

ارائه یک الگوریتم فازی-ژنتیک برای کنترل توان در شبکه‌های حسگر بی سیم بدنی

سید امیرحسین پاکروان^۱، علی قیاسیان^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، اصفهان، ایران

sahp.wrok@yahoo.com

^۲ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

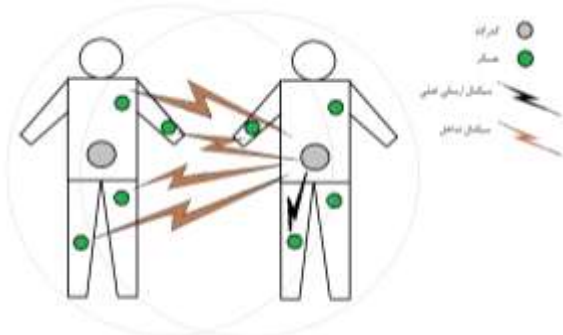
ghiasian.ali@eng.sku.ac.ir

چکیده: یکی از کاربردهای مهم شبکه‌های بی سیم در زمینه پزشکی، شبکه‌های حسگر بی سیم بدنی (WBAN) است. تعیین حسگرهای اندازه‌گیر روی یا درون بدن انسان ایجاب می‌کند میزان مصرف انرژی آن‌ها بسیار کنترل شده و اندک باشد تا خطری برای بیمار ایجاد نشود. وجود تداخل میان گره‌های فرستنده و گیرنده مختلف در این شبکه‌ها چالش مهمی است که میزان مصرف انرژی در حسگرهای تشکیل‌دهنده WBAN را افزایش می‌دهد. در این مقاله، از روش کنترل‌کننده فازی-ژنتیک به منظور کنترل توان انتقال در حسگرهای WBAN استفاده شده است. در این روش با استفاده از الگوریتم ژنتیک تلاش می‌شود پایگاه دانش کنترل‌کننده فازی به گونه‌ای تنظیم شود که کنترل‌کننده فازی بتواند با مدیریت توان انتقال هر یک از حسگرهای WBAN، هم مقدار مصرف انرژی را کاهش دهد و هم کمترین میزان تداخل را با دیگر حسگرها در WBAN‌های همسایه موجود در محیط ایجاد کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش کنترل‌کننده فازی ژنتیک می‌تواند میزان مصرف توان را تا ۳۴ درصد نسبت به روش متداول کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: تداخل، کنترل توان، مصرف انرژی، کنترل‌کننده فازی-ژنتیک، Wireless Body Area Network.

۱. مقدمه

انتقال داده در دیگر فرستنده‌ها در شبکه‌های حسگر بدنی دیگر است. هدف این مقاله، ارائه روشی برای کنترل توان فرستنده‌هاست؛ به نحوی که کیفیت کلی انتقال داده‌ها در شبکه مخدوش نگردد.



شکل (۱): تداخل‌های به‌وجودآمده بین حسگرها در دو WBAN مجاور

ادامهٔ روال مطالب این مقاله به شرح زیر است:

در بخش دوم، مروری بر پژوهش‌هایی که در زمینه مدیریت تداخل در شبکه‌های بی‌سیم صورت گرفته‌اند، انجام می‌شود. در بخش سوم، مفاهیم الگوریتم ژنتیک و کنترل‌کننده فازی و چگونگی ارتباط این دو با یکدیگر معرفی می‌شود. در بخش چهارم روش پیشنهادی شبیه‌سازی می‌شود. در بخش پنجم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی تحلیل می‌شود، و در بخش آخر هم نتایج به‌دست‌آمده از این مقاله جمع‌بندی و ارائه می‌شود.

۲. مرور کارهای گذشته

با توجه به اهمیت مدیریت تداخل و قابلیت اطمینان در شبکه‌های بی‌سیم، تابه‌حال رویکردهای زیادی برای افزایش گذردهی و نسبت تحویل صحیح بسته به کل داده‌های ارسالی در شبکه (PDR) و همچنین مدیریت تداخل به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان در شبکه‌های بی‌سیم مختلف ارائه شده است؛ در ادامه به چند مورد از پرکاربردترین آن‌ها اشاره می‌شود. روش‌هایی را که به‌منظور مدیریت تداخل در شبکه‌های بی‌سیم به کار می‌رود به‌طور کلی می‌توان در دو دسته تقسیم‌بندی کرد: الف. روش‌های متکی بر زمان‌بندی کانال اشتراکی؛ ب. کنترل توان.

۱.۲. روش‌های متکی بر زمان‌بندی کانال اشتراکی

برای اولین بار در مرجع [۳] تاسیولاس الگوریتم حداکثر زمان‌بندی وزن‌دار^۶ را معرفی کرد و ثابت نمود که با مدیریت تداخل به این روش، گذردهی شبکه در این الگوریتم بهینه است. از آن موقع تاکنون،

در سال‌های اخیر، فناوری بی‌سیم به‌طور چشمگیری مورد توجه و استفاده کاربران شبکه قرار گرفته است. این توجه موجب به‌وجود آمدن کاربردهای جدیدی در زمینه‌های مختلف نظامی، پزشکی و... شده است. یکی از کاربردهای مهم شبکه‌های بی‌سیم در زمینه پزشکی، شبکه‌های حسگر بی‌سیم بدنی (WBAN) است.

یک شبکه حسگر بی‌سیم بدنی به‌طور کلی از یک گره مرکزی به‌عنوان درگاه^۲ و چندین گره حسگر قابل کاشت و قابل پوشیدن تشکیل شده است که می‌تواند به‌طور دائم سیگنال‌های حیاتی از قبیل نرخ سلامتی، غلظت خون، نوار قلب، الکترومیوگرافی^۳ و... را از بدن انسان جمع‌آوری کند و آن‌ها را به بیمارستان یا مرکز مدیریت انتقال دهد [۱]. وجود شبکه‌های حسگر بی‌سیم بدنی موجب می‌شود که دیگر نیاز نباشد بیماران، به‌خصوص صعب‌العلاج‌ها، پیوسته به بیمارستان‌ها مراجعه کنند و یا حتی در بیمارستان‌ها بستری شوند.

در فرایند پیاده‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم بدنی، مشکلاتی اساسی نمایان شده است؛ از جمله: ۱. شبکه حسگر بی‌سیم بدنی باید از تأخیر کم و قابلیت اطمینان^۴ فوق‌العاده‌ای برخوردار باشد؛ زیرا در این ساختار، گره‌های حسگر سیگنال‌های زندگی را از بدن انسان نمونه‌برداری می‌کنند. ۲. عدم وجود انرژی کافی؛ زیرا عمر باتری گره‌های حسگر محدود است و شارژ مجدد حسگرها و یا حتی تعویض آن‌ها امری دشوار و در بعضی موارد غیرممکن است [۲]. همچنین، برای جلوگیری از آسیب تشعشعات امواج رادیویی روی بدن بیمار، توان ارسالی حسگرها حتماً باید اندک و بسیار کنترل‌شده باشد؛ از این‌رو هرچه بتوان در مصرف توان در هنگام تبادل اطلاعات صرفه‌جویی کرد، کارایی و عمر شبکه افزایش می‌یابد.

آزمایش‌ها نشان داده‌اند که قابلیت اطمینان در یک پیوند در شبکه‌های بی‌سیم ناحیه بدن و همچنین میزان مصرف انرژی در حسگرهای تشکیل‌دهنده شبکه‌های حسگر بی‌سیم بدنی، تا حد زیادی متأثر از تداخلی است که توسط فرستنده‌های پیوندهای دیگر، ایجاد شده است. منظور از ایجاد تداخل در دو شبکه WBAN مجاور در شکل (۱) نشان داده شده است.

