ارائه یک مکانیزم قیمت‌گذاری در برون‌سپاری ترافیک تحمل‌پذیر تأخیر کاربران از شبکه‌های سلولی به فمتوسل‌ها

دانا قادری[۱]، صالح یوسفی[۲]، وحید سلوک[۳]، مجید فلاح خوشبخت[۴]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی فناوری اطلاعات، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی ارومیه، danaghaderi@yahoo.com

[۲] دانشیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، s.yousefi@urmia.ac.ir

[۳] استادیار، گروه مهندسی فناوری اطلاعات، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی ارومیه، v.solouk@it.uut.ac.ir

[۴] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، St_m.fallah@urmia.ac.ir

چکیده

در دهه گذشته حجم ترافیک داده شبکه‌های سلولی رشد چشم‌گیری داشته است. این افزایش حجم ترافیک داده در شبکه‌های سلولی موجب بالا رفتن احتمال اشباع در شبکه سلولی شده است. برون‌سپاری ترافیک داده شبکه‌های سلولی به شبکه‌های مکملی مانند فمتوسل یک راه‌حل مناسب و کم‌هزینه برای جلوگیری از اشباع شبکه‌های سلولی و افت شدید کیفیت سرویس آن‌ها است. آنچه در چند سال اخیر بسیار مورد توجه قرارگرفته است، حوزه اقتصادی برون‌سپاری ترافیک داده است. در این مقاله، سعی شده است با ارائه یک مکانیزم قیمت‌گذاری، در شرایطی که شبکه سلولی در حالت ازدحام قرار دارد میزان برون‌سپاری ترافیک داده را افزایش داد. در مکانیزم ارائه‌شده که مبتنی بر تأخیر است، برای کاربران و اپراتورهای شبکه تابع مطلوبیت تعریف شده است که بر اساس میزان مطلوبیت به‌دست‌آمده تحت شرایط مختلف می‌توانند به‌طور صحیح تصمیم‌گیری نمایند. اپراتورها با توجه به کاهش رضایت کاربران که در اثر تأخیر در دریافت داده حاصل می‌شود به کاربران پیشنهاد تخفیف در هزینه دسترسی به شبکه را می‌دهند. کاربران شبکه با توجه به مطلوبیتی که از شبکه در حالت مبتنی بر تأخیر در مقایسه باحالت بلادرنگ می‌توانند به دست آورند، در مورد پذیرش یا عدم پذیرش تأخیر تصمیم‌گیری می‌کنند. نتایج حاصل از ارزیابی مکانیزم قیمت‌گذاری پیشنهادی افزایش حجم برون‌سپاری ترافیک داده و نیز بالا رفتن رضایت کاربران و اپراتورها را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

برون‌سپاری، فمتوسل، اقتصاد، تأخیر

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر رشد بسیار سریع تلفن‌های هوشمند و شبکه‌های اجتماعی، موجب افزایش نمایی میزان ترافیک داده بر روی شبکه‌های سلولی شده است ولی سخت‌افزار موردنیاز جهت تأمین ظرفیت موردنظر رشد چندانی نداشته است. اپراتورهای شبکه سلولی، برون‌سپاری ترافیک داده را برای حل مشکل عدم تطابق عرضه و تقاضا بکار گرفته‌اند. برون‌سپاری ترافیک داده می‌تواند ضمن حفظ کیفیت خدمات (QoS)، ظرفیت شبکه را افزایش و هزینه‌های اپراتور را کاهش بدهد [1]. برون‌سپاری ترافیک داده به شبکه‌های مکمل به دو صورت انجام‌پذیر است: ۱- برون‌سپاری بلادرنگ ۲- برون‌سپاری مبتنی بر تأخیر. در برون‌سپاری بلادرنگ شبکه مکمل در زمان درخواست در دسترس است و کاربران بلافاصله شروع به تبادل داده از شبکه مکمل می‌کنند، ولی در برون‌سپاری مبتنی بر تأخیر با توجه به نوع داده درخواستی کاربران، حداکثر تأخیری جهت تبادل داده تعیین می‌شود. اگر در مدت تأخیر تعیین‌شده کاربر در محدوده شبکه مکمل قرار بگیرد، انتقال داده از شبکه مکمل صورت می‌گیرد تا اینکه انتقال کامل گردد، در غیر این صورت از شبکه سلولی برای تکمیل تبادل داده استفاده می‌شود.

همان‌طور که تحقیقات اخیر نشان می‌دهد بیش از ۸۰ درصد ترافیک شبکه‌های سلولی ناشی از فعالیت کاربران داخلی است. با توجه به اینکه پوشش‌دهی شبکه سلولی در فضای داخلی ساختمان‌ها حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد، این امر موجب بروز مشکل در ارائه خدمات باکیفیت می‌شود. به همین دلیل از ایستگاه‌های مقیاس کوچک فمتوسل برای پوشش‌دهی مکان‌های داخلی استفاده می‌شود. فمتوسل موجب پوشش بهتر محیط و افزایش ظرفیت شبکه می‌شود، همچنین برای اپراتورهای سلولی امکان توسعه و مدیریت خدمات را فراهم می‌کنند.

