مروری بر مدل ها و الگوریتم های آنلاین پویا برای مدیریت ترافیک راه آهن

چکیده

جداول زمانی راه‌آهن برای انجام عملیات قوی و انعطاف‌پذیر و با تأخیر کم توسعه‌یافته‌اند. به هر حال، تغییرات برنامه‌های روزانه موجب رخداد اختلالاتی در جداول زمانی می‌گردد و برنامه‌ریزان، تلاش می‌کنند تا جداول زمانی را تا حد امکان، شدنی نگه داشته و از انتشار تأخیر جلوگیری کنند. هدف روش‌های زمان‌بندی مجدد، به‌روز کردن جداول زمانی در حالت آفلاین و به بهترین شکل ممکن می‌باشد. ما مروری را بر روی روش‌های اخیر در زمینه مسائل زمان‌بندی مجدد ترافیک راه‌آهن به صورت آنلاین انجام داده‌ایم که بر جنبه‌های پویا و تصادفی (یا حداقل نه کاملاً قطعی) دلالت دارند. در حقیقت، اگر چه زمان‌بندی ایستای آنلاین، منجر به درجه بالایی از انتشار تأخیر می‌گردد، اما هنوز با توجه به طبیعت احتمالی مشکلات حاصل از مسائل زمان‌بندی مجدد و توانایی آن در محاسبه عدم قطعیت در برنامه‌های آتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت چالش‌های مطرح برای تحقیقات آتی بیان می‌گردند.

کلمات کلیدی: انتشار تأخیر، سیستم های پویا، مدیریت ترافیک راه‌آهن، زمان‌بندی قطار

1. مقدمه

تهیه خدمات به موقع و قابل‌اعتماد، هدف اصلی صنایع ریلی به منظور حفظ و بهبود مزیت رقابتی در این صنعت است که به سرعت در حال رشد است. جداول زمانی قطارها به عنوان برنامه‌های تاکتیکی، برنامه‌ریزی‌شده و سالانه یا در هر فصل (آفلاین) به‌روز می‌شوند تا مسیرها و زمان‌بندی قطارها را تعیین کنند. در عملیات روزانه قطارها، منابع مختلفی

از آشفتگی وجود دارد که ممکن است همانند حوادث مختلف تصادف و غیره بر روی زمان‌های حرکت قطارها تأثیر گذارد و موجب تأخیر اولیه در برنامه زمانی قطارها باشند. به دلیل وابستگی متقابل بین قطارها، تأخیر اولیه می‌تواند انتشاریافته و موجب تأخیر در سایر قطارها بر روی شبکه حرکت قطارها گردد.

غالباً انتظار می رود که یک جدول زمانی باید قادر به تحمل اختلالات جزئی در زمان واقعی باشد: این مورد اعتبار و صحت نامیده می‌شود که به اختلالات ایجادشده در شبکه ترافیک راه‌آهن حساس است (مانند برخی از بخش‌های جدول زمانی که تحت تأثیر توزیع انتشار تأخیر قرار می‌گیرند) ([24] را ببینید). مطالعات بسیاری برای ساختن جداول زمانی قوی[1] انجام‌شده‌اند. به طور مثال، Carey [10]، Carey and Kwiecinski [11]، Goverde [34]، Khan and Zhou [49] و Vromans et al. [75]. به هر حال، هیچ برنامه آفلاینی نمی‌تواند به حد کافی در برابر آشفتگی و بی‌برنامگی‌های ایجادشده قوی باشد (مثل اختلالات عمده‌ای که موجب انسداد یک راه می‌گردند) و بهره‌وری ترافیک راه‌آهن را به خطر نیندازد (Kauppi et al. [47]، Zaroliagis et al. [82]). روش‌های مدیریت ترافیک آنلاین، برنامه‌هایی را برای تغییر وضعیت ترافیک در شرایط رخداد ترافیک و یا خرابی و انتشار تأخیر دارند.

جدول1 . حوزه مرور

	ایستا بهینه سازی، با اطلاعات کاملا قطعی	پویا بهینه سازی زمانی که اطلاعات جدید/به روز رسانی موجود	
آنلاین (انجام در طی عملیات، زمان محاسباتی کم در حدود چند	زمانبندی ترافیک ایستای آنلاین **Open loop control**	Reactive dynamic *Closed Loop Control*	Proactive-dynamic *Closed Loop Control*
آفلاین (انجام به صورت پیشرفته، زمان محاسباتی بالا در حدود ساعت ها)	جداول زمانی قطارها	-	

[1] robust

کنترل ترافیک راه‌آهن، یک مسئله تنظیم جداول زمانی قطارها مطابق با شرایط زمان واقعی است تا تأثیرات منفی رخدادهای غیرمنتظره کاهش یابد. این مسئله به صورت مسئله توزیع امکانات[2] راه‌آهن یا قطارها و یا کنترل ترافیک راه‌آهن تعریف می‌گردد. فرآیند تنظیم نقشه برای شرایط واقعی پیچیده است (Informs-RAS را ببینید [42] ONTIME [65] و Schaafsma and Bartholomeus [70]).

ما روش‌های زمان‌بندی ترافیک آنلاین (زمان واقعی نیز نامیده می‌شود) و آفلاین را به دو صورت طبقه‌بندی کرده‌ایم: ایستا (یا حلقه باز) و پویا (یا حلقه بسته). جدول 1، ساختار این طبقه‌بندی را نشان می‌دهد.

زمانی که جداول زمانی ماه‌ها قبل از عملیات آماده می‌شوند، جداول زمانی قطارها فقط می توانند آفلاین و ایستا انجام گیرند و هیچ پیشگویی صحیح و یا اطلاعات به‌روزی وجود نخواهد داشت.

روش‌های آنلاین دارای محاسبات زمانی کوتاه (در حد چند ثانیه یا چند دقیقه) هستند و به داده‌های زمان واقعی و آدرس‌دهی توابع هدف خاصی برای بازیابی مسیر اولیه نیاز دارند. روش‌های آنلاین می‌توانند ایستا باشند، اگر فقط یک بار و با تمام اطلاعات اجرا گردند و یا می‌توانند پویا باشند، اگر اطلاعات در طی زمان تغییر یابند. تعامل بین عملیات، کنترل و عملیات مجدد به زمان زیادی نیاز دارد. به عنوان مثال، تنها اتفاقات آتی را می‌توان کنترل کرد. این تمایز منجر به ایجاد دو روش کنترل حلقه باز و حلقه بسته می‌گردند. جزئیات بیشتر را در ادامه ببینید.

