مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۹-۱

بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص آگاه از کیفیت سرویس کانال در شبکه‌های رادیوی شناختگر با استفاده از الگوریتم NSGA-II

هومن رضوی[۱]، عبدالرسول قاسمی[۲]

[۱]فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر، گروه هوش مصنوعی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، hrazavi@ee.kntu.ac.ir
[۲]استادیار، دانشکدهٔ مهندسی کامپیوتر، گروه معماری سیستم‌های کامپیوتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، arghasemi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۵/۱۱/۲، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۶/۱/۲۸)

چکیده: در این مقاله مساله تخصیص آگاه از کیفیت سرویس کانال در قالب یک مساله بهینه‌سازی با دو تابع هدف شامل بهره‌وری طیفی و انصاف میان کاربران ثانویه با در نظر گرفتن محدودیت‌های دسترسی کانال بررسی می‌شود. هر تخصیص امکان‌پذیر کانال به کاربر که می‌تواند پاسخ مساله بهینه‌سازی باشد به صورت یک کروموزوم دودویی کد می‌شود. کد کردن فرصت‌های طیفی دسترس‌پذیر به جای همه ترکیب‌های کانال- کاربر باعث کاهش قابل توجه فضای جستجو می‌شود. بر این اساس طرح تخصیص آگاه از کیفیت سرویس کانال مبتنی بر الگوریتم NSGA-II برای یافتن تخصیص بهینه با هدف بیشینه کردن توام هرکدام از توابع هدف به صورت هم‌زمان ارایه شده و در نهایت در فضای گسسته پاسخ‌های شدنی مساله، مجموعه پاسخ‌های بهینه پرتو به دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی، نقاط بهینه و مصالحه بین بهره‌وری طیفی و انصاف میان کاربران را نشان می‌دهد. روش بهینه‌سازی با متغیرهای تصمیم‌گیری صحیح دودویی نتایج به دست آمده از طرح پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم NSGA-II را در نمونه‌های مقیاس کوچک مساله تایید می‌کند در حالی که در نمونه‌های مقیاس بزرگ، طرح پیشنهادی از نظر پیچیدگی محاسباتی بسیار سریع‌تر عمل می‌کند.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی با متغیرهای تصمیم‌گیری صحیح دودویی، رادیوی شناختگر؛ الگوریتم NSGA-II، بهینه‌سازی چندهدفه، تخصیص کانال آگاه از کیفیت سرویس، فرصت‌های طیفی.

Multi-Objective Optimization of a QoS-Aware Channel Allocation in Cognitive Radio Networks using NSGA-II Algorithm

Hooman Razavi, Abdorasoul Ghasemi

Abstract: In this paper the QoS-aware channel allocation problem formulated as an optimization problem with two conflicting objectives; spectrum utilization and fairness among secondary users (SUs) subject to channel availabilities constraints. Any possible channel allocation which could be a solution of the optimization problem, encoded as a binary chromosome. By having coded available spectrum opportunities instead of all channel-user combinations, the search space is significantly reduced. Designing the QoS-aware channel assignment scheme is based on NSGA-II Algorithm to find the optimum allocation of these two objectives jointly and finally the set of Pareto optimal solutions achieved by proposed algorithm in discrete space of feasible solutions. Simulation results demonstrate the trade-off between spectrum utilization and fairness and the Pareto optimum points. Binary Integer Programming (BIP) confirms the results of the proposed evolutionary scheme in small-scale instances while our scheme outperforms BIP method significantly in computational for large-scale ones.

Keywords: Binary Integer Programming; Cognitive radio; NSGA-II Algorithm; Multi-Objective Optimization; QoS-Aware Channel Assignment; Spectrum Opportunities.

۱- مقدمه

طیف فرکانسی در شبکه‌های بی‌سیم یک منبع با ارزش است که استفاده بهینه و مدیریت درست این منبع ارزشمند ضروری است. به دلیل افزایش تقاضا برای به دست آوردن طیف‌های فرکانسی در سال‌های اخیر روش‌های ایستا در تخصیص طیف، پاسخگوی نیازهای امروزی نیست. بر اساس گزارش‌های کمیسیون ارتباطات فدرال (FCC[1])، شیوه‌های گذشته برای استفاده از طیف فرکانسی، کارایی مناسبی ندارند و بخش قابل توجهی از طیف اختصاص یافته و قیمت‌گذاری شده بدون استفاده می‌ماند [۱]. به بیان دیگر، در سیستم‌های بی‌سیم سنتی، تنها میزان کمی از طیف رادیویی اختصاص یافته به کاربران، در هر لحظه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد که موجب هدر رفتن این منبع با ارزش می‌شود. نیاز به استفاده بهینه از طیف، موجب ظهور فناوری رادیو شناختگر شده است. شبکه رادیوی شناختگر قادر به تشخیص زیرباندهای طیف رادیویی است که مورد استفاده قرار نگرفته‌اند و آن‌ها را به کاربران ثانویه‌ای که مجوز استفاده ندارند اختصاص می‌دهد. در این شبکه‌ها کاربران دارای مجوز استفاده از طیف (کاربران اولیه) و کاربرانی که به‌صورت فرصت‌طلبانه به فرصت‌های طیفی دسترسی پیدا می‌کنند (کاربران ثانویه) در کنار هم به طیف فرکانسی دسترسی دارند و کاربران اولیه باید در مقابل دسترسی کاربران ثانویه به فرصت‌های طیفی محافظت شوند.

مدیریت پویای طیف یکی از اصلی‌ترین موضوع‌های مطرح در شبکه‌های رادیوی شناختگر است که طراحی مکانیزم‌های تخصیص پویای کانال از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی آن است [۲]. مکانیزم تخصیص کانال مشخص می‌کند که در هر وضعیت سیستم، چه کانالی به کدام کاربر ثانویه تعلق گیرد به‌طوری که با کاربران اولیه تداخلی نداشته باشد. این تخصیص می‌تواند به‌صورت متمرکز یا توزیع‌شده انجام شود [۳]. در روش متمرکز، یک عنصر تصمیم‌گیرنده که اطلاعات کافی از کاربران در اختیار دارد، از طریق حل یک مساله بهینه‌سازی، فرصت‌های در دسترس یا همان حفره‌های طیفی را به کاربران ثانویه تخصیص می‌دهد. در روش توزیع‌شده، هر کاربر ثانویه باید با واکاوی فرصت‌های طیفی دسترس‌پذیر و در نظر گرفتن محدودیت‌هایی که با سایر کاربران ثانویه دارد، بهترین کانال را مورد بهره‌برداری قرار دهد.

