نشریه علمی- ترویجی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دوره ششم، شماره ۱، اسفند ماه ۱۳۹۳

برنامه‌ریزی مسیر در شبکه‌های حمل‌ونقل چندساختی وابسته به زمان

علی عزیزی*[۱]، فرید کریمی‌پور[۲] ، علی اسماعیلی[۳]

[۱]کارشناس ارشد سیستم اطلاعات مکانی- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان
a.azizi66@yahoo.com

[۲]استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری- پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران
fkarimipr@ut.ac.ir

[۳]استادیار گروه سنجش از دور- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان
aliesmaiely@kgut.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۳، تاریخ تصویب شهریور ۱۳۹۳)

چکیده

برنامه‌ریزی سفر با هدف پیدا کردن یک مسیر بهینه، در حالیکه از حالت‌های حمل‌ونقل مختلف از جمله سرویس‌های حمل‌ونقل عمومی و سرویس‌های شخصی استفاده می‌شود، به منظور کمک به افراد در بهره‌گیری از زیرساخت‌های حمل‌ونقل ضروری است. شبکه-های حمل‌ونقل به دو مدل مستقل از زمان و وابسته به زمان دسته‌بندی می‌شوند. تفاوت اصلی این دو مدل به خاطر ثابت بودن وزن یال در مدل اول و وابستگی مدل دیگر به زمان حرکت است. از اهداف این مطالعه، مدل‌سازی شبکه‌های حمل‌ونقل با دوره‌های تناوب متفاوت، ارائه روشی نوین برای ذخیره‌سازی داده‌ها، توسعه الگوریتم دایجسترا برای برنامه‌ریزی مسیر در شبکه‌های حمل‌ونقل چندساختی برون-شهری بر حسب زمان و علاقه، پیاده‌سازی چارچوب پیشنهادی برای مجموعه‌ای از داده‌های شهرهای ایران و ارزیابی نتایج می‌باشد. در این مطالعه چارچوبی ارائه می‌شود که اطلاعات، زمان شروع سفر، شهر مبدا و مقصد، شبکه‌های حمل‌ونقل مورد علاقه و روز شروع سفر از کاربر دریافت می‌شود و خروجی برنامه‌ریزی مسیر به نحوی به کاربر ارایه می‌شود که با در نظر گرفتن شبکه‌های حمل‌ونقل مورد علاقه کاربر در زودترین زمان به شهر مقصد وارد شود.

واژگان کلیدی : الگوریتم دایجسترا، شبکه‌های حمل‌ونقل چندساختی، برنامه‌ریزی مسیر، وابسته به زمان

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

در زندگی مدرن، برنامه‌ریزی سفر دارای اهمیت زیادی است و با توجه به پیچیده شدن شبکه‌های حمل‌ونقل، تقاضا برای روش‌های کارآمد در برنامه‌ریزی سفر افزایش یافته است. با افزایش آگاهی مردم و بالا رفتن هزینه‌های انرژی، افراد تمایل بیشتری به استفاده از وسایل حمل‌ونقل عمومی نشان می‌دهند [۱]. یکی از اهداف سرویس‌های ناوبری هوشمند، کمک به افراد در بهره‌گیری از زیرساخت‌های حمل‌ونقل است. بنابراین برنامه‌ریزی سفر چندساختی با هدف پیدا کردن یک مسیر بهینه، در حالی که از حالت‌های حمل‌ونقل مختلف از جمله سرویس‌های حمل‌ونقل عمومی و سرویس‌های شخصی مثل خودرو استفاده می‌شود، ضروری است [۲].

شبکه‌های حمل‌ونقل برون‌شهری دارای ویژگی‌هایی متفاوت از جمله زمان تناوب و وزن یالها هستند و نمی‌توان از یک مدل برای همه این شبکه‌ها استفاده نمود. شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی بر اساس یک جدول زمان‌بندی حرکت می‌کنند، در حالیکه وسایل حمل‌ونقل شخصی محدودیت شروع حرکت ندارند. همچنین زمان تناوب جدول زمان‌بندی در شبکه‌های حمل و نقل متفاوت است.

از اهداف این مطالعه، مدل‌سازی شبکه‌های حمل‌ونقل با دوره تناوب متفاوت، ارائه روشی نوین برای ذخیره‌سازی داده‌ها، توسعه الگوریتم دایجسترا برای برنامه‌ریزی مسیر برون شهری در شبکه‌های حمل‌ونقل چندساختی شهری بر حسب زمان و علاقه، پیاده‌سازی برای مجموعه‌ای از داده‌های شهرهای ایران و ارزیابی نتایج می‌باشد. در این مطالعه، اطلاعات زمان شروع سفر، شهر مبدا و مقصد، شبکه‌های حمل‌ونقل مورد علاقه و روز شروع سفر دریافت می‌شود و برنامه‌ریزی مسیر به نحوی به کاربر ارایه می‌شود که با در نظر گرفتن شبکه‌های حمل‌ونقل مورد علاقه کاربر در زودترین زمان به شهر مقصد وارد شود.

در بخش دوم این مطالعه مروری بر کارهای پیشین بیان می‌شود. روش‌های مدل‌سازی، ذخیره‌سازی داده‌ها و مسیریابی در بخش سوم بیان می‌شود. در بخش چهارم، نتایج پیاده‌سازی و ارزیابی جواب‌ها ارائه می‌شود. در نهایت، در بخش پنجم، به نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای کارهای آتی در را ارائه خواهیم نمود.

۲- مروری بر کارهای پیشین

در این بخش، تحقیقات پیشین مربوط به مسیریابی در شبکه راه‌ها، مسیریابی در شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی و مسیریابی در شبکه‌های حمل‌ونقل چندساختی، به تفکیک معرفی می‌شود.