در برون‌سپاری ترافیک داده اپراتور ماکروسل قصد دارد با صرف کم‌ترین هزینه، خدماتی باکیفیت سرویس مناسب را در اختیار کاربران قرار دهد؛ با توجه به این نگرش، اقتصاد در برون‌سپاری ترافیک از طریق فمتوسل‌ها اهمیت پیدا می‌کند. در این مقاله، اپراتورهای ماکروسل و فمتوسل جدا در نظر گرفته‌شده است، هرکدام از طرفین به دنبال کسب سود بیشتر برای خود

هستند. از طرفی کاربران تمایل دارند با صرف هزینه کمتر، خدماتی باکیفیت مناسب را دریافت نمایند که این امر موجب اهمیت قیمت‌گذاری خدمات ارائه‌شده توسط اپراتورها می‌شود. در تحقیقات انجام‌شده قبلی، مدل‌های مختلف اقتصادی جهت بهینه کردن سود برای طرفین (اپراتورها و کاربران) ارائه‌شده است؛ به‌گونه‌ای که تعادل بین هزینه‌ها، قیمت و ارائه خدمات باکیفیت مناسب برقرار گردد.

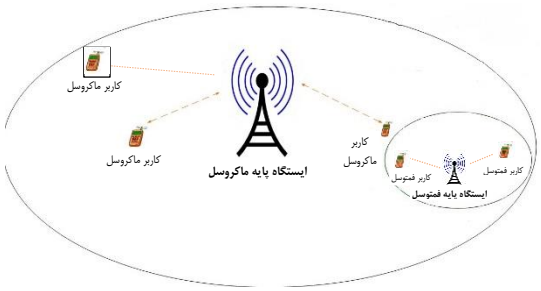
در [2] درباره زمینه اقتصاد برون‌سپاری ترافیک به‌وسیله WiFi و فمتوسل بحث شده است. در این پژوهش، برون‌سپاری ترافیک داده از ایستگاه‌های پایه ماکروسل به فمتوسل بررسی‌شده است و جهت رسیدن به اهداف از تئوری بازی استفاده‌شده است. همچنین دو نوع بازار تعادلی (رقابت کامل) و انحصاری در نظر گرفته‌شده است. طی بررسی‌های انجام‌گرفته این نتیجه حاصل‌شده است که در بازار تعادلی، قیمت تعادلی کاهش و در بازار انحصاری قیمت تعادلی افزایش می‌یابد. در مقاله [3] یک چهارچوب انگیزشی قابل‌اعتماد و راست‌گو بین کاربران و اپراتورها (ماکروسل و فمتوسل) تعریف شده است که کارایی شبکه و بهره‌وری از آن را افزایش داده است. این چارچوب برای کاربران تلفن همراه، پردازش‌های لازم جهت برون‌سپاری ترافیک (چه موقع و چه مقدار از ترافیک داده واگذار گردد) را انجام می‌دهد. در پایان بررسی این چارچوب، این نتیجه به‌دست‌آمده که انگیزه کاربران تلفن همراه جهت دسترسی و استفاده از فمتوسل بیش‌تر شده است. در [4] جنبه‌های اقتصادی مرتبط با خدمات فمتوسل در بازار انحصاری موردبررسی قرارگرفته است، در این مقاله به مواردی نظیر درآمد ماهیانه اپراتورها، مازاد کاربران و همچنین رفاه اجتماعی با در نظر گرفتن نوع خدمات و استراتژی قیمت‌گذاری‌ها، اشاره‌شده است. همچنین بر اساس نوع دسترسی کاربران، خدمات ارائه‌شده به کاربران و نحوه استراتژی‌های قیمت‌گذاری بحث شده است و درنهایت به فواید خدمات دسترسی باز برای کاربران و اپراتورها پرداخته است. در [5] در مورد انگیزه اپراتورها جهت ارائه خدمات باکیفیت به کاربران صحبت شده است. در این پژوهش ارتباطات بین اپراتور سلولی و کاربران با استفاده از استاکلبرگ مدل شده است؛ اپراتورها ابتدا طیف تخصیصی و هزینه خدمات ماکروسل و فمتوسل را تعیین می‌کنند و سپس کاربر را از بین کاربران مختلف انتخاب و مقدار منابع درخواستی کاربر را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. هنگامی‌که خدمات ماکروسل و فمتوسل یکسان محیط را پوشش دهند، اپراتور ترجیح می‌دهد که فقط خدمات فمتوسل را ارائه دهد زیرا دارای کیفیت خدمات بهتری است و همچنین اپراتور سود بیشتری را کسب می‌کند.

در کارهای پیشین، مسئله افزایش برون‌سپاری ترافیک داده به شبکه مکمل فمتوسل و بهبود هزینه و کیفیت خدمات ارائه‌شده توسط اپراتورها به کاربران بدون در نظر گرفتن تأخیر بیان‌شده است. در این مقاله به دنبال ارائه مدلی اقتصادی جهت بهبود برون‌سپاری ترافیک داده و نیز ارائه خدمات باکیفیت به مشتری هستیم. در مدل مفروض کاربران در ازای قبول تأخیر در تبادل داده، در هزینه پرداختی از اپراتور تخفیف دریافت می‌کنند. نوآوری‌های این مقاله شامل: ارائه یک مدل ریاضی جهت محاسبه تخفیف، هزینه نهایی و مطلوبیت مبتنی بر تأخیر برای کاربران و اپراتورها است.