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی بر روی مساله تخصیص کانال با معماری متمرکز یا توزیع‌شده صورت گرفته‌است [۴]. به عنوان نمونه در [۵] با مدل کردن مساله تخصیص کانال در قالب یک مساله بهینه‌سازی تک هدفه، یک طرح متمرکز مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی برای حل این مساله ارایه شده‌است. در [۶] نیز مساله تخصیص کانال بین کاربران ثانویه در قالب یک مساله بهینه‌سازی دودویی بیان شده‌است که جواب بهینه این مساله یک ماتریس دودویی تخصیص بی‌مغایرت کانال است به صورتی که با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی در دسترسی کاربران، یک تابع تک‌هدفه را بیشینه می‌کند. این مدل در [۷] به یک مدل کامل‌تر تبدیل شده تا بتواند نیازمندی‌های مختلف کاربران ثانویه را پوشش دهد.

کاربران شبکه رادیوی شناختگر نیازمندی‌های متفاوتی از کیفیت سرویس دریافتی دارند. در برخی از کاربران قابلیت اطمینان، در برخی میزان پهنای باند و در برخی دیگر نرخ خطای بیتی مهم است. لذا اهمیت در نظر گرفتن این نیازمندی‌ها در تخصیص فرصت‌های طیفی به کاربران ثانویه باید مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله با بهره‌گیری از مدل سیستمی ارایه شده در [۶] کاربران از لحاظ سرویس ارسال و دریافت، به سه دسته کاربران داده، صوتی و ویدیو تقسیم شده و بر اساس نیازمندی متفاوت این سه گروه از کیفیت سرویس مخابره داده، به هرکدام کانال متناسب با نیازشان تخصیص داده می‌شود. مساله تخصیص کانال با تعریف دو تابع هدف بهره‌وری طیفی و انصاف در قالب یک مساله بهینه‌سازی دوهدفه نوشته شده‌است. تفاوت اصلی این مقاله با کارهای مشابهی که در این زمینه صورت گرفته، درنظر گرفتن مساله کیفیت سرویس کاربران شبکه و هم‌چنین درنظر گرفتن توام دو معیار بهره‌وری و انصاف است. در حالی که در کارهای مشابه قبلی تنها یک معیار برای سنجش مطلوبت تخصیص کانال به کاربران ثانویه شبکه رادیوی شناختگر در نظر گرفته شده [۷ , ۸] و آن معیار به عنوان تابع هدف برای مساله بهینه‌سازی تک هدفه به کار رفته است. از آنجا که این مساله به کلاس NP-Complete مسایل تعلق دارد برای حل کامل آن و به دست آوردن پاسخ بهینه باید از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند بهره گرفته شود که در این مقاله از دسته الگوریتم‌های مبتنی بر ژنتیک برای حل این مساله بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده‌است. این الگوریتم‌ها با جستجوی تصادفی به سمت پاسخ‌های بهینه همگرا می‌شوند.

الگوریتم‌های تکاملی، اصول تکامل موجود در طبیعت را برای یافتن راه حل بهینه مسایل بهینه‌سازی به کار می‌گیرند [۹]. الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه[2] (MOEA) الگوریتم‌هایی هستند که براساس الگوریتم‌های تکاملی تک‌هدفه شکل گرفته‌اند، با این تفاوت که در هر مرحله از اجرای این الگوریتم‌ها یک جبهه پرتو[3] از جواب‌های بهینه ارایه می‌شود که جواب‌های مرحله قبل را مغلوب می‌کند. این روند تا رسیدن به جبهه پرتو بهینه ادامه پیدا می‌کند [۱۰]. تاکنون الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه بسیاری معرفی شده‌اند که یکی از معروف‌ترین آن‌ها الگوریتم NSGA-II است که در [۱۱] بیان شده است و در مقاله پیش رو به عنوان راه حل مساله بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص کانال مورد استفاده قرار گرفته‌است. در این مقاله هر تخصیص کانال به کاربر ثانویه به صورت یک رشته بیتی (کروموزوم) مدل شده است. با توجه دودویی بودن فضای جستجوی مساله و همچنین سازگاری این مدل‌سازی با الگوریتم‌های مشتق شده از الگوریتم ژنتیک و سادگی در پیاده‌سازی از الگوریتم NSGA-II برای حل مساله بهره گرفته شده‌است.

[1] - Federal Communications Commission

[2]- Multi-objective Evolutionary Algorithms

[3]- Pareto Front

ادامه این مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده‌است؛ در بخش دوم مدل سیستمی شبکه رادیوی شناختگر و قالب بهینه‌سازی مساله تخصیص کانال با آگاهی از کیفیت سرویس بیان شده‌است. در بخش سوم طرح پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم NSGA-II برای حل مساله بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص کانال ارایه شده‌است. بخش چهارم به ارایه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر اختصاص یافته و در نهایت بخش پنجم، مقاله را جمع‌بندی کرده و پیشنهادهایی برای ادامه کار در این حوزه ارایه می‌کند.

۲- مدل سیستمی و تعریف مساله بهینه‌سازی چندهدفه

۲-۱- مدل سیستمی

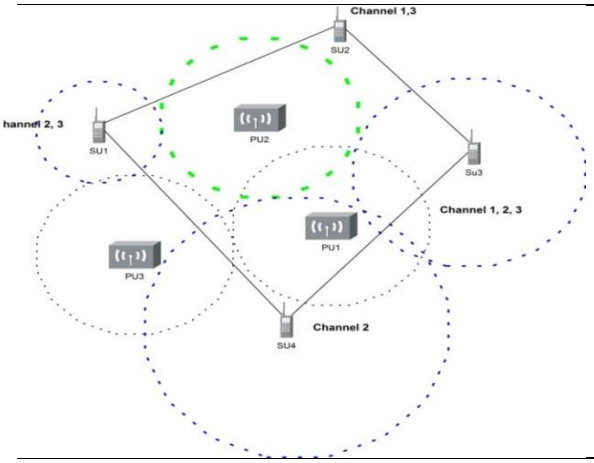
در [۵] یک مدل جامع و ساده از محیط مخابراتی شبکه‌های رادیوی شناختگر ارایه شده که در آن سه ماتریس برای مدل کردن سیستم به‌کار گرفته شده‌است. این سه ماتریس شامل ماتریس‌های دسترس‌پذیری، محدودیت دسترسی و پاداش است. مدل سیستمی استفاده شده در این مقاله مبتنی بر این سه ماتریس اصلی و چهار ماتریس کمکی است که با استفاده از این چهار ماتریس، مشخصات کیفیت سرویس هر کانال مدل می‌شود.