علاوه بر این، ما می‌توانیم بین روش‌های reactive که از تصمیمات آتی غفلت می‌کنند و روش‌های proactive تمایز قائل شویم. مورد دوم، آشفتگی و وضعیت آتی شبکه را بررسی کرده و شبکه را به صورتی احتمالی و وابسته به زمان در نظر می‌گیرد. بنابراین، احتمال زمان انتظار حوادث آتی (مانند ورود به ایستگاه) در طول زمان تغییر می‌یابد. فرآیند کنترلِ زمانی به منظور کاهش زمان تصمیم‌گیری به کار می رود.

زمان‌بندی مجدد قطار، درواقع همان به‌روزرسانی جداول زمانی است (انتشار برنامه‌ای برای خروج قطار، زمان عبور و زمان رسیدن قطار و همچنین مسیر قطار در شبکه راه‌آهن) که باید مکان جاری و سرعت قطار و تأخیر آن را به عنوان محدودیتی در نظر بگیرد. گردش قطارها باید با ارائه روشی برای حرکت شدنی قطارها در شبکه راه‌آهن با اندازه‌گیری

[2] Dispatching

موقعیت و سرعت و امنیت و پویایی انجام گیرد. مسئله، زمانی مشکل می‌گردد که هیچ دو قطاری نمی‌توانند به دلیل محدودیت ظرفیت زیرساخت به صورت همزمان بر روی یک ریل و یا در یک ایستگاه باشند. نظریه مسدود کردن زمان (به [37] مراجعه کنید)، برای بررسی امنیت حرکت قطارها در سطح میکروسکوپ (به صورت کاملاً جزئی) مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به سطح جزئیات مورد نیاز، روش‌های بهینه‌سازی غالباً قادر به مدیریت افق زمانی کوتاه (معمولاً در حدود یک ساعت و نه بیشتر از آن) و مکان کوچکی (معمولاً دو حدود 50 کیلومتر و نه بیشتر از آن) هستند.

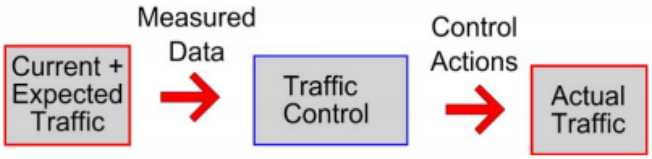
این مقاله روش‌های پویای آنلاین را برای زمان‌بندی مجدد ترافیک راه‌آهن مرور می‌کند. در واقع با وجود اینکه، کنترل شبکه راه‌آهن فرآیندی تصادفی و عدم قطعی است، عمدتاً مورد غفلت قرار گرفته‌اند. این موارد موجب ایجاد انگیزه برای بررسی و تمرکز بر روی این موضوع گردید. ما بررسی‌های اخیر [15] و [31] و تحقیقات اخیر شامل [14]، [15]، [57]، [63]، [71] را با جزئیات مورد بررسی قراردادیم.

ادامه مقاله به این صورت سازمان‌دهی شده است. ما ابتدا روش‌های موجود را بر اساس تنظیمات کنترلی، زمان پویا، مدل ریاضی و جزئیات مورد بررسی قراردادیم. سپس ارتباط مسائل را با سایر مسائل موجود بررسی کرده و در انتها به نتیجه‌گیری پرداخته‌ایم.

2. تنظیمات کنترلی

به طور کلی روش‌های کنترل آنلاین در شکل 1 نشان داده‌شده‌اند. به خصوص، داده‌ها از جهان واقعی اندازه‌گیری شده‌اند، فاکتورهای مرتبطی را که در ادامه بیان می‌شوند را توصیف می‌کنند. این داده‌ها ذاتاً آنلاین هستند و مسائل را از روش‌های آفلاینی که چنین ورودی‌هایی را ندارند متفاوت می‌کنند. این داده‌ها در ماژول‌هایی استفاده می‌شوند که برای کنترل مقررات هستند. اقدامات ورودی برای هر سیستم در زیر شرح داده شده است.

به طور کلی، چنین سیستم هایی دارای چارچوب تکراری شامل تنظیم پیش‌بینی، راه حل در طی زمان‌های طولانی تر و پیش‌بینی مدل کنترلی هستند.



شکل 1. تنظیمات کنترل ترافیک

A. اندازه‌گیری داده

داده‌ها را می‌توان اندازه‌گیری کرد و در حالت کلی این داده‌ها شامل موقعیت و زمان [60]، [69]، [71] هستند. برخی از روش‌ها شامل مشخصه‌های سرعت قطار و سرعت جاری و آتی قطار [16] و برخی شامل سرعت هدف (یعنی سرعتی که یک قطار برای رسیدن به هدف مورد نظر باید داشته باشد) [56] هستند. علاوه بر این، زمان‌بندی مجدد در حالت نرمال به دنبال برنامه‌ریزی وضعیت جداول زمانی است تا اطلاعات برنامه‌ریزی‌شده به خوبی قابل انجام باشند. روش‌های کمتری اطلاعات اضافی نظیر تعداد مسافران (در برنامه‌ریزی خطی استفاده می‌گردد) عملکرد قطار و پویایی محیط (برای مشاوره سرعت [2]، [72]) را مورد بررسی قرار می‌دهند. مگر اینکه اختلالات بسیار بزرگی در شبکه رخ داده و به آن آسیب برساند [16]، [46]، [60]، [66].

برای توصیف حالت‌های آینده، روش پویا نیاز به داده‌های فرآیندهای سیستم دارد، مثل پیش‌گویی زمان اجرا، انتظارات بار ورودی و تنوع ورودی‌ها. اطلاعات بیشتر در این زمینه در بخش سوم بررسی خواهد شد.

B. عملیات کنترل

عملیات کنترلی شامل اقداماتی است که در آن یک کنترلر باید ترافیک را تغییر دهد تا به وضعیت مطلوب مشخصی برسد [56]. در عمل (برای مثال [79] را ببینید)، این با انتخاب‌هایی مرتبط است:

1) زمان: تغییر زمان برنامه‌ریزی در نقاط مرجع (سنجش مجدد زمان) معمولاً شامل تنظیم مشخصات سرعت قطار است که تعیین می‌کند قطار باید کندتر یا تندتر حرکت کند [34]، [48] تا تأخیر کاهش یابد [9]، [23]، [38]، [59].