ادامه مقاله به شکل زیر سازمان‌دهی شده است. در بخش دوم فرضیات مسئله بررسی خواهد شد، در بخش سوم مدل ارائه شده بحث خواهد شد، در بخش چهارم به بررسی نتایج شبیه‌سازی و در بخش پنجم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

۲- فرضیات مسئله

در این مقاله فرض بر این است که کاربران شبکه در یک منطقه قرار دارند و از مدل حرکتی خاصی پیروی می‌کنند. منطقه‌ای که کاربران در آن قرار دارند به چند ناحیه تقسیم‌شده است که اپراتور ماکروسل همه این نواحی و اپراتور فمتوسل برخی از این نواحی را تحت پوشش خود قرار داده‌اند. به عبارتی کاربران در برخی نواحی به هر دو اپراتور ماکروسل و فمتوسل دسترسی دارند و در برخی نواحی فقط به ماکروسل دسترسی دارند همانند آنچه در شکل (۱) آورده شده است. کاربران می‌توانند بر اساس شرایطی که در آن قرار دارند به اپراتور ماکروسل یا اپراتور فمتوسل متصل شوند. نوع دسترسی در اپراتور فمتوسل از نوع دسترسی باز است به این معنی که کاربران اجازه‌ی دسترسی به کلیه ایستگاه‌های پایه فمتوسل را دارند. کاربران بر اساس نیازی که دارند تقاضای دسترسی به شبکه و تبادل داده را می‌دهند که هنگام دسترسی به شبکه ماکروسل توان عملیاتی (R_m) و هنگامی دسترسی به شبکه فمتوسل توان عملیاتی (R_f) را می‌توانند به دست آورند. همچنین هر ایستگاه پایه ماکروسل از ایستگاه‌های پایه ماکروسل همسایه تداخل (I_m) و هر ایستگاه پایه فمتوسل از ایستگاه‌های پایه فمتوسل همسایه تداخل (I_f) را دریافت می‌کند.



شکل (۱): ایستگاه پایه ماکروسل و فمتوسل همراه با کاربران

کاربران شبکه در هنگام ارسال درخواست جهت دسترسی به شبکه اطلاعاتی از قبیل، حجم داده درخواستی و نیز در صورت نیاز، تمایل به پذیرش تأخیر در تبادل داده را به اپراتور ارسال می‌کنند. داده درخواستی کاربر شامل چهار نوع Video، Data، P2P، Audio است، برای هرکدام از انواع درخواست‌ها حداکثر تأخیری که کاربر می‌تواند بپذیرد متفاوت هست. در جدول (۱) حداکثر تأخیر قابل‌تحمل آورده شده است:

جدول (۱): دسته‌بندی ترافیک و حداکثر تأخیر قابل‌قبول بر اساس نوع داده[6]

	Video	*Data*	*P2P*	*Audio*	*کل*
درصد ترافیک	٪۶۶/۴	٪۲۰/۹	٪۶/۱	٪۶/۶	٪۱۰۰
حداکثر تأخیر	۳۰دقیقه	۶۰دقیقه	۳۰دقیقه	۰	-

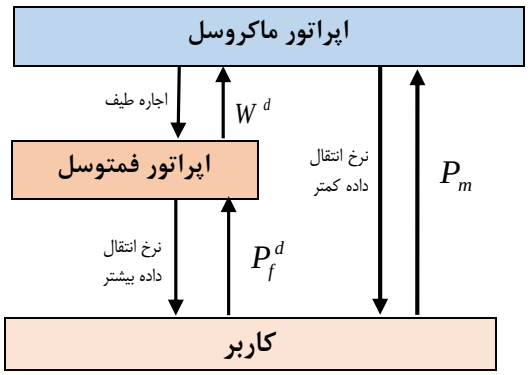
همان‌طور که در جدول (۱) ملاحظه می‌شود نوع داده درخواستی Data بیشترین و نوع درخواست Audio کمترین تاخیرپذیری (بلادرنگ) را دارا

هستند. همچنین ۹۳/۴ درصد از حجم درخواست‌هایی که کاربران ارسال می‌نمایند توانایی پذیرش تأخیر را دارند.

به دلیل اینکه اپراتور ماکروسل همه نواحی را تحت پوشش قرار می‌دهد، در برخی از اوقات کاربران بیشتر به اپراتور ماکروسل درخواست داده می‌دهند که این امر ممکن است موجب ازدحام شبکه ماکروسل و یا حتی اشباع آن گردد. درصورتی‌که اپراتور ماکروسل در حالت ازدحام قرار گیرد، این اپراتور درخواست کاربران را مورد بررسی قرار می‌دهد و تمایل آن‌ها جهت پذیرش تأخیر و انجام برون‌سپاری ترافیک داده بر روی فمتوسل را ارزیابی می‌کند. سپس اپراتور ماکروسل با توجه به سوابق حرکتی که از کاربر دارد، احتمال رسیدن کاربر به اپراتور فمتوسل و انجام برون‌سپاری داده را موردبررسی قرار می‌دهد. درصورتی‌که احتمال رسیدن کاربر به اپراتور فمتوسل از یک حد آستانه بیشتر باشد، اپراتور ماکروسل به کاربر تأخیر را می‌دهد و کاربر از طریق فمتوسل داده درخواستی خود را دریافت خواهد نمود. اپراتور فمتوسل با توجه به حداکثر تأخیر قابل‌قبول و مدت‌زمانی که طول کشیده تا کاربر به شبکه دسترسی پیدا کند در هزینه دسترسی شبکه به کاربر تخفیف می‌دهد. هدف از دادن تخفیف، تشویق کاربر جهت تمایل بیشتر به پذیرش تأخیر و جبران رضایت از دست رفته کاربر در اثر تأخیر است.

