ارائه مدل اقتصادی رقابت انحصاری چندجانبه برای تخصیص پهنای باند و قیمت‌گذاری عادلانه در شبکه‌های دسترسی ناهمگون بی‌سیم

وحید حقیقت دوست[1] سیاوش خرسندی[2]

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی کامپیوتر و فن‌آوری اطلاعات- دانشگاه صنعتی امیرکبیر-تهران- ایران
haghighatdoost@aut.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی کامپیوتر و فن‌آوری اطلاعات- دانشگاه صنعتی امیرکبیر-تهران- ایران
khorsandi@aut.ac.ir

چکیده:در این مقاله موضوع قیمت‌گذاری و تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی ناهمگون بی‌سیم مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به وجود نظریه‌های غنی اقتصاد خرد در بازارهای رقابتی، در این مقاله موضوع قیمت‌گذاری و تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی ناهمگون بی‌سیم را از این رویکرد، مورد بررسی و تحلیل قرار دادیم. با بیان چند فرضیه و قضیه، مباحث مربوط به سرویس رومینگ و دیگر ویژگی‌هایی که مخصوص شبکه‌های بی‌سیم و کاربران این شبکه‌ها می‌باشد،یک مدل اقتصاد رقابتی با الهام از نظریه اقتصاد خرد در بازارهای رقابتی کامل، ارائه گردیده است. بدین ترتیب، قیمت‌گذاری برای هر یک از شبکه‌ها با توجه به میزان پهنای باند تدارک دیده شده توسط آن شبکه و میزان علاقمندی کاربران، توسط کاربران تعیین می‌شود و شبکه‌ها نیز با توجه به قیمتی که پهنای باند آن‌ها خریداری می‌شود، میزان تولید خود را تنظیم می‌کنند. در نهایت اثبات شده است که تخصیص صورت گرفته بر اساس این مدل که همه عامل‌های آن بر مبنای رفتار عاقلانه و خودخواهانه عمل می‌کنند، بهینه پَرِتو می‌باشد و قیمت فروش سرویس برای تمامی شبکه‌ها منفعت آور است.

واژه های کلیدی: شبکه‌های دسترسی ناهمگون بی‌سیم، قیمت‌گذاری پویا، تخصیص منابع، اقتصاد خرد، تخصیص بهینه پرتو.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۰۸/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سیاوش خرسندی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران – تهران – خیابان حافظ – پلاک ۴۲۴ – دانشگاه صنعتی امیر کبیر – دانشکده‌ی مهندسی کامپیوتر و فن آوری اطلاعات

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-19]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.10.1]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter2018

۱- مقدمه

در حال حاضر رشد تکنولوژی‌های مختلف بی‌سیم برای ارتباط کاربران، تنوع در سرویس دهندگان یک تکنولوژی و توسعه سخت افزاری و نرم افزاری سمت کاربر، باعث گردیده است تا در یک لحظه کاربران شرایط برقراری ارتباط با شبکه از طریق تکنولوژی‌های متفاوت و سرویس دهندگان مختلف را داشته باشند. چنین رویکردی را، شبکه‌های دسترسی ناهمگون بی‌سیم[۱] و یا به اختصار شبکه‌های ناهمگون می‌گویند. در این شبکه‌ها با تغییر رویکردها، کاربران در انتخاب شبکه نقش مهمی پیدا کرده‌اند و هر کاربر براساس سلیقه شخصی، وضعیت دستگاه ارتباطی و نیازهای برنامه کاربردی، به بررسی شبکه‌های در دسترس پرداخته و بهترین شبکه را برای اتصال برمی‌گزینند که به اصل «همیشه بهترین انتخاب[۲]» معروف است[۱].

یکی از تصمیمات مهم برای شبکه، مکانیزم قیمت‌گذاری سرویس می‌باشد. مدیر شبکه باید به طور پیوسته وضعیت شبکه را رصد نماید و براساس میزان بار موجود و تعداد کاربران فعال، پهنای باند تدارک دیده شده و قیمت را تعدیل نماید. چنانچه شبکه در تدارک پهنای باند، ضعیف عمل نماید یعنی پهنای باند تدارک دیده شده کمتر از حد نیاز باشد باعث نارضایتی کاربران می‌شود و چنانچه این مقدار از حد نیاز بیشتر باشد، باید هزینه اضافه پرداخت نماید. لذا تنظیم میزان پهنای باند در کنار قیمت هر دو باید توسط مدیر شبکه صورت پذیرد.

به طور کلی مدیر شبکه مایل است با افزایش قیمت، میزان درآمد خود را افزایش دهد در حالی که کاربران به دنبال این هستند تا سرویس را با قیمت پایین تری دریافت کنند. از نظر تئوری‌های اقتصادی در یک معامله هر دو طرف باید از معامله‌ای که انجام می‌دهند منتفع شوند و در غیر این صورت انگیزه‌ای برای حضور در معامله نخواهند داشت. به طور کلی دو روش برای قیمت‌گذاری وجود دارد [۲و۳]:

روش اول) قیمت کالا برابر است با محل تلاقی منحنی عرضه با منحنی تقاضا؛

روش دوم) رقابت بین عامل‌ها تعیین کننده قیمت خواهد بود.

در روش اول تمامی تولیدکنندگان یک محصول یکسان[۳] را تولیدمی‌کنند و قیمت محصول برای تمامی تولیدکنندگان یکسان است که به این بازارها، بازارهای رقابتی کامل[۴] میگویند. ولی در مورد دوم، تعداد محدودی از تولیدکنندگان، حضور دارند که محصول یکسان با اندک تفاوت‌هایی نسبت به هم ارائه می‌نمایند. هر تولیدی، قیمت خود را برای محصولش ارائه می‌نماید که به این نوع بازارها بازار انحصاری چندجانبه[۵] میگویند. در بازارهای انحصاری چندجانبه، شرکت‌ها با دو موضوع درگیر هستند: اول رقابت با سایر تولیدکنندگان برای کسب سهم بیشتری از بازار، و دوم، رقابت با مشتریان، جهت قیمت‌گذاری و افزایش سود.

۲- پیشینه تحقیق

می‌توان مجموعه گسترده مقالات و مطالعات قبلی در زمینه مدیریت اتصال در شبکه‌های بی‌سیم ناهمگون را در پنج گروه دسته‌بندی نمود. دسته اول مربوط به فرایند جابجایی بین شبکه می‌باشد به طوری که این جابجایی به طور آرام از یک شبکه به شبکه دیگر صورت پذیرد و کمترین تلفات داده را در بر داشته باشد. دسته دوم مربوط به اولویت‌بندی شبکه‌ها و انتخاب بهترین شبکه از بین شبکه‌های موجود می‌باشد. به طور کلیمیتوان دو روش اصلی را برای انتخاب شبکه در شبکه‌های بی‌سیم ناهمگون متصور شد: مدل شبکه محور و مدل کاربر محور. دسته سوم از مطالعات، تخصیص پهنای باند به نواحی را بررسی می‌نمایند. هر سلول در یک شبکه سلولی به عنوان یک ناحیه تلقی می‌شود. فراهم کنندگان سرویس باید براساس نیازی که در هر ناحیه وجود دارد، پهنای باند را به آن ناحیه برسانند. چنانچه پهنای باند تدارک دیده شده برای یک ناحیه کمتر از میزان نیاز آن باشد باعث نارضایتی کاربران و کاهش کیفیت سرویس خواهد شد و همچنین تدارک بیش از نیاز پهنای باند، منجر به بلااستفاده بودن پهنای باند شده و فراهم‌کننده سرویس متضرر می‌شود.

دسته چهارم از مطالعات گذشته مربوط به مجوز برقراری اتصال و تخصیص منابع به هر اتصال می‌باشد. مدیر شبکه باید از تمامی منابع موجود استفاده نماید و آن را بین کاربران متصل شده به اشتراک بگذارد. الگوریتم مجوز برقراری اتصال باید تضمین نماید که برقراری اتصال جدید بر روی کیفیت سرویس اتصالات قبلی اثر نمی‌گذارد و همچنین پهنای باند اختصاص یافته به اتصال جدید باید در طول مدت برقراری ارتباط، ثابت باقی بماند.

در نهایت دسته پنجم از مطالعات، مربوط به قیمت‌گذاری سرویس است و بیان می‌دارد که قیمت سرویس در نواحی مختلف و بین پروایدرهای مختلف می‌تواند متفاوت باشد.

از آنجا که در این مقاله در خصوص استفاده از یک مدل اقتصادی برای تخصیص منابع و قیمت‌گذاری استفاده خواهد شد، به نوعی تمرکز ما روی مسائل مطرح شده در دسته ۴ و ۵ می‌باشد و به طور ضمنی پس از تعیین پهنای باند به اتصالات، تا حدی مسئله ما در دسته ۳ هم قرار می‌گیرد.