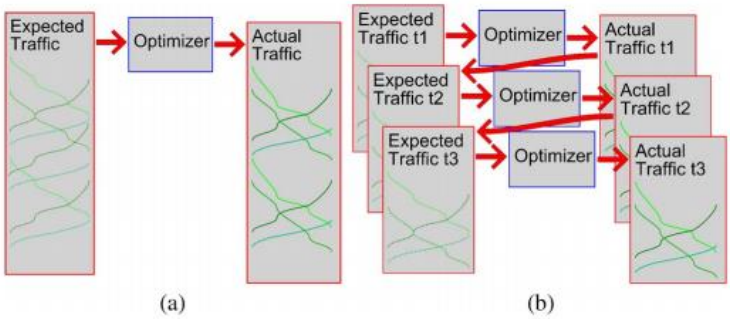
2) سرعت: به‌روزرسانی سرعت رانندگان برای جلوگیری از درگیری احتمالی و صرفه‌جویی در انرژی [2]، [34]، [35]، [39]، [51]، [66]، [73]، [80]. دو هدف ذخیره تأخیر و کاهش انرژی با همدیگر مورد بررسی قرار گرفتند که در تحقیقات [22]، [56]، [59]، [67] نشان داده شده است و همچنین سیاست‌های مدیریت سرعت در [20] بررسی‌شده است.

3) مرتبه: تغییر توالی قطارها به عنوان عملی بحرانی است که ظرفیت زیرساخت قطارها را دچار مشکل می‌کند [3]، [15]، [16]، [23]، [25]، [29]، [44]، [58]، [59]، [66]، [71]، [73]. از لحاظ تاریخی، اغلب محققان به مسئله meet and pass توجه کرده‌اند. مثل، یافتن مکانی که قطارها می‌توانند قبل از تغییر مسیر در آنجا قرار گیرند و مکان‌های بلاک شده برای توقف جهت تغییر مسیر و یا مکان‌های تک مسیری. هر قطاری در یک زمان می‌تواند بین دو مکان حرکت کند [10]، [51]، [60]، [66]، [69]، [74]، [76]، [78]، [81].

4) مسیر محلی در یک منطقه پیوسته پیچیده: تغییر مسیر قطار با قطار مجاور آن که دارای مسیر مشابهی هستند در مکان محلی، مانند تغییر پلتفرم ایستگاه یا مسیر متصل به همان پلتفرم [6]، [16]، [57]، [66]، [71].

5) مسیر جهانی در شبکه: یک محاسبه گر که مسیری جهانی را با توجه به تمام محدودیت‌های ارائه‌شده توسط شبکه بیابد تا به تمامی درخواست‌ها پاسخ داده شود [45]، [64].

6) سرویس: سرویس ها توسط لغو شدن یک قطار، لغو توقف و یا افزودن یک ایستگاه توقف جدید ایجاد می‌گردند.



شکل 2. (a) کنترل حلقه باز. (b) کنترل حلقه بسته

به طور فزاینده، درجه آزادی اجازه می‌دهد تا بتوانیم راه‌حل‌های بهتری را اما با هزینه پیچیدگی محاسباتی بالاتر ارائه دهیم [79]. به دلیل پیچیدگی بالا، تنها تعداد کمی از روش‌های پویای آنلاین در نظر گرفته‌شده‌اند. بنابراین تعداد

کمی از اقدامات برای آدرس‌دهی متفاوت درخواست‌ها ارائه‌شده‌اند. اکثر راه‌کارها، اقدامات کنترلی را به شیوه پی در پی در نظر می‌گیرند که از مسیریابی جهانی شروع می‌شوند. به عنوان مثال، مسیریابی جهانی، می‌تواند برای جلوگیری از مسدود شدن یک منطقه انجام شود. سپس محاسبه گر می‌تواند پس از انتخاب مسیر، به گسترش ظرفیت در ایستگاهی که دچار گلوگاه شده است، بکند [19]. علاوه بر این، فرایندهای مختلفی را می‌توان برای یافتن یک مسیر ممکن برای زمان‌بندی اجرا کرد. به عنوان مثال، فرآیندی که در [6] پیشنهاد شده است که در رقابت با روش [42] ارائه گردیده است. یکی از اشکالات اساسی در رابطه با روش ترتیبی، استفاده از گزینه‌های محدود در هر مرحله از زمان‌بندی است که می‌تواند به طور چشمگیری موجب کاهش عملیات لازم در مرحله دوم گردد. برای پرداختن به این موضوع، مطالعات اخیر روش‌هایی را پیشنهاد کرده‌اند که به طور همزمان تغییر زمان‌بندی را با در نظر گرفتن هدف راه حل انجام می‌دهند [61]، [66]. با توجه به سرعت قطار در عملیات زمان واقعی، بیشتر مطالعات بر روی زمان‌بندی تنها یک قطار تمرکز دارند (نگاه کنید به عنوان مثال، [2] و [51])، و روابط متقابل بین قطارها را که کاملاً پیچیده است، برای مدل‌سازی در نظر نمی‌گیرند.

C. روش‌های حلقه باز

روش‌های حلقه باز (شامل روش‌های ایستای آنلاین جدول 1)، زمان‌بندی مجددی را بر اساس اطلاعات کامل درباره وضعیت جاری زیرساخت، وضعیت قطار و سرعت و پیش‌گویی تأخیر و زمان انتظار رخدادهای آتی ارائه می‌دهند. اغلب روش‌های بهینه‌سازی فرض می‌کنند که تنظیمات ارائه‌شده می‌توانند مسئله را برای همیشه حل کنند [3]، [6]، [10]، [25]، [38]، [44]، [57]، [62]، [66]، [69]، [79] و بنابراین طرح‌های ممکنی را برای اجرا در واقعیت ارائه می‌دهند [16]. مدل های پیشگویی (مثل روش‌های انتشار تأخیر) ترافیکی را که به نوعی در طبقه‌بندی مورد بررسی آن‌ها قرار نگیرد، زمان‌بندی نمی‌کنند [5]، [28]، [34].

شکل 2، روش‌های حلقه باز و حلقه بسته را طبقه‌بندی می‌کنند. در یک کنترل حلقه باز [شکل 2(a) را ببینید]، بهینه‌ساز فقط یک بار با تمام دانشی که در آینده ممکن است رخ دهد، اجرا می‌گردد.

D. روش‌های حلقه بسته

در مقابل، در یک کنترل حلقه بسته، بهینه‌ساز مکرراً در زمان‌هایی مثل T1، T2، T3، ...، TN، هر بار که وضعیت ترافیک مورد انتظار و ترافیک واقعی تغییر می‌یابد، زمان‌بندی مجدی را انجام می‌دهد. ترافیک مورد انتظار در زمان ti + 1 بستگی به ترافیک واقعی در زمان Tl دارد که آن هم به نوبه خود بستگی به اقدامات کنترلی محاسبه گر در تمامی زمان‌ها T1، ...، Tl دارد. برای مشاهده یک طرح مرجع، شکل 2(b) را ببینید. روش‌های حلقه بسته ذاتاً تمام جوانب مسائل را مورد بررسی قرار می‌دهند که کنترل‌های حلقه باز از تنوع راه‌حل‌ها ممانعت می‌کردند. تنوع راه‌حل‌های موجود موجب سهولت دستیابی به یکی از این راه‌حل‌ها می‌گردد. (در [68] بررسی‌شده است و توسط مجموعه‌ای از معیارها ارزیابی شده است) . کیفیت راه حل مورد مطالعه در [18] و [71] نشان داده شده است. علاوه بر این، اغلب گزینه‌های عملیاتی زمانی ساخته می‌شوند که یک مرحله اضافی اجرا گردد که بر اساس انحراف استاندارد [56]، [67]، [77] و یا بر اساس مراحل زمانی [9]، [59]، [68]، [71] است.