۳- مدل قیمت‌گذاری پیشنهادی

مدل قیمت‌گذاری که از آن استفاده می‌کنیم مدل قیمت‌گذاری دوسطحی است[7]. در این مدل قیمت‌گذاری اپراتورهای فمتوسل و ماکروسل از هم جدا در نظر گرفته‌شده‌اند. هزینه‌ای که کاربر جهت دسترسی به شبکه باید به اپراتور فمتوسل و ماکروسل پرداخت نماید، با P_f و P_m نمایش داده می‌شود. ازآنجایی‌که اپراتور فمتوسل نرخ انتقال داده بالاتری را نسبت به اپراتور ماکروسل برای کاربر تأمین می‌نماید، به همین دلیل هزینه بیشتری را نسبت به اپراتور ماکروسل از کاربر می‌گیرد به این معنی که $P_m < P_f$ خواهد بود. همچنین اپراتور فمتوسل هزینه W را به اپراتور ماکروسل باید پرداخت می‌نماید، W هزینه‌ای است که اپراتور فمتوسل جهت اجاره طیف به ماکروسل پرداخت می‌نماید. مقدار W همواره کمتر از P_f است ($W < P_f$)، زیرا درصورتی‌که مقدار W بزرگ‌تر یا مساوی P_f باشد سودی که اپراتور فمتوسل به دست خواهد آورد منفی یا صفر خواهد بود. در این مدل قیمت‌گذاری هزینه‌های P_m و P_f از طریق نظریه بازی و نقطه تعادل نش به دست آورده می‌شود (بازیگران بازی اپراتورهای ماکروسل و فمتوسل هستند). هزینه‌های P_m و P_f به‌گونه‌ای محاسبه می‌شوند که بر اساس شرایط موجود اپراتورهای ماکروسل و فمتوسل بیشترین سود ممکن را به دست آورند. با توجه به شرایطی که اپراتورها در آن هستند چهار حالت مختلف استراتژی قیمت‌گذاری بین دو اپراتور پیش می‌آید: "حالت مستقل"، "حالت رقابتی"، "حالت همکاری" و "حالت تهدید" که در هرکدام از این شرایط هزینه دسترسی به شبکه متفاوت است. "حالت مستقل" هنگامی پیش می‌آید که اپراتور ماکروسل کاربری نداشته باشد و کاربران فقط به فمتوسل متصل شوند (به‌طوری‌که انگار اپراتور ماکروسل وجود ندارد)، در این حالت استراتژی قیمت‌گذاری اپراتورها مستقل از همدیگر است. "حالت رقابتی" در شرایط که هزینه کل ماکروسل ($I_m + R_f - R_m$) و هزینه اجاره طیف (W) هر دو مقدار کمی داشته باشند، این حالت پیش می‌آید. "حالت همکاری" در شرایطی که هزینه کل ماکروسل کم باشد و هزینه اجازه طیف از آن بیشتر باشد دو اپراتور این استراتژی را انتخاب می‌کنند. "حالت تهدید" هنگامی‌که هزینه کل ماکروسل مقدار زیادی داشته باشد، کاربران به ماکروسل متصل نمی‌شوند (نمونه‌ای از این حالت زمانی که کاربر در مرز میان دو اپراتور ماکروسل قرار دارد و تداخل ماکروسل زیاد است) در این حالت قیمت‌گذاری که اپراتور ماکروسل تعیین می‌کند اپراتور فمتوسل را تهدید می‌کند. مقادیر تعیین‌شده P_m و P_f برای حالتی هستند که کاربران تقاضای دسترسی به شبکه دهند و در همان لحظه به شبکه دسترسی یابند (بلادرنگ).



شکل (۲): مدل قیمت‌گذاری دوسطحی مبتنی بر تأخیر

محاسبه هزینه دسترسی به شبکه در شرایطی که کاربر با تأخیر روبه‌رو شود. در برون‌سپاری ترافیک داده مبتنی بر تأخیر، مدل قیمت‌گذاری دوسطحی مبتنی بر تأخیر به‌صورت شکل (۲) خواهد بود. پارامتر P_f^d هزینه دسترسی مبتنی بر تأخیر برای شبکه فمتوسل است، کاربر باید پس از متحمل شدن تأخیر در دسترسی به شبکه این هزینه را جهت دسترسی به اپراتور فمتوسل پرداخت نماید. نحوه محاسبه P_f^d به‌صورت فرمول (۱) است:

$$P_f^d = P_f - P_f^T \qquad (۱)$$

P_f هزینه‌ای است که اپراتور فمتوسل از کاربران جهت اتصال بدون تأخیر به شبکه (برون‌سپاری بلادرنگ) می‌گیرد. P_f^T مقدار تخفیفی است که در ازای پذیرش تأخیر به کاربر داده می‌شود (همواره کوچک‌تر از P_f است). مقدار تخفیف را اپراتور فمتوسل بر اساس زمان تأخیر و حداکثر تأخیر قابل تحمل برای کاربر تعیین می‌کند، از طریق فرمول (۲) محاسبه می‌گردد [8]:

$$P_f^T = aT^b \qquad (۲)$$

در فرمول (۲) مقدار پارامتر a از بازه (0,1) انتخاب می‌شود و مقدار آن به حداکثر تأخیر قابل قبول و مدت زمان تأخیر بستگی دارد، هر چه فاصله حداکثر تأخیر با مدت‌زمان تأخیر کمتر باشد مقداری که برای پارامتر a انتخاب می‌گردد بیشتر است. T مدت‌زمان تأخیر رسیدن کاربر به فمتوسل است (از لحظه درخواست داده کاربر به ماکروسل تا زمانی که به فمتوسل دسترسی پیدا کند). پارامتر b نیز مقدار آن از بازه (۱/۲, ۰/۸) انتخاب می‌گردد که مقدار آن به وضعیت شبکه بستگی دارد، هرچه ازدحام در شبکه بیشتر باشد مقدار این پارامتر بیشتر خواهد بود.