شبکه‌ای با N کاربر ثانویه، K کانال فرکانسی و M کاربر اولیه را درنظر بگیرید که در آن کاربران ثانویه بر سر در اختیار گرفتن فرصت‌های طیفی که همان کانال‌های خالی از کاربر اولیه هستند، با یکدیگر رقابت می‌کنند. ماتریس‌های دسترس‌پذیری و محدودیت دسترسی به این ترتیب تعریف می‌شوند که ماتریس دسترس‌پذیری یک ماتریس $N \times K$ است که در آن هر درایه $l_{n,k}$ مقداری دودویی دارد و در صورتی که $l_{n,k} = 1$ باشد، k-امین کانال برای n-امین کاربر دسترس‌پذیر است و در غیر این صورت کاربر n-ام نمی‌تواند به این کانال دسترسی داشته باشد. علت در دسترس نبودن یک کانال برای کاربر ثانویه در این است که کاربر اولیه‌ای که کانال k-ام را اشغال کرده‌است در ناحیه پوشش آن کاربر ثانویه قرار دارد. نمونه‌ای از چگونگی تشکیل ماتریس دسترس‌پذیری در شکل۱ نشان داده شده‌است. هنگامی که دو یا بیش از دو کاربر ثانویه همزمان بخواهند یک کانال خاص را در اختیار بگیرند، در صورتی که در ناحیه پوشش یکدیگر باشند، تنها یکی از آن‌ها می‌تواند کانال را اشغال کند. برای نشان دادن محدودیت در دسترسی کاربران ثانویه به کانال‌ها، ماتریس سه بعدی محدودیت دسترسی $C = \left\{c_{n,n\prime,k} \middle| c_{n,n\prime,k} \in \{0,1\}\right\}_{N\times N\times K}$ تعریف می‌شود که یک ماتریس دودویی است و در صورتی $c_{n,n\prime,k} = 1$ است که کاربر n-ام و n'-ام در ناحیه پوشش یکدیگر بوده و نتوانند همزمان کانال k-ام را در اختیار بگیرند. درایه‌های روی قطر اصلی این ماتریس نشان دهنده عکس دسترس‌پذیری برای هر کاربر ثانویه است، یعنی در صورتی که $n = n'$ باشد، داریم $c_{n.n\prime,k} = 1 - l_{n,n\prime}$. در نهایت خروجی الگوریتم‌های تخصیص کانال در قالب ماتریس دودویی $A = \left\{a_{n,k} \middle| a_{n,k} \in \{0,1\}\right\}_{N\times K}$ نشان داده می‌شود که در آن دسترسی کاربران به کانال‌ها باید با ماتریس‌های L و C سازگاری داشته باشد. در این ماتریس، $a_{n,k} = 1$ اگر و تنها اگر کانال k-ام به کاربر ثانویه n-ام تخصیص داده شده باشد. شرط بی‌مغایرت بودن ماتریس A به ازای ماتریس محدودیت دسترسی C از رابطه (۱) به‌دست می‌آید.

$$a_{n,k} + a_{n',k} \le 1 \; if \; c_{n,n',k} = 1, \quad for \;\; 1 \le n, n' \le N, 1 \le k \le K \qquad (۱)$$

شکل۱ نمونه‌ای از این شبکه با ۴ کاربر ثانویه، ۳ کانال دسترس‌پذیر و ۳ کاربر اولیه و ناحیه تحت پوشش این کاربران را نشان می‌دهد. برای هر کاربر ثانویه با توجه به موقعیت مکانی که نسبت به سایر کاربران اولیه دارد، تعدادی کانال دسترس‌پذیر است. به عنوان نمونه در شکل۱ برای کاربر ثانویه۲، کانال‌های ۱ و ۳ دسترس‌پذیر بوده و با توجه به نزدیکی کاربر اولیه۲ به کاربر ثانویه۲، کانال۲ برای این این کاربر ثانویه غیرقابل استفاده است. ماتریس دسترس‌پذیری مشخص شده در شکل۱ از مشخصات فیزیکی محیط شبکه استخراج شده‌است. هر سطر از این ماتریس مربوط به یک کاربر و هر ستون آن مربوط به یک کانال است و یک بودن درایه $l_{n,k}$ نشان دهنده دسترس‌پذیر بودن کانال k-ام برای کاربر n-ام است. هم‌چنین در شکل۱ مشاهده می‌شود که ناحیه ارسال/دریافت کاربران ثانویه ۳ و ۴ با یکدیگر تداخل دارد. بنابراین یکی از دو کاربر ۳ و ۴ به طور همزمان می‌توانند از کانال ۲ استفاده کنند و داریم $c_{3,4,2} = 1$.

دسته‌های مختلف کاربران داده، صوتی و ویدیو نیازمندی‌های مختلف کیفیت سرویس دارند. لذا بر پایه ماتریس‌های ویژگی که در ادامه تعریف می‌شوند، یک ماتریس $N \times K$ به نام ماتریس جامع پاداش از ترکیب ماتریس‌های چهارگانه ویژگی هر کانال تعریف شده که بر اساس نیازمندی و ترجیح هر کاربر از سطح کیفیت سرویس هر کانال، عددی را به عنوان پاداش جامع کانال k-ام برای کاربر ثانویه n-ام در $b_{n,k}$ نشان می‌دهد.



$$L=\begin{bmatrix}1 & 0 & 1\\ 0 & 1 & 1\\ 0 & 1 & 0\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}$$

شکل۱. یک شبکه رادیوی شناختگر با ۳ کاربر اولیه و ۴ کاربر ثانویه ناحیه تحت پوشش این کاربران و ماتریس دسترس‌پذیری آن

نحوه محاسبه ماتریس جامع پاداش در بخش بعدی ارایه شده‌است.

ماتریس پاداش احتمال دسترس‌پذیری: یک ماتریس دودویی به صورت $BA=\{ba_{n,k}|ba_{n,k}\in[0,1]\}_{N\times K}$ است که $ba_{n,k}$ نشان دهنده پاداش احتمال بی‌کاری k-امین کانال برای کاربر ثانویه n-ام است. کانالی که زمان بی‌کاری آن بیش‌تر باشد، پاداش بیش‌تری دارد زیرا کاربران ثانویه برای اجتناب از متحمل شدن هزینه سوییچینگ در طیف ترجیح می‌دهند از آن کانال استفاده کنند. مقادیر این ماتریس از صفر تا یک تغییر می‌کند که به ترتیب نشان دهنده کم‌ترین و بیش‌ترین میزان پاداش احتمال بی‌کاری یک کانال است.

ماتریس پاداش پهنای باند: طیف فرکانس رادیویی محدوده گسترده‌ای از امواج با فرکانس پایین ۱۰ کیلو هرتز تا ۱۰۰ گیگا هرتز را شامل می‌شود. طیف رادیویی به باندهای فرکانسی تقسیم می‌شود که برای استفاده‌های مختلف ذخیره شده‌اند [۱۴]. از این رو در فرآیند تخصیص طیف، پهنای باند یک عنصر مهم است. در کاربردهای صنعتی، علمی و پزشکی پهنای باند در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰۰ کیلوبیت بر ثانیه متغیر است. بنابراین در این مدل نیز ماتریس پاداش پهنای باند، یک ماتریس به‌صورت $BW=\{bw_{n,k}|bw_{n,k}\in[100,1000]\}_{N\times K}$ تعریف می‌شود که $bw_{n,k}$ پاداش پهنای باند کانال k-ام برای کاربر ثانویه n-ام را نشان می‌دهد.