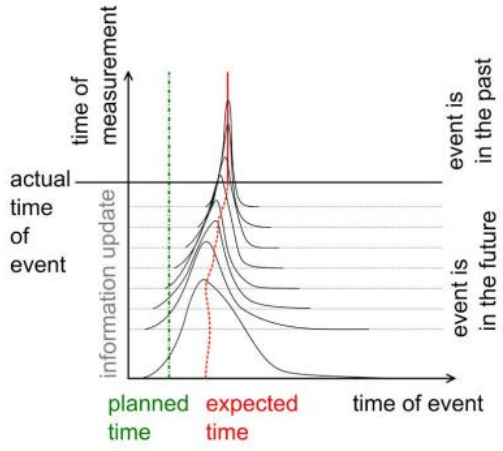
برای گروه دوم، اغلب راه‌حل‌های محاسباتی به‌روز، منجر به تنظیمات سریع‌تر و راه‌حل‌های بهتری می‌گردند[68]. برای کاهش اثرات منفی تغییرات متعدد در dispatchers محلی (به عنوان مثال، مدیر ایستگاه)، رانندگان و مسافران [60]، [68]، [79] تمرکز بر راه‌حل‌هایی که اختلالات تصادفی را کاهش دهد، ضروری به نظر می‌رسد.

3. پیش‌بینی پویا

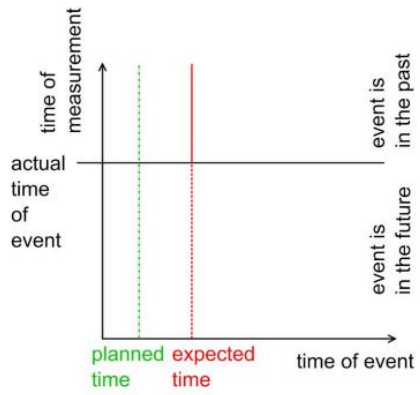
ما در این بخش ویژگی‌های اصلی روش‌های آنلاین پویا و همچنین پیش‌بینی پویای مبتنی بر زمان را بررسی می‌کنیم. این بررسی‌ها پاسخی برای "آنچه که شناخته‌شده؟" است و نشان‌دهنده مواردی است که در گذشته، حال و آینده برای رسیدن به هدف این مقاله شناخته‌شده است. مدل‌سازی عدم قطعیت و پیش‌گویی برای محاسبه عملیات کنترلی بهینه و قابل‌قبول ضروری است. هدف سیستم کنترلی مقابله با انحرافات حاصل از برنامه موجود است. به عنوان مثال، تأخیر حاصل از قطارها را که در برنامه در نظر گرفته نشده است را جبران می‌کند. مطابق با نظر Yuan and Hansen [80] که فرآیند تأخیر و مدل‌سازی را مرور کردند، تأخیر می‌تواند به تنهایی با روش گاوس، معکوس گاما و یا توزیع

Weibull دنبال شود و تأخیر می‌تواند بر روی یک قطار منفرد و یا تمامی آن‌ها به صورت زنجیر وار تأثیر بگذارد. به غیر از تأخیر، ساکن بودن قطار در یک مکان یا ایستگاه نیز ممکن است موجب ترافیک شده و مزاحمت ایجاد کند. علاوه بر این، تأخیر می‌تواند قابل انتظار بوده و در طرح‌های بهینه‌سازی با دانستن مکان و وضعیت جاری ترافیک شبکه در نظر گرفته شود. به‌روزرسانی‌های حاصل از عملیات ممکن است بر روی قابلیت اطمینان راه‌کارها در آینده تأثیر داشته باشد.

ما به کمک شکل 3، این مسائل را بررسی کرده‌ایم. برای هر رویدادی (برای مثال، رسیدن قطار به ایستگاه)، ما ترافیک احتمالی متفاوتی را بر حسب زمان آن رویداد ترسیم کرده‌ایم که بر اساس زمان اندازه‌گیری وقایع و همچنین وضعیت آن‌ها بستگی دارد. هر دو محور به زمان برمی‌گردند: محور x، زمانی است که رویدادها رخ می‌دهند (حدس) یا اتفاق افتاده است (اندازه‌گیری). محور y، زمانی است که این حدسیات یا اندازه‌گیری‌ها انجام‌شده‌اند. رویدادها دارای یک زمان برنامه‌ریزی نیز هستند که با خط نقطه‌چین سبز رنگ عمودی نشان داده شده است.



شکل 3. پیش‌بینی پویای حوادث آتی



شکل 4. اطلاعات کامل آتی

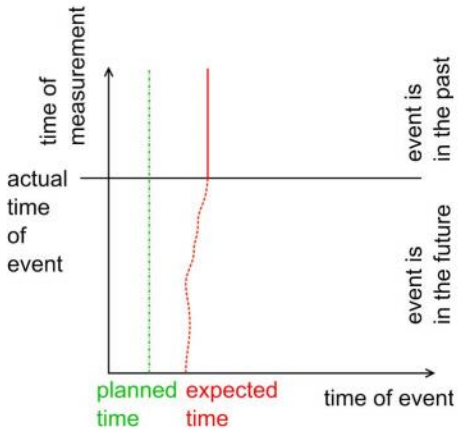
در زمان اندازه‌گیری برابر با صفر، ما زمان رویدادی را که به حد کافی در آینده‌ی دور است و کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد را بررسی کردیم. بنابراین، ما می‌توانیم یک احتمال توزیع آفلاین و یک مقدار مورد انتظار را محاسبه کنیم. زمانی که اطلاعات به‌روز می‌شوند و آماده‌اند، ما می‌توانیم یک توزیع احتمال جدید از رمان رویدادها تا زمانی که رویداد واقعاً رخ می‌دهد محاسبه کنیم. در این فرآیند، ما انتظار داریم، واریانس توزیع زمانی رویدادها در طول زمان کاهش یابد و زمانی که رویدادها واقعاً رخ می‌دهند، تأثیرات قطعی آن‌ها شناخته‌شده است. ما تکامل مقدار زمانی مورد انتظار را برنامه‌ریزی کردیم و با خطوط قرمز رنگ نقطه‌چین نمایش دادیم. فرض می‌کنیم که مقادیر متفاوت در زمان‌های متفاوت اندازه‌گیری می‌گردند (مثل ثابت‌ها) و پس از رخداد واقعی آن رویداد، ثابت می مانند.