هنگامی‌که شبکه ماکروسل در حالت ازدحام قرار می‌گیرد، اپراتور ماکروسل برای کاهش ازدحام و اپراتور فمتوسل به‌منظور افزایش تعداد کاربرانش (افزایش سود) برای افزایش برون‌سپاری باتحمل تأخیر باهم همکاری می‌کنند، پس در دادن تخفیف به کاربر نیز دو اپراتور باید نقش داشته باشند و در همین راستا اپراتور فمتوسل جهت تقسیم کردن تخفیف مابین خود و اپراتور ماکروسل درصدی از مقدار تخفیف داده‌شده به کاربر را از هزینه پرداختی W کم می‌کند. هزینه اجاره طیف مبتنی بر تأخیر را با W^d نمایش می‌دهیم که با استفاده از فرمول (۳) محاسبه می‌شود:

$$W^d = W - (\alpha P_f^T) : \{0 \le \alpha \le 1\} \qquad (۳)$$

α درصدی از مقدار تخفیف است که باید اپراتور ماکروسل آن را پرداخت نماید و محاسبه مقدار آن به حالت شبکه و میزان ازدحام اپراتور ماکروسل بستگی دارد. αP_f^T سهم اپراتور ماکروسل از تخفیف است که باید آن را متحمل شود.

در ادامه به بررسی مطلوبیت اپراتورها و کاربران، در برون‌سپاری بلادرنگ و برون‌سپاری مبتنی بر تأخیر (تأثیر تأخیر بر روی مطلوبیت) پرداخته می‌شود. کاربران هنگام اتصال به شبکه (بلادرنگ)، از اپراتورهای ماکروسل و فمتوسل مطلوبیتی به دست می‌آورند که مطلوبیت کاربران از اپراتور ماکروسل با U_m و مطلوبیت کاربران از اپراتور فمتوسل با U_f نمایش داده می‌شود. محاسبه U_m و U_f از طریق فرمول‌های (۴) و (۵) انجام می‌گیرد [7]:

$$\begin{cases} U_m = R_m - \theta P_m - I_m & (۴) \\ U_f = R_f - \theta P_f - r_f I_f & (۵) \end{cases}$$

در فرمول‌های (۴) و (۵)، R_m و R_f توان عملیاتی هستند که کاربران هنگام اتصال به اپراتورهای ماکروسل و فمتوسل به دست می‌آورند، مقادیر این پارامترها هنگام دسترسی به شبکه قابل‌محاسبه است. I_m تداخلی که از سوی ایستگاه‌های پایه ماکروسل همسایه دریافت می‌شود، $r_f I_f$ تداخلی است که از ایستگاه‌های پایه همسایه فمتوسلی که در شعاع r_f از فمتوسل موردنظر قرار دارند دریافت می‌شود. پارامتر θ ضریب ثابت کاهش هزینه نسبت به کاهش توان عملیاتی است. اکنون مطلوبیت مبتنی بر تأخیر را برای کاربرانی که تأخیر را پذیرفته‌اند، محاسبه خواهیم کرد. با توجه به اینکه کاربران تأخیر را می‌پذیرند میزان رضایت آن‌ها کاهش می‌یابد که آن را با $SL_{(t)}$ نمایش می‌دهیم. تخفیفی که کاربران از اپراتور فمتوسل می‌گیرند به نوعی در جهت جبران رضایت از دست رفته کاربران است. مطلوبیت مبتنی بر تأخیر کاربران به‌صورت فرمول‌های (۶) و (۷) تغییر خواهد کرد:

$$\begin{cases} U_m = R_m - \theta P_m - I_m & (۶) \\ U_f^d = R_f - \theta P_f - r_f I_f - \theta(P_f^t - SL_{(t)}) & (۷) \end{cases}$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در فرمول (۶) که مربوط به مطلوبیت کاربران اپراتور ماکروسل است هیچ‌گونه تغییری رخ نداده است؛ زیرا این کاربران تأخیری را نپذیرفته‌اند و مطلوبیتی که به دست می‌آورند همانند شرایط قبلی است. فرمول (۷) مربوط به مطلوبیت کاربرانی است که تأخیر را پذیرفته‌اند و از اپراتور فمتوسل داده را دریافت می‌کنند، در فرمول عبارت $\theta(P_f^t - SL_{(t)})$ به فرمول مطلوبیت اضافه‌شده است که بیانگر میزان تأثیر تخفیف داده‌شده به کاربر در مقابل رضایت ازدست‌رفته وی است. درصورتی‌که $(P_f^t < SL_{(t)})$ باشد میزان مطلوبیتی که کاربر باید به دست آورد کمتر شده است $(U_f^d < U_f)$ پس در این شرایط کاربر حاضر به پذیرش تأخیر نخواهد بود. ولی درصورتی‌که $(P_f^t \ge SL_{(t)})$ باشد به دلیل اینکه میزان مطلوبیت کاربر کاهش نخواهد یافت $(U_f^d \ge U_f)$، کاربر تأخیر را خواهد پذیرفت.

پس از بررسی مطلوبیت کاربران به بررسی مطلوبیت اپراتورها می‌پردازیم. مطلوبیتی که اپراتورهای ماکروسل و فمتوسل از کاربران در شرایط بلادرنگ به دست می‌آورند را با V_m و V_f نشان می‌دهیم که از طریق فرمول‌های (۸) و (۹) محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} V_m = P_m Q_m + W Q_f & (۸) \\ V_f = (P_m - W) Q_f & (۹) \end{cases}$$

در فرمول‌های (۸) و (۹) پارامترهای Q_m و Q_f به ترتیب تعداد کاربران ماکروسل و فمتوسل هستند. W نیز همان‌طور که قبلاً گفته شد هزینه‌ای است که اپراتور فمتوسل بابت اجاره طیف به اپراتور ماکروسل پرداخت می‌نماید.

