شبکه را نسبت به دو الگوریتم دیگر به نحو مطلوب‌تری افزایش دهد.

کلیدواژه: الگوریتم جستجوی گرانشی، الگوریتم جستجوی گرانشی باینری کوانتومی، شبکه حسگر بی‌سیم، کشاورزی نظارت‌شده.

۱- مقدمه

امروزه، شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN) ابزار قدرتمندی در کاربردهای مبتنی بر نظارت محسوب می‌شوند. کاربردهایی نظیر نظارت بر علائم حیاتی در پزشکی، کنترل ترافیک، کشاورزی نظارت‌شده، اتوماسیون صنعتی، تشخیص هدف در مسایل نظامی و غیره را می‌توان از جمله کاربردهایی برشمرد که در آنها استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم بسیار مفید و کارآمد است [۱] تا [۴]. ساختار کلی یک شبکه حسگر بی‌سیم از تعدادی سخت‌افزار الکترونیکی خودکار به نام حسگر تشکیل شده است. این حسگرها بر حسب کاربرد، جهت نظارت بر یک پدیده خاص فیزیکی مانند دما، رطوبت، صدا، تصویر و غیره در محیط مورد نظر قرار می‌گیرند. هر حسگر قادر است داده‌ها را از محیط جمع‌آوری، ذخیره و در صورت لزوم پردازش نماید و از طرفی با حسگرهای دیگر ارتباط برقرار نماید تا این اطلاعات جهت اتخاذ تصمیم‌گیری‌های لازم به ایستگاه

این مقاله در تاریخ ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۴ آذر ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

مینا میرحسینی، گروه علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی و محاسبات، مجتمع آموزش عالی بزم، بزرگراه خلیج فارس، بزم، (email: mirhosseini@bam.ac.ir).

فاطمه بارانی، گروه علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی و محاسبات، مجتمع آموزش عالی بزم، بزرگراه خلیج فارس، بزم، (email: f.barani@bam.ac.ir).

حسین نظام‌آبادی‌پور، بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، (email: nezam@uk.ac.ir).

1. Base Station (Sink)

2. Cluster Based

3. Regular Sensors

4. Single Hop Connection

الگوریتم‌های بهینه‌سازی به شمار می‌آید. قابلیت‌ها و اثربخشی این الگوریتم در مقایسه با برخی الگوریتم‌های بهینه‌سازی، ما را بر آن داشت تا این الگوریتم را برای ارائه طرح بهینه شبکه حسگر بی‌سیم که در آن نیازمندی‌های ارتباطی، محدودیت‌های مصرف انرژی و کاربرد خاص برآورده شود به کار گیریم.

ادامه این مطالعه به صورت زیر سازماندهی شده است. در بخش دوم به مفاهیم پایه مرتبط با الگوریتم جستجوی گرانشی و نسخه کوانتومی الگوریتم جستجوی گرانشی باینری پرداخته می‌شود. در بخش سوم نحوه تطبیق الگوریتم جستجوی گرانشی باینری کوانتومی برای یافتن طرح بهینه WSN در کشاورزی نظارت‌شده تشریح می‌شود. در این بخش تابع هدف، نحوه نمایش عامل‌ها و نحوه به کارگیری الگوریتم توضیح داده خواهد شد. در بخش چهارم به بحث پیرامون نتایج شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل آنها پرداخته می‌شود. این تحقیق در بخش پنجم با بحث و نتیجه‌گیری پایان می‌یابد.

۲- مفاهیم پایه

۲-۱ الگوریتم جستجوی گرانشی

نسخه اولیه الگوریتم جستجوی گرانشی توسط راشدی و همکاران [۱۳] پیشنهاد شد که برای حل مسایل بهینه‌سازی پیوسته طراحی شده است. این الگوریتم متعلق به رده الگوریتم‌های فرااکتشافی است که از قوانین گرانش و حرکت نیوتن و مفهوم تعامل بین اجرام برگرفته شده است. در این الگوریتم، موقعیت هر شیء در فضای جستجوی n بعدی به صورت (۱) نشان داده می‌شود

$$\vec{X}_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^n) \quad (1)$$

همان طور که در [۱۳] شرح داده شده است، جرم گرانشی شیء i در تکرار t ام الگوریتم که به صورت $M_i(t)$ نمادگذاری شده به صورت (۲) محاسبه می‌گردد. در این رابطه $fit_i(t)$ مقدار تابع هدف شیء i و $worst(t)$ بدترین مقدار تابع هدف در تکرار t ام الگوریتم است

$$M_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{\sum_{j=1}^N (fit_j(t) - worst(t))} \quad (2)$$

برآیند نیروهایی که از سایر اجرام به شیء i در بعد d وارد می‌شود با استفاده از (۳) محاسبه می‌گردد. طبق قانون حرکت نیوتن، شیء i در بعد d و در زمان t ، شتابی معادل (۴) خواهد داشت. به علاوه سرعت شیء i در زمان $t+1$ با استفاده از (۵) که رابطه‌ای بر حسب سرعت و شتاب کنونی شیء است محاسبه می‌گردد. سپس موقعیت جدید شیء در بعد d با استفاده از (۶) به روز رسانی می‌شود

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in kbest, j \neq i} rand_j G(t) \frac{M_j(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} \times (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (3)$$

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_i(t)} \quad (4)$$

$$\sum_{j \in kbest, j \neq i} rand_j G(t) \frac{M_j(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t))$$

$$v_i^d(t+1) = rand_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (5)$$

است [۱۱].

در این کاربرد، یک زمین کشاورزی به ابعاد r در c به صورت مدرج مفروض است به طوری که تعداد $r \times c$ حسگر در محل تقاطع خطوط درجه‌بندی قرار گرفته‌اند. حسگرها یکسان هستند و می‌توانند در یکی از چهار حالت عملیاتی قرار گیرند. در واقع هر حسگر می‌تواند در حالت عملیاتی سرگروه (CH)، حسگر منظم با محدوده حسگری بلند (HSR)، حسگر منظم با محدوده حسگری کوتاه (LSR) و یا در حالت غیر فعال یا خاموش (Off) قرار گیرد. حسگرهای سرگروه از قابلیت برقراری ارتباط و ارسال اطلاعات به ایستگاه اصلی برخوردارند. مصرف انرژی این نوع حسگرها به مراتب از حسگرهای منظم بیشتر است. حسگرهای منظم LSR و HSR قادرند با نزدیک‌ترین سرگروه ارتباط برقرار نمایند. محدوده ارتباطی و حسگری حسگرهای LSR برابر با ۵ واحد طول و محدوده ارتباطی و حسگری حسگرهای HSR معادل ۱۰ واحد طول است. لازم به ذکر است که در این کاربرد واحد طول، به فاصله هر حسگر با حسگر همسایه اطلاق می‌گردد [۸] تا [۱۱].

فرنتینوس^۳ و سیلیگریدیس^۴ در [۸] از الگوریتم وراثتی دودویی (BGA)^۵ برای یافتن یک طرح بهینه WSN برای تعیین حالت عملیاتی هر یک از حسگرها بهره گرفته‌اند به طوری که مصرف انرژی شبکه کمینه شود، محدودیت‌های ارتباطی شبکه برآورده و از طرفی یکنواختی نقاط حسگری بیشینه گردد. با تکرار پی در پی این الگوریتم که سطح انرژی باتری حسگرها به روز رسانی شده، یک طرح پویای شبکه حاصل می‌شود که تا حدی منتهی به افزایش طول عمر شبکه بر حسب تعداد دوره‌های اندازه‌گیری می‌گردد. در [۹] از ترکیب الگوریتم وراثتی باینری با جستجوی محلی برای بهبود عملکرد الگوریتم وراثتی ارائه‌شده در [۸] برای تعیین طرح بهینه پویای شبکه استفاده شده است. حجت‌الاسلامی و همکاران در [۱۲] از الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات (PSO)^۶ به این منظور استفاده نموده‌اند.

الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA)^۷ یکی از الگوریتم‌های تکاملی است که اخیراً توسط راشدی و همکارانش [۱۳] پیشنهاد شد. این الگوریتم برگرفته از قوانین گرانش و حرکت نیوتن است. در سال ۲۰۱۰ نسخه باینری این الگوریتم (BGSA)^۸ [۱۴] برای حل مسایل باینری ارائه شد و در سال ۲۰۱۴ نسخه بهبودیافته آن با عنوان IBGSA^۹ برای حل مسئله انتخاب ویژگی عرضه گردید [۱۵]. در سال‌های اخیر، نتایج به دست آمده در تحقیقات متعدد [۱۳] تا [۲۲]، مؤید برتری الگوریتم GSA در حل مسائل بهینه‌سازی بوده و لذا نسخه‌های کوانتومی آن برای حل مسایل پیوسته [۲۳] تا [۲۵] و باینری [۲۶] و [۲۷] توسط محققان ارائه شده است. در واقع، الگوریتم جستجوی گرانشی و نسخه‌های کوانتومی آن از قابلیت اکتشاف و استخراج بالایی برخوردارند. نسخه کوانتومی الگوریتم جستجوی گرانشی باینری موسوم به BQIGSA^{۱۰} که اخیراً توسط نظام‌آبادی‌پور [۲۷] ارائه شده است، یکی از قدرتمندترین و کاراترین

1. Regular Sensor with High Signal Range
2. Regular Sensor with Low Signal Range
3. Ferentinos
4. Tsiligiridi
5. Binary Genetic Algorithm
6. Particle Swarm Optimization
7. Gravitational Search Algorithm
8. Binary Gravitational Search Algorithm
9. Improved Binary Gravitational Search Algorithm
10. Binary Quantum-Inspired Gravitational Search Algorithm

به دست آمده توسط هر شیء در طول تکرارهای الگوریتم در یک مجموعه به صورت $SB(t) = \{B_1(t), B_r(t), \dots, B_N(t)\}$ که در آن $B_i(t) = (b_i^1(t), b_i^2(t), \dots, b_i^n(t))$ است، نگهداری می‌شوند. در تکرار $t=0$ همه جواب‌های $SW(\cdot)$ به $SB(\cdot)$ منتقل می‌شوند. در تکرارهای بعدی الگوریتم، به روز رسانی هر شیء کیوبیت در مجموعه $Q(t)$ با استفاده از کیوبیت چرخشی^۴ به صورت (۱۰) انجام می‌گیرد

$$\begin{bmatrix} \alpha_i^d(t+1) \\ \beta_i^d(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_i^d) & -\sin(\Delta\theta_i^d) \\ \sin(\Delta\theta_i^d) & \cos(\Delta\theta_i^d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i^d(t) \\ \beta_i^d(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

در این رابطه، $\Delta\theta_i^d$ زاویه چرخش عامل i در بعد d است. در سیستم کوانتومی، سرعت زاویه‌ای (ω) در کیوبیت چرخشی استفاده می‌شود که میزان حرکت به سمت "۰" یا "۱" را تعیین می‌کند. طبق (۱۱) مقدار ω به مقدار سرعت خطی (v) و شعاع سیستم دایره‌ای (r) وابسته است. در صورتی که $r=1$ باشد سرعت زاویه‌ای با سرعت خطی برابر است. سرعت زاویه‌ای هر عامل به صورت (۱۲) محاسبه می‌شود که در آن $\alpha_i^d(t)$ شتاب عامل i در بعد d در تکرار t ام الگوریتم است که طبق (۱۳) به دست می‌آید

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (11)$$

$$\omega_i^d(t+1) = rand_i \times \omega_i^d(t) + \alpha_i^d(t) \quad (12)$$

$$\alpha_i^d(t) = \sum_{j \in kbest} G(t) \frac{M_j(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} \times (b_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (13)$$

در این رابطه، $M_j(t)$ جرم گرانشی است که همانند (۲) محاسبه می‌گردد. $kbest$ مجموعه k جواب بهتر در $SB(t)$ است که در ابتدا با N مقداری می‌شود و در طی هر تکرار به طور خطی به ۱ کاهش می‌یابد. $R_{ij}(t)$ فاصله بین عامل i و j در فضای باینری است که با استفاده از فاصله همینگ نرمال طبق (۱۴) محاسبه می‌شود

$$R_{ij}(t) = \frac{\sum_{j=1}^n |x_i^j(t) - b_j^i(t)|}{n} \quad (14)$$

در سیستم دایره‌ای میزان جابه‌جایی از رابطه $\Delta\theta = \omega\Delta t$ به دست می‌آید که در سیستم گسسته Δt برابر ۱ فرض می‌شود. جهت حرکت طبق (۱۵) به دست می‌آید که با توجه به علامت $\alpha_i^d(t+1)$ و $\beta_i^d(t+1)$ تعیین می‌شود [۲۷]

$$\Delta\theta_i^d = \begin{cases} \omega_i^d(t+1) & \text{if } (\alpha_i^d(t+1)\beta_i^d(t+1)) \geq 0 \\ -\omega_i^d(t+1) & \text{if } (\alpha_i^d(t+1)\beta_i^d(t+1)) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

شبه‌کد این الگوریتم در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳- تطبیق الگوریتم جستجوی گرانشی باینری کوانتومی در WSN

در این بخش الگوریتم جستجوی گرانشی کوانتومی برای طراحی بهینه دینامیک شبکه حسگر بی‌سیم برای افزایش طول عمر شبکه تطبیق داده شده است به طوری که نیازمندی خاص شبکه و محدودیت‌های انرژی و ارتباطی برآورده گردد. به این منظور، محیط مورد نظر به صورت یک محیط مستطیلی $r \times c$ فرض شده که همه حسگرها به صورت

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (6)$$

در روابط فوق، $kbest$ مجموعه k شیء است که بهترین مقدار تابع هدف و بیشترین جرم را دارند و به صورت یک تابع خطی نزولی بر حسب زمان تعریف می‌شود که از مقدار اولیه K شروع و در پایان به مقدار ۱ کاهش می‌یابد. $rand_j$ یک عدد تصادفی در بازه $[0, 1]$ ، ϵ یک مقدار کوچک جهت جلوگیری از تقسیم بر صفر و R_{ij} فاصله اقلیدسی بین دو شیء i و j می‌باشد. همچنین G یک تابع نزولی بر حسب زمان است که از مقدار اولیه G آغاز شده و به صفر ختم می‌شود [۱۳].

۲-۲ الگوریتم جستجوی گرانشی باینری کوانتومی

الگوریتم جستجوی گرانشی باینری کوانتومی (BQIGSA) در سال ۲۰۱۵ توسط نظام‌آبادی‌پور [۲۷] پیشنهاد شد. این الگوریتم، ترکیبی از الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) و محاسبات کوانتومی (QC) است که استراتژی کیوبیت‌های چرخشی اصلاح‌شده را با الگوریتم جستجوی گرانشی ترکیب کرده و از آن برای حل مسایل باینری بهره می‌گیرد. در محاسبات کوانتومی کوچک‌ترین واحد اطلاعاتی کیوبیت^۱ است. الگوریتم‌های کوانتومی دنباله‌ای از عملگرهای کوانتومی هستند که روی کیوبیت‌ها اعمال می‌شوند و هر کیوبیت می‌تواند در حالت ۰ یا ۱ قرار گیرد. هر کیوبیت شامل یک زوج مرتب (α, β) است که $|\alpha|^2$ و $|\beta|^2$ به ترتیب احتمال حضور در حالت "۰" و "۱" را نشان می‌دهند و باید در (۷) صدق کنند

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (7)$$

در الگوریتم BQIGSA به صورتی که در (۸) ملاحظه می‌گردد، مجموعه $Q(t)$ شامل N شیء کیوبیت در فضای جستجوی n بعدی است. ساختار هر شیء کوانتومی عامل i در (۸) نشان داده شده که در این روابط، N تعداد عامل‌ها و n اندازه فضای جستجوی مسأله است

$$Q(t) = \{q_1(t), q_2(t), \dots, q_N(t)\},$$

$$q_i(t) = [q_i^1(t), q_i^2(t), \dots, q_i^n(t)] = \begin{bmatrix} \alpha_i^1(t) & \alpha_i^2(t) & \dots & \alpha_i^n(t) \\ \beta_i^1(t) & \beta_i^2(t) & \dots & \beta_i^n(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

اگرچه هر کیوبیت می‌تواند در هر لحظه برهم‌نهی^۲ دو حالت ۰ و ۱ باشد اما با استفاده از عملگر مشاهده^۳ تنها به یکی از دو حالت ۰ یا ۱ نگاشت می‌شود. این عملگر به صورت (۹) تعریف شده که در آن $rand \in [0, 1]$ یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است. $SW(t) = \{X_1(t), X_2(t), \dots, X_N(t)\}$ مجموعه جواب‌ها در فضای باینری در تکرار t ام الگوریتم است که با اعمال عملگر مشاهده روی $Q(t)$ ایجاد می‌شود. در این مجموعه، $X_i(t) = (x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^n(t))$ که $1 \leq i \leq N$ است

$$\text{if } rand[0, 1] < (\alpha_i^d(t))^2 \\ \text{then } x_i^d(t) = 0 \\ \text{else } x_i^d(t) = 1 \quad (9)$$

در مرحله مقادری اولیه، مجموعه $Q(t)$ متشکل از N شیء کیوبیت در فضای n بعدی به صورت (۸) به شکل تصادفی تولید می‌گردد به طوری که در آن شرط (۷) برآورده شود. بهترین جواب‌های

1. Q-Bit
2. Superposition
3. Observation

۳-۲ تابع هدف

عملکرد WSN طراحی شده در کشاورزی نظارت شده توسط یک تابع هدف سنجیده می شود که از سه گروه پارامتر تشکیل یافته است. این پارامترها عبارتند از پارامترهای مرتبط با انرژی، پارامترهای مربوط به ارتباطات شبکه و پارامترهای مبتنی بر کاربرد خاص. این پارامترها برای ارزیابی کیفیت هر راه حل ممکن به یک تابع هدف نگاشت می شوند. به این منظور از ترکیب پارامترها با استفاده از مجموع حاصل ضرب پارامترها در ضرایب وزنی آنها استفاده می شود به طوری که همه پارامترها کمینه شوند. نمایش ریاضی این پارامترها در حالت کمینه در ادامه تشریح می گردد.