Buker and Wendler [8]، مطالعه کاملی بر روی تأخیر پویا انجام دادند، به عنوان مثال، چگونگی توزیع تأخیر و مقدار آن را در اثر گذر زمان تغییر دادند. در اصل، آینده را می‌توان به عنوان یک مقدار مورد انتظار در نظر گرفت. با این حال، روش علمی اغلب فرض می‌کنند که تنظیمات ساده‌ای در رابطه با اطلاعات وجود دارند که در ادامه بحث خواهد شد.

A. دانش کاملی از آینده

اگر همه چیز قبل از تصمیم‌گیری شناخته‌شده باشد، ما به اطلاعات کاملی دستیابی داریم. روش ایستا فرض می‌کند که تمامی اطلاعات را از قبل دارد. ما این مسائل را در شکل 4 نمایش داده‌ایم. این تنظیمات ساده هستند و می‌توانند

برای عملیات برنامه‌ریزی‌شده، مانند تعمیر و نگهداری و یا قابلیت اطمینان از پیش‌بینی‌های بالا مورد استفاده قرار گیرند [63].



شکل 5. به‌روزرسانی اطلاعات به صورت مداوم

ما در این طبقه‌بندی تمام روش‌هایی را که هیچ‌گونه به‌روزرسانی در اثر گذر زمان ندارند را بررسی کردیم. در این مورد، زمان مورد انتظار فقط یک بار محاسبه می‌گردد و تنظیمات مطابق با آن زمان محاسبه می‌گردند و یا بهینه‌ساز معتقد است که تمامی اطلاعات کامل آینده را می‌شناسد [3]، [10]، [15]، [16]، [22]، [69].

روش‌هایی که دارای تنظیمات مشابهی با آنچه که تا کنون گفته شد هستند نیز به تجزیه زمان نیاز دارند. مسائل کنترل ترافیک به زیر مسائلی با بُعد زمان (به عنوان مثال، کنترل یک تکه در زمان) تجزیه می‌شوند. اما فقط برای اهداف ترکیب [30]، [66] در برخی از موارد محدود [9] کارایی دارند. در هر مرحله، حل کننده به اطلاعات کامل آینده آگاه است [6]، [23]، [66]، [71].

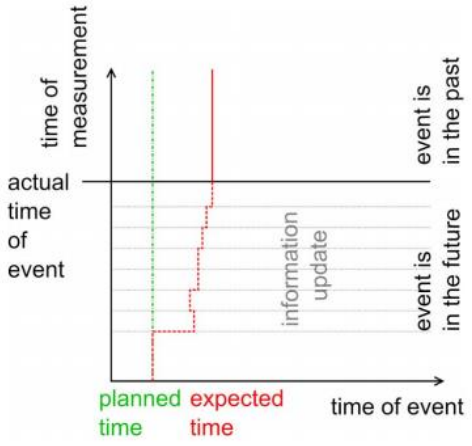
علاوه بر این، روش‌هایی که فرض می‌کنند اطلاعات کامل و قطعی در مورد تأخیر و موارد دیگر را در اختیاردارند، فرض می‌کنند که مقادیر قابل انتظار آن‌ها در طی زمان تغییر پیدا نمی‌کنند. در این مورد، ما بهینه‌سازی را ارائه کرده‌ایم که از مقادیر دقیق آینده اطلاع ندارد و فقط بر اساس مقادیر قابل انتظار تصمیم‌گیری می‌کند.

علاوه بر این، اطلاعات موجود در اثر گذر زمان ثابت هستند: زمان هیچ تأثیری بر روی درجه عدم قطعیت ندارد. راه حل تحت آگاهی کامل از رویدادهای آتی است و انتظار می رود، ارزیابی واقعی را انجام داده و نتایج صحیح و بهینه‌ای را ارائه دهد [17]، [54]، [73].

B. به‌روزرسانی اطلاعات به صورت مداوم

به‌روزرسانی اطلاعات می‌تواند مستمر باشد (در شکل 5 نشان داده شده است) یا می‌تواند غیر مستمر باشد. با توجه به رفتار فعلی سیستم، اطلاعات ممکن است در زمانی که یک قطار از مرز مشخص و یا یک نقطه مرجعی عبور می‌کند، نیمه مستمر تغییر کنند (مثل موقعیت و سرعت قطار [59]). یک نوع از اطلاعات ناکامل در آینده نیز می‌توانند در شرح احتمالاتی تأثیرگذارند (به عنوان مثال، سری زمانی ثبت‌شده از زمان در حال اجرا).

برای رویدادی که در آینده نزدیک رخ می‌دهد، فرض می‌کنیم که احتمال زمان رخداد آن توسط وضعیت جاری شبکه تأثیر می‌گیرد. برای مثال، قطاری که در منطقه کنترل همسایه شروع به حرکت می‌کند، دارای احتمال تأخیری است که تقریباً شناخته‌شده است و به وضعیت سایر قطارهای حاضر در مسیر بستگی دارد. بنابراین می‌توان با داشتن چنین اطلاعاتی، به قابلیت اطمینان بالایی در روش‌های مدیریت ترافیک دست یافت. به هر حال، می‌توانیم مواردی را که فرکانس به‌روزرسانی اطلاعات بالا است را نیز در نظر بگیریم.



شکل 6. مراحل اطلاعات گسسته

C. به‌روزرسانی اطلاعات گسسته

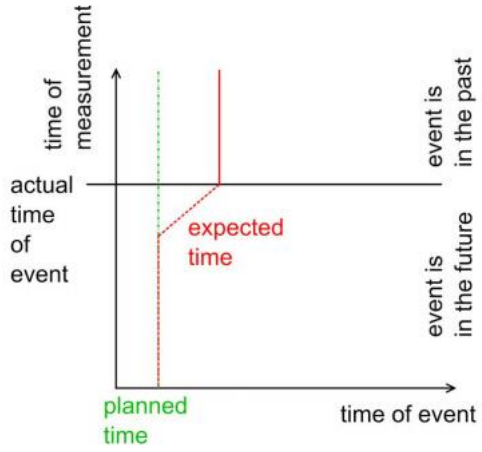
زمانی که تنظیمات حلقه بسته بررسی می‌گردند، زمان‌بندی مجدد پویای آنلاین در موفقیت بهینه‌سازی و کنترل تأثیر خواهد داشت. برای روش‌هایی که به‌روزرسانی عملیاتی را در فواصل زمانی ثابت دنبال می‌کنند، راه‌اندازی روش‌های

حلقه بسته [9]، [18] مد نظر خواهد بود. این مسائل در شکل 6 نشان داده‌شده‌اند. فواصل زمانی به‌روزرسانی اطلاعات قطار در این روش، حدود 10 دقیقه ([66]، توالی قطارها [59]) تا 1 دقیقه است [9]. پیش‌بینی ممکن است از 30 دقیقه بعدی تا 1 ساعت بعدی باشد [66] و یا ممکن است تا 3 ساعت را نیز پشتیبانی کند [23]. یک راه‌کار متفاوت در مدیریت ترافیک، به رویدادهای پیش‌بینی‌شده و به‌روزرسانی‌های ارائه‌شده متکی است که در اغلب راه‌کارها مورد بررسی قرار می‌گیرد (مثل [44]). همچنین اطلاعات می‌توانند با روال بهینه‌سازی یکسانی در فواصل زمانی ثابت به اشتراک گذاشته شوند [64].