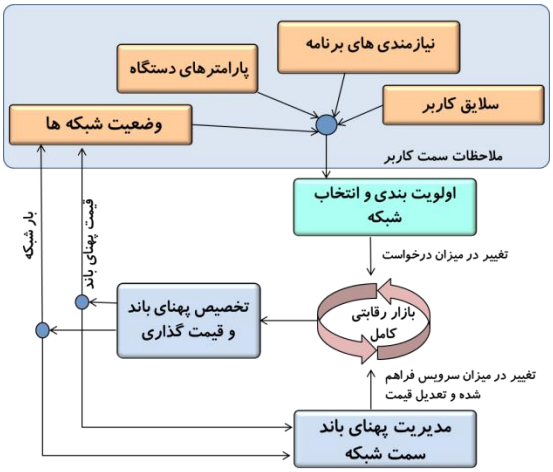
قیمت‌گذاری در شبکه‌های سیمی در[۴]، توسط فرانک کلی و همکارانش بیان شد به طوری که قیمت و نرخ ارسال داده برای یک ترافیک انعطاف پذیر بهینه شده بود ولی موضوع ناهمگونی در سرویس دهندگان و رقابت بین سرویس دهندگان دیده نشده بود. نیاتو و اکرام حسین، در[۵]، یک بازی پیشرو-دنباله‌رورقابتی را میان شبکه‌ها پیشنهاد دادند که قیمت بهینه را براساس مدل بازارهای رقابتی چندگانه محاسبه می‌کرد. متین خواه و خرسندی در[۶] یک روش پویا برای انتخاب شبکه مبتنی بر تحلیل پوششی داده‌ها[۶] ارائه دادند ولی آن‌ها در محاسبات خود بودجه کاربران و رقابت شبکه‌ها را برای قیمت‌گذاری در نظر نگرفتند در مقاله [۷] آن‌ها یک روش مبتنی بر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.10.1]

کاربر[۷] برای تخصیص پهنای باند با هدف توازن بار در شبکه ارائه نمودند که در این مقاله بودجه کاربران در نظر گرفته نشده بود. سالنت و همکارانش در[۸] از یک بازی مدل حراجی برای تخصیص پهنای باند و قیمت‌گذاری استفاده کردند، در این کار، کاربران به طور متوالی، سرویس مورد نیاز و قیمت پیشنهادی خود را برای شبکه‌ها ارسال می‌کنند. سپس مدیر شبکه در خصوص میزان پهنای باند تخصیص یافته تصمیم گیری نموده و با هدف افزایش میزان درآمد خود تخصیص منابع به متقضیان را انجام می‌دهد. برای اجرایی کردن سیستم حراجی مطمئن، از یک عامل مدیریتی استفاده کردند تا تعاملات میان کاربران سیار و شبکه‌ها راحت تر صورت پذیرد. در سیستم‌های مبتنی بر حراجی تنها مطلوبیت شبکه‌ها دیده می‌شود و شبکه‌ها برای افزایش درآمد خود ممکن است سرویس‌ها را با قیمت بالا به فروش برسانند. چان و همکارانش در [۹] یک چارچوب تخصیص منابع برای شبکه‌های بی‌سیم ناهمگون مبتنی بر مفهوم عرضه-تقاضا ارائه نمودند. تابع تقاضا، با استفاده از حل یک مسئله بهینه‌سازی برای افزایش منفعت کاربران حاصل می‌شد و همچنین تابع عرضه با استفاده از حل یک مسئله بهینه‌سازی برای افزایش منفعت شبکه‌ها به دست می‌آمد. قیمتی که در آن میزان عرضه با میزان تقاضا برابری داشت به عنوان نقطه تعادل تعیین می‌گردید. این مقاله با فرض همگن بودن سرویس و وجود بازار رقابتی کامل، وجود رقابت بین شبکه‌ها برای کسب سهم بیشتر از بازار را در نظر نگرفته است. در تئوری‌های اقتصاد بازار رقابتی کامل، بازارهایی را توصیف می‌کنند که تعداد تولیدکنندگان زیاد و هر تولیدکننده به اندازه‌ای بزرگ و پر قدرت نیست که بتواند قیمت کالای همگن را به تنهایی تعیین نماید. در بازار رقابتی کامل رفتار تمامی عامل‌ها (فروشنده و خریدار) براساس منفعت شخصی می‌باشد و به دلیل تعدد بالای این عامل‌ها، یک عامل به تنهایی نمی‌تواند قیمت‌گذاری کالا را انجام دهد و نقطه تعادل قیمت در این بازارها از محل تلاقی منحنی‌های عرضه و تقاضا حاصل می‌شود[۱۰]. دوئان و همکارانش در [۱۱] مکانیزمی را برای قیمت‌گذاری در شبکه‌های سراسری Wi-Fi مطالعه نمودند به طوری که فراهم کنندگان سرویس Wi-Fi سراسری، سرویس ارتباطی پرسرعت با کارایی بالا را برای ارتباط کاربران سیار فراهم می‌کنند مانند شبکه AT&T در امریکا، شبکه BT Openzone در انگلستان و شبکه PCCW در هنگ کنگ که تعداد زیادی نقطه دسترسی WiFi[۸] را در مناطق محلی تعبیه کرده و از آن‌ها برای پوشش سراسری استفاده می‌کنند. آن‌ها برای یافتن قیمت تعادلی در هر ناحیه یک بازی استکلبرگ را بین فراهم‌کننده سرویس i و گروه کاربران محلی N_i تدارک دیدند و در مرحله اول از بازی، فراهم‌کننده سرویس i ، قیمت p_i را اعلام می‌نماید و در مرحله بعد کاربران تصمیم می‌گیرند که براساس این قیمت چه میزان از سرویس را از این فراهم‌کننده سرویس تهیه نمایند. در[۱۲]، ما یک مکانیزمی را برای قیمت‌گذاری شبکه‌ها در نواحی مختلف پوشش، ارائه دادیم و تأثیر استراتژی قیمت‌گذاری بر میزان رفاه کاربران مورد بررسی قرار گرفت.

۳- مدل سیستم

مدل کلی که از تعاملات موجود بین عامل‌ها در شبکه بی‌سیم ناهمگون در شکل ۱ آورده شده است.



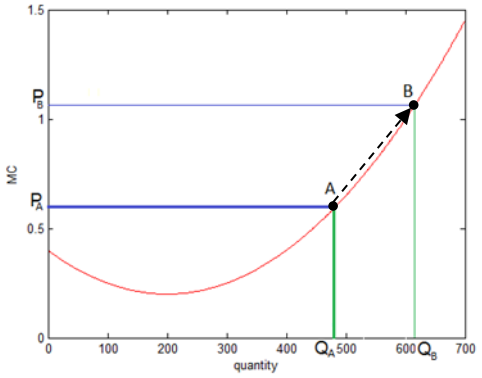
شکل (۱): شمایی از تعاملات موجود در شبکه‌های بی‌سیم ناهمگون

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ما از یک طرف کاربران در شبکه را داریم و از طرف دیگر فراهم کنندگان سرویس. کاربران وضعیت تمامی شبکه‌های در دسترس را دریافت و آن‌ها را براساس معیارهای داخلی که دارند اولویت‌بندی می‌کنند. در بردار وضعیت دریافتی از هر شبکه اطلاعات مربوط به بار شبکه (load)، هزینه هر واحد از سرویس (service cost)، واریانس تغییرات قیمت (cost variation)، پهنای باند در دسترس (available bandwidth)، تأخیر (delay) و موارد دیگر وجود دارد.

در مسئله تخصیص منابع با یک سری عامل‌ها درگیر هستیم و تصمیمات توزیع شده است. کاربران وضعیت تمامی شبکه‌ها را بررسی می‌کنند و هر کاربر به شبکه‌ها وزن دهی می‌کند سپس مکانیزم انتخاب شبکه را انجام می‌دهد و تغییر در میزان تقاضا برای دریافت سرویس از یک پروایدر را به همراه دارد و شبکه تصمیم می‌گیرد که درخواست اتصال جدید را قبول کند یا رد نماید. با قبول اتصال، پروایدر باید پهنای باند بیشتری را در صورت نیاز برای آن ناحیه تدارک ببیند. بدیهی است که افزایش میزان پهنای باند در یک ناحیه، افزایش هزینه تولید را در بر دارد البته میزان افزایش هزینه به میزان سرمایه‌گذاری اولیه پروایدر در آن ناحیه و مدیریت منابع انسانی و تجهیزاتی آن بستگی دارد. در حوزه اقتصاد، هر شرکت تولیدکننده محصول یا خدمات یک منحنی هزینه حاشیه‌ای[۹] دارد. این منحنی که U- شکل است، نشان می‌دهد که میزان هزینه تولید یک واحد از محصول در ازای کل محصول تولید شده چقدر است. شکل ۲ نمونه‌ای

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.10.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter2018

از یک منحنی هزینه حاشیه‌ای را نشان می‌دهد. در بازارهای رقابتی، زمانی که تعادل برقرار است، قیمت محصول برای هر شرکت تولیدی، برابر با هزینه حاشیه‌ای می‌باشد. حالت اول نشان داده شده در شکل ۲، وضعیت بازار در حالت A قرار دارد و با ایجاد تغییرات در بازار میزان تقاضا برای محصول این شرکت افزایش می‌یابد. در این صورت شرکت بایستی محصول خود را به تعداد Q_B عرضه نماید و در این صورت هزینه تولید هر واحد از محصول P_B خواهد شد. لذا شرکت همچنان که میزان تولید خود را افزایش می‌دهد، قیمت کالای خود را به P_B افزایش می‌دهد.



