بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه علم و صنعت ايران
دانشكده كامپيوتر

الگوريتم هاي مسيريابي تضمين كننده QoS براي محيط هايي با سرويس هاي مختلف

ياسر علمي سولا

پايان نامه براي دريافت درجه كارشناسي ارشد

استاد راهنما : دكتر مرتضي آنالويي

آذر 1382

تقدیم به پدر و مادر
عزیزم

سپاسگزاري

نكوهش مكن چرخ نيلوفري را
برون كن زسر با خيره سري را
بري دان ز افعال چرخ برين را
نشايد نكوهش ز دانش بري را
بسوزند همه چو درختان بي بر
سزا خود همين است مر بي بري را
درخت تو گر بار دانش بگيرد
به زير آوري چرخ نيلوفري را

سپاسگزار ايزد يكتا هستم كه به من امكان داد در راهي قدم بردارم كه امروز بتوانم درختي باشم كه به نظر خود سزاوار سوختن نيستم و اين مساله مرهون تلاش بسياري است كه از روز نخست رنجم را كشيده و دستم را گرفته اند . در اين راه پدر و مادرم همچون تكيه گاهي بودند كه در زمانهاي آشفتگي و بي قراري به آنها تكيه مي كردم . بسياري از افراد در زندگي باعث شدند كه من در اين راه قدم بردارم بعضي نقش اساسي داشتند و عده اي هم تلنگري زده و گذشتند . مهمترين كساني كه خود را مديون آنها مي دانم ، كساني هستند كه مطلبي به من آموختند ، از اوايل تولد كه مادرم دستم را گرفته و راه رفتن را به من آموخت و پدرم كه برخي حكمت هاي زندگي را بر من آشكار ساخت ، تا به امروز كه اساتيدي گرانمايه چون دكتر آنالويي حركت در مسير علم و دانش را به من آموختند . خود را مديون تمامي اين افراد ميدانم و اميدوارم در طول زندگي فرصتي براي جبران زحماتشان حاصل شود .

ياسر علمي سولا

چکیده

کیفیت سرویس[1] و سرویس های مختلف [2] شبکه موضوعاتی هستند که در چند سال اخیرکانون توجه بسیاری از تحقیقات و پژوهشها در حیطه شبکه های کامپیوتری قرار گرفته اند . دلایل نیاز به سرویس های مختلف برای ایجاد کیفیت سرویس(*QoS*)در اینترنت اولین موضوعی است که در این رساله مورد بررسی قرار می گیرد . در این پایان نامه مقدمه ای در مورد دلایل نیاز به *QoS* و سرویس های مختلف در شبکه اینترنت بیان می شود و نیز مشخصه ها و ویژگی های مورد نیاز برای مکانیزمهای ارائه شده جهت ارائه سرویس های مختلف برای کلاسهای جریان متفاوت ، بررسی می شود . پس از درك نیاز به سرویسهای مختلف ، دو معماری استاندارد که توسط *IETF* برای ارائه سرویسهای مختلف پیشنهاد شده اند را معرفی خواهیم کرد : معماری سرویسهای مجتمع *IntServ* و معماری سرویسهای مختلف *DiffServ* . ویژگی ها ، مشخصات اصلی و نحوه عملکرد هر کدام از این دو معماری به همراه مقایسه ای بین این روشها و نیز مقایسه ای بین این روشها و مدل بهترین تلاش بیان خواهند شد .این دو بحث را می توان پیش درآمدی جهت ورود به بحث اصلی این رساله در نظر گرفت . موضوع این رساله بررسی الگوریتم های مسیریابی *QoS* در محیط هایی با سرویسهای مختلف است. فصل اول به بررسی انواع الگوریتم های مسیریابی *QoS* می پردازد .د ر فصل اول مقدمه ای درباره ویژگی های الگوریتم های مسیریابی *QoS* بیان شده و با توجه به سلسله مراتب پیچیدگی الگوریتم ها ، به ترتیب پنج الگوریتم مختلف که هر کدام به گونه ای خاص مساله عمومی مسیریابی *QoS* را ساده سازی کرده اند معرفی می شوند این ساده سازی برای خارج کردن مسائل مسیریابی *QoS* از حالت *NP-hard* انجام پذیرفته است . الگوریتم *DCCR* ، الگوریتم *DCCR+SSR* ، الگوریتم *DCUR* ، الگوریتم تضمین کننده پهنای باند ، الگوریتم *k-WSP* و الگوریتم *CCPF* الگوریتم هایی هستندکه به ترتیب پیچیدگی و تعداد پارامترهایی که در امر تصمیم گیری دخالت دارند ، معرفی می شوند . در فصل دوم ، جهت بررسی الگوریتم *DCUR* و ارزیابی آن ، نرم افزارشبیه ساز *IQRS* معرفی شده و نیز ملاحظات طراحی و پیاده سازی این نرم افزار ارائه خواهد شد .در فصل سوم الگوریتم *DCUR* که الگوریتمی برای یافتن مسیرهایی با حداقل هزینه و ارضاء یك قید تاخیر است ، مورد بررسی دقیقتری قرار خواهد گرفت . جهت بهبود نحوه استفاده از منابع شبکه ، وزنهایی