به‌طور کلی، تداخل در شبکه‌های بی‌سیم متأثر از چندین عامل از قبیل حالت کانال، نویز، اثر محوشدگی^۵، فاصله انتقال، توان انتقال و... است. یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در تداخل سطح، همین توان

1. Wireless Body Area Network
2. Gateway
3. Electromyography
4. Reliability
5. Fading

6. Packet Delivery Ratio

7. Maximum Weighted Scheduling

که از تعداد محدودی توان انتقال استفاده می‌کنند، برای اینکه بتوانند مدل تداخل فیزیکی را ایجاد کند، خود نیاز به یک روش کنترل توان دارند. افزون بر اینکه یکی از معایب این الگوریتم‌ها میزان تأخیر بالای آنهاست.

۲.۲. کنترل توان

روش دیگری که برای امر مدیریت تداخل در شبکه‌های بی‌سیم بسیار استفاده شده، روش کنترل توان انتقال است. در کنترل توان انتقال نیز عموماً برای مشخص کردن روابط تداخلی میان یک فرستنده و دیگر فرستنده‌های همزمان در گیرنده متناظر، از نسبت قدرت سیگنال اصلی به قدرت سیگنال‌های متداخل به علاوه نویز یا همان SINR استفاده می‌کنند [۹ و ۱۰]. به همین علت است که این روش‌های کنترل توان، خود برای ایجاد ساختار مدل تداخل فیزیکی هم به کار می‌روند.

در این روش‌ها تلاش بر این است که توان انتقال هر یک از فرستنده‌ها در شبکه به گونه‌ای انتخاب شود که بتوان ضمن رعایت یک حداقل آستانه‌ای از SINR به منظور اطمینان از وجود یک ارتباط موفق و حفظ کیفیت سرویس مدنظر^۴ (QoS)، از کمترین توان انتقال برای تبادل اطلاعات بین فرستنده و گیرنده‌ها استفاده کرد. به همین سبب روش‌های کنترل توان انتقال نه تنها موجب می‌شوند که با کاهش تداخل بین پیوندهای متداخل، گذردهی کل شبکه بی‌سیم و PDR افزایش یابد، بلکه مدیریت مصرف توان برای هر یک از زوج‌های فرستنده و گیرنده، باعث کاهش یافتن توان مصرفی کل سیستم می‌شود. این امر خود برای یک سری از شبکه‌های بی‌سیم به خصوص شبکه‌های حسگر بی‌سیم بدنی، امری حیاتی و تعیین‌کننده در کارایی شبکه است.

روش‌هایی که مراجع [۹ و ۱۱] پیشنهاد کرده‌اند، با استفاده از ایده نظریه بازی‌ها برای هر کاربر در شبکه، یک تابع سود و منفعت تعریف شده است که توسط SINR مطلوب آن کاربر منهای یک قیمت‌گذاری برای فراهم کردن انگیزه کافی برای هر کاربر محاسبه می‌شود. در این روش‌ها، اگر هر گره به صورت خودسرانه بخواهد مقدار توان انتقال خود را افزایش دهد، در عمل شاهد آن خواهد بود که تابع منفعت کلی سیستم را کاهش داده است. به همین علت هر گره سعی می‌کند سطح توان انتقال را به گونه‌ای انتخاب کند که سودمندی جمعی همه کاربران را به حداکثر رساند به جای اینکه فقط تلاش کند که سطح SINR خودش را حداکثر سازد. همچنین هر گره ضمن تلاش برای حداکثر کردن سود و منفعت کل شبکه و به دست آوردن آستانه SINR

تلاش‌های تحقیقی فراوانی برای پیاده‌سازی توزیع شده‌ای از این الگوریتم‌ها انجام شده است و برای این منظور از انواع مدل‌های تداخلی بهره گرفته‌اند.

ژیانگ و همکاران در مراجع [۴ و ۵] نسخه‌هایی از CSMA^۱ ساده و گذردهی بهینه تطبیقی را پیشنهاد داده‌اند. این الگوریتم‌ها از ویژگی کاملاً توزیع‌شدگی بهره می‌برند؛ یعنی نیاز به هیچ تبادل پیامی میان انواع فرستنده‌ها ندارند. در این روش‌ها فرض بر این است که توان انتقال گره‌های شبکه ثابت‌اند و محقق فقط سعی بر این دارد که گره‌ها را به گونه‌ای زمان‌بندی کند که بتواند به تمام درخواست‌های گره‌ها در کمترین زمان ممکن پاسخ دهد و در واقع گذردهی شبکه را به حداکثر رساند. در هر صورت، آنالیز گذردهی و ضمانت کارایی در آنها متکی بر یک سری فرضیات قوی صورت گرفته است. برای مثال در الگوریتم پیشنهادی آنها تداخل می‌تواند به صورت یک گراف بدون جهت ساده مدل‌سازی شود. این مدل تداخل ساده نمی‌تواند مسائل نهایی آشکار و پنهان شناخته‌شده از تداخل واقعی را به حساب بیاورد و در کل به طور دقیق، ماهیت تداخل را ضبط نمی‌کند. برای مثال این مدل تداخلی اثر تجمعی پیوندهای همزمان را روی یک پیوند، در نظر نمی‌گیرد.

روش دیگری که برای مدیریت تداخل در مراجع [۶-۸] پیشنهاد شده، استفاده از زمان‌بندی پیوندها در شبکه بر اساس یک مدل تداخلی واقعی‌تر به نام مدل تداخل فیزیکی (SINR) است. در این روش‌ها تلاش می‌شود عناصر تشکیل‌دهنده شبکه (فرستنده و گیرنده‌ها) را به گونه‌ای زمان‌بندی کنند که پیوندهایی که در مدل تداخل فیزیکی با یکدیگر هیچ‌گونه تداخلی ندارند، در یک شکاف از زمان، عملیات انتقال داده را انجام دهند و پیوندهایی که با یکدیگر متداخل‌اند در شکاف‌های زمانی مختلف فعالیت کنند تا به این طریق بتوانند گذردهی سیستم را تا حد امکان افزایش دهند.

از آنجایی که زمان‌بندی شبکه برای افزایش گذردهی بر اساس مدل تداخلی فیزیکی، خود امری پیچیده و مشکل است و اثبات شده که الگوریتم‌هایی که بتوانند این مشکل را حل کنند خود NP-HARD^۳ هستند، در هر یک از این الگوریتم‌ها نیز به منظور کاهش پیچیدگی مجبورند که از یک سری فرضیات ساده‌کننده استفاده کنند. مثلاً در هر یک از مقالات بیان شده به منظور کاهش پیچیدگی الگوریتم فرض کرده‌اند که یا توان انتقال گره‌های فرستنده ثابت است [۷] یا از تعداد معدودی توان انتقال استفاده کرده‌اند [۶ و ۸]. در الگوریتم‌هایی

1. Carrier Sense Multiple Access
2. Signal to Interference Plus Noise Ratio
3. Non-deterministic Polynomial-time Hard

کردن روابط غیرخطی به دلیل NP HARD بودن مسئله غیرممکن فرض می‌شود.

در این مقاله، روش سومی برای پیدا کردن این پارامترهای اساسی در کنترل‌کننده فازی معرفی می‌شود و آن استفاده از الگوریتم ژنتیک است. الگوریتم ژنتیک این قابلیت را دارد که با جست‌وجو در مجموعه عظیمی از پایگاه‌های دانش ممکن برای کنترل‌کننده فازی، پایگاه دانشی را که متناسب با حالت کانال موجود در شبکه است، پیدا کند؛ به نحوی که کنترل‌کننده فازی منطبق با آن شرایط قابل تنظیم باشد. در ادامه، مدل سیستم استفاده‌شده در این مقاله معرفی می‌شود.