۲-۱- مسیریابی در شبکه راه‌ها

تحقیقات وسیعی در زمینه مسیریابی انجام شده است. مسئله برنامه‌ریزی مسیر با حل کوتاهترین مسیر در یک گراف وزن‌دار جهت‌دار حل می‌شود. اولین الگوریتم برای حل این مسئله توسط دایجسترا در سال ۱۹۵۹ ارایه شد [۳]. این الگوریتم تنها برای شبکه‌هایی با یال‌های دارای وزن مثبت جوابگوست. همچنین بلمن و فورد، الگوریتمی برای حل شبکه‌های با وزن منفی ارایه دادند. هارد، نیلسون و رافائل الگوریتم *A را ارائه نمودند [۴].

در شبکه‌های گراف با حجم داده‌ای بالا، الگوریتم‌های ذکر شده دارای سرعت کمی هستند و برای حل این مشکل، امروزه مطالعات الگوریتم‌های مسیریابی در جهت افزایش سرعت جواب‌گویی در شبکه‌های با حجم داده‌ای زیاد می‌باشد [۵].

۲-۲- مسیریابی در شبکه حمل‌ونقل عمومی

مسیریابی در شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی به مراتب سخت‌تر از شبکه راه‌ها است. در این زمینه، تحقیقات در جداول زمانی شبکه‌های راه‌آهن متمرکز شده است. در مقالات متعدد، مدل‌های مختلف با توجه به سطح واقع‌گرایی و الگوریتم‌ها، ارائه شده است.

به طور کلی دو روش "مدل زمان گسترش یافته" و "مدل وابسته به زمان" دارای این توانایی هستند که اطلاعات جداول زمانی شبکه راه‌آهن را مدل‌سازی کنند [۶]. در روش اول، مدل‌سازی دارای انعطاف‌پذیری بیشتری است. در مقابل، در مدل‌سازی با روش دوم، شبکه گراف دارای ابعاد کوچکتری بوده و زمان پاسخ به پرسش در آن سریع‌تر است [۷]. در این نوع مسیریابی، برای حل مسئله زودترین ورود[۱] که همان کم‌ترین زمان سفر می‌باشد، می‌توان الگوریتم دایجسترا را برای هر دو مدل

[۱] Earliest Arrival Problem

وابسته به زمان و زمان گسترش یافته توسعه داد [۶, ۸]. علاوه بر این در شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی بهینه‌سازی چندمعیاره بسیار مهم است، یعنی نه تنها زمان سفر، بلکه پارامترهای دیگر همچون هزینه سفر نیز کمینه باشد. در این زمینه و برای حل این مسئله نیز مطالعاتی انجام شده است [۹]. لازم به ذکر است در مطالعه حاضر، کمترین زمان تا ورود به مقصد مد نظر قرار گرفته است.

۲-۳- مسیریابی در شبکه‌های چندساختی

در مطالعات با حجم داده‌های بسیار زیاد، در مواردی پاسخ کوتاهترین مسیر زمانی یک جواب کارآمد نیست، بنابراین برنامه‌ریزی مسیر در شبکه چندساختی با استفاده از مسئله کوتاه‌ترین مسیر مقید برچسب‌دار حل شده است [۱۰].

Barrett و همکاران یک تحقیق نظری را ارائه دادند که در آن مسئله کوتاهترین مسیر مقید برچسب‌دار با توجه به انواع زبان از لحاظ پیچیدگی زمانی بررسی شده است [۱۱]. همچنین آنها نشان دادند، هنگامی که محدودیت-های زبان با قاعده در الگوریتم دایجسترا توسعه داده شود، مسئله کوتاه‌ترین مسیر مقید برچسب‌دار در یک زمان چندجمله‌ای به طور قطعی قابل حل است. علاوه بر این، Barrett و همکاران اولین مطالعه اجرایی یک زبان با قاعده را ارائه دادند[۱۲].

مدلسازی‌های متعدد دیگری نیز برای حل این مسئله مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳]، [۱۴]، [۲].

۳- روش انجام کار

برای حل مسئله کوتاه‌ترین مسیر در شبکه‌های چندساختی، ابتدا شبکه‌های حمل‌ونقل چندساختی مدل-سازی شده و سپس برای مسیریابی الگوریتم دایجسترا توسعه داده می‌شود. در این مطالعه شبکه راه‌ها، شبکه هوایی، شبکه راه‌آهن و شبکه اتوبوس‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی دارای زمان تکرار متفاوت هستند، که در این مطالعه زمان تناوب هفتگی در نظر گرفته شده است. همچنین، به‌طور جداگانه شبکه‌های حمل‌ونقل بررسی و مدل مناسب برای آنها بیان می‌شود.

مسئله کوتاهترین مسیر در برنامه‌ریزی سفر معادل با مسئله زودترین ورود در شبکه گراف است. شبکه گراف به شبکه‌های "وابسته به زمان" و "مستقل از زمان" دسته-بندی می‌شود. در شبکه‌های مستقل از زمان، الگوریتم دایجسترا بهترین جواب را ارائه می‌دهد. همچنین با توسعه الگوریتم دایجسترا می‌توان برای شبکه‌های وابسته به زمان نیز بهترین پاسخ را دریافت نمود. در شبکه‌های وابسته به زمان دو نوع پرسش وجود دارد: پرسش‌های زمانی[۱] و پرسش‌های پروفیلی[۲]. در پرسش‌های زمانی، هدف یافتن کوتاهترین مسیر برای زمان حرکت τ می‌باشد؛ و در پرسش پروفیلی، هدف یافتن کوتاه‌ترین مسیر حرکت در بازه زمانی (τ, Π) می‌باشد [۱۵]. در این مطالعه پرسش زمانی مدنظر قرار گرفته است.