شکل (۲): منحنی هزینه حاشیه‌ای و تعدیل قیمت براساس میزان تقاضا

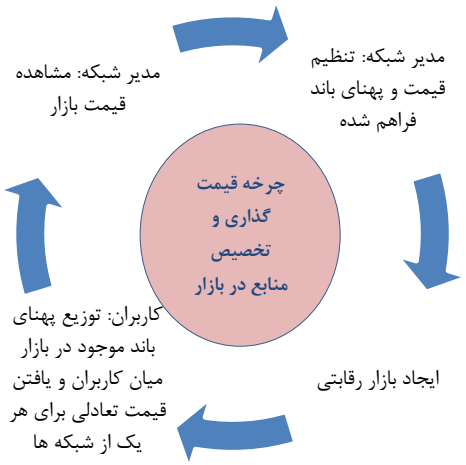
متغیرها و نمادهای استفاده شده در این مقاله در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): نمادها و متغیرها

توضیحات	پارامتر
تعداد کاربران در مدل	n
تعداد شبکه‌ها در مدل	m
مجموعه اندیس m کاربر	$M = \{1,\dots,m\}$
مجموعه اندیس n شبکه	$N = \{1,\dots,n\}$
پهنای باند اختصاص یافته به کاربر i از شبکه j	x_j^i
پهنای باند اختصاص یافته به کاربر i از تمامی شبکه‌ها	$x^i = (x_1^i,..,x_n^i)$
پهنای باند اختصاص یافته بهینه به کاربر i از تمامی شبکه‌ها	$x^{i*} = (x_1^{i*},..,x_n^{i*})$
بردار پهنای باند درخواستی کاربر i از تمامی شبکه‌ها	$r^i = (r_1^i,..,r_n^i)$
بردار اعطا اولیه به کاربر i از تمامی شبکه‌ها	$e^i = (e_1^i,..,e_n^i)$
ماتریس وضعیت شبکه‌ها که در ردیف j از ماتریس بردار وضعیت شبکه j در خصوص f معیار در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد.	$v_{n\times f}$
بردار وزن ویژگی‌ها برای کاربر i برای استفاده در الگوریتم تاپسیس	$a^i = (a_1^i,\dots,a_f^i)$
بردار وزن کاربر i، برای n شبکه موجود	$w^i = (w_1^i,\dots,w_n^i)$
مازاد تقاضا برای سرویس‌های شبکه j	z_j
بردار مازاد تقاضا برای تمامی شبکه‌ها	$z=(z_1,\dots,z_n)$
سرویس مورد نیاز کاربر i	R_i
پهنای باند فراهم شده توسط شبکه j	Q_j
میزان پهنای باند واگذار شده توسط شبکه j	BW_j
میزان بار موجود روی شبکه j	L_j
میزان بار موجود روی شبکه jاز سوی کاربران عضو	L_j^M
میزان بار موجود روی شبکه jاز سوی کاربران مستقیم	L_j^D
میزان بار موجود روی شبکه jاز سوی کاربران میهمان	L_j^G
بردار قیمت برای n شبکه	$P = (p_1,\dots,p_n)$
قیمت نرم یک واحد از پهنای باند از نظر کاربر i	$\bar{p}_i$
هزینه یک واحد از پهنای باند برای کاربران مستقیم	P_D
هزینه یک واحد از پهنای باند برای کاربران عضو	P_M
هزینه یک واحد از پهنای باند برای کاربران میهمان	P_G
بردار قیمت بهینه برای n شبکه	$P^* = (p_1^*,\dots,p_n^*)$
کاربر i ام	Cl_i
شبکه j ام	Net_j
هزینه ثابت تولید سرویس برای شبکه‌ها	C_0
ماتریس وضعیت n شبکه برای f ویژگی	$v_{n\times f}$
مجموعه شبکه‌هایی که مجموع اعطا اولیه صورت گرفته از پهنای باند فراهم شده توسط آن‌ها کمتر است.	$\mathcal{G}$
درآمد شبکه j ام (Network Income)	NI_j

۳-۱- نقطه تعادل قیمت و تخصیص پهنای باند

برای یافتن نقطه تعادل یک الگوریتم تکراری مطابق شکل ۳، انجام می‌شود و در مرحله اول شبکه‌ها پهنای باندی را آماده کرده و براساس منحنی هزینه حاشیه‌ای، قیمت پایه برای تبادل پهنای باند را ارائه می‌نمایند.



شکل (۳): چرخه مدل اقتصادی تا زمان رسیدن به نقطه تعادل

کاربران در یک فضای رقابتی با توجه به وزنی که به شبکه‌ها می‌دهند، بردار تقاضای خود را ایجاد می‌نمایند. از مشخصه بازار رقابتی این است که علاوه بر توزیع پهنای باند، ارزش نسبی پهنای باند هر یک از

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.10.1]

شبکه‌ها نسبت به دیگر شبکه‌ها نیز مشخص می‌شود و با توجه به قیمت پایه‌ای که توسط شبکه‌ها ارائه شده بود، قیمت بازار برای شبکه‌های مختلف حاصل می‌شود. چرخه قیمت‌گذاری نمایش داده شده در شکل ۳، زمانی که یکی از شرایط زیر ایجاد شود، به همگرایی خود رسیده است:

۱- تغییری در قیمت تعادلی بازار در دو تکرار متوالی ایجاد نشود؛

۲- تغییری در میزان پهنای باند فراهم شده توسط شبکه‌ها در دو تکرار متوالی ایجاد نشود.

در اقتصاد هرگونه تغییر در عوامل تولید و یا مصرف بازار باعث تغییر در قیمت کالا می‌شود، لذا چنانچه در میزان پهنای باند تولید شده توسط شبکه‌ها و یا الگوی مصرف کاربران تغییری ایجاد شود، این تغییر در شاخص قیمت خود را نشان می‌دهد و پس از چند مرتبه تکرار در چرخه مجدد سیستم به حالت پایدار خود می‌رسد.

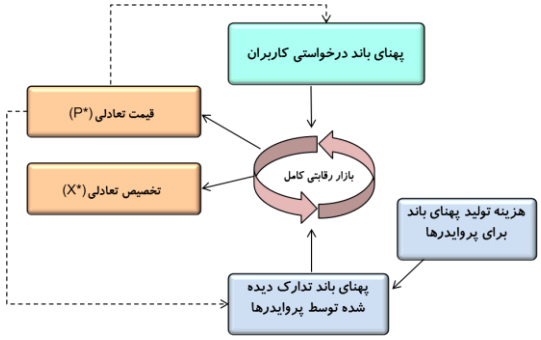
۳-۲- تحلیل اقتصادی برای مسئله تخصیص منابع و قیمت‌گذاری

در عرصه بازارهای رقابتی و بازارهای انحصاری چندجانبه قیمت‌گذاری در بازار یا توسط مشتری انجام می‌شود. بدین صورت که تولیدکنندگان، محصول خود را تولید کرده و در بازار عرضه می‌کنند، خریداران براساس میزان موجودی کل کالا در بازار، قیمت آن را تعیین می‌کنند. برخی از اقتصاد دانان تحلیل خود را بدین صورت بیان می‌کنند که هر کدام از تولیدی‌ها براساس قیمت کالا، میزان تولید خود را تعدیل می‌کنند. مدل اول که قیمت متغیر است را الگوی تعادلی والراس و مدل دوم که میزان تولید متغیر است را الگوی تعادلی مارشال میگویند[۱۰].

به طور کلی مدل اقتصادی پیشنهادی، بازاری را متصور می‌شود که در آن کاربران با سلایق مختلف حضور دارند و براساس اولویتی که برای شبکه‌ها قائل هستند، به شبکه‌ها وزن دهی کرده و از آن‌ها پهنای باند خریداری می‌کنند. شبکه‌های مختلف نیز براساس نیازی که در بازار رقابتی وجود دارد، پهنای باند لازم را تدارک دیده و عرضه می‌نمایند. قیمت هر واحد از پهنای باند برای هر شبکه در یک بازار رقابتی تعیین می‌شود. یقیناً قیمت هر واحد از پهنای باند برای شبکه‌ای که بیشترین علاقمندی را در بین کاربران داشته باشد، بیشتر خواهد بود. شکل ۴، نمایی از ایجاد بازار رقابتی بین کاربران و شبکه‌ها را نشان می‌دهد.

۳-۲-۱- وزن دهی به شبکه‌ها توسط کاربران

در مدل اقتصادی پیشنهادی با توجه به وجود سلیقه‌های مختلف در کاربران فرض می‌کنیم که وزن هر یک از معیارهای شبکه توسط هر کاربر متفاوت باشد مثلاً برای یک کاربر تأخیر اهمیت بیشتری دارد و برای دیگری، امنیت و به همین ترتیب الی آخر. فرض می‌کنیم که بردار وضعیت شبکه‌های در دسترس به دست تمامی کاربران می‌رسد و در شبیه‌سازی انجام شده این معیارها عبارتند از تأخیر (D) نسبت سیگنال به نویز (SNR)، توان سیگنال دریافتی (SS)، دسترس پذیری (A)، پایداری (S)، هزینه (C) و بار شبکه (L). برای وزن دهی به شبکه‌های در دسترس از راهکار تاپسیس استفاده شده است. روش تاپسیس از جمله روش‌های تصمیم گیری چند معیاره محسوب می‌شود. روش‌های تصمیم گیری چند معیاره برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار میگیرند[۱۳]. از آنجا که معیارها همگی از یک جنس نیستند و از طرف دیگر محدوده آن‌ها ممکن است از نظر عددی هم متفاوت باشد لذا روش تاپسیس برای این گونه مسائل بسیار کارآمد می‌باشد. بسیاری از مقالات و تحقیقات وجود دارد که از روش‌های مبتنی بر تاپسیس استفاده کرده‌اند[۱۴].



