

واگذاری داده به فمتوسل با استفاده از فناوری ارتباط دوسویه هم‌فرکانس

محمد ملاشاهی، مهری مهرجو و مجید عبیری

استفاده از فمتوسل و IBFD در نسل پنجم شبکه‌های سلولی و ترکیب آن با فناوری‌های مختلف مثل واگذاری ترافیک، شکل‌دهی پرتو، رله و MIMO^۳ به منظور بهبود بهره‌وری فرکانس پیشنهاد گردیده است. در [۴] ترکیب فناوری IBFD و MIMO ارائه شده است. در [۵] برای واگذاری داده کاربران موجود در لبه سلول، از فمتوسل متصل به شبکه داده استفاده شده است. این روش، قابلیت واگذاری ۹۰ درصد داده تولیدشده را دارد و باعث کاهش تراکم شبکه، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و افزایش حداقل ۶۰ درصدی گذردهی شبکه شده است. در [۶] روشی جهت کاهش تداخل و افزایش گذردهی به وسیله کنترل توان فمتوسل و اعمال شکل‌دهی پرتو در مسیر فرسو در شرایطی که اطلاعات کانال به طور کامل در دسترس نمی‌باشد معرفی شده است. در [۷] با طراحی یک شکل‌دهنده پرتو برای فرستنده و گیرنده و استفاده از آنتن‌های MIMO در فمتوسل، هم تداخل ناشی از آنتن ماکروسل روی کاربران سلول و هم تداخل ناشی از آنتن سلول‌های مجاور کاهش یافته است.

در این مقاله به بررسی راهکار واگذاری ترافیک و استفاده از فناوری IBFD به منظور افزایش گذردهی یک شبکه ناهمگن متشکل از یک ماکروسل و یک فمتوسل می‌پردازیم. برای این منظور، فرض می‌کنیم کاربران ترافیک خود را یا مستقیماً به ماکروسل ارسال می‌کنند و یا بخشی از آن را به فمتوسل واگذار می‌کنند و فمتوسل ترافیک داده دریافتی را به ماکروسل ارسال می‌کند. بر این اساس واگذاری داده به دو بخش واگذاری ۱۰۰ درصد ترافیک کاربران به فمتوسل و واگذاری غیر ۱۰۰ درصد تقسیم می‌شود. برای بهبود عملکرد شبکه چند حالت زمان‌بندی ارسال ترافیک کاربران به فمتوسل پیشنهاد می‌کنیم. در ادامه کار، تأثیر استفاده از IBFD و زمان‌بندی ارسال به صورت توأم بررسی می‌گردد. سپس تعداد و مکان بهینه کاربرانی که ترافیک خود را با استفاده از IBFD به فمتوسل واگذار می‌کنند با استفاده از روش بهینه‌سازی کوله‌پشتی و روش مکاشفه‌ای تعیین می‌شود. برای تعیین تعداد بهینه کاربران در روش واگذاری غیر ۱۰۰ درصد، از روش بهینه‌سازی Pareto برای حل مسئله بهینه‌سازی دودفده با توابع هدف بهینه‌سازی گذردهی و کمینه‌سازی توان مصرفی استفاده می‌گردد.

در ادامه مقاله، سناریوی تحقیق و روش پیشنهادی را معرفی خواهیم کرد. در بخش سوم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند و خلاصه نتایج حاصل از این تحقیق نیز در بخش چهارم مطرح می‌گردد.

۲- سناریوی تحقیق و روش پیشنهادی

در این بخش ابتدا روش مورد استفاده برای کاهش تداخل و سناریوی مورد نظر را ارائه می‌کنیم و سپس به تشریح روش‌های پیشنهادی شامل

چکیده: در این مقاله، راهکار واگذاری داده کاربران شبکه سلولی به فمتوسل و استفاده از فناوری ارتباط دوسویه هم‌فرکانس (IBFD) به منظور افزایش گذردهی شبکه و بهره‌وری طیفی پیشنهاد شده است. برای ارسال ترافیک کاربران به ماکروسل در مسیر فراسو، از واگذاری ترافیک به فمتوسل استفاده می‌شود. به عبارتی تمام یا بخشی از ترافیک کاربران به جای ارسال مستقیم به ماکروسل، ابتدا به فمتوسل ارسال شده و سپس به ماکروسل ارسال می‌گردد. همچنین فناوری IBFD که ارسال و دریافت هم‌زمان در یک باند فرکانسی را انجام می‌دهد نیز در فمتوسل به کار گرفته شده و چند حالت زمان‌بندی ارسال ترافیک پیشنهاد می‌گردد. علاوه بر این، تعداد و موقعیت بهینه کاربرانی که ترافیک داده خود را با IBFD یا بدون آن به فمتوسل واگذار می‌کنند تعیین می‌شود. نتایج شبیه‌سازی مؤید بهبود گذردهی شبکه به واسطه افزایش بهره‌وری فرکانس و کاهش توان مصرفی است.

کلیدواژه: فناوری IBFD، شبکه سلولی، فمتوسل، واگذاری داده.

۱- مقدمه

برای مقابله با چالش افزایش ترافیک تولیدی شبکه‌های مخابرات سلولی، استفاده از واگذاری ترافیک به یک شبکه ثانویه مانند فمتوسل برای ارسال آن به ماکروسل پیشنهاد شده است [۱]. سلول‌های کوچک از نوع فمتوسل با استفاده مجدد از باند فرکانسی ماکروسل باعث افزایش بهره‌وری فرکانس و در نتیجه افزایش گذردهی شبکه می‌شوند. یک راهکار دیگر برای افزایش بهره‌وری فرکانس در شبکه‌های مخابرات سلولی، استفاده از فناوری ارتباط دوسویه هم‌فرکانس، IBFD^۱، به منظور استفاده هم‌زمان از یک باند فرکانسی در مسیر فراسو و فرسو است که در سال ۱۹۴۰ پیشنهاد گردید [۲]. برای استفاده از فناوری IBFD نیاز است که هر پایانه به ساختار آنتن IBFD مجهز باشد. استفاده از فناوری IBFD باعث افزایش دوبرابری ظرفیت شبکه، کاهش تأخیر و افزایش ایمنی شبکه می‌شود. هرچند این فناوری به دلیل تداخل خودی بالا، SI^۲، ابتدا در شبکه‌های سلولی مورد استفاده قرار نگرفت ولی امروزه با توجه به پیشرفت چشم‌گیر فناوری‌های کاهش تداخل خودی، با استقبال روبه‌رو شده است [۳].

این مقاله در تاریخ ۲۱ مهر ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۷ اسفند ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

محمد ملاشاهی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، (email: mohammad_mollashahi@pgs.usb.ac.ir).

