

کنترل توان و تخصیص زیرکانال در شبکه‌های دوسطحی ماکروسول و فمتوسول مبتنی بر OFDMA

حسین داودی و مهدی راستی

این حجم عظیم از ترافیک باشد [۴]. با توجه به این افزایش حجم داده و تقاضا، نیاز است ظرفیت شبکه‌های بی‌سیم افزایش یابد [۵]. یکی از روش‌های افزایش ظرفیت شبکه، استفاده از تعداد سلول‌های زیاد و متراکم است [۶]. با این روش فاصله بین کاربر تا ایستگاه پایه کاهش یافته و می‌توان با تکیه بر تکنیک OFDMA بهره بیشتری از استفاده مجدد زیرکانال‌های فرکانسی در مصارف خانگی داشته باشیم. وجود سلول‌های کوچک باعث ناهمگونی شبکه از نظر اندازه سلول‌ها شده و به همین دلیل به این گونه از شبکه‌ها، شبکه‌های ناهمگون (چندسطحی) گفته می‌شود [۷]. در این گونه شبکه‌ها باید آستانه تداخل بین کاربران در سطوح ماکرو و فمتو رعایت گردد [۸].

در [۹] و [۱۰] یک شبکه تنها در سطح فمتوسول در نظر گرفته شده است. در [۹] مسئله با هدف بیشینه‌کردن مجموع نرخ داده کاربران فمتوسول تعریف شده است. در [۱۰] برای رعایت انصاف بین کاربران فمتوسول یک راهکار تخصیص زیرکانال و کنترل توان ارسالی پیشنهاد شده است. در [۱۰] اگرچه آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل برای کاربران ماکروسول از سوی کاربران فمتوسول رعایت می‌گردد اما رعایت کیفیت سرویس برای کاربران فمتوسول به عنوان یک محدودیت در مسئله در نظر گرفته نشده است. در [۱۱] تا [۱۳] یک شبکه سلولی بی‌سیم به صورت چندسطحی در نظر گرفته شده که در آن فرض گردیده تخصیص زیرکانال و توان ارسالی در سطح ماکروسول از قبل انجام شده و تنها یک راهکار کنترل توان و تخصیص زیرکانال در سطح فمتوسول ارائه شده است. در [۱۱] در سطح فمتوسول، ابتدا فمتوسول‌ها خوشه‌بندی شده و سپس با هدف بیشینه‌شدن مجموع نرخ داده کاربران، زیرکانال و توان ارسالی تخصیص می‌یابند. در [۱۲] در سطح فمتوسول، هدف بیشینه‌شدن مجموع نرخ داده کاربران است به نحوی که کاربران حساس به تأخیر به حداقل نرخ داده خود دست یابند. در این سطح برای تخصیص زیرکانال از یک الگوریتم مکاشفه‌ای و برای تعیین توان ارسالی از روش دوگان لاگرانژ استفاده شده است. در [۱۳] مسئله در سطح فمتوسول با هدف بیشینه‌کردن مجموع نرخ داده در یک شبکه چندسطحی رادیوشناختی بیان می‌گردد. در این مرجع در سطح فمتوسول تنها توان ارسالی به عنوان متغیر در نظر گرفته می‌شود. در [۱۴] تا [۱۶] یک شبکه سلولی بی‌سیم به صورت چندسطحی در نظر گرفته شده است. در [۱۴] یک روش تخصیص منابع توزیع‌شده با استفاده از potential game و روش‌های حل مسایل بهینه محدب با هدف بیشینه‌کردن مجموع نرخ کاربران در هر دو سطح ماکروسول و فمتوسول ارائه شده است. در [۱۵] برای حل مسئله تخصیص منابع در هر دو سطح فمتوسول و ماکروسول از نظریه بازی‌ها بهره‌گیری شده است. در [۱۶] در هر دو سطح فمتوسول و ماکروسول، مسئله با هدف بیشینه‌نمودن مجموع نرخ داده کاربران بیان شده که در آن قید دستیابی کاربران به حداقل نرخ داده مورد نیاز، در سطح ماکروسول لحاظ و در سطح فمتوسول صرف نظر شده است.

چکیده: شبکه‌های چندسطحی که شامل ماکروسول و فمتوسول هستند، منجر به افزایش ظرفیت شبکه و بهبود کیفیت سرویس‌های ارائه‌شده به کاربران در شبکه‌های سلولار می‌شوند. تخصیص زیرکانال مشترک بین کاربران سطوح مختلف، باعث ایجاد تداخل بین سطحی بین کاربران می‌گردد که به دلیل اولویت بالاتر کاربران ماکروسول، حضور کاربران فمتوسول نباید مانع دستیابی این کاربران به حداقل کیفیت سرویس خود شوند. در این مقاله یک روش کنترل توان و تخصیص زیرکانال در حالت فروسو و در دو سطح ماکروسول و فمتوسول مبتنی بر OFDMA با هدف بیشینه‌کردن مجموع نرخ کاربران فمتوسول‌ها، به نحوی که حداقل کیفیت سرویس برای همه کاربران ماکروسول و کاربران حساس به تأخیر فمتوسول‌ها رعایت گردد ارائه می‌دهیم. در سطح ماکروسول دو مسئله متفاوت را به صورت جداگانه در نظر می‌گیریم. مسئله اول با هدف بیشینه‌نمودن مجموع آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل برای کاربران ماکروسول و مسئله دوم با هدف کمینه‌کردن مجموع توان ارسالی ماکروسول بیان می‌شود. مسئله در سطح فمتوسول، با هدف بیشینه‌نمودن مجموع نرخ داده کاربران فمتوسول‌ها بیان می‌گردد. برای حل مسئله اول در سطح ماکروسول از الگوریتم مجارستانی که یک روش بهینه انتساب است استفاده می‌نماییم. همچنین برای حل مسئله دوم از یک روش مکاشفه‌ای برای تخصیص زیرکانال و از روش دوگان لاگرانژ برای کنترل توان استفاده می‌گردد. برای حل مسئله در سطح فمتوسول نیز ابتدا با استفاده از یک روش مکاشفه‌ای، تخصیص زیرکانال صورت می‌گیرد و سپس با استفاده از روش دوگان لاگرانژ که یکی از روش‌های حل مسایل بهینه‌سازی محدب است، کنترل توان صورت می‌پذیرد. در انتها عملکرد این روش با تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی بررسی می‌گردد.

کلیدواژه: شبکه‌های چندسطحی، فمتوسول، کنترل توان و تخصیص زیرکانال، بهینه‌سازی محدب، OFDMA.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر میزان استفاده از تجهیزات هوشمند، برنامه‌های کاربردی با نرخ بالای ارسال داده و ارتباط ماشین با ماشین رشد قابل توجهی داشته است [۱] و به همین دلیل میزان داده تولیدشده افزایش یافته است. بر اساس پیش‌بینی‌های انجام‌شده نرخ داده تولیدشده تا سال ۲۰۲۰ حدود ۱۰۰۰ برابر میزان آن در سال ۲۰۱۵ می‌شود [۲]. همچنین در نسل جدید شبکه‌های بی‌سیم شاهد افزایش ۶۶ درصدی در ترافیک صدا و افزایش ۹۰ درصدی در ترافیک داده در کاربران خانگی هستیم [۳]. بر همین اساس نسل بعدی شبکه‌های بی‌سیم یا نسل ۵ باید پاسخ‌گوی

این مقاله در تاریخ ۲۹ اردیبهشت ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۱۳ آبان ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

حسین داودی، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، (email: hdavoudi@aut.ac.ir).
مهدی راستی، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، (email: راستی@aut.ac.ir).

فمتوسل‌ها در حالت دسترسی بسته قرار دارند. در حالت دسترسی بسته تنها کاربرانی امکان دریافت سرویس از سلول را دارا هستند که از قبل به عضویت آن درآمده باشند. تعداد کاربرانی که از ماکروسل B سرویس دریافت می‌کنند با M و مجموعه کاربران ماکروسل را با نماد \mathcal{M} نمایش می‌دهیم. همچنین فرض می‌کنیم تعداد کاربران هر یک از فمتوسل‌ها با یکدیگر مساوی و برابر با F است. مجموعه کاربران هر فمتوسل را با نماد \mathcal{F}_k نمایش می‌دهیم. مجموعه کاربران فمتوسل خود به دو دسته کاربران حساس به تأخیر (DS) که نیازمند تضمین یک حداقل کیفیت سرویس هستند و کاربرانی که قابلیت تحمل تأخیر را دارا هستند (DT) تقسیم می‌شوند که به ترتیب با دو مجموعه DS_k و DT_k نمایش داده می‌شوند که $|DS_k| + |DT_k| = F$ که در آن $DS_k \cap DT_k = \emptyset$.