۱-۳- مدل‌سازی

شبکه‌های حمل‌ونقل به دو دسته وسایل حمل‌ونقل عمومی مثل شبکه اتوبوس‌ها و وسایل حمل ونقل شخصی مثل اتومبیل شخصی تقسیم‌بندی می‌شود. مدل‌ها با توجه وزن یال‌ها در شبکه به دو دسته مستقل و وابسته به زمان دسته‌بندی می‌شود. تفاوت اصلی این دو مدل به خاطر ثابت بودن وزن یال در مدل اول و تابعی بودن در مدل دیگر (وابسته به زمان حرکت) است. روش مستقل از زمان برای شبکه راهها و مدل وابسته به زمان برای شبکه حمل-ونقل عمومی همچون شبکه هوایی، راه‌آهن و اتوبوس استفاده می‌شود [۷].

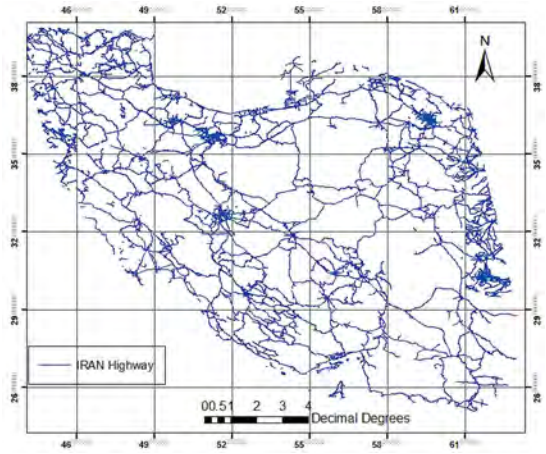
۱-۱-۳- مدل مستقل از زمان

شبکه راه‌ها، ساده‌ترین مدل مسیریابی است. در شکل ۱، شبکه راه‌های ایران نشان داده شده است. در این مدل، تقاطعات به عنوان گره در نظر گرفته شده‌اند. در صورتی که بین گره u و گره v راهی وجود داشته باشد، $e = (u, v)$ یال بین دو گره $u, v \in V$ است. اگر در دنیای واقعی راه بین u و v یک راه دوطرفه باشد، هر دو یال (u,v) و (v,u) به گراف اضافه می‌شود. وزن یال‌ها در شبکه راه‌ها با میانگین زمان سفر در آن قطعه خاص نشان داده می‌شود. میانگین

---

۱ Time queries
۲ Profile queries

زمان سفر با استفاده از میانگین سرعت ترافیک و فاصله مکانی آن منطقه، محاسبه می‌شود [۱۶].



شکل ۱- شبکه راههای ایران

۳-۱-۲- مدل وابسته به زمان

اساس تمام مدل‌های شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی، جدول زمانی است. یک جدول زمانی یک چهارتایی (C, B , Z , Π) است که در آن B مجموعه‌ای از ایستگاه‌ها، Z مجموعه‌ای از وسایل حمل‌ونقل، Π زمان تناوب جدول زمانی و C مجموعه عناصر اتصال است. یک عنصر اتصال از C بصورت $c= (z, S_1, S_2, D, \tau_1, \tau_2)$ تعریف شده و چنین تفسیر می‌گردد: اتوبوس $z \in Z$ از ایستگاه $S_1 \in B$ به ایستگاه $S_2 \in B$ می‌رود. در روز D، این اتوبوس در S_1 در زمان $\tau_1 < \Pi$ حرکت می‌کند و در $\tau_2 < \Pi$ به ایستگاه S_2 می‌رسد. این نکته در نظر گرفته شود که برای یک مؤلفه اتصال اتوبوس از S_1 به S_2 توقفی در بین مسیر وجود ندارد. در این ساختار، اگر زمان رسیدن τ_2 بزرگ‌تر از زمان خروج τ_1 باشد، زمان سفر C توسط $\tau_2 - \tau_1$ محاسبه می‌شود [۶, ۱۷].

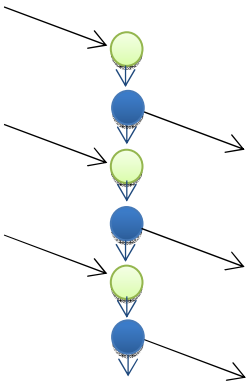
نکته دیگری که باید توجه شود، تناوب جدول زمانی است که ممکن است در یک سفر، شروع حرکت در شب بوده و زمان ورود در طول روز بعد باشد. در اینجا $\tau_2 < \tau_1$ است و زمان سفر از مجموع مدت زمان τ_1 تا نیمه شب و نیمه شب تا τ_2 محاسبه می‌شود. بنابراین با توجه به زمان تناوب Π، زمان سفر محاسبه می‌شود. بصورت کلی، تابع Δ (رابطه ۱) برای محاسبه زمان سفر قراردادی بین دو نقطه زمانی τ_1 و τ_2 استفاده می‌شود [۱۷]:

$$|\Delta| = \begin{cases} \tau_2 - \tau_1, & \tau_2 > \tau_1 \\ \pi - \tau_2 + \tau_1, & \text{Otherwise} \end{cases} \qquad (۱)$$

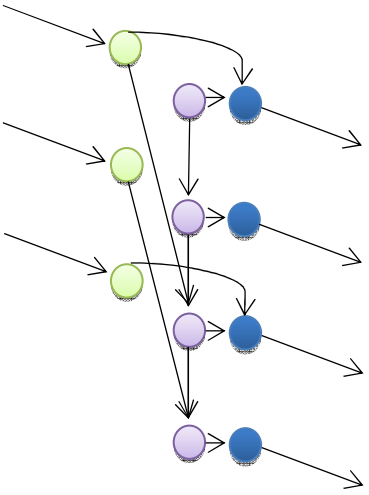
مدل‌های وابسته به زمان به مدلهای گسترش‌یافته زمان و وابسته به زمان دسته‌بندی می‌شوند.