[1]Quality of Service

[2]Differentiated Services

ديناميك به لينك هاي شبكه نسبت مي دهيم ، وزنهايي كه در هر لحظه وابسته به ميزان بكارگيري منابع شبكه اند . سپس تاثير پارامترهاي مختلف مسيريابي در نحوه بكار گيري منابع شبكه را در الگوريتم *DCUR* اوليه و الگوريتم *DCUR* ديناميك بررسي خواهيم كرد . همچنين تاثيرات پارامتر محدوديت تاخير نيز در شبيه سازي مشابهي مورد بررسي قرار خواهد گرفت . در فصل انتهايي ،نتيجه گيري و پيشنهاد كارهاي آتي ارائه شده است .

فصل اول : الگوريتم هاي مسيريابي QoS ..... Error! Bookmark not defined.

1-1 مقدمه اي بر انواع الگوريتم هاي مسيريابي *QoS*.....11

2-1 الگوريتم *DCCR*.....14

1-2-1 مدلسازي مساله.....16

2-2-1 معرفي روش *SSR+DCCR*.....18

3-2-1 بهبود الگوريتم *DCCR*.....23

4-2-1 كاهش فضاي جستجو در *DCCR* به كمك *SSR*.....24

3-1 الگوريتم *DCUR*.....25

1-3-1 توسعه الگوريتم بلمن - فورد.....26

2-3-1 اطلاعات مسيريابي.....27

3-3-1 نحوه عمل الگوريتم *DCUR*.....29

4-3-1 حذف حلقه ها.....38

5-3-1 نياز به بروزرساني اطلاعات مسيريابي.....42

4 -1 الگوريتم *CCPF*.....45

1-4-1 برنامه نويسي چندهدفي در مسيريابي *QoS*.....46

2-4-1 تعاريف اوليه در الگوريتم *CCPF*.....49

5-1 خلاصه و نتيجه گيري فصل اول.....52

فصل دوم : طراحي شبيه سازIQRS ..... Error! Bookmark not defined.