D. نبود اطلاعات در مورد آینده

اغلب روش‌ها از آنچه که در آینده ممکن است رخ دهد، غفلت می‌کنند. مثل انتظار در رخداد رویدادی برای دخالت دادن آن تا زمانی که آن واقعاً رخ دهد. بنابراین، زمان واقعی در زمان رخداد حوادث، قابل بررسی است و نیازی به پیش‌بینی ندارد. اما انتظار تا زمان رخداد حوادث، زمان محاسباتی را به تأخیر می‌اندازد و بهتر است از پیشگویی قبل از رخداد برای بهبود مدیریت ترافیک استفاده کنیم. این مسائل در شکل 7 نشان داده‌شده‌اند. در این شکل نشان داده شده است که بسیاری از تصمیمات بر اساس وضعیت فعلی شبکه [44] اتخاذ می‌گردند و به آینده پیش رو توجه زیادی ندارند [29].

بسیاری از قوانین شامل (سرویس‌دهی به فردی که زودتر رسیده) (FCFS) در [16] بررسی‌شده است و روش‌های توزیع‌شده [43]، [52]، [53]، [55]، [74] صرفاً پیش‌گویی را در مدیریت ترافیک مد نظر قرار می‌دهند. این روش‌ها صرفاً طبیعت پویای شبکه را مد نظر قرار می‌دهند (مثل راه‌کارهایی که صرفاً بر اساس زمان حاضر و نه تکامل آینده انجام می‌شوند). تمام روش‌هایی که در زمان واقعی انجام می‌شوند، می‌توانند در این طبقه‌بندی قرار گیرند. زیرا آن‌ها صرفاً از دانش حاضر و واقعی برای مدیریت ترافیک استفاده می‌کنند [5]، [28]، [57]، [59].



شکل 7. نبود اطلاعات در مورد آینده

4. مدل‌سازی ریاضی

ما در حال حاضر مدل های ریاضی را بررسی می‌کنیم. ساختار مسئله می‌تواند به راحتی به یک دنباله از عملیات از پشت سر هم رخ می‌دهند، نگاشت شود (مثل توقف پس از رسیدن به هر ایستگاه) یا عملیاتی که در کنار یکدیگر رخ می‌دهند (مثل حرکت یک قطار در زمان توقف قطار دیگر در یک ایستگاه یکسان) [37]. تمامی مدل ها محدودیت‌های خطی را بر اساس وقایع گسسته بررسی می‌کنند. به عنوان مثال،زمان مربوط به عملیات شناسایی و درک رویدادهایی که وضعیت متغیرها را تغییر می‌دهند. اغلب روش‌های بهینه‌سازی دارای ساختار ریاضی خطی هستند. آن‌ها قادر به آدرس‌دهی محدودیت‌ها و توابع هدف در شکل خطی هستند (شامل [9]، [16]، [57]، [60]، [66]، [73]). این ساختارها را می‌توان در نموداری به صورت گراف نمایش داد و مجموعه محدودیت‌ها و عملیات مربوط به آن را (عمل حداکثر، جمع) نیز به عملیات اضافه نمود [34]، [73]. در نهایت، نمودار جایگزین [58]، خواهد توانست از محدودیت‌ها و متغیرهای برنامه‌ریزی استفاده نماید.

A. مدل‌سازی زمان و ظرفیت

با توجه به رویکردهای زمانی، بسیاری از روش‌ها از متغیرهای زمانی پیوسته استفاده می‌کنند. احتمال دیگر این است که از متغیرهای زمانی نیز می‌توانند استفاده کنند: مشکل این است که مجموعه‌ی محدودی از متغیرها و محدودیت‌ها

را در نظر می‌گیرند (اغلب به صورت گسسته) [9]، [38]، [61]. این مقاله اجازه می‌دهد تا پیچیدگی دامنه متغیرها تا حد زیادی برای انتخاب زمان مناسب کاهش یابد. اغلب حل کنندگان و مسئولین جداول زمانی آفلاین از این روش استفاده می‌کنند.

زمانی که مدل‌سازی ظرفیت زیرساخت شبکه مد نظر قرار گیرد، راه‌کار استفاده‌شده [37] متفاوت از روش‌های بهینه‌سازی آفلاین خواهد بود. این واقعیت منجر به دو فرمول‌بندی شناخته‌شده برای مدل‌سازی توالی حرکت قطارها و امنیت آن‌ها می‌گردد. اگر متغیرها در هر توالی دلخواهی باشند، محدودیت‌ها متفاوت خواهند بود. مثل متغیرهایی که از عملگر منطقی "OR" بین دو قطار استفاده می‌کند. این نیازمندی‌ها، از یک سو و نیاز به شناسایی وضعیت قطارها از سوی دیگر باعث می‌شود که تمام محدودیت‌های ممکن در نظر گرفته شوند. زمانی که تمام محدودیت‌ها را در نظر می‌گیریم، فرموله بندی مسئله و محدودیت‌ها پیچیده شده و به طبع حل چنین مسائلی نیز دارای مشکلات حاصل خود خواهد بود. برخی از قطارها را ممکن است نتوان بر روی ریل فرستاد و یا از تمام ظرفیت آن‌ها استفاده کرد [6]، [61]، [66].

B. اهداف

هدف مدیریت ترافیک راه‌آهن، بهبود کارایی ترافیک در حال اجرا است. مدل های شبیه‌سازی سعی می‌کنند تا جریان زندگی واقعی را تکرار کنند تا بتوانند تصمیمات صحیحی را در رویارویی با حوادث واقعی بگیرند [12]، [14]، [34]، [44]، [70]. روش‌های هیوریستیک که باهدف کمینه کردن توابع هدف ارائه‌شده‌اند [4]، [25]، [29]، [41]، [59]، [69]، [71] منجر به کاهش شاخص عملکرد در برخی از تصمیم‌گیری‌ها می‌گردند (مانند تأخیر). به طور کلی، اطلاعات کمی درباره کیفیت راه‌حل‌های ارائه‌شده وجود ندارد.

