مسيريابي بهينه چند مسيري در شبكه‌هاي مش بي‌سيم و تاثير آن بر كارايي شبكه

بهادر بخشي
دانشكده مهندسي كامپيوتر و فناوري اطلاعات
دانشگاه صنعتي اميركبير
bbakhshi@aut.ac.ir

سياوش خرسندي
دانشكده مهندسي كامپيوتر و فناوري اطلاعات
دانشگاه صنعتي اميركبير
khorsand@aut.ac.ir

چكيده: در اين مقاله استفاده از مسيريابي چند مسيري در شبكه‌هاي مش بي‌سيم بررسي و مدلي براي مسيريابي چند مسيري بهينه ارايه مي‌گردد. بعلاوه تاثير مسيريابي چندمسيري بر كارايي شبكه را بررسي و روابط مربوط ميزان تاثير آن را بدست مي‌آوريم. مسيريابي چند مسيري و تقسيم جريان به عنوان يكي از روش‌هاي بهبود كارايي در شبكه سيمي مورد توجه بوده است. اما در شبكه‌هاي بي‌سيم به دليل تداخل بين گره‌ها و محدود بودن منابع شبكه، مسيريابي چند مسيري و تقسيم جريان ممكن است منجر به كاهش كارايي شود. در اين مقاله، سه معيار كارايي شبكه شامل گذردهي كل شبكه، كمترين پهناي‌باند عادلانه جريانها و تعداد درخواست‌هاى پذيرفته شده با نيازمندي پهناي‌باند مشخص را در نظر مي‌گيريم. با مدل‌كردن مسئله به صورت يك مسئله بهينه‌سازي، مقدار بهينه هر یک از اين معيارها را در صورت نياز به مسيريابي چند مسيري و بدون آن محاسبه كرده و باهم مقايسه مي‌كنيم. نتايج بدست آمده نشان مي‌دهد كه استفاده از مسيريابي چند مسيري، تاثير چنداني بر معيارهاي كارايي شبكه ندارد و لذا مدل بهينه‌سازي مبتني بر چند مسيري مي‌تواند بصورت تقريب مناسبي از الگوريتم‌هاي تك مسيري مورد استفاده قرار گيرد.

واژه‌هاي كليدي: شبكه‌هاى مش بي‌سيم، مسيريابي چند مسيري، تقسيم جريان، بهينه‌سازي، عدالت، كيفيت سرويس.

۱- مقدمه

مسيريابي چند مسيري، به مسيريابي اطلاق مي‌شود كه در آن، بيش از يك مسير بين مبدا و مقصد پيدا مي‌شود. با وجود اينكه در حال حاضر در اكثر شبكه‌ها از مسيريابي تك مسيري استفاده مي‌شود، اما مسيريابي چند مسيري به عنوان يكي از موضوعات تحقيقي داغ مورد توجه محققان بوده و الگوريتم‌ها و پروتكل‌هاي متعددي براي اين منظور ارايه شده است.

از اين تكنيك مسيريابي براي اهداف مختلفي از جمله مقابله با خرابي، افزايش گذردهي شبكه و بهبود پارامترهاي كيفيت سرويس مانند تاخير انتها به انتها و قابليت اطمينان استفاده مى شود [1]. براي مقابله با خرابي، چندين مسير بين مبدا و مقصد پيدا مى شود. يكى از آنها به عنوان مسير اصلي استفاده شده و در صورتي بروز خرابي در مسير اصلي، گره مبدا مي‌تواند به سادگي از مسيرهاي پشتيبان استفاده كند. براي افزايش گذردهي شبكه، جريان ارسالي در مبدا به چندين مسير تقسيم شده و با ارسال همزمان داده بر روي چندين مسير، گذردهي افزايش مي‌يابد. يكي از مشكلات اين روش رسيدن خارج از نوبت بسته‌ها به مقصد است كه توسط پروتكل‌هاي لايه بالاتر مديريت مي‌شود. براي بهبود قابليت اطمينان شبكه (افزايش احتمال رسيدن بسته‌ها به مقصد)، مبدا چندين كپي از هر بسته را با استفاده از چندين مسير يافت شده ارسال مي‌كند.

استفاده از مسيريابي چند مسيري براي مقابله با خرابي و افزايش قابليت اطمينان شبكه معمولا در شبكه‌هاي موردي سيار مد نظر بوده تا بدون نياز به مسيريابي مجدد، مسير بين مبدا و مقصد برقرار باشد. مسيرهايي كه در اين حالت استفاده مي‌شود، نوعا بايد node-disjoint يا link-disjoint باشند. در شبكه‌هاي سيمي، از مسيريابي چند مسيري به همراه تقسيم جريان براي افزايش گذردهي شبكه استفاده مي‌شود.

در چندين سال اخير نسل جديدي از شبكه‌هاي بي‌سيم معرفي شده است كه به اسم شبكه‌هاي مش بي‌سيم (WMN) شناخته مي‌شود. اين شبكه‌ها، شبكه‌هاي بي‌سيم چندگام با زير ساخت ثابت هستند [2]. با توجه به ثابت بودن اين زيرساخت و عدم وجود محدوديت توان مصرفي در آنها، توپولوژي شبكه‌هاي WMN مانند شبكه‌هاي موردي سيار دائما در حال تغيير نيست. يكي از كاربردهاي اصلي اين شبكه‌ها، استفاده از آنها به عنوان شبكه‌هاي دسترسي است [2]. براي اين منظور، افزايش ظرفيت شبكه و بهبود گذردهي آنها به عنوان مسئله اصلي مطرح است. عامل اصلي محدود كننده ظرفيت شبكه، وجود تداخل است كه باعث مي‌شود در زمان ارسال داده بر روي يك پيوند، همه پيوندهايي كه در ناحيه تداخل اين پيوند قرار دارند غير قابل استفاده باشند.

يكي ديگر از كاربردهاي مسيريابي چند مسيري و تقسيم جريان، ساده‌سازي مدل‌هاي بهينه‌سازي شبكه است. در بسيار از مسائل شبكه مانند مسيريابي حساس به كيفيت سرويس و توزيع بار، براي بدست آوردن مقدار بهينه معيار ارزيابي، آن مسئله به صورت يك مسئله

بهينه‌سازي مدل مي‌شود. در اين مدل‌ها، اگر فرض مسيريابي چند مسيري و تقسيم جريان وجود نداشته باشد، مدل بهينه‌سازي از نوع Mixed Integer Programming خواهد بود كه در حالت كلي NP-Complete است. بنابراين براي ساده‌سازي مدل، از مسيريابي چند مسيري و تقسيم جريان استفاده مي‌شود. نتيجه بدست آمده از حل اين مدل (كه بعد از اين ساده‌سازي عموما از نوع Linear Programming است) به عنوان حد بالا يا پايين كارايي در نظر گرفته مي‌شود.