۳-۱-۲-۱- مدل گسترش‌یافته زمان

در مدل گسترش‌یافته ساده، گره‌ها در گراف با ایستگاه‌ها در جدول زمانی مشابه با رویداد مرتبط هستند. در مدل زمان گسترش‌یافته ساده دو نوع رویداد "ورود" و "خروج" وجود دارد. برای هر عنصر اتصال $c= (z, S_1, S_2, D, \tau_1, \tau_2)$ یک رویداد خروج از اتوبوس z در ایستگاه S_1 و زمان τ_1 و یک زمان ورود از اتوبوس z در ایستگاه S_2 و در زمان τ_2 وجود دارد. بنابراین دو گره u و v به گراف مرتبط با رویداد ورود و خروج تعریف می‌شود. برای درک مکان هر ایستگاه، هر گره با ایستگاهش S مرتبط می‌شود و علاوه بر آن برچسب زمانی τ (هنگامی که رخ می‌دهد) به آن نسبت داده می‌شود. علاوه بر گره‌ها، دو نوع یال نیز تعریف می‌شود: برای دو رویداد (گره) متعلق به یک مؤلفه اتصال c، یک یال از گره خروج به گره ورود مربوطه وجود دارد و وزن این یال برابر با زمان سفر $\Delta(\tau_1(c), \tau_2(c))$ بوده و یال دیگر مربوط به همان ایستگاه است. برای دو گره متوالی v_i ,v_{i+1} که دارای برچسب زمانی τ_i و τ_{i+1} است، یک یال ایستگاه داخلی $e = (v_i, v_{i+1})$ با وزن (τ_i, τ_{i+1}) وجود دارد. در شکل ۲-الف این مدل نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲- یک ایستگاه قطار مدل زمان گسترش یافته ساده و واقع-گرایانه نشان داده شده است. گره‌های ورود سبز رنگ، گره‌های خروج آبی رنگ و گره‌های انتقال بنفش رنگ هستند. در نوع ساده قطار اول به قطار دوم می‌رسد، در حالی‌که در نوع واقع‌گرایانه این حالت ممکن نیست.

در مدل زمان گسترش‌یافته واقع‌گرایانه، برای غلبه بر انتقال واقعی، جدول زمانی C با تابع انتقال توسعه داده می‌شود که در هر ایستگاه در جدول زمانی یک زمان انتقال مرتبط می‌شود. با توجه به نوع واقع‌گرایانه مدل گسترش‌یافته سه نوع گره خروج، ورود و انتقال وجود دارد. گره ورود نمایش دهنده رویداد ورود، در جداول زمانی است. رویداد خروج با دو جفت گره که شامل گره خروج و انتقالی است، مدل می‌شود. برای هر عنصر اتصال $c \in C$ سه گره $v_{c,arr}$,$v_{c,dep}$,$v_{c,tra}$ وارد می‌شود. با در نظر گرفتن این فرض که گره خروج و انتقال دارای مقادیر یکسانی هستند، ایستگاه‌ها و برچسب‌های زمانی مرتبط با هر گره، مشابه با نوع ساده این مدل است [۶].

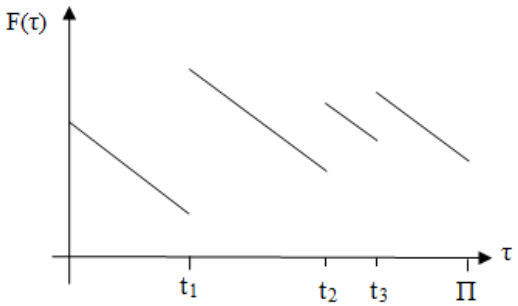
۳-۱-۲-۲- مدل وابسته به زمان

در مدل ساده وابسته به زمان، مجموعه گره‌ها دقیقا مجموعه ایستگاه‌ها است و یک یال اتصال بین دو گره u و v وارد می‌شود، اگر و تنها اگر حداقل یک اتصال بین گره u و v در جدول زمانی وجود داشته باشد. همچنین یال‌ها به زمان حرکت وابسته هستند. نوع توابع یالی که استفاده می‌شود، توابع خطی تکه‌ای است (شکل ۳) [۶].

برای هر اتصال $c= (z, S_1, S_2, \tau_1, \tau_2)$ در جدول زمانی یک نقطه درونیابی $p = (\tau1, \Delta (\tau_1, \tau_2))$ به تابع f که متعلق به یال S_1 و S_2 است، اضافه می‌شود. درون‌یابی نقاط با رویداد زمان خروج در یک یال خاص از شبکه مرتبط است. بنابراین اگر تابع f در نقطه درونیابی τ_i ارزیابی شود، مقدار $f(\tau_i)$ نتیجه دقیقی از زمان سفر iامین اتوبوس آن قطعه است. به عبارت دیگر، اگر یک نقطه زودتر از زمان حرکت $\tau < \tau_i$ در نظر گرفته شود و زمان سفر محاسبه گردد، ابتدا باید میزان انتظار در ایستگاه S_1 تا زمان شروع حرکت قطار محاسبه شود [۶, ۱۷]. بنابراین وزن یال $f(\tau)$، ترکیبی از زمان سفر $f(\tau_i)$ به اضافه زمان میزان انتظار است که در رابطه ۲ نشان داده شده است:

$$f(\tau) = WaitT + f(\tau_i) \qquad (۲)$$

از آنجایی که در این مقاله، دوره تناوب جدول زمانبندی حرکت هفتگی می‌باشد، مدت زمان انتظار تا شروع سفر از الگوریتم ۱ محاسبه می‌شود.



