



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق

پایان نامه دوره کارشناسی مهندسی برق - مخابرات

طراحی و شبیه سازی روتینگ و تخصیص طول موج

در شبکه های نوری بر پایه تئوری گراف

توسط:

سعید اودک

استاد مشاور:

دکتر لطف اله بیگی

تابستان ۱۳۹۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تأییدیه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای: سعید اودک

را با عنوان: طراحی و شبیه سازی روتینگ و تخصیص طول موج در شبکه های نوری بر پایه تئوری گراف

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی تأیید می کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر لطف اله بیگی	استادیار	
۲- استاد ارزیاب	دکتر بهاره اخباری	استادیار	



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اظہارنامہ دانشجو

شماره:

تاریخ:

اینجانب سعید اودک دانشجوی کارشناسی رشته برق گرایش مخابرات دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که مطالب ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان

طراحی و شبیه سازی روتینگ و تخصیص طول موج در شبکه های نوری بر پایه تئوری گراف

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر لطف اله بیگی، توسط اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر را به‌طور کامل رعایت کرده‌ام. چنانچه در هر زمان خلاف آنچه گواهی نموده‌ام مشاهده گردد خود را از آثار حقیقی و حقوقی ناشی از دریافت مدرک کارشناسی محروم می‌دانم و هیچگونه ادعائی نخواهم داشت.

امضاء دانشجو:

تاریخ: ۹۸/۷/۵ اور

حق طبع، نشر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این پروژه متعلق به نویسنده و استاد راهنمای آن می‌باشد. هرگونه تصویربرداری از کل یا بخشی از پروژه تنها با موافقت نویسنده یا استاد راهنما یا کتابخانه دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.
- ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.
- ۳- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود پروژه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیم بہ پدر و مادر

تشکر و قدردانی

سپاس‌گزاری و قدردانی ویژه پروردگار هستی است؛ ولذا از خداوند مهربان که در طول مسیر زندگی یار و یاور من بوده است و مسیر تعالی را پیش پای من گذاشته است و اجازه تلاش و جنگیدن برای رسیدن به اهدافم را به من داده است، تشکر می‌کنم.

از پدر و مادرم به دلیل تمام زحماتی که برای موفقیت و سربلندی من صرف کرده‌اند و تلاشی که برای نشان دادن راه و رسم صحیح زندگی نموده‌اند، تشکر به عمل می‌آورم.

از استادم دکتر بیگی و دانشجوی ارشد ایشان مهندس جمال زاده هم که در طول انجام این پروژه بنده را راهنمایی کرده‌اند تشکر می‌کنم و بهترین‌ها را برای ایشان آرزومندم.

از دوستان ارجمندم آقایان محمد مهدی خدابنده، محسن زارع، مسیح مجیدی و کیوان دهقان نیری که در به اتمام رسیدن این پروژه بنده را همراهی نمودند، تشکر ویژه دارم.

چکیده

امروزه حجم داده های انتقالی توسط زیر ساخت های اینترنت به صورت نمایی افزایش پیدا کرده است و از این رو تخصیص طول موج برای درخواست های انتقال داده به صورت بهینه در شبکه های مخابراتی اهمیت بیشتری میابد، به همین دلیل ما در این پروژه به بررسی این مسئله در شبکه های نوری پرداخته ایم و تلاش کرده ایم که مسئله مسیریابی و تخصیص طول موج در بین درخواست های انتقال ترافیک در شبکه های مخابرات نوری را بررسی کنیم.

ما در این پایان نامه یک روش تقریبی مبتنی بر شار در گراف برای یافتن مسیر و تخصیص طول موج برای درخواست های انتقال داده پیشنهاد دادیم که طی آن تلاش بر این است که از هر طول موج در حد توان بیشترین میزان استفاده انجام شود یعنی با یک طول موج مشخص بیشترین میزان درخواست هایی که برای پاسخ گویی می توانیم پیدا کنیم را برطرف نماییم.

برای ارزیابی نتایج بدست آمده، خروجی راه حل تقریبی را با روش های موجود مانند ILP مقایسه کردیم، که حاصل آن در شبکه US ۱۰ درصد خطا در تعداد طول موج های استفاده شده برای ۱۲۱ درخواست می باشد. در کل از لحاظ میزان زمانی که برای خروجی گرفتن از برنامه باید صرف کنیم روش پیشنهادی به مراتب سریع تر از روش ILP می باشد ولی همان طور که گفته شد این روش دارای خطا می باشد و این خطا در مقابل سرعت پردازش راه حل قابل قبول است.

کلید واژه: تخصیص طول موج، شبکه های نوری، روتینگ، الگوریتم های گراف در شبکه.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۳.....	فهرست جدول‌ها.....
۴.....	فهرست شکل‌ها.....
۵.....	فصل ۱- مقدمه.....
۵.....	۱-۱- معرفی شبکه های نوری.....
۵.....	۱-۲- اهمیت شبکه های نوری.....
۶.....	۱-۳- بیان مسئله.....
۷.....	۱-۴- ساختار پایان نامه.....
۸.....	فصل ۲- معرفی اجمالی شبکه های نوری.....
۸.....	۲-۱- مقدمه.....
۸.....	۲-۲- فیبر نوری.....
۸.....	۲-۳- تلفات در فیبر نوری.....
۹.....	۲-۴- انواع فیبر نوری.....
۱۰.....	۲-۵- روند پیشرفت مخابرات فیبر نوری.....
۱۰.....	۲-۵-۱- طول موج ۸۵۰ nm.....
۱۱.....	۲-۵-۲- طول موج ۱۳۱۰ nm.....
۱۱.....	۲-۵-۳- طول موج ۱۵۵۰ nm.....
۱۱.....	۲-۵-۴- فیبرهای DSF و مدارهای بازسازی.....
۱۲.....	۲-۵-۵- تقویت کننده فیبر نوری EDFA.....
۱۲.....	۲-۵-۶- سولایتون.....
۱۳.....	فصل ۳- مسیر یابی و تخصیص طول موج.....
۱۳.....	۳-۱- مقدمه.....
۱۴.....	۳-۲- نقش بازسازی در تخصیص طول موج.....
۱۵.....	۳-۳- RWA چند مرحله ای.....
۱۶.....	۳-۴- RWA تک مرحله ای.....
۱۶.....	۳-۴-۱- هرس کردن توپولوژی گراف.....
۱۷.....	۳-۴-۲- تبدیل به گراف دسترسی.....

۱۹.....	۳-۴-۳	روش های مبتنی بر جریان در گراف.....
۲۰.....	۴-۴-۳	روش مبتنی بر ILP در شبکه حلقه ای.....
۲۱.....	۳-۵	استراتژی های تخصیص طول موج.....
۲۲.....	۵-۳-۱	First – Fit.....
۲۳.....	۵-۳-۲	Most Used.....
۲۳.....	۵-۳-۳	Relative capacity less.....
۲۵.....	۴	فصل ۴- پیاده سازی و نتایج عددی.....
۲۵.....	۴-۱	مقدمه.....
۲۵.....	۴-۲	راه حل ILP.....
۲۷.....	۴-۳	پیشنیاز ها و چند الگوریتم از نظریه گراف.....
۲۷.....	۴-۳-۱	روش تقسیم دودویی برای پیدا کردن ریشه یک تابع یکنوا.....
۲۸.....	۴-۳-۲	شبکه ی شار (Flow Network).....
۲۸.....	۴-۳-۳	شبکه ی باقی مانده و مسیر افزایشی.....
۲۹.....	۴-۳-۴	روش فورد-فولکرسون.....
۲۹.....	۴-۳-۵	مساله ی شار با هزینه ی کمینه.....
۳۰.....	۴-۳-۶	یافتن شار K با کمترین هزینه.....
۳۰.....	۴-۴	ارائه راه حل تقریبی.....
۳۲.....	۴-۵	پیچیدگی زمانی الگوریتم.....
۳۲.....	۴-۶	نتایج عددی برای شبکه های مختلف.....
۳۲.....	۴-۶-۱	شبکه US.....
۳۷.....	۴-۶-۲	شبکه German.....
۴۱.....	۳-۶-۴	شبکه European.....
۴۵.....	۵	فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادها.....
۴۵.....	۵-۱	مقایسه روش ILP و روش تقریبی در شبکه US.....
۴۵.....	۵-۲	نتیجه گیری.....
۴۷.....	۵-۳	پیشنهادهای.....
۴۸.....		فهرست مراجع.....

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۲۶.....	جدول ۱-۴ تعداد طول موج برای تعداد درخواست های مختلف در شبکه US با روش ILP
۳۳.....	جدول ۲-۴ فاصله فیزیکی در شبکه US
۳۳.....	جدول ۳-۴ ترافیک در شبکه US
۳۴.....	جدول ۴-۴ خروجی برای مقادیر k در شبکه US
۳۵.....	جدول ۵-۴ خروجی بر اساس تعداد درخواست ها در شبکه US
۳۷.....	جدول ۶-۴ فاصله فیزیکی در شبکه German
۳۸.....	جدول ۷-۴ میزان ترافیک کلی شبکه German
۳۸.....	جدول ۸-۴ برنامه برای مقادیر مختلف k در شبکه German
۴۰.....	جدول ۹-۴ خروجی برای تعداد درخواست ها در شبکه German
۴۲.....	جدول ۱۰-۴ فاصله فیزیکی شبکه European
۴۳.....	جدول ۱۱-۴ میزان ترافیک کلی شبکه European
۴۳.....	جدول ۱۲-۴ خروجی برای مقادیر k در شبکه European
۴۴.....	جدول ۱۳-۴ نمودار تعداد لینک ها با تعداد طول موج های عبوری مشخص در شبکه European
۴۵.....	جدول ۱۵-۱ مقایسه تعداد طول موج استفاده شده برای درخواست های مختلف

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۵	شکل ۱-۱ شبکه مخابرات نوری
۶	شکل ۲-۱ نمودار پیش بینی حجم مصرف داده موبایل تا سال ۲۰۳۰
۹	شکل ۱-۲ باندهای مخابرات فیبر نوری بر اساس طول موج
	شکل ۲-۲ نمودار تضعیف توان و پاشندگی سیگنال‌های اپتیکی در باندهای مختلف مخابرات فیبر نوری
۱۰	
۱۲	شکل ۳-۲ نمایی از یک تقویت کننده فیبر نوری آلائیده به عنصر اربوم
۱۴	شکل ۱-۳ اهمیت بازسازی در شبکه های نوری
۱۷	شکل ۲-۳ نمونه ای از بدست آوردن گراف دسترسی
۲۱	شکل ۳-۳ تخصیص طول موج دو جهته
۲۲	شکل ۴-۳ رویه first – fit
۲۴	شکل ۵-۳ رویه RLC
۲۷	شکل ۱-۴ نمودار تعداد طول موج برای تعداد درخواست های مختلف در شبکه US با روش ILP
۳۳	شکل ۲-۴ گراف شبکه US
۳۴	شکل ۳-۴ نمودار زمان اجرای برنامه برای مقادیر مختلف k در شبکه US
۳۶	شکل ۴-۴ تعداد طول موج های استفاده شده بر اساس تعداد درخواست ها در شبکه US
۳۶	شکل ۵-۴ نمودار تعداد لینک ها با تعداد طول موج های عبوری مشخص در شبکه US
۳۷	شکل ۶-۴ گراف شبکه German
۳۹	شکل ۷-۴ زمان اجرا برای مقادیر مختلف k در شبکه German
۳۹	شکل ۸-۴ تعداد طول موج های استفاده شده برای مقادیر مختلف k در شبکه German
۴۰	شکل ۹-۴ تعداد طول موج های استفاده شده بر اساس تعداد درخواست ها در شبکه German
۴۱	شکل ۱۰-۴ نمودار تعداد لینک ها با تعداد طول موج های عبوری مشخص در شبکه German
۴۲	شکل ۱۱-۴ گراف شبکه European
	شکل ۱-۵ نمودار مقایسه تعداد طول موج های استفاده شده در دو روش برای تعداد درخواست های مختلف
۴۶	

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- معرفی شبکه های نوری

از اوایل دهه ۷۰ میلادی، استفاده از فیبرهای نوری به منظور انتقال اطلاعات، به طور جدی مورد توجه قرار گرفت. شبکه های نوری که از فیبرنوری به عنوان رسانه ی انتقال استفاده می کنند، می توانند داده هایی با حجم بسیار بالا را در فواصل طولانی انتقال دهند. فیبر نوری، به عنوان محیط حامل سیگنال نوری، در حقیقت یک موجبر دی الکتریک با مقطع استوانه ای است. نور به عنوان حامل اطلاعات، درون فیبر منتشر می شود. شبکه های نوری که از فیبر نوری به عنوان رسانه ی انتقال استفاده می کنند، می توانند داده های حجیم را در فاصله های طولانی انتقال دهند. از آنجایی که طول موج امواج نوری بسیار کوچک و در حد میکرومتر است، پهنای باندی که این روش در اختیار می گذارد حدود چندین تراهرتز است که از روش های دیگر بسیار بالاتر است.

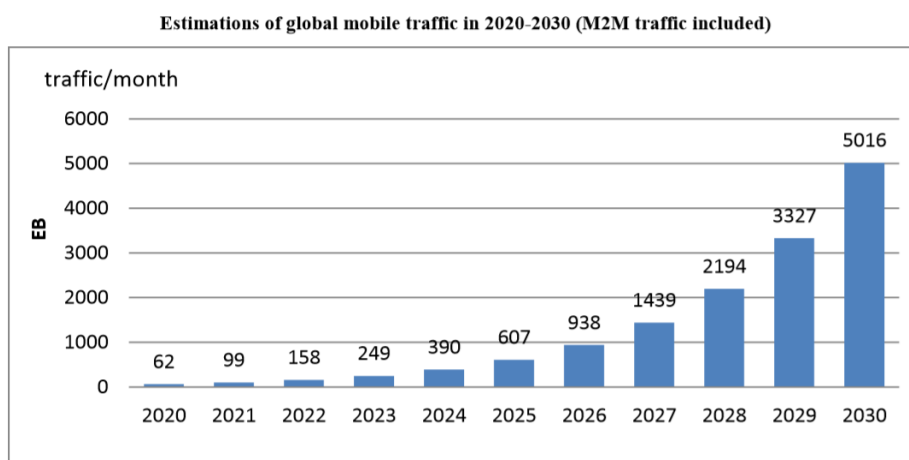


شکل ۱-۱ شبکه مخابرات نوری

۱-۲- اهمیت شبکه های نوری

در دهه گذشته حجم داده های انتقالی توسط زیر ساخت های اینترنت به صورت نمایی افزایش پیدا کرده است. از دلایل این افزایش می توان تماشای ویدیو ها، وجود شبکه های مجازی و پیام رسانی متنوع و تمایل شرکت های بزرگ برای استفاده از سیستم های ابری نام برد. یکی از راهکار های کنونی استفاده هر چه بیشتر از شبکه های فیبر نوری به علت هزینه کم، سرعت بیشتر و نویز کم می باشد. با نظر به پیشرفت های اخیر در حوزه های اینترنت و گوشی های همراه، تمامی نتایج بررسی های آماری نشان از رشد نمایی مصرف داده توسط کاربران را در سال های آتی می دهند. نمودار زیر که توسط ITU تهیه شده

است، تخمینی از افزایش بیش از ۸۰ برابری حجم داده مصرفی کاربران گوشی های همراه تا سال ۲۰۳۰ می دهد.



شکل ۲-۱ نمودار پیش بینی حجم مصرف داده موبایل تا سال ۲۰۳۰

شبکه ها نوری که در آنها از پالس های نوری با فرکانس مرکزی بسیار بزرگ بهره گرفته می شود، امکان پردازش و انتقال اطلاعات را با سرعتی بیش از روشهای دیگر فراهم می کنند. شبکه های نوری در واقع بستر انتقال داده برای اینترنت و تمام بستر های مولتی مدیا می باشد. حال با توجه به این رشد روز افزون استفاده از اینترنت اهمیت شبکه های نوری دوچندان خواهد شد.

۳-۱- بیان مسئله

شبکه مخابرات نوری که اهمیت آن در بخش های قبلی بیان شد را می توان با یک گراف مدل نمود که متشکل از مجموعه ای راس ها و لینک ها بین این رئوس می باشد، که راس ها نمایانگر یکسری سخت افزار های مخابراتی هستند و داده توسط لینک ها بین آن ها جابه جا می شود. می دانیم که در هریک از این لینک ها تعداد مشخصی طول موج برای انتقال داده در دسترس می باشد.

حال مسئله ما در این شبکه که با یک گراف مدل شده است این است که درخواست های انتقال ترافیک در این شبکه را برقرار سازیم به گونه ای که شرایط تخصیص مسیر برای هر درخواست معتبر باشد. اگر بخواهیم یک صورت رسمی از مسئله ارائه دهیم می توان گفت، شبکه به صورت یک گراف با تعدادی راس و لینک و همچنین مجموعه ای از درخواست ها ما بین این راس ها به عنوان ورودی مسئله داده می شود و به عنوان راه حل انتظار می رود الگوریتمی ارائه شود که بین هر دو راس از مجموعه درخواست ها مسیری ارائه دهد که در طول کل لینک های مسیر از یک طول موج ثابت برای هر مسیر استفاده شود به گونه ای که برای همه درخواست ها یک مسیر پیدا شود و همچنین حداقل سیگنال به نویز در طول مسیر های

مختلف حداکثر شود که این فاکتور آخر را می توان با حداقل کردن حداکثر فاصله دربین همه مسیر ها برای درخواست ها مختلف در نظر گرفت چرا که سیگنال به نویز با فاصله رابطه عکس دارد.

۴-۱- ساختار پایان نامه

در این پایان نامه ابتدا در فصل ۲ به معرفی اجمالی از شبکه های نوری می پردازیم و تعاریف موجود در شبکه های نوری و ساختار فیبر نوری مورد بحث واقع می شود. در ادامه مختصری از تئوری مربوط به تخصیص طول موج و تئوری مربوط به آن در فصل ۳ مورد بررسی قرار می گیرد که به توضیح این که مسئله تخصیص طول موج چیست و نقش عوامل موثر در آن می پردازد و همچنین الگوریتم های حل مسئله به صورت کلی مورد بررسی واقع می شود و به رویه های تخصیص طول موج در شبکه نوری می پردازیم. در فصل ۴ در ابتدا به توضیح الگوریتم هایی از گراف که در حل مسئله به ما کمک می کند می پردازیم سپس روشی که برای حل مسئله به صورت تقریبی به کار رفته است را به صورت دقیق توضیح می دهیم و نتایج آن نمایش داده می شود. در فصل پایانی با نتیجه گیری و پیشنهاداتی برای بهبود خروجی، پایان نامه را به اتمام می رسانیم.