۳-۲-۱ پارامترهای کاربرد خاص

به منظور حصول یکنواختی چیدمان حسگرها در محیط، پارامترهای زیر باید مد نظر قرار گیرند. این پارامترها شامل انحراف نسبی متوسط و خطای تراکم ویژه هستند که هر یک در ادامه تشریح می شود.

الف) انحراف نسبی متوسط (MRD)

این پارامتر معیاری برای اندازه گیری یکنواختی نقاط اندازه گیری است. برای محاسبه این پارامتر، محیط مورد نظر به m زیرناحیه تقسیم می گردد. این پارامتر به صورت (۱۸) تعریف می شود که در آن، ρ_{S_i} تراکم ویژه نقاط اندازه گیری در زیرناحیه S_i است که $i=1,2,\dots,m$ و ρ_S تراکم ویژه کل ناحیه است که از تقسیم تعداد کل حسگرهای اندازه گیری به کل ناحیه حاصل می شود

$$MRD = \frac{\sum_{i=1}^m |\rho_{S_i} - \rho_S|}{m\rho_S} \quad (18)$$

ب) خطای تراکم ویژه (SDE)

این پارامتر برای جلوگیری از تولید جواب هایی است که ملزومات تراکم ویژه حسگرها را در محیط برآورده نمی کند. پارامتر SDE به صورت (۱۹) تعریف می شود که در آن ρ_d تراکم ویژه مطلوب و ρ_S تراکم ویژه محیط مورد نظر است

$$SDE = \begin{cases} \frac{\rho_d - \rho_S}{\rho_d} & \text{if } \rho_S < \rho_d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

۳-۲-۲ پارامترهای ارتباطی

این گروه از پارامترها به منظور برآورده شدن نیازهای ارتباطی شبکه حسگر تعریف می شوند. همان گونه که ذکر شد در شبکه مورد بررسی از پروتکل ارتباطی مبتنی بر سرگروه استفاده می شود که در آن هر حسگر با نزدیک ترین سرگروه ارتباط برقرار می کند. در این ارتباط دو عامل باید مد نظر قرار گیرد. حداکثر تعداد حسگرهایی که یک سرگروه می تواند در گروه خود قرار دهد و تعداد حسگرهایی که با توجه به محدوده حسگریشان قادر نیستند با هیچ سرگروهی ارتباط برقرار نمایند. این دو نوع پارامترها در ادامه توضیح داده می شوند.

الف) خطای حسگرهای مربوط به هر سرگروه (SCE)

این پارامتر برای اطمینان از این است که هر حسگر سرگروه بیشتر از تعداد مشخصی حسگر منظم در گروه خود نداشته باشد. این تعداد حسگرها به مقدار داده هایی که باید توسط سرگروه پردازش شوند و

1. **Begin**
2. $t=0$, $SB(t) = \{\}$
3. Randomly initialize $Q(t)$
4. **While** (not stopping criterion) **do**
5. Make $SW(t)$ by observing the state of $Q(t)$ using Eq. (9)
6. Evaluate $SW(t)$
7. Updating $SB(t)$
8. Update $M_i(t)$, $i=1,2,\dots,N$ by Eq. (2)
9. Update $Q(t)$ by modified RQ-gate to yield $Q(t+1)$ by Eqs. (10, 12, 13, 15)
10. $t=t+1$
11. **End while**

شکل ۱: شبه کد الگوریتم BQIGSA [۲۷].

مرتب در محل تقاطع خطوط تقسیم بندی قرار گرفته اند. ساختار ارتباطی شبکه به صورت مبتنی بر خوشه بندی در نظر گرفته شده که در آن، حسگرهای منظم می توانند با نزدیک ترین سرگروه ارتباط برقرار کنند. در ادامه نحوه نمایش هر راه حل ممکن و تابع هدف برای ارزیابی تشریح می گردد.

۳-۱-۱ نمایش عاملها

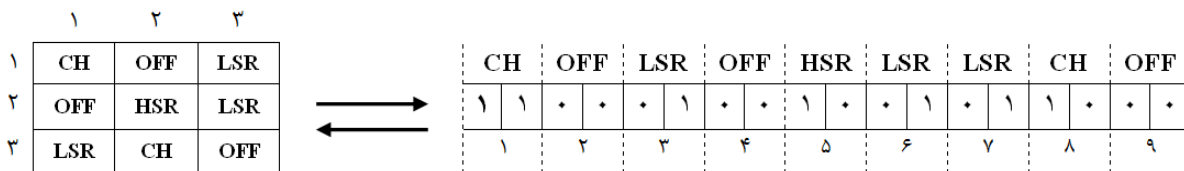
نمایش هر راه حل ممکن در طرح بهینه WSN باید به گونه ای باشد که بیانگر مکان و حالت عملیاتی هر حسگر باشد. به عبارت دیگر باید مشخص شود که حسگر باید در وضعیت فعال باشد یا غیر فعال و در صورتی که فعال است در حالت عملیاتی سرگروه قرار گیرد یا حسگر منظم و در صورتی که به صورت حسگر منظم است در محدوده حسگری کوتاه تنظیم شود یا محدوده حسگری بلند. در BQIGSA هر راه حل ممکن یک طرح WSN است که به صورت یک بردار که در بردارنده حالت عملیاتی حسگرها است نشان داده می شود. اندازه این بردار دو برابر تعداد حسگرها خواهد بود، به دلیل این که در فضای باینری هر حالت عملیاتی می تواند با دو بیت نشان داده شود. حالت عملیاتی CH با کد باینری ۱۱، حالت عملیاتی HSR با ۱۰، حالت عملیاتی LSR با ۰۱ و حالت عملیاتی غیر فعال به صورت ۰۰ رمزگذاری می شود. شکل ۲ نمونه ای از نحوه نمایش یک طرح WSN را در مقیاس کوچک که متشکل از ۹ حسگر است نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود این طرح به صورت یک بردار به اندازه ۱۸ نمایش داده می شود که هر دو بیت آن نمایانگر حالت عملیاتی یک حسگر است.

هر طرح WSN باید قابل تبدیل به نمایش برداری متناظر آن باشد و بالعکس هر عامل در فرم برداری باید بتواند به صورت یک طرح WSN نگاشت شود. به این منظور در صورتی که محیط مورد مطالعه در ابعاد $r \times c$ باشد، تبدیل طرح WSN به نمایش برداری معادل آن با استفاده از (۱۶) و تبدیل نمایش برداری به طرح WSN با استفاده از (۱۷) انجام می گیرد. در این روابط، s شماره حسگر در نمایش برداری و (row, col) مختصات حسگر در طرح WSN است

$$s = c \times (row - 1) + col \quad (16)$$

$$row = \begin{cases} \frac{s}{c} & \text{if } s \bmod c = 0 \\ \left[\frac{s}{c}\right] + 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

$$col = \begin{cases} c & \text{if } s \bmod c = 0 \\ s \bmod c & \text{otherwise} \end{cases}$$



شکل ۲: طرح WSN (سمت چپ) و نمایش عامل متناظر آن (سمت راست) در یک شبکه مقیاس کوچک متشکل از ۹ حسگر.

$$CE = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^{n_i} \mu d_{ij}^k \quad (23)$$

ج) خطای ظرفیت باتری (BCP)

این پارامتر مربوط به ظرفیت باتری‌ها بوده و نقش مهمی در افزایش طول عمر شبکه دارد. ظرفیت باتری حسگر i در دوره اندازه‌گیری t که به صورت $BC_i^{[t]}$ نام‌گذاری می‌شود به صورت (۲۴) و بر اساس حالت عملیاتی حسگر محاسبه و به روز رسانی می‌شود. مقدار $BC_i^{[t]}$ می‌تواند بین ۰ تا ۱ تغییر کند که ۱ نمایانگر پر بودن ظرفیت باتری و ۰ نمایانگر خالی بودن آن است. در این رابطه، $BRR_i^{[t+1]}$ نرخ کاهش باتری است که مستقیماً به حالت عملیاتی حسگر i در دوره اندازه‌گیری $t+1$ بستگی دارد

$$BC_i^{[t]} = BC_i^{[t-1]} - BRR_i^{[t-1]} \quad (24)$$

با در نظر گرفتن این رابطه، BCP در دوره اندازه‌گیری t با استفاده از (۲۵) به دست می‌آید. در این رابطه، $ngrid$ تعداد کل حسگرها و $PF_i^{[t]}$ نسبت مصرف انرژی با توجه به حالت عملیاتی حسگر i است

$$BCP^{[t]} = \sum_{i=1}^{ngrid} PF_i^{[t]} \left(\frac{1}{BC_i^{[t]}} - 1 \right), \quad t = 1, 2, \dots \quad (25)$$

شکل نهایی تابع هدف برای یافتن طرح بهینه WSN که تابعی خطی و وزن‌دار است در (۲۶) ملاحظه می‌شود. این رابطه در بردارنده پارامترهای اصلی است که در ارزیابی عملکرد WSN در کاربرد کشاورزی نظارت‌شده دخیل هستند. این تابع باید در طی فرایند BQIGSA بیهینه شود. ضرایب وزنی $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_7$ بیانگر میزان اهمیت هر پارامتر هستند [۸]، [۹] و [۱۱]. مقدار این پارامترها و سایر پارامترهای مربوط به تابع هدف در بخش ۴-۱ بحث خواهد شد

$$f = 1 / (\alpha_1 MRD + \alpha_2 SDE + \alpha_3 SCE + \alpha_4 SORE + \alpha_5 OE + \alpha_6 CE + \alpha_7 BCP) \quad (26)$$

۳-۳ به کارگیری BQIGSA

الگوریتم BQIGSA در دو مرحله روی مسئله به کار برده می‌شود که به ترتیب الگوریتم طرح بهینه (ODA) و الگوریتم طرح بهینه پویا (DODA) نامیده می‌شوند. در مرحله اول، ODA که شبه‌کد آن در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد روی حسگرها با ظرفیت باتری مشخص اجرا می‌شود. پس از آن در مرحله DODA که شبه‌کد آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ظرفیت باتری حسگرها با توجه به نتیجه ODA به روز رسانی می‌شوند.