شکل۳- یک نوع تابع خطی تکه‌ای در توابع وابسته به زمان است که در شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی استفاده می‌شود.

Input: (τ, τi ,TSD,TDD)
TSD= Travel Start Day
TDD= Travel Departure Day
Output: WaitT= Wait Time to Departure

```
1.  t= τi - τ;
2.  d= TDD - TSD;
3.  if (d>0) then
4.      WaitT=t+d*24;
5.  elseif (d<0) then
6.      WaitT=t+(d+7)*24;
7.  elseif (d==0) && (t<0) then
8.      WaitT=t+7*24;
9.  else  (d==0)&&(t>0)
10.     WaitT=t;
11. End if
```

الگوریتم ۱- محاسبه مدت زمان انتظار

۳-۲- ذخیره‌سازی فشرده داده‌ها

تمام مدل‌های شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی با جدول زمانی مدل‌سازی شده است که در آنها c مجموعه عناصر اتصال است. یک عنصر اتصال از c بصورت $c=(z, S_1, S_2, \tau_1, \tau_2)$ نشان داده و تعریف شده است. در این مقاله، با توجه به سفرهای برون‌شهری D (روز حرکت) به آن افزوده شد. می‌توان با ذخیره‌سازی فشرده، تعداد سطرهای ذخیره‌سازی را کاهش داد.

در این مقاله، پیشنهاد می‌شود که عنصر اتصال c به صورت $c=(z, S_1, S_2, D, \Delta, n, \tau_i, \ldots, \tau_n)$ تعریف شود و این عنصر چنین تفسیر می‌گردد: z نوع وسیله حمل-ونقل، S_1 ایستگاه مبدا، S_2 ایستگاه مقصد، D روز حرکت، n تعداد سرویس‌های از نوع z که در روز D از ایستگاه S_1 به ایستگاه S_2 می‌رود و $\tau_i, \ldots, \tau_n$ به ترتیب بیان‌گر زمان‌های عزیمت از ایستگاه S_1 به ایستگاه S_2 می‌باشند.

۳-۳- مسیریابی

هنگامی که سفری از s به t طراحی می‌شود، ممکن است معیارهای گوناگونی برای انتخاب مسیر وجود داشته باشد. در این مقاله، معیارهای کمترین زمان مسیر و شبکه‌های حمل‌ونقل مورد علاقه برای بهترین مسیر در شبکه‌های چندساختی در نظر گرفته شده است و هدف تعیین مسیری است که زودترین ورود را به شهر مقصد داشته باشد.

۳-۳-۱- مسئله زودترین ورود

فرض کنید یک شبکه مستقل از زمان یا وابسته به زمان موجود است. نقاط مبدا و مقصد در شبکه به ترتیب s و t و زمان عزیمت $\tau < \Pi$ باشد. در این حالت، مسیری در شبکه مطلوب و مناسب است که شرایط زیر را داشته باشد:

۱. شروع مسیر در s باشد.
۲. زمان حرکت در s برابر با τ باشد.
۳. انتهای مسیر t باشد.
۴. زمان سفر همه مسیرهای دیگر باید شرایط ۱ و ۳ را داشته باشد و باید بزرگتر و یا حداقل مساوی این مسیر باشد.

در صورتی‌که شبکه مستقل از زمان باشد، شرط (۲) حذف می‌شود. برنامه مسیر در شبکه‌های چندساختی یک دنباله از I عنصر ارتباطی از جدول زمانی پرواز یا راه‌آهن است، به نحوی که عناصر اتصال پی در پی هستند؛ به عبارت دیگر $c_i, c_{i+1} \in I$ و ایستگاه یا فرودگاه c_i با ایستگاه خروج c_{i+1} مطابقت دارد. حاصل این فرایند، یک زنجیره از عناصر اتصال است که برای سفر در میان شبکه از آن استفاده می‌شود[۸, ۱۷].

۳-۳-۲- مسیریابی در شبکه‌های حمل‌ونقل وابسته به زمان

برای این هدف باید در الگوریتم دایجسترا تغییراتی اعمال شود تا بر وابسته بودن شبکه به زمان غلبه شده و به هدف اصلی که کوتاه‌ترین مسیر برای زمان حرکت τ می‌باشد، رسید. در پرسش‌های زمانی، الگوریتم دایجسترا برای روش وابسته به زمان، مشابه با الگوریتم مستقل از زمان است. با این حال مهم است که همه یال‌های شبکه گراف، ویژگی FIFO[۱] را داشته باشند. در این‌جا نیاز است تنها دو تغییر اعمال شود: در ابتدا، زمان حرکت τ به ورودی اضافه شود. همچنین، برای محاسبه وزن یال‌ها، باید زمان جاری در نظر گرفته شود، که یال‌های مربوطه را شامل می‌شود.

فرض کنید $e = (v_1, v_2)$ یالی است که باید وزنش محاسبه شود. زمانی که تابع f_e برای یال e محاسبه می‌کند برابر است با زمان خروج τ به همراه فاصله زمانی در امتداد v_1، که با $Dist_s(v_1)$ در الگوریتم نمایش داده می‌شود. بنابراین در الگوریتم دایجسترا وزن یال با $f_e(\tau+Dist_s(v_1))$ نمایش داده و محاسبه خواهد شد.