ماتریس پاداش توان ارسالی: بین پاداش توان ارسالی و سطح تحت پوشش یک فرستنده ارتباط مستقیمی برقرار است. لذا در این مدل سیستمی برای ساده‌سازی، طرح کنترل توان برای هر کاربر ثانویه به‌صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود و فرض شده هر کاربر توان ارسالی خود را تا حداکثر میزان قابل قبول تنظیم می‌کند به‌گونه‌ای که با کاربران اولیه تداخل نداشته باشد. هر انتشار امواجی از سوی کاربران اولیه و ثانویه در یک کانال خاص که در محدوده تداخل سایر کاربران باشد موجب بروز تداخل در آن کانال می‌شود که مکانیزم تخصیص کانال باید از بروز آن جلوگیری کند. همان‌طور که در [۱۲] توضیح داده شده‌است، $bt_{n,k}$ نشان‌دهنده پاداش توان ارسالی کانال k-ام برای کاربر ثانویه n-ام است.

۲-۲- نرمال‌سازی برای بدست آوردن ماتریس جامع پاداش مبتنی بر قاعده سنجش فازی

روش داوری فراگیر فازی[1] برای حل مسایل تصمیم‌سازی چندعامله بکار می‌رود [۱۴]. در این مقاله نیز برای بدست آوردن پاداش جامع هر کانال برای هر کاربر ثانویه، از این روش استفاده شده‌است. اگر کاربر n-ام کانال k را اشغال کند، چهار ماتریس پاداشی که بر اساس شرایط فیزیکی مساله مقادیر آن‌ها تعیین شده‌اند، نمایان‌گر ویژگی‌های مختلف آن کانال طیفی برای آن کاربر ثانویه است. با استفاده از نرمال‌سازی، از این چهار مقادیر پاداش به یک مقدار جامع می‌رسیم.

با توجه تعریف چهار ماتریس پاداش کمکی، هرچه پاداش پهنای باند، احتمال دسترس‌پذیری و توان ارسالی مقادیر بیش‌تری داشته باشند، کانال مورد استفاده برای کاربر ثانویه‌ای که آن را انتخاب کرده‌است مناسب‌تر است. بر خلاف آن در مورد پاداش نرخ اتلاف بسته، هرچه مقادیر پاداش کوچک‌تر باشد، آن کانال برای کاربر ثانویه مناسب‌تر است. از این رو برای نرمال‌سازی مقادیر ماتریس‌های پاداش در بازه $[0,1]$، از روابط (۲) و (۳) استفاده شده‌است. رابطه (۲) برای ماتریس‌های پاداشی که در آن‌ها مقادیر بزرگ رجحان دارند و رابطه (۳) برای ماتریس‌های پاداش با ارجحیت مقادیر کوچک به کار می‌روند.

$$V_{n,k}=\frac{b_{n,k}}{\max_{\mathrm{n,k}} b_{n,k}} \qquad (۲)$$

$$V_{n,k}=\frac{b_{n,k}-\min_{\mathrm{n,k}} b_{n,k}}{\min_{\mathrm{n,k}} b_{n,k}} \qquad (۳)$$

$$\begin{cases}W1=\{w1_1,w1_2,w1_3,w1_4\}\\ W2=\{w2_1,w2_2,w2_3,w2_4\}\\ W3=\{w3_1,w3_2,w3_3,w3_4\}\end{cases} \qquad (۴)$$

$$b_{i,j}=w1_1\times bw_{i,j}+w1_2\times bt_{i,j}+ w1_3\times ba_{i,j}+w1_4\times bl_{i,j} \qquad (۵)$$

$$b_{i,j}=w2_1\times bw_{i,j}+w2_2\times bt_{i,j}+ w2_3\times ba_{i,j}+w2_4\times bl_{i,j} \qquad (۶)$$

[1]- Fuzzy comprehensive method

$$b_{i,j} = w3_1 \times bw_{i,j} + w3_2 \times bt_{i,j} + w3_3 \times ba_{i,j} + w3_4 \times bl_{i,j} \quad (۷)$$

بر اساس این بردارهای سه‌گانه ماتریس جامع پاداش طبق روابط (۵)، (۶) و (۷) تشکیل می‌شود.

۲-۳- تعریف مساله بهینه‌سازی چندهدفه

در این مقاله مساله تخصیص کانال در قالب یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه دودویی با توابع هدف بهره‌وری و انصاف، بیان شده‌است و نشان داده شده که این دو تابع در مصالحه با یکدیگرند و با افزایش یک تابع هدف، تابع دیگر کاهش‌می‌یابد. بیشینه کردن تابع بهره‌وری $U(A,B)$ معادل بیشینه کردن مجموع پاداش‌هایی است که در یک تخصیص بی‌مغایرت کانال به کاربران ثانویه تعلق می‌گیرد. این مقدار یک عدد مثبت است و طبق رابطه (۸) بدست می‌آید [۵] که در آن $a_{n,k}$ متغیر دودویی برای نشان دادن تخصیص یا عدم تخصیص و $b_{n,k}$ نشان دهنده پاداش کانال k–ام برای کاربر ثانویه n–ام است.تابع انصاف$F(A,B,N)$ مطابق رابطه (۹) بر اساس شاخص انصاف جین[1] میان کاربران ثانویه تعریف شده است. مقدار $\sum_{k=1}^{K} b_{n,k}.a_{n,k}$ برای کاربر ثانویه n–ام نشان‌دهنده مجموع پاداش‌هایی است که پاسخ تخصیص کانال در مجموع همه کانال‌ها به‌دست می‌آورد. بنابراین یک تخصیص کانال منصفانه، کانال‌ها را به قسمی به کاربران ثانویه اختصاص می‌دهد که بهره‌وری کاربران از مجموع کانال‌ها به هم نزدیک باشد. وقتی تابع انصاف به سمت یک میل کند، میزان بهره‌وری کاربران به هم نزدیک است و پاسخ تخصیص کانال منصفانه است. به ازای تخصیص‌های غیرمنصفانه، مقدار این تابع به سمت صفر میل می‌کند با توجه به اهمیت بیشینه‌سازی بهره‌وری در یک مکانیزم تخصیص کانال در شبکه‌های رادیوی شناختگر و توجه به رعایت معیار انصاف در تخصیص منابع فرکانسی بین کاربران ثانویه [۴] می‌توان مساله تخصیص کانال را با دو تابع هدف بهره‌وری و انصاف تعریف کرد. قالب بهینه‌سازی چندهدفه دودویی مساله تخصیص کانال در رابطه (۱۰) تعریف شده است. ابعاد این مساله تابعی از تعداد کاربران ثانویه و تعداد کانال‌های دسترس‌پذیر است که افزایش هرکدام از آن‌ها پیچیدگی مساله را افزایش می‌دهد. با توجه به کاهش مساله (۱۰) به مساله رنگ‌آمیزی گراف به این ترتیب که هر کاربر ثانویه معادل یک گره از گراف، کانال‌های در دسترس برای آن کاربر معادل رنگ‌های مجاز برای آن گره و محدودیت بین کاربران مختلف معادل یال‌های گراف باشد، تعلق این مساله به کلاس مسایل NP-Complete مشخص می‌شود [۷]. لذا برای حل این مساله باید از روش‌های مکاشفه‌ای و غیرکامل نظیر الگوریتم‌های تکاملی استفاده شود.