فصل ۲- معرفی اجمالی شبکه های نوری

۲-۱- مقدمه

در دهه ۷۰ میلادی استفاده از فیبر نوری برای انتقال بهینه اطلاعات به صورت جدی توجه محققین از کشور های مختلف را به خود جلب کرد. از آن تاریخ، پیشرفت های زیادی در زمینه ی ارتباطات نوری ایجاد شده است. رشد این تکنولوژی به حدی زیاد است که پردازشگرهای لازم برای پردازش اطلاعات حمل شده، بعضاً دچار محدودیت سرعت پردازش می شوند. به همین دلیل، انجام پردازش در شبکه های نوری اهمیت دارد.

۲-۲- فیبر نوری

فیبر نوری، به عنوان محیط حامل سیگنال نوری، در حقیقت یک موجبر دی الکتریک با مقطع استوانه ای است. نور به عنوان حامل اطلاعات، درون این فیبر منتشر می شود. معمولاً در سیستم های انتقال، مجموعه ای از چند فیبر نوری تحت عنوان کابل نوری برای انتقال اطلاعات استفاده می شود.

۲-۳- تلفات در فیبر نوری

به صورت تئوری فرض می شود که فیبر نوری دارای تضعیف صفر و پهنای باند بی نهایت است ولی در عمل به دلیل محدودیت های فیزیکی، پهنای باند فیبر محدود و تلفات آن غیر صفر است .

تلفات در فیبر نوری از سه منبع ناشی می شود :

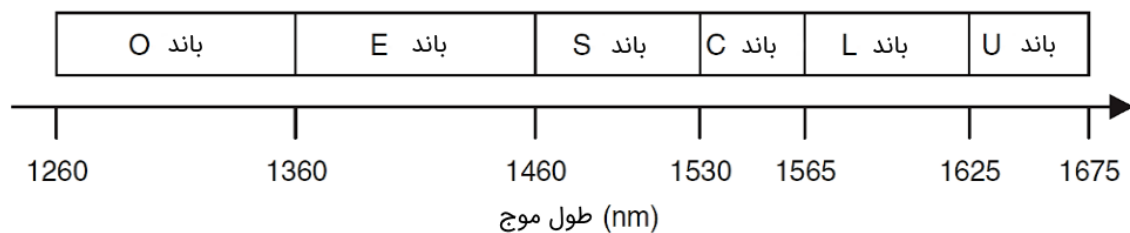
- تضعیف ها در اثر ناخالصی های موجود در فیبر است که باعث اتلاف انرژی می شود (تلفات جذب).
- ناشی از غیرهمگن بودن چگالی شیشه در طول فیبر است که باعث پراکندگی نور و تضعیف آن در طول فیبر می شود (تلفات پراکندگی).
- ناشی از خمش فیبر یا غیر یکنواختی شعاع فیبر است که منجر به خروج شعاع نوری از فیبر می شود (تلفات هندسی).

غیر از تلفات، عامل دیگر محدودکننده عملکرد بهینه فیبر، پاشندگی است. پاشندگی به زبان ساده عبارت است از پهن شدن پالس نوری در اثر انتشار در طول فیبر. پاشندگی باعث کاهش پهنای باند فیبر نوری می‌شود. عوامل پاشندگی در فیبر نوری بسیار متنوع هستند:

- پاشندگی مدی در تارهای چند مدی به علت اختلاف در زمان رسیدن مدهای مختلف به انتهای فیبر رخ می‌دهد.
- پاشندگی موجب در تارهای تک مدی که ناشی از اختلاف جزئی بین ضریب‌های دی‌الکتریک هسته و پوسته فیبر نوری است باعث انتشار نور در دو مسیر هسته و پوسته با سرعت‌های متفاوت می‌شود.
- پاشندگی ماده‌ای ناشی از اختلاف سرعت بین طول موج‌های مختلف (رنگ‌های مختلف) موجود در نور در اثر عبور از فیبر نوری است.

۴-۲- انواع فیبر نوری

بسته به تعداد مدهای الکترومغناطیسی قابل حمل توسط فیبر، فیبر نوری به دو صورت تک مدی و چند مدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با پیشرفت در تکنولوژی ساخت فیبرهای نوری در سال ۱۹۷۷ اولین لینک مخابرات فیبر نوری چند مدی طول موج ۸۵۰ nm مورد بررسی قرار گرفت. پس از گذشت چند سال و بهبود ساختار فیبرهای نوری تک مدی، طول موج‌های ۱۳۱۰ nm و ۱۵۵۰ nm مورد آزمایش و بررسی قرار گرفتند. شکل زیر باند های طول موجی مخابرات فیبر نوری را نشان می‌دهد.

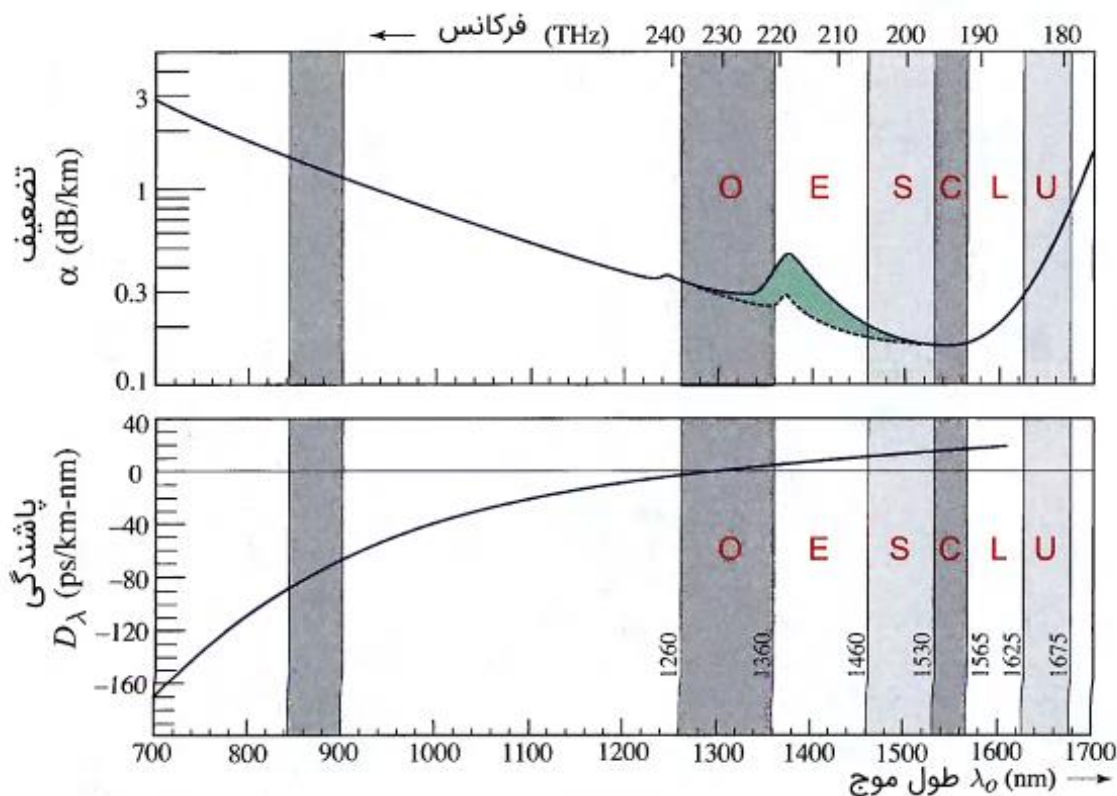


شکل ۲-۱ باندهای مخابرات فیبر نوری بر اساس طول موج.

۵-۲- روند پیشرفت مخابرات فیبر نوری

۱-۵-۲- طول موج ۸۵۰ nm

در اولین نسل مخابرات فیبر نوری از فیبرهای چند مد، در پنجره اول مخابرات فیبر نوری یعنی طول موج ۸۵۰ nm استفاده کردند. عدم کیفیت مطلوب فیبرهای نوری و وجود مشکلات پاشندگی (پهن شدگی سیگنال) و افت زیاد در این طول موج، مانع از یک ارتباط مطلوب می‌شود. شکل زیر پاشندگی و افت سیگنال‌های اپتیکی را در مخابرات فیبر نوری در باندهای مختلف طول موجی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در ناحیه طول موجی (۹۰۰ nm ~ ۸۰۰ nm) تضعیف توان و پاشندگی سیگنال اپتیکی بسیار زیاد بوده که مانع از یک ارتباط خوب و پایدار می‌شود.



شکل ۲-۲ نمودار تضعیف توان و پاشندگی سیگنال‌های اپتیکی در باندهای مختلف مخابرات فیبر نوری

۲-۵-۲- طول موج ۱۳۱۰ nm

برای رفع مشکل پاشندگی، در نسل دوم سیستم‌های مخابرات فیبر نوری استفاده از طول موج ۱۳۱۰ nm پیشنهاد شد. این طول موج به پنجره دوم مخابرات فیبر نوری معروف بوده و در باند O است. طبق شکل مشاهده می‌شود که پاشندگی در طول موج ۱۳۱۰ nm نزدیک به صفر بوده که خود برای بالا بردن سرعت انتقال اطلاعات مزیت قابل توجهی است. با وجود استفاده از این طول موج، به دلیل عدم کیفیت فیبرهای نوری و افت شدید توان، استفاده از سیستم‌های مخابرات فیبر نوری در مسیرهای طولانی همچنان با مشکل مواجه بود.

۲-۵-۳- طول موج ۱۵۵۰ nm

برای رفع مشکل تضعیف، پژوهشگران استفاده از فیبرهای نوری تک مد و طول موج ۱۵۵۰ nm را که به پنجره سوم مخابرات فیبر نوری معروف است، پیشنهاد دادند. این امر باعث استفاده از سیستم‌های مخابرات فیبر نوری برای انتقال اطلاعات با سرعت بالا در مسیرهایی نسبتاً طولانی شد. امروزه طول موج ۱۵۵۰ nm که در باند C قرار دارد به طول موج استاندارد مخابرات فیبر نوری شناخته می‌شود. در شبکه‌های غیر فعال نوری PON از این طول موج برای انتقال ویدئو به سمت کاربر استفاده می‌شود. همچنین از طول موج ۱۴۹۰ nm برای ارسال صوت و داده به سمت کاربر (دانلود) و از طول موج ۱۵۵۰ nm برای ارسال صوت و داده از کاربر به سمت مرکز (آپلود) استفاده می‌شود.

۲-۵-۴- فیبرهای DSF و مدارهای بازسازی

با اینکه فیبرهای نوری تک مد در طول موج ۱۵۵۰ nm موفقیت نسبتاً خوبی به دست آوردند، همچنان تلاش پژوهشگران برای به حداقل رساندن پاشندگی و تضعیف توان ادامه داشت. حاصل این پژوهش، تولید فیبرهایی با پاشندگی شیفت یافته (Dispersion Shifted Fiber – DSF) بود. در واقع این نوع فیبرها پاشندگی صفر را که در نزدیکی طول موج ۱۳۱۰ nm حاصل می‌شد را به حوالی طول موج ۱۵۵۰ nm منتقل (شیفت) کردند.

نوعی از فیبرهای نوری وجود دارند که نمودار پاشندگی آن‌ها منفی است. از این نوع فیبرها می‌توان در برخی قسمت‌های طول مسیر برای جبران و یا کاهش پاشندگی استفاده کرد. این گونه تصور کنید که یک فیبر معمولی با پاشندگی مثبت، باعث پهن شدن سیگنال شده و فیبر جبران‌ساز پاشندگی (Dispersion Compensating Fiber) باعث جمع‌شدن سیگنال می‌شود.



شکل ۳-۲ نمایی از یک تقویت کننده فیبر نوری آلاینده به عنصر اربوم

۵-۲-۵- تقویت کننده فیبر نوری EDFA

با بهبود فیبرهای نوری و اختراع لیزرهای فیبری، ساخت و استفاده از تقویت کننده های فیبر نوری آلاینده به اربوم (Erbium Doped Fiber Amplifier) در سال ۱۹۸۶ بهبودهای فراوانی را صنعت مخابرات فیبر نوری به ارمغان آورد. تقویت کننده های EDFA به دلیل تطبیق کامل با فیبرهای نوری معمولی، پهنای باند و بهره زیاد، نویز کم، حجم کم، قیمت مناسب و ... امروزه یکی از اصلی ترین تجهیزات مخابرات و شبکه های نوری مبتنی بر فیبر است. با بهره گیری از تقویت کننده های EDFA در مسیرهای طولانی امکان انتقال اطلاعات با سرعتی بیش از ۱۰ ترابیت در ثانیه در کیلومتر مهیا می شود.

۵-۲-۶- سولایتون

در نسل ششم مخابرات نوری پیشنهاد انتشار پالس های سالی تونی (استفاده از اثرات غیرخطی فیبر نوری) در کنار تقویت کننده های فیبر نوری آلاینده به عنصر اربوم داده شد. این پیشنهاد امکان انتقال اطلاعات را با سرعتی بیش از ۵ ترابیت در ثانیه را برای مسیرهای بسیار طولانی فراهم می کند.

فصل ۳- مسیریابی و تخصیص طول موج

۳-۱- مقدمه

تخصیص طول موج یکی از مهم ترین بخش های طراحی شبکه در شبکه های نوری می باشد. مسئله تخصیص طول موج از انجایی اهمیت پیدا می کند که در برقراری ارتباط بین درخواست های مختلف در لینک های مختلف مسیر برای هر درخواست، از یک طول موج باید استفاده شود، بنابراین طول موج های در حال استفاده در یک لینک ارتباطی ممکن است محدودیت برای برقراری ارتباط های بیشتر داشته باشد و باید یک روش موثر برای تخصیص طول موج میان درخواست های مختلف مخابراتی انتخاب شود تا مطمئن شویم که اختلال در تخصیص طول موج حداقل شود.

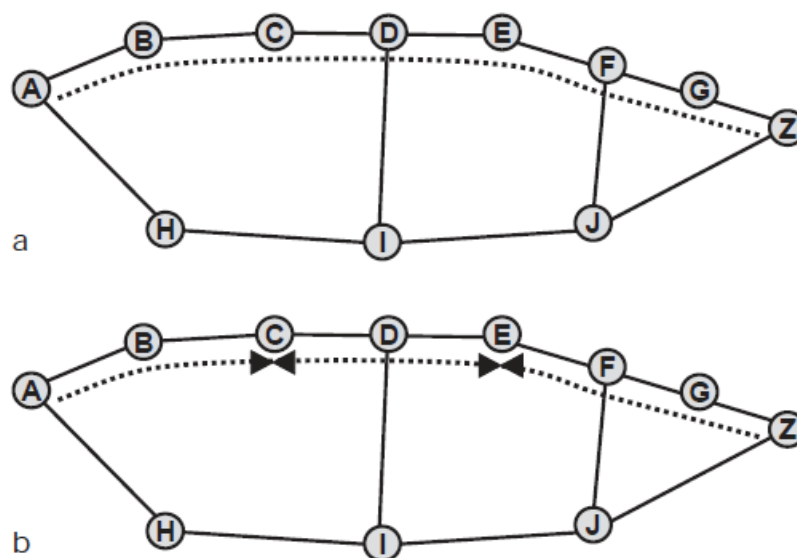
مسئله تخصیص طول موج با مسئله مسیریابی با مفهوم انتخاب مسیری بین درخواست ها که هر لینک در مسیر حداقل یک طول موج استفاده نشده داشته باشند در ارتباط است. این دو مسئله باهم به عنوان مسئله مسیریابی و تخصیص طول موج (RWA) مطرح می شوند. با توجه به این، می دانیم وجود بازسازی در برخی راس های شبکه حیاتی می باشد. در بخش ۲-۳ به بازسازی و اثر آن در مسئله روتینگ و تخصیص طول موج پرداخته می شود.

انتخاب مسیر های برقراری ارتباط و هم چنین انتخاب راس هایی از شبکه که در آن ها باز سازی رخ دهد دو مرحله اول می باشند که پس از آن ها مسئله تخصیص طول موج مطرح می شود و به عنوان مرحله سوم در طراحی شبکه های نوری می باشد. ولی این روش چند مرحله ای هیچ تضمینی برای پیدا کردن یک تخصیص طول موج معتبر برای درخواست های مختلف در شبکه نوری ندارد، در نتیجه باید حالت تک مرحله ای RWA در نظر گرفته شود. روش دیگر اجرای RWA به صورت تک مرحله ای می باشد. این روش پیچیده تر است اما هر مسیری که در آن پیدا می شود تضمین می شود که دارای تخصیص طول موج معتبر است. در بخش های ۳-۳ و ۳-۴ به ترتیب به RWA چند مرحله ای و RWA تک مرحله ای می پردازیم.

الگوریتم های تخصیص طول موج یکی از جنبه های پیچیده در شبکه های نوری می باشد. نتیجه بررسی های قبلی یک مجموعه از روش ها و الگوریتم های مطالعه شده است که دارای عملکرد و پیچیدگی متفاوت از نگاه اجرایی دارند. در بخش ۵-۳ تعدادی از استراتژی های مربوط که در طراحی شبکه های واقعی اثبات شده اند مورد بررسی قرار می گیرند.

۲-۳- نقش بازسازی در تخصیص طول موج

اگر یک درخواست به شکل تمام نوری از مبدا به مقصد ایجاد شود آنگاه برای مسیر پیدا شده باید در همه ی لینک های مسیر از یک طول موج استفاده شود. به طور مثال ارتباط بین راس های A, Z را در شکل ۱-۳a در نظر بگیرید که توسط مسیر هفت لینکی به هم راه دارند. اگر این ارتباط تمام نوری باشد آنگاه یک الگوریتم تخصیص طول موج نیاز دارد که یک طول موج خالی در طول لینک های این مسیر پیدا کند. در شکل ۱-۳b همان مسیر در راس های E و C دارای بازسازی است به گونه ای که ۳ زیر اتصال برقرار می کند ($A-C, C-E, E-Z$). در این حالت یک الگوریتم کافی است که طول موج های استفاده نشده در هر زیراتصال پیدا کند. و دیگر نیازی نیست که طول موج های هر دو زیر اتصال یکسان باشد، چرا که در راس بازسازی امکان تغییر طول موج داریم. پیدا کردن طول موج استفاده شده در یک زیر اتصال به مراتب آسان تر از پیدا کردن آن در یک اتصال کلی است. پس به طور کلی وجود بازسازی باعث افزایش احتمال یافتن یک تخصیص طول موج معتبر می شود. [8]



شکل ۱-۳ اهمیت بازسازی در شبکه های نوری

۳-۳- RWA چند مرحله ای

وقتی با مسئله ی طراحی شبکه به شکل چند مرحله ای برخورد می شود برای یک درخواست مسیر انتخاب می شود، اگر لازم باشد این مسیر به زیر مسیرهای مختلف تقسیم می شود و برای هر زیر مسیر یک طول موج اختصاص داده می شود و ممکن است اصلاً یک تخصیص طول موج معتبر برای یک زیر مسیر یا تعدادی از آن ها اتفاق نیفتد و نیاز به تکرار تعدادی از مراحل باشیم.