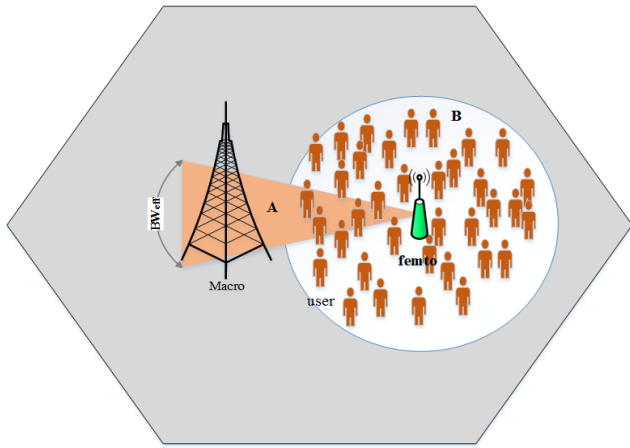
مهری مهرجو، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، (email: mehrjoo@ieee.org).

مجید عبیری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، (email: abiri064@pgs.usb.ac.ir).

1. In-Band Full Duplex

2. Self Interference

3. Multiple-Input Multiple-Output



شکل ۲: سناریوی پیاده‌سازی شده در این تحقیق.

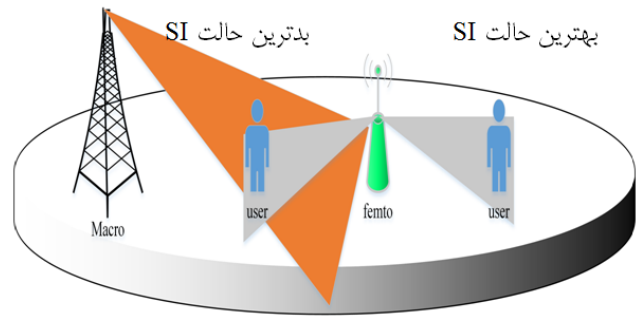
که در آن p_t^U توان ارسالی کاربر، G^U بهره آنتن کاربر و H_U^F ماتریس کانال بین کاربر و فمتوسل است که در آن تأثیر تلفات فاصله در نظر گرفته شده است. همچنین B پهنای باند سیگنال ارسالی کاربر می‌باشد. با توجه به این که فمتوسل به صورت IBFD عمل می‌کند، تداخل خودی ایجاد شده روی آن به توان ارسالی، p_t^F ، و الگوی آنتن بستگی دارد. فمتوسل دو الگوی آنتن دارد، $G_{r,F}$ که برای دریافت استفاده شده و به سمت کاربر قرار دارد و $G_{t,F}$ که برای ارسال استفاده شده و به سمت ماکروسل قرار دارد. عبارت $p_t^F G_{t,F} G_{r,F}$ میزان تداخل خودی روی فمتوسل را نشان می‌دهد که پس از حذف با یکی از فناوری‌های متداول حذف تداخل خودی با ضریب SI^{-1} اثر آن کم می‌شود. برای کاهش تداخل خودی در IBFD، در این مقاله از آنتن‌های هوشمند مانند آنتن آرایه‌ای و فناوری شکل‌دهی پرتو استفاده می‌شود [۸].

۲-۲ سناریوی پیاده‌سازی شده

شکل ۲ سناریوی پیاده‌سازی شده در این مقاله را نشان می‌دهد. در این مقاله IBFD در شبکه‌ای متشکل از یک ماکروسل و یک فمتوسل که به عنوان رله عمل می‌کند به کار گرفته می‌شود. تمام یا بخشی از ترافیک تولید شده توسط کاربرانی که در پوشش فمتوسل قرار دارند می‌تواند به فمتوسل واگذار گردد و فمتوسل این ترافیک را به ماکروسل ارسال کند و بخش دیگر مستقیماً به ماکروسل ارسال شود. فمتوسل دارای ۳۶ کانال فرکانسی است و از فرکانس‌های ماکروسل برای ارسال و دریافت استفاده می‌کند که هر کدام از کانال‌ها به یک کاربر اختصاص دارد. تعداد ۳۶ کاربر، هر کدام با اختلاف زاویه‌ای ۱۰ درجه از ۰ تا ۳۶۰ درجه نسبت به هم و فاصله شعاعی تصادفی در فمتوسل توزیع شده‌اند. به دلیل تداخل خودی زیاد، برای انتقال ترافیک کاربرانی که بین فمتوسل و ماکروسل در محدوده BW_{eff} قرار دارند، ناحیه A ، از IBFD استفاده نمی‌شود. انتقال ترافیک بقیه کاربران، ناحیه B ، با استفاده از IBFD صورت می‌گیرد. U_A کاربران ناحیه A و U_B کاربران ناحیه B هستند و ارتباط بین فمتوسل و ماکروسل به صورت TDMA است.

۲-۳ روش‌های پیشنهادی

در این مقاله، چند روش ارسال اطلاعات کاربران ناحیه A و B به ماکروسل با استفاده از IBFD و بدون آن مطابق جدول ۱ پیشنهاد شده است. کاربرانی که در واگذاری غیر ۱۰۰ درصد، ترافیک خود را مستقیماً به ماکروسل ارسال می‌کنند با U_M نمایش داده می‌شوند. کاربرانی که ترافیک خود را از طریق فمتوسل به ماکروسل ارسال می‌کنند به دو دسته



شکل ۱: بهترین و بدترین حالت SI.

جدول ۱: روش‌های واگذاری و زمان‌بندی پیشنهادی.

$U_A + U_B \rightarrow F$	$F \rightarrow M$	(الف)
$U_A \rightarrow F$	$F_A \rightarrow M$ $U_B \rightarrow F \rightarrow M$	(ب)
$U_A + (U_B - U_{B,sch}) \rightarrow F$	$F_A + F_{B-B,sch} \rightarrow M$ $U_{B,sch} \rightarrow F \rightarrow M$	(ج)
$U_M \rightarrow M$ $U_{F,non-IBFD} \rightarrow F$	$F_{F,non-IBFD} + U_M \rightarrow M$ $U_{F,IBFD} \rightarrow F \rightarrow M$	(د)
α	$1 - \alpha$	فریم
$U_{F,non-IBFD} = U_B - U_{B,sch}$		

روش واگذاری داده ۱۰۰ درصد و حالت‌های زمان‌بندی ارسال مربوط به آن و روش واگذاری داده غیر ۱۰۰ درصد می‌پردازیم. در نهایت، مسأله انتخاب تعداد و محل کاربرانی که از فمتوسل و IBFD برای ارسال داده استفاده می‌کنند طرح می‌گردد.

۱-۲ تداخل خودی

ارسال اطلاعات به صورت هم‌زمان در یک باند فرکانسی باعث به وجود آمدن تداخل خودی می‌شود. شکل ۱ بهترین و بدترین حالت تداخل خودی را برای ساختاری که فمتوسل به عنوان رله استفاده شده، نشان می‌دهد. بدترین حالت تداخل خودی زمانی رخ می‌دهد که کاربر بین آنتن فمتوسل و آنتن ماکروسل قرار داشته باشد. بهترین حالت تداخل خودی زمانی رخ می‌دهد که کاربر بین آنتن فمتوسل و آنتن ماکروسل قرار نداشته باشد. در این حالت، الگوی دریافتی آنتن فمتوسل با الگوی ارسالی آنتن فمتوسل کاملاً در خلاف جهت هم قرار دارند و باعث می‌شود حداقل تداخل خودی روی فمتوسل ایجاد شود.