تعداد زیرکانال‌های در دسترس در یک سیستم مبتنی بر OFDMA را با نماد N و مجموعه زیرکانال‌ها را با نماد \mathcal{N} نمایش می‌دهیم. فرض می‌کنیم در این شبکه، امکان استفاده مجدد از زیرکانال‌های در دسترس وجود دارد. در واقع ماکروسل و فمتوسل امکان دسترسی مشترک به مجموعه \mathcal{N} را دارا هستند. متغیر باینری $a_{i,j}^n$ نماد تخصیص زیرکانال n به ایستگاه پایه i و کاربر j است ($j \in \{\mathcal{F}_k \cup \mathcal{M}\}, i \in \{B, \mathcal{K}\}$). در صورت تخصیص زیرکانال، $a_{i,j}^n$ برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر با صفر است. نمادهای $p_{i,j}^n$ و $g_{i,j}^n$ به ترتیب نشان‌دهنده توان ارسالی ایستگاه پایه i و بهره مسیر بین ایستگاه پایه i و کاربر j در زیرکانال n هستند ($j \in \{\mathcal{F}_k \cup \mathcal{M}\}, i \in \{B, \mathcal{K}\}$). نماد $P_{i,\max}$ به حداکثر توان ارسالی ایستگاه پایه i و نماد σ^2 میزان توان نویز جمع‌شونده سفید و گاوسی (AWGN) را نمایش می‌دهند که σ^2 برابر با $(w/N) \times N$ است که در آن w میزان پهنای باند و N نویز محیط هستند.

نسبت سیگنال دریافتی به نویز (SINR) کاربر m ماکروسل در زیرکانال n به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$\gamma_{B,m}^n = \frac{P_{B,m}^n g_{B,m}^n}{\sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F a_{k,f}^n p_{k,f}^n g_{k,m}^n + \sigma^2} \quad (1)$$

میزان تداخل بین سطحی ناشی از کاربران فمتوسل برای کاربر m ماکروسل در زیرکانال n را با نماد I_m^n نمایش می‌دهیم. آستانه میزان تداخل بین سطحی قابل تحمل برای کاربر m ماکروسل در زیرکانال n را با نماد \bar{I}_m^n نمایش می‌دهیم. به صورت مشابه نسبت سیگنال دریافتی به نویز (SINR) کاربر f فمتوسل در زیرکانال n بدین صورت است

$$\gamma_{k,f}^n = \frac{P_{k,f}^n g_{k,f}^n}{\sum_{m=1}^M a_{B,m}^n p_{B,m}^n g_{B,f}^n + \sigma^2} \quad (2)$$

در این سیستم مدل تنها تداخل بین سطحی در نظر گرفته شده است. مقدار نرخ داده کاربر i که از ایستگاه پایه j سرویس دریافت می‌کند بر اساس رابطه شانون به صورت زیر است ($j \in \{\mathcal{F}_k \cup \mathcal{M}\}, i \in \{B, \mathcal{K}\}$)

$$R_{i,j}^n = a_{i,j}^n \log_2(1 + \gamma_{i,j}^n) \quad (3)$$

کاربران ماکروسل نسبت به کاربران فمتوسل دارای اولویت بالاتری هستند به این معنا که همه کاربران ماکروسل باید به حداقل نرخ داده دست R_m^{\min} یابند و تداخل ناشی از کاربران فمتوسل مانع این دستیابی نشود. در واقع داریم

در این مقاله قصد داریم برخلاف [۹] و [۱۰] که در آنها مسئله تخصیص منابع تنها در سطح فمتوسل بیان شده و [۱۱]، [۱۲] و [۱۴] که تنها برای تخصیص منابع در سطح فمتوسل راهکاری ارائه گردیده و [۱۶] که رعایت حداقل کیفیت سرویس برای کاربران سلول کوچک در نظر گرفته نشده است، یک مسئله تخصیص منابع در حالت فروسو و در دو سطح ماکروسل و فمتوسل ارائه دهیم. هدف مسئله در نظر گرفته شده در این مقاله این است که با رعایت حداقل کیفیت سرویس برای همه کاربران ماکروسل، مجموع نرخ داده همه کاربران فمتوسل را بیشینه نماییم به نحوی که حداقل کیفیت سرویس برای همه کاربران ماکروسل و کاربران حساس به تأخیر فمتوسل‌ها رعایت گردد. در این مسئله، ابتدا تخصیص منابع برای کاربران ماکروسل و سپس برای کاربران فمتوسل صورت می‌پذیرد. در سطح ماکروسل دو مسئله متفاوت را به صورت جداگانه در نظر می‌گیریم. در مسئله اول، هدف بیشینه‌نمودن مجموع آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل برای کاربران ماکروسل بیان می‌گردد. برای حل این مسئله ابتدا یک مسئله بهینه‌سازی جایگزین را با پیچیدگی کمتر بیان می‌کنیم. سپس با استفاده از الگوریتم مجارستانی که یک روش بهینه انتساب است، مسئله جایگزین را حل می‌نماییم. در مسئله دوم، هدف کمینه‌کردن مجموع توان ارسالی کاربران ماکروسل بیان می‌شود. برای حل این مسئله ابتدا با استفاده از یک روش مکاشفه‌ای تخصیص زیرکانال صورت می‌پذیرد. سپس با استفاده از روش دوگان لاگرانژ و روش Bisection به ترتیب توان ارسالی در زیرکانال‌ها و آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل کاربران ماکروسل را تعیین می‌نماییم. مسئله در سطح فمتوسل با هدف بیشینه‌نمودن مجموع نرخ همه کاربران فمتوسل‌ها بیان می‌گردد. برای حل این مسئله نیز ابتدا با استفاده از یک روش مکاشفه‌ای تخصیص زیرکانال صورت گرفته و سپس با استفاده از روش دوگان لاگرانژ که یکی از روش‌های حل مسایل بهینه‌سازی محدب است، تخصیص توان صورت می‌پذیرد. در انتها عملکرد این روش با تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی بررسی می‌گردد که نتایج شبیه‌سازی از نظر مجموع نرخ داده کاربران فمتوسل نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی نسبت به روش پیشنهاد شده در [۱۲] است. در واقع همان طور که اشاره نمودیم در [۱۲] فرض شده که تخصیص منابع در سطح ماکروسل از قبل انجام شده است. در این مقاله نشان می‌دهیم که بیان مسئله در سطح ماکروسل چه تأثیری بر مجموع نرخ داده کاربران فمتوسل دارد. همچنین نشان می‌دهیم که بیشینه‌کردن مجموع آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل در سطح ماکروسل در مقایسه با کمینه‌کردن مجموع توان ارسالی کاربران ماکروسل منجر به بهبود بیشتری برای مجموع نرخ داده کاربران فمتوسل می‌شود.

ساختار این مقاله بدین صورت است که ابتدا در بخش ۲ مدل سیستمی بیان می‌گردد. در بخش‌های ۳ و ۴ به ترتیب به بیان مسئله در سطح ماکروسل و فمتوسل پرداخته و راه حل‌هایی برای حل آنها ارائه می‌دهیم. در بخش ۵ نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرند و در بخش ۶ نیز نتیجه‌گیری از مقاله بیان می‌گردد.

۲- مدل سیستم

یک شبکه سلولی بی‌سیم دوسطحی را شامل یک ماکروسل و تعدادی فمتوسل در حالت فروسو در نظر می‌گیریم. ماکروسل با نماد B و شعاع پوشش r_B مشخص می‌گردد. در کنار ماکروسل، تعداد K فمتوسل با شعاع پوشش r_k وجود دارد که مجموعه فمتوسل‌ها را با $\mathcal{K} = \{k_1, k_2, \dots, k_{|K}|\}$ نمایش می‌دهیم. فرض می‌شود که هر یک از

$$\begin{aligned}
 C3: & \sum_{m=1}^M a_{B,m}^n \leq 1, \forall n \in \mathcal{N} \\
 C4: & p_{B,m}^n \leq a_{B,m}^n P_{B,\max}, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N} \\
 C5: & \bar{I}_m^n \geq (1 - a_{B,m}^n) I_{\max}, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N} \\
 C6: & a_{B,m}^n \in \{0, 1\}, p_{B,m}^n \geq 0, I_m^n \geq 0, \bar{I}_m^n \leq I_{\max}, \\
 & \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}
 \end{aligned} \quad (6)$$

محدودیت $C1$ بیانگر دستیابی کاربران ماکروسول به حداقل نرخ داده مورد نیاز خود است. محدودیت $C2$ به کم‌تر بودن مجموع توان ارسالی ماکروسول از مقدار بیشینه آن اشاره می‌کند. محدودیت $C3$ بیانگر این است که هر زیرکانال حداکثر به یک کاربر ماکروسول تخصیص می‌یابد. در صورت عدم تخصیص هر یک از زیرکانال‌ها به کاربران به ترتیب بر اساس محدودیت‌های $C4$ و $C5$ توان ارسالی در آن زیرکانال صفر و مقدار آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل I_{\max} در نظر گرفته می‌شود. I_{\max} بیانگر حد بالای میزان \bar{I}_m^n برای کاربران ماکروسول از طرف سطح فمتوسل است. محدودیت $C6$ نیز به باینری بودن تخصیص زیرکانال، غیر منفی بودن $p_{B,m}^n$ و \bar{I}_m^n اشاره می‌کند.