برای حداقل کردن تعداد اختلال طول موج در لینک ها به یک استراتژی خوب برای مسیریاب نیاز داریم. ابتدا یک مجموعه از مسیر های خاص کاندید برای مبدا و مقصد های مختلف در نظر می گیریم که مسیر های کاندید به گونه ای انتخاب شده اند که هزینه را کمینه کنند. وقتی درخواست ها اضافه می شود، حالت الان شبکه برای انتخاب مسیر برای یک درخواست خاص اختیار می شود. یک استراتژی خوب انتخاب مسیر با کمترین هزینه می باشد به طوری که کمترین تعداد طول موج های استفاده شده در هر لینک در طول مسیر ماکزیمم شود. این روش تضمین نمی کند که یک طول موج مشخص در لینک ها در مسیر استفاده نشده باشد بلکه به طول کلی شانس پیدا کردن یک تخصیص طول موج شدنی را بیشتر می کند.

وقتی درخواست ها به ترتیب اعمال می شود آنگاه الگوریتم به دنبال یک طول موج مشخص می گردد که در طول یکی مسیرهای کاندید استفاده نشده باشد پس شدنی بودن یک مسیر کاندید وقتی که به عنوان مسیر برای درخواست انتخاب می شود بررسی می شود. وقتی که تعدادی درخواست با هم به شبکه ارائه می شوند. که در واقعیت شبکه های نوری بیشتر به این شکل است. یک راه حل این است که درخواست ها را یکی یکی بررسی کنیم یعنی ابتدا مسیریابی کنیم سپس راس های بازسازی را انتخاب کنیم در واقع مسیر پیدا شده را به زیر مسیرها تقسیم کنیم سپس تخصیص طول موج را انجام دهیم. روش دیگر همانند بررسی به روش یک درخواست است که ابتدا برای هر درخواست مسیریابی و بازسازی انجام شود سپس تخصیص طول موج آغاز می شود که روشی با مزایایی بیشتر است در این الگوریتم تخصیص طول موج اطلاع کامل از مسیرها و زیرمسیرها دارد و از این اطلاعات برای بهتر کردن جواب مسئله تخصیص طول موج است. هرچند این روش از این که کدام طول موج در طول مسیر استفاده نشده است بهره نمی گیرد.

در این روش چند مرحله ای مسیریابی، بازسازی و تخصیص طول موج به مسیرها در عمل معمولاً خوب کار می کند ولی هر وقت که شبکه سنگین باشد می تواند تداخل طول موج رخ دهد و زیر مسیر ها انتخاب شده به تخصیص طول موج معتبر منجر نشود.[13]

۴-۳- RWA تک مرحله ای

بر خلاف تکیه بر تکنیکی که وقتی حالات نشدنی در تخصیص طول موج ایجاد می شود را برطرف کند طبیعی است که از اول به روشی فکر کنیم که به مسیریابی و تخصیص طول موج به عنوان یک مسئله واحد نگاه شود تا از شدنی بودن جواب از ابتدا مطمئن باشیم. در زیر روش های مختلف RWA تک مرحله ای بررسی می شود که هر یک قسمت پردازشی یا حافظه ای اضافه دارد. وقتی یک درخواست اضافه می شود که خیلی باز سنگینی ندارد روش RWA چند مرحله ای مشکل زیادی برای پیدا کردن مسیر شدنی ندارد پس در این حالت RWA چند مرحله ای بیشتر مورد علاقه ما است چرا که اغلب سریع تر است. حال حالتی که یک درخواست بار سنگین در شبکه حساب شود را در نظر بگیریم روش RWA یک مرحله ای روش بهتر برای اعمال است. [9]

۱-۴-۳- هرس کردن توپولوژی گراف

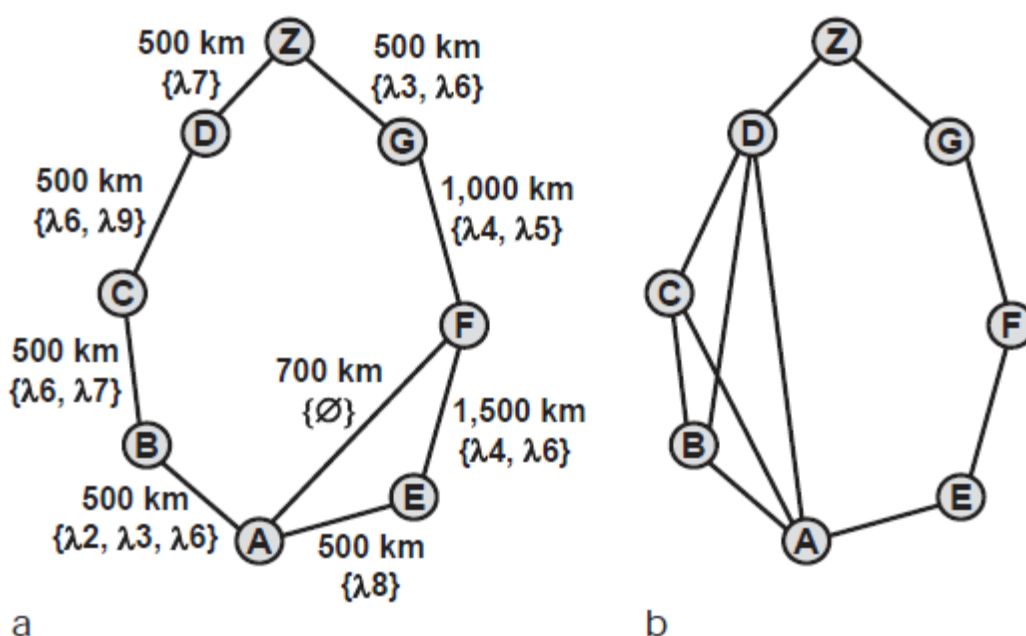
یکی از مقدماتی ترین روش های تک مرحله ای انتخاب یک طول موج خاص و کاهش شبکه به آن لینک هایی که از آنها همچنان این طول موج در دسترس است. سپس یکی از الگوریتم های مسیریابی مسئله کوتاه ترین مسیر در گراف مثلاً Dijkstra را در این گراف هرس شده اجرا کنیم، اگر هیچ مسیری پیدا نشد یا مسیر پیدا شده بیش از حد پیچیده و طولانی باشد یک طول موج دیگر انتخاب می شود و پروسه روی گراف هرس شده جدید اجرا می شود. این پروسه آنقدر برای طول موج های بعدی انجام می شود تا برای هر درخواست مسیر مطلوب با طول موج مربوطه مناسب پیدا شود. با این روش مطمئن هستیم که برای هر مسیر پیدا شده یک طول موج استفاده نشده وجود دارد. اگر مسیر مناسب بعد از تکرار این پروسه برای همه طول موج ها برای یک درخواست پیدا نشود می گوییم درخواست بلاک شده است.

در یک شبکه با راس های بازسازی، استفاده از ترکیب مسیریابی و تخصیص طول موج با هم مسئله را به شکلی که نیاز نیست سخت تر می کند چرا که به دنبال یک طول موج که در کل مسیر استفاده نشده به طول کامل می گردد. همان طور که بالا اشاره شد تنها کافی است که یک طول موج استفاده نشده در یک زیر مسیر پیدا شود نه کل یک مسیر end-to-end. یک روش این است که راس هایی که در آن ها احتمال بازسازی بیشتر است را انتخاب کنیم و روش ترکیبی مسیریابی و تخصیص طول موج را برای هر زیر مسیر احتمالی به تنهایی محاسبه کرده باشیم. به طور کلی این استراتژی ایده آل نمی باشد. [1]

۲-۴-۳- تبدیل به گراف دسترسی

یک روش مستقیم یکپارچه حل RWA ساخت گراف دسترسی زمانی که یک درخواست جدید ایجاد می شود، می باشد. گراف دسترسی به این صورت ساخته می شود که همه ی راس هایی که در آنها بازسازی رخ می دهد به همراه راس های مبدا و مقصد یک درخواست به عنوان راس های گراف دسترسی در نظر گرفته می شوند. بین هر دو راس از این گراف جدید لینک قرار می دهیم اگر و فقط اگر یک مسیر بدون راس بازسازی بین این دو راس در گراف اصلی باشد که دارای طول موج استفاده نشده در کل مسیر باشد. حتی اگر چند مسیر با این ویژگی در گراف اصلی باشد تنها یک لینک در گراف دسترسی قرار می دهیم. در یک طراحی گسترده (long-term) همه ی راس ها تقریباً در گراف دسترسی ظاهر می شوند. در حالی که در طراحی در لحظه (real-time) تنها راس ها با امکان بازسازی و راس مبدا و مقصد به گراف دسترسی اضافه می شود.

مثالی از چنین تبدیل در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. گراف اصلی در شکل ۲-۳a نشان داده شده است که طول موج های قابل استفاده روی هر لینک مشخص شده است. فرض شده است که دسترسی اپتیکال ۲۰۰۰ km باشد و همچنین درخواست بین راس های A و Z فرض شده است. گراف دسترسی حاصله در شکل ۲-۳b مشخص شده است.



شکل ۲-۳ نمونه ای از بدست آوردن گراف دسترسی

در یک شبکه واقعی با تعداد زیادی راس و طول موج ساخت گراف دسترسی می تواند فرایند زمان بری باشد. برای هر دو راس X و Y که امکان وجود مسیر با یک طول موج استفاده شده باید جست و جو را انجام

دهیم برای این کار می توان از روش هرس کردن شبکه که در بخش قبل توضیح داده شد استفاده کرد که در آن شبکه اصلی به شبکه ای که تنها در آن لینک هایی که برای یک طول موج مشخص استفاده شده اند وجود دارد، هرس شده است و از الگوریتم کوتاه ترین مسیر در توپولوژی هرس شده برای جست و جوی مسیر بین X و Y که راس بازسازی ندارد استفاده می شود. این پروسه برای هر طول موج تکرار می شود تا به یک مسیر بدون راس بازسازی برسیم.

با روش دیگر می توان الگوریتم k -کوتاه ترین مسیر را روی گراف اصلی اجرا کرد و k را به اندازه ای بزرگ انتخاب می کنیم که هر مسیر بدون بازسازی از X به Y پیدا شود سپس مسیر های پیدا شده برای یک طول موج استفاده نشده چک می شود اگر یک مسیر بدون راس بازسازی پیدا شد یک لینک در گراف دسترسی اضافه می شود به این صورت گراف دسترسی کامل می شود.

برای کاهش زمان اجرا برای پیدا کردن گراف دسترسی، می توان تعداد کمتری مسیرهای بدون راس بازسازی بین هر دو راس در نظر گرفت به گونه ای که بین هر دو راس در صورت وجود حداقل یک مسیر بدون راس بازسازی باشد. در این حالت تعداد دفعاتی که الگوریتم کوتاه ترین مسیر استفاده می شود کاهش می یابد ولی این روش تضمینی برای پیدا کردن یک مسیر بدون بازسازی شدنی در صورت وجود نمی دهد. هر چند در عمل اغلب به خوبی کار می کند.

وقتی گراف دسترسی ساخته شد الگوریتم کوتاه ترین مسیر از مبدا درخواست به مقصد درخواست اجرا می شود تا میر با کمترین تعداد لینک یافت شود که هر لینک نشان دهنده ی یک زیر مسیر در گراف اصلی است. اگر یک مسیر پیدا شود آنگاه تضمین می شود که کمترین تعداد بازسازی ها استفاده شده است و زیر مسیر های مسیر پیدا شده تضمین می شود که طول موج استفاده نشده دارند. به طور مثال در شکل 3-4، مسیر $A-D-Z$ یافت شده است که به زیر مسیر های $A-B-C-D$ و $D-Z$ در گراف اصلی متناظر است به این زیر مسیر ها λ_6 و λ_7 به ترتیب تخصیص داده شده است.[1]

۳-۴-۳- روش های مبتنی بر جریان در گراف

تکنیک بهینه سازی می تواند در مسئله RWA تک مرحله ای اعمال شود با توجه به بحث بخش ۳-۹ از کتاب Simmons می دانیم که روش برنامه ریزی خطی صحیح (ILP) به طور کلی برای مسئله واقعی قابل اعمال نیست در حالی که روش برنامه ریزی خطی (LP) شدنی تر است. محدود نکردن به حالت صحیح امکان همگرایی سریع تر را فراهم می کند.

RWA برای مجموعه ای از درخواست ها می تواند با مسئله جریان مدل شود که متغیر متغیر ها و شرایط اضافی ایجاد می شود که شرایط لازم برای تخصیص طول موج ایجاد شود. به طور معمول جواب صحیح مد نظر است که برای هر درخواست مسیری را در نظر می گیرد از یک طول موج در طول لینک های خود استفاده می کند. در این روش زمان اجرا تقریباً بالا است برای سرعت بخشیدن به الگوریتم، ورودی دادن مجموعه مسیر هایی که توسط درخواست ها بین هر مبدا و مقصد ایجاد می شود توصیه می شود. محدود کردن LP به مجموعه ای از مسیر های کاندید به گونه ای که باعث مانع شدن الگوریتم LP برای انتخاب آزادانه در مسیر های موجود شود ممکن است به جوابی مغایر با جواب بهینه بیانجامد. هر چند با انتخاب خوب از مسیر های کاندید این مغایرت خیلی کم خواهد بود. از دیگر مزیت های پیش انتخاب مسیر ها می توان به پیش انتخاب راس های بازسازی اشاره کرد که باعث می شود به جای اهمیت داشتن پیوستگی طول موج در کل مسیر، تنها زیر مسیر ها اهمیت پیدا کنند. به عنوان نتیجه همانطور که قبلاً پیشنهاد شد، وقتی یک مجموعه زیاد از تقاضا ها داریم استفاده از یک روش یک مرحله ای مانند روش LP ممکن است بیشتر به مصلحت باشد.

روش مبتنی بر جریان حل RWA به این صورت است که شرط پیوستگی طول موج با در نظر گرفتن گراف تبدیل برای لایه های مختلف طول موج اعمال می شود فرض کنید w طول موج در فیبر نوری موجود باشد پس می توانیم گراف شبکه را با w کپی برای هر لینک در نظر بگیریم و از هر راس هم w کپی مختلف در نظر بگیریم حال با اجرای الگوریتم ماکزیمم جریان در هر یک از مبدا و مقصد های درخواست ها از خروجی الگوریتم که مسیر های مختلفی را پیشنهاد می دهد یکی را بر می گزینیم. [11]

۴-۴-۳- روش مبتنی بر ILP در شبکه حلقه ای

هر چند که روش فرمول بندی به صورت ILP به طور کلی در مسئله عملی کند کار می کند، اما باز هم در شبکه های حلقوی مدل ساده شده ILP استفاده می شود.

گام اول آن است که همه مسیر هایی که ممکن است توسط درخواست ها استفاده شود را لیست کنیم. سپس یک گراف بسازیم که هر مسیر در لیست نمایان گر یک راس در این گراف است و بین دو راس لینک قرار می دهیم اگر و فقط اگر در مسیر متناظر با این دو راس لااقل یک لینک مشترک باشد حلقه ها در گراف یک جهت در نظر گرفته می شوند. پس از راس B به C ممکن است با مسیر از راس C به B در گراف اصلی متفاوت باشد، محدودیت این که دو مسیر حلقوی نمی توانند از یک طول موج استفاده کنند به محدودیت این که در گراف جدید دو راس مجاور رنگ یکسان نداشته باشند می انجامد.

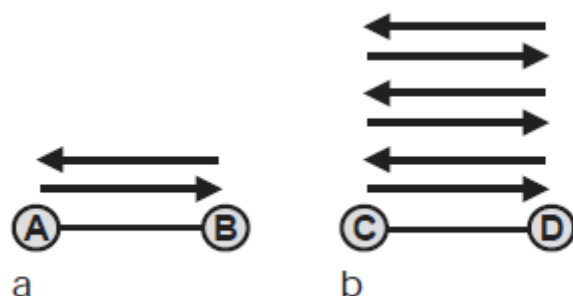
این فرمولبندی منجر به مسئله رنگ آمیزی گراف می شود سپس همه ی maximum independent set ها را در گراف حاصله در نظر می گیریم. یک independent set یک مجموعه از راس های گراف است که جفت جفت همسایه نیستند. حال با این تعریف MIS یک مجموعه ای از راس ها است که هر راسی که در MIS نیست لااقل با یکی از اعضای MIS همسایه است. توجه کنید که می توان همه ی راس های موجود در MIS را هم رنگ در نظر گرفت. حال می توان فرمول بندی ILP برای هر MIS ارائه داد و این مسئله به روش ILP حل شود. ILP مسیر های مختلف را در حلقه ها انتخاب می کند و طول موج برای هر درخواست درون حلقه در نظر می گیرد. [13]

۵-۳- استراتژی های تخصیص طول موج

یک استراتژی مشخص تخصیص طول موج می تواند در عملکرد و کارایی هر دو RWA یک مرحله ای و چند مرحله ای تاثیر بگذارد. با RWA چند مرحله ای یک مسیر انتخاب می شود سپس این مسیر توسط راس های بازسازی به زیر مسیر ها تقسیم می شود. اگر راس بازسازی وجود نداشته باشد کل مسیر یک زیر مسیر در نظر گرفته می شود. حال استراتژی تخصیص طول موج زمانی که برای هر زیر مسیر یک طول موج در نظر گرفته می شود به کار می آید.

برای RWA تک مرحله ای استراتژی تخصیص طول موج ترتیبی که کدام طول موج زمانی که هرس شبکه انجام می شود یا یک لینک به گراف دسترسی اضافه می شود در نظر گرفته شود، را تصمیم می گیرد. یک استراتژی خاص تخصیص طول موج در روش های مبتنی بر جریان خیلی تاثیری ندارد ولی تابع هزینه می تواند انتخاب طول موج را تحت تاثیر قرار دهد. اگر در RWA چند مرحله ای یک طول موج استفاده شده برای یک زیر مسیر وجود نداشته باشد از یکی از روش های بخش ۱-۵-۳ استفاده می کنیم یا گزارش می کنیم که درخواست بلاک شده است، در RWA تک مرحله ای اگر متود به کار رفته موفق به پیدا کردن جواب نشود گوییم درخواست بلاک شده است.

طول موج ها باید به گونه ای تخصیص یابد که یک طول موج خاص نباید دوبار در یک فیبر استفاده شود، برای واضح نمودن این محدودیت به شکل ۳-۳ توجه کنیم. لینک AB در شکل 3-4a یک ترافیک از A به B و یک ترافیک دیگر از B به A را جابجا می کند یک طول موج می تواند یک بار از A به B و بار دیگر از B به A استفاده شود. حال جفت C و D توسط ۳ ترافیک فیبری اشغال شده است سه تا از C به D و سه تا از D به C.