1-2 مدلسازي شبكه.....56

2-2 توليد شبكه هاي تصادفي تصادفي.....59

1-2-2 توليد لينك ها در شبكه.....60

2-2-2 حفظ حداكثر درجه هر نود.....60

3-2-2 متصل بودن گراف.....62

3-2 پياده سازي الگوريتم هاي مسيريابي*QoS*.....65

1-3-2 روش تعريف پروسيجر مسيريابي در شبيه ساز.....66

2-3-2 استقلال پروسيجر مسيريابي.....66

4-2 ايجاد جريان هاي ترافيك.....67

5-2 مسيريابي ايستا.....68

6-2 مسيريابي پويا.....68

فصل سوم : ارزيابي الگوريتم DCUR ..... Error! Bookmark not defined.
3-1 بررسي صحت عمل IQRS 76
3-2 بررسي ارتباط بار عرضه شده بر روي لينك هاي مختلف با متغير Δ 76
3-3 معرفي تابع وزنگذاري ديناميك 78
3-4 تاثيرات پارامتر Δ در خروجي الگوريتم DCUR ديناميك 79
3-5 مقايسه DCUR استاتيك و DCUR ديناميك 81
3-6 بررسي حالات يك شبكه خاص با 50 نود 87
3-7 مقايسه شبكه هايي با $\Delta = \frac{R}{2}$ ، وزندهي ثابت و پويا : 91
3-8 خلاصه و نتيجه گيري 96
فصل چهارم : نتيجه گيري نهايي و پيشنهاد كارهاي آينده Error! Bookmark not defined.
4-1 پيشنهاد كارهاي آينده 102
ضمايم ..... Error! Bookmark not defined.
ضميمه A-1 : مقدمه اي بر كيفيت سرويس در اينترنت 105
A-1-1 تعريف QoS اينترنت 108
A-1-2 تغييرات در روترها 109
ضميمه A-2 : معماري هاي DiffServ و IntServ 110
A-2-1 معماري سرويس هاي مجتمع (Integrated Service) 113
A-2-1-1 روش IntServ 114
A-2-1-2 پروتكل رزروسازي منابع 115
A-2-1-3 مشخصه هاي اصلي معماري IntServ 116
A-2-2 معماري سرويس هاي مختلف (Differentiated Services) 117
A-2-2-1 مشخصه هاي اصلي معماري DiffServ 117
A-2-2-2 تعريف اصطلاحات DiffServ 118
A-3-2 مقايسه اي بين DiffServ و intServ 120
ضميمه B-1 مدلسازي مساله در DCCR 121
ضميمه B-2 : اطلاعات ذخيره شده در بردارهاي cost و delay در الگوريتم DCUR 123
ضميمه B-3 صحت و درستي الگوريتم DCUR 124
ضميمه B-4 : الگوريتم مسيريابي با قيد پهناي باند 128
B-4-1 ايده اصلي درالگوريتم مسيريابي QoS با محدوديت بر روي پهناي باند ..130
B-4-2 معيارهاي بهينه سازي 131
B-4-3 تعيين مسير 132
B-4-4 محافظت در برابر حلقه 134
B-4-5 انتخاب مسير و تخصيص پهناي باند 134
ضميمه B-5 : الگوريتم $k\text{-}WSP_{EP}$ و $k\text{-}WSP_{AP}$ 135
B-5-1 ايده اصلي در روش k-WSP 136

B-5-2 تعريف مساله 138
B-5-3 متد سرويسدهي در صف بندي وزندار منصف (*WFQ*) 139
B-5-4 الگوريتم مسيريابي براي مسيرهاي از پيش محاسبه شده دقيق (k_WSP_{EP}) . 140
B-5-5 جدول مسيريابي 147
B-5-6 الگوريتم مسيريابي *QoS* براي مسيرهاي از پيش تعريف شده تقريبي ($k\text{-}WSP_{AP}$) 147

ضميمه B-6 ايده اصلي در الگوريتم CCPF 149

ضميمه C-1 : كد شبيه ساز IQRS 153

ضميمه C-2 : پيچيدگي زماني الگوريتم DCUR 159

مراجع 161

فصل اول

الگوريتم هاي مسيريابي QoS

در دهه اخير ، رشد روزافزون اينترنت باعث بروز مسائل و مشكلات جديدي شده است . از يك سو ساختار *TCP/IP* به گونه اي طراحي شده كه امكان رشد وافزايش شبكه ها و ميزبانهاي جديد به آن به راحتي امكانپذير بود ولي از سوي ديگر بعضي اجزاي اينترنت براي جاي دادن اين رشد به اندازه كافي مناسب نبودند . اين مساله باعث بروز مشكلاتي شد . اين مشكلات از نحوه سرويس دهي اينترنت به جريان هاي ترافيكي يعني مدل بهترين تلاش ، نشات مي گرفت . كاربران نياز به سرويسهاي متفاوتي داشتند ، كاربردهايي نظير كاربردهاي مالتي مديا نياز به تضمين مشخصه هاي ترافيكي خاصي از طرف شبكه داشتند . كيفيت خدمات(*QoS*)و نيز سرويس هاي مختف مطالبي است كه امروزه به يك مبحث مهم در زمينه شبكه تبديل شده است .دو راه حل سرويس هاي مجتمع[3] و سرويس هاي مختلف[4] از سوي *IETF* براي پشتيباني از *QoS* و كلاسهاي مختلف سرويس ارائه شده است كه هر دو اين راه حل ها براي مسيريابي نياز به مكانيزم هاي مسيريابي متفاوت با روشهاي مسيريابي سنتي دارند .