۱.۳. مدل سیستم

امروزه تلاش‌های زیادی برای مدل کردن شبکه‌های WBAN خاص صورت می‌گیرد. در مرجع [۱۴]، با هدف نظارت بر بیماران پارکینسون کانال WBAN با تکنیک FI^۲ مدل شده و در مرجع [۱۵] برای مدل کردن از روش ES^۳ بهره گرفته شده است. مدل عمومی سیستمی که با توجه به کاربرد مدنظر این مقاله در نظر گرفته شده و مدل پایه محسوب می‌شود، با تکیه بر مدل‌های ارائه‌شده در مراجع [۱۶ و ۱۷] از n شبکه حسگر بی‌سیم بدنی تشکیل شده است. در هر شبکه تنها، فرض می‌شود که هیچ برخورد درون‌شبکه‌ای بین گره‌های حسگر و گذرگاه موجود در آن شبکه اتفاق نمی‌افتد؛ زیرا درون هر شبکه حسگر بی‌سیم بدنی از یک طرح (MAC) مبتنی بر TDMA^۵ برای ارتباط میان گذرگاه و گره‌های حسگر استفاده می‌شود. پس با توجه به اینکه درون هر شبکه تنها، هیچ‌گونه برخوردی روی نمی‌دهد، برای سادگی در بیان مدل سیستم و همچنین امر شبیه‌سازی فرض می‌شود که هر شبکه WBAN شامل یک گره حسگر s_i و یک گذرگاه g_i است که از طریق لینک l_i انتقال از گره s_i به سمت g_i انجام می‌گیرد (مطابق شکل ۲). بنابراین در اینجا سیستم ارتباطی شامل دو مجموعه متناهی $S = \{s_1, \dots, s_n\}$ و $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ است که به ترتیب گره‌های فرستنده حسگر و گره‌های گیرنده گذرگاه‌ها هستند و تشکیل یک مجموعه پیوند^۶ $L = \{l_1, \dots, l_n\}$ از n زوج گره فرستنده - گیرنده را می‌دهند که $l_i = \langle s_i, g_i \rangle$

مورد نظر، سعی می‌کند از حداقل توان برای انتقال بهره گیرد تا بتواند توان مصرفی کل شبکه بی‌سیم را نیز کاهش دهد.

یکی دیگر از روش‌هایی که برای کنترل توزیع‌شده توان استفاده شده، روش استفاده از منطق فازی و کنترل‌کننده فازی است [۱۲ و ۱۳]. برای این منظور در هر گره، یک کنترل‌کننده فازی تعبیه شده و این کنترل‌کننده با استفاده از بازخوردی که از گیرنده متناظر خود دریافت می‌کند، تأثیر توان انتقالی خود را در مرحله قبل به روش فازی ارزیابی کرده و اگر نیاز به کاهش یا افزایش توان انتقال به منظور دستیابی به توان بهینه در شبکه وجود داشته باشد، با استفاده از محاسبات فازی، این مقدار افزایش یا کاهش را محاسبه کرده و توان انتقالی جدیدی را برای انتصاب به سیگنال بعدی تولید می‌کند.

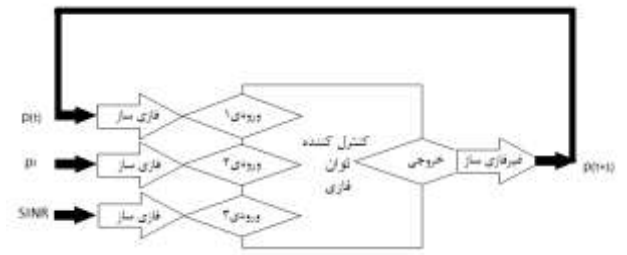
از آنجایی که پارامترهای تعیین‌کننده کنترل‌کننده فازی به صورت دستی تنظیم می‌شود اما بر شرایط حاکم در تداخل میان WBAN‌های مجاور تنوع و پویایی زیادی وجود دارد، این امکان هست که در شرایطی از تداخل، کنترل‌کننده فازی نتواند توان انتقال بهینه‌ای را برای سیستم پیشنهاد کند. در روش پیشنهادی ما به نام کنترل‌کننده فازی ژنتیک چون پایگاه دانش کنترل‌کننده از طریق الگوریتم ژنتیک به دست می‌آید، الگوریتم ژنتیک تلاش می‌کند با شناخت کامل شرایط حاکم بر سیستم، بهترین تنظیمات را برای کنترل‌کننده فازی به وجود آورد. این امر باعث بهبود کارایی سیستم از لحاظ مصرف انرژی و رساندن درصد بیشتری از بسته‌های صحیح به مقصد خواهد شد.

۳. کنترل‌کننده فازی ژنتیک

در این بخش، روش کنترل‌کننده فازی ژنتیک ارائه می‌شود. این روش با استفاده از مفاهیم و منطق فازی به جای مفاهیم منطق کلاسیک، سعی در کنترل توان در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بدنی دارد. در این روش از یک کنترل‌کننده فازی استفاده می‌شود که با استفاده از بازخوردی که از گره گیرنده دریافت می‌کند، سعی در کاهش توان انتقال و بهبود گذردهی کلی شبکه بی‌سیم ناحیه بدن دارد. برای آنکه کنترل‌کننده فازی بتواند وظیفه کنترل بازخوردی خود را به خوبی انجام دهد، باید پارامترهای اساسی آن که در واقع همان پایگاه دانش کنترل‌کننده را تشکیل می‌دهد، به درستی تنظیم شود. برای پیدا کردن پایگاه دانش این کنترل‌کننده‌ها معمولاً از دو روش می‌توان استفاده کرد. اولین راه، کمک گرفتن از یک فرد خیره است که با چالش‌ها و پیچیدگی‌های تداخل در شبکه آگاهی دارد. این روش به دلیل پویایی بیش از حد شبکه، امری بسیار سخت و حتی محال است. روش دوم، تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده بر اساس روابط غیرخطی موجود در شبکه است؛ پیدا کردن این روابط نیز خود امری بسیار دشوار است و گاهی همین پیدا

1. Non-deterministic Polynomial-time HARD
 2. Finite Integration
 3. Electromagnetic Simulation-based
 4. Media Access Control
 5. Time Division Multiple Access
 6. Link

وجود دارد، از نوع ارتباط رو به بالا^۱ در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی ارتباط از گره حسگر به سمت گذرگاه انجام می‌شود. پس می‌توان در نظر گرفت که کنترل‌کننده فازی درون گره حسگر قرار دارد. این امر می‌تواند به صورت سخت‌افزاری یا نرم‌افزاری یا تلفیقی از هر دو پیاده‌سازی شود. کنترل‌کننده‌ای که در این نوشته به منظور مدیریت تداخل و همچنین مصرف توان مدنظر است، مطابق با شکل (۳)، سه ورودی $P(t)$ و P_I و $SINR$ و خروجی $P(t+1)$ را دارد.



شکل (۳): نمای بیرونی کنترل‌کننده توان فازی

همان گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، توان انتقال پیام از هر حسگر به گذرگاه متناظرش برای i امین شبکه ناحیه بدن در لحظه زمانی t با $P(t)$ نشان داده می‌شود. این توان انتقال درون محدوده حداکثر توان انتقال مجاز و حداقل توان انتقال مجاز $(P_{min} < P(t) < P_{max})$ قرار دارد. $P(t+1)$ هم توان انتقالی است که توسط کنترل‌کننده فازی برای لحظه $t+1$ انتخاب شده است. P_I نیز توان تداخلی است که در گذرگاه (گیرنده) متناظر حسگر در لحظه t از دیگر حسگرهای متداخل موجود در مدل سیستم دریافت می‌شود. توان این تداخل را می‌توان از رابطه (۳) [۱۶ و ۱۷] محاسبه کرد.