شکل (۴): ایجاد بازار رقابتی بین شبکه‌ها و کاربران نهایی. خروجی این بازار میزان تخصیص‌ها و قیمت را مشخص می‌کند

الگوریتم تاپسیس شامل ۷ مرحله می‌باشد. در قدم اول یک ماتریس $\boldsymbol{v}_{n\times f}$ از بردارهای وضعیت شبکه‌ها ایجاد می‌شود. n تعداد شبکه‌ها و f تعداد ویژگی‌های هر شبکه می‌باشد. به طوری که هر سطر از این ماتریس، بردار وضعیت یک شبکه را نشان می‌دهد. در قدم دوم ماتریس $\overline{\boldsymbol{v}}$ با نرمال سازی ماتریس $\boldsymbol{v}$ ایجاد می‌شود به طوری که هر یک از درایه‌های این ماتریس از رابطه $\bar{v}_{jl}=\frac{v_{jl}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n} v_{jl}^2}}$ محاسبه می‌شوند. در قدم سوم ماتریس $\tilde{\boldsymbol{v}}$ از روی ماتریس $\overline{\boldsymbol{v}}$ ایجاد می‌شود. هر یک از ستونهای ماتریس با توجه به ارجحیتی که هر یک از ویژگی‌های بردار وضعیت شبکه از نظر کاربر دارد، وزن دهی می‌شود. فرض کنید a_l وزن ویژگی l ام از بردار وضعیت را نشان دهد در این صورت تمام درایه‌های ستون l ام در a_l ضرب شده و ماتریس $\tilde{\boldsymbol{v}}$ ایجاد می‌شود ($\tilde{v}_{jl}=a_l\bar{v}_{jl}$) باید به این نکته توجه داشت که مجموع وزن‌ها برابر واحد می‌باشد یعنی $\sum_{l=1}^{f} a_l = 1$. در قدم چهارم بهترین مقدار و بدترین مقدار برای هر ویژگی محاسبه می‌شود. چنانچه مقدار بیشتر (کمتر) برای یک ویژگی به معنی مقدار بهتری باشد در این صورت مقدار ماکسیمم (مینیمم) معرف بهترین مقدار و مقدار مینیمم (ماکسیمم) معرف بدترین مقدار برای آن ویژگی می‌باشد. بردار t^+ برداری است که بهترین مقدار هر ویژگی را دارد و بردار t^- برداری

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.10.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter2018

است که بدترین مقدار هر ویژگی را نگه می‌دارد. در قدم پنجم فاصله هر یک از بردارهای (ردیف‌های ماتریس) وضعیت نرمال شده در ماتریس $\tilde{\boldsymbol{v}}$ را تا بردار بهترین و بردار بدترین محاسبه می‌کنیم:

$$d_j^- = \sqrt{\sum_{l=1}^{f}\left(\tilde{v}_{jl} - t_l^-\right)^2}\,, d_j^+ = \sqrt{\sum_{l=1}^{f}\left(\tilde{v}_{jl} - t_l^+\right)^2} \qquad (۱)$$

به طوری که t_l^- درایه l ام از بردار t^- و t_l^+ درایه l ام از بردار t^+ و همچنین d_j^- و d_j^+ به ترتیب فاصله اقلیدسی بین بردار بدترین و بردار بهترین وضعیت می‌باشد. در مرحله ششم وزن خالص هر یک از شبکه‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\widehat{w}_j = \frac{d_j^-}{\left(d_j^- + d_j^+\right)}\,, \widehat{w}_j \in [0,1]\,. \qquad (۲)$$

بدیهی است که $\widehat{w}_j = 1$ اگر و تنها اگر شبکه j بردار بهترین وضعیت باشد و $\widehat{w}_j = 0$ اگر و تنها اگر شبکه j، بردار بدترین وضعیت باشد. در قدم هفتم وزن‌ها براساس رابطه زیر نرمال شده و وزن هر یک از شبکه‌ها توسط هر کاربر محاسبه می‌شود. w_j وزن شبکه j ام از دید کاربر می‌باشد:

$$w_j = \frac{\widehat{w}_j}{\sum_{j=1}^{n}\widehat{w}_j}. \qquad (۳)$$

۳-۲-۲- ویژگی رومینگ بین شبکه‌ها

رومینگ یکی از ویژگی‌های مهم در شبکه‌های بی‌سیم می‌باشد. در شرایط رومینگ کاربر به دلیل محدودیت‌های ارتباطی و پر شدن منابع، نمی‌تواند، به طور مستقیم به شبکه‌ای که انتخاب کرده است متصل شود و لذا اتصال خود را از طریق یک شبکه دیگر برقرار می‌نماید ولی حسابرسی آن توسط شبکه انتخاب شده انجام می‌شود. بدین ترتیب کاربران هر شبکه را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

- کاربران مستقیم: کاربرانی که به طور مستقیم به شبکه انتخاب شده متصل می‌شوند.
- کاربران میهمان: کاربرانی هستند که بنا به دلایلی نمی‌توانند به شبکه انتخابی خودشان متصل شوند و لذا به صورت میهمان به شبکه متصل می‌شوند.

به طور کلی شرایط رومینگ بین شبکه‌ها را با ماتریس RM نشان می‌دهیم. ماتریس RM یک ماتریس مربعی $n \times n$ است که n تعداد شبکه‌ها می‌باشد. درایه RM_{ij} میزان نرخ حضور کاربرانی که شبکه i را انتخاب کرده‌اند ولی به صورت میهمان در شبکه j قرار دارند را نشان می‌دهد. مجموع درایه‌های واقع شده در هر سطر برابر ۱ می‌باشد ($\forall i = \{1, \dots, n\}: \sum_{j=1}^{n} RM_{ij} = 1$). خاصیت رومینگ در شبکه‌های بی‌سیم ناهمگون یکی از نقاط متمایز مدل اقتصادی ارائه شده با مدل‌های اقتصادی برای بازارهای سنتی می‌باشد.

با توجه به وجود خاصیت رومینگ، کاربران میهمان بایستی دو هزینه را پرداخت نمایند یک هزینه به شبکه‌ای که به عنوان میهمان در آن حضور دارند و یک هزینه به شبکه‌ای که عضو آن هستند. بدین ترتیب برای هر شبکه سه قیمت P_D، P_M و P_G وجود دارد که به ترتیب هزینه یک واحد از پهنای باند برای کاربران مستقیم، کاربران عضو و کاربران میهمان می‌باشد. مقادیر مربوط به P_M و P_G از روی P_D با استفاده از رابطه زیر برای شبکه j محاسبه می‌شوند:

$$P_G^j = \tfrac{2}{3}P_D^j \quad , \quad P_M^j = \tfrac{1}{2}P_D^j\,. \qquad (۴)$$

یعنی اگر کاربری شبکه k را انتخاب کرده باشد ولی در شبکه l به صورت میهمان حضور داشته باشد به ازای هر واحد از پهنای باند مصرفی باید $P_M^k + P_G^l$ را بپردازد. از طرف دیگر میزان بار در شبکه j (L_j) با توجه به میزان باری که از طرف کاربران عضو (L_j^M)، کاربران مستقیم (L_j^D) و کاربران میهمان (L_j^G) وارد می‌شود، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$L_j = L_j^D + \tfrac{2}{3}L_j^G + \tfrac{1}{3}L_j^M\,. \qquad (۵)$$

۳-۲-۳- رقابت کاربران و تعیین قیمت در بازار مصرف

همان طور که اشاره شد در مدل والراسین، فرض بر این است که تولیدکنندگان محصول خود را در بازار عرضه می‌کنند و در بازار رقابتی، خریداران کالا یا خدمات با توجه به موجودی که از کالا و یا خدمات وجود دارد، آن را قیمت‌گذاری می‌کنند. این روش مبتنی بر رفتار منفعت طلبانه کاربران می‌باشد. در روش والراسین فرض بر این است که کالای موجود در بازار بین تمامی مشتریان توزیع شده است و هر مشتری برای افزایش منفعت خود شروع به دادوستد با دیگر مشتریان می‌کند و مشتریان با تبادل کالایی که با هم انجام می‌دهند، میزان مطلوبیت خود را افزایش می‌دهند. البته در حین این دادوستد قیمت نسبی کالاها نسبت به یکدیگر نیز استخراج می‌شود. فرض کنیم که بردار e^i، بردار موجودی اولیه مشتری iام باشد و چنانچه قیمت کالاها در بازار در بردار P باشد، در این صورت $P.e^i$، بودجه مربوط به مشتری i را نشان خواهد داد. بدین ترتیب چنانچه پهنای باند ارائه شده توسط هر پرویدر را به منزله یک کالا در نظر بگیریم، هر کاربر به دنبال افزایش مطلوبیت خود در یک فرایند جابجایی کالا به کالا با دیگر کاربران خواهد بود. چنانچه بردار x^i نشان دهنده، بردار تخصیص به کاربر i ام باشد که دارای n مولفه است و $u^i(x^i)$ تابع مطلوبیت کاربر i به ازای تخصیص x^i می‌باشد. اگر بردار $P \equiv (p_1, \dots, p_n) \gg 0$، یک بردار از قیمت‌های غیرمنفی باشد هر کاربر مسئله بهینه‌سازی زیر را به ازای بردار قیمت P که n بعدی است را حل خواهد کرد:

$$\begin{aligned} &\text{Maximize } u^i\left(x^i\right) \\ &\text{s.t.} \\ &1)\ P.x^i \le P.e^i \\ &2)\ x^i \in \mathbb{R}_+^n. \end{aligned} \qquad (۶)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.10.1]

اولین شرط در (۶) محدودیت بودجه کاربر را نشان می‌دهد و دومین شرط غیرمنفی بودن تخصیص صورت گرفته را تضمین می‌کند.

فرضیه ۱: مشخصه تابع مطلوبیت کاربران

تابع مطلوبیت u^i برای کاربر i، یک تابع پیوسته، صعودی اکید و شبه مقعر در فضای R_+^nمی‌باشد.

تعریف ۱: مازاد تقاضا برای پروایدر j را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$z_j(P) \equiv \sum_{i\in M} x_j^i\,(P, P.e^i) - \sum_{i\in M} e_j^i. \qquad (۷)$$

تابع x_j^i، نتیجه بازتوزیع منابع بین کاربران می‌باشد که سهم کاربر i از شبکه j را نشان می‌دهد. زمانی که $z_j(P) > 0$ مازاد تقاضا برای شبکه j وجود دارد و $z_j(P) < 0$ بیانگر مازاد تولید برای شبکه j است. به همین ترتیب بردار مازاد تقاضا برای تمام شبکه‌ها به صورت $z(P) \equiv \big(z_1(P), \dots, z_n(P)\big)$ تعریف می‌گردد.