۳-۱-۲ مسئله ۲ در سطح ماکروسول: کمینه‌کردن مجموع توان ارسالی کاربران ماکروسول

در مسئله ۲ در سطح ماکروسول هدف کمینه‌کردن مجموع توان ارسالی ماکروسول در زیرکانال‌های مختلف با در نظر گرفتن دستیابی همه کاربران به حداقل نرخ داده مورد نیاز خود است. مسئله مورد نظر به این صورت تعریف می‌گردد

$$\begin{aligned}
 \min_{\{a_{B,m}^n, \bar{I}_m^n, p_{B,m}^n\}} & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N p_{B,m}^n \\
 \text{Subject to} & \\
 C1: & \sum_{n=1}^N a_{B,m}^n \log_{\tau} \left(1 + \frac{P_{B,m}^n g_{B,m}^n}{\bar{I}_m^n + \sigma^2} \right) \geq R_m^{\min}, \forall m \in \mathcal{M} \\
 C2: & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N p_{B,m}^n \leq P_{B,\max} \\
 C3: & \sum_{m=1}^M a_{B,m}^n \leq 1, \forall n \in \mathcal{N} \\
 C4: & p_{B,m}^n \leq a_{B,m}^n P_{B,\max}, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N} \\
 C5: & a_{B,m}^n \in \{0, 1\}, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N} \\
 C6: & p_{B,m}^n \geq 0, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}
 \end{aligned} \quad (7)$$

محدودیت $C1$ بیانگر دستیابی کاربران ماکروسول به حداقل نرخ داده مورد نیاز خود است. محدودیت $C2$ به کم‌تر بودن مجموع توان ارسالی ماکروسول از مقدار بیشینه آن اشاره می‌کند. محدودیت $C3$ بیانگر این است که هر زیرکانال تنها به یک کاربر ماکروسول تخصیص می‌یابد. در صورت عدم تخصیص هر زیرکانال، توان ارسالی آن بر اساس محدودیت $C4$ صفر در نظر گرفته می‌شود. محدودیت $C5$ و $C6$ به ترتیب به باینری بودن تخصیص زیر کانال و غیر منفی بودن توان ارسالی اشاره می‌کند.

۳-۲ مسئله کنترل توان و تخصیص زیرکانال در سطح فمتوسل

در سطح فمتوسل با توجه به اولویت کاربران ماکروسول، توان ارسالی

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_m^n &= \max \{ I_m^n \mid \forall m \in \mathcal{M}, \\
 & \sum_{n=1}^N a_{B,m}^n \log_{\tau} \left(1 + \frac{P_{B,m}^n g_{B,m}^n}{\bar{I}_m^n + \sigma^2} \right) \geq R_m^{\min} \}
 \end{aligned} \quad (4)$$

پس یک محدودیت را برای توان ارسالی فمتوسل در زیرکانال n به این صورت بیان می‌نماییم

$$a_{B,m}^n \left(\sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F a_{k,f}^n p_{k,f}^n g_{k,m}^n \right) \leq a_{B,m}^n \bar{I}_m^n \quad (5)$$

رابطه (۵) زمانی برقرار است که زیرکانال n به صورت مشترک به کاربر m ماکروسول و کاربر f فمتوسل k تخصیص یابد. همچنین در سطح فمتوسل کاربران DS دارای اولویت بالاتری نسبت به کاربران DT هستند به این معنا که همه کاربران DS باید به حداقل نرخ داده $R_{k,f}^{\min}$ دست یابند و حضور کاربران DT نیز مانع این دستیابی نشود.

۳- بیان مسئله

همان طور که در بخش ۱ اشاره گردید، در [۱۲] مسئله تنها در سطح فمتوسل بیان شده و در سطح ماکروسول تخصیص زیرکانال، توان ارسالی و آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل کاربران ماکروسول ثابت و از قبل تعیین شده در نظر گرفته شده است. در این مقاله قصد داریم علاوه بر بیان مسئله در سطح فمتوسل، در سطح ماکروسول نیز یک مسئله تخصیص منابع را در نظر بگیریم. این مسئله با هدف بیشینه‌کردن مجموع نرخ داده کاربران فمتوسل به نحوی که اولویت کاربران ماکروسول و DS حفظ گردد است و در قالب دو سطح ماکروسول و فمتوسل مطرح می‌گردد. در ادامه ابتدا کنترل توان و تخصیص زیرکانال برای کاربران ماکروسول و سپس برای کاربران فمتوسل صورت می‌گیرد.

۳-۱ مسئله کنترل توان و تخصیص زیرکانال در سطح ماکروسول

در این مقاله با رعایت قید دستیابی به حداقل کیفیت سرویس مورد نظر کاربران ماکروسول، مسئله را در سطح ماکروسول به دو صورت جداگانه تعریف می‌کنیم. مسئله اول با هدف بیشینه‌نمودن مجموع آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل کاربران ماکروسول و مسئله دوم با هدف کمینه‌کردن مجموع توان ارسالی ماکروسول بیان می‌شود. همچنین در بخش شبیه‌سازی نحوه تأثیر هر یک از این مسایل بر روی مجموع نرخ داده کاربران فمتوسل نشان داده می‌شود.

۳-۱-۱ مسئله ۱ در سطح ماکروسول: بیشینه‌کردن مجموع آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل

در مسئله ۱ در سطح ماکروسول هدف بیشینه‌نمودن مجموع آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل در زیرکانال‌های در دسترس برای کاربران ماکروسول با در نظر گرفتن دستیابی همه کاربران به حداقل نرخ داده مورد نیاز خود است. مسئله مورد نظر به این صورت تعریف می‌گردد

$$\begin{aligned}
 \max_{\{a_{B,m}^n, \bar{I}_m^n, p_{B,m}^n\}} & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \bar{I}_m^n \\
 \text{Subject to} & \\
 C1: & \sum_{n=1}^N a_{B,m}^n \log_{\tau} \left(1 + \frac{P_{B,m}^n g_{B,m}^n}{\bar{I}_m^n + \sigma^2} \right) \geq R_m^{\min}, \forall m \in \mathcal{M} \\
 C2: & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N p_{B,m}^n \leq P_{B,\max}
 \end{aligned}$$

ماکروسول را رعایت نمایند. در نتیجه به دنبال این هستیم که تا جای ممکن مجبور به رعایت این محدودیت برای زیرکانال‌های کمتری باشیم. همچنین توان ارسالی ماکروسول در هر زیرکانال به صورت مساوی و برابر با $p_{B,m}^n = P_{B,max} / M$ است. حال با توجه به ثابت بودن R_m^{min} و $P_{B,m}^n$ و بر اساس (۹)، میزان آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل کاربر m ماکروسول در زیرکانال n متناظر با مقدار بهره مسیر کاربر m ماکروسول در زیرکانال n است [۱۷]

$$\bar{I}_m^n = \frac{P_{B,m}^n \mathcal{G}_{B,m}^n}{\gamma_{B,m}^{min} - 1} - \sigma^2 \quad (9)$$

در واقع برای حل مسئله (۶)، زیرکانال n به کاربر m ماکروسول به نحوی تخصیص می‌یابد که دارای بیشترین بهره مسیر باشد $(g_{B,m}^n, n \in N)$ [۱۷]. بر طبق این روش برای بیشینه‌نمودن مجموع آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل کاربران ماکروسول می‌توان مسئله جایگزین (۱۰) را حل نمود

$$\begin{aligned} & \max_{\{a_{B,m}^n\}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{B,m}^n g_{B,m}^n \\ & \text{Subject to} \\ & C1: \sum_{n=1}^N a_{B,m}^n = 1, \forall m \in M \\ & C2: \sum_{m=1}^M a_{B,m}^n \leq 1, \forall n \in N \\ & C3: a_{B,m}^n \in \{0, 1\}, \forall m \in M, n \in N \end{aligned} \quad (10)$$

محدودیت‌های $C1$ و $C2$ به ترتیب بیانگر این هستند که به هر کاربر تنها یک زیرکانال می‌توان تخصیص داد و هر زیرکانال تنها به یک کاربر می‌تواند تخصیص یابد.