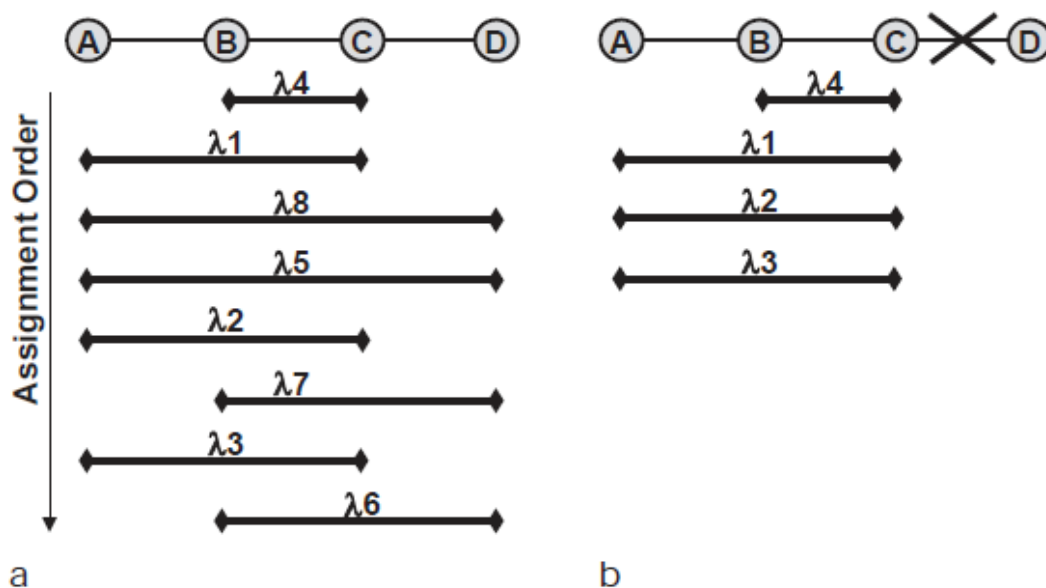
شکل ۳-۳ تخصیص طول موج دو جهته

استراتژی های مختلف تخصیص طول موج در سال های مختلف توسعه یافته اند. که در عملکرد تفاوت خیلی کمی با هم دارند. در اینجا ۳ تا از رویه های پرکاربرد را بررسی می کنیم:

First – Fit ۳-۵-۱

first - fit ساده ترین رویه از میان سه روش تخصیص طول موج می باشد. برای هر طول موج یک ایندکس در نظر گرفته می شود از ۱ تا W که W ماکزیمم تعداد طول موج هایی است که توسط فیبر تامین می شود. هیچ ارتباطی بین ایندکس ها این که طول موج کجای طیف قرار دارد وجود ندارد. این ایندکس ها همواره ثابت باقی می مانند و در زمان اجرای تخصیص طول موج این طول موج ها از ایندکس کوچک به ایندکس بزرگ استفاده می شوند و اولین طول موج در دسترس پیدا شده استفاده می شود.

این منطقی است که از ایندکس گذاری first-fit برای اینکه شبکه را در جهتی که باعث پیشرفت کارایی آن باشد، استفاده کنیم. به عنوان مثال شکل ۳-۴ را در نظر بگیرید که فرض شده است طول موج در سیستم وجود دارد و فرض می کنیم به ترتیب $\lambda_4, \lambda_1, \lambda_8, \lambda_5, \lambda_2, \lambda_7, \lambda_3, \lambda_6$ باشد. با تمرکز روی ۳ لینک نشان داده شده در شکل 3-4a فرض کنید ۸ طول موج با ترتیب نشان داده شده در شکل اضافه شده اند. [15]



شکل ۳-۴ رویه first – fit

۲-۵-۳ Most Used

رویه دوم که مورد بحث می باشد Most Used می باشد. Most Used نسبت به first-first بیشتر تطبیق پذیر است هر چند که به اطلاعات بیشتری نیاز دارد. وقتی که لازم است که طول موجی تخصیص داده شود طول موج ها بر اساس این که هر طول موج روی چه تعداد لینک قبلاً استفاده شده است ترتیب می یابند. طول موجی که به تعداد بیشتری لینک قبلاً تخصیص داده شده است کمترین ایندکس را دریافت می کند و بقیه هم به همین ترتیب پس از آنکه طول موج ها ایندکس گزاری شدند حال تخصیص طول موج همانند first-first ادامه می یابد. انگیزه پست این رویه این است که طول موجی که قبلاً در تعداد لینک بیشتری استفاده شده است الان شانس کمتری برای دوباره استفاده شدن دارد. [15]

۲-۵-۳ Relative capacity less

RCL از جفت روش های قبل پیچیده تر است. ایده آن بر اساس این است که چقدر یک تخصیص طول موج در حال حاضر ممکن است در آینده برای یک درخواست دیگر در شبکه صفر باشد یعنی چقدر ممکن است باعث تداخل در درخواست های بعدی شود. این رویه بیشتر در RWA چند مرحله ای استفاده می شود پس در ادامه بیشتر روی این روش تمرکز می کنیم.

اولین قدم در RCL، تولید کردن مجموعه ای از مسیر ها ی ممکن در شبکه است. مثلاً بر اساس پیش بینی ترافیک. وقتی که بازسازی هم در شبکه در نظر گرفته می شود لازم است که زیر مسیر ها هم در نظر گرفته شوند و همچنین وقتی انتظار می رود یک زیر مسیر بیشتر استفاده شود لازم است که چندین کپی از آن در نظر گرفته شود. این پیدا کردن مسیر ها قبل از اضافه شدن درخواست ها به شبکه انجام می شود و می تواند با تغییر در شبکه بعداً آپدیت هم شود.

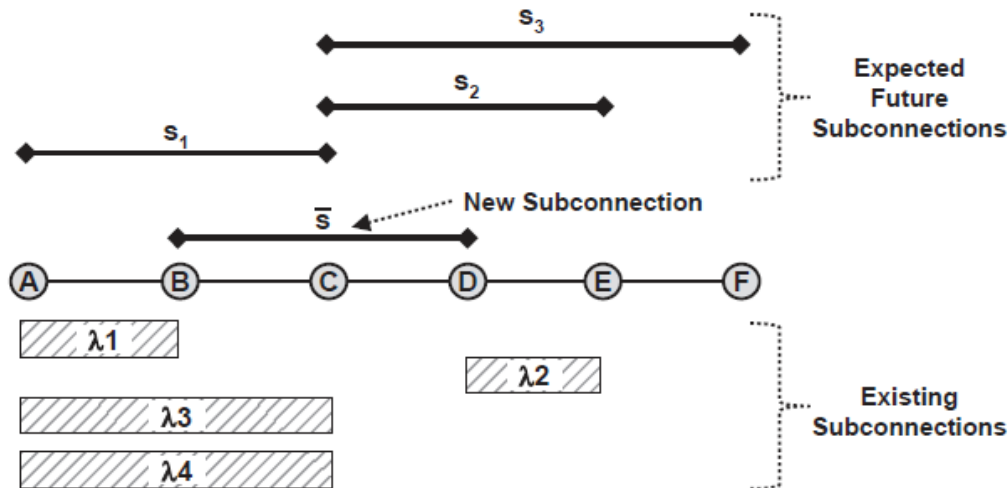
وقتی که یک درخواست وارد شبکه می شود یک مسیر ارتباطی انتخاب می شود و این مسیر به زیر مسیر ها تقسیم می شود و برای هر زیر مسیر یک طول موج باید اختیار شود. حال یکی از چنین زیر مسیر هایی را مثلاً S_i در نظر بگیرید. حال مجموعه ی S را به گونه ای تعریف می کنیم که شامل همه ی زیر مسیر هایی است که با S_i لا اقل یک لینک مشترک دارند. و حال برای هر S_j در S تعداد طول موج هایی که در S_j استفاده نشده است را با N_j نشان می دهیم.

سپس برای هر طول موج λ_i که ممکن است به S_i تخصیص داده شود که $1 \leq i \leq w$ چک می شود که آیا امکان دارد S_j تحت تاثیر قرار گیر اگر λ_i برای S_i استفاده شود بنابراین I_{ij} برابر یک قرار می گیرد اگر انتخاب λ_i برای S_i ، S_j را تحت تاثیر قرار دهد. در غیر اینصورت ۰ قرار می گیرد. حال برای هر λ_i متغیر زیر را برای S_i محاسبه می کنیم:

$$C_i = \sum_j \frac{I_{ij}}{N_j}$$

حال λ_i با کمترین C_i برای تخصیص داده شدن به \underline{S} استفاده می شود.

این الگوریتم در شکل ۵-۳ با فرض حداکثر ۵ طول موج برای هر فیبر و حداکثر یک فیبر برای هر لینک استفاده شده است.



شکل ۵-۳ رویه RLC

رویه RCL به طور خاصی برای حالتی که درخواست ها به نوبت وارد شبکه می شوند مناسب است. در این سناریو با روش RWA چند مرحله ای همه ی زیر مسیر ها قبل از شروع تخصیص طول موج ها مشخص هستند و وقتی تخصیص یک طول موج به یک زیر مسیر در حال وقوع است و مجموعه ی S برای آن در حال محاسبه است کافی است تنها زیر مسیر هایی که به آنها طول موج تخصیص داده نشده است در نظر گرفته شود. [15]

فصل ۴- پیاده سازی و نتایج عددی

۴-۱- مقدمه

در ابتدای این فصل به ارائه یک راه حل مبتنی بر ILP می پردازیم سپس در ادامه این فصل به کار هایی که ما برای حل مسئله ای که در فصل یک مطرح شد، انجام دادیم، می پردازیم که تلفیقی از روش های ارائه شده در فصل ۳ می باشد. ابتدا برای درک بهتر در بخش ۳-۴ الگوریتم ها مورد استفاده توضیح داده می شود و در ادامه در بخش ۳-۵ به توضیح روش حل تقریبی خود می پردازیم و در بخش پایانی نتایجی از اجرای برنامه در شبکه US، German و European ارائه می دهیم و با نتایج ILP مقایسه می کنیم.

۴-۲- راه حل ILP

برای مدل کردن مسئله برای راه حل ILP، گراف با N راس و $2E$ یال جهت دار (E یال بدون جهت) را در نظر می گیریم، یال ها را با $e = 1, 2, \dots, 2E$ شماره گذاری می کنیم. فرض میکنیم $s(e)$ راس شروع یال جهت دار e و $d(e)$ راس پایان آن و w_e وزن لینک باشد. همچنین فرض می کنیم H درخواست در شبکه موجود باشد. که با $h = 1, 2, \dots, H$ شماره گذاری شده اند و فرض میکنیم $s(h)$ راس شروع مسیر h و $d(e)$ راس پایان آن باشد. متغیر های P_e^h را به این صورت تعریف می کنیم که P_e^h برابر یک است اگر e در مسیر h قرار داشته باشد و غیر این صورت برابر صفر باشد. پس در کل $2EH$ متغیر تعریف می شود. حال فرمول بندی مربوط به ILP به صورت زیر خواهد:

$$\min \max_h \delta^h \quad (1)$$

به طوری که

$$\delta^h = \sum_e w_e P_e^h \quad \forall h \quad (2)$$

$$\sum_{d(e)=n} P_e^h = \sum_{s(e)=n} P_e^h \quad \forall h, n = 1, \dots, N: n \neq s(h), d(h) \quad (3)$$

$$\sum_{s(e)=s(h)} P_e^h = 1; \quad \sum_{d(e)=d(h)} P_e^h = 1 \quad \forall h \quad (4)$$

$$\sum_{d(e)=s(h)} P_e^h = 0; \quad \sum_{s(e)=d(h)} P_e^h = 0 \quad \forall h \quad (5)$$

$$\sum_h P_e^h \leq M \quad \forall e \quad (6)$$

رابطه (۲) تعریف فاصله در طول مسیر و رابطه (۳) تا (۵) قوانین پایداری شار را بررسی می کنند و رابطه (۶) مربوط به حداکثر تعداد طول موج های مربوط به یک فیبرنوری (M) می باشد. [4]

حال می بینیم که رابطه تابع هدف یک تابع خطی نمی باشد پس با تغییر متغیر مناسب آن را خطی می کنیم و مسئله به مسئله زیر تبدیل می شود.

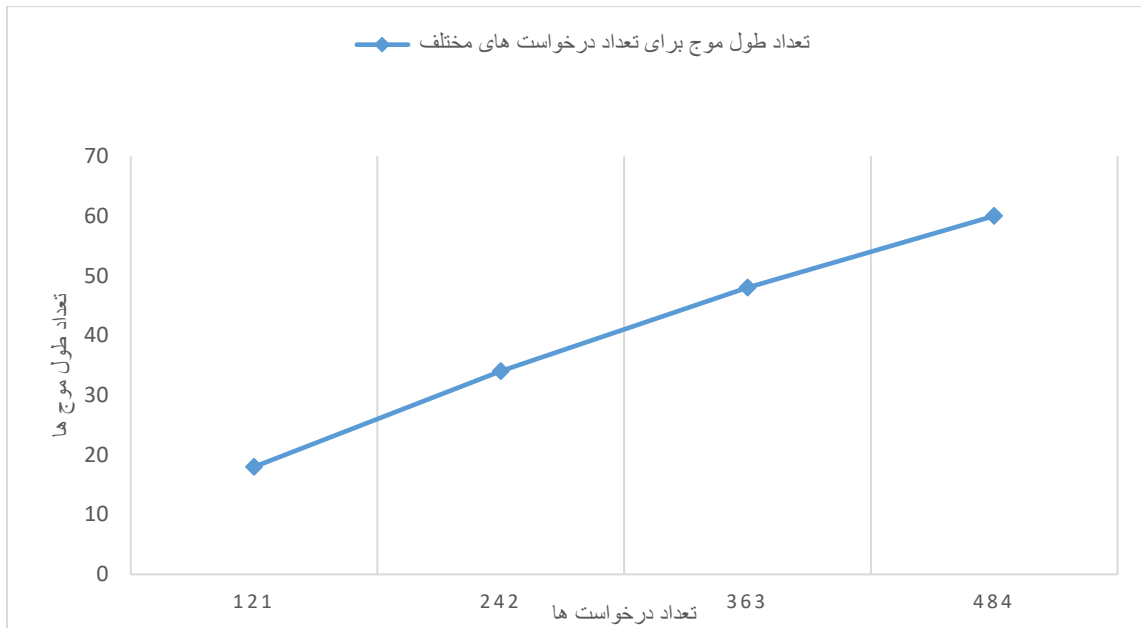
$$\min_{\text{تخصیص های ممکن}} Z \quad (1')$$

$$Z \geq \delta^h \quad \forall h \quad (7)$$

حال تابع هدف (1') به همراه شرط های (۲) الی (۷) روابط فرمولی مربوط به ILP مسئله می باشد و نتایج حاصل از پیاده سازی آن در شبکه US در ادامه برای تعداد درخواست های مختلف به صورت جدول و نمودار نشان داده شده است و این نتایج در فصل بعد با نتایج بدست آمده برای همین شبکه با روش تقریبی مقایسه خواهد شد.

تعداد درخواست ها در شبکه US	تعداد طول موج استفاده شده توسط روش ILP
۱۲۱	۱۸
۲۴۲	۳۴
۳۶۳	۴۸
۴۸۴	۶۰

جدول ۴-۱ تعداد طول موج برای تعداد درخواست های مختلف در شبکه US با روش ILP



شکل ۴-۱ نمودار تعداد طول موج برای تعداد درخواست های مختلف در شبکه US با روش ILP

با توجه به نمودار با افزایش تعداد درخواست ها در شبکه به طور طبیعی تعداد طول موج های استفاده شده نیز افزایش یافته است.

۴-۳- پیشنیاز ها و چند الگوریتم از نظریه گراف

۴-۳-۱- روش تقسیم دودویی برای پیدا کردن ریشه یک تابع یکنوا

فرض کنید یک تابع یکنوا داریم که دارای تنها یک ریشه در بازه $[L, R]$ باشد آنگاه برای پیدا کردن این ریشه می توان از روش bisection استفاده کرد، گیریم بدون کاسته شدن از کلیت تابع صعودی باشد و فرض می کنیم مقدار تابع در L منفی و در R مثبت است. حال مقدار تابع در $\frac{L+R}{2}$ در نظر میگیریم که اگر این مقدار منفی باشد جواب در بازه $\left[\frac{L+R}{2}, R\right]$ قرار دارد یا در غیر این صورت در بازه $\left[L, \frac{L+R}{2}\right]$ قرار می گیرد. که در هر دو حالت طول بازه نصف می شود. این روند نصف کردن بازه کاندید جواب را آنقدر ادامه می دهیم تا بازه به اندازه کافی کوچک باشد در این صورت مقدار یک عدد از بازه را به عنوان جواب معادله گزارش می دهیم. اگر بدانیم تابع فقط به ازای اعداد صحیح مقدار دارد آنگاه به جواب دقیق دست میابیم.

۲-۳-۴- شبکه ی شار (Flow Network)

یک شبکه ی شار یک گراف جهت دار $G = (V, E)$ است که در آن هر لینک $(u, v) \in E$ یک ظرفیت غیر منفی $c(u, v)$ دارد. اگر $(u, v) \notin E$ برای راحتی تعریف می کنیم $c(u, v) = 0$. دو راس s به عنوان مبدا و راس t به عنوان مقصد را مشخص می کنیم. برای راحتی، فرض می کنیم هر راس در یک مسیر از مبدا به مقصد قرار دارد. به این معنی که برای هر راس v ، شبکه ی شار حاوی یک مسیر $s \rightarrow v \rightarrow t$ می باشد. بنابراین گراف همبند بوده و هر راس به غیر از s دارای حداقل یک لینک ورودی می باشد که در نتیجه $|E| \geq |V| - 1$.

حال به تعریف شار می پردازیم. فرض کنید $G = (V, E)$ یک گراف باشد، که دارای تابع ظرفیت c می باشد که s راس مبدا و t راس مقصد می باشد. یک شار، یک تابع با مقدار حقیقی $f: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ است که دو مشخصه ی زیر را برقرار می کند:

- محدودیت ظرفیت: برای هر $(u, v) \in E$ باید $0 \leq f(u, v) \leq c(u, v)$ باشد.
 - شرط بقای شارش: برای هر $u \in V - \{s, t\}$ باید $\sum_{v \in V} f(u, v) = \sum_{v \in V} f(v, u)$.
- یا به عبارت دیگر شار ورودی هر راس به جز مبدا و مقصد باید برابر با شار خروجی همان راس باشد و اگر بین u و v یالی وجود نداشته باشد هیچ شاری نمی تواند بین u و v باشد، بنابراین $f(u, v) = 0$.