دو قضیه کاربردی با عناوین زیر در (Jehle & Reny, First published 2011) اثبات شده که در اینجا به آن‌ها اشاره می‌کنیم و از نتایج آن‌ها استفاده خواهیم کرد.

قضیه ۱: برای هر بردار قیمت،یک تخصیص منحصربه‌فرد برای هر کاربر وجود دارد که به ازای آن ارزش تخصیص جدید با ارزش تخصیص اولیه برابر بوده و منفعت کاربر بیشترین مقدار خود را دارد.

قضیه ۲: وجود قیمت تعادلی که به ازای آن مازاد تقاضا برابر صفر خواهد شد.

حداقل یک قیمت P^* وجود دارد که اگر توابع مطلوبیت کاربران با فرضیه ۱ سازگار باشد و کاربران براساس مسئله بهینه سازی (۶)، بازتوزیع منابع را انجام دهند، آنگاه بردار مازاد تقاضا برابر صفر خواهد بود $(z(P^*) = 0)$.

در قضیه اول اثبات می‌شود که به ازای هر بردار قیمت و تخصیص اولیه صورت گرفته، یک تخصیص منحصربه‌فرد$x^i(P, P.e^i)$ وجود دارد که منفعت کاربر در آن بیشینه خواهد شد و در قضیه دوم اثبات شد که حداقل یک بردار قیمت$0 \ll P^*$ وجود دارد که به ازای آن مازاد تقاضا صفر است.

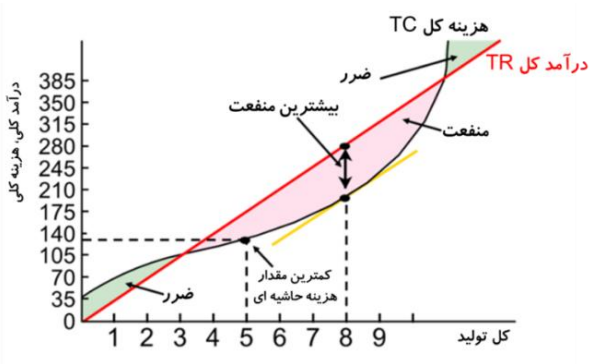
$$\forall j \in N, \quad \sum_{i\in M} x_j^i\,(P^*, P^*.e^i) = \sum_{i\in M} e_j^i\,. \qquad (۸)$$

در رابطه فوق N مجموعه اندیس‌های مربوط به n شبکه موجود و M مجموعه اندیس‌های مربوط به m کاربر فعال در شبکه می‌باشد.یعنی کل پهنای باندی که به صورت تخصیص اولیه به کاربران داده شده بود به صورت عادلانه بین آن‌ها تقسیم خواهد شد و منفعت تمامی آن‌ها افزایش می‌یابد.

این نکته باید اضافه شود که به ازای هر مقدار $\lambda > 0$ خواهیم داشت $z(\lambda P^*) = z(P^*) = 0$یعنی$\lambda P^*$ هم قیمتی است که به ازای آن مازاد تقاضا صفر خواهد بود. به نوعی می‌توان تصور کرد که بردار P^*، ارزش نسبی پهنای باند شبکه‌ها نسبت به یکدیگر را نگه میدارد.

۳-۲-۴- تنظیم میزان پهنای باند آماده شده توسط پروایدرها

در بخش گذشته فرایند قیمت‌گذاری توسط کاربران در یک فضای رقابتی مورد بحث قرار گرفت. در این بخش به تعدیل پهنای باند و قیمت‌گذاری پیشنهادی توسط شبکه‌ها می‌پردازیم. طبق نظریه‌های اقتصاد همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است در حالت تعادل برای یک بازار رقابتی هزینه حاشیه‌ای تولید هر واحد از کالا یا خدمات با قیمت فروش آن برابر است. شبکه‌ها پس از دریافت قیمت بازار (قیمت حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی (۶) و قضیه (۲)، میزان تولید خود را تنظیم می‌کنند. فرض کنید شبکه k پهنای باند Q_k را با قیمتp_kدر مرحله قبل تدارک دیده بود و پس از انجام رقابت در بازار قیمت بازار برای هر واحد از پهنای باند شبکه k برابر$\hat{p}_k$ باشد $(\hat{p}_k < p_k)$. در این صورت شبکه k باید تولید خود را به $\hat{Q}_k$ کاهش دهد به طوری که $MC(\hat{Q}_k) = \hat{p}_k$ باشد. بدین ترتیب شبکه با کنترل میزان تولیدی خود، جلوی ضرر خود را خواهد گرفت و از طرف دیگر چنانچه قیمت بازار بیشتر از قیمت پیشنهادی در مرحله قبل باشد، شبکه با افزایش تولید خود، منفعت خود را افزایش خواهد داد. آنچه برای شبکه اهمیت دارد، افزایش سود می‌باشد که تفاضل مجموع درآمد و مجموع هزینه است. همان طور که در شکل ۵، نشان داده شده است منحنی درآمد کلی[۱۰] براساس میزان تولید،یک خط مستقیم است که از مبدا می‌گذرد و شیب این خط برابر با قیمت فروش پهنای باند می‌باشد $(TR(Q) = p.Q)$ و منحنی هزینه کل[۱۱] برابر است با انتگرال منحنی هزینه حاشیه‌ای[۱۲] بعلاوه هزینه ثابت یعنی$= TC(Q)$ $\int_0^Q MC(q)dq + C_0$ و C_0 همان هزینه ثابت[۱۳] است.



شکل (۵): منحنی درآمد کل و منحنی هزینه کل و بیشترین منفعت برای یک پروایدر

بدین ترتیب همان طور که در شکل ۵، نشان داده شده است به ازای یک قیمت مشخص برای فروش پهنای باند، بهترین منفعت زمانی است که شیب منحنیTC با شیب منحنیTR برابر می‌شود. شیب منحنیTR همان قیمت است و شیب منحنیTC در نقطه Q ، برابر با $MC(Q)$ می‌باشد. به عبارت دیگر بیشترین منفعت زمانی حاصل

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.10.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter2018

می‌شود که $MC(Q)=p$ یعنی همان رابطه‌ای که قبلاً برای قیمت‌گذاری و تنظیم تولید بیان شده بود.

۳-۲-۵- بردار اعطا اولیه

در مطالبی که در بخش گذشته مطرح شد از بردار e^i به عنوان بردار اعطا اولیه نام برده شد که به نوعی توزیع اولیه پهنای باند آماده شده توسط شبکه‌ها بین کاربران می‌باشد تا در یک بازار رقابتی ارزش واقعی هر واحد از پهنای باند تعیین شود. در این بخش روش پیشنهادی برای تخصیص اولیه را بیان می‌داریم. این بردار باید دارای این ویژگی باشد که در حالت پایدار شبکه، تخصیصی که به کاربر می‌دهد با حاصل مسئله بهینه‌سازی یکی باشد یعنی $e^i=x^i(P^*,P^*.e^i)$. بدین ترتیب برای تخصیص اولیه مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر را حل می‌کنیم:

$$\begin{aligned}&\text{Maximize } u^i(e^i)\\&\text{s.t.}\\&1)\ \textstyle\sum_{j=1}^{n}\bar{p}_i.e_j^i\le R_i.\bar{p}_i\\&2)\ e^i\in\mathbb{R}_+^n.\end{aligned}\qquad(۹)$$

در مسئله بهینه سازی فوق $\bar{p}_i$ قیمت نرم یک واحد از پهنای باند از نظر کاربر i را نشان می‌دهد. در زمانی که قصد تخصیص پهنای باند اولیه را داریم، شبکه‌های مختلف قیمت‌های متفاوتی را برای هر واحد از پهنای باند خود مطرح می‌کنند. از نظر کاربر i، نرم قیمت برابر است با میانگین وزنی قیمت‌ها بر اساس بردار وزن مربوط به آن کاربر. لذا چنانچه R_i کل پهنای باند مورد نیاز کاربر i باشد و بردار $w^i\equiv(w_1^i,\dots,w_n^i)$ وزن هر یک از شبکه‌ها از نظر کاربر i را نشان دهد. در این صورت قیمت نرم هر واحد از پهنای باند از دید کاربر i از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$\bar{p}_i=\textstyle\sum_{j=1}^{n}p_jw_j^i.\qquad(۱۰)$$

چنانچه میزان اعطا اولیه برای یک شبکه از میزان پهنای باند تدارک دیده در آن شبکه بیشتر باشد باید میزان اعطا در آن شبکه کاهش یابد و بجای آن، پهنای باند از دیگر پروایدرها جایگزین شود و چنانچه کل پهنای باند تدارک دیده شده توسط کل پروایدرها با کل نیاز یکسان نباشد، میزان کسری پهنای باند تدارک دیده شده باید به صورت مشترک توسط همه شبکه‌ها تأمین گردد. فرض کنید Q_j پهنای باند تدارک دیده شده توسط j باشد. ابتدا کسری پهنای باند $\bar{Q}$ با استفاده از رابطه $\sum_{j\in N}Q_j-\sum_{j\in N}\sum_{i\in M}e_j^i$ محاسبه می‌شود. سپس مقدار تولیدی هر یک از پروایدرها به اندازه $\bar{Q}/n$ افزایش می‌یابد. بدین ترتیب میزان پهنای باند تدارک دیده شده برای هر یک از شبکه‌ها برابر خواهد بود با:

$$Q'_j=Q_j+\bar{Q}/n\qquad\forall j\in N.\qquad(۱۱)$$

حال باید مواردی که مازاد تخصیص دارند را تعدیل کنیم و از پهنای باند دیگر پروایدرها به آن‌ها اختصاص دهیم. حال که میزان پهنای تدارک دیده شده بزرگتر و یا مساوی مجموع کل نیاز کاربران شده است، لذا چنانچه شبکه‌ای مانند k باشد که در آن کمبود پهنای باند داشته باشیم در این صورت الگوریتم زیر را تکرار می‌کنیم تا دیگر هیچ شبکه‌ای کمبود پهنای باند نداشته باشد.