---

۱ First In, First Out

Input: A weighted graph G = (V, E), s ∈ V
Output: Shortest paths from s to t in time τ and day TSD

```
1.  for each vertex v :
2.    Weight[v] := infinity ;
3.    Previous[v] := undefined ;
4.  end for
5.  Weight[s] := 0 ;
6.  S := empty set
7.  Q :=  set of all vertices;
8.  while Q is not empty:
9.    u := Extract-Min(Q);
10.   S := S union {u} ;
11.   Remove u from Q ;
12.   for each edge e=(u,v) outgoing from u
13.     alt= f_e(τ+ Dist_u(v)) + Weight(u);
14.     if Weight [v] > alt
15.       Weight [v]= alt;
16.       Previous[v] = u ;
17.     end if
18.   end for
19. end while
```

الگوریتم ۲- الگوریتم دایجسترا توسعه یافته برای یافتن کوتاهترین های چندساختی وابسته به زمان‌مسیر در شبکه

با استفاده از روشی که برای پرسش‌های زمانی تشریح شد، نتیجه پرسش وابسته به زمان، کوتاه‌ترین مسیر برای زمان خاص حرکت τ مشخص می‌شود [۸, ۱۷].

۳-۳-۳- مسیریابی در شبکه‌های حمل‌ونقل چندساختی

حل مسئله کوتاه‌ترین مسیر نتایج خوبی را در شبکه‌های تک‌ساختی به دنبال دارد. در شبکه‌های گراف با حجم داده‌ای زیاد، هنگامی که گراف‌ها با هم ترکیب می‌شوند، کوتاه‌ترین مسیر به یک مسیر ناخواسته تبدیل می‌شود که ممکن است کاربر در عمل از آنها استفاده نکند. به طور مثال اگر در شبکه حمل‌ونقل شهری، شبکه‌های دوچرخه، مترو، تاکسی، اتوبوس و پیاده‌روی موجود باشد، شخصی می‌خواهد با توجه به زمان کوتاه‌ترین مسیر از مبدا تا مقصد خود را مشخص نماید؛ ترتیب وسایل حمل‌ونقل جواب کوتاه‌ترین مسیر ممکن است به صورت "دوچرخه، مترو و دوچرخه" باشد، که یک جواب غیرعملی و نشدنی برای کاربر بوده و در دنیای واقعی کاربرد ندارد. برای حل این مشکل از زبان با قاعده استفاده شده است. در این مطالعه، با توجه به حجم و مدل‌سازی داده‌ها در منطقه مورد مطالعه، برای ارایه جواب‌های کاربردی، اطلاعات شبکه‌های حمل‌ونقل مدنظر و محدودیت‌های آن‌ها از کاربر دریافت و به شبکه اعمال می‌شود و بدون استفاده از زبان با قاعده جواب‌های کاربردی ارائه می‌شود.

در الگوریتم ۲، الگوریتم دایجسترا توسعه یافته برای یافتن کوتاهترین مسیر در شبکه‌های چندساختی وابسته به زمان بیان شده است.

۴- نتایج و ارزیابی

چارچوب پیشنهادی با استفاده از داده‌های ۱۵ مرکز استان و مجموعه‌ای از شهرهای ایران پیاده‌سازی شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. کشور ایران بدلیل وجود بناهای تاریخی، مکان‌های تفریحی و تنوع زیستی و اقلیمی دارای قابلیت بالایی در صنعت گردشگری می‌باشد. با استفاده از برنامه‌ریزی مسیر چندساختی با هدف پیدا کردن یک مسیر بهینه در شبکه‌های حمل‌ونقل چندساختی، می‌توان به کاربران در بهره‌گیری از زیرساخت‌های حمل‌ونقل کمک نمود.

مدل‌سازی: نتایج پیاده‌سازی نشان می‌هد که با توجه به عدم پیچیدگی مدل‌سازی سفرهای برون‌شهری، مدل وابسته به زمان واقع‌گرایانه نسبت به مدل گسترش یافته با حجم کمتری از داده‌ها ساخته شده و دارای پیچیدگی محاسباتی کمتری نسبت به مدل گسترش یافته زمان است.

ذخیره‌سازی داده‌ها: در جدول ۱ نتایج ذخیره‌سازی داده‌ها در دو حالت فشرده و معمولی بر حسب تعداد درایه‌های جدول‌های ذخیره‌سازی داده‌ها بیان شده است.

جدول۱- بررسی ذخیره‌سازی داده‌ها

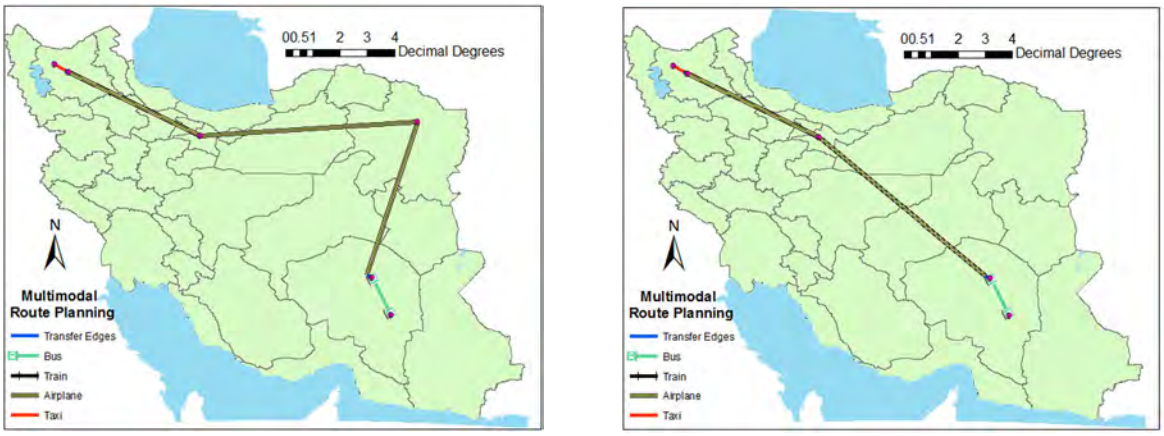
نوع وسیله	نحوه ذخیره سازی	
	فشرده	معمولی
اتوبوس	۲۶۲۵۰	۳۸۱۵۰
هواپیما	۷۱۶۱	۷۱۸۲
قطار	۲۹۳۸	۲۷۷۸
مجموع	۳۶۳۴۹	۴۸۱۱۰

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد هنگامی که در همه ایستگاه‌ها به طور متوسط تعداد حرکت بین مبدا و مقصد در یک روز زیاد باشد، با ذخیره‌سازی داده‌ها به صورت فشرده تعداد درایه کمتری استفاده می‌شود و هنگامی که تعداد حرکت بین مبدا و مقصد در یک روز در ایستگاه‌های

متفاوت دارای پراکندگی باشد، با توجه به میزان پراکندگی ذخیره‌سازی با روش فشرده نسبت به روش معمولی، یکسان و یا حتی ضعیف‌تر است.