در DODA به روز رسانی ظرفیت باتری‌ها و اجرای ODA هم‌زمان با جمع‌آوری داده‌ها انجام می‌گیرد، بدون آن که نیاز باشد که دوره اندازه‌گیری پایان یابد. به دلیل این که ظرفیت نهایی باتری‌ها در پایان دوره اندازه‌گیری مشخص و قابل ارزیابی است. هر دوره اندازه‌گیری به صورت بازه‌ای از زمان تعریف می‌شود که در آن ۲۰٪ ظرفیت باتری سرگروه‌ها مصرف می‌شود. یک WSN زنده تلقی می‌شود در صورتی که

قابلیت‌های ارتباطی حسگرها بستگی دارد. این پارامتر به صورت (۲۰) محاسبه می‌گردد. در این رابطه، $nfull$ تعداد گروه‌هایی است که بیشتر از حداکثر تعداد از پیش تعریف شده حسگر منظم دارند و n_i تعداد حسگرهایی موجود در گروه i ام است

$$SCE = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{nfull} n_i}{nfull} & \text{if } nfull > . \\ . & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

ب) خطای حسگرهای خارج از محدوده (SORE)

این پارامتر به این منظور تعیبه شده که تضمین شود همه حسگرها قادر به برقراری ارتباط با سرگروه خود باشند. این پارامتر به مقدار محدوده سیگنالی هر حسگر وابسته است و به صورت (۲۱) تعریف می‌شود. در این رابطه، $nout$ تعداد حسگرهای منظمی است که قادر به برقراری ارتباط با سرگروه خود نیستند و n تعداد کل حسگرهای موجود در محیط است

$$SORE = \frac{nout}{n} \quad (21)$$

۳-۲-۳ پارامترهای مرتبط با انرژی

کارایی، قابلیت اطمینان و طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم شدیداً به ظرفیت باتری حسگرها و میزان مصرف انرژی وابسته است. میزان مصرف انرژی خود به دو عامل مصرف انرژی عملیاتی و مصرف انرژی ارتباطی بستگی دارد. انرژی عملیاتی مربوط به انرژی است که حسگرها در صورت فعال‌بودن بر حسب حالت عملیاتی خود مصرف می‌کنند و انرژی ارتباطی مربوط به انرژی است که حسگرها در طی روند برقراری ارتباط و انتقال اطلاعات در شبکه مصرف می‌کنند. در ادامه این سه پارامتر مرتبط با انرژی با جزئیات بیشتری تشریح می‌شود.

الف) انرژی عملیاتی (OE)

این پارامتر به انرژی که حسگرها در بازه زمانی مشخصی مصرف می‌کنند اشاره دارد و مستقیماً به حالت عملیاتی حسگرها وابسته است. اگر مصرف انرژی حسگرهای CH، HSR، LSR و غیر فعال به ترتیب به نسبت $x:y:z:0$ باشد، مصرف انرژی عملیاتی طبق (۲۲) محاسبه می‌گردد که در آن nch تعداد حسگرهای CH و nhs و nls به ترتیب بیانگر تعداد حسگرهای HSR و LSR هستند

$$OE = x \frac{nch}{n} + y \frac{nhs}{n} + z \frac{nls}{n} \quad (22)$$

ب) انرژی ارتباطی (CE)

این پارامتر معادل انرژی است که در هنگام برقراری ارتباط بین حسگرهای منظم و سرگروه‌ها مصرف می‌گردد. این پارامتر به صورت (۲۳) محاسبه می‌شود که در آن c تعداد گروه‌ها، n_i تعداد حسگرهای موجود در گروه i ، d_{ij} فاصله اقلیدسی بین حسگر j و سرگروه مربوط به آن است. همچنین μ و k ثوابت هستند

Pseudo code of dynamic optimal WSN design algorithm (DODA)

1. **Begin**
2. Apply ODA (شکل ۳)
3. **While** WSN is alive **do**
4. Initiate new measuring cycle via current optimal design
5. Evaluate and update battery capacity by Eq. (24)
6. Rerun ODA on the sensors with updated battery capacities
7. **End while**
8. **End**

شکل ۴: شبه‌کد الگوریتم طرح بهینه پویا (DODA).

جدول ۱: مقدار ضرایب وزنی در تابع هدف.

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
1.0^{-2}	1.0^{-4}	1.0^{-6}	1.0^{-5}	1.0	1.0^{-2}	1.0^{-2}

معنا که قرارگیری تعداد ۲۰۰ حسگر در مساحتی معادل ۱۰۰ واحد طول مربع مطلوب است.

در SCE حداکثر تعداد حسگری که با یک سرگروه می‌تواند ارتباط برقرار کند به ۱۵ حسگر مقداری شده است. در مورد پارامتر SORE، فرض شده که حسگرهای HSR و LSR هر یک به ترتیب دایره‌ای به شعاع ۱۰ و ۵ را پوشش می‌دهند. در OE، نسبت $x:y:z$ به صورت ۲:۱:۲۰ فرض شده و این بدان معناست که حسگر با حالت عملیاتی CH ۱۰ برابر بیشتر از حسگر در حالت عملیاتی HSR و ۲۰ برابر بیشتر از حسگر در حالت عملیاتی LSR انرژی مصرف می‌کند. در CE ثابت μ و k به ترتیب به ۱ و ۳ مقداری شده‌اند. همچنین در پارامتر BCP، فاکتور PF_i' برای حالت‌های عملیاتی CH، HSR و LSR به ترتیب به صورت همان نسبت ۲:۱:۲۰ فرض شده است. به علاوه، پارامتر BRR یا نرخ کاهش باتری برای حسگرهای CH، HSR و LSR به ترتیب برابر 0.2 ، 0.1 و 0.1 و برای حسگر غیر فعال ۰ در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است که سطح اولیه باتری همه حسگرها در اولین دوره اندازه‌گیری ۱ است [۷].

۴-۲ مقداردهی پارامترهای مرتبط با الگوریتم

برای حصول بهترین نتایج در هر الگوریتم، مقدار برخی پارامترها باید تنظیم گردد. در همه الگوریتم‌های مورد بررسی، تعداد دفعات تکرار الگوریتم به ۱۰۰ و اندازه جمعیت اولیه به ۲۰ مقداری شده است. در الگوریتم BGA برای عملگر انتخاب از روش چرخ گردان استفاده شده که احتمال انتخاب هر عامل به صورت نسبتی از مقدار شایستگی آن لحاظ می‌شود. در مرحله ترکیب نیز از روش تک‌نقطه‌ای با احتمال $p_c = 0.8$ و در مرحله جهش از روش مرسوم استفاده شده که با برعکس کردن برخی بیت‌ها که با یک احتمال خاص و به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند انجام می‌گیرد. در عملگر جهش مقدار احتمال جهش $p_m = 0.05$ در نظر گرفته شده است. در این الگوریتم به منظور بقای بهترین جواب‌های به دست آمده، از نخبه‌گرایی نیز استفاده شده است [۸] و [۹]. در الگوریتم BPSO، پارامترهای c_1 و c_2 برابر ۲ و w برابر ۱ تنظیم شده است.

در الگوریتم BQIGSA، پارامتر $kbest$ یک تابع خطی نزولی بر حسب تکرارهای الگوریتم است که از مقدار اولیه N (تعداد عامل‌ها) شروع شده و به ۱ کاهش می‌یابد. پارامتر دیگر G است که آن نیز یک تابع خطی نزولی بوده که در طی تکرارهای الگوریتم از مقدار اولیه G به مقدار صفر می‌رسد. G یک مقدار ثابت مهم است که برای کارایی بیشتر الگوریتم باید تنظیم گردد. در کاربرد مورد بررسی، با انجام آزمایش و روش سعی و خطا، مناسب‌ترین مقدار برای G برابر 0.7536 به دست آمده است.