براي ايجاز سخن ، دلايل نياز به *QoS* ،تعريف كاربردهاي حساس به *QoS* ، مشخصه هاي *QoS* مربوط به جريانهاي ترافيكي و نيز مشخصه راه حل هاي پيشنهادي جهت تضمين *QoS* ، بطور كامل در ضميمه *A-1* بيان شده است.

دو روش ارائه شده توسط *IETF* يعني *IntServ* و *DiffServ* به همراه نحوه عملكرد اين دو معماري و مقايسه اين دو

---

[3] Integrated Services

[4] Differentiated Services

روش و مقايسه اين روشها با مدل بهترين تلاش نيز در ضميمه *A-2* بيان شده است .

در اين فصل قصد داريم تفاوت بين الگوريتم هاي مسيريابي *QoS* و الگوريتم هاي مسيريابي سنتي را موردبررسي قرار دهيم . اين بخش به اين شكل سازمان دهي شده است كه در ابتدا يك ديد كلي در مورد روشهاي مسيريابي *QoS* بيان مي كنيم ، سپس از الگوريتم هاي مسيريابي *QoS* ساده تر شروع كرده و به ترتيب پيچيدگي ، چندين الگوريتم مسير يابي *QoS* را معرفي كنيم . اكثر بحث اين فصل بر روي الگوريتمي به نام *DCUR* انجام خواهد شد . از ديگر الگوريتم هاي ارائه شده مثل *DCCR*، *CCPF* براي تكميل و بهبود *DCUR* و نيز طراحي يك شيه ساز مناسب استفاده خواهيم كرد .

1-1 مقدمه اي بر انواع الگوريتم هاي مسيريابي *QoS*

مساله مسيريابي تك پخشي *QoS*[5] به صورت زيرتعريف مي شود : يك گره مبدا s ، يك گره مقصد d ، مجموعه اي از محدوديت هاي *QoS*[6] كه با Δ نشان داده ميشود و احتمالا يك يا چند هدف بهينه سازي ، داده شده است ،بهترين مسير قابل قبول از s به d را پيدا كنيد كه Δ را تحقق بخشد . در اين بخش به ترتيب الگوريتم هاي مسيريابي زير معرفي مي شوند :

1- الگوريتم *DCCR* : الگوريتمي كه داراي محدوديت *QoS* بر روي پارامتر تاخير بوده و هدف اصلي آن حداقل كردن پارامتر هزينه است .

2- الگوريتم *DCUR* : الگوريتمي كه داراي محدوديت *QoS* بر روي پارامتر تاخير بوده و هدف آن مشابه با

---

[5] unicast

[6] Constraint

DCCR ، حداقل کردن پارامتر هزینه است . این الگوریتم بر اساس الگوریتم بلمن-فورد عمل می نماید .

3- الگوریتم *CCPF* : الگوریتمي که از برنامه ریزي چند هدفي براي ارضاء همزمان چندین محدودیت *QoS* و بهینه سازي چندین پارامتر مختلف مسیریابي استفاده میکند.

(دو الگوریتم به نامهاي *K-WSP* و الگوریتم تضمین کننده پهناي باند هم در این پایان نامه در قسمت هاي مختلف مورد ارجاع قرار مي گیرند ولي بدلیل ارتباط کمتر این الگوریتم ها در بخش ضمیمه *B-4* و *B-5* به بررسي آنها پرداخته شده است)

تفاوت اصلي الگوریتم هاي مسیر یابي *QoS* با الگوریتم هاي مسیریابي سنتي در تعداد پارامترهاي بکاربرده شده براي ایجاد تصمیمات مسیریابي است .در الگوریتم هاي مسیریابي سنتي هدف فقط بهینه سازي یك پارامتر است که این پارامتر مي تواند طول مسیر ، هزینه مسیر ، تاخیر مسیر یا تعداد گام مسیر باشد . از نقطه نظر پیاده سازي ، الگوریتم هایي مشابه دیجسترا یا بلمن -فوردمي توانند کوتاهترین مسیر[7] یا کم هزینه ترین مسیر[8] را ارائه نمایند . ولي در مسیر یابي *QoS* که به آن مسیر یابي محدودیت هم گفته میشود همواره بیش از یك پارامتر در ایجاد تصمیمیات مسیریابي دخالت دارند . این پارامترهاي ثانوي مي توانند به صورت قید[9] و یا به صورت پارامتري جهت بهینه شدن