مسئله (۱۰) یک مسئله انتساب است لذا می‌توان برای حل آن از الگوریتم مجارستانی که یک الگوریتم بهینه برای مسئله انتساب است استفاده نماییم. در الگوریتم مجارستانی تعدادی منابع به نحوی به تعدادی شغل نسبت داده می‌شوند که کمترین هزینه ممکن برای انجام همه شغل‌ها صرف شود. در واقع هر شغل برای انجام به تعدادی منابع نیاز دارد که هر منبع هزینه‌ای دارد، لذا هدف این الگوریتم یافتن یک تناسب بهینه بین شغل‌ها و منابع است که با استفاده از منابع همه شغل‌ها با کمترین هزینه انجام شوند. در این الگوریتم، تعداد مشخصی شغل، منابع و یک ماتریس هزینه به عنوان ورودی الگوریتم داده می‌شود. ماتریس هزینه به تعداد شغل‌ها دارای سطر و به تعداد منابع دارای ستون است که در آن درایه سطر i و ستون j هزینه انجام z از امین کار توسط i امین منبع است. خروجی این الگوریتم یک ماتریس باینری است که تخصیص منابع به شغل‌ها را به نحوی که مجموع هزینه‌ها کمینه شود مشخص می‌کند [۱۸]. برای حل مسئله (۱۰) با الگوریتم مجارستانی، زیرکانال‌های در دسترس به عنوان منابع، کاربران به عنوان شغل و $g_{B,m}^n$ به عنوان ماتریس هزینه فرض می‌گردند. این الگوریتم به نحوی زیرکانال‌ها را تخصیص می‌دهد که مجموع بهره مسیر کاربران ماکروسول بیشینه گردد. در انتها میزان آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل کاربران ماکروسول بر اساس (۹) به دست می‌آید.

۴-۱-۲ روش پیشنهادی برای حل مسئله ۲ در سطح ماکروسول

به صورت کلی مسئله (۷) یک مسئله MINLP و غیر محدب است و بر همین اساس روش حل این مسئله در دو مرحله صورت می‌پذیرد. ابتدا

فمتوسل نباید مانع رسیدن کاربران ماکروسول به حداقل نرخ داده مورد نیاز آنان شوند. در واقع با تعیین آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل برای کاربران ماکروسول، فرض می‌شود با یک مسئله امکان‌پذیر مواجه هستیم. مسئله مورد نظر با هدف بیشینه‌کردن مجموع نرخ داده کاربران فمتوسل به نحوی که کاربران حساس به تأخیر به حداقل نرخ داده خود دست یابند، بدین صورت تعریف می‌گردد

$$\begin{aligned} & \max_{\{a_{k,f}^n, p_{k,f}^n\}} \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N a_{k,f}^n R_{k,f}^n \\ & \text{Subject to} \\ & C1: \sum_{n=1}^N R_{k,f}^n \geq R_{k,f}^{min}, \forall f \in DS_k, k \in K \\ & C2: \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N p_{k,f}^n \leq P_{k,max}, \forall k \in K \\ & C3: \sum_{f=1}^F a_{k,f}^n \leq 1, \forall k \in K, n \in N \\ & C4: a_{B,m}^n \left(\sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F a_{k,f}^n p_{k,f}^n g_{k,m}^n \right) \leq a_{B,m}^n \bar{I}_m^n, \forall n \in N \\ & C5: a_{k,f}^n \in \{0, 1\}, \forall k \in K, f \in F_k, n \in N \\ & C6: p_{k,f}^n \geq 0, \forall k \in K, f \in F_k, n \in N \end{aligned} \quad (8)$$

محدودیت $C1$ بیانگر دستیابی کاربران حساس به تأخیر فمتوسل به حداقل نرخ داده مورد نیاز خود است. محدودیت $C2$ به کمترین بودن مجموع توان ارسالی فمتوسل از مقدار بیشینه آن اشاره می‌کند. محدودیت $C3$ بیانگر این است که هر زیرکانال تنها به یک کاربر فمتوسل تخصیص می‌یابد. در صورت عدم تخصیص هر یک از زیرکانال‌ها، توان ارسالی آن بر اساس محدودیت $C4$ صفر در نظر گرفته می‌شود. بر اساس محدودیت $C5$ در صورت تخصیص زیرکانال مشترک باید آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل برای کاربران ماکروسول از طرف کاربران فمتوسل رعایت گردد. محدودیت $C6$ نیز به باینری بودن تخصیص زیرکانال و غیر منفی بودن توان ارسالی فمتوسل اشاره می‌کند.

۴-۲ الگوریتم‌های پیشنهادی کنترل توان و تخصیص زیرکانال برای مسایل بیان شده

همان طور که در بخش ۳ بیان شد، مسئله مورد نظر در دو سطح ماکروسول و فمتوسل بیان گردید. در این بخش روش‌های پیشنهادی برای حل این مسایل ارائه می‌دهیم.

۴-۱-۱ روش‌های پیشنهادی برای حل مسئله در سطح ماکروسول

در بخش ۳ در سطح ماکروسول دو مسئله متفاوت و جداگانه بیان نمودیم. حال به بیان روش حل برای هر یک از این مسایل می‌پردازیم.

۴-۱-۱-۱ روش پیشنهادی برای حل مسئله ۱ در سطح ماکروسول

به صورت کلی مسئله (۶) یک مسئله MINLP و غیر محدب است و دستیابی به یک جواب بهینه برای این مسئله مشکل است. لذا فرض می‌کنیم مسئله (۶) امکان‌پذیر است و هر یک از کاربران ماکروسول با تخصیص تنها یک زیرکانال به نرخ داده‌ای مساوی با حداقل نرخ داده مورد نیاز خود دست می‌یابد [۱۷]. این فرض بدان جهت است که در صورت تخصیص زیرکانال مشترک بین کاربران ماکروسول و کاربران فمتوسل، کاربران فمتوسل باید آستانه تداخل قابل تحمل کاربران

Algorithm 2- Bisection method to find optimal I_{th}

- 1: Macrocell initialize $I_{th,L}, I_{th,H}$ and δ
- 2: While $\left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{B,m}^n p_{B,m}^n - p_{B,max} \right| > \delta$ do
- 3: $I_{th,M} = (I_{th,L} + I_{th,H})/2$
- 4: Macrocell solves the optimization problem in (10)
- 5: If $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{B,m}^n p_{B,m}^n > p_{B,max}$ then $I_{th,H} = I_{th,M}$
- 6: else If $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{B,m}^n p_{B,m}^n \leq p_{B,max}$ then
- 7: $I_{th,L} = I_{th,M}$
- 8: End if
- 9: End while

شکل ۲: روش Bisection برای یافتن مقدار بهینه I_{th}

تعیین شده، مقدار آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل کاربران بر اساس روش Bisection که یک روش بهینه است، تعیین می‌شود که به صورت خلاصه در شکل ۲ بیان شده است [۲۰]

$$\min_{\{p_{B,m}^n\}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N p_{B,m}^n$$

Subject to

$$C1: \sum_{n=1}^N \log_r \left(1 + \frac{p_{B,m}^n g_{B,m}^n}{I_m^n + \sigma^r} \right) \geq R_m^{\min}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (11)$$

$$C2: p_{B,m}^n \geq 0, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}$$

مسئله (۱۱) یک مسئله بهینه‌سازی محدب است و برای حل آن از روش دوگان لاگرانژ استفاده می‌گردد [۲۱]. در این مسئله مقدار \bar{I}_m^n را برابر با یک مقدار یکسان مانند I_{th} ($\bar{I}_m^n = I_{th}$) فرض می‌کنیم. همچنین $I_{th,L}$ و $I_{th,H}$ به ترتیب یک حد پایین و بالا برای I_{th} هستند. در نهایت میزان $I_{th,M}$ مقدار بهینه آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل کاربران ماکروسول است.

۴-۲ روش‌های پیشنهادی برای حل مسئله در سطح فمتوسل

به صورت کلی مسئله (۸) یک مسئله MINLP و غیر محدب است. حل این مسئله بدین صورت است که ابتدا با استفاده از تکنیک جداسازی مسئله (۸) را به دو زیرمسئله تقسیم می‌کنیم.

۴-۲-۱ تخصیص زیرکانال در سطح فمتوسل

تخصیص زیرکانال برای کاربران فمتوسل در راستای تابع هدف مسئله که بیشینه‌کردن مجموع نرخ داده کاربران است بر مبنای معیار $(p_{B,m}^n g_{B,f}^n + \sigma^r)/g_{k,f}^n$ انجام می‌گردد. در واقع برای یک کاربر در یک زیرکانال هرچه میزان بهره مسیر بیشتر و میزان تداخل کمتر باشد، بر اساس رابطه شانون کاربر می‌تواند به نرخ داده بیشتری دست یابد.