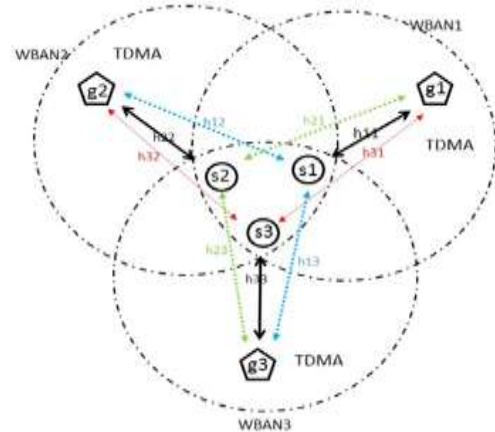
$$P_I = \sum_{i \neq j} p_j h_{ji} \quad (3)$$

$SINR$ نسبت قدرت سیگنال دریافتی در گذرگاه متناظر (گیرنده) با حسگر هدف (فرستنده) به قدرت توان تداخل به علاوه نویز است که با توجه به تعریف گفته شده برای این مفهوم می‌توان آن را به صورت رابطه (۴) در مراجع [۱۶ و ۱۷] نیز تعریف کرد.

$$SINR_i = \frac{p_i h_{ii}}{P_I + \sigma} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، σ توان نویزی است که در شبکه وجود دارد.

هر ورودی کنترل‌کننده فازی با استفاده از M اصطلاح زبان‌شناختی در کنترل‌کننده شناخته می‌شود که هر اصطلاح زبان‌شناختی در منطق فازی با استفاده از یک تابع عضویت^۲ معرفی می‌شود. پس می‌توان گفت



شکل (۲): نمونه‌ای از تداخل به وجود آمده بین WBAN‌های مجاور

هر WBAN از یک گیرنده G و یک فرستنده S تشکیل شده است که پیامی از فرستنده به گیرنده ارسال می‌شود. با توجه به شکل (۲) زمانی که گره فرستنده s_1 پیامی را به گیرنده متناظر خودش یعنی g_1 ارسال می‌کند، این پیام برای گیرنده‌های موجود در دیگر WBAN‌های همسایه در مدل سیستم نیز قابل دریافت است. حال اگر در همان زمان فرستنده s_2 نیز به فرستنده متناظر خود یعنی g_2 پیامی ارسال کند، این پیام آرسالی در g_2 به صورت حاصل جمع پیام s_1 و s_2 دریافت می‌شود. اگر g_2 نتواند پیام گیرنده متناظر خود را به درستی تشخیص دهد و دریافت کند، پاسخی به گیرنده خود مبتنی بر ارسال دوباره پیام ارسال خواهد کرد.

در این شبکه، بهره کانال بین i امین فرستنده - گیرنده (پیوند i ام) h_{ii} و بهره کانال بین i امین فرستنده و j امین گیرنده h_{ij} ماست و از طریق رابطه (۱) [۱۶ و ۱۷] محاسبه می‌شود:

$$h_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^n + S} \quad (1)$$

در این فرمول، S بیانگر اثر محوشدگی سایه‌ای است که در شبیه‌سازی با استفاده از یک تابع توزیع نرمال به صورت یک فرایند تصادفی شبیه‌سازی شده است. n نیز نشانگر توان افت مسیر است که عموماً بین ۲ تا ۶ در نظر گرفته می‌شود. همچنین d بیانگر فاصله بین فرستنده i و گیرنده j است که با استفاده از رابطه (۲) اندازه‌گیری می‌شود.

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

در این فرمول، (x_i, y_i) مختصات گره فرستنده و (x_j, y_j) مختصات گره گیرنده است.

۲.۳. کنترل‌کننده فازی

در این مقاله، مسیر انتقال داده که در هر شبکه حسگر بی‌سیم بدنی

1. Uplink
2. Member Function
2. Fuzzy Rules
2. Gaussian Member Function

توابع عضویت به صورت دنباله‌ای از زوج اعداد حقیقی به وجود می‌آیند، به صورت شکل (۴) تعریف می‌شود.

ب. ژن‌های مربوط به وزن قوانین

حداکثر تعداد قوانینی که برای یک کنترل‌کننده فازی می‌توان در نظر گرفت، از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$Mr = (Nmpi)^{Ni} \times (Nmpo)^{No} \quad (6)$$

در این رابطه، Mr بیانگر حداکثر تعداد قوانین ممکن برای یک کنترل‌کننده فازی و $Nmpi$ تعداد توابع عضویت برای یک ورودی و Ni تعداد ورودی‌ها و $Nmpo$ تعداد توابع عضویت برای یک خروجی و No تعداد خروجی‌هاست.

از آنجایی که کنترل‌کننده فازی موجود در این نوشته از سه ورودی که هر کدام m_i تابع عضویت دارند و یک خروجی که m_o تابع عضویت دارد تشکیل شده، پس می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر تعداد قوانین برای این کنترل‌کننده برابر است با $m_o \times m_i^3$. اکنون با در نظر گرفتن آنچه گفته شد، قسمت دوم کروموزوم مربوط به وزن قوانین کنترل‌کننده به صورت نمایش داده شده در شکل (۵) تعریف می‌شود.

با توجه به شکل (۵) می‌توان گفت $R(m_i)_{۲۳}$ ؛ یعنی:

اگر ورودی اول مساوی با تابع عضویت m_i و ورودی دوم مساوی تابع عضویت ۱ و ورودی سوم مساوی با تابع عضویت ۲ باشد، آنگاه خروجی مساوی با تابع عضویت ۳ به اندازه وزن $R(m_i)_{۲۳}$ می‌شود؛ به عبارت دیگر می‌توان گفت که هر قانون یک ضریب وزنی می‌خواهد که به عنوان ژن باید تعریف شود.

که برای هر ورودی کنترل‌کننده فازی M_i تابع عضویت معرفی می‌شود و برای خروجی آن نیز M_o تابع عضویت در نظر گرفته می‌شود.

برای آنکه بتوان قوانین فازی^۱ و توابع عضویت بهینه‌ای برای کنترل‌کننده فازی ایجاد کرد، از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود.

۳.۳. الگوریتم ژنتیک

اجزای تشکیل‌دهنده الگوریتم ژنتیک به کاررفته در این مقاله بدین شرح است:

۱.۳.۳. ساختار کروموزوم

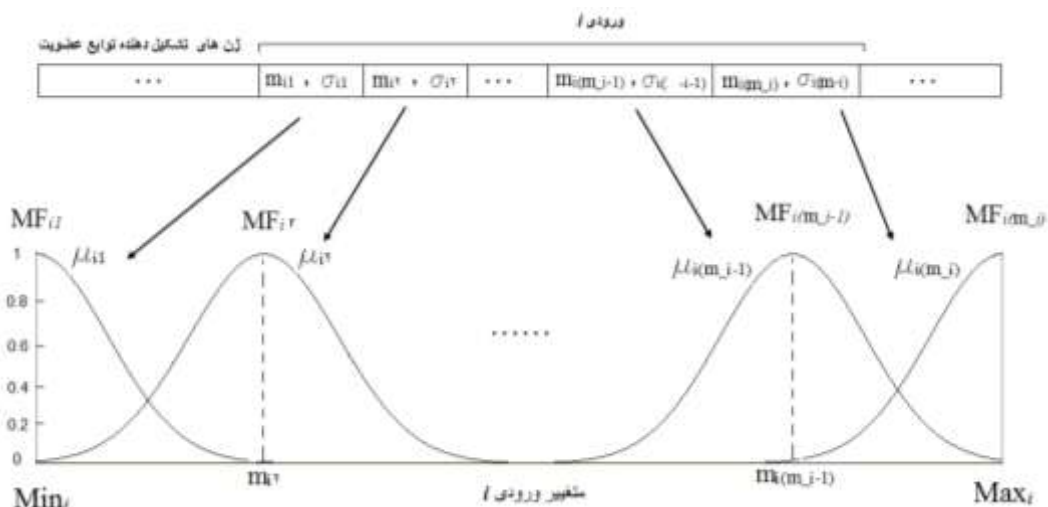
در مسئله بهینه‌سازی کنترل‌کننده فازی دو دسته متغیر وجود دارد که ژنتیک باید بتواند آن‌ها را بهینه‌سازی کند. یکی توابع عضویت برای ورودی‌ها و خروجی و دوم پایگاه وزن قوانین کنترل‌کننده. پس با این تعریف می‌توان ژن‌های تشکیل‌دهنده هر کروموزوم را به دو قسمت تقسیم کرد:

الف. ژن‌های مربوط به توابع عضویت

در این نوشته، توابع عضویتی که در کنترل‌کننده به کار می‌روند، از نوع گوسی مطابق رابطه (۵) در نظر گرفته می‌شود.