در شکل ۱ کاربر ترافیک خود را به فمتوسل ارسال می‌کند و فمتوسل با استفاده از فناوری IBFD هم‌زمان در همان باند فرکانسی ترافیک دریافتی را به ماکروسل ارسال می‌کند. $SINR$ ایجاد شده روی آنتن ماکروسل از (۱) به دست می‌آید

$$SINR_M = \frac{p_t^F G_f^{\max} H_F^M}{N \cdot B_F} \quad (1)$$

که در آن p_t^F توان ارسالی فمتوسل، G_f^{\max} بیشینه بهره آنتن فمتوسل و H_F^M ماتریس کانال بین فمتوسل و ماکروسل است که در آن تأثیر تلفات فاصله در نظر گرفته شده است. همچنین B_F پهنای باند سیگنال ارسالی بین فمتوسل و ماکروسل و N چگالی طیف توان نویز است. به همین ترتیب $SINR$ ایجاد شده روی فمتوسل از (۲) به دست می‌آید

$$SINR_{F,IBFD} = \frac{p_t^U G^U H_U^F}{(p_t^F G_{t,F} G_{r,F} SI^{-1}) + N \cdot B} \quad (2)$$

$$C_{M,i} = B_{FM} \times \log_r(1 + SINR_{M,i}), \quad i = 1, 2 \quad (۶)$$

که $C_{M,1}$ و $C_{M,2}$ به ترتیب گذردهی ایجادشده روی ماکروسل ناشی از ارسال ترافیک کاربران به ماکروسل زمانی که فمتوسل ترافیک را بدون استفاده از IBFD و با استفاده از IBFD ارسال می‌کند، است. B_{FM} پهنای باند سیگنال ارسالی بین فمتوسل و ماکروسل می‌باشد. با توجه به شرایط کانال بین فمتوسل و ماکروسل، زمان مورد نیاز را برای انتقال این تعداد بیت از فمتوسل به ماکروسل، T ، به دست می‌آوریم. حال مقدار α از (۷) به دست می‌آید

$$\alpha C_{F,non-IBFD} = (1-\alpha)C_{M,1} \Rightarrow \alpha(C_{F,non-IBFD} + C_{M,1}) = C_{M,1} \Rightarrow \alpha = \frac{C_{M,1}}{C_{F,non-IBFD} + C_{M,1}} \left. \begin{aligned} 1-\alpha = T \\ 1-\alpha = T = \frac{C_{F,non-IBFD}}{C_{F,non-IBFD} + C_{M,1}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (۷)$$

روش‌های پیشنهادی به ترتیب در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند. این روش‌ها عبارتند از:

الف) واگذاری ۱۰۰ درصد، بدون زمان‌بندی ارسال و بدون IBFD (%100 Off & No-sch & No-IBFD)

در این روش، $U_A + U_B$ ترافیک خود را در بازه زمانی α به فمتوسل ارسال می‌کنند و فمتوسل در بازه زمانی $1-\alpha$ ترافیک دریافتی از $U_A + U_B$ را مطابق شکل ۳-الف به ماکروسل ارسال می‌کند. گذردهی سیستم در این روش از (۸) به دست می‌آید

$$C_{non-IBFD} = \alpha(C_{F,non-IBFD}) + (1-\alpha)(C_{M,1}) \quad (۸)$$

ب) واگذاری ۱۰۰ درصد، بدون زمان‌بندی ارسال و با IBFD (%100 Off & No-sch & IBFD)

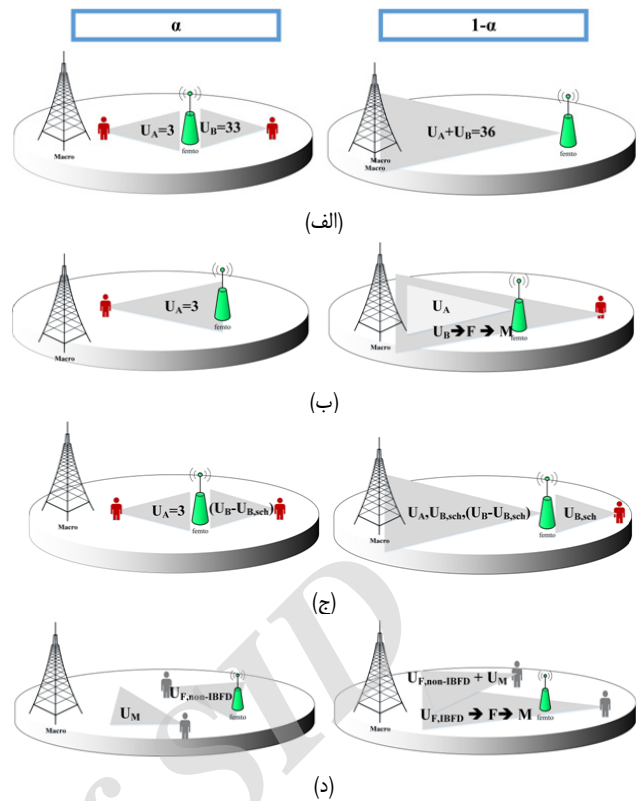
در این روش مطابق شکل ۳-ب، U_A ترافیک خود را در بازه زمانی α به فمتوسل ارسال می‌کنند. در بازه زمانی $1-\alpha$ ، فمتوسل ترافیک دریافتی از U_A را به ماکروسل ارسال کرده و در همین بازه زمانی با استفاده از فناوری IBFD هم‌زمان ترافیک U_B را در باند فرکانسی دیگر دریافت و به ماکروسل ارسال می‌کند ($U_B \rightarrow F \rightarrow M$). گذردهی سیستم در این روش از (۹) به دست می‌آید

$$C_{IBFD} = \alpha(C_{F,non-IBFD}) + (1-\alpha)(C_{M,1} + \min(C_{F,IBFD}, C_{M,2})) \quad (۹)$$

ج) واگذاری ۱۰۰ درصد، با زمان‌بندی ارسال و با IBFD (%100 Off & sch & IBFD)

در این روش، تعدادی از U_B ‌ها ترافیک خود را در بازه زمانی α به همراه U_A ‌ها به فمتوسل ارسال می‌کنند و در بازه زمانی $1-\alpha$ ، فمتوسل ترافیک دریافتی در بازه α را به همراه ترافیک سایر U_B ‌ها مطابق شکل ۳-ج به ماکروسل ارسال می‌کند. فناوری IBFD فقط برای U_B ‌هایی که در بازه $1-\alpha$ ارسال انجام می‌دهند به کار گرفته می‌شود. گذردهی سیستم در این روش از (۱۰) به دست می‌آید

$$C_{IBFD} = \alpha(C_{F,non-IBFD}) + (1-\alpha)(C_{M,1} + \min(C_{F,IBFD}, C_{M,2})) \quad (۱۰)$$



شکل ۳: شماتیک روش‌های پیشنهادی، الف) روش ۱۰۰ Off & No-sch & No-IBFD، ب) روش IBFD، ج) روش ۱۰۰ Off & sch & IBFD، د) روش IBFD non-100 Off & sch & IBFD