$$U(A,B) = \sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} b_{n,k}.a_{n,k} \; where \;\; a_{n,k} \in \{0,1\} \quad (۸)$$

$$F(A,B,N) = \frac{\left(\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} b_{n,k}.a_{n,k}\right)^2}{N.\sum_{n=1}^{N}\left(\sum_{k=1}^{K} b_{n,k}.a_{n,k}\right)^2} \quad (۹)$$
$$where \;\; a_{n,k} \in \{0,1\}$$

$$Maximize \begin{cases} U(A,B) = \sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} b_{n,k}.a_{n,k} \\ F(A,B,N) = \frac{\left(\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} b_{n,k}.a_{n,k}\right)^2}{N.\sum_{n=1}^{N}\left(\sum_{k=1}^{K} b_{n,k}.a_{n,k}\right)^2} \end{cases} \quad (۱۰)$$

$$Subject\ to:$$
$$for\ each\ c_{n'n''k} = 1:\ \ a_{n'k} + a_{n''k} \le 1\ \ ,$$
$$\forall n', n'' \in \{1,2,\dots,N\}, \forall k \in \{1,2,\dots,K\}$$
$$where\ a_{n,k} \in \{0,1\}$$

۳- طرح تخصیص آگاه از کیفیت سرویس کانال مبتنی بر الگوریتم NSGA-II

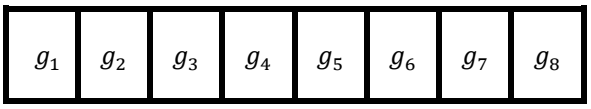
به دلیل مصالحه موجود میان بهره‌وری و انصاف در تخصیص کانال میان کاربران شبکه رادیوی شناختگر، برای رسیدن به یک طرح تخصیص کانال جامع که با شرایط واقعی مساله منطبق باشد و در عین در نظر گرفتن کیفیت سرویس کاربران و بیشینه کردن آن معیار انصاف را هم در تخصیص کانال رعایت کند به سراغ حل مساله بهینه‌سازی چندهدفه (۱۰) می‌رویم. در بهینه‌سازی چندهدفه، یک پاسخ شدنی برای بیشینه یا کمینه کردن توام همه توابع هدف وجود ندارد. بنابراین در حل این مسایل به دنبال یافتن یک مجموعه پاسخ بهینه پرتو هستیم که توسط پاسخ دیگری مغلوب نشده و در عین حال نتوان در هیچ کدام از توابع هدف پاسخ بهتری برای آن یافت به

جدول ۱. قاعده سنجش فازی

قاعده سنجش فازی براساس رجحان مقادیر بزرگ					
مقدار ورودی	$0-0.1$	$0.1-0.2$	$0.2-0.3$	$0.3-0.4$	$0.4-0.5$
مقدار خروجی	1	2	3	4	5
مقدار ورودی	$0.5-0.6$	$0.6-0.7$	$0.7-0.8$	$0.8-0.9$	$0.9-1$
مقدار خروجی	6	7	8	9	10
قاعده سنجش فازی براساس رجحان مقادیر کوچک					
مقدار ورودی	$1-0.9$	$0.9-0.8$	$0.8-0.7$	$0.7-0.6$	$0.6-0.5$
مقدار خروجی	1	2	3	4	5
مقدار ورودی	$0.5-0.4$	$0.4-0.3$	$0.3-0.2$	$0.2-0.1$	$0.1-0$
مقدار خروجی	6	7	8	9	10

[1]- Jain's Fairness Index

$$\begin{bmatrix} g_1 & 0 & 0 & g_2 \\ 0 & 0 & g_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_4 \\ 0 & g_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_6 \\ g_7 & 0 & g_8 & 0 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

شکل۲. ساختار یک کروموزوم در طرح تخصیص کانال مبتنی بر الگوریتم NSGA-II

طوری که در تابع دیگری به پاسخ بدتر نرسیم. به مجموعه تمام پاسخ‌های غیرمغلوب، مجموعه بهینه پرتو و به مقادیر توابع متناظر با این پاسخ‌ها، جبهه پرتو گفته می‌شود [۱۰]. در این بخش با استفاده از الگوریتم NSGA-II معرفی شده در [۱۱] یک طرح تخصیص آگاه از کیفیت سرویس کانال ارایه می‌شود که نقاط بهینه پرتو را به دست می‌آورد.

۳-۱- مدل کردن پاسخ مساله بهینه‌سازی در قالب کروموزوم دودویی

هر پاسخ مساله که یک تخصیص فاقد مغایرت کانال باشد، در یک کروموزوم کد می‌شود. در این کدگذاری هر درایه از ماتریس تخصیص کانال به یک ژن نگاشت می‌شود. برای کاهش افزونگی و کوچک شدن کروموزوم تنها به ازای درایه‌هایی از ماتریس A که امکان تخصیص کانال در آن وجود دارد، ژن در نظر گرفته می‌شود. بنابراین وقتی $l_{n,k}=0$ باشد، $a_{n,k}=0$ بوده و به ازای این درایه‌ها ژنی در کروموزوم نخواهیم داشت. در نتیجه برای شبکه‌ای با N کاربر ثانویه و M کانال، تعداد ژن‌های کروموزوم برابر $\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{M} l_{n,k}$ خواهد بود. این مساله که در شکل۲ نیز نشان داده شده است سبب کاهش فضای جستجو و در نتیجه بالا رفتن سرعت همگرایی به پاسخ بهینه می‌شود.

در شکل۲ که مثالی از یک کروموزوم است، یک ماتریس دسترس‌پذیری برای ۶ کاربر و ۴ کانال ارایه شده تنها شامل ۸ درایه یک است. بنابراین تعداد ژن‌های کروموزوم نیز ۸ عدد بوده که نسبت به حالتی که همه درایه‌ها کد شوند، فضای جستجو را 2^{16} برابر کاهش می‌دهد. بنابراین وقتی $l_{n,k}=0$ باشد، $a_{n,k}=0$ بوده و به ازای این درایه‌ها ژنی در کروموزوم نخواهیم داشت. در نتیجه برای شبکه‌ای با N کاربر ثانویه و M کانال، تعداد ژن‌های کروموزوم برابر $\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{M} l_{n,k}$ خواهد بود.