در نظر بگیرید که مجموعه $\mathcal{G}$ شبکه‌هایی را نشان دهد که میزان پهنای باند تدارک دیده شده توسط آن‌ها بیشتر از تخصیص اولیه باشد:

$$\mathcal{G}=\left\{j\middle|Q_j-\sum\nolimits_{i\in M}e_j^i>0\right\}.\qquad(۱۲)$$

در این صورت میزان کسری تولیدی که برای شبکه k وجود دارد را محاسبه کرده و بین تمامی شبکه‌های عضو $\mathcal{G}$ توزیع می‌کنیم.

$$\begin{aligned}&\bar{Q}_k=Q_k-\sum\nolimits_{i\in M}e_k^i\\&e_k^i\leftarrow e_k^i-\frac{\bar{Q}_k}{m}\qquad\forall i\in M\\&e_j^i\leftarrow e_j^i+\frac{\frac{\bar{Q}_k}{m}}{|\mathcal{G}|}\qquad\forall i\in M,\forall j\in\mathcal{G}\\&Q_j\leftarrow Q_j+\frac{\bar{Q}_k}{|\mathcal{G}|}\qquad\forall j\in\mathcal{G}\\&Q_k\leftarrow Q_k-\bar{Q}_k.\end{aligned}\qquad(۱۳)$$

این کار را آن‌قدر تکرار می‌کنیم تا دیگر شبکه‌ای وجود نداشته باشد که میزان اعطا صورت گرفته برای آن شبکه از تخصیص اولیه صورت گرفته از آن شبکه بیشتر باشد. می‌توان تحقیق کرد در حالت پایداری سیستم و یافتن قیمت تعادلی خواهیم داشت: $e^i=x^i(P^*,P^*.e^i)$.

۴- شبیه‌سازی

برای انجام شبیه سازی قدم اول تعیین ساختار تابع مطلوبیت کاربران است. یکی از توابع شناخته شده و پر استفاده در تئوری‌های اقتصاد که به شکل مناسبی مطلوبیت حاصل شده برای کاربران را نشان می‌دهد توابع مطلوبیتCESمی‌باشد. فرمت کلی این خانواده از توابع مطلوبیت به صورت زیر می‌باشد که برای مقادیر $0<r<1$، توابع یکنواخت و اکیداً مقعر است:

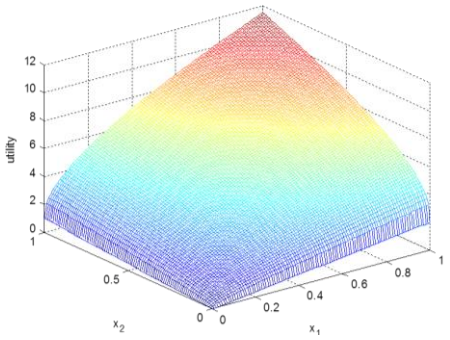
$$f(x)=\sqrt[r]{\textstyle\sum x_i{}^r}\qquad\forall i\in M.\qquad(۱۴)$$

تابع مطلوبیت کاربران مجموع وزنی از مطلوبیت‌های حاصل شده از پهنای دریافتی از هر یک از شبکه‌ها می‌باشد و به راحتی می‌توان نشان داد که تابع مطلوبیت تعریف شده در زیر یک تابع یکنواخت و اکیداً مقعر است که شرایط فرضیه ۱ را دارد:

$$u^i=\left(\textstyle\sum_{j\in N}\sqrt[3]{w_{ij}x_j^i}\right)^3\qquad\forall i\in M.\qquad(۱۵)$$

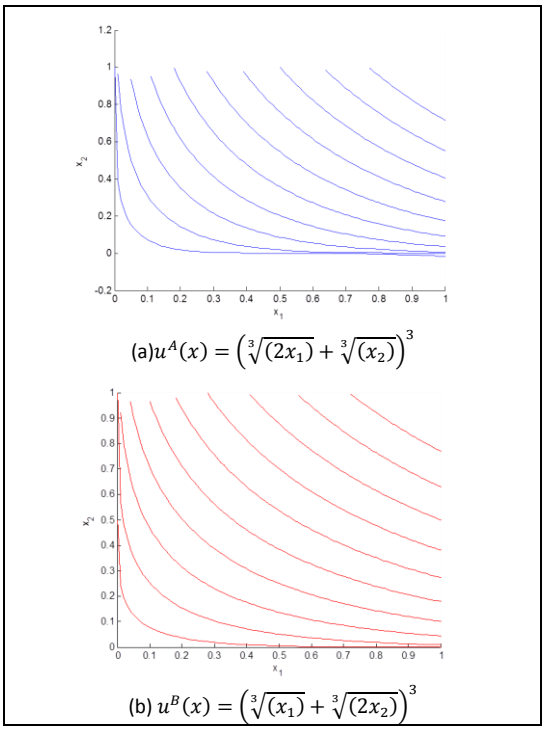
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.10.1]

در رابطه فوق x_j^i، پهنای باند اختصاص داده شده به کاربر i از شبکه j می‌باشد. شکل ۶، رویه مربوط به تابع مطلوبیت یک کاربر نمونه را نشان می‌دهد که از دو شبکه در دسترس پهنای باند دریافت می‌کند و وزن شبکه اول ۲ و وزن شبکه دوم ۱ است.



شکل (۶): رویه مربوط به تابع مطلوبیت یک کاربر که از دو شبکه پهنای باند دریافت می‌کند: $U(x) = \left(\sqrt[3]{(2x_1)} + \sqrt[3]{(x_2)}\right)^3$

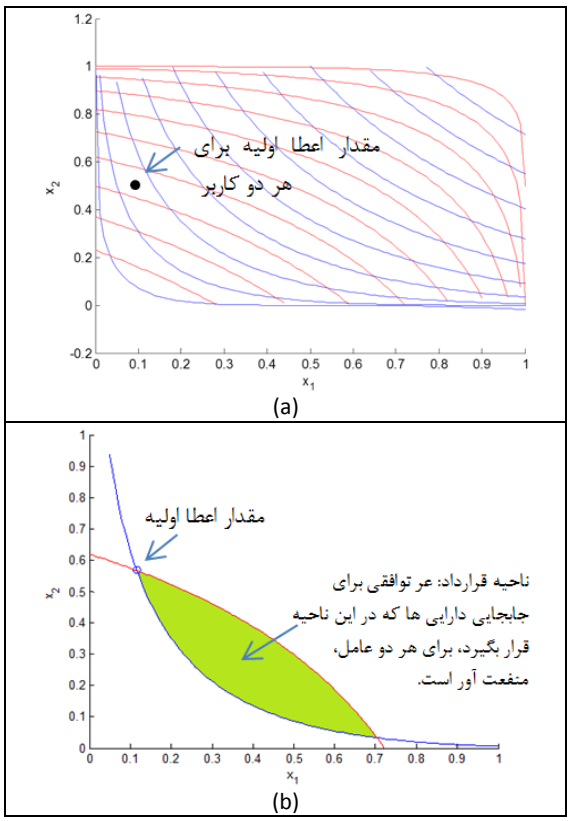
در فرایند قیمت‌گذاری، تمامی کاربران وارد یک رقابت دادوستدی می‌شوند تا با جابجایی دارایی‌های خود، منفعت خود را افزایش دهند.



شکل (۷): منحنی‌های بی‌تفاوتی برای دو کاربر A و B

برای اینکه بحث وجود نقطه تعادل در بازتوزیع منابع به صورت دقیق‌تر مشخص شود دو کاربر A وB را در نظر بگیرید. کاربر A با تابع مطلوبیت به صورت $u^A(x) = \left(\sqrt[3]{(2x_1)} + \sqrt[3]{(x_2)}\right)^3$ و کاربر B با تابع مطلوبیت به صورت $u^B(x) = \left(\sqrt[3]{(x_1)} + \sqrt[3]{(2x_2)}\right)^3$ وجود دارند همان طور که در روابط مطلوبیت مشخص است، ارزش شبکه ۱ نسبت به شبکه ۲، برای کاربر A دو برابر است و برای کاربر B این نسبت ½ است. به ازای برخی از مقادیر مختلف تخصیص، مقدار مطلوبیت ثابت است و چنانچه سطوحی که دارای مطلوبیت یکسان را برای هر یک از کاربران ترسیم کنیم، منحنی‌های بی‌تفاوتی مطابق شکل ۷ ایجاد خواهد شد. منحنی‌های بی‌تفاوتی دارای این ویژگی هستند که کلیه نقاط واقع روی هر منحنی دارای میزان یکسان مطلوبیت برای کاربر هستند و هرچه یک منحنی از مبدأ مختصات فاصله پیدا می‌کند، میزان مطلوبیت بیشتر می‌شود.

چنانچه منحنی‌های بی‌تفاوتی کاربر B را 180°بصورت پاد ساعتگرد بچرخانیم و آن را روی منحنی‌های بی‌تفاوتی کاربر A مطابق شکل ۸ قرار دهیم اصطلاحاً جعبه اجورث[۱۴] ترسیم شده است.