تخصیص زیرکانال بدین صورت انجام می‌پذیرد که ابتدا به صورت ترتیبی به هر یک از کاربران حساس به تأخیر زیرکانالی که دارای کمترین مقدار تداخل مؤثر بر اساس معیار $(p_{B,m}^n g_{B,f}^n + \sigma^r)/g_{k,f}^n$ باشد تخصیص می‌یابد. بر اساس این معیار زیرکانالی به کاربر تخصیص داده می‌شود که دارای بیشترین بهره مسیر و کمترین میزان تداخل از سوی کاربران ماکروسول باشد. این کار تا زمانی که همه کاربران حساس به

Algorithm 1- Sub-channel allocation in the macrocell

- 1: Initialize $R_{B,m}^n = 0, a_{B,m}^n = 0, \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}$
- 2: Phase 1
- 3: For each macrocell user
- 4: $(n^*, m^*) = \arg \max_{m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}} g_{B,m}^n$
- 5: Set $a_{B,m^*}^{n^*} = 1, \mathcal{N} = \mathcal{N} - \{n^*\}, R_{B,m^*}^{n^*} = R_{B,m^*}^{n^*} + R_{B,m^*}^{n^*}$
- 6: If $R_{B,m^*}^{n^*} \geq R_{B,m^*}^{\min}$ then $\mathcal{M} = \mathcal{M} - \{m^*\}$
- 7: End If
- 8: End For
- 9: Phase 2
- 10: While $\mathcal{M} \neq \emptyset$ do
- 11: $m^* = \arg \max_{m \in \mathcal{M}_t} R_{ach,m}$
- 12: $n^* = \arg \max_{n \in \mathcal{N}} g_{B,m^*}^{n^*}$
- 13: Set $a_{B,m^*}^{n^*} = 1, \mathcal{N} = \mathcal{N} - \{n^*\}, R_{B,m^*}^{n^*} = R_{B,m^*}^{n^*} + R_{B,m^*}^{n^*}$
- 14: If $R_{B,m^*}^{n^*} \geq R_{B,m^*}^{\min}$ then $\mathcal{M} = \mathcal{M} - \{m^*\}$
- 15: End If
- 16: End While

شکل ۱: الگوریتم تخصیص زیرکانال در سطح ماکروسول.

تخصیص زیرکانال و سپس توان ارسالی ماکروسول و میزان آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل کاربران ماکروسول تعیین می‌گردد. **تخصیص زیرکانال کاربران ماکروسول:** تخصیص زیرکانال برای کاربران ماکروسول در راستای تابع هدف مسئله که کمینه‌کردن مجموع توان ارسالی است بر مبنای بهره مسیر انجام می‌گردد. در واقع با توجه به این که هرچه میزان بهره مسیر کاربری بیشتر باشد، مقدار توان ارسالی ماکروسول برای کاربر کمتر است، تخصیص زیرکانال بر مبنای بهره مسیر انجام می‌گردد [۱۹]. نحوه تخصیص زیرکانال بدین صورت است که ابتدا برای هر کاربر ماکروسول، زیرکانالی را که کاربر در آن دارای بیشترین مقدار $g_{B,m}^n$ است مشخص می‌شود. حال از بین کاربران، کاربر ماکروسولی که بیشترین مقدار $g_{B,m}^n$ در زیرکانال مشخص شده در مرحله قبل را دارد، تعیین و زیرکانال مورد نظر تخصیص می‌یابد. این روند تا زمانی که به همه کاربران ماکروسول یک زیرکانال تخصیص داده شود، ادامه می‌یابد. "سپس برای رعایت قید دستیابی همه کاربران ماکروسول به حداقل نرخ داده مورد نظر خود، از میان زیرکانال‌های در دسترس باقی مانده، به کاربری که هنوز به حداقل نرخ دلخواه خود نرسیده و دارای کمترین مقدار نرخ داده است، بر اساس سطور ۱۲ و ۱۳ شکل ۱ بهترین زیرکانال تعیین و تخصیص می‌یابد. این کار تا زمانی که زیرکانال در دسترس باقی بماند، تکرار می‌گردد. در این الگوریتم آستانه تداخل کاربران و توان ارسالی در زیرکانال‌ها به صورت یکسان است. روش تخصیص زیرکانال به صورت خلاصه در شکل ۱ است. در این الگوریتم آستانه تداخل کاربران و توان ارسالی در زیرکانال‌ها به صورت یکسان است.

تخصیص توان ارسالی و آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل کاربران ماکروسول: بر اساس تخصیص زیرکانال انجام شده، ابتدا مسئله (۱۱) را با هدف کمینه‌کردن مجموع توان ارسالی ماکروسول برای تعیین توان ارسالی ماکروسول تعریف می‌نماییم. سپس بر اساس توان ارسالی

$$\begin{aligned} & \min g(\lambda, \nu, \mu) \\ & \text{Subject to} \\ & \lambda, \nu, \mu \geq 0 \end{aligned} \quad (۱۶)$$

حال بر اساس شرایط KKT، اگر جواب بهینه (۱۵) را با $\{\hat{S}_{k,f}^n\}$ نشان دهیم داریم

$$\frac{\partial L_{k,n}(\{S_{k,f}^n\}, \lambda, \nu, \mu)}{\partial \hat{S}_{k,f}^n} = \frac{1}{\ln 2} \frac{(1 + \nu_{k,f}) a_{k,f}^n g_{k,f}^n}{\hat{S}_{k,f}^n g_{k,f}^n + a_{k,f}^n L_{k,f}^n} - \lambda_k - \mu_n g_{k,m}^n, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \quad (۱۷)$$

با مساوی صفر قرار دادن (۱۷)، توان ارسالی بهینه تخصیص داده شده به کاربر f فمتوسل k و در زیرکانال n به ترتیب برای کاربران DS و DT از طریق (۱۸) و (۱۹) به دست می‌آیند

$$\hat{p}_{k,f}^n = \frac{\hat{S}_{k,f}^n}{a_{k,f}^n} = \left(\frac{1}{\ln 2} \frac{1 + \nu_{k,f}}{\lambda_k + \mu_n g_{k,m}^n} - \frac{L_{k,f}^n}{g_{k,f}^n} \right)^+, \quad \forall f \in DS_k, k \in \mathcal{K} \quad (۱۸)$$

$$\hat{p}_{k,f}^n = \frac{\hat{S}_{k,f}^n}{a_{k,f}^n} = \left(\frac{1}{\ln 2} \frac{1}{\lambda_k + \mu_n g_{k,m}^n} - \frac{L_{k,f}^n}{g_{k,f}^n} \right)^+, \quad \forall f \in DT_k, k \in \mathcal{K} \quad (۱۹)$$

که $(x)^+ = \max(0, x)$ است با استفاده از روش Subgradient به روزرسانی ضرایب لاگرانژ از طریق (۲۰) تا (۲۲) به دست می‌آیند

$$\lambda_k^{(i+1)} = [\lambda_k^{(i)} - \beta_\lambda^{(i)} (P_{k,\max} - \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F S_{k,f}^n)]^+, \forall k \in \mathcal{K} \quad (۲۰)$$

$$\nu_{k,f}^{(i+1)} = [\nu_{k,f}^{(i)} - \beta_\nu^{(i)} (\sum_{n=1}^N C_{k,f}^n - R_f^{\min})]^+, \quad \forall k \in \mathcal{K}, f \in DS_k \quad (۲۱)$$

$$\mu_n^{(i+1)} = [\mu_n^{(i)} - \beta_\mu^{(i)} (\bar{I}_m^n - \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F S_{k,f}^n g_{k,m}^n)]^+, \forall n \in \mathcal{N} \quad (۲۲)$$

متغیرهای $\beta_\lambda^{(i)}$ ، $\beta_\nu^{(i)}$ و $\beta_\mu^{(i)}$ مقادیر اندازه گام در هر تکرار هستند و داریم

$$\sum_{i=1}^{\infty} \beta_\lambda^{(i)} = \infty, \lim_{i \rightarrow \infty} \beta_\lambda^{(i)} = 0, \forall l \in \{\lambda, \nu, \mu\} \quad (۲۳)$$

به صورت خلاصه الگوریتم مورد استفاده برای تخصیص زیرکانال و کنترل توان در شکل ۳ آمده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش ابتدا به بیان پارامترهای شبیه‌سازی و سپس در بخش دوم به مقایسه الگوریتم‌های پیشنهادی خود با الگوریتم [۱۲] می‌پردازیم. در سطح ماکروسول دو مسئله جداگانه و متفاوت مطرح نمودیم و برای هر یک الگوریتم‌های حل جداگانه ارائه کردیم. الگوریتم پیشنهادی A مربوط به مسئله اول با هدف بیشینه‌نمودن مجموع آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل کاربران ماکروسول و الگوریتم پیشنهادی B مربوط به مسئله دوم با هدف کمینه‌کردن مجموع توان ارسالی ماکروسول است.

تأخیر به حداقل نرخ داده مورد نظر خود دست یابند ادامه می‌یابد. بدین ترتیب دستیابی کاربران حساس به تأخیر به حداقل نرخ داده مورد نظر تضمین می‌گردد. سپس با هدف بیشتر شدن مجموع نرخ داده همه کاربران، زیرکانال‌های در دسترس باقیمانده بدین صورت تخصیص می‌یابد که زیرکانالی به کاربری تخصیص داده می‌شود که دارای کمترین مقدار تداخل مؤثر است. این کار تا زمانی که زیرکانالی در دسترس باشد ادامه می‌یابد.