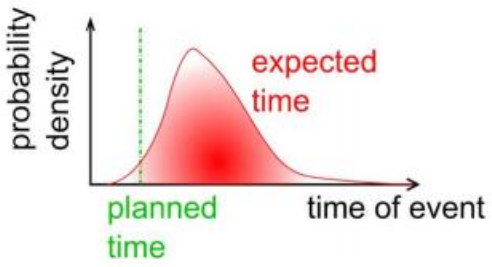
مدل های بهینه‌سازی ریاضی، توابع هدف خوبی را ایجاد می‌کنند. توابع مربوط به تأخیر دارای میانگین یا بیشینه تأخیر مورد انتظار یا پیش‌بینی‌شده توسط قطارهای یک شبکه در ترافیک راه‌آهن هستند [16]، [66]. برخی از روش‌ها از تعداد و زمان سفر مسافران قطار نیز به عنوان محدودیت‌هایی استفاده می‌کنند [71]. سایر توابع هدف [3]، [30]

شامل کمینه کردن عملیات بازیابی و بیشینه کردن دقت برنامه‌ریزی انجام‌شده [6]، [60] و یا کمینه کردن هزینه جاری و یا صرف انرژی کمتر [1]، [2]، [22]، [39]، [51] هستند. روش‌هایی که عملیات را شبیه‌سازی می‌کنند یا از قوانین و هیوریستیک هایی استفاده می‌کنند، هیچ تابع هدف صریحی ندارند. بلکه از توابع هدف شبیه‌سازی شده استفاده می‌کنند. روش‌های حلقه بسته یا time-decomposed از توابع هدف برای هر زیر توالی استفاده می‌کنند [23]، [66].

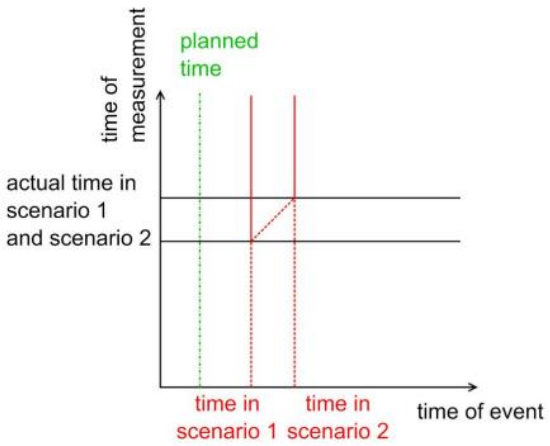
بنابراین فرموله بندی باید با تصمیمات گرفته‌شده با گذشت زمان همزمان باشند. تنها FCFS را می‌توان در این مورد در نظر گرفت [16].

C. درجه اکتشافی بودن

اغلب روش‌ها با مقادیر قطعی کار می‌کنند و اگر با توزیع تصادفی همراه شوند، روش مونت‌کارلو را دنبال می‌کنند. مثلاً، آن‌ها یک مجموعه بزرگ از رفتار تجربی را مدنظر قرار می‌دهند و از آن‌ها برای پیش‌بینی رفتار آتی همان طور که در شکل 2-5 نشان داده شده است، استفاده می‌کنند.



شکل 8. توزیع احتمال پیوسته



شکل 9. احتمال زمان رویدادها بر اساس دو سناریو(1 و 2)

به عبارت دیگر، روش‌های تصادفی، متغیرها را به عنوان توزیع احتمال مدل‌سازی می‌کنند (احتمال توزیع مستمر در شکل 8 نشان داده شده است).

برای مثال، الگوریتم‌های انتشار تأخیر [34]، زمان مسافرت قطارهایی را که موجب رخداد آسیب در شبکه و اختلالات برنامه‌ریزی می‌گردند را بررسی می‌کنند. سپس، آن‌ها نیاز به ارزیابی متغیرهایی برای تعیین زمان توزیع رویدادها دارند. مدل های کاملا تصادفی، در عمل کاربردهای محدودی دارند و در عین حال پیچیدگی محاسباتی بالایی نیز دارند. در حقیقت، روش‌های بهینه‌سازی نیاز به ارزیابی تنظیمات اولیه و تغییر آن‌ها در صورت نیاز دارند. زمان‌بندی مجدد نیازی به بهینه‌سازی متغیرهای تصادفی و تجمعی ندارد. به همین دلیل، تنها راه کار زمان‌بندی مجدد که از مقادیر هدف اجتناب می‌کند، راه کار [5] است. در غیر این صورت، یک متغیر تصادفی منفرد () که توسط by Meng and Zhou [60] ارائه‌شده است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. معرفی برنامه نویسی تصادفی تکامل یافته برای مقابله با ترافیک راه‌آهن و مدیریت آن بسیار مفید است. برای راه‌کارهای آنلاین مدیریت ترافیک مثل آنچه که در این مقاله بررسی گردید، تأخیر و سایر متغیرهایی که موجب عدم قطعیت در سراسر مراحل می‌گردند، بسیار ضروری است و در نتیجه مدیریت ترافیک تأثیر فراوانی خواهد داشت.

در مقابل، روش‌های مبتنی بر مجموعه کوچکی از متغیرها، دارای نتایج قابل‌اعتمادی منتها تا یک مدت زمان کمتری می‌باشند [13]، [60] که در شکل 9 نشان داده شده است [64].

فرایند راه حل مربوط به این مسائل، که در آن یک راه حل تولید می‌شود، از ساختار ترکیبی برنامه‌ریزی خطی استفاده کرده‌اند [6]، [7]، [9]، [38]، [57]، [61]، [64]، [66]، [71]، [73]، [78]، [4]، [15]، [16]، [20]، [22]، [23]، [43]، [44]، [56]، [59]، [62]، [69]، [74]، [79]. مدلهای ریاضی ممکن است نیاز به زمان زیادی (غیرقابل‌قبول برای مشکلات زمان واقعی) حتی برای یک مشکل کوچک تقریبی، برای به دست آوردن راه حل بهینه داشته باشند [37].

D. جزئیات و طرح زیرساخت

جزئیات بررسی‌شده می‌توانند بخش‌هایی از مسیر، تغییرات و جابجایی‌ها و تأثیر آن‌ها بر روی سیستم ایمنی مدل سازی کنند [16]، [18]، [44]، [66] و یا صرفاً این موارد را با همدیگر ادغام کنند تا به راحتی نقاط عبور مختلف و برنامه‌ریزی ترافیک را با منابعی با ظرفیت محدود انجام دهند [25]، [26]، [29]، [38]، [41]، [49]، [57]، [60]، [62]، [71]. ساده ترین مدل های مدیریت ترافیک، ایستگاه ها و منابع با ظرفیت نامحدود را در نشر می گیرند، تا بتوانند مشکلات جداول زمانی را با زمان‌بندی مجدد حل کنند. در نتیجه با مدل سازی جزئیات، موارد تست می‌توانند به سهولت انجام گیرند (به عنوان مثال، [18]، [22]، [23]، [38]، [41]، [44]، [59]، [60]، [69]، [71]، [73]، [74]، [81]).