به کمیت غیر منفی $f(u, v)$ شار از راس u به راس v گفته می شود. مقدار شار f به صورت زیر تعریف می شود:

$$|f| = \sum_{v \in V} f(s, v) - \sum_{v \in V} f(v, s)$$

که همان شار کل خروجی از مبدا منهای شار کل ورودی به مبدا است. در مساله ی شار بیشینه، می خواهیم در یک شبکه ی شار G با مبدا s و مقصد t یک شار با مقدار بیشینه بیابیم. [2]

۳-۳-۴- شبکه ی باقی مانده و مسیر افزایشی

فرض کنید شبکه ی G و شار f در این شبکه داده شده اند، شبکه ی باقی مانده ی G_f تشکیل شده از لینک هایی دارای ظرفیت که مشخص می کند چگونه می توانیم شار را در G تغییر دهیم. یک لینک می تواند شاری اضافی با مقدار ظرفیت لینک منهای شار عبوری را از خود عبور دهد. اگر این مقدار مثبت بود در گراف باقی مانده یالی با ظرفیت باقی مانده ی $c_f(u, v) = c(u, v) - f(u, v)$ قرار می دهیم. تنها لینک هایی در G_f وجود دارند که می توانند شار بیشتری عبور دهند. اگر یالی شار با مقدار ظرفیت خودش داشته باشد در G_f نمی آید.

علاوه بر این G_f ممکن است حاوی لینک هایی باشد که در G نیامده اند. حذف مقداری شار از لینک (u, v) معادل با عبور دادن همان مقدار شار از v به u است. ممکن است الگوریتم برای بیشتر کردن شار

مجبور به حذف مقداری شار از یک لینک باشد، بنابراین اگر در G مقدار $f(u, v)$ شار از (u, v) عبور داده شده باشد، در G_f یالی با $c_f(v, u) = f(u, v)$ اضافه می کنیم. در شبکه ی شار $G = (V, E)$ با تابع شار f ، یک مسیر افزایشی یک مسیر ساده از s به t در گراف باقی مانده G_f است [2].

۴-۳-۴ روش فورد-فولکرسون

Ford-Fulkerson-Method (G, s, t):
 $f = 0$
 While there is an augmenting path p in G_f
 Augment flow f along p
 Return f

در این روش در گراف باقی مانده به دنبال یک مسیر افزایشی در G_f هستیم و چون پیدا کردن یک مسیر p در G_f به معنی این است که یک دنباله از راس های متوالی با ظرفیت غیر صفر از s به t وجود دارد، می توانیم شار را به اندازه ی کمینه ظرفیت در p اضافه کنیم. پس از اضافه کردن شار، G_f تغییر می کند، و تا زمانی که در G_f مسیر افزایشی وجود داشته باشد این کار را ادامه می دهیم. الگوریتم زمانی متوقف می شود که مسیر افزایشی در G_f وجود نداشته باشد و در نتیجه f بیشینه شار است. [3]

۴-۳-۵ مساله ی شار با هزینه ی کمینه

در یک شبکه شار $G = (V, E)$ با مبدا s و مقصد t ، علاوه بر تابع ظرفیت و شار، یک تابع هزینه $cost: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ تعریف می کنیم که هزینه ی عبور هر واحد شار از یک لینک را مشخص میکند، برای راحتی اگر $(u, v) \notin E$ برقرار باشد، $cost(u, v) = \infty$ در نظر می گیریم. می خواهیم برای یک مقدار K از بین تمامی شار ها با مقدار K ، شار با کمترین هزینه را بیابیم. گاهی اوقات می خواهیم بین تمامی شار های بیشینه، شار با کمترین هزینه را بیابیم، که به آن مساله ی شار بیشینه-هزینه ی کمینه (minimum cost-maximum flow) گفته می شود. [3]

۶-۳-۴ - یافتن شار K با کمترین هزینه

ابتدا شار عبوری تمامی لینک ها صفر است. برای هر لینک (u, v) یک لینک برعکس (v, u) به شبکه اضافه می کنیم که دارای $c(v, u) = 0$ و دارای هزینه $c(u, v) = -cost(u, v)$ است. علاوه بر این همیشه $f(u, v) = -f(v, u)$ را در طول الگوریتم حفظ می کنیم. در هر مرحله در گراف باقی مانده G_f (که در آن تمامی لینک ها با ظرفیت مثبت با هزینه شان وجود دارند) به دنبال یک مسیر افزایشی p هستیم و از بین تمامی مسیر های افزایشی مسیری که مجموع هزینه لینک های آن کمینه است را انتخاب می کنیم. می توانیم شار را به اندازه y کمینه ظرفیت لینک های p اضافه کنیم، ولی تنها در صورتی این کار را می کنیم که شار کل از K بیشتر نشود، اگر مقدار شار کل از K بیشتر میشد، تنها به مقداری به شار اضافه می کنیم که شار کل برابر با K شود. برای حل مساله مساله y شار بیشینه-هزینه y کمینه می توانیم K را به سمت بی نهایت میل دهیم $(K \rightarrow \infty)$ [3].

۴-۴ - ارائه راه حل تقریبی

حال با توجه به بخش های قبل به ارائه راه حلی تقریبی برای مسئله مطرح شده در بخش 3-1 می پردازیم. توجه می کنیم که اگر ما بتوانیم همه درخواست های ایجاد شده در شبکه را بتوانیم با ماکزیمم فاصله کمتر مساوی d ارتباط برقرار کرده باشیم آنگاه برای هر فاصله $d + \epsilon$ که ϵ یک عدد مثبت می باشد نیز چنین اتفاقی افتاده است پس بر روی این که جواب تابع هدف چه مقداری باشد از روش تقسیم دودویی استفاده می کنیم یعنی با در نظر گرفتن یک بازه قبل قبول که می دانیم جواب در آن بازه قرار دارد مثلاً بازه صفر تا اندازه قطر گراف و هر بار بررسی وسط بازه طول بازه را نصف می کنیم تا با توجه به آن که طول بازه همواره عددی صحیح است زمانی که طول بازه در اجرای الگوریتم صفر شد متوقف شد و نتیجه را گزارش دهیم. حال کافی است بررسی کنیم آیا با ماکزیمم فاصله داده شده d_0 ، شبکه داری توانایی برقراری ارتباط بین هر دو درخواست می باشد به گونه ای که طول مسیر هر ارتباط نهایتاً d_0 باشد و هیچ دو مسیری در گراف داری لینک مشترک نباشد.

با توجه به مطالعاتی که تاکنون انجام شده ثابت شده است پیدا کردن تعدادی مسیر در یک گراف بین مجموعه از راس های داده شده به گونه ای که مسیر ها مجزای یالی باشد و اندازه مجموعه درخواست ها بیش از ۲ باشد NP complete می باشد [5]. به همین دلیل ما به دنبال روشی تقریبی برای بررسی امکان پذیر بودن یافتن مسیر های مجزای یالی بین هر دو راس در مجموعه درخواست ها می باشیم. به گونه ای که نهایتاً طول هر مسیر به d_0 برسد.

بر این منظور تخصیص طول موج first-fit را از بخش ۱ - ۵ - ۳ در نظر می گیریم و یک کپی از گراف اصلی را برای این طول موج در نظر می گیریم و تلاش می کنیم برای اولین طول موج که از آن می خواهیم برای برقراری ارتباط میان درخواست ها استفاده کنیم، حداکثر میزان ممکن را استفاده کنیم یعنی بیشترین تعداد ممکن از درخواست ها را برای این طول موج مشخص در این گراف ساخته شده جواب گو باشیم. باز در این لحظه الگوریتم مناسبی برای این که کدام زیر مجموعه از درخواست ها را برای برقراری ارتباط در این گراف انتخاب کنیم تا ماکزیمم تعداد آنها جواب داده شود سراغ نداریم و با توجه زیاد بودن تعداد درخواست ها بررسی کردن همه حالات امکان پذیر نیست.

می توان مشکل مطرح شده برای بررسی همه زیر مجموعه های مجموعه ی درخواست ها را با بررسی به روش back-track حل نمود. ابتدا لازم است بدانیم که با الگوریتم شار بیشینه-هزینه ی کمینه می توان بیشترین تعداد مسیر های مجرای یالی که از یک راس خارج می شوند و به مجموعه ای رئوس ختم می شود را به کمترین هزینه ممکن پیدا نمود به این صورت که با در نظر گرفتن یک راس مجازی همه راس های مقصد را به آن وصل می کنیم و با اجرای الگوریتم ماکزیمم شار می دانیم که مسیر هایی که شار از آن ها جاری می شود مسیر های مجزای یالی هستند، پس کافی است الگوریتم شار بیشینه-هزینه ی کمینه را با حد بالا برای مسیر های ارسال شار در نظر بگیریم تا امکان پذیر بود مقدار d_0 برای تابع هدف را بررسی کنیم. حال آنکه در این روش می توان d_0 را نیز به عنوان ورودی وارد الگوریتم نمود و یافتن مسیر های افزایشی در اجرای الگوریتم شار بیشینه-هزینه ی کمینه، را محدود به مسیر هایی نمود که طول آنها نهایتاً d_0 است به این صورت که در الگوریتم برای پیدا کردن مسیر افزایشی برای عبور جریان شرطی مبنی بر در نظر نگرفتن مسیر هایی با طول بیش از d_0 به الگوریتم اضافه می کنیم.

حال با این دانش از نحوه یافتن مسیر های مجزا در گراف می توان k راس را برای نقطه شروع الگوریتم شار بیشینه-هزینه ی کمینه در نظر می گیریم و برای راس اول الگوریتم را اجرا نمود و از گراف مسئله لینک هایی که در مسیر های پیدا شده برای راس اول می باشد حذف می کنیم حال در گراف باقی مانده به پیدا کردن مسیر برای درخواست های بعدی با الگوریتم شار بیشینه-هزینه ی کمینه از راس دوم در لیست k تایی خود می پردازیم و همین رویه را ادامه می دهیم تا دیگر امکان برقراری ارتباط بین هیچ دو راسی از مجموعه درخواست ها نباشد یا همه ارس های شروع در لیست تمام شود.

بهترین انتخاب برای k ، همه راس های گراف است در واقع لیست k تایی همه جایگشت های رئوس گراف اصلی باشد اما این حالت می تواند به زمان اجرا فوق العاده زیاد منجر شود پس k را به گونه ای انتخاب می کنیم که زمان اجرا بسته به شبکه و تعداد درخواست ها مقدار معقولی باشد.

حال با توجه به آنکه همه جایگشت های مختلف از رئوس گراف را نمی توان بررسی کرد با ثابت کردن مقدار k ، با بررسی همه حالات انتخاب k ، انتخابی را در نظر می گیریم که بیشتر استفاده از این طول موج

را داشته باشد. سپس به سراغ طول موج بعدی رفته و رویه فوق را تکرار می کنیم. پس از آن که تمام ظرفیت های لینک های مخابراتی استفاده شد، اگر همه در خواست ها برقرار شده بود توانستیم با یک روش تقریبی و حریصانه برای ماکزیمم فاصله d_0 مسئله را حل کنیم، در غیر این صورت گزارش می کنیم که این مجموعه درخواست ها در این شبکه بلاک شده است.

۵-۴- پیچیدگی زمانی روش پیشنهادی

با توجه به روش پیدا کردن کوتاه ترین مسیر در گراف برای الگوریتم شار بیشینه-هزینه ی کمینه و این که مقدار k به عنوان ورودی مسئله در نظر بگیریم و فرض کنیم تعداد راس های گراف برابر n و تعداد لینک ها برابر m و تعداد درخواست ها q باشد داریم :

$$O((k! \binom{n}{k})[n * m * T(n, m) + q]) \log_2(\text{MAX})$$

که در آن $T(n, m)$ پیچیدگی زمانی برای پیدا کردن کوتاه ترین مسیر در گراف در نظر گرفت و MAX برابر قطر گراف یعنی بزرگترین مسیر، در مجموعه کوتاه ترین مسیر ها بین هر دو راس از گراف می باشد.

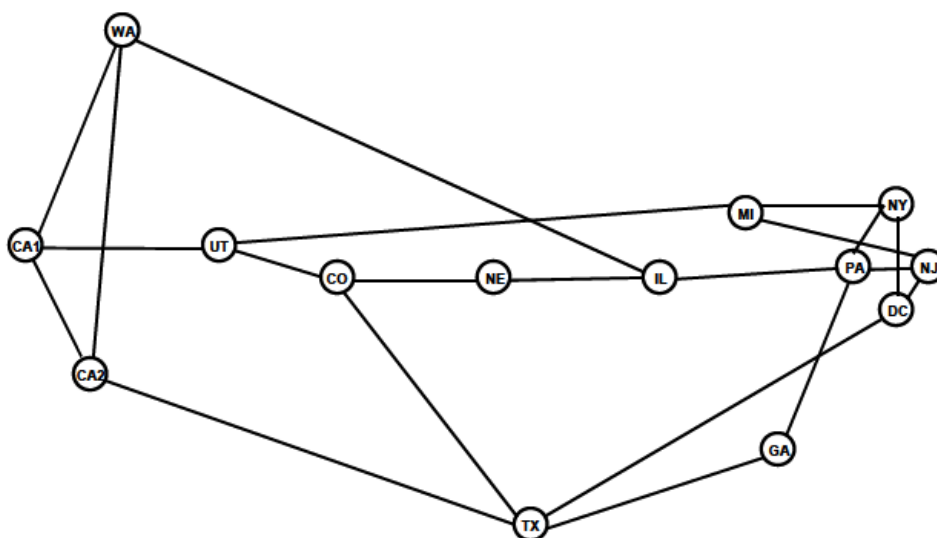
حال از الگوریتم های Dijkstra ، Bellmanford ، و یا D'Esopo-Pape برای محاسبه کوتاه ترین مسیر در گراف می توان استفاده کرد. که مورد سوم به دلیل عمل کرد بهتر در پیاده سازی ما استفاده شده است. ولی در کل الگوریتم Dijkstra دارای پیچیدگی بهتر می باشد.[2]

پیاده سازی این روش با زبان برنامه نویسی C++ انجام شده است و دلیل این که این زبان برای پیاده سازی انتخاب شده است سرعت اجرای این زبان نسبت به هر زبان یا نرم افزار دیگر است. نتایج حاصل از اجرای برنامه در چند شبکه در بخش های بعد قابل مشاهده می باشد.

۶-۴- نتایج عددی برای شبکه های مختلف

۱-۶-۴- شبکه US

شبکه US شبکه متشکل از ۱۴ راس و ۲۱ لینک و ۱۲۱ درخواست می باشد که در جدول های زیر داده ی لازم ارائه شده است. که از آن برای ورودی دادن به کد های پیاده سازی شده استفاده شده است. شکل ۲-۴ نشان دهنده گراف مربوط به شبکه US و جدول ۲-۴ مقادیر فاصله های بین شهر ها در آمریکا را در واحد کیلومتر نشان می دهد، از جدول ۳-۴ برای تولید تعداد در خواست ها در شبکه استفاده می شود. در این شبکه تعداد طول موج های در دسترس برای هر لینک برابر ۱۰۰ تصور شده است.



شکل ۲-۴ گراف شبکه US

	CA1	CA2	CO	DC	GA	IL	MI	NE	NJ	NY	PA	TX	UT	WA
CA1														
CA2	834													
CO														
DC														
GA														
IL														
MI														
NE			870			864								
NJ				312			942							
NY				468			720							
PA					1008	846			540	438				
TX		2520	1746	2364	1350									
UT	1152		684				2820							
WA	1338	2056				3408								

Fibre Length [km]

جدول ۲-۴ فاصله فیزیکی در شبکه US

	CA1	CA2	CO	DC	GA	IL	MI	NE	NJ	NY	PA	TX	UT	WA
CA1		63.35	20.144	38.69	78.524	48.888	41.108	16.854	17.524	62.014	47.582	63.382	25.05	28.47
CA2	63.35		29.97	56.146	114.59	71.048	59.604	24.608	25.384	89.792	68.926	94.314	36.436	37.386
CO	20.144	29.97		26.608	54.596	35.486	28.758	14.24	11.888	41.914	32.112	48.256	18.816	16.182
DC	38.69	56.146	26.608		149.42	90.04	86.05	26.244	74.522	207.73	240.14	95.184	28.084	31.74
GA	78.524	114.59	54.596	149.42		182.02	154.37	54.618	65.106	225.79	177.19	213.5	57.104	63.89
IL	48.888	71.048	35.486	90.04	182.02		124.62	40.962	40.02	140.03	108.47	126.5	36.33	40.33
MI	41.108	59.604	28.758	86.05	154.37	124.62		30.204	38.918	135.41	105.5	102.54	30.104	33.912
NE	16.854	24.608	14.24	26.244	54.618	40.962	30.204		11.682	41.13	31.568	45.806	13.186	13.884
NJ	17.524	25.384	11.888	74.522	65.106	40.02	38.918	11.682		208.66	291.57	42.46	12.638	14.422
NY	62.014	89.792	41.914	207.73	225.79	140.03	135.41	41.13	208.66		403.05	149.31	44.676	51.046
PA	47.582	68.926	32.112	240.14	177.19	108.47	105.5	31.568	291.57	403.05		115.2	34.284	39.096
TX	63.382	94.314	48.256	95.184	213.5	126.5	102.54	45.806	42.46	149.31	115.2		47.616	50.62
UT	25.05	36.436	18.816	28.084	57.104	36.33	30.104	13.186	12.638	44.676	34.284	47.616		19.546
WA	28.47	37.386	16.182	31.74	63.89	40.33	33.912	13.884	14.422	51.046	39.096	50.62	19.546	

Demand [Gbit/s]