$U_{F,IBFD}$ و $U_{F,non-IBFD}$ تقسیم می‌شوند. کاربران $U_{F,IBFD}$ ثابت بوده و ارسال ترافیک آنها به صورت IBFD انجام می‌شود. کاربران $U_{F,non-IBFD}$ کاربرانی هستند که ترافیک خود را به فمتوسل واگذار می‌کنند و فمتوسل بدون استفاده از IBFD ترافیک دریافتی را به ماکروسل ارسال می‌کند. هر فریم به دو بازه زمانی α و $1-\alpha$ تقسیم می‌شود. بازه زمانی اول، α ، برای ارسال اطلاعات از کاربران به فمتوسل و بازه زمانی دوم، $1-\alpha$ ، برای ارسال اطلاعات از فمتوسل به ماکروسل استفاده می‌شود. برای تعیین مقادیر α و $1-\alpha$ به طوری که بتوان کلیه اطلاعات ارسالی از کاربران به فمتوسل در بازه زمانی α را در بازه زمانی $1-\alpha$ به ماکروسل منتقل کرد به روش زیر عمل می‌کنیم. تعداد بیت ارسالی از کاربران به فمتوسل در یک ثانیه از (۳) و (۴) به دست می‌آید

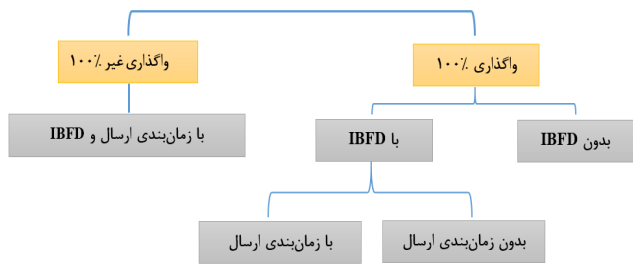
$$C_{F,IBFD} = \sum_{number\ of\ IBFD\ user} B_U \times \log_r(1 + SINR_{F,IBFD}) \quad (۳)$$

$$C_{F,non-IBFD} = \sum_{number\ of\ non-IBFD\ user} B_U \times \log_r(1 + SINR_{F,non-IBFD}) \quad (۴)$$

که در آن B_U پهنای باند سیگنال ارسالی کاربر است که توسط فمتوسل به هر کاربر اختصاص می‌یابد و برای همه کاربران یکسان در نظر گرفته می‌شود. میزان $SINR$ ایجادشده روی فمتوسل زمانی که فمتوسل به صورت IBFD عمل نمی‌کند $SINR_{F,non-IBFD}$ است و از (۵) به دست می‌آید

$$SINR_{F,IBFD} = \frac{P_t^U G_U^U H_U^F}{N.B} \quad (۵)$$

گذردهی ماکروسل از (۶) به دست می‌آید



شکل ۴: دسته‌بندی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده.

جدول ۲: پارامترهای شبیه‌سازی.

۵۰۰ m	شعاع سلول
۲۰ MHz	پهنای باند کاربران
۲۳ dBm	P_t^U
۳۰ dBm	P_t^F
۲ dBi	G^U
۵ dBi	G_F^{\max}
۴	N
۳	Path loss exponent
-۱۷۴ dBm/Hz	N_f
۷۰ dB	SIC

سه حالت زمان‌بندی sch^2 ، sch^3 و sch^4 اجرا می‌شوند. در sch^1 از هر سه کاربر U_B ، دو کاربر یعنی ۲۲ کاربر، در sch^2 از هر دو کاربر U_B ، یک کاربر یعنی ۱۷ کاربر و در sch^3 از هر سه کاربر U_B ، یک کاربر یعنی ۱۱ کاربر ارسال را به صورت IBFD انجام می‌دهند. کاربران انتخاب‌شده برای زمان‌بندی، $U_{B,sch}$ ، نامیده می‌شوند.

د) واگذاری غیر ۱۰۰ درصد، با زمان‌بندی ارسال و IBFD (non-100% Off & sch & IBFD)

در این روش در بازه زمانی α ، تعداد $U_M = U_A + (U_B - U_{B,sch})$ کاربران ترافیک خود را مستقیماً به ماکروسل ارسال کرده و $U_{F,non-IBFD}$ از کاربران ترافیک خود را به فمتوسل واگذار می‌کنند. در بازه زمانی $1-\alpha$ ، فمتوسل ترافیک دریافتی کاربران $U_A + (U_B - U_{B,sch})$ یعنی $F_{F,non-IBFD}$ ، را به همراه ترافیک کاربران $U_{B,sch}$ مطابق شکل ۳-د با استفاده از IBFD به ماکروسل ارسال می‌کند. کاربرانی که در بازه زمانی α ترافیک خود را مستقیماً به ماکروسل ارسال کرده‌اند در بازه زمانی $1-\alpha$ نیز مجدداً ارسال انجام می‌دهند. گذردهی ماکروسل ناشی از ارسال ترافیک توسط فمتوسل از (۶) به دست می‌آید و گذردهی ماکروسل ناشی از ارسال توسط کاربرانی که ترافیک خود را مستقیماً به ماکروسل ارسال می‌کنند از (۱۱) به دست می‌آید.

$$C_{UM} = B_{UM} \log_2(1 + SINR_{UM}) \quad (11)$$

که در آن B_{UM} پهنای باند اختصاصی بین کاربران و ماکروسل است و $SINR_{UM}$ میزان $SINR$ ایجادشده روی ماکروسل ناشی از ارسال مستقیم ترافیک کاربران به ماکروسل است و از (۱۲) به دست می‌آید.

$$SINR_{UM} = \frac{\sum_{\text{number of non-IBFD user}} \frac{P_t^U G^U H_U^M}{N_f B_{UM}}}{N_f B_{UM}} \quad (12)$$

که H_U^M ماتریس کانال بین کاربران و ماکروسل است که در آن تأثیر تلفات فاصله در نظر گرفته شده است.

در این روش برای تعیین تعداد بهینه کاربرانی که ترافیک خود را به فمتوسل واگذار می‌کنند، مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با دو تابع هدف بیشینه‌سازی گذردهی و کمینه‌سازی توان مصرفی طرح و حل می‌گردد. گذردهی سیستم در این روش از (۱۳) به دست می‌آید.

$$Throughput = \alpha(C_{F,non-IBFD} + C_{UM}) + (1-\alpha)(C_{UM} + C_{M,N} + \min(C_{M,N}, C_{F,IBFD})) \quad (13)$$

۴-۲ انتخاب کاربران با استفاده از مسئله کوله‌پشتی

به منظور بهبود گذردهی سیستم، لازم است موقعیت کاربرانی که ترافیک خود را با استفاده از فمتوسل به ماکروسل ارسال می‌کنند تعیین گردد. به این منظور، مسئله کوله‌پشتی به صورت (۱۴) پیشنهاد می‌شود.

$$\begin{aligned} \max \sum x_i C_i \\ \text{s.t. } \sum x_i w_i \leq W \end{aligned} \quad (14)$$

که در (۱۴)، w_i پهنای باند اختصاص‌یافته به هر کدام از کاربران و $W = \sum_{i=1}^K w_i$ ظرفیت کل کوله‌پشتی و برابر حاصل جمع پهنای باند اختصاص‌یافته به کاربرانی است که در بهترین حالت زمان‌بندی ارسال ترافیک خود را به صورت IBFD ارسال می‌کنند. به عنوان مثال در حالت sch^3 از ۳۳ کاربر ناحیه B تعداد ۱۱ کاربر ترافیک خود را به صورت IBFD ارسال می‌کنند ($K=11$) و ظرفیت کوله‌پشتی برابر با مجموع پهنای باند ۱۱ کاربر است. هدف از استفاده از مسئله کوله‌پشتی در این مثال انتخاب موقعیت بهینه ۱۱ کاربر از بین ۳۳ کاربر است. نهایتاً C_i گذردهی فمتوسل ناشی از ارسال ترافیک کاربران ناحیه B است که می‌توانند به صورت IBFD ترافیک ارسال کنند.

$$C_i = B_U \log_2(1 + SINR_{F,IBFD}) \quad (15)$$

در (۱۵) B_U پهنای باند سیگنال‌رسانی کاربر است و برای همه کاربران یکسان در نظر گرفته می‌شود.