ما در اين مقاله به بررسي تاثير استفاده از مسيريابي چند مسيري و تقسيم جريان بر افزايش كارايي شبكه خواهيم پرداخت. مهمترين كارهاي انجام شده در اين مقاله به اين شرح است:

- در نظر گرفتن سه معيار كارايي مختلف براى شبكه: ۱) گذردهي كل شبكه بدون در نظر گرفتن عدالت، ۲) كمترين پهناي‌باند در دسترس هر جريان با وجود عدالت كامل و ۳) تعداد جريان‌ها پذيرفته شده با نيازمندي پهناي‌باند مشخص.
- ارايه مدل‌هاي بهينه‌سازي براي بدست آوردن معيارهاي مذكور.
- شبيه‌سازي شبكه و بدست آوردن مقدار بهينه معيارهاي فوق براي تعداد جريان‌هاي مختلف و مقايسه آنها.

ساختار اين مقاله به اين شرح است كه در بخش ۲، كارهاي مرتبط مرور مي‌شود، بخش ۳ مسئله مورد بحث را معرفي مي‌كند. مدل شبكه و تداخل در بخش ۴ ارايه شده است. بخش ۵ به ارايه مدل‌هاي بهينه‌سازي اختصاص دارد. نتايج آزمايش‌ها در بخش ۶ آمده و بخش ۷ جمع بندي اين مقاله است.

۲- كارهاي مرتبط

كارهاي متعددي بر روي مسيريابي چند مسيري در شبكه‌هاي سيمي و بي‌سيم انجام شده است. در شبكه‌هاي سيمي، پروتكل‌هاي استاندارد مانند OSPF، قابليت مسيريابي چند مسيري و توزيع بار بر روي مسيرهاي با وزن يكسان را دارا هستند. از ديگر الگوريتم‌هاي مسيريابي چند مسيري حالت پيوند در شبكه‌هاي سيمي مي‌توان به [3] اشاره كرد. در [4] الگوريتم مسيريابي چند مسيري از نوع الگوريتم‌هاي بردار فاصله پيشنهاد شده است كه داراي دور نيست و مشكل counted-to-infinity را ندارد.

در شبكه‌هاي بي‌سيم الگوريتم‌هاي مسيريابي چند مسيري متعددي مبتني بر الگوريتم‌هاي AODV يا DSR وجود دارد. اين الگوريتم‌ها در دو دسته كلي قرار مي‌گيرند: ۱) الگوريتم‌هايي كه تنها مرحله كشف مسير آنها چند مسيري است و از چند مسير پيدا شده به صورت همزمان استفاده نمي‌كنند. ۲) الگوريتم‌هايي كه جريان را بر روي چند مسير تقسيم كرده و به صورت همزمان ارسال مي‌كنند. برخي از الگوريتم‌هاي مسيريابي چند مسيري كه بر اساس DSR ارايه شده است عبارتند از [5]، [6] و [7] كه [5] از نوع ۱ و [6] و [7] از نوع ۲ است. در [5] دو الگوريتم مختلف ارايه شده است. در الگوريتم اول، تنها گره مبدا چندين مسير به مقصد را نگهداري مي‌كند. در صورت خرابي در مسير فعال، خرابي به اطلاع مبدا مي‌رسد و آن مسير جايگزين را انتخاب كند. در الگوريتم دوم، هر گره مياني مسير، چندين مسير به مقصد نگهداري مي‌كند و به محض اينكه پيوندي در مسير فعال قطع شد، گره متصل به اين پيوند از مسير جايگزين استفاده مي‌كند. مسيرهايي كه در اين الگوريتم‌ها مورد استفاده قرار مي‌گيرد، مسيرهاي link-disjoint هستند. در [6]، دو مسيري كه بين مبدا و مقصد پيدا مي‌شود، maximally disjoint هستند و ارسال بسته‌ها به صورت همزمان بر روي اين دو مسير انجام مي‌شود. در [7]، پارامتر كيفيت سرويس به صورت قابليت اطمينان انتها به انتها در نظر گرفته مي‌شود. قابليت اطمينان انتها به انتها با استفاده از چندين مسير، برابر مجموع قابليت اطمينان هر يك از مسيرهاست. بنابراين با در اختيار داشتن قابليت اطمينان مورد نياز، به تعداد كافي مسير پيدا مي‌شود و بسته‌ها به صورت همزمان بر روي آنها ارسال مي‌شود. [8] هم با هدفي مشابه از مسيريابي چند مسيري استفاده كرده است، اما برخلاف [7] چندين كپي از اطلاعات را ارسال نمي‌كند، بلكه اطلاعات در مبدا به نحوي مناسب تقسيم شده و هر بخش از طريق يك مسير مجزا ارسال مي‌شود. تحليل ارايه شده در [8] نشان مي‌دهد كه با استفاده از اين روش قابليت اطمينان انتها به انتها با سرآيند نه چندان زياد افزايش مي‌يابد.

يكي از الگوريتم‌هاي مبتني بر AODV در [9] ارايه شده است. اين الگوريتم مسيرهاي link-disjoint بين مبدا و مقصد را پيدا مي‌كند. در اين الگوريتم، در هر گره ليستي از مسيرها به مقصد نگهداري مي‌شود. در [9] نشان داده شده است كه مكانيزم جلوگيري از ايجاد دور موجود در الگوريتم AODV در اين حالت كار نمي‌كند و با توسعه اين مكانيزم، عدم وجود دور در مسيرها تضمين شده است.

با وجود اينكه الگوريتم‌هاي ذكر شده، براي شبكه‌هاي بي‌سيم ارايه شده‌اند ولي تداخل در شبكه‌هاي بي‌سيم را در نظر نمي‌گيرند و از معيارهاي مورد استفاده در شبكه‌هاي سيمي مانند link-disjoint استفاده مي‌كنند. يكي از اولين كارهايي كه وجود تداخل را در نظر گرفت [10] است كه مفهوم zone-disjoint را در مسيريابي چند مسيري معرفي كرد.

روش‌هاي ارايه شده براي شبكه‌هاي ad hoc در شبكه‌هاي مش بي‌سيم كاربردي ندارد، زيرا مسئله مقابله با خرابي در شبكه‌هاي مش چندان مطرح نيست و هدف افزايش كارايي شبكه است. نزديكترين كار انجام شده به اين مقاله، [11] است. در [11] با استفاده از مسيريابي چند مسيري، network coding و opportunistic routing كارايي شبكه بهبود داده شده و با ارايه يك مدل بهينه‌سازي نشان داده شده است كه كارايي شبكه در زمان استفاده از مسيريابي چند مسيري بهتر است. ما نيز در اينجا تاثير استفاده از مسيريابي چند مسيري بر روي كارايي شبكه را بررسي خواهيم كرد با اين تفاوت‌ها كه ما مسيريابي كيفيت سرويس را نيز در نظر خواهيم گرفت و مسيريابي مورد بررسي

در اينجا مسيريابي ساده‌اي است و از مكانيزم‌هاي پيچيده‌اي كه استفاده از آنها در عمل ساده نيست مانند network coding، استفاده نمي‌شود.