Pseudo code of optimal WSN design algorithm (ODA)

Population size: N , number of iteration: G

1. **Begin**
2. $t = 0$, $SB(t) = \{\}$
3. Initialize a population of Q-bits $Q(t) = \{q_1, q_2, \dots, q_N\}$
4. **While** ($t \leq G$) **do**
5. Make $SW(t)$ by observing the state of $Q(t)$ using Eq. (9)
6. Evaluate $SW(t)$ by Eq. (26)
7. Update $SB(t)$ and $M_i(t), i=1, 2, \dots, N$ by Eq. (2)
8. Update $Q(t)$ by RQ-gate to yield $Q(t+1)$ by Eq. (10, 12, 13, 15)
9. Memorize the best agent A_{best} from $SB(t)$
10. **End while**
11. Return the best solution as the optimal WSN design
12. **End procedure**

شکل ۳: شبه‌کد الگوریتم طرح بهینه WSN با استفاده از BQIGSA.

در آن باتری‌هایی با ظرفیت بالای صفر موجود باشد، به طوری که یک طرح عملیاتی WSN بتواند ایجاد و برای دوره اندازه‌گیری بعدی به کار برده شود [۸].

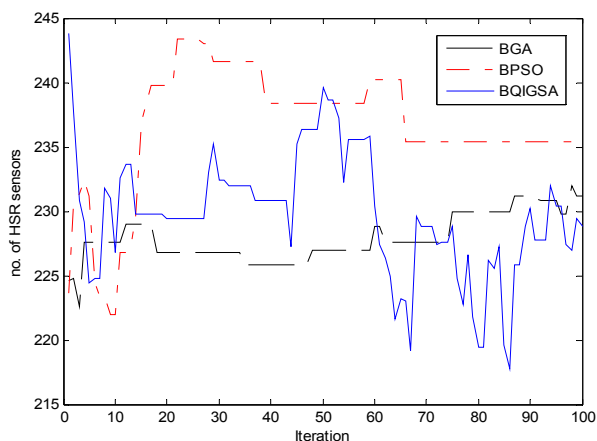
۴-۳ آزمایش‌ها و نتایج

همان طور که در بخش ۳-۱ توضیح داده شد، هر راه حل ممکن در الگوریتم BQIGSA به صورت یک بردار به اندازه ۱۸۰۰ و با مقادیر ۰ و ۱ شبیه‌سازی خواهد شد. این بردار به یک بردار به اندازه ۹۰۰ (تعداد حسگرها) قابل رمزگشایی است به طوری که در بردار به دست آمده ۰ نمایانگر غیر فعال بودن حسگر، ۱ نمایانگر حسگر فعال در محدوده حسگری کوتاه (LSR)، ۲ نمایانگر حسگر فعال در محدوده حسگری بلند (HSR) و ۳ نمایانگر سرگروه (CH) بودن حسگر است. مقدار شایستگی هر راه حل ممکن با استفاده از تابع هدف در (۲۶) محاسبه می‌شود. در ادامه به نحوه مقداردهی پارامترهای تابع هدف و پارامترهای مرتبط با الگوریتم‌های به کار برده شده پرداخته می‌شود. نتایج آزمایشات در دو بخش گزارش می‌شود. بخش اول مربوط به اعمال ODA است که الگوریتم‌ها روی شبکه با حسگرها با ظرفیت باتری کامل اجرا می‌شوند. بخش دوم نتایج مربوط به اعمال DODA است که الگوریتم‌ها به طور پی‌درپی روی شبکه استفاده می‌شوند تا مقایسه گردد که کدام الگوریتم تا مدت زمان بیشتری می‌تواند کارایی شبکه را حفظ کند یا به عبارتی طول عمر شبکه را افزایش دهد.

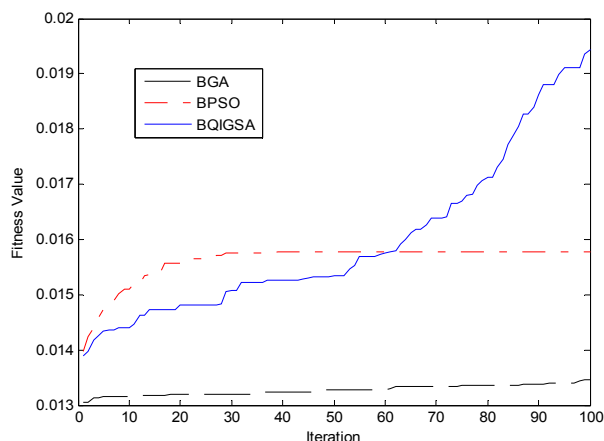
۴-۱ مقداردهی پارامترهای تابع هدف

همان طور که در بخش ۳-۲ ملاحظه می‌شود در تابع هدف، پارامترهایی وجود دارد که مقدار آنها باید تنظیم شوند که در این بخش به مقداردهی آنها پرداخته می‌شود. ضرایب وزنی $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_7$ در تابع هدف (۲۶) که میزان اهمیت هر پارامتر را مقداردهی می‌کنند به صورت جدول ۱ تنظیم شده‌اند [۷].

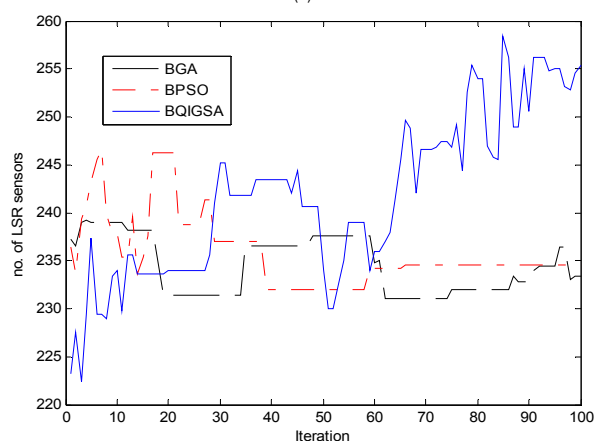
در پارامتر MRD، پارامتری به نام ρ_{S_i} وجود دارد که به عنوان تراکم ویژه زیرناحیه S_i تعریف می‌شود. برای اندازه‌گیری این پارامتر، کل محیط مورد مطالعه به ۹ زیرناحیه تقسیم شده که تراکم ویژه هر یک به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. تراکم ویژه هر زیرناحیه از تقسیم تعداد نقاط اندازه‌گیری آن زیرناحیه نسبت به مساحت آن به دست می‌آید. واضح است که با این فرض، مقدار m در رابطه MRD برابر ۹ خواهد بود. در پارامتر SDE مقدار ρ_d (تراکم ویژه مطلوب) به 0.2 مقداردهی شده است به این



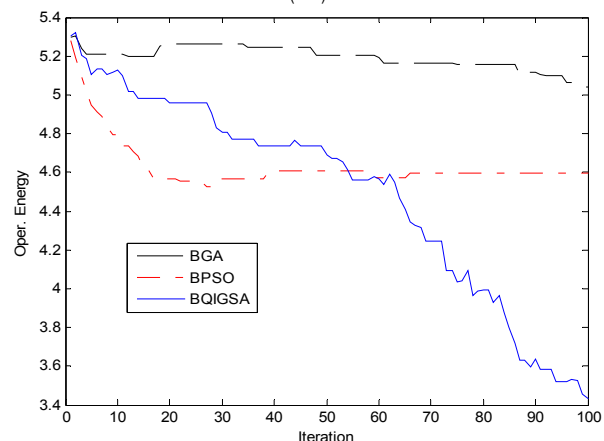
(د)



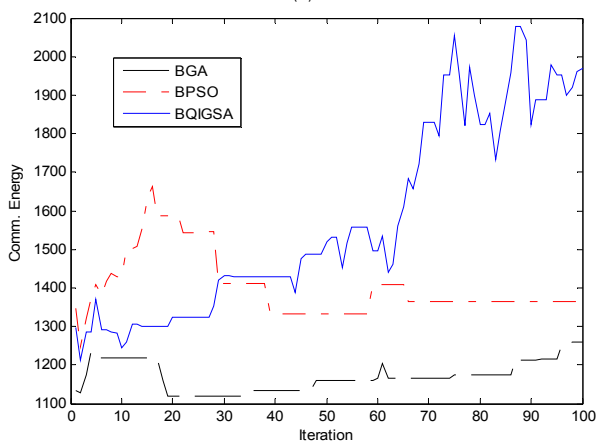
(الف)



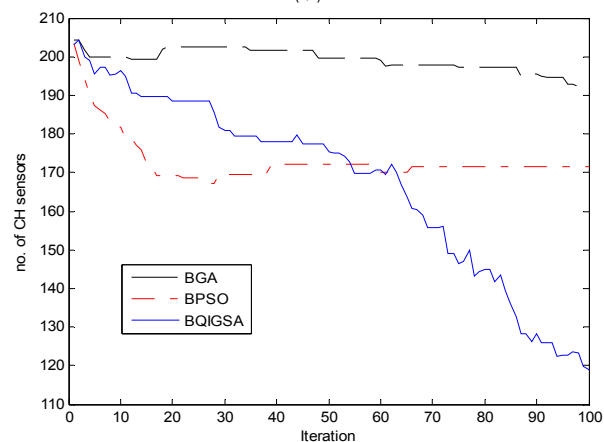
(ه)