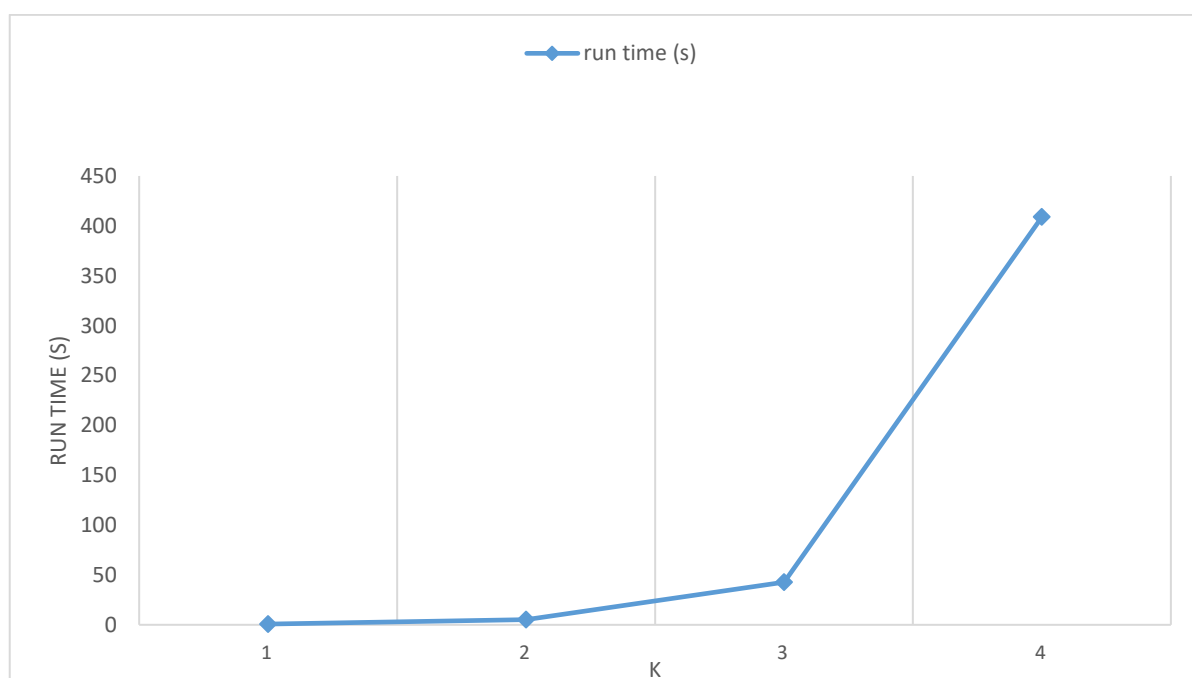
جدول ۳-۴ ترافیک در شبکه US

در جدول ریز نتایج حاصل برای زمان اجرا در k های مختلف در شبکه دیده می شود. همان طور که مشاهده می شود با افزایش عمق بررسی در گراف برای برقراری تعداد بیشتری درخواست در یک طول موج

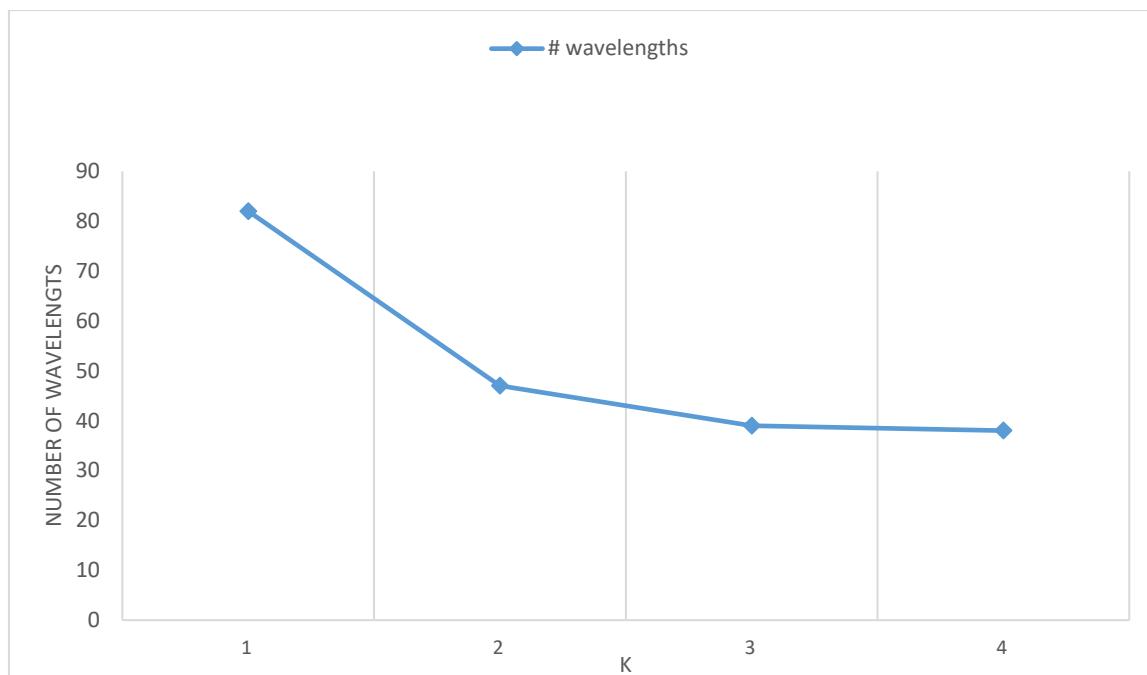
زمان اجرا افزایش می یابد ولی تعداد طول موج های استفاده شده کاهش می یابد، با توجه به ساختار شبکه در این مثال خاص تابع هزینه از جایی به بعد ثابت می ماند این نشان می دهد که عمق بیشتر برای بررسی بیشتر در این شبکه باعث بهتر شدن هزینه نمی شود ولی تعداد طول موج های استفاده شده را بهتر می کند. در ادامه نمودار مربوط به اجرای الگوریتم برای زمان اجرا و تعداد طول موج های استفاده شده به منظور برقراری همه درخواست ها قرار دارد.

مقدار k	زمان اجرا (s)	مقدار هزینه (km)	تعداد طول موج های استفاده شده
۱	۰,۷۷۰	۵۵۹۲	۸۲
۲	۵,۱۹۶	۵۳۱۶	۴۷
۳	۴۲,۸۷۸	۵۳۱۶	۳۹
۴	۴۰۸,۸۷۰	۵۳۱۶	۳۸

جدول ۴-۴ خروجی برای مقادیر k در شبکه US



شکل ۴-۳ نمودار زمان اجرای برنامه برای مقادیر مختلف k در شبکه US

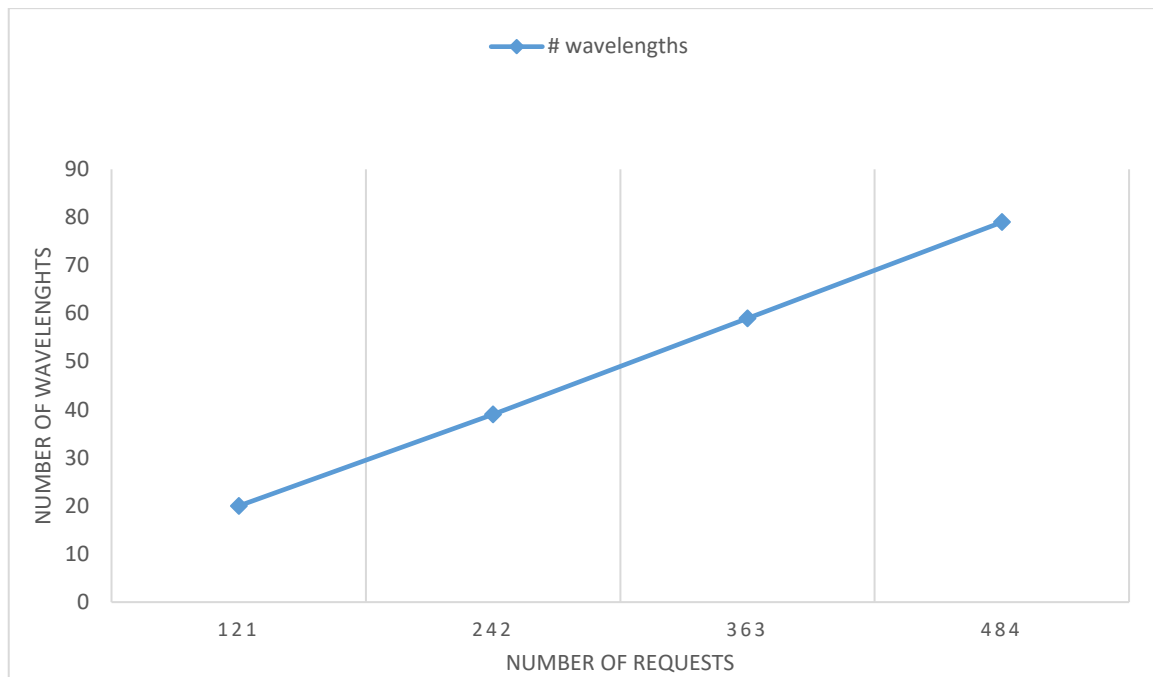


شکل ۳-۴ نمودار تعداد طول موج های استفاده شده برای مقادیر مختلف k

در جدول زیر نیز نتایج حاصل برای چند برابر شده تعداد درخواست ها برای $k = 3$ ارائه شده است دقت می کنیم که افزایش تعداد درخواست هایی که باید در شبکه جوابگو باشیم در تعداد طول موج های لازم تاثیر می گذارد و با افزایش تعداد درخواست ها تعداد طول موج های استفاده شده افزایش می یابد.

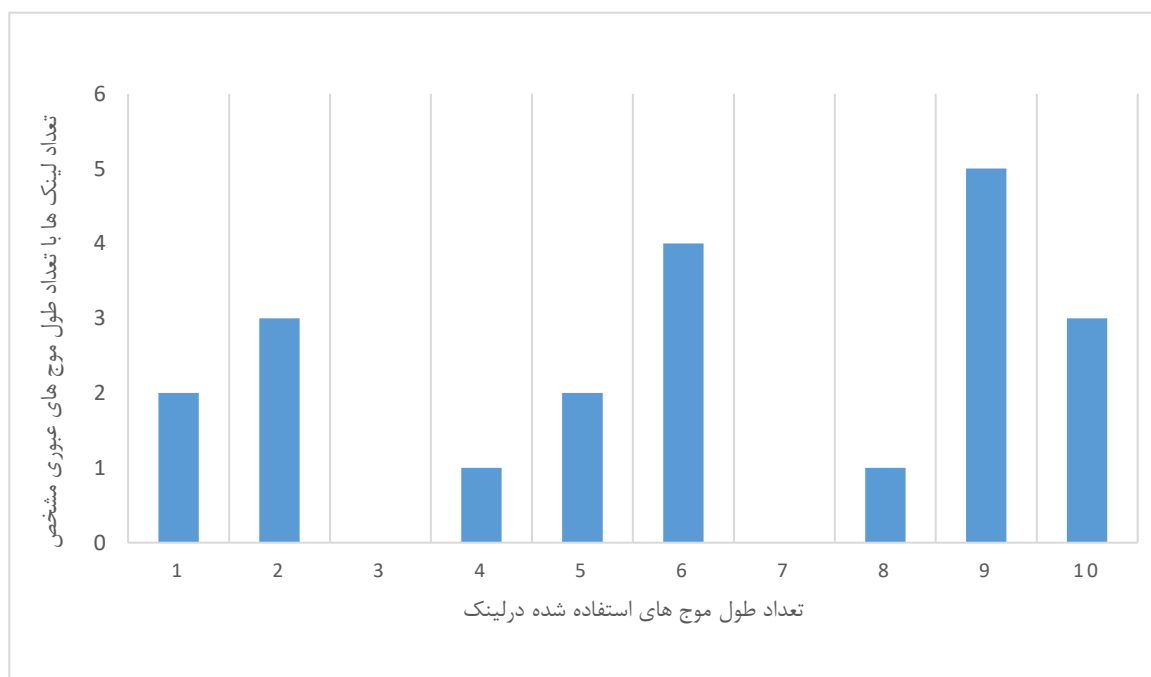
تعداد درخواست ها	مقدار هزینه (km)	تعداد طول موج های استفاده شده
۱۲۱	۵۳۱۶	۲۰
۲۴۲	۵۳۱۶	۳۹
۳۶۳	۵۳۱۶	۵۹
۴۸۴	۵۳۱۶	۷۹

جدول ۴-۵ خروجی بر اساس تعداد درخواست ها در شبکه US



شکل ۴-۴ تعداد طول موج های استفاده شده بر اساس تعداد درخواست ها در شبکه US

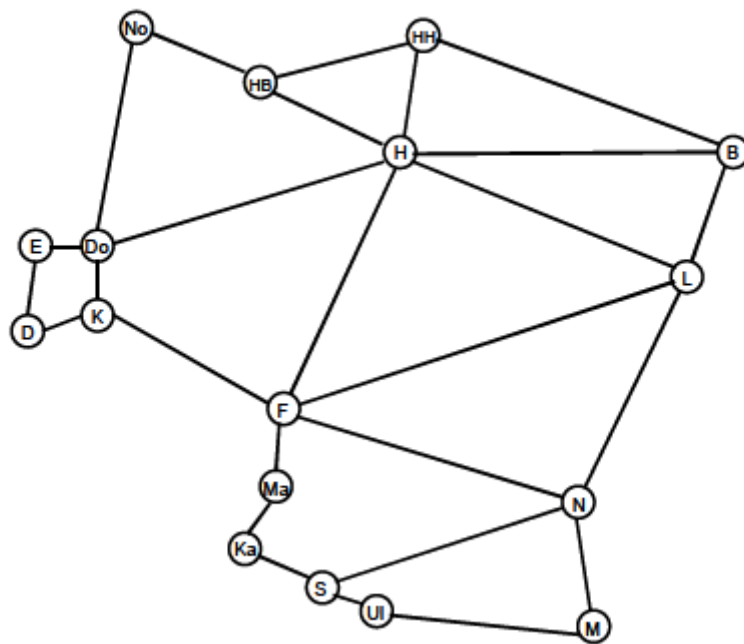
در نمودار رو به رو هم تعداد طول موج های استفاده شده در هر لینک فاکتور مقایسه می باشد و معیاری دیگری برای بررسی کارایی الگوریتم در واقعیت است.



شکل ۴-۵ نمودار تعداد لینک ها با تعداد طول موج های عبوری مشخص در شبکه US

شبکه German - ۴-۶-۲

شبکه German متشکل از ۱۷ راس و ۲۶ لینک و ۱۲۳ درخواست می باشد که در جدول های زیر داده های آن قرار دارد. در این شبکه فرض بر این است که هر لینک فیبر نوری ۱۰۰ طول موج مختلف می تواند داشته باشد. شکل ۴-۶ نشان دهنده گراف مربوط به شبکه German و جدول ۴-۶ مقادیر فاصله های بین شهر ها در آلمان را در واحد کیلومتر و جدول ۴-۷ معیاری از تعداد درخواست ها می باشد.



شکل ۴-۶ گراف شبکه German

	B	HB	Do	D	E	F	HH	H	Ka	K	L	Ma	M	No	N	S	UI
B																	
HB																	
Do																	
D																	
E				37	36												
F																	
HH	306	114															
H	298	120	208			316	157										
Ka																	
K			88	41		182											
L	174					353		258									
Ma						85			64								
M																	
No			144	278													
N						224					275		179				
S									74						187		
UI													143			86	

Fibre Length [km]

جدول ۴-۶ فاصله فیزیکی در شبکه German

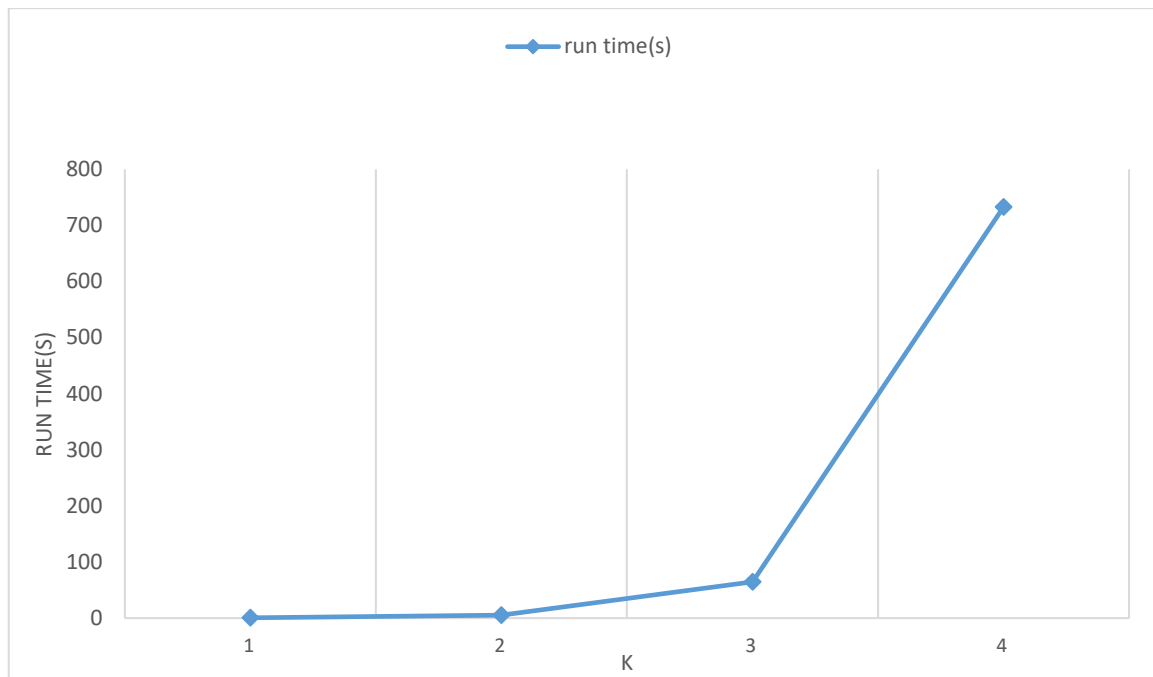
	B	HB	Do	D	E	F	HH	H	Ka	K	L	Ma	M	No	N	S	UI
B		11.536	15.85	17.48	12.496	57.834	24.836	27.066	5.46	18.702	43.588	9.6	19.728	0	15.812	22.916	14.204
HB	11.536		7.446	8.028	5.818	25.688	12.906	13.752	2.35	8.488	16.192	4.148	8.24	0	6.586	9.778	6.02
Do	15.85	7.446		16.214	14.704	38.91	14.636	17.258	3.532	15.982	22.816	6.318	11.978	0	9.648	14.528	8.846
D	17.48	8.028	16.214		16.844	43.424	16.014	18.43	3.982	24.104	25.102	7.112	13.354	0	10.708	16.278	9.874
E	12.496	5.818	14.704	16.844		31.004	11.504	13.228	2.804	13.81	17.95	5.006	9.488	0	7.616	11.514	7.008
F	57.834	25.688	38.91	43.424	31.004		51.492	58.224	14.484	47.234	82.6	27.656	45.768	288.48	37.692	57.36	34.614
HH	24.836	12.906	14.636	16.014	11.504	51.492		27.004	4.81	17.018	33.942	8.472	17.022	0	13.594	20.066	12.372
H	27.066	13.752	17.258	18.43	13.228	58.224	27.004		5.414	19.522	38.752	9.596	18.986	0	15.344	22.574	13.86
Ka	5.46	2.35	3.532	3.982	2.804	14.484	4.81	5.414		4.346	7.934	3.228	4.574	0	3.67	7.344	3.672
K	18.702	8.488	15.982	24.104	13.81	47.234	17.018	19.522	4.346		26.928	7.814	14.386	0	11.564	17.666	10.67
L	43.588	16.192	22.816	25.102	17.95	82.6	33.942	38.752	7.934	26.928		13.998	28.748	0	23.722	33.392	20.702
Ma	9.6	4.148	6.318	7.112	5.006	27.656	8.472	9.596	3.228	7.814	13.998		7.88	0	6.468	11.288	6.16
M	19.728	8.24	11.978	13.354	9.488	45.768	17.022	18.986	4.574	14.386	28.748	7.88		0	14.008	20.066	13.638
No	0	0	0	0	0	288.48	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
N	15.812	6.586	9.648	10.708	7.616	37.692	13.594	15.344	3.67	11.564	23.722	6.468	14.008	0		16.07	10.154
S	22.916	9.778	14.528	16.278	11.514	57.36	20.066	22.574	7.344	17.666	33.392	11.288	20.066	0	16.07		18.056
UI	14.204	6.02	8.846	9.874	7.008	34.614	12.372	13.86	3.672	10.67	20.702	6.16	13.638	0	10.154	18.056	
Demand [Gbit/s]																	