[7]Shortest Path
[8]Least Cost
[9]constraint

مطرح شوند كه در هر دو صورت مساله مسيريابي *QoS* مساله اي *NP-hard* [10]خواهد بود

در واقع اين الگوريتم ها براي تضمين كيفيت سرويس ، با پارامترهاي زيادي سر و كار دارند كه اين افزوني پارامتر ها باعث ميشود كه اين الگوريتم ها داراي پيچيدگي زماني فوق العاده زيادي باشند . در همه روشها و الگوريتم هاي پيشنهاد شده [12،13،14،15] سعي شده است كه به گونه اي صورت مساله ساده سازي شود .معمولا اين ساده سازي با كاهش تعداد پارامترها يا محدود كردن مقادير پارامترهاي مسيريابي در يك بازه مشخص و روشهايي از اين قبيل انجام شده است . الگوريتم هاي *DCCR* ، *DCUR*، الگوريتم تضمين كننده پهناي باند ، *k-WSP* و *CCPF* نيز همگي حالات خاصي را در نظر گرفته اند . به اين شكل كه *DCCR* و *DCUR*تعداد پارامترهاي تصميم گيري را به دو پارامتر هزينه[11] و تاخير[12] و الگوريتم تضمين كننده پهناي باند پارامترهاي تصميم گيري را به دو پارامتر هزينه و پهناي باند ، كاهش داده است . اين كاهش پارامترها در جهت ساده شدن الگوريتم مسيريابي و متناسب با آن كم شدن پيچيدگي زماني اجراي الگوريتم انجام شده است .

بسياري از كاربردهاي جديد مثل صوت يا تصوير نياز به تاخير انتها به انتهاي مشخصي دارند به عبارت ديگر كاربردهايي اينچنين كه در آنها حداكثر تاخير ممكن براي بسته ها مشخص و محدود است را كاربردهاي حساس به تاخير [13] مي گوييم . اين كاربردها در

---

[10] Non Polinomialمساله اي با پيچيدگي زماني بالا (فوق نمايي)

[11] cost

[12] delay

[13] delay sensitive

صورتي كه بسته هاي يك جريان با تاخيري بيش از مقدار مشخص شده به مقصد برسند يا بطور كامل بي نتيجه خواهد بود و يا افت شديدي در كيفيت كاربرد حاصل ميشود .در اين كاربردها ، هدف اصلي الگوريتم مسيريابي ارضاء قيود تاخير براي جريانهاي شبكه است . يعني مسيري براي يك جريان (يك بسته) انتخاب شود كه تاخير مورد نياز بسته را برآورده سازد . در عين حال الگوريتم مسيريابي بايد همراه با ارضاء قيود تاخير، مسيري با حداقل هزينه را ارائه كند . اين هزينه مي تواند پارامتري نظير مقدار بكارگيري منابع شبكه[14] يا پارامترهايي نظير فاصله و امثال آن باشد . مساله مهم و قابل توجه اين است كه اين نوع مسيريابي مشابه مسيريابي كوتاهترين مسير همراه با يك محدوديت (قيد) اضافي است . بطور كلي مي توان گفت هدف از مسيريابي كوتاهترين مسير يا مسيريابي كمترين هزينه ، بهينه سازي است ولي در اينجا با يك مساله بهينه سازي روبرو شده ايم كه يك پارامتر اضافي (قيد تاخير يا ...) را نيز بايد ارضاء نمايد . بنابراين مي توان اين مساله را جزو مسائل بهينه سازي چندپارامتري در نظر گرفت . همانطور كه گفته شد اين مسائل از نظر تئوريك مسائلي *NP-hard* [16] بوده و براي ارائه راه حل مناسب بايد تغييراتي در صورت مساله ايجاد كنيم .