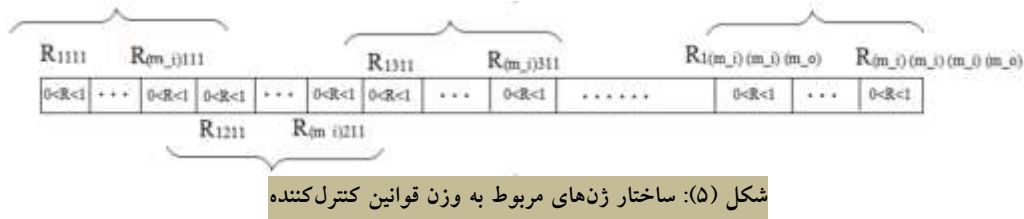
$$\mu_{ij}(x) = e^{-\frac{(x-m_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، $\mu_{ij}(x)$ نشان‌دهنده تابع عضویت گاوسی^۲ برای i امین ورودی و j امین تابع عضویت آن است. همان گونه که در رابطه (۵) می‌بینید، این تابع دو پارامتر اساسی m_{ij} و σ_{ij} دارد که اولی بیانگر مرکز تابع عضویت و دومی بیانگر دامنه تابع عضویت است. پس در واقع این دو پارامتر هستند که موقعیت و مکان تابع عضویت را مشخص می‌کنند. قسمت اول هر کروموزوم که با استفاده از ژن‌های



شکل (۴): ساختار ژن‌های مربوط به توابع عضویت

1. Fuzzy Rules
2. Gaussian Member Function



۳.۳.۳. تابع هزینه

از آنجایی که هدف اصلی در استفاده از الگوریتم ژنتیک، به دست آوردن تنظیمات پارامترها و پایگاه داده کنترل کننده فازی ای است که بتواند در مدل سیستمی که معرفی شد در عین کاهش توان مصرفی کل شبکه، گذردهی شبکه را نیز بهبود بخشد، تابع هزینه مطابق با رابطه (۷) تعریف می شود:

$$FIS \text{ cost} = \frac{pc}{pdr} \quad (7)$$

در این رابطه، pc در واقع بیانگر مصرف توان کل شبکه های حسگر بی سیم بدنی است که در مدل سیستم با یکدیگر تداخل داشته اند و pdr^r نیز بیانگر نسبت تعداد شبکه هایی است که توانسته اند با موفقیت $(SINR_i > \beta)$ [۱۶ و ۱۷] پیام خود را از گره حسگر (فرستنده) به گذرگاه (گیرنده) انتقال دهند، به کل شبکه های حسگر بی سیم بدنی های موجود. به عبارت دیگر، زمانی که سنسورهای فرستنده داخل چندین WBAN مجاور، به طور همزمان خواهان انتقال داده به گیرنده های متناظر خود هستند، برای آنکه بتوانند در رقابت ارسال موفق پیام های خود پیروز گردند، توان انتقال داده های خود را افزایش می دهند. با وجود این، افزایش توان انتقال تعدادی از گیرنده های موجود در WBAN های مجاور موفق به دریافت درست پیام خود بوده و عده ای هم منتظر ارسال دوباره پیام از سوی فرستنده خود می شوند. به مجموع توان های مصرفی که فرستنده های همزمان در WBAN های مجاور برای شرکت در این رقابت مصرف می کنند pc و به نسبت تعداد WBAN هایی که گیرنده های موجود در آن ها موفق به دریافت صحیح پیام از فرستنده متناظر خود شده اند، به کل تعداد WBAN های مجاور شرکت کننده در این رقابت pdr می گویند.

$FIScost$ نیز تابع هزینه هر کروموزوم در الگوریتم ژنتیک است که برای محاسبه آن کنترل کننده فازی، بر طبق هریک از کروموزوم ها تنظیم می شود و آن کنترل کننده فازی درون حسگرهای موجود در شبکه های حاضر در مدل سیستم قرار داده می شود. نتایجی که بر اثر کنترل توان انتقال با این کنترل کننده فازی توسط حسگرهای درون مدل سیستم حاصل می گردد، با استفاده از رابطه (۷) اندازه گیری می شود.

۲.۳.۳. عملگرهای ژنتیک

برای الگوریتم ژنتیک دو نوع عملگر وجود دارد:

الف. عملگر جفت یابی

روش های مختلفی برای جفت یابی وجود دارد که در این مقاله از سه روش انتخابی تصادفی، روش انتخاب چرخ منگنه دار^۱ و روش تورنمنت استفاده شده است.

ب. عملگر تولید نسل

برای الگوریتم ژنتیک دو نوع عملگر تولید نسل وجود دارد: یک عملگر آمیزش^۲ به منظور ایجاد نسل جدید از کروموزوم ها؛ این عمل با ترکیب ژن های والد با یکدیگر سعی در ایجاد کروموزوم هایی دارد که دارای ژن های مثبت هر دو والد خود و حذف ژن های بیهوده آنها باشند. دوم عملگر جهش ژنی؛ که به صورت اتفاقی با ایجاد تغییراتی اندک در یک سری از ژن های بعضی کروموزوم ها سعی در جلوگیری از حبس شدن برنامه در پاسخ بهینه محلی دارد.

تنها نکته ای که درباره این عملگرها باید همواره مدنظر قرار گیرد، این است که در این پژوهش، کروموزوم ها مقادیر پیوسته حقیقی دارند. بنابراین برای عملگر آمیزش، از روش آمیزش دو نقطه متقاطع برای اعداد پیوسته حقیقی استفاده می شود.

برای عملگر جهش نیز باید دقت کرد که در اینجا دو دسته اعداد حقیقی وجود دارند: یکی اعداد حقیقی که پارامترهای توابع عضویت را تعیین می کنند و می توانند در بازه حداقل و حداکثر مقدار ورودی ها متغیر باشند؛ دوم اعداد حقیقی بین صفر و یک که برای مشخص کردن وزن قوانین موجود در کنترل کننده استفاده می شوند. بنابراین برای مکمل گیری برای عملگر جهش باید از روش مکمل گیری برای اعداد حقیقی پیوسته استفاده کرد.

مسئله مهمی که در ایجاد توابع آمیزش و جهش باید به آن توجه کرد، این است که این توابع به گونه ای تعیین شوند که همواره احتمال ایجاد تمام گونه از ژن ها وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، باید عملگرهای ایجاد نسل چنان جامع باشند که همواره احتمال اینکه هر ژنی در کروموزوم ها ایجاد و ارزیابی شود، وجود داشته باشد.