۲-۵ روش مکاشفه‌ای برای انتخاب کاربران IBFD

از آنجایی که اجرای روش بهینه‌سازی کوله‌پشتی زمان‌بر است، یک روش مکاشفه‌ای برای انتخاب کاربرانی که از فناوری IBFD استفاده می‌کنند پیشنهاد می‌کنیم. در این روش کاربرانی که از IBFD استفاده می‌کنند از بین کاربران U_B که باعث ایجاد تداخل خودی کمتر می‌شوند، انتخاب می‌گردند. در این روش ابتدا میزان تداخل خودی ایجادشده روی فمتوسل ناشی از کاربران محاسبه می‌گردد.

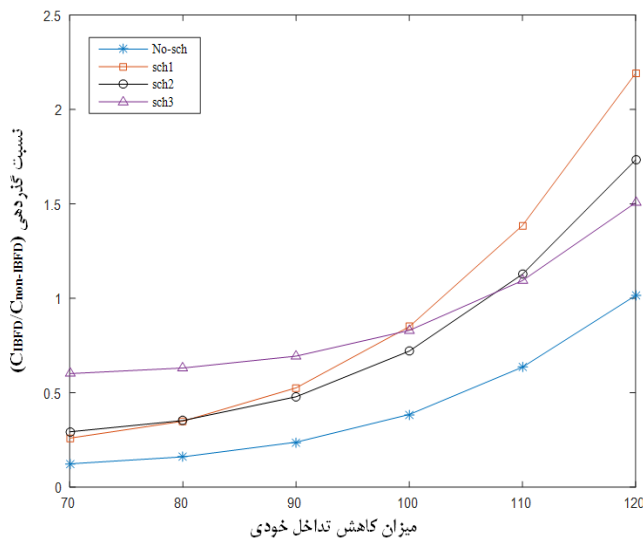
$$SI = P_t^F G_{t,F} G_{r,F} \quad (16)$$

تداخل خودی ایجادشده روی فمتوسل به الگوی دریافتی آنتن آن که به سمت کاربران تنظیم می‌شود یا موقعیت کاربران بستگی دارد. سپس میزان تداخل خودی به صورت صعودی مرتب شده و تعدادی از کاربرانی که باعث ایجاد تداخل خودی کمتر می‌شوند انتخاب می‌گردند. تعداد کاربران انتخاب‌شده برابر با تعداد کاربرانی است که در بهترین حالت زمان‌بندی ارسال ترافیک خود را به صورت IBFD ارسال می‌کنند.

۳- نتایج شبیه‌سازی

شعاع پوشش‌دهی ماکروسل در این تحقیق ۵۰۰ متر است که فمتوسل در فاصله ۲۵۰ متری از ماکروسل قرار دارد. فمتوسل به آنتن آرایه‌ای با تعداد $N=4$ المان خطی مجهز است. در جدول ۲ سایر پارامترهای شبیه‌سازی ارائه شده است.

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش واگذاری ۱۰۰ درصد ترافیک کاربران و حالت‌های زمان‌بندی ارسال و روش واگذاری غیر ۱۰۰ درصد ترافیک کاربران با زمان‌بندی ارسال بهینه ارائه خواهد شد. شکل ۴



شکل ۶: میزان بهبود نرخ گذردهی برای مقادیر مختلف کاهش تداخل خودی.

نمی‌کند اما روش‌های $sch1$ ، $sch2$ و $sch3$ با فناوری IBFD به ترتیب $1/5$ ، $1/73$ و $2/19$ برابر نسبت گذردهی شبکه را می‌توانند افزایش دهند.

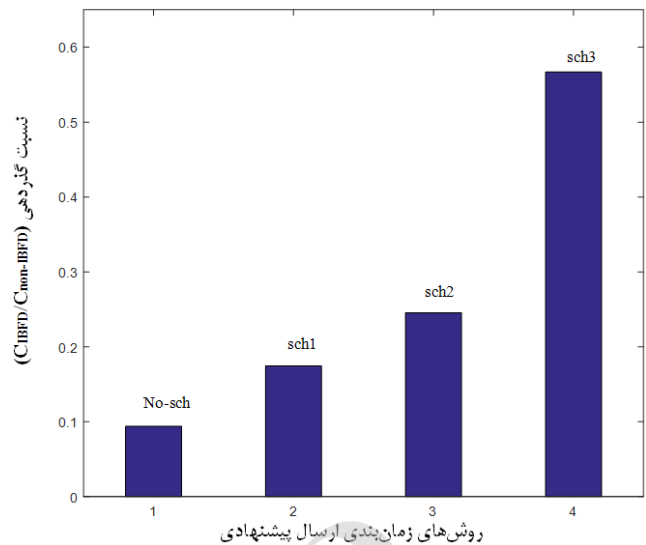
۳-۲ بررسی روش‌های با واگذاری غیر ۱۰۰ درصد

در این بخش به مقایسه نتایج شبیه‌سازی روش واگذاری داده غیر ۱۰۰ درصد با زمان‌بندی ارسال و IBFD می‌پردازیم. با توجه به هزینه‌بر بودن رسیدن به بهره بالای کاهش تداخل خودی، میزان کاهش تداخل خودی برابر ۷۰ dB است. با توجه به شکل ۶ روش $sch3$ در این میزان کاهش تداخل خودی نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری در بهبود نسبت گذردهی دارد. در روش $sch3$ ، تعداد ۱۱ کاربر از U_B ‌ها ترافیک خود را به فمتوسل واگذار می‌کنند تا فمتوسل به صورت IBFD ترافیک دریافتی را به ماکروسل ارسال کند. به منظور بهبود میزان گذردهی، موقعیت این کاربران توسط مسئله کوله‌پشتی تعیین می‌گردد. از آنجایی که اجرای مسئله بهینه‌سازی کوله‌پشتی زمان‌بر است از روش مکاشفه‌ای که در بخش ۲-۵ معرفی کردیم استفاده می‌کنیم.