2-1 الگوريتم *DCCR*

در اين بخش روشي براي يافتن يك مسير با كمترين هزينه و همزمان با آن با يك قيد تاخير انتها به انتهاي مشخص ارائه مي كنيم *[22]* . مي توان اين مساله را

[14]network utilization

به صورت مساله *DCLC* [15] فرموله کرد و یا بطور عمومي تر مي توان آنرا به عنوان يك مساله بهينه سازي قيود [16] در نظر گرفت . بسياري از مقالات ارائه شده در مورد اين مساله مسيريابي ، مساله را به يك مساله مسيريابي چندقيدي [17] (يا به اختصار *MCP*) تبديل كرده اند .تفاوت بين يك مساله *MCP* با مسائل *DCLC* اين است كه مساله *MCP* فقط به دنبال يك جواب ممكن جستجو مي كند در صورتي كه در *DCLC* هدف يافتن مسيري بهينه با قيود مشخص شده است . بنابراين بدليل عدم بهينه سازي جواب مطمئنا روشهاي *MCP* الگوريتم هاي ساده تري هستند . با اين همه حتي در مسائل *MCP* هم اگر يكي از پارامترهاي تصميم گيري مسير تجمعي [18] باشد و مقادير آن به صورت مقاديري حقيقي تعريف شده باشند (يا مقادير صحيح نامحدود) ، باز هم مساله به يك مساله *NP-hard* تبديل خواهد شد . برخي روشهاي قبلي مثل [17] و [18] سعي بر اين داشته اند كه با حذف يكي از اين شروط مساله را از حالت *NP-hard* خارج نمايند يعني يا مقادير حقيقي را به مقادير صحيح تبديل كرده و يا فقط يك بازه خاص و معين براي تغييرات مقادير پارامترها بكار برده اند .

با توجه به اينكه مسائل *MCP* نسبت به *DCLC* ساده تر هستند و از نظر زمان اجراي الگوريتم ، يك الگوريتم براي حل مساله *MCP* زمان كمتري نسبت به يك الگوريتم *DCLC* خواهد داشت . روشي كه در اين قسمت ارائه مي كنيم نمونه اي از اين روشها است كه

---

[15]Delay Constraint Least Cost

[16]Constraint optimization

[17]Multiple-Constraints Path

[18]additive

مسیریابي مقید به هزینه-تاخیر[19] یا به اختصار *DCCR* نامیده میشود . این روش در شبکه هاي بزرگ با لینك هاي متقارن یا نامتقارن مي تواند به سرعت جوابي نزدیك به بهترین جواب ممکن را ارائه نماید . این الگوریتم در مرحله اول با توجه به وضعیت شبکه یك حد بالایي براي هزینه[20] معرفي میکند . سپس با استفاده از الگوریتم k -کوتاهترین مسیر [21] [19] مسیر دلخواه را با ارائه یك تابع وزن خطي براي تاخیر و هزینه بدست مي آورد . در روش ارائه شده ، اولویت بیشتر به هزینه [22] داده شده است . در روش *DCCR* اگر حد بالایي هزینه بطور دقیقتري تعیین شود (کاهش یابد) به دقیقتر بودن جواب کمك خواهد کرد و همچنین کم شدن این حد بالایي ، زمان اجراي الگوریتم را نیز کاهش خواهد داد . بنابراین به عنوان یك بهبود ، الگوریتم ارائه شده در [20] را براي تعریف دقیق فضاي مساله بکار خواهیم برد .

1-2-1 مدلسازي مساله

یك شبکه را به صورت مجموعه اي از نودها (روتر یا سویچ) که بوسیله لینك هایي به یکدیگر متصل شده اند مدل سازي مي کنیم [21] . در این مدل V مجموعه اي از نودها و E مجموعه اي از یالهاي گراف است . به دلیل دور شدن از بحث اصلي ، مدل دقیق ریاضي مساله در ضمیمه *B-2* بیان شده است.

مساله مسیر *DCLC* : در یك شبکه $N=(V,E)$ با هزینه هاي غیر منفي $C(e)$براي هر $e\in E$و تاخیرهاي غیرمنفي $D(e)$ ،

---

[19]Delay-Cost Constrained Routing

[20]cost bound

[21]k-shortest path

[22]cost

براي هر نود $e \in E$، براي هر $s \in V$ ، نود مقصد $d \in V$ و يك قيد تاخير ثابت Δ ، مساله مبني موم سازي قيد به صورت زير است :

$$\min_{P_i \in \rho'(s,d)} Cost(P_i) \qquad (1-1)$$

كه درآن $\rho'(s,d)$ مجموعه اي از مسيرهاي موجود بين s و d است كه بتواند قيد تاخير مساله را ارضا نمايد . يعني $\rho'(s,d)$ مجموعه همه مسيرهايي است كه تاخيرشان از Δ كمتر است . بنابراين $\rho'(s,d) \subseteq \rho(s,d)$ است . اگر $P_i \in \rho(s,d)$ باشد ، آنگاه $P_i \in \rho'(s,d)$ خواهد بود اگر و فقط اگر :