۳-۲- الگوریتم تخصیص آگاه از کیفیت سرویس کانال مبتنی بر NSGA-II

طرح تخصیص آگاه از کیفیت سرویس کانال برای حل مساله دوهدفه رابطه (۱۰) مبتنی بر الگوریتم NSGA-II در Algorithm1 به صورت شبه کد آمده‌است. در این طرح دو تابع بهره‌وری و انصاف که به ترتیب در (۸) و (۹) معرفی شده‌اند به عنوان دو تابع هدف در نظر گرفته شده و همه اعضای جمعیت بر اساس آن‌ها ارزیابی می‌شوند. در این الگوریتم از میان پاسخ‌های هر نسل، تعدادی از آن‌ها با استفاده از روش انتخاب تورنمنت دودویی انتخاب می‌شوند. در روش انتخاب دودویی، دو پاسخ به تصادف از میان جمعیت انتخاب می شوند و سپس میان این دو پاسخ، مقایسه‌ای انجام می‌شود و هر کدام که بهتر باشد در نهایت انتخاب می‌شود. معیارهای انتخاب در الگوریتم NSGA-II در درجه اول، رتبه پاسخ و در درجه دوم فاصله تراکمی[1] [۱۱] مربوط به پاسخ است. هرقدر رتبه پاسخ کم‌تر باشد و دارای فاصله تراکمی بیشتری باشد، مطلوب‌تر است. با تکرار عملگر انتخاب دودویی بر روی جمعیت هر نسل، مجموعه‌ای از افراد آن نسل برای شرکت در برش و جهش انتخاب می‌شوند. بر روی بخشی از مجموعه افراد انتخاب شده، عمل برش و بر روی بقیه عمل جهش انجام شده و جمعیتی از فرزندان و جهش یافتگان$Q(t)$ ایجاد می‌شود. عملگر برش مورد استفاده در این الگوریتم برش دو نقطه‌ای و عملگر جهش نیز به صورت یکنواخت با نرخ ۰/۰۲ است. در ادامه این جمعیت با جمعیت اصلی $P(t)$ ادغام می‌شود. اعضای جمعیت تازه تشکیل یافته، ابتدا برحسب رتبه و به صورت صعودی مرتب می‌شوند. اعضایی از جمعیت که دارای رتبه یکسانی هستند، بر حسب فاصله تراکمی و به صورت نزولی مرتب می‌شوند. حال اعضای جمعیت در درجه اول بر حسب رتبه، و در درجه دوم بر حسب فاصله تراکمی مرتب سازی شده‌اند. برابر با تعداد افراد جمعیت اصلی، اعضایی از بالای فهرست مرتب شده انتخاب و بقیه اعضای جمعیت دور ریخته می شوند. اعضای انتخاب شده جمعیت نسل بعدی را تشکیل می‌دهند. و چرخه مذکور در این بخش، تا رسیدن به شرایط خاتمه، تکرار می شود.

در تابع Fast non-dominated sort که شبه کد آن در Algorithm2 آمده‌است، به ازای هر کروموزوم از جمعیت تعداد پاسخ‌هایی که آن کروموزوم را مغلوب می‌کنند محاسبه می‌شود. تعداد پاسخ‌هایی که کروموزوم p را مغلوب می‌کنند n_p است. جبهه اول پرتو (F_1) شامل کروموزوم‌هایی است که هیچ پاسخی در جمعیت نتواند آن‌ها را مغلوب سازد و به عبارتی دیگر برای $n_p=0$ باشد. این روند در تابع Fast non-dominated sort تا جایی ادامه پیدا می‌کند که همه جمعیت در جبهه‌های مختلف افراز شوند.

1 - Crowding Distance

Algorithm1: NSGA-II for QoS-Aware Channel Assignment

1: Set $P, Q, R = \emptyset$ and $t = 0$
   //* t is the generation number and P, Q and R are parent, offspring and collect populations, sequentially.
2: Initialize the $P(0)$.
3: **while** $t \leq t_{\max}$ **do**
4: $R(t) = P(t) \cup Q(t)$.
5: Sort all solutions of $R(t)$ to get all non-dominated fronts $F =$ **fast-non-dominated-sort**$(R(t))$
Where $F = (F_1, F_2)$.// F_1 is utilization as (2) and F_2 is fairness as (3).
6: **while** the parent population size $|P(t+1)| + |F_i| < N$ **do**
7: Calculate crowding-distance of F_i.
8: Add the ith non-dominated front F_i to the parent population $P(t+1)$.
9: Set $i = i + 1$.
10: **end while**
11: Sort the F_i according to the crowding distance.
12: Complete the $P(t+1)$ with the first $N - |P(t+1)|$ elements of F_i.
13: Generate the offspring population to $Q(t+1)$.
14: $Q =$ **Conflict Resolving (**Q**)**.
15: Set $t = t + 1$.
16: **end while**
17: The populations in P are the non-dominated solutions.

همان‌طور که در Algorithm1 آمده است پس از تولید جمعیت اولیه به صورت تصادفی و تولید هر نسل با عملگرهای برش، جهش و انتخاب، تابع Conflict Resolving برای از بین بردن مغایرت‌های ممکن اعمال می‌شود.

Algorithm2: Fastnon-dominatedsort function

1: Set S_p as the set solutions in P which p dominates them and n_p as the number of solutions which dominate p.
2: F_1 is the first front and includes the solutions whose $n_p = 0$.
3: Set $i = 1$.
4: **while**$F_i \neq \emptyset$**do**
5: Set $Q = \emptyset$.
6: **for** each $p \in F_i$**do**
7: **for** each $q \in S_p$**do**
8: $n_q = n_q - 1$.
9: **if** $n_q = 0$ then add q to the Q.
10: **end for**
11: **end for**
12: $i = i + 1$ and the solutions in Q compose the F_i.
13: **end while**

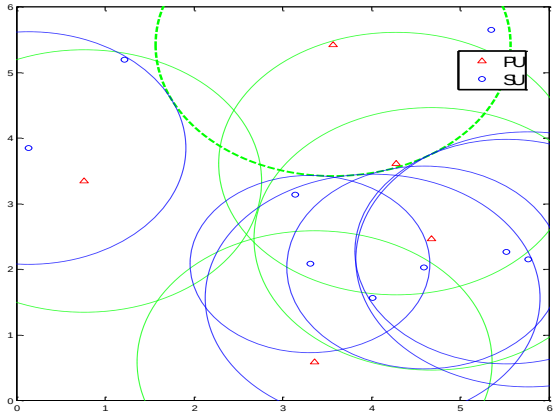
تولید تصادفی یک کروموزوم و اعمال عمگرهای برش و جهش ممکن است پاسخی را بدهد که از نظر شرایط فیزیکی حاکم بر مساله یک تخصیص شدنی نباشد. بنابراین در تابع Conflict Resolving که شبه کد آن در Algorithm3 آمده‌است، مغایرت‌های موجود در هر کروموزوم شناسایی و برطرف می‌شوند. در این تابع به ازای هر $c_{n,n',k} = 1$ در ماتریس محدودیت دسترسی C، دو ژن کروموزوم که متناظر با $a_{n,k}$ و $a_{n',k}$ در شرایط شدنی بودن پاسخ که با رابطه (۱) مشخص می‌شود، بررسی و در صورت وجود مغایرت، یک ژن از پاسخ را به صورت تصادفی تغییر می‌دهد تا مغایرت برطرف شده و پاسخ شدنی باشد.