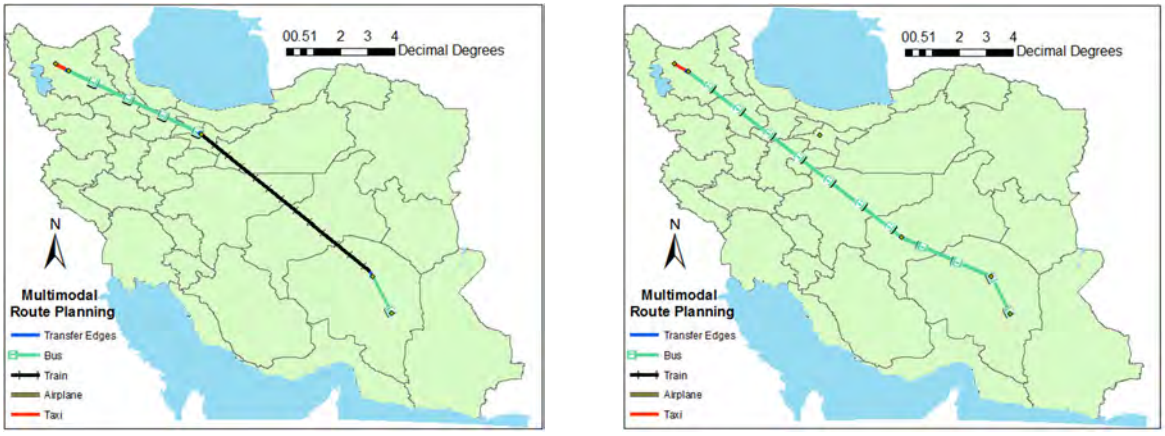
برنامه‌ریزی مسیر در شبکه‌های چندساختی: در این مقاله، الگوریتم دایجسترا برای سفرهای برون‌شهری توسعه داده شد. یکی از پارامترهای مهم در شبکه‌های چندساختی، انتخاب شبکه‌های حمل‌ونقل مورد علاقه و تعیین محدودیت‌ها می‌باشد.

زودترین ورود به شهر مقصد در دو زمان متفاوت در یک روز محاسبه شده و در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این درخواست، چهار شبکه هواپیما، قطار، اتوبوس و تاکسی در نظر گرفته شده است. در شکل ۵، زودترین ورود به شهر مقصد در دو زمان مختلف یک روز با درنظر گرفتن سه شبکه قطار، اتوبوس و تاکسی نمایش داده شده است. از آن‌جایی که زمان تناوب مطالعه مورد نظر یک هفته می‌باشد، برنامه‌ریزی مسیر در دو روز متفاوت با زمان شروع سفر یکسان نیست (شکل ۶).



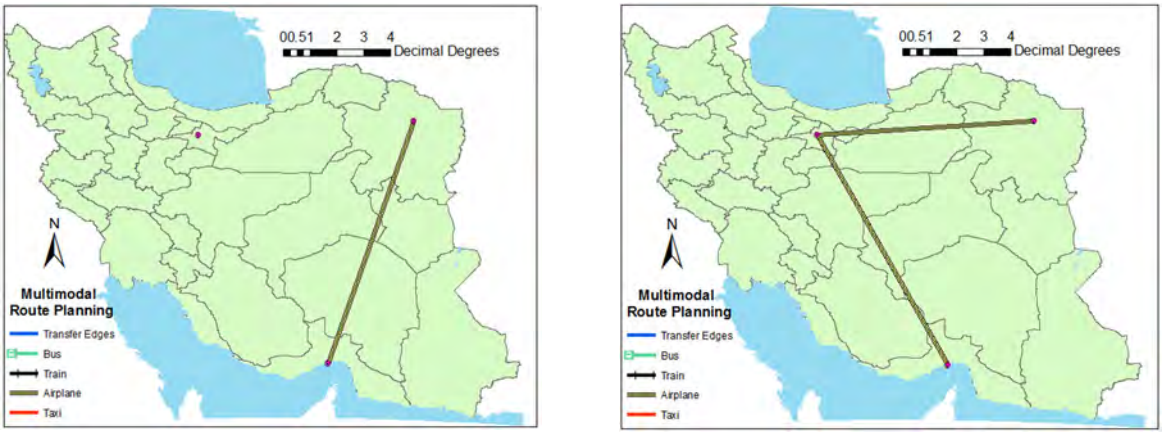
(ب) (الف)

شکل ۴- برنامه‌ریزی مسیر در دو زمان مختلف برای یک روز



(ب) (الف)

شکل۵- برنامه‌ریزی مسیر در دو زمان مختلف یک روز با در نظر گرفتن شبکه‌های حمل‌ونقل اتوبوس، قطار و تاکسی



(ب) (الف)

شکل۶- برنامه‌ریزی مسیر با زمان شروع سفر یکسان در دو روز متفاوت

نتایج نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی با توانایی ۱۰۰ درصد، سفر بین دو شهر را با در نظر گرفتن شبکه-های حمل‌و نقل مورد علاقه و محدودیت‌ها به نحوی برنامه‌ریزی می‌کند که کاربر در زودترین زمان در مقصد باشد.