$$Delay(P_i) \le \Delta \qquad (2-1)$$

مساله *DCLC* مي تواند بطور كلي در مجموعه مسائل بهينه سازي قيود *COP* [23] قرار گيرد كه شامل بهينه سازي يك يا چند پارامتر با در نظر گرفتن قيودي براي ديگر پارامترهاست (در اينجا هدف بهينه كردن *cost* با در نظر گرفتن قيد *delay* است). نوع ديگري از اين مساله كه به آن مسيريابي چندقيدي *MCP* گفته ميشود ، فقط به دنبال يك جواب ممكن جستجو انجام داده به گونه اي كه اين جواب ممكن ، تمامي قيود مساله را ارضا نمايد . در واقع اين روش هيچگونه بهينه سازي انجام نمي دهد . در اينجا ما نيز براي اينكه مساله را از حالت بهينه سازي خارج كنيم از همين روش استفاده مي كنيم . به اين معني كه براي *cost* يك قيد در نظر مي گيريم به گونه اي كه فقط مسيرهايي براي ما قابل قبول خواهند بود كه *cost* آنها از مقدار مشخص شده كمتر باشد . بنابراين مساله *DCLC* به يك مساله *MCP* مبدل خواهد شد (مساله اي كه در آن هدف ما فقط يافتن مسيري است كه هم قيد *cost* وهم قيد *delay* را

[23] Constrained Optimization Problem

برآورده سازد). این مساله را مساله قیود تاخیر-هزینه DCC[24] می نامیم . از نظر مدل سازي این مساله نیز مشابه مساله $DCLC$ است با این تفاوت که هدف یافتن مسیر $P_i \in \rho'(s,d)$ است به گونه اي که $C(P_i) \le \Delta_c$ و $D(P_i) \le \Delta_d$ باشد اگر و فقط اگر $P_i \in \rho'(s,d)$ که در آن Δ_c نشاندهنده حد بالایي هزینه و Δ_d حد بالایي تاخیر را نشان مي دهند . مساله $DCLC$ و DCC هر دو جزو مسائل $NP\text{-}hard$ هستند با این تفاوت که مساله $DCLC$ با هدف بهینه سازي بر روي پارامتر $cost$ و با ارضاء قید $delay$ عمل میکند در حالي که $DCCR$ الگوریتمي است که فقط با هدف ارضاء محدودیت $delay$ و $cost$ اجرا میشود .

2-2-1 معرفي روش $SSR+DCCR$

همانطور که گفته شد هدف از مسیریابي $DCLC$ یافتن مسیري از s به d است به گونه اي که اولا $Cost(P_i)$ حداقل شود و ثانیا $Delay(P_i) \le \Delta_d$ باشد . براي ساده تر شدن مساله در روش ارائه شده براي $cost$ هم یك حد بالایي (بطور تقریبي)معین مي کنیم . در این حالت هر جواب ممکن براي DCC یك جواب براي $DCLC$ خواهد بود البته اگر حد بالایي $cost$ بطور صحیحي تقریب زده شده باشد . در این روش در ابتدا مسیري با کمترین تاخیر یافت میشود (LD[25]) . هزینه این مسیر به عنوان حد بالاي هزینه ها در نظر گرفته میشود . اگر هیچ مسیر ممکن دیگري با هزینه کمتر از آن وجود نداشته باشد ، مسیر LD بهترین مسیر است و مسیري است که توسط الگوریتم بازگردانده میشود .