1. Roulette Wheel Selection
2. Crossover

۴.۳.۳. فرایند کلی یادگیری کنترل‌کننده فازی-ژنتیک

شکل (۶) روند نمای کلی مراحل الگوریتم ژنتیک فازی را نشان می‌دهد. برای آنکه در طی مراحل الگوریتم ژنتیک بتوان برای تک تک کروموزوم‌های موجود در جمعیت مقدار تابع هزینه را محاسبه کرد، لازم است که برای هر کروموزوم کنترل‌کننده فازی مطابق آن تنظیم شود. سپس عملکرد آن کنترل‌کننده ارزیابی شده و مقدار تابع هزینه آن به دست می‌آید.

در این پژوهش، ابتدا در یک محیط و مدل سیستم شبیه‌سازی شده آموزشی و با حذف حالات متغیر در مدل سیستم واقعی، هریک از کنترل‌کننده‌های تشکیل شده از کروموزوم‌های موجود در جمعیت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در نهایت کنترل‌کننده بهینه‌ای که در این مدل سیستم آموزشی به دست می‌آید، برای مدل سیستم واقعی مورد استفاده قرار داده می‌شود. عملکرد روش پیشنهادی با روش کنترل توان توزیع شده در مدل SINR به نام روش حریم‌نا، مقایسه خواهد شد.

۴. شبیه‌سازی

در این بخش، پارامترهایی که در شبیه‌سازی به کار رفته‌اند، به‌اجمال معرفی می‌شوند. در این مقاله برای شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

۱.۴. شرایط حاکم بر مدل سیستم

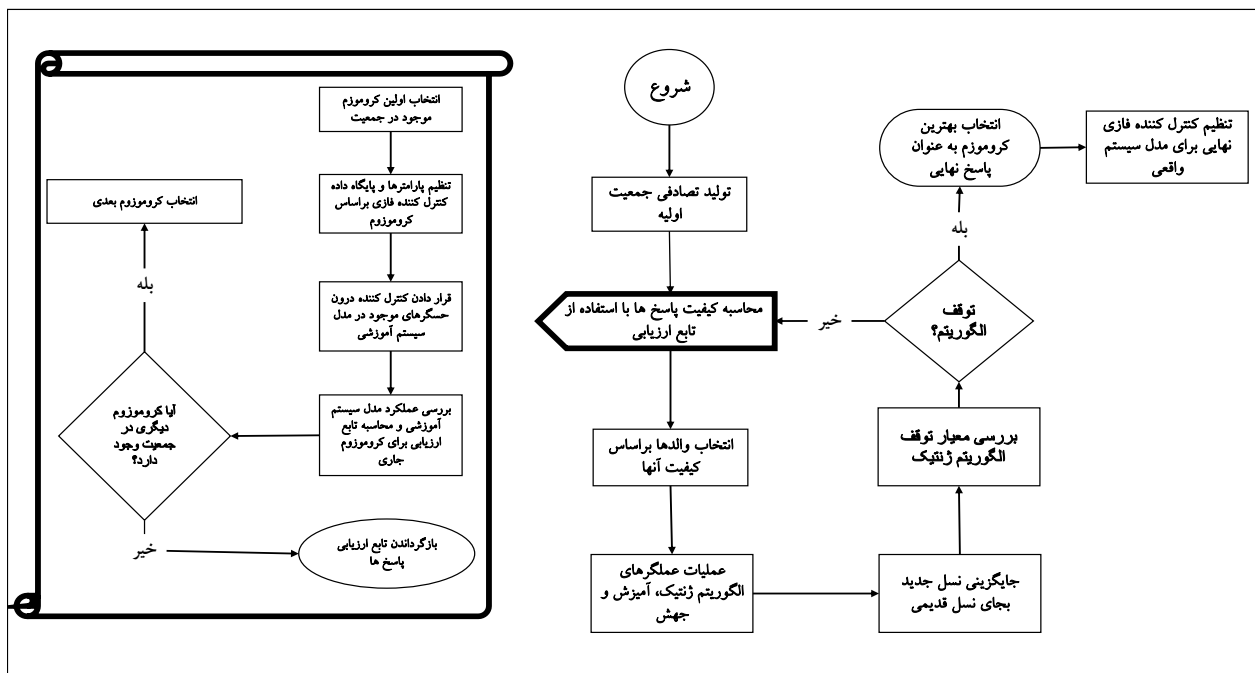
در این شبیه‌سازی‌ها همان گونه که در بخش دوم بیان شد، مدل سیستم

متشکل از چندین شبکه حسگر بی‌سیم بدنی است که هر شبکه فقط از یک گره حسگر (فرستنده) و یک گذرگاه (گیرنده) تشکیل شده است و همگی در محیطی به ابعاد 10×10 مترمربع پراکنده شده‌اند. شبکه‌های حسگر بی‌سیم بدنی در محیط به صورت تصادفی توزیع شده‌اند. از آنجایی که عموماً حسگرها در شبکه‌های ناحیه بدن یا بر روی بدن یا درون بدن قرار دارند و گره گذرگاه عموماً در نزدیکی بدن شخص قرار دارد تا بتواند سریع علائم حیاتی را از گره حسگر دریافت کرده و برای مرکز داده مراقبت‌های پزشکی که در مکانی در فاصله بسیار دور از شخص قرار دارد ارسال کند. پس می‌توان فرض کرد که این گره گذرگاه در فاصله کمتر یا برابر یک متری از بدن شخص تحت نظر قرار دارد. بنابراین در شبیه‌سازی نیز برای هر شبکه حسگر بی‌سیم بدنی فاصله گره حسگر تا گذرگاه کمتر یا مساوی یک متر قرار داده می‌شود. در جدول (۱) به‌طور مختصر، شرایط حاکم بر مدل سیستم بیان شده است.

با توجه به جدول (۱) توان نویز محیط از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$\sigma = B \times N0 \quad (8)$$

جدول (۱): شرایط حاکم بر مدل سیستم در شبیه‌سازی		
مقدار	پارامتر	توضیحات
۱۰×۱۰ مترمربع	$L \times L$	ابعاد محیط شبیه‌سازی
۵	β	آستانه قدرت سیگنال به نویز در گیرنده
۴	n	توان افت مسیر (۱)
۱۲kHz	B	پهنای باند
-۴۰dbm/HZ	$N0$	قدرت نویز



شکل (۶): روند نمای کلی الگوریتم ژنتیک فازی

۲.۴. شرایط حاکم بر کنترل‌کننده فازی-ژنتیک در شبیه‌سازی

در این بخش، شرایط اختصاصی کنترل‌کننده فازی و الگوریتم ژنتیک به تفکیک شرح داده می‌شود.

۱.۲.۴. شرایط حاکم بر کنترل‌کننده فازی

از اصلی‌ترین شاخصه‌هایی که باید برای کنترل‌کننده فازی مشخص شود، میزان حداکثر و حداقل مقادیری است که برای ورودی‌های کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، اگر به کنترل‌کننده ورودی خارج از بازه، مقادیری که برای ورودی‌های آن در نظر گرفته شده است اعمال شود، این کنترل‌کننده قادر به اخذ تصمیمی درست برای مقدار خروجی نخواهد بود. به همین سبب، حدود ورودی‌ها برای کنترل‌کننده مطابق با جدول (۲) تنظیم می‌شود.