جدول ۷-۴ میزان ترافیک کلی شبکه German

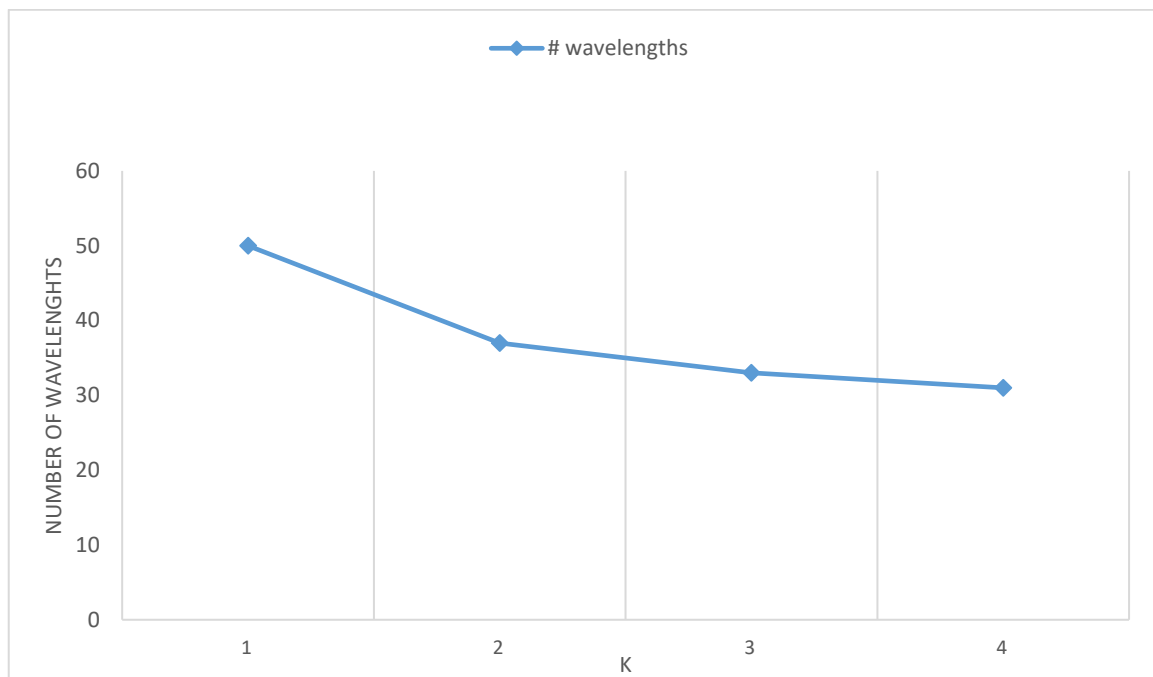
در جدول ریز نتایج حاصل برای زمان اجرا برای k های مختلف در شبکه دیده می شود. همان طور که مشاهده می شود خروجی همان طور که انتظار می رفت مشابه شبکه US می باشد. با افزایش k برای برقراری تعداد بیشتری درخواست در یک طول موج زمان اجرا افزایش می یابد ولی تعداد طول موج های استفاده شده کاهش می یابد همچنین نمودار مربوط به اجرای الگوریتم برای زمان اجرا و تعداد طول موج های استفاده شده در ادامه رسم شده است تا شهود بهتری نسبت به اجرای برنامه داشته باشیم.

مقدار k	زمان اجرا (s)	مقدار هزینه (km)	تعداد طول موج های استفاده شده
۱	۰,۶۱۶	۱۱۱۶	۵۰
۲	۵,۵۶۴	۹۹۸	۳۷
۳	۶۴,۴۳۰	۹۹۸	۳۳
۴	۷۳۲,۵۸۵	۹۹۸	۳۱

جدول ۸-۴ خروجی برنامه برای مقادیر مختلف k در شبکه German



شکل ۴-۷ زمان اجرا برای مقادیر مختلف k در شبکه German

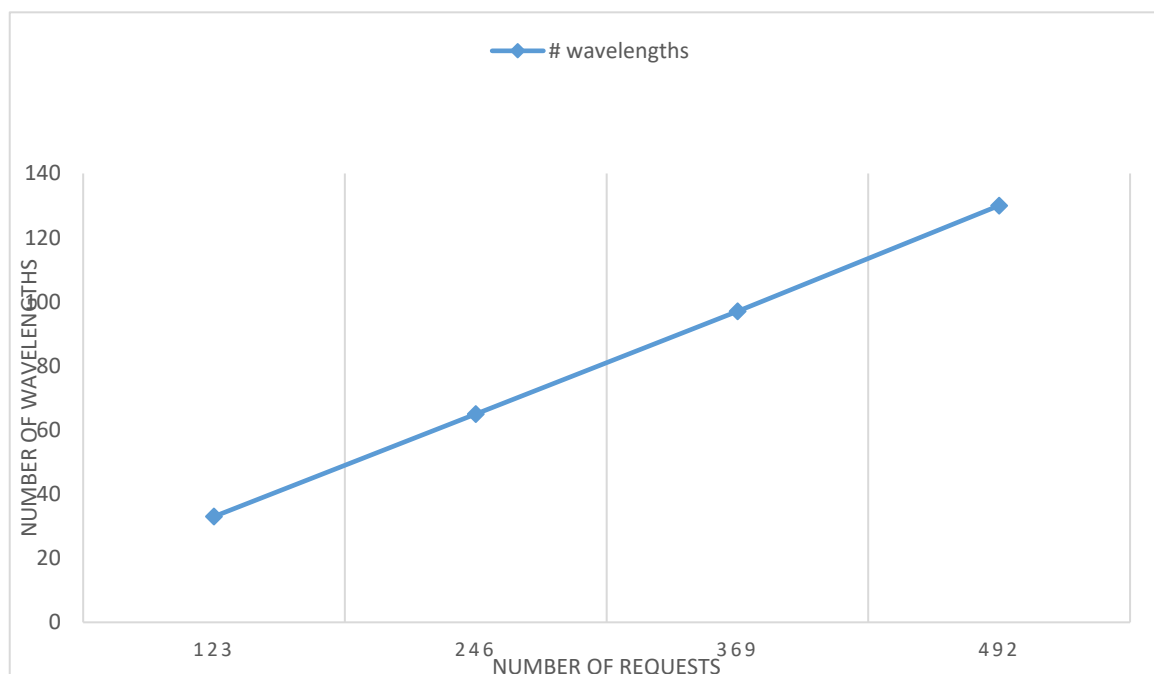


شکل ۴-۸ تعداد طول موج های استفاده شده برای مقادیر مختلف k در شبکه German

در جدول زیر نیز همانند قبل نتایج حاصل برای چند برابر شده تعداد درخواست ها برای $k = 3$ ارائه شده است دقت می کنیم که با افزایش تعداد درخواست ها تعداد طول موج های استفاده شده افزایش می یابد.

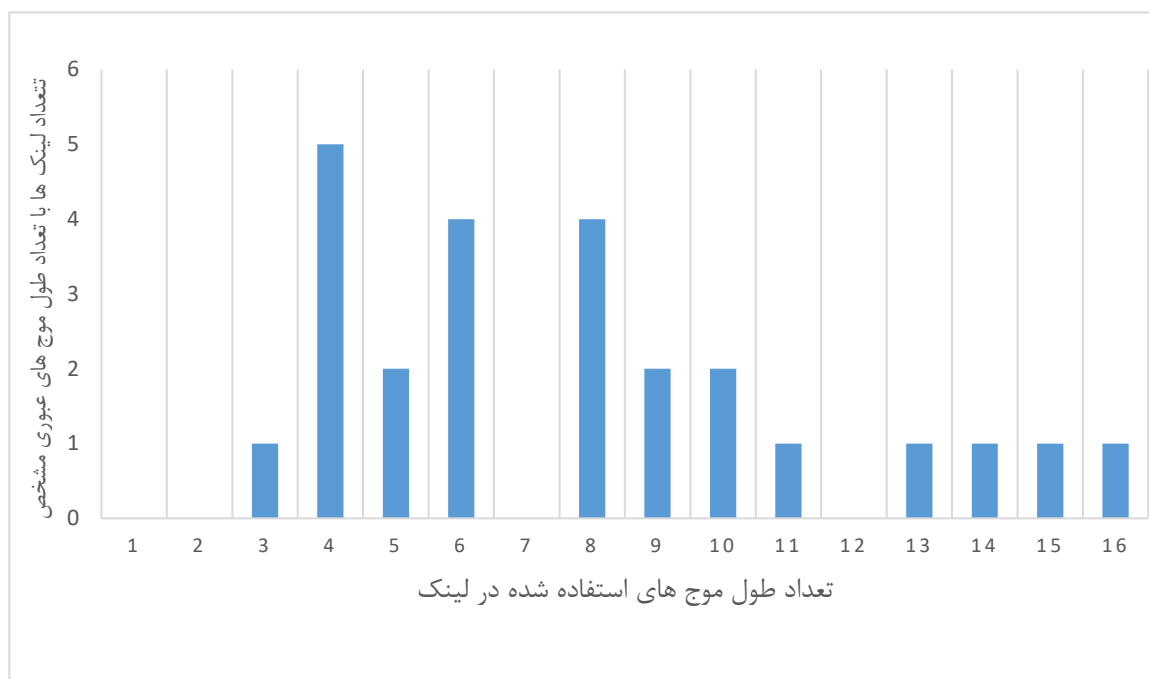
تعداد درخواست ها	مقدار هزینه (km)	تعداد طول موج های استفاده شده
۱۲۳	۹۹۸	۳۳
۲۴۶	۹۹۸	۶۵
۳۶۹	۹۹۸	۹۷
۴۹۲	۹۹۸	بیش از ۱۰۰

جدول ۹-۴ خروجی برای تعداد درخواست ها در شبکه German



شکل ۹-۴ تعداد طول موج های استفاده شده بر اساس تعداد درخواست ها در شبکه German

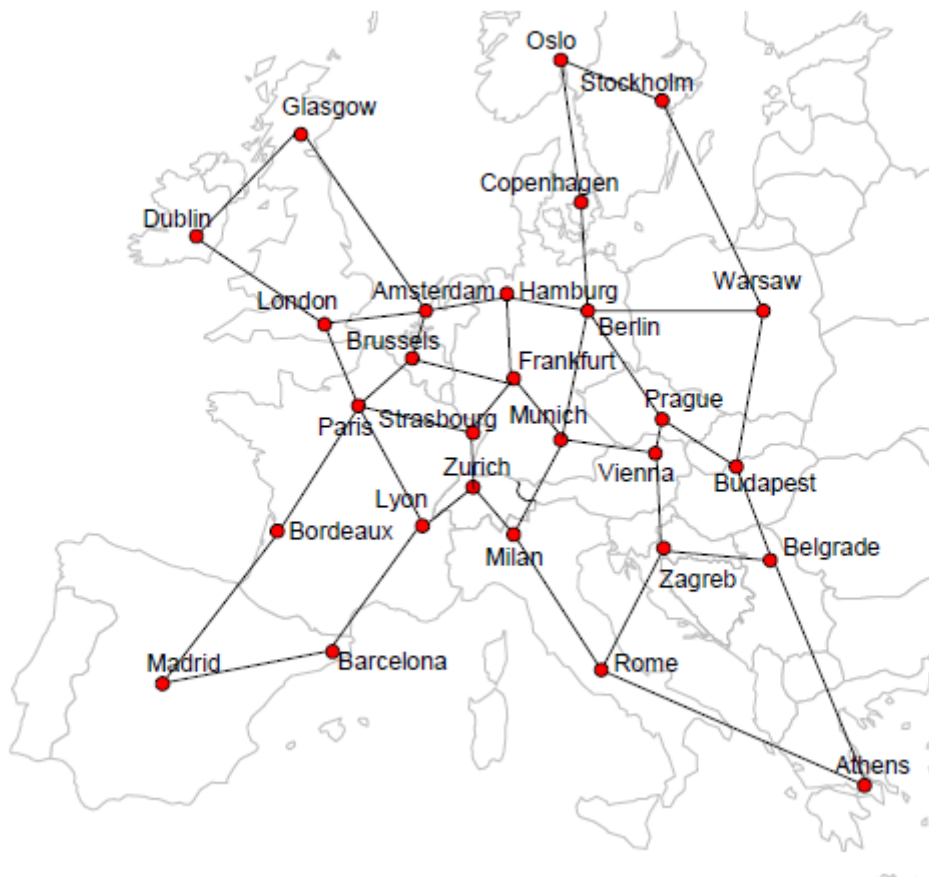
در نمودار رو به رو هم تعداد طول موج های عبوری از هر لینک فاکتور مقایسه می باشد و این نمودار گویای نتیجه بهتر برای تخصیص طول موج است چرا که تعداد لینک ها با طول موج استفاده شده بالا، رفته رفته کاهش یافته است.



شکل ۴-۱۰ نمودار تعداد لینک ها با تعداد طول موج های عبوری مشخص در شبکه German

۳-۶-۴ - شبکه European

شبکه European شبکه متشکل از ۲۸ راس و ۴۱ لینک و ۳۲۸ درخواست می باشد که در جدول های زیر داده های لازم ارائه شده است. شکل ۴-۱۱ نشان دهنده گراف مربوط به شبکه European و جدول ۴-۱۰ مقادیر فاصله های بین شهر ها در اروپا را نشان می دهد و جدول ۴-۱۱ نشان دهنده ترافیک در شبکه می باشد.



شکل ۴-۱۱ گراف شبکه European

	Amsterdam	Athens	Barcelona	Belgrade	Berlin	Bordeaux	Brussels	Budapest	Copenhagen	Dublin	Frankfurt	Glasgow	Hamburg	London	Lyon	Madrid	Milan	Munich	Oslo	Paris	Prague	Rome	Stockholm	Strasbourg	Vienna	Warsaw	Zagreb	Zurich	
Amsterdam																													
Athens																													
Barcelona																													
Belgrade			1209																										
Berlin																													
Bordeaux																													
Brussels	259																												
Budapest				474																									
Copenhagen					540																								
Dublin																													
Frankfurt							474																						
Glasgow	1067									462																			
Hamburg	552				381						592																		
London	540									690																			
Lyon			796																										
Madrid			760			834																							
Milan																													
Munich					757						456						522												
Oslo									722																				
Paris						747	393							514	594														
Prague					420			668																					
Rome			1500																										
Stockholm																			623										
Strasbourg											271									600									
Vienna																		534			376								
Warsaw					775			819															1213						
Zagreb				551																		783				400			
Zurich														507		327								218					
	Fibre Length (km)																												