حال مطلوبیت مبتنی بر تأخیر اپراتورها را در شرایطی که تعدادی از کاربران تأخیر را بپذیرند به دست می‌آوریم. فرمول‌های (۱۰) و (۱۱) مطلوبیت مبتنی بر تأخیر اپراتورها پس از دادن تأخیر به کاربر هستند:

$$\begin{cases} V_m^d = P_m Q_m^{'} + W Q_f + W^d Q_f^d & (۱۰) \\ V_f^d = (P_m - W) Q_f + (P_f^d - W^d) Q_f^d & (۱۱) \end{cases}$$

طبق فرمول‌های (۱۰) و (۱۱)، Q_f^d برابر است با تعداد کاربرانی که تأخیر را پذیرفته و به فمتوسل متصل شده‌اند. $Q_m^{'}$ نیز تعداد کاربران ماکروسل بعد از دادن تأخیر به بعضی از کاربران است که برابر با $Q_m^{'} = Q_m - Q_f^d$ است. همان‌طور که از فرمول (۱۱) مشخص است هنگامی‌که مدل پیشنهادی انجام می‌شود اپراتور فمتوسل مطلوبیت بیشتری را به دست می‌آورد، زیرا تعداد کاربرانی که از اپراتور فمتوسل استفاده می‌کنند بیشتر شده است. با توجه به فرمول‌های (۹) و (۱۱) مطلوبیت اپراتور فمتوسل به میزان $(P_f^d - W^d) Q_f^d$ افزایش می‌یابد، مطلوبیت بیشتر برای اپراتور برابر با کسب سود بیشتر است. اپراتور ماکروسل نیز به دلیل قرار گرفتن در شرایط ازدحام و خطر اشباع شبکه ملزم به انجام مدل پیشنهادی و دادن تأخیر به برخی از کاربران جهت جلوگیری از اشباع شبکه است.

با توجه به اینکه فرمول‌های به‌دست‌آمده برای مطلوبیت مبتنی بر تأخیر که افزایش میزان مطلوبیت (کاربران و اپراتور فمتوسل) را نسبت به مطلوبیت بلادرنگ نشان می‌دهد؛ بنابراین کاربران و اپراتورها رضایت بیشتری را در مدل مبتنی بر تأخیر کسب می‌کنند.

٤ – حل عددی مدل پیشنهادی

در این بخش به بحث در مورد پیاده‌سازی و تأثیر پارامترها بر نتایج پرداخته می‌شود. فرض بر این است که کاربران موجود در سیستم از مدل تحرک

Leavy walk پیروی می‌کنند[9]، این کاربران در یک منطقه به ابعاد 3km×3km قرار دارند که به ۱۰۰ ناحیه مساوی تقسیم‌شده است. کل نواحی تحت پوشش ماکروسل و برخی از این نواحی تحت پوشش فمتوسل هستند. همچنین به مدت ۳۰ روز سابقه تحرک کاربران در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و نگهداری شده است. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در نرم‌افزار متلب، احتمال ازدحام در اپراتور ماکروسل و تأثیر نرخ ورود کاربران ماکروسل (λ_m) بر آن، احتمال رسیدن کاربران به فمتوسل و انجام برون‌سپاری داده در زمان‌های مختلف (حداکثر تأخیر قابل‌قبول) بر اساس تاریخچه تحرک کاربران با استفاده از یک مدل پیش‌بینی شبه مارکوف موردبررسی قرارگرفته است. همچنین هزینه نهایی که کاربر جهت دسترسی به شبکه باید به اپراتور پرداخت نماید، در شرایط بلادرنگ و مبتنی بر تأخیر محاسبه‌شده و باهم مقایسه شده است. پارامترهای استفاده‌شده در شبیه‌سازی در جدول (۲) آورده شده‌اند.

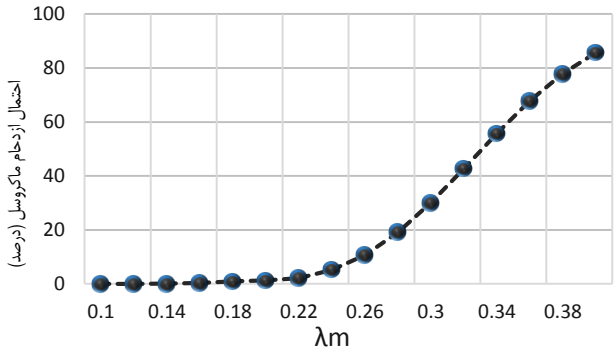
جدول (۲): پارامترهای شبیه‌سازی

توان عملیات ماکروسل	$R_m = 2.5Mbps$
توان عملیاتی فمتوسل	$R_f = 3.7Mbps$
نرخ ورود کاربران فمتوسل	$\lambda_f = 0.2$
مدل تحرک کاربران	Leavy walk
تعداد نواحی	10×10
ضریب	$\theta = 1000$

۴-۱- ازدحام در اپراتور ماکروسل

در این قسمت به بحث در مورد احتمال ازدحام در اپراتور ماکروسل می‌پردازیم. در شبیه‌سازی این قسمت فرض شده است که نرخ ورود و خروج برای اپراتور فمتوسل ثابت است (μ_f =۰/۱ ,λ_f =۰/۲) و در اپراتور ماکروسل نرخ ورود کاربران در حال افزایش بوده و نرخ خروج آن‌ها نیز ثابت است (μ_m =۰/۱). هنگامی‌که وضعیت شبکه به‌گونه‌ای باشد که نرخ ورود کاربران در اپراتور ماکروسل در حال افزایش باشد این شرایط موجب می‌شود اپراتور ماکروسل در شرایط ازدحام قرار گیرد و خطر اشباع، شبکه را تهدید کند.