(ب)



(و)



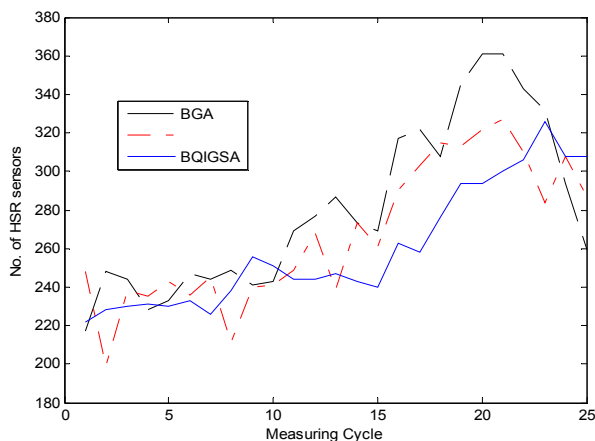
(ج)

شکل ۵: ارزیابی عملکرد سه الگوریتم BGA، BPSO و IBGSA در طول ۱۰۰ مرتبه تکرار الگوریتم. نتایج میانگین ۱۰ مرتبه اجرای هر الگوریتم گزارش شده است. (الف) مقدار تابع هدف، (ب) پارامتر انرژی عملیاتی، (ج) تعداد حسگرهای سرگروه، (د) تعداد حسگرهای منظم با محدوده حسگری بلند، (ه) تعداد حسگرهای با محدوده حسگری کوتاه و (و) پارامتر انرژی ارتباطی.

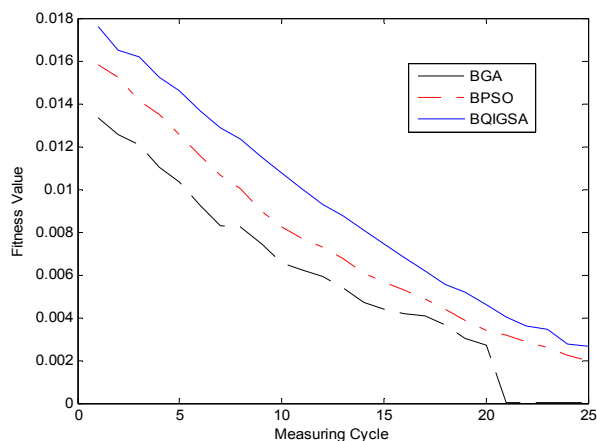
بوده است که طرح WSN بهینه‌تری را در مقایسه با BGA و BPSO به دست آورد. شکل ۵-ب میانگین روند تغییرات انرژی عملیاتی را در سه الگوریتم نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که الگوریتم پیشنهادی به طور چشم‌گیری مصرف انرژی عملیاتی را کاهش می‌دهد. شکل‌های ۵-ج، ۵-د و ۵-ه به ترتیب میانگین تغییرات تعداد حسگرها در حالت‌های عملیاتی CH، LSR و HSR را نشان می‌دهد. همان گونه که قبلاً ذکر شد، نسبت مصرف انرژی این حسگرها به ترتیب به نسبت ۲۰:۴:۱ است. در واقع مصرف انرژی حسگرهای سرگروه (CH) به نسبت بسیار بیشتر از سایر حالت‌های عملیاتی است. چنانچه در شکل ۵-ج ملاحظه می‌شود، الگوریتم BQIGSA به طور قابل ملاحظه‌ای تعداد حسگرهای سرگروه را

۴-۳ نتایج ODA

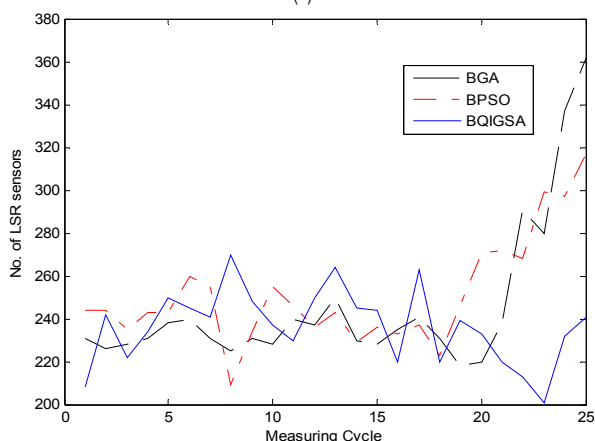
در این بخش به بررسی نتایج حاصل از اعمال الگوریتم‌های BGA، BPSO و BQIGSA روی شبکه حسگر پرداخته می‌شود. در طرح اولیه، الگوریتم‌ها روی شبکه‌ای اعمال می‌شوند که تمام حسگرها ظرفیت باتری پر دارند. این آزمایش‌ها ۱۰ مرتبه تکرار و میانگین نتایج به صورتی که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، گزارش شده است. شکل ۵-الف روند تغییر مقدار تابع هدف را در ۱۰۰ مرتبه تکرار الگوریتم نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌گردد در این نمودار الگوریتم BQIGSA نسبت به دو الگوریتم دیگر، کارایی بیشتری دارد. در واقع الگوریتم BQIGSA قادر



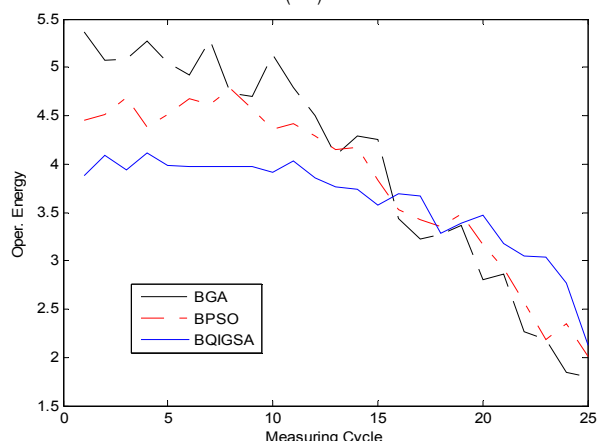
(د)



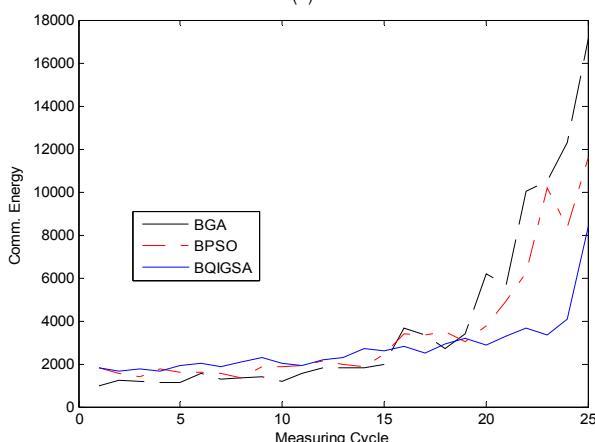
(الف)



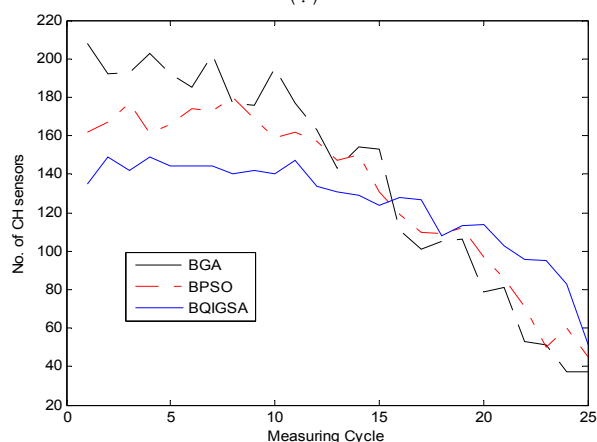
(ه)



(ب)



(و)



(ج)

شکل ۶: ارزیابی عملکرد سه الگوریتم BGA، BPSO و IBGSA در ۲۵ دوره اندازه‌گیری، (الف) مقدار تابع هدف، (ب) پارامتر انرژی عملیاتی، (ج) تعداد حسگرهای سرگروه، (د) تعداد حسگرهای منظم با محدوده حسگری بلند، (ه) تعداد حسگرهای با محدوده حسگری کوتاه و (و) پارامتر انرژی ارتباطی.

روند به تعداد ۲۵ مرتبه با استفاده از الگوریتم‌های BQIGSA، BGA و BPSO تکرار شده است. نتایج حاصل از اجرای مکرر این الگوریتم‌ها، روی شبکه با حسگرهای به روز رسانی شده بر اساس مقدار تابع هدف، انرژی عملیاتی، انرژی ارتباطی و تعداد حسگرهای CH، HSR و LSR در شکل ۶ مقایسه شده است. طرح اولیه هر یک از الگوریتم‌ها پس از اجرای اولین مرتبه ODA در جدول ۲ ملاحظه می‌شود. در این جدول، پارامتر ORR تعداد حسگرهایی است که نمی‌توانند با حسگر سرگروه ارتباط برقرار کنند و OCC تعداد حسگرهای سرگروهی است که دربردارنده بیشتر از ۱۵ حسگر در گروه خود هستند. همان طور که از این جدول نیز برمی‌آید الگوریتم BQIGSA در همه پارامترها نتیجه بهینه‌تری را در مقایسه با دو الگوریتم دیگر دارد.