۵- نتیجه‌گیری

هنگامی که سفری از s به t برنامه‌ریزی می‌شود، ممکن است معیارهای گوناگونی همچون سفر سریع، ارزان و با پارامترهای دارای نقل‌و انتقالات کم در نظر گرفته شود. به طور مثال در شکل ۴-الف پارامترهای انتقال و هزینه نسبت به برنامه‌ریزی شکل ۴-ب بیشتر بوده ولی زمان ورود به شهر مقصد چند ساعت زودتر است. نتایج پیاده-سازی نشان می‌دهد با وجود شبکه حمل‌ونقل هوایی تعداد گره‌های انتقالی افزایش می‌یابد. برای کاهش تعداد نقل و انتقال می‌توان وزن یال‌های انتقالی شبکه هوایی را افزایش داد. در این حالت مسیر انتخاب شده، مسیر دارای زودترین ورود به مقصد نیست ولی از دید کاربر بهترین است. بنابراین برای کارهای آتی پیشنهاد می‌شود که برنامه‌ریزی سفر بافت‌آگاه باشد، زیرا همیشه زودترین ورود به مقصد، بهترین مسیر نیست؛ و در برنامه‌ریزی مسیر نیز معیارهای گوناگون مدنظر کاربر در نظر گرفته شده و برنامه‌ریزی مسیر چندمعیاره بافت آگاه گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود برای ارزیابی بهتر مدل‌سازی‌ها بر اساس حجم داده‌ها و شبکه‌های حمل‌ونقل، منطقه مورد مطالعه، به تمام شهرهای ایران توسعه یافته و از زبان با قاعده نیز استفاده شود. در نهایت، در ساختار پیشنهادی، دسترسی به داده‌های جدول زمانی حرکات وسایل حمل‌ونقل نقش اساسی برای رسیدن به نتایج صحیح ایفا می‌کند. این داده‌ها باید به طور صحیح، دقیق و کامل شرایط مکانی-زمانی را بیان کنند. بنابراین دقیق، صحیح و در دسترس بودن داده‌ها، نتایج و برنامه سفر را تحت تاثیر قرار می-دهد. استمرار و بروزرسانی داده‌ها، نیازمند تلاش قابل توجهی است که بایستی مد نظر قرار گیرد.

مراجع

[1] Gräbener, T., Berro, A., and Duthen, Y., (2010). "Time dependent multiobjective best path for multimodal urban routing." Electronic Notes in Discrete Mathematics,Vol. 36,No. 0, pp. 487-494

[2] Liu, L., and Meng, L., (2009). "Algorithms of multi-modal route planning based on the concept of switch point." Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation,Vol. 2009,No. 5, pp. 431-444

[3] Dijkstra, E.W., (1959). "A note on two problems in connexion with graphs." Numerische mathematik,Vol. 1,No. 1, pp. 269-271

[4] Hart, P.E., Nilsson, N.J., and Raphael, B., (1968). "A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths." Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on,Vol. 4,No. 2, pp. 100-107

[5] Bauer, R., Delling, D., Sanders, P., Schieferdecker, D., Schultes, D., and Wagner, D., (2008). "Combining hierarchical and goal-directed speed-up techniques for Dijkstra's algorithm." Proc. Conference Name, Conference Location, Date pp. 303-318.

[6] Schulz, F., (2005). "Timetable information and shortest paths." Dizertační práce, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät Informatik,Vol.

[7] Pyrga, E., Schulz, F., Wagner, D., and Zaroliagis, C.: 'Experimental comparison of shortest path approaches for timetable information', in Editor (Ed.)^(Eds.): 'Book Experimental comparison of shortest path approaches for timetable information' (Citeseer, 2004, edn.), pp. 88-99

[8] Pyrga, E., Schulz, F., Wagner, D., and Zaroliagis, C., (2008). "Efficient models for timetable information in public transportation systems." Journal of Experimental Algorithmics (JEA),Vol. 12, pp. 2.4

[9] Disser, Y., Müller–Hannemann, M., and Schnee, M., (2008). "Multi-criteria shortest paths in time-dependent train networks." Proc. Conference Name, Conference Location, Date pp. 347-361.

[10] Barrett, C., Bisset, K., Holzer, M., Konjevod, G., Marathe, M., and Wagner, D., (2008). "Engineering label-constrained shortest-path algorithms." Proc. Conference Name, Conference Location, Date pp. 27-37.

[11] Barrett, C., Jacob, R., and Marathe, M., (2000). "Formal-language-constrained path problems." SIAM Journal on Computing,Vol. 30,No. 3, pp. 809-837

[12] Barrett, C., Bisset, K., Jacob, R., Konjevod, G., and Marathe, M., (2002). "Classical and contemporary shortest path problems in road networks: Implementation and experimental analysis of the TRANSIMS router." Proc. Conference Name, Conference Location, Date pp. 126-138.

[13] Abbaspour, R., and Samadzadegan, F., (2009). "A solution for time-dependent multimodal shortest path problem." Journal of Applied Sciences,Vol. 9,No. 21, pp. 3804-3812

[14] Bielli, M., Boulmakoul, A., and Mouncif, H., (2006). "Object modeling and path computation for multimodal travel systems." European Journal of Operational Research,Vol. 175,No. 3, pp. 1705-1730

[15] Dean, B.C., (1999). "Continuous-time dynamic shortest path algorithms." Massachusetts Institute of Technology

[16] Delling, D., Sanders, P., Schultes, D., and Wagner, D., (2009). "Engineering route planning algorithms." Proc. Conference Name, Conference Location, Date pp. 117-139.

[17] Pajor, T., (2009). "Multi-modal route planning." Master thesis, Univ. Karlsruhe (TH)