۳- معرفي مسئله

ما در اينجا به مطالعه مسيريابي چند مسيري از نظر كارايي شبكه خواهيم پرداخت. پارامترهاي متعددي را مي‌توان براي ارزيابي كارايي شبكه به عنوان معيار قرار داد. در اينجا از سه معيار جداگانه استفاده خواهيم كرد كه عبارتند از:

معيار اول: گذردهي كل شبكه بدون در نظر گرفتن عدالت. در اين حالت هدف تعيين ميزان پهناي‌باند هر جريان است به نحوي كه مجموع كل جريان‌هاي اختصاص داده شده بيشينه شود.

معيار دوم: كمترين پهناي‌باند در اختيار هر جريان با در نظر گرفتن عدالت كامل بين جريان‌ها. در اين حالت هدف بيشينه كردن مقدار α است به نحوي كه پهناي‌باند در اختيار هر جريان از α بزرگتر باشد.

معيار سوم: تعداد جريان‌هاي پذيرفته شده با پهناي‌باند مورد نياز مشخص. در اين حالت علاوه مبدا و مقصد جريان‌ها، مقدار پهناي‌باند مورد نياز آنها نيز مشخص است. جريان زماني پذيرفته مي‌شود كه مسيري با پهناي‌باند آزاد كافي براي آن وجود داشته باشد. در اين حالت، هدف بيشينه كردن تعداد جريان‌هايي است كه پذيرفته مي‌شود.

براي بررسي تاثير استفاده از مسيريابي چند مسيري و تقسيم جريان بر روي اين معيارها، هر يك از اين معيارها در دو حالت (الف) بدون استفاده از مسيريابي چند مسيري و (ب) با استفاده از مسيريابي چند مسيري و تقسيم جريان بدست آمده و باهم مقايسه مي‌شود. بدست آوردن اين معيارها در عمل كار ساده‌اي نيست، براي اين منظور بايستي ۶ الگوريتم مسيريابي طراحي شود. در كارهاي قبلي الگوريتم‌هاي مختلف براي اين موارد ارايه شده است اما استفاده از آنها اين مشكل را ايجاد مي‌كند كه نتايج حاصل از مقايسه آنها در عمل مقايسه الگوريتم‌هاي استفاده شده است نه تاثير استفاده يا عدم استفاده از مسيريابي چند مسيري. براي حل اين مشكل، در اينجا به دنبال مقدار بهينه هر يك از اين معيارها هستيم. براي بدست آوردن مقدار بهينه هريك از اين معيارها، از مدل‌سازي مسئله به صورت يك مسئله بهينه‌سازي و حل آن استفاده خواهد شد. بنابراين ۶ مسئله بهينه‌سازي ارايه شده و با حل هر يك از آنها مقدار بهينه اين معيارها در حالت‌هاي (الف) و (ب) بدست خواهد آمد. براي توسعه اين مدل‌هاي بهينه‌سازي، به يك مدل مجرد از شبكه و تداخل نياز است. اين مدل‌ها و نحوه محاسبه پهناي‌باند آزاد در بخش بعد ارايه شده است.

٤- مدل شبكه و تداخل و محاسبه پهناي‌باند

در اين بخش در ابتدا مدل مجرد شبكه و سپس مدل تداخل معرفي مي‌شود. در نهايت نحوه محاسبه پهناي‌باند آزاد هر پيوند مورد بحث قرار مي‌گيرد.

٤-١ مدل شبكه

شبكه‌اي كه در اين مقاله مد نظر است، شبكه بي‌سيم چندگام است. فرض مي‌شود كه: ۱) توپولوژي شبكه در طول مدت زمان مورد نظر تغيير پيدا نمي‌كند. ۲) همه گره‌هاي آن تك راديويي هستند، از آنتن‌هاي omni-directional استفاده مي‌كنند و همه راديوها در يك كانال فركانسي يكسان كار مي‌كنند. ۳) همه گره‌ها داراي برد ارسال يكسان TR و برد تداخل يكسان IR هستند و $IR = r.TR$ و $r \geq 1$. ۴) ظرفيت كانال براي همه پيوندها ثابت و برابر C است. ۵) همه جريان‌ها نيز به صورت fluid flow مدل مي‌شوند.

با اين فرضيات، شبكه به صورت يك گراف جهت‌دار $G = (V,E)$ مدل مي‌شود كه در آن $\forall v \in V$ معادل يك گره در شبكه است و $(u,v) \in E$ اگر و تنها اگر $d(u,v) \leq TR$ كه در آن $d(u,v)$ فاصله اقليدسي بين u و v است.

٤-٢ مدل تداخل

برخلاف شبكه‌هاي سيمي، تنها مدل‌سازي توپولوژي شبكه كافي نيست و علاوه بر آن، به مدلي براي مدل‌سازي تداخل نيز نياز است. دو مدل رايج براي اينكار مدل protocol و مدل physical است [12]. مدل protocol تداخل را به صورت صفر و يك در نظر مي‌گيرد و براي مدل‌هاي مجرد مناسب‌تر است. در اينجا نيز از آن استفاده مي‌شود. علاوه بر آن فرض مي‌شود كه لايه MAC از نوع 802.11 بوده و مكانيزم RTS/CTS فعال است.

مجموعه تداخلي (u,v) كه با I_{uv} نشان مي‌دهيم، شامل خود (u,v) و همه پيوندهايي است كه طبق تعريف زير با (u,v) تداخل دارند.

تعريف ۱: پيوند (a,b) در صورتي با (u,v) تداخل دارد كه اين دو نتوانند به صورت همزمان ارسال كنند.

بنابراين اگر يكي از شرايط زير برقرار باشد، (a,b) با (u,v) تداخل دارد:

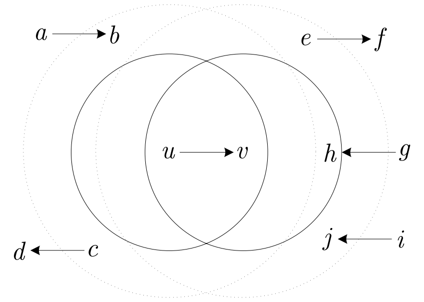
۱- $d(u,a) \leq IR$: زيرا a ارسال u را sense مي‌كند و برعكس.