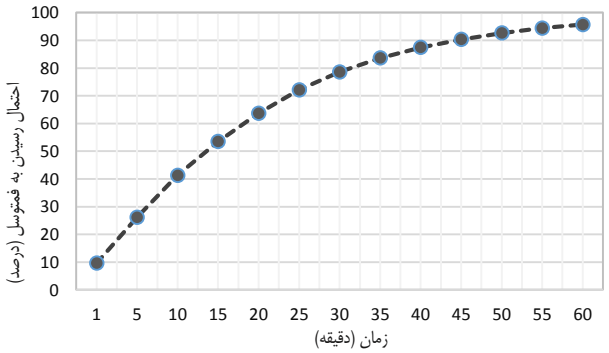
نتایج حاصل از شبیه‌سازی که در شکل (۳) آورده شده است، نشان می‌دهد با افزایش λ_m تا ۰/۲ احتمال قرار گرفتن در شرایط ازدحام بسیار ناچیز است. هنگامی‌که مقدار λ_m از ۰/۲ بیشتر می‌شود احتمال قرار گرفتن در حالت ازدحام به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که وقتی λ_m =۰/۳ باشد احتمال قرار گرفتن در حالت ازدحام برابر ۳۰/۱ درصد است؛ همچنین زمانی که λ_m =۰/۳۸ است احتمال قرار گرفتن در حالت ازدحام برابر ۷۷/۹ درصد خواهد شد. نتایج به‌دست‌آمده از این شبیه‌سازی حساسیت و اهمیت موضوع افزایش برون‌سپاری ترافیک داده با استفاده از مدل پیشنهادی در شرایطی که نرخ ورود کاربران ماکروسل افزایش یابد (خطر اشباع شبکه) را نشان می‌دهد.



شکل (۳): احتمال ازدحام ماکروسل با افزایش نرخ ورود کاربران

۴-۲- برون‌سپاری و قیمت‌گذاری

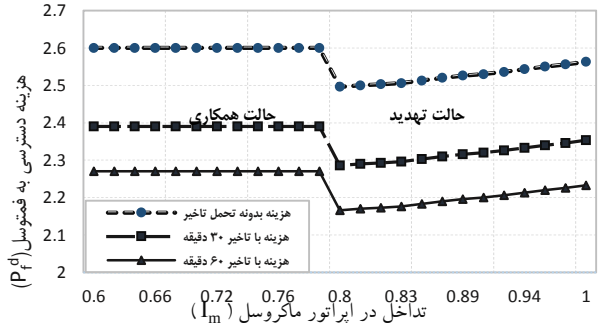
در این قسمت به بررسی شبیه‌سازی نحوه انجام برون‌سپاری ترافیک داده و تعیین قیمت بر اساس میزان تأخیر پذیرفته‌شده توسط کاربر می‌پردازیم. در بخش دوم در جدول (۱) حداکثر تأخیر قابل‌قبول بر اساس نوع داده درخواستی ذکرشده است که برای نوع داده‌های P2P و Video برابر ۳۰ دقیقه و برای نوع داده Data برابر ۶۰ دقیقه هست. بر اساس حداکثر تأخیرهای مفروض احتمال رسیدن کاربران به اپراتور فمتوسل در این بازه‌های زمانی شبیه‌سازی‌شده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده هنگامی‌که حداکثر تأخیر قابل‌قبول برای کاربر برابر ۳۰ دقیقه باشد به‌احتمال ۷۸/۶ درصد کاربر توانایی دسترسی به اپراتور فمتوسل را خواهد داشت. همچنین زمانی که حداکثر تأخیر قابل‌قبول برای کاربر برابر با ۶۰ دقیقه باشد، کاربر به‌احتمال ۹۶ درصد خواهد توانست که به اپراتور فمتوسل دسترسی پیدا کند.



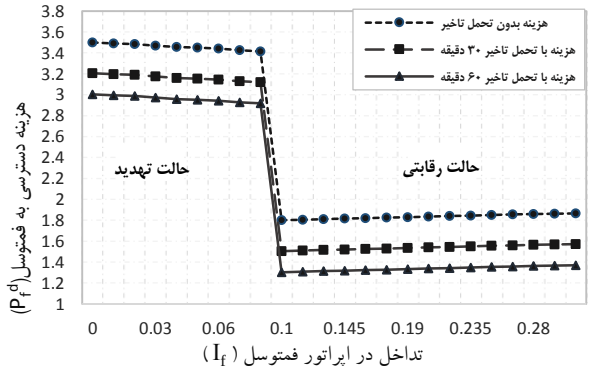
شکل (۴): احتمال رسیدن کاربر به اپراتور فمتوسل

حال به بررسی نتایج حاصل از مدل قیمت‌گذاری پیشنهادی و مقایسه آن با کارهای پیشین (حالت بلادرنگ) پرداخته خواهد شد. نتایج حاصل در شکل‌های (۵) و (۶)، قیمت‌گذاری‌ها در حالت برون‌سپاری بلادرنگ ترافیک داده در مقایسه با برون‌سپاری مبتنی بر تأخیر ترافیک داده را نشان می‌دهند. در حالت برون‌سپاری بلادرنگ قیمت‌گذاری بر اساس شرایط شبکه و استراتژی اپراتورها نسبت به همدیگر، با استفاده از نقطه تعادل نش به دست می‌آید به‌گونه‌ای اپراتورها بیشترین میزان مطلوبیت را بتوانند به دست آورند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در برون‌سپاری مبتنی بر تأخیر نتایج در دو حالت، تأخیر زمانی ۳۰ دقیقه‌ای و تأخیر زمانی ۶۰ دقیقه‌ای تحت شرایط مختلف شبکه (تغییرات در تداخل شبکه) و استراتژی‌های متفاوت اپراتورها