در روش $sch3$ تعداد ۲۵ کاربر ترافیک خود را همان‌طور که در شکل ۳-۳ نشان داده شده است یا به طور مستقیم به ماکروسل ارسال می‌کنند یا ترافیک خود را در بازه زمانی α به فمتوسل واگذار می‌کنند تا فمتوسل در بازه زمانی $1-\alpha$ ترافیک دریافتی را به ماکروسل ارسال کند. هدف ما در این بخش تعیین تعداد بهینه کاربرانی است که ترافیک خود را به فمتوسل واگذار می‌کنند و فمتوسل بدون استفاده از IBFD ترافیک دریافتی را در بازه زمانی $1-\alpha$ به ماکروسل ارسال می‌کند. برای تعیین تعداد بهینه کاربران نیاز به حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با دو تابع هدف بیشینه‌سازی گذردهی و کمینه‌سازی توان مصرفی داریم. یعنی هدف ما تعیین تعداد کاربرانی است که ترافیک خود را به فمتوسل واگذار می‌کنند تا فمتوسل بدون استفاده از IBFD ترافیک دریافتی را به ماکروسل ارسال کند به گونه‌ای که تعادلی بین بیشینه‌شدن گذردهی و کمینه‌شدن توان مصرفی برقرار شود. بدین منظور از روش بهینه‌سازی pareto استفاده می‌کنیم.

۳-۲-۱ روش بهینه pareto

مفهوم pareto حالتی از تخصیص منابع است که در آن امکان بهترنمودن وضعیت یک تابع هدف بدون بدکردن وضعیت تابع هدف دیگر وجود ندارد. به عبارت دیگر تخصیص منابعی "بهینه pareto" نامیده



شکل ۵: نرخ گذردهی، زمانی که کاهش تداخل خودی وجود ندارد.

دسته‌بندی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این مقاله را نشان می‌دهد. در ادامه سناریوی شبیه‌سازی شده و نتایج با هم مقایسه خواهد شد.

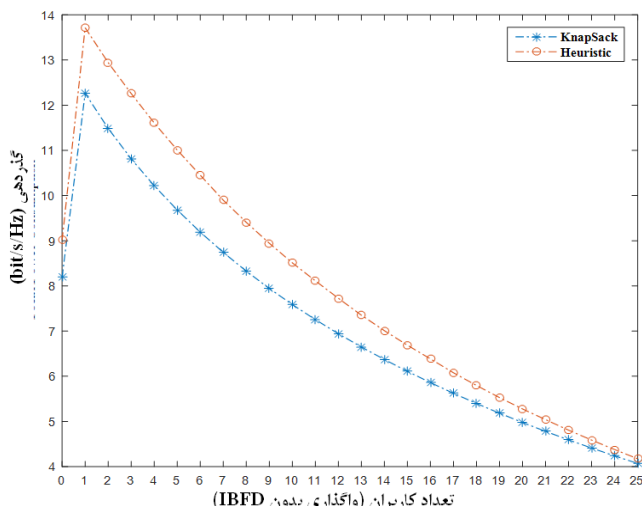
۳-۱ بررسی روش‌های با واگذاری ۱۰۰ درصد

در این بخش به مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال حالت‌های زمان‌بندی ارسال پیشنهادی برای واگذاری ۱۰۰ درصد ترافیک کاربران به فمتوسل می‌پردازیم. ابتدا به بررسی تأثیر IBFD و شرایط به کارگیری آن می‌پردازیم. نسبت گذردهی کل شبکه در حالتی که از IBFD استفاده می‌شود، C_{IBFD} ، به گذردهی کل شبکه در حالتی که از BFD استفاده نمی‌شود، $C_{non-IBFD}$ ، از (۱۷) به دست می‌آید

$$\text{نسبت گذردهی} = \frac{C_{IBFD}}{C_{non-IBFD}} \quad (17)$$

در شکل ۵ تأثیر استفاده از IBFD بر نرخ گذردهی شبکه برای حالت‌های نشان داده شده در شکل ۳-۳ ب و ۳-۳ ج ارائه گردیده است. این نتایج برای حالتی است که هیچ‌گونه کاهش تداخل خودی وجود ندارد. مطابق این شکل، حالت روش زمان‌بندی ارسال داده برای کاربران، کمترین نسبت گذردهی را دارد و به ترتیب برای روش‌های دیگر نسبت گذردهی افزایش یافته است. ملاحظه می‌شود که با کاهش تعداد کاربرانی که از IBFD هم‌زمان با sch استفاده می‌کنند، نسبت گذردهی افزایش می‌یابد ولی هنوز به دلیل عدم کاهش تداخل خودی فناوری IBFD نتوانسته است بهبودی در گذردهی ایجاد کند. برای رسیدن به بازدهی مناسب برای IBFD، نیاز به کاهش تداخل خودی بیشتر از ۷۰ dB داریم [۹].

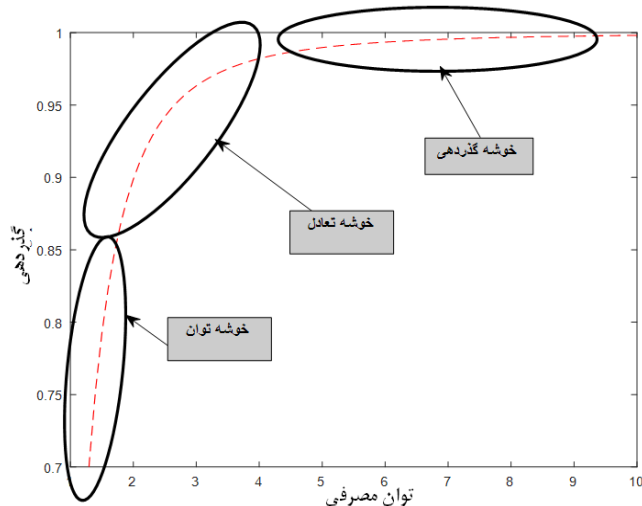
در شکل ۶ میزان بهبود گذردهی برای مقادیر مختلف کاهش تداخل خودی نشان داده شده است. با افزایش میزان کاهش تداخل خودی تا مقدار ۱۰۰ dB روش $sch3$ عملکرد بهتری نسبت به روش‌های دیگر دارد. دلیل این عملکرد این است که کاربران کمتری اطلاعات خود را به صورت IBFD ارسال می‌کنند اما زمانی که کاهش تداخل خودی از ۱۰۰ dB بیشتر می‌شود، در روش‌هایی که کاربران بیشتری اطلاعات خود را به صورت IBFD ارسال می‌کنند عملکرد بهتری مشاهده می‌شود. همچنین زمانی که میزان کاهش تداخل خودی برابر ۱۲۰ dB است، روش No-sch با فناوری IBFD بهبودی در نسبت گذردهی شبکه ایجاد



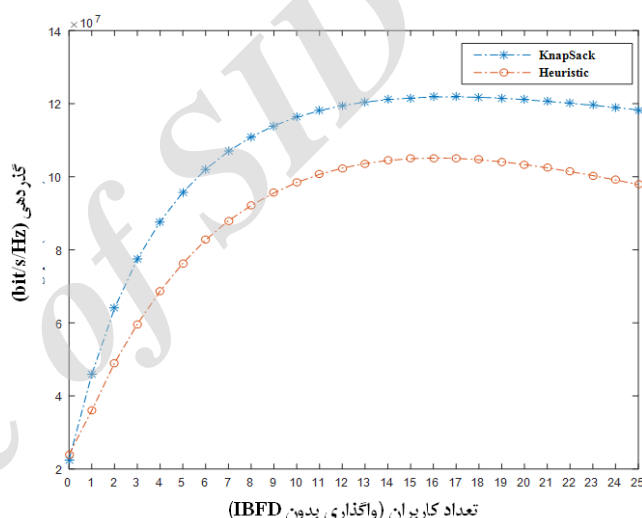
شکل ۹: نمودار توان مصرفی شبکه بر حسب تعداد کاربرانی که ترافیک خود را بدون IBFD به فمتوسل واگذار می‌کنند.