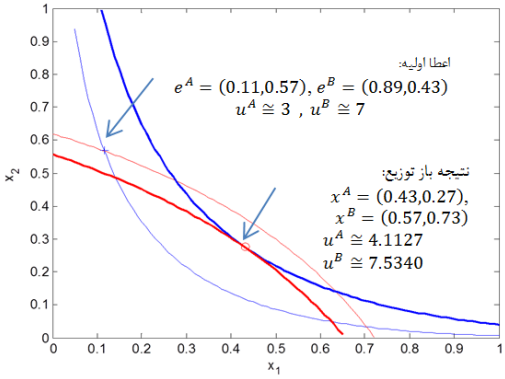
شکل (۸): جعبه اجورث برای دو کاربر A و B و ترسیم ناحیه قرارداد با توجه به دارایی اولیه کاربران

هر نقطه از جعبه اجورث مشخص می‌کند که چه توزیعی از منابع انجام گرفته است و هر یک از کاربران در چه سطحی از مطلوبیت قرار دارند. در نظر بگیرید که اعطا اولیه برای دو کاربر A و B به ترتیب $e^A =$ (0.110,0.57) و $e^B = (0.89,0.43)$ باشد و سطح مطلوبیت آن‌ها نیز $u^A \cong 3$ و $u^B \cong 7$باشد. ناحیه‌ای که جابجایی پهنای باند بین دو کاربر، برای هر دو کاربر منفعت آور است با رنگ سبز مشخص شده که به این ناحیه، ناحیه قرارداد[۱۵] می‌گویند.

حل مسئله بهینه‌سازی (۶)، یک نقطه را نشان می‌دهد که آن نقطه، محلی در داخل ناحیه قرارداد می‌باشد که دو منحنی بی‌تفاوتی مربوط

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.10.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter2018

به عامل‌ها تنها یک نقطه مشترک دارند (شکل ۹) و نمی‌توان نقطه‌ای دیگر را داخل ناحیه قرارداد پیدا کرد که منفعت هر دو عامل را بیشینه کند و این نقطه دارای خاصیت تخصیص بهینه پَرِتو می‌باشد. در این مثال مطلوبیت جدید دو کاربر به $u^A \cong 4.11$ و $u^B \cong 7.5$ افزایش می یابد. زمانی که یک تخصیص بهینه پرتو باشد، یعنی نمی‌توان هیچ گونه دیگری باز توزیع را انجام داد و منفعت یک عامل را افزایش داد مگر اینکه منفعت یک یا چند عامل دیگر کم شود. از نظریه تعادل بازی‌ها، تخصیص پرتو، یک نقطه تعادل نش است و هیچ یک از عامل‌ها انگیزه‌ای برای تغییر در آن را ندارند.

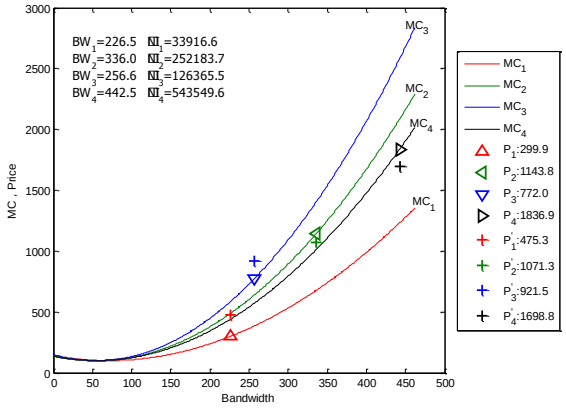


شکل (۹): بهترین نقطه توافق برای باز توزیع منابع برای دو کاربر A و B

شبیه سازی ۱: برای مشاهده نتایج اجرای مدل ارائه شده، شبکه بی‌سیم ناهمگون را با ۵۰ کاربر $(m = 50)$ و چهار شبکه $(n = 4)$ را در نظر بگیرید که کل تقاضای کاربران ۱۱۸۰ واحد باشد. همچنین فرض کنید که ماتریس رومینگ به صورت زیر باشد:

$$RM = \begin{bmatrix} 0.6606 & 0.0437 & 0.2382 & 0.0575 \\ 0.3363 & 0.4903 & 0.0854 & 0.0880 \\ 0.1119 & 0.1720 & 0.5901 & 0.1260 \\ 0.0684 & 0.1254 & 0.1727 & 0.6335 \end{bmatrix}. \qquad (۱۶)$$

شکل ۱۰، نتیجه حاصل شده بعد از همگرایی و رسیدن به حالت پایداری در شبکه را نشان می‌دهد. نقاطی که با مثلث مشخص شده‌اند، درآمد حاصل شده برای شبکه‌ها با نماد + و هزینه‌ای که کاربران پرداخت کرده‌اند با نماد مثلث، نشان داده شده است. درآمد همان طور که در شکل ۱۰ مشخص است قیمت واقعی پرداخت شده توسط کاربر به ازای هر شبکه با قیمت دریافتی توسط شبکه برابر نیست و دلیل این تفاوت، وجود رومینگ در شبکه‌ها است. برای مثال شبکه ۴ که گران‌ترین قیمت را برای سرویس دارد، مبلغ دریافتی به ازای هر واحد از پهنای باندش روی منحنیMC قرار دارد در حالی که میانگین هزینه پرداختی برای کاربرانی که شبکه ۴ را انتخاب کرده‌اند، کمتر از این میزان است چرا که طبق ماتریس رومینگ (۲۹)، حدود ۳۷٪ از کاربرانی که شبکه ۴ را انتخاب کرده‌اند، به یکی دیگر از شبکه‌ها متصل شده‌اند و چون قیمت سرویس در دیگر شبکه‌ها کمتر از شبکه ۴ است لذا میانگین هزینه پرداختی آن‌ها کمتر از میانگین هزینه دریافتی در شبکه ۴ شده است. به همین دلیل، مشاهده می‌شود که میانگین هزینه پرداختی کاربران برای دیگر شبکه‌ها نسبت به میانگین دریافتی آن‌ها بیشتر است چرا که برخی از کاربران این شبکه‌ها مجبور شده‌اند در شبکه ۴ میهمان شوند و این موضوع مستلزم هزینه بالاتر برای آن‌ها شده است.



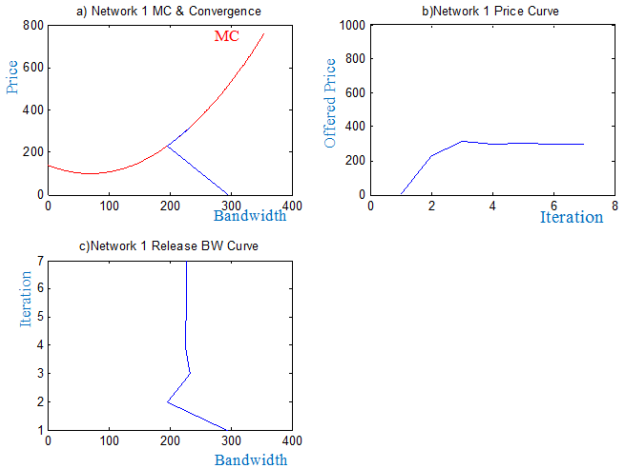
شکل (۱۰): منحنی MC چهار شبکه به همراه مبلغ دریافتی توسط شبکه‌ها و همچنین قیمت پرداختی توسط کاربران به ازای هر واحد از پهنای باند

در شکل ۱۱-a، منحنی هزینه حاشیه‌ای برای شبکه ۱ با رنگ قرمز مشخص شده است و تغییرات قیمت در تکرارهای الگوریتم، با رنگ آبی مشخص شده است و میزان پهنای باند و قیمت بازار در تکرارهای مختلف به صورت خطوط به یکدیگر متصل شده‌اند. از آنجا که در این شکل محور زمان وجود ندارد لذا اتصال این نقاط به هم به صورت یک خط آبی قابل مشاهده است.

جدول (۲): نتیجه شبیه سازی ۱ و یافتن قیمت تعادلی در یک ناحیه با سه شبکه و پنجاه کاربر

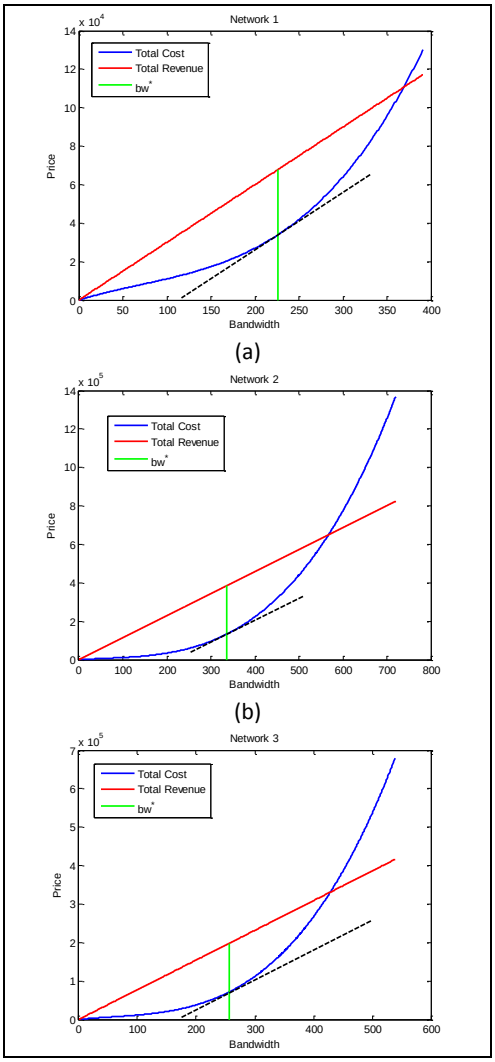
(شماره شبکه) j	(مجموع بار شبکه) L_j	کل درآمد	کل هزینه	کل سود
1	226.5	67917.62	34001.02	33916.61
2	336.0	384269.74	132086.06	252183.69
3	256.6	198099.08	71733.58	126365.50
4	442.5	812838.55	269288.97	543549.58
			مجموع	956015.38