---

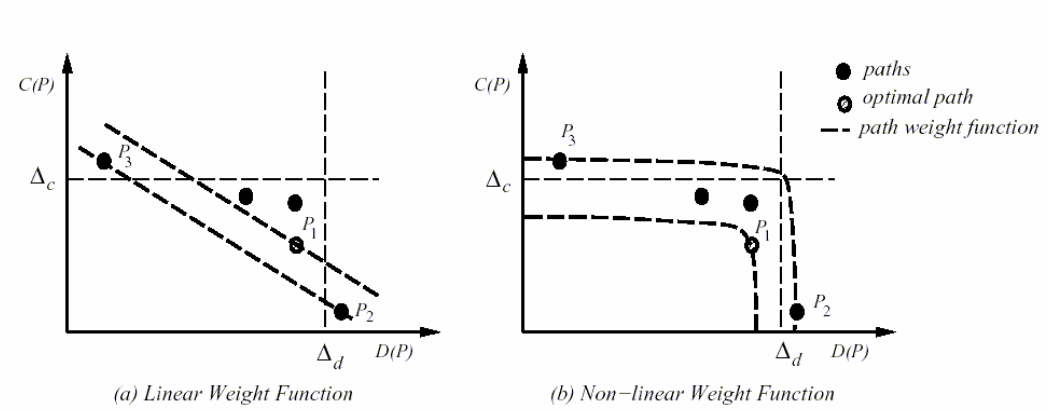
[24] Delay-Cost Constraint

[25] Least Delay

براي پيدا كردن مسيري با حداقل هزينه بايد همه فضاي راه حل ها [26] جستجو شود ، ما نياز داريم كه تمامي راه حل هاي ممكن را براي DCC بررسي كنيم (مسيرهايي كه هر دو قيد ارائه شده را ارضا نمايند) به اين منظور ، از الگوريتم هاي مشهور كوتاهترين مسير (مثل ديجسترا يا بلمن-فورد) استفاده مي كنيم . ولي اين الگوريتم ها بطور معمول فقط از يك پارامتر جهت ايجاد تصميمات راهگزيني استفاده مي كنند و ما مجبوريم كه تمامي پارامترهاي مربوط به يك لينك را تركيب كرده و وزن جديدي ايجاد كنيم كه اين وزن جديد به عنوان پارامتر تصميم گيري در الگوريتم كوتاهترين مسير بكار گرفته شود ، با اين روش مي توان مسيري را بدست آورد كه همه پارامترهاي ممكن را با هم حداقل كند .

يك راه حل ساده استفاده از تركيب خطي پارامترها است به عنوان مثال $w(e)=\alpha C(e)+\beta D(e)$ مي تواند وزن جديدي باشد كه به هر لينك نسبت مي دهيم . اين روش داراي اين مزيت است كه فضاي جستجوي مربوط به چندين قيد را به يك قيد خلاصه ميكند يعني ميتوان فقط به دنبال اين بود كه مسيري بيابيم تا قيد $\Delta=\alpha\Delta_c+\beta\Delta_d$ را ارضا كند . ولي اين تابع خطي براي وزن گذاري انعكاس مناسبي ازكيفيت مسير نيست يعني با اين وزن گذاري جديد يك مسير بهينه مي تواند توسط يك مسير نيمه بهينه حذف شود . يعني مسيري بدتر ، داراي وزني بهتر از يك مسير بهينه است .شكل زير اين مساله را نشان ميدهد:

[26] solution space



شكل 1-1 : مقايسه توابع وزني خطي و غير خطي*[21]*

در شكل (1-1) قسمت *a* ديده ميشود كه با اينكه تاخير *P2* از حد مجازبيشتر است ولي هنوز هم داراي كمترين وزن است به اين دليل كه *cost* اين مسير بسيار پايين است ، بنابراين فرايند جستجو ، مسير بهينه واقعي را در نظر نگرفته و مسير ممكن *P1* را انتخاب نخواهد كرد و يا ميتوان با استدلالي مشابه ديد كه مسير *P3* مي تواند توسط اين الگوريتم انتخاب شود در صورتي كه مسير بهينه *P1* جواب واقعي مساله است .

براي حل اين مشكل بايد تابع وزن ديگري پيشنهاد كنيم . روش ديگري كه در اينجا ارائه ميشود يك تابع غير خطي است و بطور دقيق تر يك تابع كسري است كه به صورت زير تعريف ميشود [22] :

$$w(p) = \max\left(\frac{C(p)}{\Delta_c}, \frac{D(p)}{\Delta_d}\right) \qquad (3-1)$$

مي توان نشان داد كه با اين تابع وزني ، الگوريتم *DCCR* مي تواند كوتاهترين مسير (مسيري كه هم قيد تاخير و هم قيد هزينه را برآورده سازد) را با يك نرخ موفقيت بالا ارائه نمايد . در قسمت *b* شكل (1-1) ديده ميشود كه با ارائه اين تابع جديد ديگر *P2* يا