۲- $d(u,b) \leq IR$: زيرا b ارسال u را sense مي‌كند و به بسته‌هاي RTS رسيده از a پاسخ نمي‌دهد.

۳- $d(a,v) \leq IR$: زيرا v ارسال a را sense كرده و به RTS رسيده از u پاسخ نمي‌دهد.

۴- $d(v,b) \leq TR$: زيرا v (b) بسته‌هاي CTS از b (v) را دريافت كرده و به RTSهاي u (a) پاسخ نمي‌دهد.

به عنوان مثال، شكل ۱ را در نظر بگيريد. در اين شكل، پيوند (u,v)، برد ارسال u و v با دايره ممتد و برد تداخل آنها با دايره نقطه‌چين نشان داده شده است. در اين شكل، (c,d) به دليل شرط ۱، (a,b) به دليل شرط ۲، (e,f) به دليل شرط ۳ و (g,h) به دليل شرط ٤ با (u,v) تداخل دارند. اما (i,j) در هيچ يك از شرط‌ها صدق نمي‌كند و بنابراين $(i,j) \notin I_{uv}$.



شکل ۱. پیوند (u,v) و پیوندهاي تداخلي با آن

۳-٤ محاسبه پهناي‌باند

با توجه به تعريف ۱، (u,v) نمي‌تواند به صورت همزمان با هيچ يك از $(a,b) \in I_{uv}$ فعال شود، بنابراين ظرفيت کانال را با آنها بـه اشـتراك گذاشته است. اما بايستي به اين نکته دقـت کـرد کـه دو عـضو I_{uv} در صورتي که باهم ديگر تداخل نداشته باشـند مـي‌تواننـد همزمـان فعـال شوند. براي مثال در شکل ۱ (c,d) و (e,f) مي‌توانند همزمان ارسـال کنند. اين مسئله محاسبه پهناي‌باند آزاد پيوند را مـشکل مـي‌سـازد. در [13] با استفاده از مفهوم گراف تداخل، شـرط‌هـاي لازم و کـافي بـراي وجود يك زمان‌بندي شـدني در شـبکه بدسـت آمـده و رابطـه‌اي بـراي محاسبه پهناي‌باند آزاد پيوند ارايه شده اسـت. امـا بـراي محاسـبه ايـن رابطه بايستي Maximal Clique که اين پيوند در آن قرار دارد را پيـدا کرد که خود اين مسئله، NP-Complete است. با وجود اينکه در [13] الگوريتم تقريبي براي محاسبه Maximal Clique پيشنهاد شده اسـت ولي بررسي‌هاي انجام شده در [14] نشان مي‌دهد که اين رابطه تنها در صورتي برقرار است کـه زمـان‌بنـد مـورد اسـتفاده در لايـه MAC يـك زمان‌بند ايده‌آل باشـد و الگـوريتم زمـان‌بنـدي غيـرهمگـام موجـود در 802.11 بسيار بدتر از الگوريتم ايده‌آل عمل مي‌کنـد. [13] محـدوديت ديگري به اسم row constraint براي محاسبه پهنـاي‌بانـد ارايـه کـرده است. اين محدوديت بدترين حالت ممکن است امـا محاسـبه آن بـسيار ساده است و در اينجا نيز از آن اسـتفاده مـي‌شـود. ايـن محـدوديت بـه صورت زير بيان مي‌شود.

$$\sum_{(a,b)\in I_{uv}} f_{ab} \le C \qquad \forall (u,v) \in E \tag{۱}$$

که در آن f_{ab} کل جريـاني اسـت کـه از طريـق پيونـد (a,b) ارسـال مي‌شود.

۵- مدل‌هاي بهينه‌سازي براي محاسبه معيارها

اين بخـش شـامل ۳ زيـربخش اسـت کـه در هـر زيـربخش، ۲ مـسئله بهينه‌سازي براي محاسبه مقدار بهينه يکي از معيارهاي اول تا سوم ارايه مي‌شود. يکي از اين دو مسئله با استفاده از مسيريـابي چنـد مـسيري و تقسيم جريان، مقدار بهينه معيار مورد نظر را بدست مي‌آورد و ديگـري بدون استفاده از آنها. در همه اين مدل‌هاي بهينـه‌سـازي، گـراف شـبکه $G=(V,E)$، I_{uv} و مجموعه درخواست‌هاي $Q=\{(s_q,d_q,b_q)\}$ به عنوان ورودي داده مي‌شود. که در آن s_q، d_q و b_q به ترتيب مبـدا، مقصد و پهناي‌باند مورد نياز درخواست q است. بايستي دقت کـرد کـه b_q تنها براي معيار سوم استفاده مـي‌شـود و در معيـارهـاي اول و دوم کاربردي ندارد چرا که براي محاسبه اين دو معيار مقدار پهناي‌باند بهينه هر جريان، z_q، محاسبه مي‌شـود. در ايـن مـدل‌سـازي‌هـا متغيـر x^q_{uv} ميزان جرياني از درخواست q است که بر روي پيوند (u,v) مسيريابي شده است.

۵-۱ مدل بهينه‌سازي بر اساس معيار اول

معيار اول گذردهي کل شبکه است و مقدار بهينه آن، بيـشينه مجمـوع کل پهناي‌باندي است که به مجموعه درخواست‌ها اختـصاص داده شـده است. در ابتدا حالتي را در نظر مي‌گيـريم کـه در آن امکـان مـسيريابي چنـد مـسيري و تقـسيم جريـان وجـود دارد. در ايـن حالـت تنهـا دو محـدوديت اصـلي وجـود دارد: ۱) محـدوديت بقـاي جريـان (flow conservation) و ۲) محـدوديت ظرفيـت پيونـدهـا. بنـابراين مـسئله بهينه‌سازي به صورت زير خواهد بود:

Problem: Multi-Path Throughput (**MPT**)
Objective:

$$\text{Maximize} \quad \sum_{q\in Q} z_q \tag{۲}$$

Subject to:

$$\sum_{(v,u)\in E} x^q_{vu} - \sum_{(u,v)\in E} x^q_{uv} = 0, \quad \forall u \in V \setminus \{s_q,d_q\}, \quad \forall q \in Q \tag{۳}$$

$$\sum_{(s_q,u)\in E} x^q_{s_q u} = z_q, \quad \forall q \in Q \tag{۴}$$

$$\sum_{(u,d_q)\in E} x^q_{u d_q} = z_q, \quad \forall q \in Q \tag{۵}$$

$$\sum_{q\in Q}\sum_{(i,j)\in I_{uv}} x^q_{ij} \le C, \quad \forall (u,v) \in E \tag{۶}$$