جدول (۲): حدود ورودی‌ها برای تنظیم کنترل‌کننده فازی

توضیحات	پارامتر	مقدار
حداقل توان انتقال	P_{min}	0 mW
حداکثر توان انتقال	P_{max}	60 mW
حداکثر توان تداخل	PI_{max}	300 mW
حداقل توان تداخل	PI_{min}	0 mW
حداکثر SINR	$SINR_{max}$	30 mW
حداقل SINR	$SINR_{min}$	0 mW

۲.۲.۴. شرایط حاکم بر الگوریتم ژنتیک

در این الگوریتم، از ۷ تابع عضویت برای هر ورودی و خروجی استفاده شده است ($M_o = M_i = 7$). با توجه به آنچه در بخش ۱.۳.۳ بیان شد، می‌توان گفت کروموزوم‌های قسمت اول مربوط به ژن‌های توابع عضویت متشکل از $7 \times 3 = 21$ زوج اعداد مربوط به رابطه گوسی (۵) برای توابع عضویت ورودی‌ها و ۷ زوج اعداد مربوط به رابطه گوسی برای تابع عضویت خروجی و در مجموع $21 + 7 = 28$ زوج اعداد مربوط به رابطه گوسی برای ژن‌های توابع عضویت تشکیل شده است. کروموزوم‌های قسمت دوم مربوط به وزن قوانین فازی نیز با توجه به رابطه (۶) دارای $7 \times 7 = 49$ وزن مربوط به وزن قوانین فازی است.

۵. نتایج شبیه‌سازی

پیش از آنکه به ارزیابی دو روش بیان‌شده در این نوشته پرداخته شود، لازم است نخست پارامترهایی که با آن‌ها این دو روش مقایسه می‌شوند، معرفی گردند. به منظور انجام مقایسه بین دو روش بیان‌شده در این پژوهش، از سه پارامتر زیر استفاده شده است.

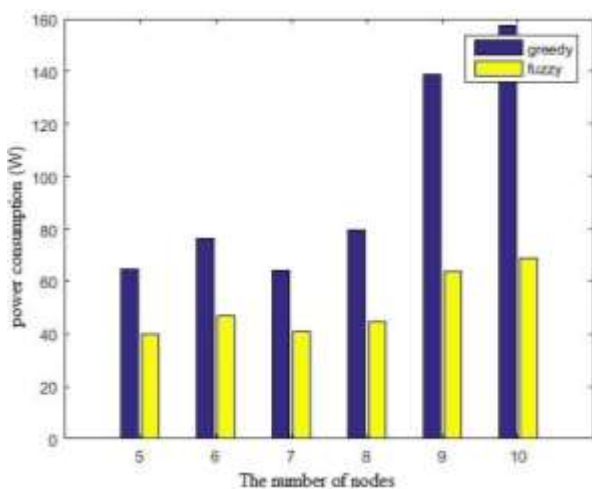
الف. پارامتر مجموع مصرف توان توسط شبکه‌های حسگر بی‌سیم بدنی؛ این پارامتر نشان‌دهنده آن است که روش پیشنهادی تا چقدر توانسته است در کاهش مصرف توان و ذخیره انرژی حسگرها مؤثر واقع شود.

ب. پارامتر PDR؛ منظور از PDR نسبت تحویل صحیح بسته‌ها به کل بسته‌های ارسالی در واحد زمان در کل سیستم است. در واقع این پارامتر برای مشخص کردن تعداد پیام‌هایی است که توانسته‌اند با موفقیت از فرستنده‌ها ارسال و در گیرنده‌های متناظر دریافت شوند. برای آنکه یک پیام با موفقیت بتواند از فرستنده به گیرنده برسد، باید رابطه $(SINR_i > \beta)$ برقرار گردد.

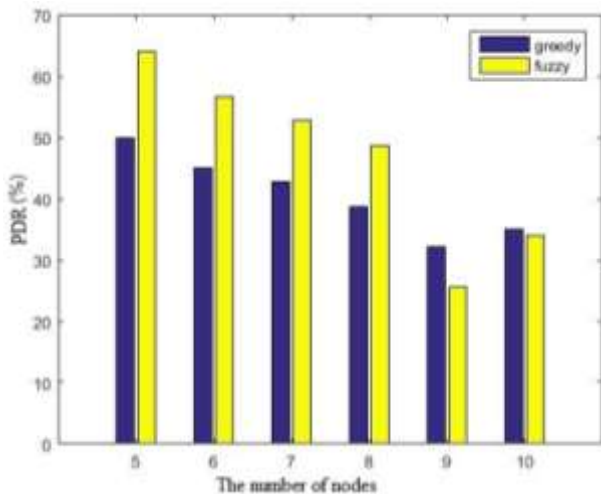
ج. پارامتر کارایی؛ منظور از کارایی نسبت PDR به توان مصرفی است.

هریک از نمودارهای شکل‌های (۷-۹) با میانگین‌گیری از پارامتر مربوط به آن نمودار میان ۵۰ توپولوژی مختلف در مدل سیستم حاصل شده که به یک مقایسه جامع میان دو روش بیان‌شده منتج گردیده است. همچنین تأثیر افزایش تعداد شبکه‌های حسگر بی‌سیم بدنی متداخل بر عملکرد الگوریتم پیشنهادی مشخص شده است.

همان گونه که در شکل (۷) مشخص است، هرچه تعداد شبکه‌های متداخل افزایش پیدا می‌کند، میزان مصرف توان در روش حریم‌بانه نیز بیشتر می‌شود؛ اما در روش کنترل‌کننده فازی با وجود اندک افزایش توان مصرفی باز همچنان به نسبت روش حریم‌بانه میزان مصرف توان توانسته است ثابت بماند. این نکته نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از قابلیت گسترش مناسبی برخوردار است. با توجه به شکل (۷) می‌توان گفت که روش پیشنهادی حداقل ۳۴ درصد و حداکثر تا مقدار ۵۶ درصد توانسته است توان مصرفی را نسبت به روش حریم‌بانه کاهش دهد.



شکل (۷): نمودار تأثیر افزایش تعداد WBAN بر عملکرد دو روش پیشنهادی بر اساس پارامتر مصرف توان



شکل (۹): نمودار تأثیر افزایش تعداد WBAN بر عملکرد دو روش پیشنهادی بر اساس پارامتر مقدار گذردهی

۶. جمع‌بندی

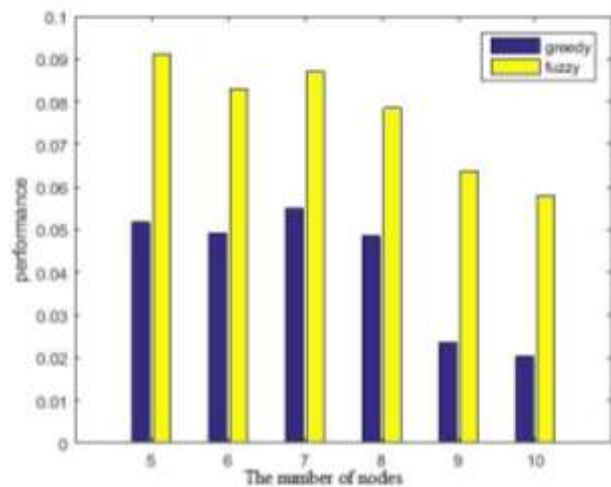
در این مقاله، یک کنترل‌کننده فازی-ژنتیک به منظور کنترل توان انتقال در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بدنی معرفی شده است. برای آنکه کنترل‌کننده فازی بتواند توسط الگوریتم ژنتیک آموزش شود، در یک مدل از سیستم به‌عنوان مدل آموزشی مورد آموزش و سپس در مدل واقعی، ارزیابی شد.

تابع هزینه برای الگوریتم ژنتیک نسبت توان مصرفی به گذردهی سیستم تعریف شد؛ یعنی الگوریتم ژنتیک به دنبال پاسخی است که بتواند کنترل‌کننده فازی را به‌گونه‌ای تنظیم کند که این نسبت را که معکوس کارایی می‌توان نامید، به حداقل برساند. از همین رو مشاهده شد که کنترل‌کننده فازی زمانی ارزیابی شده در مدل سیستم واقعی، می‌تواند کارایی را نسبت به روش حریصانه به‌خوبی افزایش دهد. از آنجایی که کارایی، نسبت گذردهی به توان مصرفی است پس طبیعتاً توان مصرفی کاهش پیدا کرده و گذردهی در سیستم افزایش پیدا می‌کند که این امر در نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی‌ها به‌خوبی مشاهده می‌شود.