۴-۲-۲-۴ تخصیص توان ارسالی در سطح فمتوسل

برای تخصیص توان ارسالی فمتوسل ابتدا تغییر متغیرهای (۱۲) را در نظر می‌گیریم

$$\begin{aligned} s_{k,f}^n &= a_{k,f}^n p_{k,f}^n \\ L_{k,f}^n &= p_{B,m}^n g_{B,f}^n + \sigma^2 \\ C_{k,f}^n &= \log_2 \left(1 + \frac{s_{k,f}^n g_{k,f}^n}{a_{k,f}^n L_{k,f}^n} \right) \end{aligned} \quad (۱۲)$$

سپس با در نظر گرفتن تخصیص زیرکانال انجام‌شده، مسئله (۸) را با استفاده از تغییر متغیرهای در نظر گرفته شده بازنویسی می‌کنیم

$$\begin{aligned} & \max_{\{p_{k,f}^n\}} \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N a_{k,f}^n C_{k,f}^n \\ & \text{Subject to} \\ & C1: \sum_{n=1}^N a_{k,f}^n C_{k,f}^n \geq R_{k,f}^{\min}, \forall f \in DS_k, k \in \mathcal{K} \\ & C2: \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N S_{k,f}^n \leq P_{k,\max}, \forall k \in \mathcal{K} \end{aligned} \quad (۱۳)$$

$$C3: a_{B,m}^n \left(\sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F S_{k,f}^n g_{k,m}^n \right) \leq a_{B,m}^n \bar{I}_m^n, \forall n \in \mathcal{N}$$

$$C4: S_{k,f}^n \geq 0, \forall k \in \mathcal{K}, f \in \mathcal{F}_k, n \in \mathcal{N}$$

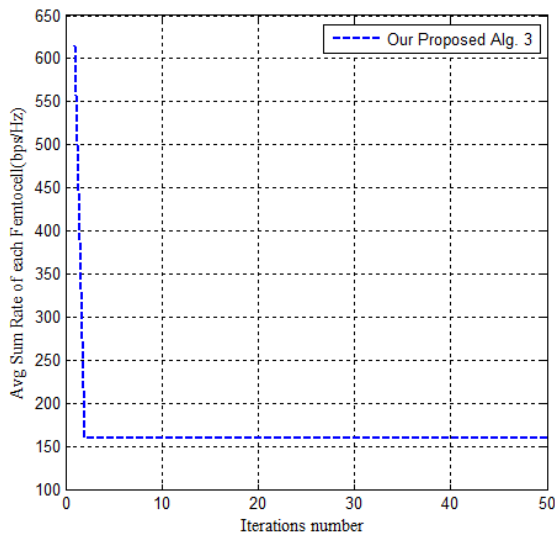
مسئله (۱۳) یک مسئله محدب است چرا که تابع هدف آن یک تابع مقعر و فضای جواب آن یک مجموعه محدب است. بدین ترتیب می‌توانیم با استفاده از روش‌های حل مسایل بهینه‌سازی محدب مسئله مورد نظر را حل نماییم. حال با بهره‌گیری از روش دوگان لاگرانژ مسئله محدب (۱۳) را حل می‌نماییم [۲۲] و [۲۳]. برای حل ابتدا تابع لاگرانژ این مسئله را به دست می‌آوریم و سپس مسئله دوگان آن را بیان می‌نماییم

$$\begin{aligned} L(\{S_{k,f}^n\}, \lambda, \nu, \mu) &= \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N a_{k,f}^n C_{k,f}^n + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F \lambda_k (P_{k,\max} - \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N S_{k,f}^n) + \\ & \sum_{n=1}^N \mu_n (\bar{I}_m^n - \sum_{k=1}^K \sum_{f=1}^F S_{k,f}^n g_{k,m}^n) + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{f \in DS_k} \nu_{k,f} \left(\sum_{n=1}^N a_{k,f}^n C_{k,f}^n - R_{k,f}^{\min} \right) \end{aligned} \quad (۱۴)$$

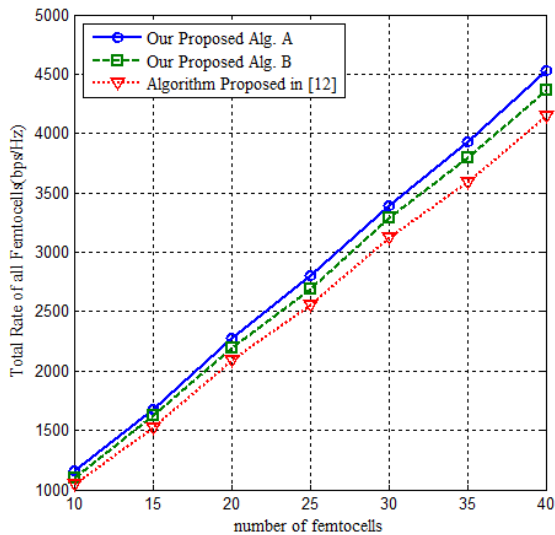
در این رابطه متغیرهای λ ، ν و μ ضرایب لاگرانژ هستند. تابع مسئله دوگان لاگرانژ بدین صورت است

$$g(\lambda, \nu, \mu) = \max_{\{S_{k,f}^n\}} L(\{S_{k,f}^n\}, \lambda, \nu, \mu) \quad (۱۵)$$

همچنین مسئله دوگان بدین صورت تعریف می‌گردد



شکل ۴: همگرایی میانگین مجموع نرخ داده کاربران به ازای هر فمتوسل به هر تکرار برای الگوریتم ۳.



شکل ۵: مجموع نرخ داده همه کاربران بر حسب تعداد فمتوسل‌ها.

$$PL_{i,j} = 28.1 + 36.6 \times \log_{10} d_{i,j} + \log_{10} \frac{fc}{2.5} \quad (24)$$

که در آن $d_{i,j}$ فاصله بین سلول سرویس‌دهنده i و کاربر j و fc فرکانس حامل است. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۱ بیان شده است.

۵-۲ نتایج عددی

در شکل ۴ تعداد فمتوسل‌ها ۱۰ و حداقل نرخ داده کاربران حساس به تأخیر فمتوسل‌ها برابر با ۱۰ bps/Hz است. در این نمودار همگرایی میانگین مجموع نرخ داده کاربران فمتوسل‌ها به ازای هر فمتوسل بر حسب تکرار را برای الگوریتم ۳ نشان می‌دهیم.

در شکل‌های ۵ و ۶ حداقل نرخ داده کاربران حساس به تأخیر ۱۰ bps/Hz و تعداد فمتوسل‌ها ۱۰ الی ۴۰ در نظر گرفته شده است. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نسبت مجموع نرخ داده همه کاربران فمتوسل‌ها و کاربران DS فمتوسل‌ها بر حسب افزایش تعداد فمتوسل‌ها را برای الگوریتم‌های پیشنهادی A، B و ارائه شده در [۱۲] نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد فمتوسل‌ها مجموع نرخ داده نیز افزایش یافته است. دلیل این افزایش مجموع نرخ داده،

Algorithm 3- Resource allocation in the femtocell

Sub-channel Assignment with QoS Guarantee

- 1: Allocate the same power to each sub-channel
 $a_{k,f}^n = 0, \forall k \in \mathcal{K}, f \in \mathcal{F}, n \in \mathcal{N}$
- 2: For each Femtocell do
- 3: While $DS_k \neq \emptyset$ do $n^* = \arg \min_{n \in \mathcal{N}} L_{k,f}^n / g_{k,f}^n$
- 4: Set $a_{k,f}^{n^*} = 1, \mathcal{N} = \mathcal{N} - \{n^*\}$
- 5: If $\sum_{n=1}^N a_{k,f}^n R_{k,f}^n - R_{k,f}^{\min} : f \in DS_k$ then
 $DS_k = DS_k - \{f\}$
- 6: End if
- 7: End while
- 8: While $N \neq 0$ do
- 9: $f^*, n^* = \arg \min_{f \in \mathcal{F}, n \in \mathcal{N}} L_{k,f}^n / g_{k,f}^n$ Set $a_{k,f}^{n^*} = 1$
- 10: End while
- 11: End for

Optimal Power Allocation under Interference Constraint

- 12: Initialize Itr_{max} and Lagrangian variables vectors
 λ, ν, μ and set $i=0$
- 13: Repeat
- 14: For each FBS do
- 15: For $n=1$ to N do
- 16: DS users update $p_{k,f}^n$ according to (18)
- 17: DT users update $p_{k,f}^n$ according to (19)
- 18: FBS update ν according to (21)
- 19: End for
- 20: FBS update λ according to (20)
- 21: End for
- 22: MBS updates μ according to (22), $i = i + 1$
- 23: Until Convergence or $i = Itr_{max}$

شکل ۳: الگوریتم تخصیص زیرکانال و کنترل توان در سطح فمتوسل.

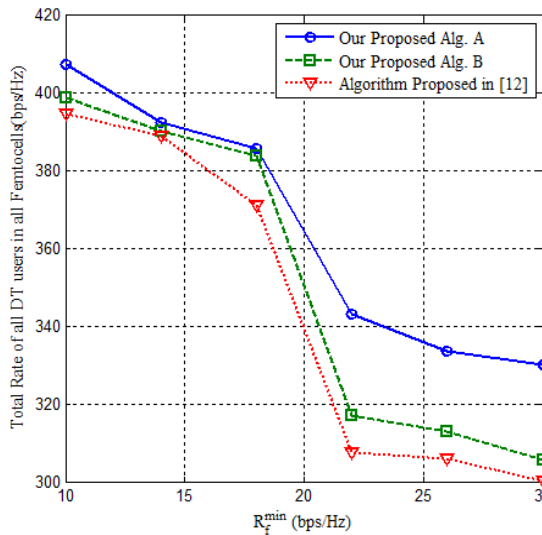
جدول ۱: پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی.