محدوديت‌هاي (۳)، (۴) و (۵) محدوديت بقاي جريـان را بـرآورده مي‌کنند. رابطه (۳) الزام مي‌کند که هيچ جرياني در هيچ گرهي به غيـر از مبدا و مقصد جريان ايجاد نشده يا از بين نرود. رابطـه‌هـاي (۴) و (۵) به ترتيب بيان مي‌کنند که جريان خروجي از مبـدا و ورودي بـه مقـصد برابر z_q باشد. رابطه (۶) محدوديت ظرفيت پيوند - همان (۱) - اسـت که با استفاده از x^q_{uv} نوشته شده است. با توجه بـه فرمـول‌بنـدي بـالا، ميزان پهناي‌باند اختصاص داده شده به جريان q برابر z_q خواهد بود و هدف نيز بيشينه کردن مجموع کـل جريـان‌هـاي اختـصاص داده شـده است. هيچ محدوديتي بر روي متغير x^q_{uv} وجود ندارد، ايـن متغيـر هـر مقدار دلخواهي مي‌تواند داشته باشد که اين به معناي تقسيم جريان بـه هر ميزان دلخواه در هر گره و ارسال آن بر روي مسيرهاي مختلف است.

باتوجه به توضيحات فـوق، بـراي حـذف قابليـت مـسيريابي چنـد مسيري و تقسيم جريان، بايستي x^q_{uv} را به نحوي محدود کـرد کـه در هر گره، جريان بين چندين پيوند خروجي از آن گره تقسيم نشود. براي

این منظور، از متغیر کمکي به اسم y_{uv}^q استفاده ميکنیم. این متغیـر از نوع binary است و اگر $y_{uv}^q = 1$ باشد به این معني است کـه جریـان q از پیوند (u,v) استفاده ميکند. با استفاده از این متغیر یك مسیر و تنها یك مسیر از مبدا به مقصد پیـدا مـيشـود و جریـان تنهـا بـر روي پیوندهایي ارسال ميشود که جزء مسیر هستند. بـه عبـارت دیگـر اگـر $y_{uv}^q = 0$ باشـد آنگـاه $x_{uv}^q = 0$ و اگـر $y_{uv}^q = 1$ باشـد آنگـاه $x_{uv}^q = z_q$. با وجود اینکه این محدودیت یك شرط "و" منطقـي اسـت ولي نميتوان از آن در مدلسازي استفاده کرد، زیرا منجر به غیـرخطـي شدن مدل ميشود. براي خطيسازي مدل، محدودیتهاي زیر را اضـافه ميکنیم.

$$x_{uv}^q \le y_{uv}^q.M, \quad \forall (u,v) \in E, \forall q \in Q \qquad (۷)$$

$$y_{uv}^q \in \{0,1\}, \quad \forall (u,v) \in E, \forall q \in Q \qquad (۸)$$

که در آن M مقدار ثابت و بزرگ است. با وجود ایـن محـدودیت، اگـر $y_{uv}^q = 0$ باشـد آنگـاه $x_{uv}^q = 0$. امـا اگـر $y_{uv}^q = 1$ باشـد، x_{uv}^q ميتواند هر مقداري داشته باشد. مشکل زماني پیش ميآیـد کـه مـسیر پیدا شده توسط y_{uv}^q داراي دور باشد، در این صورت جریان خارج شده از یك گره ميتواند به آن گره باز نگردد لذا محدودیتهاي دیگري براي جلوگیري از ایجـاد دور در مـسیر، بـا اسـتفاده از دو رابطـه زیـر اعمـال ميشود.

$$\sum_{(u,v)\in E} y_{uv}^q \le 1, \quad \forall u \in V, \forall q \in Q \qquad (۹)$$

$$\sum_{(v,u)\in E} y_{vu}^q \le 1, \quad \forall u \in V, \forall q \in Q \qquad (۱۰)$$

با وجود این محدودیتها، مدل بهینهسازي گذردهي کـل شـبکه بـدون استفاده از مسیریابي چند مسیري و تقسیم جریان به صورت زیر خواهد بود:

Problem: Single-Path Throughput (**SPT**)
Objective:

(۲)

Subject to:

(۳)، (۴) (۵)، (۶)، (۷)، (۸)، (۹)، (۱۰)

$$\sum_{(v,u)\in E} y_{vu}^q - \sum_{(u,v)\in E} y_{uv}^q = 0, \quad \forall u \in V \setminus \{s_q, d_q\}, \quad \forall q \in Q \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{(s_q,u)\in E} y_{s_q u}^q = 1, \quad \forall q \in Q \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{(u,d_q)\in E} y_{u d_q}^q = 1, \quad \forall q \in Q \qquad (۱۳)$$

۵-۲ مدل بهینهسازي بر اساس معیار دوم

معیار دوم کمترین پهنايباند در اختیار هـر جریـان بـا در نظـر گـرفتن عدالت کامل بین جریانهاست. در اینجا، هدف بیـشینه کـردن حـداقل پهنايباند در اختیار همه جریانهاست. مدل بهینهسازي این مسئله چـه با استفاده و چه بدون استفاده از مسیریابي چند مـسیري بـسیار مـشابه معیار قبلي است با این تفاوت که علاوه بر تغییر تابع هـدف، محـدودیت دیگري اضافه ميشود که الزام مـيکنـد پهنـايبانـد همـه جریـانهـا از کمترین مقدار بیشتر باشد. این محدودیت به صورت زیر است:

$$z_q \ge \alpha, \quad \forall q \in Q \qquad (۱۴)$$

که در آن α حداقل پهنايباند اختصاص داده شده است. بنابراین مـدل بهینهسازي بـراي محاسـبه معیـار دوم بـا اسـتفاده از مـسیریـابي چنـد مسیري و بدون استفاده از آن به ترتیب به صورت زیر خواهد بود.