می‌شوند نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود گذردهی شبکه در این روش برای مسئله کوله‌پشتی نسبت به روش مکاشفه‌ای بیشتر است. با توجه به شکل ۸ زمانی که هیچ کدام از کاربران $(U_A + (U_B - U_{B, sch}))$ یعنی کاربرانی که از IBFD استفاده نمی‌کنند، ترافیک خود را در بازه زمانی α به فمتوسل واگذار نمی‌کنند، گذردهی پایین‌ترین مقدار ممکن است. هرچه تعداد کاربرانی که در بازه زمانی α ترافیک خود را به فمتوسل واگذار می‌کنند افزایش می‌یابد، گذردهی نیز افزایش می‌یابد تا جایی که این تعداد کاربران به ۱۳ می‌رسد. از این تعداد کاربر به بعد تقریباً گذردهی ثابت شده و به میزان کمی افت می‌کند. دلیل این افت گذردهی، کاهش بازه زمانی $1-\alpha$ است. با توجه به این که تعداد ۱۱ کاربر از ۳۶ کاربر که توسط مسئله بهینه‌سازی کوله‌پشتی یا روش مکاشفه‌ای انتخاب می‌شوند ترافیک خود را در بازه زمانی $1-\alpha$ به فمتوسل واگذار می‌کنند تا فمتوسل ترافیک دریافتی را به ماکروسل ارسال کند کاهش این بازه زمانی باعث کاهش گذردهی ناشی از فناوری IBFD می‌شود. از آنجایی که فمتوسل در همین بازه زمانی $1-\alpha$ ترافیک دریافتی کاربران در بازه زمانی α را به ماکروسل ارسال می‌کند، کاهش این بازه زمانی به دلیل افزایش کاربران در بازه زمانی α باعث کاهش گذردهی شبکه می‌شود. در نتیجه دلیل ثابت‌شدن و افت کم گذردهی از ۱۳ کاربر به بعد همین کاهش بازه زمانی $1-\alpha$ است.

در شکل ۹ توان مصرفی شبکه در روش واگذاری غیر ۱۰۰ درصد با زمان‌بندی ارسال و IBFD در حالتی که کاربران توسط روش بهینه‌سازی کوله‌پشتی و روش مکاشفه‌ای انتخاب می‌شوند نشان داده شده است. مطابق شکل، توان مصرفی برای روش مسئله بهینه‌سازی کوله‌پشتی نسبت به روش مکاشفه‌ای کمتر است. زمانی که هیچ کاربری ترافیک خود را در بازه زمانی α به فمتوسل واگذار نمی‌کند یعنی $\alpha = 0$ و در طول یک فریم ترافیک خود را به ماکروسل ارسال می‌کند، توان مصرفی پایین است. با افزایش تعداد کاربرانی که در بازه زمانی α ترافیک خود را به فمتوسل واگذار می‌کنند توان مصرفی افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. دلیل افزایش توان مصرفی ارسال مجدد در بازه زمانی α توسط کاربرانی که در بازه زمانی α ترافیک خود را مستقیماً به ماکروسل ارسال می‌کنند است و دلیل کاهش توان مصرفی با افزایش تعداد کاربران، افزایش تعداد کاربرانی که ترافیک خود را به فمتوسل واگذار می‌کنند به دلیل پایین‌بودن تلفات مسیر در ارسال ترافیک کاربران به فمتوسل نسبت به ماکروسل است.



شکل ۷: منحنی Pareto برای دو تابع هدف بهینه‌سازی گذردهی و کمینه‌سازی توان مصرفی [۱۰].



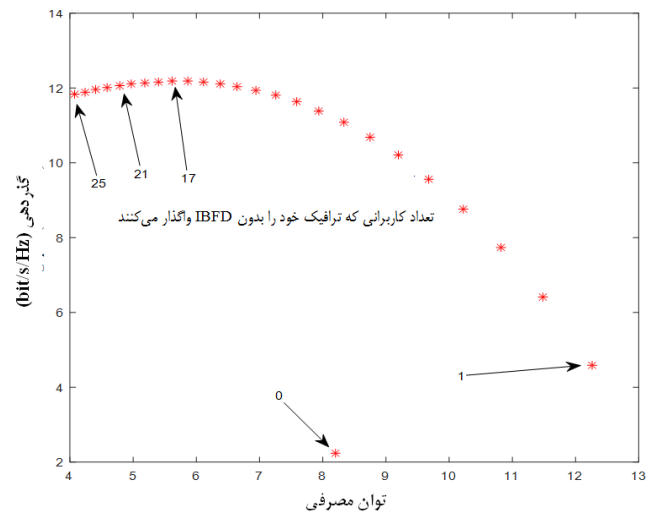
شکل ۸: نمودار گذردهی شبکه بر حسب تعداد کاربرانی که ترافیک خود را بدون IBFD به فمتوسل واگذار می‌کنند.

می‌شود که بهتر شدن وضعیت یک تابع هدف باعث بدتر شدن وضعیت تابع هدف دیگر شود. در شکل ۷ منحنی Pareto برای دو تابع هدف بهینه‌سازی گذردهی و کمینه‌سازی توان مصرفی نشان داده شده است [۱۰]. این منحنی به سه بخش تقسیم می‌شود: (۱) خوشه توان، (۲) خوشه گذردهی و (۳) خوشه تعادل. در خوشه توان با افزایش گذردهی یا بهبود وضعیت تابع هدف اول یعنی بهینه‌سازی گذردهی، تغییرات بد وضعیت تابع هدف دیگر یعنی کمینه‌سازی توان مصرفی کم است و این حالت برای زمانی که محدودیت در هزینه‌کردن توان داریم مناسب است یعنی هدف کمینه‌کردن توان مصرفی بدون توجه به میزان گذردهی است. در خوشه گذردهی با افزایش گذردهی تغییرات بد وضعیت تابع هدف دیگر یعنی کمینه‌سازی توان مصرفی زیاد می‌شود و در این حالت محدودیتی در هزینه‌کردن توان مصرفی نداریم و هدف اصلی رسیدن به گذردهی بالا است. در خوشه تعادل برقرار کردن تعادلی بین دو تابع هدف مهم است یعنی در این حالت تخصیص منابع به گونه‌ای انجام می‌شود که تعادل بین دو تابع هدف یعنی بهینه‌سازی گذردهی و کمینه‌سازی توان مصرفی ایجاد شود.