پارامتر	مقدار
M	۸
F	۵
N	۱۰
$P_{B,max}$	۲۰ w
$P_{k,max}$	۲ w
N_c	-۱۷۴ dBm/Hz
r_B	۵۰۰ m
r_k	۱۵ m
R_m	۵ bps/Hz
I_{max}	۱ w
fc	۲/۵ GHz

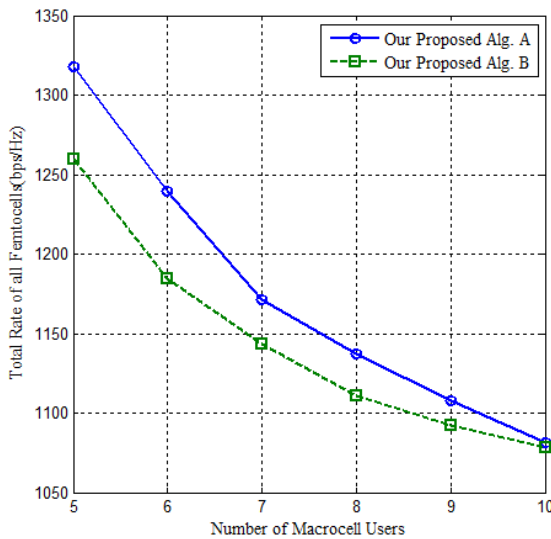
۱-۵ پارامترها

برای ارزیابی روش پیشنهادی، برای محاسبه تضعیف مسیر^۱ بین ایستگاه کاری i و کاربر j از (۲۴) استفاده می‌گردد

1. Path-Loss



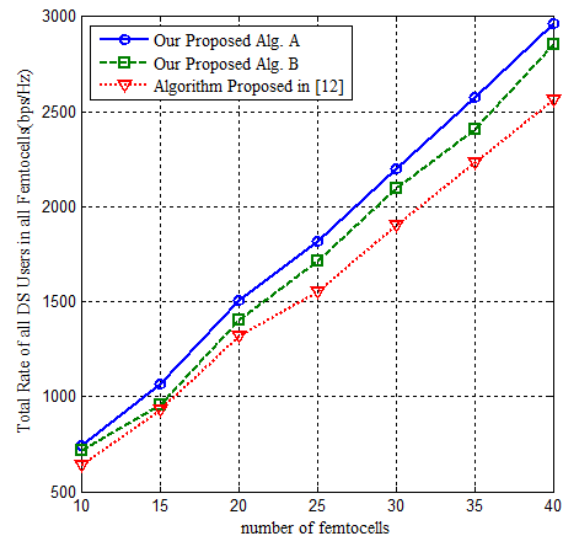
شکل ۸: مجموع نرخ داده همه کاربران DT بر حسب حداقل نرخ داده کاربران حساس به تأخیر.



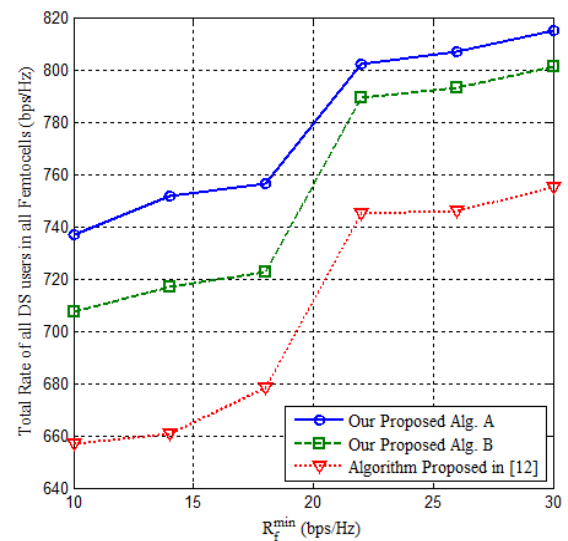
شکل ۹: مجموع نرخ داده کاربران فمتوسلها بر حسب کاربران ماکروسل.

توجه به رعایت محدودیت حداکثر توان ارسال فمتوسلها، توان ارسال کمتری به کاربران DT تخصیص داده می‌گردد و شاهد کاهش مجموع نرخ داده این کاربران هستیم. همان طور که نشان داده شده است مجموع نرخ داده کاربران فمتوسل در هر دو الگوریتم پیشنهادی A و B نسبت به الگوریتم پیشنهادی ارائه شده در [۱۲] بیشتر است. همچنین الگوریتم پیشنهادی A نسبت به الگوریتم پیشنهادی B مجموع نرخ داده بیشتری را برای کاربران فمتوسل نشان می‌دهد.

در شکل‌های ۹ تا ۱۱ حداقل نرخ داده کاربران حساس به تأخیر و تعداد فمتوسلها به ترتیب ۱۰ bps/Hz و ۱۰ و ۱۰ و تعداد کاربران ماکروسل ۵ الی ۱۰ در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۹ تا ۱۱ به ترتیب نسبت مجموع نرخ داده همه کاربران فمتوسلها، کاربران DS فمتوسلها و کاربران DT فمتوسلها بر حسب افزایش تعداد کاربران ماکروسل برای الگوریتم پیشنهادی A و B نشان داده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد کاربران ماکروسل مجموع نرخ کاربران فمتوسل کاهش یافته و دلیل این کاهش اولویت بالاتر کاربران ماکروسل نسبت به کاربران فمتوسل است. در واقع با افزایش کاربران ماکروسل، رعایت آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل کاربران فمتوسل از طرف کاربران فمتوسل باید برای تعداد بیشتری از کاربران ماکروسل رعایت گردد که



شکل ۶: مجموع نرخ داده همه کاربران DS بر حسب تعداد فمتوسلها.



شکل ۷: مجموع نرخ داده همه کاربران DS بر حسب حداقل نرخ داده کاربران حساس به تأخیر.

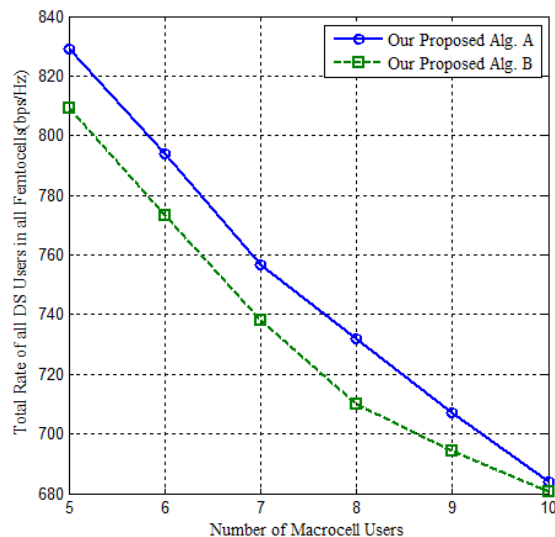
بیشتر شدن تعداد کاربران است. نکته مهم در افزایش تعداد کاربران ثابت ماندن تعداد زیرکانالهای در دسترس است که باعث افزایش استفاده مجدد از زیرکانالهای در دسترس می‌گردد. همان طور که مشاهده می‌شود مجموع نرخ داده کاربران فمتوسل در هر دو الگوریتم پیشنهادی A و B نسبت به الگوریتم پیشنهادی ارائه شده در [۱۲] بیشتر است. همچنین الگوریتم پیشنهادی A نسبت به الگوریتم پیشنهادی B مجموع نرخ داده بیشتری را برای کاربران فمتوسل نشان می‌دهد.