Problem: Multi-Path Fairness (**MPF**)
Objective:

$$\text{Maximize} \quad \alpha \qquad (۱۵)$$

Subject to:

(۳)، (۴)، (۵)، (۶) و (۱۴)

و

Problem: Single-Path Fairness (**SPF**)
Objective:

(۱۵)

Subject to:

(۳)، (۴)، (۵)، (۶)، (۷)، (۸)، (۹)، (۱۰)، (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۴)

۵-۳ مدل بهینهسازي بر اساس معیار سوم

معیار سوم، تعداد درخواستهایي است که پذیرفته ميشود. این معیار با دو معیار قبلي از این دید متفاوت است که در اینجا پهنايباند مورد نیاز هر درخواست، b_q، مشخص است و هدف این است که بیـشترین تعـداد ممکن درخواست از مجموعه درخواستهاي Q پذیرفته شود. پذیرفتـه شدن یا نشدن هـر درخواسـت توسـط یـك متغیـر binary w_q مـدل ميشود. اگر $w_q = 1$ در این صورت درخواست q پذیرفته شـده و در غیر این صورت این درخواست رد ميشود. بنابراین تابع هدف به صـورت زیر خواهد بود:

$$\text{Maximize} \quad \sum_{q\in Q} w_q \qquad (۱۶)$$

بایستي به این نکته دقت کرد که اگر درخواسـتي پذیرفتـه نـشده است، نباید هیچ جریاني از آن وارد شبکه شود، بنابراین محدودیتهـاي (۴) و (۵) به صورت زیر تغییر ميیابد:

$$\sum_{(s_q,u)\in E} x_{s_q u}^q = b_q.w_q, \quad \forall q \in Q \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{(u,d_q)\in E} x_{u d_q}^q = b_q.w_q, \quad \forall q \in Q \qquad (۱۸)$$

با در نظر گرفتن این تابع هدف و محدودیتهاي تغییـر یافتـه فـوق بـه مدل بهینهسازي زیر ميرسیم:

Problem: Multi-Path QoS (**MPQ**)
Objective:

(۱۶)

Subject to:

(۳)، (۶)، (۱۷)، (۱۸)

$$w_{uv}^{q} \in \{0,1\}, \quad \forall (u,v) \in E, \forall q \in Q \qquad (۱۹)$$

در اينجا نيز، به دليل اينكه هيچ محدوديتي براي x_{uv}^{q} وجود ندارد، جريان مي‌تواند در هر گره به ميزان دلخواه تقسيم شده و در مسيرهاي مجزا ارسال شود.

مشابه دو مدل قبلي، براي حذف قابليت تقسيم جريان، از متغير كمكي y_{uv}^{q} كه از نوع binary است، استفاده مي‌شود. با توجه به اينكه در اين مسئله مقدار پهناي‌باند هر درخواست مشخص است، مشكل غير خطي شدن مدل وجود نخواهد داشت و لذا محدوديت‌هاي زير برقرار خواهند بود:

$$x_{uv}^{q} = y_{uv}^{q}.b_q, \quad \forall (u,v) \in E, \forall q \in Q \qquad (۲۰)$$

$$y_{uv}^{q} \in \{0,1\}, \quad \forall (u,v) \in E, \forall q \in Q \qquad (۲۱)$$

براي جلوگيري از تقسيم جريان در $\forall u \in V$ فقط بايستي يكي از y_{uv}^{q} برابر ۱ باشد و بقيه برابر صفر باشند. از طرفي اين شرط فقط در صورتي برقرار است كه درخواست q پذيرفته شده باشد، در غير اين صورت $y_{uv}^{q} = 0 \;\; \forall (u,v) \in E$. بنابراين محدوديت زير وجود دارد:

$$\sum_{(u,v)\in E} y_{uv}^{q} \le w_q, \quad \forall q \in Q \qquad (۲۲)$$

بنابراين مدل بهينه‌سازي معيار سوم، بدون استفاده از تقسيم جريان به صورت زير خواهد بود.

Problem: Single-Path QoS (**SPQ**)
Objective:

(۱۶)

Subject to:

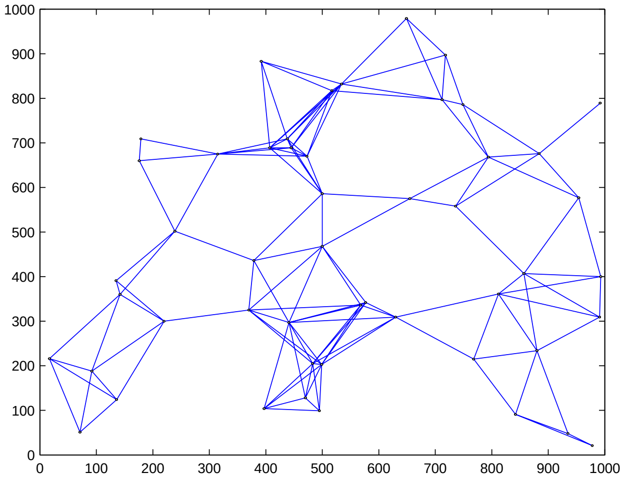
(۳)، (۶)، (۱۷)، (۱۸)، (۱۹)، (۲۰)، (۲۱)، (۲۲)

٦- شبيه‌سازي و ارزيابي

براي بررسي تاثير استفاده از مسيريابي چند مسيري بر روي كارايي شبكه‌هاي مش بي‌سيم، يك شبكه نمونه ايجاد شده و معيارهاي فوق براي تعداد مختلفي از جريان‌ها محاسبه شده است. در هر آزمايش، مقدار بهينه معيار مربوط يك بار با استفاده و يك بار بدون استفاده از مسيريابي چند مسيري محاسبه شده و نسبت آنها به عنوان ملاك تاثير استفاده از مسيريابي چند مسيري در نظر گرفته مي‌شود. بنابراين سه پارامتر زير براي هر آزمايش بدست مي‌آيد.

$$TIR = \frac{\text{MPT Objective Value}}{\text{SPT Objective Value}} \qquad (۲۳)$$

$$FIR = \frac{\text{MPF Objective Value}}{\text{SPF Objective Value}} \qquad (۲۴)$$



شكل ۲. توپولوژي شبكه مورد آزمايش

$$QIR = \frac{\text{MPQ Objective Value}}{\text{SPQ Objective Value}} \qquad (۲۵)$$

شبكه‌اي مورد آزمايش، شبكه‌اي شامل ۵۰ گره است كه به صورت تصادفي در فضاي 1000×1000 قرار دارند. علاوه بر اين $TR = 200$ و $C = 100$ است. توپولوژي اين شبكه در شكل ۲ نشان داده شده است. براي حل مسائل بهينه‌سازي از نرم افزار متن باز Zib-1.1.0 استفاده شده است [15]. مدل‌ها با استفاده از زبان zimpl توصيف شده و با استفاده از scip حل شده‌اند.

در آزمايش‌هاي انجام شده سه پارامتر TIR، FIR و QIR براي تعداد مختلفي از جريان‌ها و مقادير مختلفي از $r = IR / TR$ محاسبه شده است. مجموعه درخواست‌ها، به صورت كاملا تصادفي بين گره‌هاي شبكه ايجاد شده است. علاوه بر شبكه بي‌سيم با مقادير r مختلف، محاسبه پارامترهاي فوق براي شبكه سيمي با همان توپولوژي شكل ۲ نيز انجام شده است. تنها تفاوت موجود بين شبكه‌هاي بي‌سيم و شبكه سيمي، مجموعه تداخلي است كه در شبكه سيمي به صورت زير در نظر گرفته مي‌شود:

$$I_{uv} = \{(u,v)\}, \quad \forall (u,v) \in E \qquad (۲۶)$$

جداول ۱، ۲ و ۳ مقدار اين سه پارامتر را براي شبكه بي‌سيم با مقادير مختلف r و شبكه سيمي، به ازاي تعداد جريان‌هاي متفاوت نشان مي‌دهد. هر یک از اعداد اين جدول، ميانگين ۵ آزمايش مختلف است. در اين جداول، مواردي كه با x مشخص شده است، مواردي است كه مدل بهينه‌سازي تك مسيري آن در هيچ يك از ۵ آزمايش انجام شده در زمان تعيين شده - ۳۰ دقيقه - حل نشده است.