در شکل ۸ گذردهی شبکه در روش واگذاری غیر ۱۰۰ درصد در حالتی که کاربران توسط روش بهینه‌سازی کوله‌پشتی و روش مکاشفه‌ای انتخاب

مراجع

- [1] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, and A. Gatherer, "Femtocell networks: a survey," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 9, pp. 59-67, Sept. 2008.
- [2] D. Kim, H. Lee, and D. Hong, "A survey of in-band full-duplex transmission: from the perspective of PHY and MAC layers," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2017-2046, Feb. 2015.
- [3] J. I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication," in *Proc. of the ACM 16th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking*, 12 pp., Chicago, Illinois, USA, 20-24 Sept. 2010.
- [4] E. Aryafar, M. A. Khojastepour, K. Sundaresan, S. Rangarajan, and M. Chiang, "MIDU: enabling MIMO full duplex," in *Proc. of the ACM 18th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking*, pp. 257-268, Istanbul, Turkey, 22-26 Aug. 2012.
- [5] K. S. Munasinghe, I. Elgendi, A. Jamalipour, and D. Sharma, "Traffic offloading 3-tiered SDN architecture for denseNets," *IEEE Network*, vol. 31, no. 3, pp. 56-62, May 2017.
- [6] D. C. Oh, H. C. Lee, and Y. H. Lee, "Power control and beamforming for femtocells in the presence of channel uncertainty," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 6, pp. 2545-2554, Jun. 2011.
- [7] T. M. Nguyen, T. Q. Queki, and H. Shin, "Opportunistic interference alignment in MIMO femtocell networks," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Information Theory Proc., ISIT'12*, pp. 2631-2635, Cambridge, MA, USA, 1-6 Jul. 2012.
- [8] D. Zarbouti, G. Tsoulos, and G. Athanasiadou, "4G multicell systems with in-band full duplex relays: using beamforming to lower self-interference and/or transmitted powers," in *Proc. IEEE 81st. Vehicular Technology Conf., VTC Spring'15*, 6 pp., Glasgow, UK, 11-14 May 2015.
- [9] DUPLQ, D4.1.1. Performance of Full-Duplex Systems, Jan. 2014. Available: <http://www.fp7-duplo.eu/index.php/deliverables>.
- [10] J. Michanan, R. Dewri, and M. J. Rutherford, "Understanding the power-performance tradeoff through Pareto analysis of live performance data," in *Proc. IEEE Int. Green Computing Conf., IGCC'14*, 8 pp., Dallas, TX, USA, 3-5 Nov. 2014.



شکل ۱۰: نمودار گذردهی بر حسب توان مصرفی.

این مشاهدات ما را بر آن داشت که به برقرار کردن تعادل بین دو تابع هدف یعنی بیشینه‌سازی گذردهی و کمینه‌سازی توان مصرفی بپردازیم. بدین منظور از روش بهینه‌سازی Pareto استفاده می‌کنیم. در شکل ۱۰ نمودار گذردهی بر حسب توان مصرفی شبکه برای روش کوله‌پشتی آمده که با توجه به منحنی Pareto نشان داده شده در شکل ۷ و خوشه‌های تعریف‌شده، مقادیر گذردهی و توان مصرفی برای حالت‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق این شکل تعداد بهینه کاربرانی که ترافیک خود را در بازه زمانی α به فمتوسل واگذار می‌کنند برای خوشه توان تعداد ۲۶ کاربر، برای خوشه گذردهی تعداد ۱۷ کاربر و برای خوشه تعادل بین ۱۷ تا ۲۶ کاربر می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور افزایش میزان گذردهی شبکه‌های سلولی، به استفاده از واگذاری ترافیک به فمتوسل هم‌زمان با استفاده از فناوری IBFD در فمتوسل پرداختیم. نتایج عددی حاصل از بررسی اثر استفاده از IBFD نشان می‌دهد چنانچه هم‌زمان با حالت‌های زمان‌بندی ارسال از روش‌های کاهش تداخل خودی در آنتن هم بهره گرفته شود، گذردهی تا بیشتر از ۲ برابر افزایش می‌یابد. از میان روش‌های پیشنهادی برای زمان‌بندی، روش $sch3$ که تعداد کاربران کمتری یعنی ۱۱ کاربر برای ارسال ترافیک خود به ماکروسل از فناوری IBFD استفاده می‌کردند، عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشت.

برای انتخاب کاربرانی که از IBFD استفاده می‌کنند از مسئله بهینه‌سازی کوله‌پشتی استفاده گردید. همچنین یک روش مکاشفه‌ای نیز به منظور کاهش زمان محاسبات مسئله بهینه‌سازی ارائه گردید. با استفاده از حل این مسأله، حداکثر گذردهی شبکه تعیین گردید. در نهایت برای مقایسه عملکرد روش واگذاری غیر ۱۰۰ درصد از روش بهینه Pareto با توابع هدف بیشینه‌سازی گذردهی شبکه و کمینه‌سازی توان مصرفی شبکه استفاده شد. تعداد کاربرانی که ترافیک خود را به فمتوسل واگذار می‌کنند، برای سه مورد، الف) وقتی که تغییرات کم توان مصرفی به ازای گذردهی‌های مختلف مورد نظر باشد، ب) فقط بیشینه‌سازی گذردهی بدون توجه به توان مصرفی مورد نظر باشد، ج) بیشینه‌سازی گذردهی شبکه و کمینه‌سازی توان مصرفی شبکه با هم مورد نظر باشد، تعیین شد.

محمد ملاشاهی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی مخابرات و الکترونیک دریایی در سال ۱۳۹۳ در دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار و مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات گرایش سیستم در سال ۱۳۹۶ در دانشگاه سیستان و بلوچستان به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی دکتری مهندسی برق- مخابرات گرایش سیستم در دانشگاه سیستان و بلوچستان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: اختصاص منابع در شبکه‌های سلولی، واگذاری داده، شبکه‌های سنسوری، شبکه‌های کامپیوتری و رباتیک.

مهرجو مهرجو تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی کنترل سیستم‌ها و ابزار دقیق و کارشناسی ارشد مخابرات بترتیب در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۶ از دانشگاه فردوسی مشهد و در مقطع دکتری شبکه‌های بی‌سیم مخابراتی در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه واترلو کانادا به پایان رسانده است و هم‌اکنون استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه سیستان و بلوچستان می‌باشد. نام‌برده در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱ و ۱۳۹۷ همکاری تحقیقاتی به‌ترتیب با دانشگاه‌های واترلو، وسترن انتاریو و تورنتو کانادا داشته است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: کاربردهای جدید شبکه‌های بی‌سیم، ارزیابی و بهینه‌سازی کارایی پروتکل‌های شبکه‌های بی‌سیم.

مجید عبیری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ در دانشگاه سیستان و بلوچستان به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی دوره دکتری مهندسی برق گرایش مخابرات دانشگاه سیستان و بلوچستان است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مخابرات مشارکتی و تخصیص منابع در شبکه‌های سلولی LTE و 5G، شبکه‌های ناهمگن، انتقال ویدئو در شبکه‌های مخابرات سلولی و طراحی شبکه سلولی.