کاهش داده و در ازای آن، جهت پوشش بهتر شبکه تعداد حسگرهای HSR و LSR که مصرف انرژی کمتری دارند افزایش یافته است. این تغییرات اگرچه منتهی به افزایش میزان انرژی ارتباطی (شکل ۵- و) شده است، اما به طور کلی با توجه به روند تغییرات تابع هدف، منجر به افزایش کارایی و ایجاد طرح بهینه‌تر شبکه گردیده است.

۴-۴ نتایج DODA

در این بخش، الگوریتم DODA روی شبکه اعمال می‌شود به صورتی که پس از اعمال الگوریتم ODA روی شبکه با ظرفیت باتری کامل، ظرفیت باتری‌ها به روز رسانی می‌گردد. به همین ترتیب الگوریتم ODA مجدداً روی شبکه با باتری‌های به روز رسانی شده اعمال می‌شود. این

جدول ۳: میانگین تعداد دفعاتی که هر حسگر در ۲۵ مرتبه تکرار DODA توسط الگوریتم‌های BGA, BPSO و BQIGSA به عنوان CH, HSR و LSR یا به عنوان حسگر فعال و غیر فعال انتخاب می‌شود. اعداد داخل پرانتز انحراف معیار است.

Mean usage of	BGA	BPSO	BQIGSA
CH	۳,۸۶ (۰,۴۳)	۳,۶۶ (۰,۶۱)	۳,۴۶ (۰,۷۴)
HSR	۷,۷۹ (۱,۷۳)	۷,۶۱ (۱,۹۳)	۷,۳۶ (۲,۱۴)
LSR	۶,۸۳ (۱,۹۲)	۶,۹۷ (۱,۸۹)	۶,۵۷ (۲,۱۶)
Active	۱۸,۴۸ (۲,۰۵)	۱۸,۲۴ (۲,۱۲)	۱۷,۳۸ (۲,۲۴)
Off	۶,۵۲ (۲,۰۵)	۶,۷۵ (۲,۱۰)	۷,۶۱ (۲,۲۳)

باید ارتباط بین حسگرهای LSR را با حسگرهای سرگروه برقرار نماید و از آنجا که تعداد حسگرهای سرگروه به دلیل کاهش ظرفیت باتری‌ها در دوره‌های اندازه‌گیری بالا کاهش یافته است، لذا فاصله حسگرهای LSR و HSR از آنها بیشتر شده و متعاقباً مصرف انرژی عملیاتی BGA و پس از آن BPSO افزایش یافته است. در این موارد مشاهده می‌شود که الگوریتم BQIGSA به نسبت در حد منطقی‌تری کارایی خود را در طی دوره‌های اندازه‌گیری حفظ نموده است.

جدول ۳ میانگین تعداد دفعاتی که هر حسگر در طول ۲۵ دوره اندازه‌گیری در حالت‌های عملیاتی سرگروه، حسگر منظم با محدوده حسگری بلند، حسگر منظم با محدوده حسگری کوتاه قرار می‌گیرد و همچنین تعداد دفعاتی که به طور کلی در حالت فعال یا غیر فعال است را با سه الگوریتم BGA, BPSO و BQIGSA مقایسه می‌کند. در این جدول مقادیر داخل پرانتز نمایانگر انحراف معیار هستند. چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود، الگوریتم BQIGSA تعداد دفعاتی که حسگر در حالت فعال (CH, HSR و LSR) استفاده می‌شود را کاهش و تعداد دفعاتی که حسگر در حالت غیر فعال عمل می‌کند را افزایش داده است، در حالی که با توجه به نمودار شکل ۶- الف کارایی آن بیشتر از دو الگوریتم دیگر است. میانگین تعداد دوره‌های اندازه‌گیری که هر حسگر در حالت‌های عملیاتی CH, HSR و LSR، فعال و غیر فعال قرار می‌گیرد با استفاده از هر سه الگوریتم در جدول ۳ مقایسه شده است. در مجموع با توجه به نتایج گزارش شده در شکل‌های ۵ و ۶ و همچنین جدول ۳ می‌توان استدلال کرد که استفاده از الگوریتم BQIGSA در کاربرد پیش رو می‌تواند طرح WSN بهینه‌تری را تولید نماید و طول عمر شبکه را به نحو مطلوب‌تری افزایش دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی باینری کوانتومی روشی پیشنهاد داده شد که طرحی بهینه برای شبکه حسگر بی‌سیم ارائه دهد که علاوه بر کمینه‌کردن مصرف انرژی، نیازمندی‌های ارتباطی و کاربردی شبکه برآورده گردد. آزمایش‌ها روی یک شبکه حسگر بی‌سیم در کاربرد کشاورزی طراحی شد که در آن حسگرها به طور ثابت و در مکان مشخصی قرار دارند. حالت عملیاتی این حسگرها قابل تنظیم است که شامل چهار حالت سرگروه، حسگر با محدوده حسگری بلند، حسگر با محدوده حسگری کوتاه و حسگر غیر فعال است. هدف الگوریتم این است که دنباله بهینه‌ای متشکل از حالت‌های عملیاتی همه حسگرها را تعیین نماید. الگوریتم پیشنهادی با روش‌های الگوریتم وراثتی و الگوریتم انبوه ذرات در دو حالت طرح اولیه و طرح پویا مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی تأییدکننده برتری روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی باینری کوانتومی است. این الگوریتم قادر بوده کارایی

جدول ۲: نتایج حاصل از طرح اولیه ODA سه الگوریتم BGA, BPSO و BQIGSA به عنوان نتیجه اولین دوره اندازه‌گیری و ورودی اولیه DODA.

الگوریتم / پارامتر	BGA	BPSO	BQIGSA
Fitness	۰,۱۳۳	۰,۱۶۳	۰,۱۸۱
SDE	.	.	.
OE	۵,۲۷	۴,۵۰	۳,۸۶
CE	۱,۱۱۵۹	۱,۲۵۲۶	۱,۷۴۶۷
ORR	.	.	.
OCC	.	.	.
CH	۲۰۳	۱۶۷	۱۳۹
HSR	۲۲۸	۲۴۸	۲۲۲
LSR	۲۲۷	۲۲۱	۲۵۰
Active	۶۵۸	۶۳۶	۶۱۱

از آنجا که ممکن است پس از چندین مرتبه اجرای DODA ظرفیت باتری برخی حسگرها منفی شود، برای جلوگیری از این امر در زمان کاهش ظرفیت باتری بررسی می‌شود که چنانچه حالت عملیاتی حسگری از نوع CH باشد و ظرفیت باتری آن کمتر از ۰/۲ و بیشتر از ۰/۰۲ باشد، حالت عملیاتی آن به نوع HSR تبدیل شود. در غیر این صورت اگر ظرفیت باتری بیشتر از ۰/۰۱ باشد حالت عملیاتی به LSR تبدیل می‌گردد و چنانچه این تبدیل نیز امکان‌پذیر نباشد حسگر به حالت غیر فعال تغییر وضعیت می‌دهد.

شکل ۶- الف نمودار تغییرات تابع هدف را در ۲۵ دوره اندازه‌گیری ODAD نشان می‌دهد. بدیهی است که با کاهش باتری حسگرها کارایی شبکه یا مقدار تابع هدف آن روند نزولی دارد اما همان گونه که در نمودار ملاحظه می‌شود، BQIGSA نسبت به دو روش دیگر تا مدت زمان بیشتری می‌تواند کارایی شبکه را حفظ کند. به همین ترتیب در مورد نمودار شکل‌های ۶- ب و ۶- ج که به ترتیب نمایانگر انرژی مصرفی عملیاتی و تعداد حسگرهای سرگروه هستند، می‌توان استنتاج کرد که BQIGSA به نسبت با سرعت کمتری انرژی عملیاتی و تعداد حسگرهای سرگروه را در طی دوره‌های اندازه‌گیری کاهش می‌دهد که این باعث پایداری بیشتر شبکه می‌شود.