فهرست علائم

$SINR$	نسبت توان سیگنال ارسالی به توان سیگنال تداخل
	به‌علاوه اختلال ^۱
H	بهره کانال
S	اثر محوشدگی سایه‌ای
d	فاصله بین حسگر فرستنده و گذرگاه گیرنده (m)

برای آنکه مشخص شود بهبود مصرف توان در روش پیشنهادی در ازای حذف بسته‌ها نبوده است، از پارامتر کارایی برای مقایسه استفاده می‌شود. با توجه به نمودار شکل (۸) به‌وضوح مشخص است که کارایی روش پیشنهادی برای هر تعداد شبکه مطلوب‌تر از روش حریصانه است. زمانی که تعداد شبکه‌های متداخل افزایش پیدا می‌کند، از آنجایی که میزان مصرف توان بیشتر می‌شود، مقدار کارایی سیستم کاهش می‌یابد که این امر برای هر دو روش مشهود است. اما در هر صورت در اینجا نیز روش پیشنهادی توانسته است که کارایی سیستم را حداقل تا ۷۰ درصد و حداکثر تا ۲۰۰ درصد نسبت به روش حریصانه افزایش دهد.



شکل (۸): نمودار تأثیر افزایش تعداد WBAN بر عملکرد دو روش پیشنهادی بر اساس پارامتر کارایی

اگر فقط معیار رساندن بسته‌ها به مقصد مدنظر قرار گیرد، همان طور که در شکل (۹) مشهود است، روش پیشنهادی توانسته PDR را در بسیاری از مواقع نسبت به روش حریصانه افزایش دهد اما در محدود مواردی هم PDR در روش پیشنهادی کمتر از روش حریصانه شده است؛ در تعریف تابع هزینه در الگوریتم ژنتیک از نسبت توان مصرفی به PDR یعنی معکوس کارایی استفاده شده است. بنابراین الگوریتم ژنتیک به‌عنوان بخش مهمی از روش پیشنهادی در این مقاله به دنبال پاسخ‌هایی بوده است که بتواند کارایی کلی سیستم را بهبود بخشد؛ که گاهی این کارایی با کاهش اندک PDR در مقابل کاهش چندین برابری مصرف توان شبکه همراه بوده است.

$FIScost$	مقدار تابع هزینه برای هر کروموزم	P	توان ارسال داده (mW)
علائم یونانی		P_l	توان تداخل دریافتی در گیرنده (mW)
σ	توان نویز محیط (mW)	M_i	تعداد توابع عضویت ورودی در کنترل کننده فازی
β	حداقل آستانه مورد نیاز برای دریافت صحیح بسته از فرستنده	M_o	تعداد توان عضویت خروجی در کنترل کننده فازی
بالانویس ها		M_r	حداکثر تعداد قوانین برای یک کنترل کننده فازی
N	توان افت مسیر	N_i	تعداد ورودی ها
زیرنویس ها		N_o	تعداد خروجی ها
i, j	اندیس فرستنده ها و گیرنده ها	P_c	مصرف توان کل سیستم
		N_{mpt}	تعداد توابع عضویت برای یک خروجی
		PDR	نسبت تحویل صحیح بسته های ارسالی به کل بسته های ارسالی در سیستم

مراجع

- [1] Yongju, X. and Shingmeng, Z., "Survey of Power Control in Wireless Body Area Network", Guang-dong Communication Technology, Vol. 33, No. 10, pp. 28-31, 2013.
- [2] Changbiao, X., Li, Z. and Yongdan, Y., "Centralized Inter-Network Power Control Scheme in Wireless Body Area Network", Journal of Information & Computational Science, Vol. 12, No. 8, pp. 3311-3318, 2015.
- [3] Tassioulas, L. and Ephremides, A., "Stability Properties of Constrained Queueing Systems and Scheduling Policies for Maximum Throughput in Multihop Radio Networks", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 37, No. 12, pp. 1936-1948, DEC 1992.
- [4] Jiang, L. and Walrand, J., "A Distributed Cdma Algorithm for Throughput and Utility Maximization in Wireless Networks" in Proc. of 46th Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, 2008.
- [5] Jiang, L., Shah, D., Shin, J. and Walrand, J., "Distributed Random Access Algorithm: Scheduling and Congestion Control" IEEE Trans. on Information Theory, Vol. 56, No. 12, pp. 6182-6207, DEC. 2010.
- [6] Chaporkar, P. and Proutiere, A., "Optimal Distributed Scheduling in Wireless Networks under Sinr Interference Model", arXiv:1305.0384v1 [cs.IT] 2 MAY 2013.
- [7] Wan, P.J., Frieder, O., Jia, X.H., Yao, F., Xu, X. H. and Tang, S.J., "Wireless Link Scheduling Under Physical Interference Model" in Proc. IEEE Infocom, 2011.
- [8] Choi, J.G. and Joo, C., Shroff, N. B., "Distributed Link Scheduling Under Sinr Model in Multihop Wireless Networks", IEEE/ACM Trans. Netw., Vol. 22, No. 4, pp. 1204-1217, AUG. 2014.
- [9] Haratian, R. and Sharafat, A.R., "Better Qos and Less Power in Wireless Ad Hoc Networks by Distributed Power Control Using Power and Sinr-Based Pricing Functions", International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, WCSP 2009.
- [10] Guarnera, M., Villari, M., Zaia, A. and Puliafito, A., "Manet: Possible Applications With Pda in Wireless Imaging Environment" Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. The 13th IEEE International Symposium on, IEEE, pp. 2394-2398, 2002.
- [11] Han, Z. and Ray, Liu K. J., "Noncooperative Power-Control Game and Throughput Game Over Wireless Networks", IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, Vol. 53, No. 10, OCT. 2005.
- [12] Sabitha, R., Bhuma, K.T. and Thyagarajan, T., "Design and Analysis of Fuzzy Logic and Neural Network Based Transmission Power Control Techniques for Energy Efficient Wireless Sensor Networks", S.C. Satapathy et al. (eds.), Proc. of the 3rd Int. Conf. on Front. of Intell. Comput. (FICTA) 2014.
- [13] Alamelu, N. and Dananjayan, P., "Adaptive Fuzzy Genetic Algorithm-Based Power and Threshold Sir Control for Mc-Cdma System", Int. J. Mobile Network Design and Innovation, Vol. 1, Nos. 3/4, pp.240-247, 2006.
- [14] Sarestoniemi, M., Tuovinen, T., Niemela, V., Hamalainen, M. and Iinatti, J., "Finite Integration Technique Based Channel Modeling on The Wban Receiver Performance Evaluation (Parkinson's Disease Monitoring Case)" 11th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), Lisbon, pp. 39-43, 2017.
- [15] Särestöniemi, M., Hämäläinen, M. and Iinatti, J., "An Overview of The Electromagnetic Simulation-Based Channel Modeling Techniques for Wireless Body Area Network Applications" in IEEE Access, Vol. 5, pp. 10622-10632, 2017.
- [16] Andrews, M. and Dinitz, M., "Maximizing Capacity in Arbitrary Wireless Networks In The Sinr Model: Complexity And Game Theory", Proc. IEEE INFOCOM, pp. 1332-1340, 2009.

- [17] Lotker, Z., Parter, M., Peleg, D. and Pignolet, Y.A., "Distributed Power Control in The Sinr Model", Proc. 30th INFO COM, pp. 2525-2533, 2011.