نتايج اين جدول بيانگر اين نكته است كه مسيريابي چند مسيري و تقسيم جريان روش كارآمدي براي بهبود كارايي در شبكه‌هاي سيمي

است، بخصوص بر اساس معيار اول كارايي. اما استفاده از اين مكانيزم، تاثيري بر روي كارايي شبكه‌هاي بي‌سيم ندارد، مستقل از اينكه از چه معيار كارايي استفاده شود، تعداد درخواست‌ها (جريان‌ها) چقدر باشد و مقدار پارامتر r چقدر باشد. تفاوت فاحش بين اين دو نوع شبكه بدليل وجود تداخل در شبكه‌هاي بي‌سيم است. در شبكه‌هاي سيمي پهناي‌باند آزاد هر پيوند مستقل از ساير پيوندهاست، اما در شبكه‌هاي بي‌سيم، پهناي‌باند يك منبع اشتراكي است و همه پيوندهايي كه باهم تداخل دارند از آن استفاده مي‌كنند. لذا منابع شبكه بسيار محدود است و افزونگي چنداني در آن وجود ندارد. اما از سويي ديگر، ايده اصلي بكارگيري مسيريابي چند مسيري براي افزايش كارايي استفاده بهينه از افزونگي موجود در شبكه است [1]، بنابراين با نبودن اين افزونگي، مسيريابي چند مسيري نمي‌تواند كارايي را افزايش دهد.

همانگونه كه قبلا اشاره شده، علاوه بر كاربردهاي شبكه‌اي مسيريابي چند مسيري، از آن براي ساده‌سازي مدل‌هاي شبكه نيز استفاده مي‌شود. در آزمايش‌هاي انجام شده، علاوه بر مقدار تابع هدف، زمان لازم براي حل مسئله نيز اندازه‌گيري شده است. زمان حل هر مسئله به ۳۰ دقيقه محدود شده است. از نسبت زمان حل مسئله بهينه‌سازي تک مسيري (مسئله سخت‌تر) به زمان حل مسئله بهينه‌سازي چند مسيري (مسئله ساده‌تر) به عنوان معيار ساده شدن مدل استفاده مي‌كنيم و براي اندازه‌گيري آن، سه پارامتر زير به اين صورت تعريف مي‌شود.

$$TT = \frac{\text{Need Time to Solve SPT}}{\text{Need Time to Solve MPT}} \quad (۲۳)$$

$$FT = \frac{\text{Need Time to Solve SPF}}{\text{Need Time to Solve MPF}} \quad (۲۴)$$

$$QT = \frac{\text{Need Time to Solve SPQ}}{\text{Need Time to Solve MPQ}} \quad (۲۵)$$

اين سه پارامتر براي شبكه سيمي، شبكه بي‌سيم با مقادير مختلف r و به ازاي تعداد جريان‌هاي متفاوت در شكل‌هاي ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است. در اين شكل‌ها، برچسب‌هايي مانند TT-1.5 به معناي مقدار پارامتر TT به ازاي $r = 1.5$ است. دقت كنيد كه محور Y به صورت لگاريتمي است. در اين اشكال، مواردي كه مدل بهينه‌سازي تك مسيري آن در هيچ يك از ۵ آزمايش، در زمان تعيين شده ۳۰ دقيقه‌اي حل نشده - همان مواردي كه در جداول با x مشخص است - نشان داده نشده است.

همانگونه كه اين اشكال نشان مي‌دهند، استفاده از مسيريابي چند مسيري، مدل بهينه‌سازي شبكه را بسيار ساده‌تر مي‌كند بخصوص براي معيارهاي اول و دوم (در برخي موارد بيش از ۱۰۰ برابر). چرا كه مدل‌هاي MPT و MPF از نوع LP بوده، اما مدل‌هاي SPT و SPF از نوع MIP هستند كه بسيار پيچيده‌تر و حل آنها زمانبرتر است. در مورد دو مدل MPQ و SPQ، باتوجه به اينكه خود مسئله MPQ نيز از نوع MIP است - به دليل وجود متغير binary w_q - حل آن زمان خيلي كمتري از حل SPQ نياز ندارد.

در كنار هم قرار دادن نتايج جداول ۱، ۲ و ۳ و اشكال ۳ و ۴ و ۵ اين دو نتيجه را بدست مي‌دهد: ۱) از مسيريابي چند مسيري و تقسيم جريان نمي‌توان براي افزايش كارايي شبكه‌هاي بي‌سيم استفاده كرد و استفاده از آن منجر به پيچيدگي الگوريتم‌ها و پروتكل‌ها مي‌شود. ۲) استفاده از مسيريابي چند مسيري و تقسيم جريان در مدل‌هاي بهينه‌سازي شبكه، از يك سو باعث كاهش چشمگير پيچيدگي مدل مي‌شود. از سوي ديگر مقدار بهينه بدست آمده از حل آن، يك باند tight براي الگوريتم‌هاي تك مسيري مورد استفاده در شبكه خواهد بود، زيرا كه مقدار بهينه آن با مقدار بهينه حاصل از حل مدل تك مسيري تفاوتي ندارد.