Algorithm3: Conflict Resolvingfunction

1: Consider a given population P
2: **for** $p \leftarrow 1$ to $|P|$**do**
3: **for** $k \leftarrow 1$ to K **do**
4: Find all (n, k) that satisfies $C_{n,k,m} = 1$.
5: Convert $P(p)$ to allocation matrix A.
6: **if** $a_{n,k} \cdot a_{n',k} = 1$
7: Set one of them to 0 with prob of 0.5 .
8: **end if**
9: **end for**
10: **end for**

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی ابتدا کل فضای شدنی مساله را پیدا کرده تا با به کارگیری طرح تخصیص مبتنی بر NSGA-II نحوه رسیدن به پاسخ بهینه مشاهده شود. برای شبکه‌ای نمونه با ۹ کاربر ثانویه و ۵ کانال، ماتریس دسترس‌پذیری ۴۵ درایه دارد که از این تعداد ۱۷ درایه مقدار یک دارند. در نتیجه طول کروموزوم نیز ۱۷ بیت است. بنابراین ۱۳۱,۰۷۲ پاسخ شدنی در فضای مساله وجود دارد که با محاسبه مقادیر بهره‌وری و انصاف این پاسخ‌ها، در نهایت ۲,۱۰۰ پاسخ منحصر به فرد می‌رسیم. شکل۳ فضای شبکه‌ای با ۹ کاربر ثانویه که در یک فضای ۶ در ۶ با شعاع فرستندگی ۱ به دنبال تصاحب ۵ کانال متعلق به کاربران اولیه با شعاع فرستندگی ۴ را نشان می‌دهد. شکل۴ نتایج به کارگیری طرح تخصیص آگاه از کیفیت سرویس کانال پیشنهاد شده مبتنی بر الگوریتم NSGA-II برای یافتن جبهه پرتو بهینه در فضای شدنی مساله را نشان می‌دهد. در شکل۴ محور افقی نمودار میزان انصاف و محور عمودی میزان بهره‌وری است. در این شبیه‌سازی حداکثر تکرار الگوریتم، ۳۰ بار در نظر گرفته شده که از نسل ۲۳-ام به بعد به جبهه پرتو بهینه همگرا می‌شود. در شکل۴ پاسخ‌های غیرمغلوب در نسل‌های اول، دهم، بیستم و سی‌ام نشان داده شده‌اند. هیچ کدام از پاسخ‌های جبهه پرتو بر دیگری ارجحیت ندارند و بسته به شرایط می‌توان هر کدام را به عنوان یک تصمیم بهینه در نظر گرفت. همان گونه که در شکل۴ مشخص است، پس از همگرایی الگوریتم به جبهه بهینه، چهار پاسخ غیرمغلوب به دست می‌آید که میزان بهره‌وری و انصاف آن‌ها متفاوت بوده و بنا به شرایط شبکه، ماژول تخصیص کانال در شبکه می‌تواند هرکدام از این چهار تخصیص ممکن را انتخاب کند.

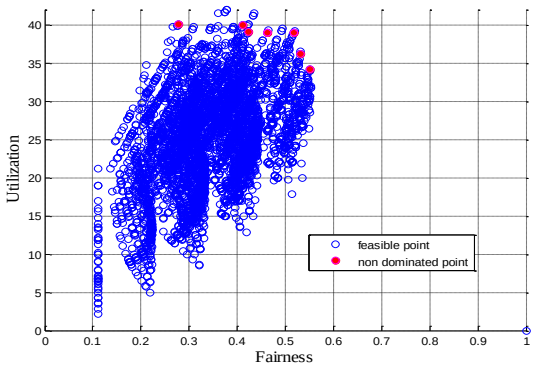


شکل۳- تداخل کاربران ثانویه در رقابت در تصاحب کانال در یک محیط ۶ در ۶

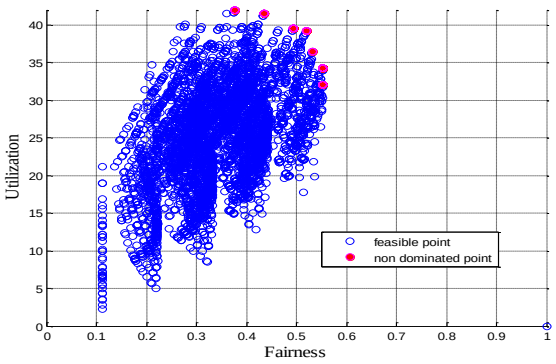
در این پژوهش برای صحت سنجی الگوریتم تکاملی پیشنهاد شده از الگوریتم BIP استفاده شده است. الگوریتم BIP با استفاده از تابع bintprog در متلب[1] که برای حل مسایل binary integer programming است و تبدیل مساله (۱۰) به فرمت این تابع، پاسخ‌های بهینه مساله را پیدا می‌کند. الگوریتم BIP پاسخ‌های مساله را به صورت دقیق و مبتنی بر جستجوی کامل[2] به دست می‌آورد لذا حل مسایل با ابعاد بزرگ با استفاده از این الگوریتم بسیار زمان‌بر است. با استفاده از این الگوریتم صحت جواب‌های بهینه الگوریتم تکاملی در ابعاد کوچک با دقت ۱۰۰٪ اثبات شده و در ابعاد بزرگ می‌توان از روش تکاملی پیشنهادی استفاده کرد.

صحت نتایج به دست آمده از این طرح پیشنهادی با روش BIP که در آن هدف بیشینه کردن بهره‌وری با شرط محدود کنندگی انصاف است، تایید می‌شود. در این حالت مقدار انصاف به عنوان یک محدودیت مساله در نظر گرفته شده و فضای پاسخ‌های شدنی را به مقدار انصاف معینی محدود می‌شود. در فضای محدود شده بهترین پاسخ مساله یافت می‌شود که با پاسخ حاصل از طرح پیشنهادی مطابقت دارد. طرح پیشنهادی برای یافتن پاسخ بهینه تخصیص آگاه از کیفیت سرویس کانال از نظر زمانی بسیار بهتر از روش مبتنی بر BIP عمل می‌کند. جدول۲ مقایسه‌ای از الگوریتم پیشنهادی Algorithm1 و BIP را ارایه می‌کند. در این جدول متوسط زمان اجرای دو الگوریتم بر روی ۱۰۰ سناریوی تصادفی بر حسب ثانیه نشان داده شده‌است. که همان‌طور که مشخص است برای مسایلی با ابعاد ۷ کاربر و ۵ کانال، روش BIP مدت زمان زیادی برای رسیدن به تخصیص بهینه صرف می‌کند. این در حالی است که الگوریتم پیشنهادی در زمان منطقی می‌تواند پاسخ‌های جبهه پرتو بهینه را به دست آورد.