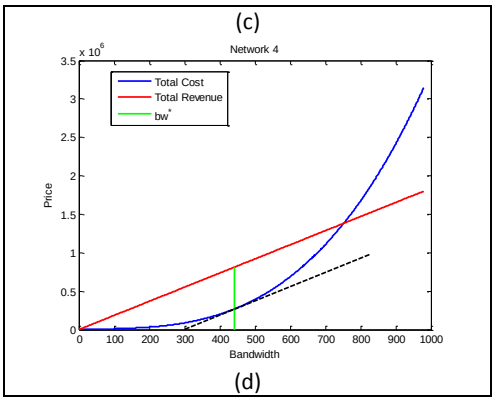
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.10.1]



شکل (۱۱): مراحل همگرایی قیمت و میزان کل پهنای باند ارائه شده توسط شبکه ۱: $BW_1 = 226.5$, $p_1 = 299.83$ در ۷ مرحله تکرار

برای نمایش میزان تغییرات قیمت پیشنهادی توسط شبکه و پهنای باند تدارک دیده شده شکل b-۱۱ و شکل c-۱۱ به ترتیب تغییرات قیمت و پهنای باند آماده شده توسط شبکه ۱ را در تکرارهای مختلف نشان می‌دهند. نتیجه همگرایی برای کلیه شبکه‌ها به شرح زیر می‌باشد:





شکل (۱۲): منحنی کل هزینه و کل درآمد برای چهار شبکه در شبیه سازی ۱ به همراه میزان سود حاصل شده

همان طور که در شکل ۱۲، نشان داده شده است، میزان پهنای باند ارائه شده توسط هر یک از شبکه‌ها در نقطه‌ای است که شیب منحنی هزینه کل با شیب منحنی درآمد کل، برابر است و به عبارت دیگر، سود شبکه در حالت بیشینه قرار دارد. لازم به یادآوری است که قیمت هر واحد از پهنای باند هر یک از شبکه‌ها در یک بازار رقابتی توسط کاربران تعیین گردیده است.

شبیه سازی ۲: شبکه بی‌سیم ناهمگون معرفی شده در شبیه سازی ۱ را در نظر بگیرید. چنانچه کل پهنای باند مورد نیاز بین چهار شبکه به طور مساوی توزیع شود و هر کاربر پهنای باند مورد نیاز خود را از هر چهار شبکه به طور مساوی دریافت نماید و شبکه‌ها براساس منحنی‌های هزینه حاشیه‌ای قیمت‌گذاری را انجام دهند خواهیم داشت:

$$bw_1 = bw_2 = bw_3 = bw_4 = \frac{TotalRequest}{4} = \frac{1180}{4} = 295. \quad (۱۷)$$

در این صورت با احتساب ماتریس رومینگ (۱۶) میزان بار برای هر یک از شبکه‌ها را خواهیم داشت:

$$L_1^D = 194.88, L_2^D = 144.63, L_3^D = 174.07, L_4^D = 186.88$$
$$L_1^G = 152.41, L_2^G = 100.62, L_3^G = 146.39, L_4^G = 80.11$$
$$L_1^M = 100.12, L_2^M = 150.37, L_3^M = 120.93, L_4^M = 108.12 \quad (۱۸)$$
$$L_1 = 346.55, L_2 = 286.90, L_3 = 332.13, L_4 = 294.35.$$

و به همین ترتیب جدول ۳، نتیجه سود حاصل شده در شبیه سازی ۲ را نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود که میزان سود شبکه‌ها ۲۰۴۸۱۹,۷۶ واحد کاهش یافته است و این کاهش سود به این دلیل است که شبکه‌هایی که ظرفیت کافی برای پاسخ‌گویی را ندارند، بار بیشتری به آن‌ها تحمیل شده و لذا میزان هزینه آن‌ها افزایش یافته است. بدین ترتیب شبکه‌ها متضرر خواهند شد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.10.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter2018

جدول (۳): نتیجه شبیه سازی ۲ با تخصیص یکسان پهنای باند به تمامی پروایدرها

(شماره شبکه) j	(مجموع بار شبکه) L_j	کل درآمد	کل هزینه	کل سود
1	346.55	251007.58	93138.39	**157869.19**
2	286.90	232701.50	84390.27	**148311.23**
3	332.13	454838.93	151398.43	**303440.49**
4	294.35	224531.65	82956.95	**141574.70**
			مجموع	**751195.62**

۵- نتیجه گیری

در این مقاله از مدل اقتصاد رقابتی کامل برای قیمت‌گذاری و تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی ناهمگون بی‌سیم استفاده شده است و تفاوت اصلی این بازار با یک بازار سنتی، در خاصیت رومینگ بین شبکه‌ها می‌باشد. در مدل شبکه‌های بی‌سیم ناهمگون به دلیل خاصیت جابجایی کاربران نهایی در نواحی مختلف پوششی، کاربران یک شبکه ممکن است از خدمات اتصال دیگر شبکه‌ها استفاده نمایند که این خاصیت در یک بازار اقتصادی سنتی به طور مستقیم، قابل بحث نمی‌باشد و در مدل پیشنهادی، با استخراج میزان بار اعمال شده به شبکه‌ها و ارائه مدلی برای یافتن میزان بار اعمالی به شبکه از روی کاربران مستقیم و کاربران میهمان، میزان بار و هزینه‌ها استخراج شدند و سپس با در نظر گرفتن بازار رقابتی کامل با عامل‌هایی که صرفاً منفعت خود را در تصمیمات در نظر می‌گیرند و در فضایی که در آن تمامی شبکه‌ها، حضور داشته و محصول خود را ارائه می‌کنند، مکانیزمی برای قیمت‌گذاری از طرف کاربران ارائه گردیده است و طبق قضایای اثبات شده در بخش‌های مقاله، تخصیص صورت گرفته بهینه پرتو می‌باشد که سطح رفاه در مقدار بیشینه خود قرار دارد. نحوه قیمت‌گذاری در مدل پیشنهادی بدین صورت است که بر مبنای مطلوبیت شبکه‌ها و پهنای باندی که تدارک دیده‌اند (میزان عرضه)، قیمت در بازار (توسط کاربران) تعیین می‌شود و شبکه‌ها، با توجه به ارزشی که محصولشان در بازار دارد (قیمت بازار)، میزان تولید را تنظیم می‌کنند. همان طور که در قضایا مطرح شد و نتایج شبیه‌سازی آن را تأیید نمود، چنانچه شبکه‌ها برای تخصیص منابع از استراتژی پیشنهاد شده تبعیت نمایند، منفعت عادلانه را به دست خواهند آورد و در کنار آن رفاه عمومی در نقطه بیشینه قرار خواهد گرفت.

مراجع

[1] E. Gustafsson and A. Jonsson, "Always best connected," *IEEE Wireless Communication Magazin*, vol. 10, no. 1, pp. 49-55, 2003.

[2] D. Begg, S. Fischer and R. Dornbusch, Economics (7t h ed.), London: McGraw-Hill, 2002.

[3] I. Taheri, M. Rashidinejad and A. Badri, "Security Constrained Bidding Strategy of GENCOs Based on Risk Analysis in Restructured Electricity Market," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 13, no. 1, pp. 59-70, 2016.

[4] F. P. Kelly, A. K. Maulloo and D. K. Tan, "Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability," *Journal of the Operational Research society*, pp. 237-252, 1998.

[5] D. Niyato and E. Hossain, "Competitive pricing in heterogeneous wireless access networks: Issues and approaches," *Network, IEEE*, vol. 22, no. 6, pp. 4-11, 2008.

[6] S. M. Matinkhah and S. Khorsandi, "Using Data Envelopment Analysis for Base Station selection in Heterogeneous Wireless Access Networks," *Telecommunications (IST), 2012 Sixth International Symposium on*, pp. 766-770, 2012.

[7] S. M. Matinkhah, S. Khorsandi and S. Yarahmadian, "A load balancing system for autonomous connection management in heterogeneous wireless networks," *Computer Communications*, vol. 97, pp. 111-119, 2017.

[8] O. Sallent, J. Pérez-Romero, R. Agusti, L. Giupponi, C. Kloeck, I. Martoyo, S. Klett and J. Luo, "Resource auctioning mechanisms in heterogeneous wireless access networks," in *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd*, 2006.

[9] H. Chan, P. Fan and Z. Cao, "A utility-based network selection scheme for multiple services in heterogeneous networks," in *Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, 2005 International Conference on*, 2005.

[10] G. A. Jehle and P. J. Reny, Advanced microeconomic theory, London: Prentice-Hall International, First published 2011.

[11] L. Duan, J. Huang and B. Shou, "Optimal pricing for local and global WiFi markets," in *INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE*, 2013.

[12] V. Haghighatdoost and S. Khorsandi, "Mechanism design for pricing and bandwidth allocation in heterogeneous wireless networks to maximize the social welfare," in *9th International Conference on Information and Knowledge Technology (IKT)*, Tehran, 2017.

[13] M. A. Golkar, S. Hosseinzadeh and A. Hajizadeh, "Optimal Multi-Objective Planning of Distribution System with Distributed Generation," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 5, no. 2, pp. 41-48, 2008.

[14] F. Bari and V. Leung, "Multi-attribute network selection by iterative TOPSIS for heterogeneous wireless access," in *4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, 2007.

زیرنویس ها

[1] Heterogeneous Wireless Access Network (HWAN)

[2] ABC: Always Best Connected

[3] Homogeneous

[4] Perfect Competition markets

[5] Oligopoly markets

[6] Data Envelopment Analysis (DEA)

[7] User-centric

[8] WiFi Access point

[9] Marginal Cost

[10] TR: Total Revenue

[11] TC: Total Cost

[12] MC: Marginal Cost

[13] Static Cost

[14] Edgeworth box

[15] Contract Region

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-19]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.10.1]