۷- جمع‌بندي و نتيجه‌گيري

در اين مقاله تاثير استفاده از مسيريابي چند مسيري و تقسيم جريان بر روي كارايي شبكه‌هاي مش بي‌سيم مورد بررسي قرار گرفت. براي اندازه‌گيري كارايي شبكه از سه معيار استفاده شد كه عبارتند از:

جدول ۱. پارامتر TIR به ازاي تعداد جريانها و rهاي مختلف

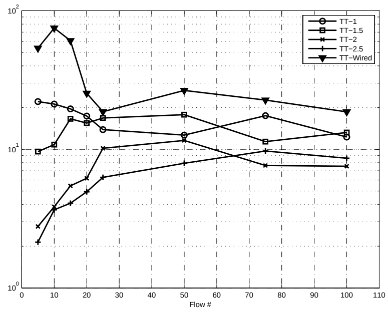
Network	Wireless				Wired
Flow # \ r	1	1.5	2	2.5	-
5	1.0005	1	1	1	2.8825
10	1	1	1	1	1.9504
15	1.0017	1	1	1	1.6853
20	1	1	1	1	1.5437
25	1	1	1	1	1.5346
50	1	1	1	1	1.5524
75	1	1	1	1	1.5041
100	1	1	1	1	1.4633

جدول ۲. پارامتر FIR به ازاي تعداد جريانها و rهاي مختلف

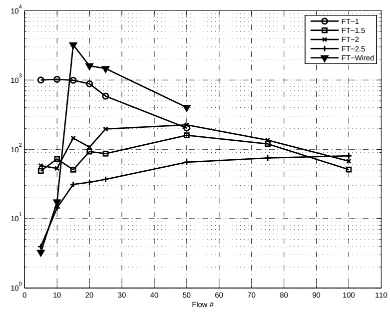
Network	Wireless				Wired
Flow # \ r	1	1.5	2	2.5	-
5	1.0856	1.0057	1.0039	1	1.5000
10	1.0417	1.0073	1.0025	1	1.1628
15	1.0210	1.0034	1.0009	1	1.2043
20	1.0381	1.0015	1.0020	1	1.3043
25	1.0148	1	1	1	1.4754
50	1.0086	1	1.0001	1	1.3740
75	x	1.0001	1.0001	1	x
100	x	1.0058	1.0030	1	x

جدول ۳. پارامتر QIR به ازاي تعداد جريانها و rهاي مختلف

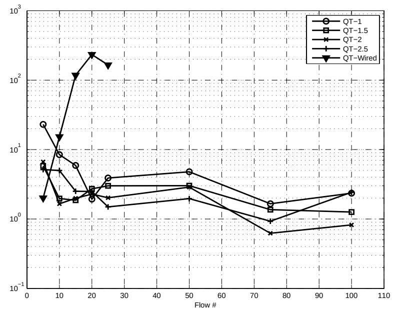
Network	Wireless				Wired
Flow # \ r	1	1.5	2	2.5	-
5	1.0417	1	1	1	1.3889
10	1.0256	1	1	1	1.4286
15	1.25	1	1	1	1.4463
20	1	1	1	1	1.4307
25	1.017	1	1	1	1.4118
50	1.25	1	1	1	x
75	1.0077	1	1	1	x
100	1.0274	1	1	1	x



شکل ۳. پارامتر **TT**



شکل ٤. پارامتر **FT**



شکل ٤. پارامتر **QT**

۱) گذردهي کل شبکه بدون در نظر گرفتن عـدالت، ۲) کمتـرين پهناي‌باند عادلانه قابل اختصاص به جريانهـا و ۳) تعـداد قابـل پـذيرش درخواست‌هايي کـه داراي نيازمنـدي کيفيـت سـرويس بـا پهنـاي‌بانـد مشخص هستند. هر يک از اين معيارها در دو حالت محاسبه شد: ۱) بـا استفاده از مسيريابي چند مسيري و تقـسيم جريـان بـر روي آنهـا و ۲) بدون استفاده از مسيريابي چند مسيري. براي محاسبه اين معيارهـا، در هر حالت يک مدل بهينه‌سازي (در کل ٦ مدل) ارايه شد که با حل آنهـا مقدار بهينه اين معيارها بدست آمـد. مقايـسه ايـن معيارهـا در ايـن دو حالت نشان داد که با وجود اينکه اسـتفاده از مـسيريابي چنـد مـسيري مي‌تواند اين معيارها را در شبکه‌هاي سيمي‌تا ۲ برابر افزايش دهـد ولـي در شبکه‌هاي بي‌سيم تاثيري ندارد. علاوه بـر ايـن، مقايـسه زمـان حـل مدل‌ها در دو حالت نشان داد که استفاده از مسيريابي چند مسيري حل مدل بهينه‌سازي را بـسيار سـاده‌تـر ميکنـد. بنـابراين اسـتفاده از آن در مدل‌هاي بهينه‌سازي مفيد اسـت، زيـرا از يـك سـو پيچيـدگي مـدل را کاهش مي‌دهد و سوي ديگر نتيجه حاصل از حل مدل يک بانـد loose نخواهد بود.

مراجع

[1] J. Tsai and T. Moors, “A Review of Multipath Routing Protocols: From Wireless Ad Hoc to Mesh Networks,” *ACoRN Early Career Researcher Workshop on Wireless Multihop Networking*, 2006.

[2] I. F. Akyildiz, X. Wang, and X. Wang, “Wireless mesh networks: A survey,” *Elsevier Journal on Computer Networks*, Vol. 47, March 2005.

[3] S.Vutukury, *Multipath routing mechanisms for traffic engineering and quality of service in the Internet*, Ph.D thesis, University of California, Santa Cruz, March 2001.

[4] S.Vutukury and J.J.Garcia-Luna-Aceves, “MDVA: A Distance-Vector Multipath Routing Protocol,” *INFOCOM*, 2001.

[5] A. Nasipuri and S. R. Das, “On-demand multipath routing for mobile ad hoc networks,” *ICCCN*, 1999.

[6] S. J. Lee and M. Gerla, “Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks,” *ICC*, 2001

[7] R. Leung, J. Liu, E. Poon, A. L. C. Chan, and B. Li, “MP-DSR: a QoS aware multi-path dynamic source routing protocol for wireless ad-hoc networks,” *LCN* 2001.

[8] Aristotelis Tsirigos and Zygmunt J. Haas, “Analysis of Multipath Routing—Part I: The Effect on the Packet Delivery Ratio,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 3, No. 1, JANUARY 2004.

[9] M. K. Marina and S. R. Das, “Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector Routing,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol. 6, No. 7, 2006.

[10] D. Saha, S. Toy, S. Bandyopadhyay, T. Ueda, and S. Tanaka, “An adaptive framework for multipath routing via maximally zone-disjoint shortest paths in ad hoc wireless networks with directional antenna,” *GLOBECOM*, 2003.

[11] B. Radunovic, C. Gkantsidis, P. Key, P. Rodriguez, “An Optimization Framework for Opportunistic Multipath Routing in Wireless Mesh Networks,” *INFOCOM 08*, 2008.

[12] P. Gupta and P. R. Kumar, “The capacity of wireless networks,” *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 46. 2000.

[13] Gupta, J. Musacchio, and J. Walrand, “Sufficient Rate Constraints for QoS Flows in Ad-Hoc Networks,” *UCB/ERL Technical Memorandum M04/43*, Fall 2004.

[14] Jean Walrand, “Implementation of QoS Routing for Manets,” *University of California at Berkeley Technical Report*, 2007.

[15] Zib Optimization Suite v1.1, http://zibopt.zib.de/ZIBopt.shtml.