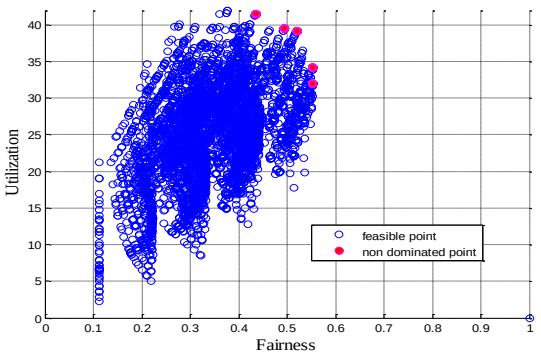
[1] - MATLAB
[2] - Exhaustive search



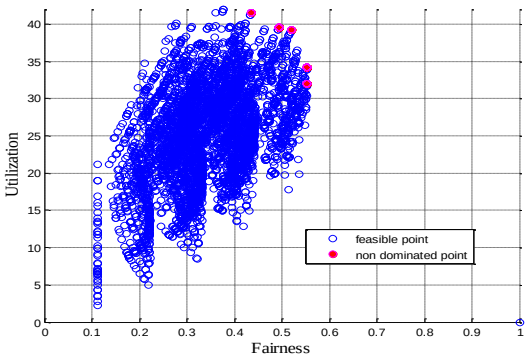
شکل۴- الف- همگرایی الگوریتم NSGA-IIبرای رسیده به جبهه پرتو (نسل اول)



شکل۴- ب- همگرایی الگوریتم NSGA-IIبرای رسیده به جبهه پرتو (نسل دهم)



شکل۴- ج- همگرایی الگوریتم NSGA-IIبرای رسیده به جبهه پرتو (نسل بیستم)



شکل۴- د- همگرایی الگوریتم NSGA-IIبرای رسیده به جبهه پرتو (نسل سی‌ام)

جدول۲. مقایسه زمان رسیدن به پاسخ روش BIP و Algorithm1

Dimensions of problem		Time of BIP (s)	Time of Algorithm1 (s)
N	M		
5	4	7.6182	1.3254
6	4	28.3916	3.3025
7	4	120.2045	4.0325
6	5	124.3557	5.5478
7	5	527.3286	7.3258
8	5	long	11.3254
7	6	long	15.3254
8	6	long	17.6578
9	6	long	26.1216
8	7	long	33.0882
9	7	long	47.4650

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مساله تخصیص آگاه از کیفیت سرویس کانال در شبکه‌های رادیوی شناختگر در قالب یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه با اهداف بهره‌وری و انصاف مدل شده‌است. هم‌چنین یک طرح تخصیص کانال مبتنی بر الگوریتم NSGA-II برای حل مساله بهینه‌سازی ارایه و چگونگی همگرایی به پاسخ‌های جبهه پرتو بهینه نشان داده شد. نتایج شبیه‌سازی همگرایی سریع طرح پیشنهادی به پاسخ‌های بهینه را نشان می‌دهد. روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی با متغیرهای تصمیم‌گیری صحیح دودویی صحت بهینگی نقاط به دست آمده توسط طرح پیشنهادی را تایید می‌کنند ولی از نظر زمان رسیدن به پاسخ‌های بهینه، طرح مبتنی بر الگوریتم NSGA-II بسیار سریع‌تر عمل کرده و برای شبکه‌های واقعی با تعداد کاربر و کانال واقعی مناسب است. مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش شامل در نظر گرفتن کیفیت سرویس کاربران مختلف، بهینه‌سازی توام بهره‌وری و انصاف در تخصیص منابع بین کاربران ثانویه و به دست آوردن نقاط جبهه پرتو برای مساله بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص کانال است. در ادامه این پژوهش می‌توان از سایر معیارهای ارزیابی شبکه نظیر گذردهی، انرژی و ریسک دسترسی را به عنوان اهداف مساله بهینه‌سازی چندهدفه در نظر گرفت و با استفاده از طرح پیشنهاد شده در این مقاله، پاسخ‌های بهینه را به ازای اهداف دیگر و یا حتی در ابعاد بیش از دو بعد هم‌زمان جستجو کرد.

مراجع

[1] Federal Communications Commission. (2003). Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies. FCC Report, ET Docket03-322.

[2] Marinho, J., & Monteiro, E. (2012). Cognitive radio: Survey on communication protocols, spectrum decision issues, and futureresearch directions. Wireless Networks, 18(2), 147–164.

[3] S. Fischer, M. Petrova, P. Mahonen, and B. Vocking, “Distributed load balancing algorithm for adaptive channel allocation for Cognitive Radios,” 2nd Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom), Orlando, FL, USA,August 2007.

[4] Tragos, E.; Zeadally, S.; Fragkiadakis, A.; Siris, V. Spectrum assignment in cognitive radio networks: A comprehensive survey.IEEE Commun. Surv. Tutor. 2013, 15, 1108–1135.

[5] Z. Zhao, Z. Peng, S. Zheng, and J. Shang, “Cognitive Radio Spectrum Al- location using Evolutionary Algorithms,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 8, no. 9, pp. 4421–4425, Sept. 2009.

[6] Quan Liu, Hongwei Niu, Wenjun Xu, Duzhong Zhang, “A service-oriented spectrum allocation algorithm using enhanced PSO for cognitive wireless networks”, Computer Networks, vol. 74, part B, pp. 81–91, 2014.

[7] G. Tsiropoulos, O. Dobre, M. Ahmed, and K. Baddour, “Radio resource allocation techniques for efficient spectrum access in cognitive radio networks,” IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 18, no. 1, pp. 817–840, 1st Quart. 2016.

[8] Bhardwaj, Piyush, et al. "Enhanced Dynamic Spectrum Access in Multiband Cognitive Radio Networks via Optimized Resource Allocation." IEEE Transactions on Wireless Communications 15.12 (2016): 8093-8106.

[9] F. Ye, R. Yang, and Y. Li, “Genetic Algorithm Based Spectrum Assignment Model in Cognitive Radio Networks,” in *Information Engineering and Computer Science (ICIECS), 2010 2nd International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 1–4.

[10] Kalyanmoy Deb. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Wiley, Chichester, UK, 2001.

[11] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, “A fast and elitist multiobjective optimization genetic algorithm: NSGA-II,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*,vol. 6, pp. 182–197, Apr. 2002.

[12] D. Porcino and W. Hirt, “Ultra-wideband radio technology: Potential and challenges ahead,” in *Proc. IEEE Commun. Mag.*, Jul. 2003, vol. 41, pp. 66–74.

[13] F. Koroupi, S. Talebi, H. Salehinejad, Cognitive radio networks spectrum allocation: an ACS perspective, Sci. Iranica 19 (3) (2012) 767–773.

[14] Kaur, Maninder Jeet, Harsh K. Verma, and Moin Uddin. "QoS provisioning in channel allocation strategy in cognitive radio using fuzzy logic." International Journal of Machine Intelligence and Sensory Signal Processing 1.3 (2014): 215-231.