در شکل‌های ۷ و ۸ تعداد فمتوسلها ۱۰ و حداقل نرخ داده مورد نیاز برای کاربران فمتوسلها ۱۰ bps/Hz الی ۳۰ bps/Hz در نظر گرفته شده است. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نسبت مجموع نرخ داده کاربران DS و کاربران DT فمتوسلها را بر حسب افزایش حداقل نرخ داده کاربران حساس به تأخیر برای الگوریتمهای پیشنهادی A، B و ارائه شده در [۱۲] نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش حداقل نرخ داده، مجموع نرخ داده برای کاربران حساس به تأخیر افزایش یافته است ولی مجموع نرخ داده برای کاربران DT کاهش یافته که این بدین دلیل است که کاربران DS دارای اولویت بالاتری نسبت به کاربران DT هستند. در واقع با افزایش حداقل نرخ داده کاربران DS، برای دستیابی به این حداقل نرخ داده باید توان ارسال بیشتری تخصیص داده شود که با

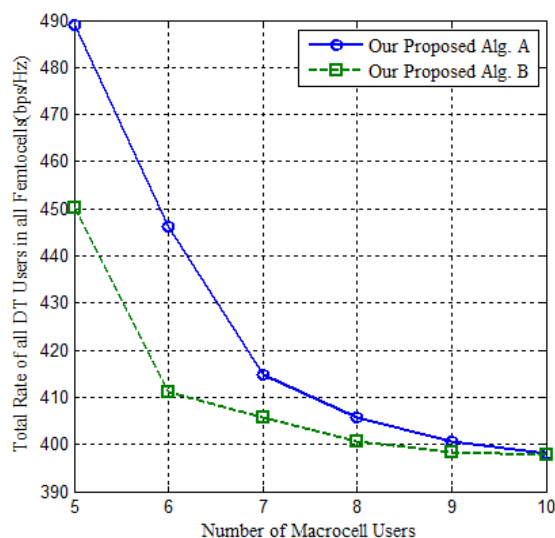
نظر بهبود مجموع نرخ داده کاربران فمتوسل و ارضای قید رعایت حداقل نرخ داده کاربران ماکروسول و کاربران حساس به تأخیر فمتوسل‌ها، از الگوریتم‌های موجود برتر است.

مراجع

- [1] R. Wang, H. Hu, and X. Yang, "Potentials and challenges of C-RAN supporting multi-RATs toward 5G mobile networks," *IEEE Access* vol. 2, pp. 1187-1195, 2014.
- [2] A. Abdelnasser and E. Hossain, "Two-tier OFDMA cellular cloud-RAN: joint resource allocation and admission control," in *Proc. IEEE Global Communications Conf., GLOBECOM'15*, 7 pp., San Diego, CA, USA, 6-10 Dec. 2015.
- [3] M. Adedoyin and O. Falowo, "Self-organizing radio resource management for next generation heterogeneous wireless networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications. ICC'16*, 6 pp., Kuala Lumpur, Malaysia, 22-27 May 2016.
- [4] A. Checko, *et al.*, "Cloud RAN for mobile networks-a technology overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 405-426, Firstquarter 2015.
- [5] E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, J. Peisa, J. Sachs, and Y. Seln, "5G radio access," *Ericsson Review*, Jun. 2014.
- [6] V. Chandrasekhar and J. G. Andrews, "Femtocell networks: a survey," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 9, pp. 59-67, Sep. 2008.
- [7] D. Fooladivanda and R. Catherine, "Joint resource allocation and user association for heterogeneous wireless cellular networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 12, no. 1, pp. 248-257, Jan. 2013.
- [8] M. Peng, Y. Li, J. Jiang, J. Li, and C. Wang, "Heterogeneous cloud radio access networks: a new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 126-135, Dec. 2014.
- [9] J. Kim and C. D. Ho, "A joint power and subchannel allocation scheme maximizing system capacity in indoor dense mobile communication systems," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 9, pp. 4340-4353, Nov. 2010.
- [10] V. N. Ha and B. L. Long, "Fair resource allocation for OFDMA femtocell networks with macrocell protection," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 3, pp. 1388-1401, Mar. 2014.
- [11] A. Abdelnasser, E. Hossain, and D. Kim, "Clustering and resource allocation for dense femtocells in a two-tier cellular OFDMA network," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 13, no. 3, pp. 1628-1641, Mar. 2014.
- [12] H. Zhang, C. Jiang, N. C. Beaulieu, X. Chu, X. Wen, and M. Tao, "Resource allocation in spectrum-sharing OFDMA femtocells with heterogeneous services," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 62, no. 7, pp. 2366-2377, Jul. 2014.
- [13] Y. Xu, Y. Hu, Q. Chen, R. Chai, and G. Li, "Distributed resource allocation for cognitive HetNets with cross-tier interference constraint," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf., WCNC'17*, 6 pp., San Francisco, CA, USA, 19-22 Mar. 2017.
- [14] L. Giupponi and C. Ibars, "Distributed interference control in ofdmabased femtocells," in *Proc. 21st Annual IEEE Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications PIMRC'10*, pp. 1201-1206, Istanbul, Turkey, 26-30 Sept. 2010.
- [15] N. Lu, Y. Jiang, F. Zheng, and X. You, "Energy efficient power control for the two-tier networks with small cells and massive MIMO," in *Proc. Wireless Communications and Networking Conf. WCNC'16*, pp. 127-132, Doha, Qatar, 3-6 Apr. 2016.
- [16] D. T. Ngo, S. Khakurel, and T. Le-Ngoc, "Joint subchannel assignment and power allocation for OFDMA femtocell networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 342-355, Jan. 2014.
- [17] A. Abdelnasser, E. Hossain, and D. Kim, "Tier-aware resource allocation in ofdma macrocell-small cell networks," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 63, no. 3, pp. 695-710, Mar. 2015.
- [18] W. L. Winston, *Operations Research: Applications and Algorithms*, Cengage Learning, 2003.
- [19] A. Abdelnasser and E. Hossain, "Resource allocation for an OFDMA cloud-RAN of small cells overlaying a macrocell," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 15, no. 11, pp. 2837-2850, Nov. 2016.
- [20] R. Byers, "A bisection method for measuring the distance of a stable matrix to the unstable matrices," *SIAM J. on Scientific and Statistical Computing*, vol. 9, no. 5, pp. 875-881, 1988.
- [21] K. Seong, M. Mohseni, and J. Cioffi, "Optimal resource allocation for OFDMA downlink systems," in *Proc. IEEE Int. Symp. on*



شکل ۱۰: مجموع نرخ داده کاربران DS بر حسب کاربران ماکروسول.



شکل ۱۱: مجموع نرخ داده کاربران DT بر حسب کاربران ماکروسول.

همین مسئله باعث کاهش توان ارسالی فمتوسل در زیرکانال‌های مشترک با ماکروسول می‌شود. همچنین همان‌طور که نشان داده شده است الگوریتم پیشنهادی A نسبت به الگوریتم پیشنهادی B مجموع نرخ داده بیشتری را برای کاربران فمتوسل نشان می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله کنترل توان و تخصیص زیرکانال با هدف بیشینه‌کردن مجموع نرخ کاربران فمتوسل به نحوی که حداقل کیفیت سرویس برای همه کاربران ماکروسول و کاربران حساس به تأخیر فمتوسل‌ها رعایت گردد، برای شبکه‌های سلولی بی‌سیم چندسطحی مبتنی بر OFDMA ارائه گردید. ابتدا در سطح ماکروسول دو مسئله متفاوت را به صورت جداگانه در نظر گرفتیم. مسئله اول با هدف بیشینه‌نمودن مجموع آستانه تداخل بین سطحی قابل تحمل کاربران ماکروسول و مسئله دوم با هدف کمینه‌کردن مجموع توان ارسالی ماکروسول بیان شد. سپس در سطح فمتوسل مسئله‌ای با هدف بیشینه‌نمودن مجموع نرخ همه کاربران فمتوسل‌ها ارائه گردید. به صورت مشابه در هر دو سطح با توجه به غیرمحدب بودن مسائل تعریف شده، با استفاده از تکنیک جداسازی مسایل به زیرمسایلی تجزیه و روشی برای حل آنان بیان گردید. در انتها نیز بر اساس نتایج شبیه‌سازی نشان دادیم که روش پیشنهادی از

مهدی راستی مدرک کارشناسی خود را از دانشگاه شیراز و مدرک کارشناسی ارشد و دکترای خود را از دانشگاه تربیت مدرس به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۷ در رشته مهندسی برق اخذ کرده است. وی در یک بازه یک‌ساله در بخش شبکه‌های بی‌سیم دانشگاه KTH سوئد و یک بازه شش‌ماهه در دانشگاه Manitoba کانادا به‌عنوان فرصت مطالعاتی حضور داشته است. پس از اتمام تحصیلات، به مدت دو سال در دانشگاه شیراز به تدریس مشغول شده و سپس در سال ۱۳۹۲ به دانشگاه صنعتی امیرکبیر پیوسته و هم‌اکنون عضو هیأت‌علمی این دانشگاه است. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل تخصیص منابع در شبکه‌های بی‌سیم و نسل ۵ شبکه‌های بی‌سیم می‌باشد.

Information Theory, pp. 1394-1398, Seattle, WA, USA, 9-14 Jul. 2006.

[22] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge, U. K.: Cambridge Univ. Press, 2004.

[23] D. W. K. Ng and R. Schober, "Resource allocation and scheduling in multi-cell ofdma systems with decode-and-forward relaying," *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 10, no. 7, pp. 2246-2258, Jul. 2011.

حسین داودی در سال ۱۳۹۳ مدرک کارشناسی مهندسی فناوری اطلاعات خود را از دانشگاه اصفهان و در سال ۱۳۹۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات گرایش شبکه‌های کامپیوتری خود را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر دریافت نمود. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل موضوعاتی مانند تکنولوژی‌های مطرح در نسل ۵ شبکه‌های بی‌سیم، تخصیص منابع در شبکه‌های بی‌سیم می‌باشد.