نسبت به یکدیگر مورد ارزیابی قرارگرفته است. در شکل (۵) کاربران در حالت بلادرنگ در شرایطی که اپراتورها در حالت همکاری با یکدیگر باشند هزینه P_f=۲/۶ را پرداخت می‌نمایند، درحالی‌که اگر تأخیر ۳۰ دقیقه را بپذیرند P_f^T=۰/۲ تخفیف از اپراتور می‌گیرند و هزینه P_f^T=۲/۴ را پرداخت می‌نمایند، همچنین تحت تأثیر تأخیر ۶۰ دقیقه‌ای P_f^T=۰/۳۲ تخفیف را از اپراتور می‌گیرند و هزینه P_f^d=۲/۲۸ را پرداخت می‌نمایند. در شکل (۶) کاربران در حالت بلادرنگ در شرایطی که اپراتورها در حالت تهدید با یکدیگر باشند و تداخل در شبکه فمتوسل نزدیک به صفر باشد، هزینه P_f=۳/۵ را پرداخت می‌نمایند، درحالی‌که اگر تأخیر ۳۰ دقیقه را بپذیرند، P_f^T=۰/۳ تخفیف از اپراتور می‌گیرند و هزینه P_f^d=۳/۲ را پرداخت می‌نمایند، همچنین تحت تأثیر تأخیر ۶۰ دقیقه‌ای P_f^T=۰/۴۹ تخفیف را از اپراتور می‌گیرند و هزینه P_f^d=۳/۰۱ را پرداخت می‌نمایند. نتایج حاصل نشان می‌دهند هر چه مدت زمان تأخیر بیشتر شود میزان حساسیت کاربر نسبت به زمان تأخیر کاهش می‌یابد، بدین معنی که سرعت کاهشی، کاهش رضایت کاربر با گذشت زمان کمتر می‌شود. این امر موجب می‌شود اپراتور بتواند با گذشت زمان میزان تخفیفی که در واحد زمان به کاربر می‌دهد را کاهش دهد و رضایت کاربر جهت انجام برون‌سپاری ترافیک تحمل‌پذیر تأخیر کاربران از شبکه سلولی به فمتوسل‌ها را با هزینه تخفیف کمتری به دست آورد.



شکل (۵): هزینه دسترسی به فمتوسل با تغییرات I_m، در حالات مختلف تحمل تأخیر با در نظر گرفتن W=1.5



شکل (۶): هزینه دسترسی به فمتوسل با تغییرات I_f در حالات مختلف تحمل تأخیر با در نظر گرفتن W=0.9

۵- نتیجه‌گیری

حوزه اقتصادی در فرآیند برون‌سپاری ترافیک داده یکی از مهم‌ترین مباحث در زمینه کنترل افزایش ترافیک داده شبکه‌های سلولی در چند سال اخیر بوده است. در همین راستا در این مقاله، یک مکانیزم قیمت‌گذاری در جهت کاهش هزینه‌ها و بهبود مقدار برون‌سپاری ترافیک داده ارائه‌شده است. در مکانیزم قیمت‌گذاری ارائه‌شده که مبتنی بر برون‌سپاری ترافیک تحمل‌پذیر تأخیر کاربران از شبکه سلولی به فمتوسل‌ها است. با استفاده از تاریخچه حرکتی کاربران مدل حرکتی آن‌ها پیش‌بینی گردیده و با محاسبه مدت زمان لازم جهت رسیدن کاربران به شبکه مکمل فمتوسل و انجام برون‌سپاری ترافیک داده، به کاربران پیشنهاد تخفیف در دریافت داده (با تأخیر) در جهت جبران کاهش رضایت آن‌ها، داده می‌شود. نتایج حاصل از ارزیابی مکانیزم قیمت‌گذاری پیشنهادی تحت شرایط مختلف شبکه و استراتژی‌های متفاوت اپراتورها نسبت به همدیگر، نشان‌دهنده کاهش *هزینه‌ها* و بهبود رضایت کاربران است که این امر منجر به افزایش برون‌سپاری ترافیک داده و جلوگیری از اشباع شبکه ماکروسل می‌گردد.

مراجع

[1] Aijaz, Adnan, Hamid Aghvami, and Mojdeh Amani. "A survey on mobile data offloading: technical and business perspectives." *Wireless Communications, IEEE* 20.2 (2013): 104-112.

[2] Gao, Lin, et al. "Economics of mobile data offloading." Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSH-PS), 2013 IEEE Conference on. IEEE, 2013.

[3] Hua, Sha, Xuejun Zhuo, and Shivendra S. Panwar. "A truthful auction based incentive framework for femtocell access." *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE*. IEEE, 2013.

[4] Yun, Se-Young, et al. "The economic effects of sharing femtocells." *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* 30.3 (2012): 595-606.

[5] Duan, Lingjie, Jianwei Huang, and Biying Shou. "Economics of femtocell service provision." *Mobile Computing, IEEE Transactions on* 12.11 (2013): 2261-2273.

[6] Cisco Systems Inc., "Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2011-2016," 2012.

[7] Jiang, Chunxiao, et al. "Optimal pricing strategy for operators in cognitive femtocell networks." *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 13.9 (2014): 5288-5301.

[8] Zhuo, Xuejun, et al. "An incentive framework for cellular traffic offloading." *Mobile Computing, IEEE Transactions on* 13.3 (2014): 541-555.

[9] Rhee, Injong, et al. "On the levy-walk nature of human mobility." *IEEE/ACM transactions on networking (TON)* 19.3 (2011): 630-643.