جدول ۴-۱۰ فاصله فیزیکی شبکه European

	Amsterdam	Athens	Barcelona	Belgrade	Berlin	Bordeaux	Brussels	Budapest	Copenhagen	Dublin	Frankfurt	Glasgow	Hamburg	London	Lyon	Madrid	Milan	Munich	Oslo	Paris	Prague	Rome	Stockholm	Strasbourg	Vienna	Warsaw	Zagreb	Zurich
Amsterdam		2.146	5.591	1.057	10.49	4.881	7.457	2.247	2.701	1.620	12.43	18.75	12.36	22.60	5.308	5.277	9.628	9.991	2.558	6.611	4.283	8.264	4.810	6.376	3.491	10.65	1.082	4.501
Athens	2.146		2.033	0.719	2.818	1.508	1.139	1.195	0.709	0.407	2.819	4.300	2.694	4.533	1.638	1.839	3.349	3.035	0.659	1.526	1.403	3.903	1.311	1.653	1.218	4.281	0.580	1.231
Barcelona	5.591	2.033		0.971	6.333	6.288	3.095	1.990	1.595	1.093	7.136	11.16	6.372	12.50	5.768	7.535	9.302	7.236	1.538	4.642	2.997	8.598	2.955	4.451	2.507	7.942	1.048	3.316
Belgrade	1.057	0.719	0.971		1.569	0.728	0.586	1.253	0.365	0.189	1.520	1.921	1.413	2.088	0.854	0.839	1.926	1.795	0.306	0.781	0.885	2.175	0.620	0.928	0.880	2.720	0.522	0.644
Berlin	10.49	2.818	6.333	1.569		5.225	5.226	3.773	4.164	1.614	14.43	18.60	18.11	19.84	5.877	5.859	11.75	13.45	3.017	6.135	8.163	10.30	5.946	7.247	5.043	18.99	1.691	5.148
Bordeaux	4.881	1.508	6.288	0.728	5.225		2.805	1.544	1.330	0.994	6.057	9.615	5.373	11.39	4.999	5.634	7.117	5.831	1.273	4.663	2.429	6.044	2.414	3.810	1.981	6.384	0.796	2.717
Brussels	7.457	1.139	3.095	0.586	5.226	2.805		1.278	1.309	0.839	7.101	8.818	5.860	11.96	3.189	2.848	5.488	5.392	1.189	4.659	2.289	4.428	2.223	4.015	1.763	5.645	0.634	2.454
Budapest	2.247	1.195	1.990	1.253	3.773	1.544	1.278		0.851	0.409	3.468	3.874	3.253	4.260	1.822	1.739	4.038	4.178	0.654	1.712	2.354	3.983	1.314	2.087	2.619	6.909	1.136	1.393
Copenhagen	2.701	0.709	1.595	0.365	4.164	1.330	1.309	0.851		0.439	3.207	5.028	4.580	5.153	1.439	1.505	2.773	2.948	0.963	1.546	1.510	2.498	1.814	1.666	1.111	4.555	0.384	1.209
Dublin	1.620	0.407	1.093	0.189	1.614	0.994	0.839	0.409	0.439		1.725	4.847	1.731	4.163	0.946	1.100	1.652	1.590	0.448	1.119	0.692	1.485	0.818	0.963	0.574	1.886	0.198	0.715
Frankfurt	12.43	2.819	7.136	1.520	14.43	6.057	7.101	3.468	3.207	1.725		19.14	14.88	22.10	7.403	6.421	14.47	16.68	2.789	7.973	6.795	11.16	5.348	12.94	4.792	14.72	1.741	6.887
Glasgow	18.75	4.300	11.16	1.921	18.60	9.615	8.818	3.874	5.028	4.847	19.14		19.76	44.61	9.524	11.09	17.42	18.01	5.646	10.68	7.413	16.18	10.51	9.869	6.824	19.55	1.826	8.422
Hamburg	12.36	2.694	6.372	1.413	18.11	5.373	5.860	3.253	4.580	1.731	14.88	19.76		21.30	5.955	5.951	11.44	12.47	3.177	6.559	6.272	9.920	5.949	7.340	4.432	15.92	1.513	5.085
London	22.60	4.533	12.50	2.088	19.84	11.39	11.96	4.260	5.153	4.163	22.10	44.61	21.30		11.40	12.12	19.84	19.93	5.472	15.33	8.117	17.59	10.43	11.91	7.247	20.56	2.060	9.389
Lyon	5.308	1.638	5.768	0.854	5.877	4.999	3.189	1.822	1.439	0.946	7.403	9.524	5.955	11.40		4.458	10.66	7.327	1.320	5.236	2.868	7.190	2.518	5.301	2.285	7.151	0.979	3.785
Madrid	5.277	1.839	7.535	0.839	5.859	5.634	2.848	1.739	1.505	1.100	6.421	11.09	5.951	12.12	4.458		7.449	6.358	1.493	4.176	2.685	7.022	2.858	3.833	2.266	7.268	0.885	2.882
Milan	9.628	3.349	9.302	1.926	11.75	7.117	5.488	4.038	2.773	1.652	14.47	17.42	11.44	19.84	10.66	7.449		17.38	2.515	7.742	6.133	16.71	4.872	10.28	5.026	14.58	2.364	8.744
Munich	9.991	3.035	7.236	1.795	13.45	5.831	5.392	4.178	2.948	1.590	16.68	18.01	12.47	19.93	7.327	6.358	17.38		2.660	6.800	7.880	12.69	5.211	10.21	5.888	15.35	2.302	7.576
Oslo	2.558	0.659	1.538	0.306	3.017	1.273	1.189	0.654	0.963	0.448	2.789	5.646	3.177	5.472	1.320	1.493	2.515	2.660		1.400	1.187	2.362	2.020	1.423	1.030	3.505	0.297	1.190
Paris	6.611	1.526	4.642	0.781	6.135	4.663	4.659	1.712	1.546	1.119	7.973	10.68	6.559	15.33	5.236	4.176	7.742	6.800	1.400		2.837	6.035	2.611	5.212	2.181	7.182	0.873	3.226
Prague	4.283	1.403	2.997	0.885	8.163	2.429	2.289	2.354	1.510	0.692	6.795	7.413	6.272	8.117	2.868	2.685	6.133	7.880	1.187	2.837		5.217	2.345	3.662	3.226	9.204	1.064	2.497
Rome	8.264	3.903	8.598	2.175	10.30	6.044	4.428	3.983	2.498	1.485	11.16	16.18	9.920	17.59	7.190	7.022	16.71	12.69	2.362	6.035	5.217		4.638	6.853	4.628	13.67	2.393	5.326
Stockholm	4.810	1.311	2.955	0.620	5.946	2.414	2.223	1.314	1.814	0.818	5.348	10.51	5.949	10.43	2.518	2.858	4.872	5.211	2.020	2.611	2.345	4.638		2.707	2.067	7.501	0.581	2.328
Strasbourg	6.376	1.653	4.451	0.928	7.247	3.810	4.015	2.087	1.666	0.963	12.94	9.869	7.340	11.91	5.301	3.833	10.28	10.21	1.423	5.212	3.662	6.853	2.707		2.650	8.229	1.101	5.709
Vienna	3.491	1.218	2.507	0.880	5.043	1.981	1.763	2.619	1.111	0.574	4.792	6.824	4.432	7.247	2.285	2.266	5.026	5.888	1.030	2.181	3.226	4.628	2.067	2.650		6.838	1.098	2.062
Warsaw	10.65	4.281	7.942	2.720	18.99	6.384	5.645	6.909	4.555	1.886	14.72	19.55	15.92	20.56	7.151	7.268	14.58	15.35	3.505	7.182	9.204	13.67	7.501	8.229	6.838		2.662	5.642
Zagreb	1.082	0.580	1.048	0.522	1.691	0.796	0.634	1.136	0.384	0.198	1.741	1.826	1.513	2.060	0.979	0.885	2.364	2.302	0.297	0.873	1.064	2.393	0.581	1.101	1.098	2.662		0.754
Zurich	4.501	1.231	3.316	0.644	5.148	2.717	2.454	1.393	1.209	0.715	6.887	8.422	5.085	9.389	3.785	2.882	8.744	7.576	1.190	3.226	2.497	5.326	2.328	5.709	2.062	5.642		0.754

Demand [Gbit/s]

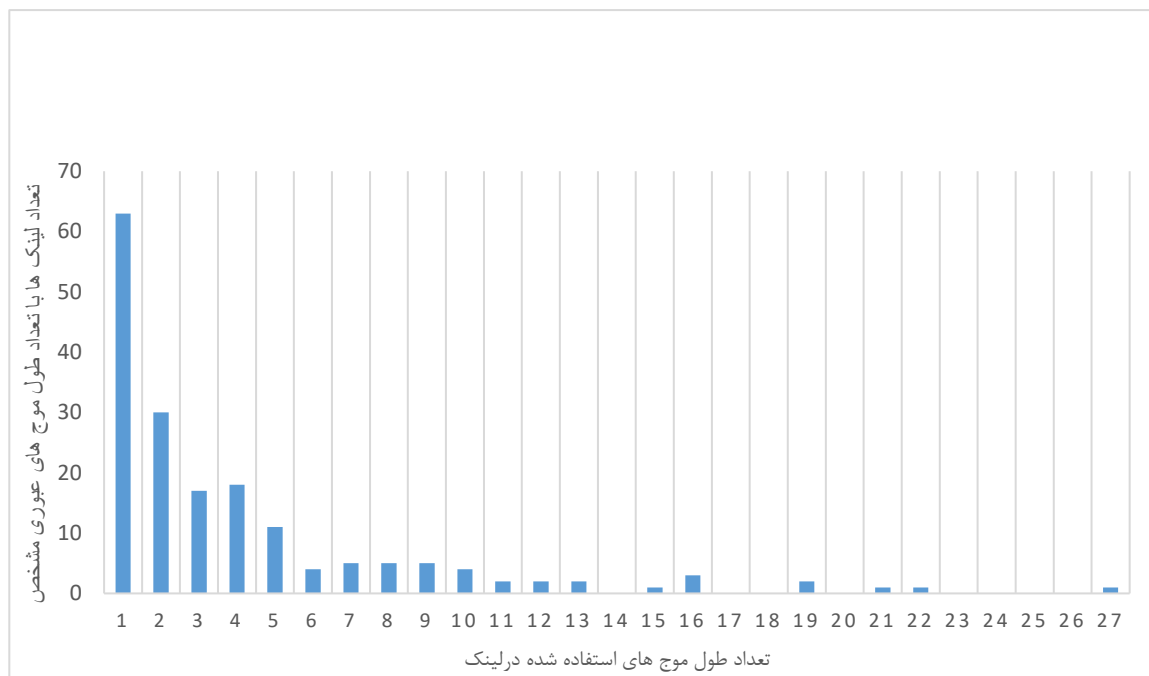
جدول ۴-۱۱ میزان ترافیک کلی شبکه European

در جدول ریز نتایج حاصل برای زمان اجرا برای k های مختلف در شبکه دیده می شود. برای $k = 1$ ، بیشتر از تعداد طول موج های موجود در هر لینک استفاده شده است و امکان برقراری همه درخواست ها همزمان مقدور نمی باشد. در نتیجه در این حالت شبکه نسبت مجموعه درخواست ها بلاک شده می باشد. برای k های بالاتر شبکه از حالت بلاک خارج شده و تخصیص طول موج را انجام می شود.

مقدار k	زمان اجرا (s)	مقدار هزینه (km)	تعداد طول موج های استفاده شده
۱	۲,۳۷۲	∞	بزرگتر از ۱۰۰
۲	۴۱,۳۶۳	۵۰۵۱	۷۶
۳	۸۳۱,۶۶	۵۰۵۱	۷۱

جدول ۴-۱۲ خروجی برای مقادیر k در شبکه European

در معیار تعداد لینک هایی که تعداد مشخصی طول موج استفاده کرده اند این شبکه خروجی بسیار مطلوبی دارد و می توان دید که تعداد لینک هایی که بیش از ۱۰ طول موج استفاده کرده اند بسیار کم است.



جدول ۴-۱۳ نمودار تعداد لینک ها با تعداد طول موج های عبوری مشخص در شبکه European

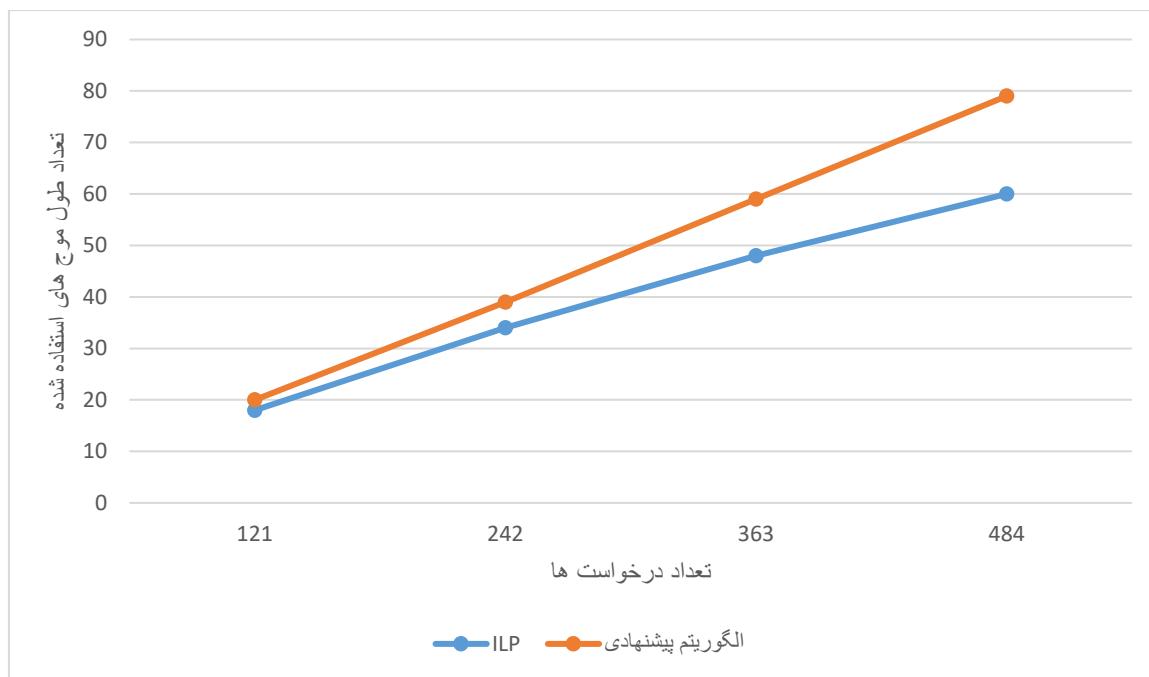
فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقایسه روش ILP و روش تقریبی در شبکه US

در روش ILP با توجه به فرمول بندی ارائه شده در بخش ۲-۴ با روش مناسب تابع هدف با توجه به شرایط داده شده بهینه شده است و زمانی که برای مشاهده خروجی باید صرف کرد به شدت زیاد است حال آنکه با روش تقریبی با خطایی که در جدول زیر برای شبکه US مقدار آن گزارش شده است می توان با صرف زمان کمتر به خروجی مطلوب رسید. در نمودار داده شده در ادامه نیز تعداد طول موج های لازم برای برقراری ارتباط بین درخواست ها در شبکه US برای هر دو روش رسم شده است.

تعداد طول موج ها	-----	
الگوریتم پیشنهادی	ILP	تعداد درخواست ها
۲۰	۱۸	۱۲۱
۳۹	۳۴	۲۴۲
۵۹	۴۸	۳۶۳
۷۹	۶۰	۴۸۴

جدول ۵-۱ مقایسه تعداد طول موج استفاده شده برای درخواست های مختلف



شکل ۵-۱ نمودار مقایسه تعداد طول موج های استفاده شده در دو روش برای تعداد درخواست های مختلف

۵-۲- نتیجه گیری

همان طور که گفتیم تخصیص طول موج از پر اهمیت ترین قسمت های پیاده سازی یک شبکه مخابراتی می باشد و برای آن که مطمئن باشیم که همه درخواست های در شبکه به درستی با مسیر های با طول موج ثابت در کل لینک های مسیر ارتباط برقرار کرده اند باید از الگوریتم مناسب استفاده نمود. در این پروژه ما روش ILP و همچنین یک روش تقریبی برای تخصیص طول موج پیاده کرده ایم، با توجه به بررسی ها و توضیح های داده شده در مقایسه اجرای الگوریتم های معرفی شده می توان گفت با توجه به آن که روش ILP تقریباً همه حالات را بررسی می کند یک روش با جواب بسیار دقیق می باشد ولی زمان اجرای فوق العاده زیادی در شبکه ها با اندازه بزرگ دارد ولی در مقابل آن روش تقریبی ارائه شده توسط ما در زمان کوتاه تر به جواب می رسد و مقدار خروجی آن برای تابع هزینه لااقل برای مثال های بررسی شده دارای مقدار قابل قبولی است. باید بین زمانی که برای خروجی گرفتن از الگوریتم صرف می کنیم و میزان دقت خروجی تعادل قابل قبولی برقرار کرد تا به لحاظ عملی ایده ی مطرح شده برای تخصیص طول موج مقدور به تولید خروجی در زمان معقول با خروجی با خطای ناچیز باشد.

۳-۵- پیشنهادات

به عنوان پیشنهاد می توان برای سرعت بخشیدن به نحوه اجرای برنامه یا برای این که تعداد بیشتری نقطه شروع در اجرای الگوریتم شار بیشینه-هزینه ی کمینه در نظر گرفته شود توصیه می شود که برای هر دو راس در گراف p - کوتاه ترین مسیر بین آنها در نظر گرفته شود و الگوریتم شار بیشینه-هزینه ی کمینه تنها در این p - کوتاه ترین مسیر پیدا شده برای هر درخواست بررسی شود. این پیشنهاد تضمینی برای پیدا کردن یک جواب بهینه نمی دهد ولی به انتخاب مناسب عدد p می تواند در افزایش سرعت اجرا تاثیر بگذارد.

به عنوان پیشنهاد دوم برای شبکه های با اندازه بزرگ می توان یک مرحله فراتر رفت به این صورت که ابتدا گراف را به دو قسمت تقریباً برابر از لحاظ تعداد راس تقسیم کنیم در بخش اول به همه درخواست هایی که راس شروع و پایان آنها در همین بخش می باشد را به صورت بازگشتی جواب می دهیم. سپس زیر مجموعه ای از رئوس در بخش دوم را به عنوان راس های باز سازی در نظر می گیریم حال برای درخواست هایی که راس شروع و پایان آنها در یک زیر گراف نیست از راس در بخش اول به یک راس با باز سازی از بخش دوم مسیر پیدا می کنیم ترجیحاً نزدیک ترین راس، حال این نوع درخواست ها به یک درخواست کاملاً در بخش دوم تبدیل می شود. و باز این درخواست ها به همراه درخواست هایی که کاملاً در بخش دوم قرار داشتند به شکل بازگشتی در بخش دوم حل می شوند. این کار را آنقدر ادامه می دهیم تا زیر شبکه به وجود آمده قابل حل با روش ILP باشد. تنها نکته باقی مانده آن است که تقسیم گراف به دو بخش تقریباً برابر با چه معیاری انجام شود که مطمئن شویم که شبکه به همه درخواست ها مسیری تخصیص دهد، در حال حاضر باید این معیار به دقت بررسی شود ولی تقسیم گراف اصلی به گراف های کوچک تر می تواند حجم پردازشی را کاهش دهد.

- [1] J. M. Simmons, *Optical Network Design and Planning*, 2nd edn. Springer, 2014.
- [2] T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest, C. Stein, *Introduction to Algorithms*, 3rd edn. MIT Press, 2009.
- [3] Eiji Oki, *Programming and Algorithms for Communication Network*, CRC Press, 2013
- [4] F. González, I. De Miguel, P. Fernández, J.C. Aguado, R.M. Lorenzo, E.J. Abril, M. López. *Iterative Linear Programming Formulation for Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks*, WSES Press, 2000.
- [5] Tali Eilam-Tzoref, *The disjoint shortest paths problem*, Discrete Applied Mathematics, 1998.
- [6] Ken-ichi Kawarabayashi, Yusuke Kobayashi, Bruce Reed, *The disjoint paths problem in quadratic time*, Journal of Combinatorial Theory, 2009.
- [7] Andreas Betker, Christoph Gerlach, Ralf Hülsermann, Monika Jäger, Marc Barry, Stefan Bodamer, Jan Späth, Christoph Gauger, Martin Köhn, *Reference Transport Network Scenarios*, 2004.
- [8] O. Gerstel, R. Cassata, L. Paraschis, W. Wakim, *Operational solutions for an open DWDM layer*. Proceedings, Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, San Diego, 2009.
- [9] K. Christodoulopoulos, P. Kokkinos, K. Manousakis, E.A. Varvarigos, *Cross layer RWA in WDM networks: Is the added complexity useful or a burden?* Proceedings, International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON'09), Ponta Delgada, 2009.
- [10] K. Christodoulopoulos, K. Manousakis, E. Varvarigos, *Offline routing and wavelength assignment in transparent WDM Networks*. IEEE/ACM Trans. 2010.
- [11] E. Karasan, E. Ayanoglu, *Effects of wavelength routing and selection algorithms on wavelength conversion gain in WDM optical networks*, IEEE/ACM Trans, 1998.
- [12] H. Obara, *Bidirectional WDM transmission technique utilizing two identical sets of Wavelengths for both directions over a single fiber*. J. Lightwave Technol, 2007.

- [13] J.M. Simmons, *Network design in realistic 'all-optical' backbone networks*. IEEE Commun.Mag, 2006.
- [14] X. Zhang, C. Qiao, *Wavelength assignment for dynamic traffic in multi-fiber WDM networks*. Proceedings, International Conference on Computer Communications and Networks, Lafayette, 1998.
- [15] A. E. Ozdaglar, D. P. Bertsekas, *Routing and wavelength assignment in optical Networks*, IEEE/ACM Trans Netw. 2003.



K. N. Toosi University of Technology
Faculty of Electrical Engineering
Department of Telecommunications

Design and Simulation of Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks based on Graph Theory

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Bachelor of Science (B.Sc.)
in Electrical Engineering, Telecommunications.

By:

Saeed Odak

Supervisor:

Dr. Lotfollah Beygi

Summer 2019