همان طور که در شکل‌های ۶- د و ۶- ه مشاهده می‌شود روند کلی تغییرات تعداد حسگرهای HSR و LSR به صورت صعودی است به دلیل این که با کاهش حسگرهای سرگروه، شبکه با استفاده از افزایش حسگرهای LSR و HSR سعی در پوشش کامل شبکه دارد. استثنایی که در رفتار منحنی‌های BGA و BPSO در نمودارهای ۶- ب، ۶- ج، ۶- د و ۶- ه ملاحظه می‌شود از آنجا ناشی می‌شود که شبکه برای جلوگیری از منفی‌شدن ظرفیت باتری‌ها، در دوره‌های اندازه‌گیری بالا حالت عملیاتی آنها را به حالت عملیاتی که مصرف انرژی کمتری دارد تغییر می‌دهد. قابل ذکر است که هر حسگر حداکثر به تعداد ۵ مرتبه می‌تواند به عنوان حسگر سرگروه انتخاب شود. در صورتی که در طی ۲۵ دوره اندازه‌گیری حسگری بیش از این تعداد بخواهد در حالت عملیاتی سرگروه قرار گیرد، یا به طریق دیگری ظرفیت باتری آن در آستانه منفی‌شدن باشد، الگوریتم از این وضعیت جلوگیری کرده و حسگر را به حالت عملیاتی مناسب کاهش می‌دهد. از منحنی‌های BGA چنین برمی‌آید که این الگوریتم نسبت به دو الگوریتم دیگر، سریع‌تر با چنین مشکلی مواجه می‌شود. به همین ترتیب می‌توان در شکل ۶- و افزایش ناگهانی مصرف انرژی ارتباطی را در مورد الگوریتم BGA توجیه نمود. از آنجا که تعداد حسگرهای LSR در دوره‌های اندازه‌گیری بالا افزایش یافته است، شبکه برای حفظ ارتباط

و طول عمر شبکه را در مقایسه با دو روش پیشین افزایش دهد.

مراجع

- ring array antenna," *Electromagnetics Research*, vol. 25, pp. 331-348, Sept. 2010.
- [19] M. Yin, Y. Hu, F. Yang, X. Li, and W. Gu, "A novel hybrid K-harmonic means and gravitational search algorithm approach for clustering," *J. of Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 8, pp. 9319-9324, Aug. 2011.
- [20] S. Sarafrazi and H. Nezamabadi-pour, "Facing the classification of binary problems with a GSA-SVM hybrid system," *J. of Math. Comput. Model*, vol. 57, no. 1-2, pp. 270-278, Jan. 2013.
- [21] C. Li and J. Zhou, "Parameters identification of hydraulic turbine governing system using improved gravitational search algorithm," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 1, pp. 374-381, Jan. 2011.
- [22] M. Taghipour, A. R. Moradi, and M. Yazdani-Asrami, "Identification of magnetizing inrush current in power transformers using GSA trained ANN for educational purposes," in *Proc. of IEEE Conf. on Open Systems, ICOS'10*, pp. 23-27, Dec. 2010.
- [23] M. Soleimanpour-Moghadam, H. Nezamabadi-pour, and M. M. Farsangi, "A quantum behaved gravitational search algorithm," *Intelligent Information Management*, vol. 4, no. 6, pp. 390-395, Nov. 2012.
- [24] M. Soleimanpour-Moghadam and H. Nezamabadi-pour, "An improved quantum behaved gravitational search algorithm," in *Proc. of 20th Iranian Conf. on Electrical Engineering, ICEE'12*, pp. 711-715, May 2012.
- [25] M. Soleimanpour-Moghadam, H. Nezamabadi-pour, and M. M. Farsangi, "A quantum inspired gravitational search algorithm for numerical function optimization," *J. of Information Sciences*, vol. 267, no. 20, pp. 83-100, May 2014.
- [26] A. A. Ibrahim, A. Mohamed, and H. Shareef, "A novel quantum-inspired binary gravitational search algorithm in obtaining optimal power quality monitor placement," *J. of Applied Science*, vol. 12, no. 9, pp. 822-830, Jun. 2012.
- [27] H. Nezamabadi-pour, "A quantum-inspired gravitational search algorithm for binary encoded optimization problems," *J. of Engineering Application of Artificial Intelligence*, vol. 40, pp. 62-75, Apr. 2015.
- مینا میرحسینی** دوره کارشناسی خود را در مهندسی کامپیوتر-سخت افزار در دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال ۱۳۸۸ به پایان رساند. پس از آن، مدرک کارشناسی ارشد خود را در علوم کامپیوتر-سیستم‌های هوشمند از دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال ۱۳۹۱ دریافت کرد. وی هم‌اکنون عضو هیات علمی گروه علوم کامپیوتر مجتمع آموزش عالی بم است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه‌ی او هوش جمعی، محاسبات تکاملی، پردازش متن و شبکه‌های حسگر بی‌سیم است.
- فاطمه بارانی** در سال ۱۳۸۷ مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر-نرم‌افزار خود را از دانشگاه فردوسی مشهد و در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر گرایش نرم‌افزار خود را از دانشگاه تربیت مدرس تهران دریافت نمود و هم‌اکنون عضو هیات علمی گروه مهندسی کامپیوتر مجتمع آموزش عالی بم می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل موضوعاتی مانند محاسبات نرم، هوش جمعی، محاسبات تکاملی، امنیت شبکه‌های کامپیوتری، شبکه‌های اقتضایی متحرک می‌باشد.
- حسین نظام‌آبادی‌پور** دوره کارشناسی خود را در مهندسی برق الکترونیک در دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال ۱۳۷۷ به پایان رساند. پس از آن، مدارک کارشناسی ارشد و دکتری خود را نیز در مهندسی برق الکترونیک از دانشگاه تربیت مدرس به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۳ دریافت کرد. وی هم‌اکنون استاد بخش مهندسی برق دانشگاه شهید باهنر کرمان است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه‌ی او پردازش تصویر، بازشناسی الگو، کاربرد رایانش نرم در پردازش تصویر و روش‌های بهینه سازی ابتکاری است.
- [1] H. Alemdar and C. Ersoy, "Wireless sensor networks for healthcare: a survey," *J. of Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2688-2710, Oct. 2010.
- [2] V. L. Boginski, C. W. Commander, P. M. Pardalos, and Y. Ye, *Sensors: Theory, Algorithms, and Applications*, Springer Optimization and Its Applications, Springer-Verlag, New York, 2011.
- [3] S. K. Das, G. Ghidini, A. Navarra, and C. M. Pinotti, "Localization and scheduling protocols for actor-centric sensor networks," *J. of Networks*, vol. 59, no. 3, pp. 299-319, May 2012.
- [4] M. K. Rafsanjani, M. Mirhoseini, and R. Nourizadeh, "A multi-objective evolutionary algorithm for improving energy consumption in wireless sensor networks," *Bull. Transilv. Univ. Brasov*, vol. 6, no. 2, pp. 107-116, Jan. 2013.
- [5] J. Park, S. Lee, and S. Yoo, "Time slot assignment for converge cast in wireless sensor networks," *J. of Parallel Distrib. Comput*, vol. 83, pp. 70-82, Sept. 2015.
- [6] F. Carrabs, R. Cerulli, C. D'Ambrosio, M. Gentili, and A. Raiconi, "Maximizing lifetime in wireless sensor networks with multiple sensor families," *Computers & Operations Research*, vol. 60, pp. 121-137, Aug. 2015.
- [7] M. Rebaia, M. Leberreb, H. Snoussi, F. Hnaiend, and L. Khoukhi, "Sensor deployment optimization methods to achieve both coverage and connectivity in wireless sensor networks," *Computers & Operations Research*, vol. 59, pp. 11-21, Jul. 2015.
- [8] K. P. Ferentinos and T. A. Tsiligiridis, "Adaptive design optimization of wireless sensor networks using genetic algorithms," *J. of Computer Networks*, vol. 51, no. 4, pp. 1031-1051, Mar. 2007.
- [9] K. P. Ferentinos and T. A. Tsiligiridis, "A memetic algorithm for optimal dynamic design of wireless sensor networks," *J. of Computer Communications*, vol. 33, no. 2, pp. 250-258, Feb. 2010.
- [10] B. Krishnamachari and F. Ordonez, "Analysis of energy-efficient, fair routing in wireless sensor networks through non-linear optimization," in *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conf.-Fall*, pp. 2844-2848, Orlando, FL, USA, Oct. 2003.
- [11] K. P. Ferentinos and T. A. Tsiligiridis, "Evolutionary energy management and design of wireless sensor networks," in *Proc. of Second Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, pp. 406-417, Sept. 2005.
- [12] S. Hojjatoleslami, V. Aghazarian, M. Dehghan, and N. G. Motlagh, "PSO based node placement optimization for wireless sensor networks," in *Proc. of Intelligent Systems and Applications*, pp. 12-17, Sept. 2011.
- [13] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, and S. Saryazdi, "GSA: a gravitational search algorithm," *J. of Information Sciences*, vol. 179, no. 13, pp. 2232-2248, Jun. 2009.
- [14] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, and S. Saryazdi, "BGSA: binary gravitational search algorithm," *J. of Nat Comput*, vol. 9, no. 3, pp. 727-745, Sept. 2010.
- [15] E. Rashedi and H. Nezamabadi-pour, "Feature subset selection using improved binary gravitational search algorithm," *J. of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1211-1221, Apr. 2014.
- [16] X. H. Han, X. M. Chang, L. Quan, X. Y. Xiong, J. X. Li, Z. X. Zhang, and Y. Liu, "Feature subset selection by gravitational search algorithm optimization," *J. of Information Sciences*, vol. 281, pp. 128-146, Oct. 2014.
- [17] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, and S. Saryazdi, "Filter modeling using gravitational search algorithm," *J. of Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 24, no. 1, pp. 117-122, Feb. 2011.
- [18] A. Chatterjee and G. K. Mahanti, "Comparative performance of gravitational search algorithm and modified particle swarm optimization algorithm for synthesis of thinned scanned concentric