طرح‌ها و جزئیات این مدل به شکل زیر است:

1) مسیر منفرد، اگر قطارها نیاز به توقف و یا عبور از منطقه‌ای را داشته باشند و این منطقه تنگنا بوده و بخش قابل‌توجهی از شبکه باشد.

2) مسیر دوتایی، شایع‌ترین مورد که از دو مسیر جداگانه و موازی استفاده می‌کند.

3) مسیر تک جهته، اگر قطارها به سمت مقصد یکسانی در حرکت باشند.

4) مسیر دو جهته، اگر قطارها در هر دو جهت از مسیر شبکه حرکت کنند.

5) عبور می‌تواند زمانی اتفاق بیفتد که قطارها در جهت‌های مختلفی از هم عبور کنند، مثلاً در یک ایستگاه.

بسیاری از روش‌ها از نوع تک مسیری استفاده می‌کنند. برخی دیگر بر روی شبکه‌هایی با مسیر منفرد دو جهته و مسیر دو جهته غیرمستقیم تمرکز دارند [6]، [61]، [62]، [71]، [78]. مدل‌سازی پیچیدگی دارای دو جنبه است: 1) از خط به شبکه که نیاز به مدل‌سازی تداوم مسیریابی وسایل نقلیه دارد [61]، [62]. 2) از یک مسیر منفرد تا شبکه که در آن نیاز به مدل‌سازی مسیرهای منفرد و بخش‌های دو طرفه داریم. در جنبه دوم، بخش‌های دو جهته از مسیر، می‌توانند به عنوان یک مسیر تک جهته در نظر گرفته شوند تا پیچیدگی‌های اضافی و زمان محاسبه کاهش یابد.

روش‌های قبلی نشان می‌دهند که اگر چه هر مطالعه‌ای از آزمایش‌هایی استفاده می‌کند، اما روش پیشنهادی از ورودی خط آهن و شبکه قطارها به عنوان ورودی استفاده می‌کند. اختلالات ورودی یکی از مشکلات اصلی محققان است که به دلیل محرمانه بودن این اطلاعات، اغلب آن‌ها در اختیار افراد تست کننده قرار نمی‌گیرند [30].

5. ارتباط با مسائل دیگر راه‌آهن

برخی از مسائل مرتبط با راه‌آهن با مشکل تغییر زمان و برنامه‌ریزی تأخیر وابسته هستند. ما به طور خلاصه در مورد چگونگی حل این مشکلات به صورت آنلاین پویا بحث می‌کنیم.

به‌روزرسانی یک جدول زمانی راه‌آهن از حالت آفلاین به حالت آنلاین نیاز به زمان‌بندی مجدد ترافیک دارد. در حقیقت، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی مجدد نیاز به یافتن مسائل و زیر مسائلی دارد که می‌توان برای حل آن‌ها از راه‌کارهایی مثل زمان‌بندی مجدد rolling stock ، زمان‌بندی مجدد crew و زمان‌بندی مجدد مبتنی بر ایستگاه که مکان انتقال مسافران را از مکانی به مکانی دیگر تعیین می‌کنند، استفاده کرد.

A. زمان‌بندی Crew

هیچ قطاری بدون توجه راننده نمی‌تواند تغییر مسیر و تغییر جهت انجام دهد. مسئله زمان‌بندی مجدد Crew واگذار کردن افراد به قطارها است به طوری که تمام سرویس های برنامه‌ریزی شده را بتوان با کمترین هزینه انجام داد. وقتی حوزه چندین کیلومتری و چند ساعتی از یک شبکه راه‌آهن مشخص و قابل پیشگویی باشد، اغلب روش‌های متداول را

می‌توان برای مدیریت ترافیک به کار برد. مشکل زمانی پیچیده می گردد که پرسنل بخواهند پس از اتمام شیفت کار یخود، قطار را در نزدیک ترین مسیر به مکان زندگی خود تغییر مسیر دهند و تأخیر زیادی ممکن است در این حالت برای آن‌ها ایجاد گردد، چه در حالتی که بدون قطار بخواهند به محل خود بروند و چه در صورتی که بخواهند روز بعد با قطار به مکان اولیه خود بیایند. علاوه بر این، در طول اختلالات، گردش وسایل نقلیه باید به درستی تنظیم گردد و مسیرها باید برای حرکت وسایل نقلیه آمادگی داشته باشند. برای جزئیات بیشتر به [36] مراجعه کنید. اغلب روش‌ها با مسئله rolling stock circulation در حالت آفلاین روبرو هستند. مثل زمانی که دانش کاملی از مدت زمان اختلال و موقعیت وسایل نقلیه در دسترس است. Nielsen et al. [64] روشی را با نام rolling horizon ارائه کرده‌اند که روابط متقابل بین پیش گویی و رویدادهای واقعی را نشان می‌دهد. به طور خاص، تاثیر به روز رسانی ها در زمان رخداد اختلال بسیار مهم و قابل توجه است. Jespersen-Groth and Clausen [46]، با مسئله رزور خطوطی برای احتمال آسیب آتی موافقت کردند. [3] روشی را برای بررسی مسافران و مدل شبکه برای حل کردن مسئله زمان‌بندی مجدد ارائه کرده است. آن‌ها پیشنهاد کردند که روش‌های بهینه‌سازی باید بتوانند trade off ای را بین طول سفر مسافران و تعداد و برنامه‌ریزی زمان‌بندی ایجاد کنند.

B. زمان‌بندی Rolling Stock

به طور مشابه، هیچ سرویسی را نمی‌توان بدون وجود یک وسیله نقلیه قطار ارائه کرد. زمان‌بندی Rolling stock، یک وسیله نقلیه قطار را به ازای هر سرویس در نظر می‌گیرد و اختصاص می‌دهد. وسایل نقلیه یدکی به ندرت استفاده می‌شوند، زیرا هزینه‌های بالایی را نیاز دارند. در نتیجه، در صورت وجود تأخیر در وسایل نقلیه، می‌توان تا حد زیادی از زمان و مکان آن‌ها مطلع گردید. مدل های فعلی معمولاً از توصیف زیرساخت برای تنظیم روش‌های بهینه‌سازی و مدیریت ترافیک استفاده می‌کنند. برای اطلاعات بیشتر به [7] و [37] مراجعه کنید.

C. مدیریت تأخیر

در نهایت، مسئله مدیریت تأخیر مرتبط است با تصمیم‌گیری در مورد اینکه کدام اتصالات باید نگه داشته شوند و کدام‌ها باید حذف گردند یا کاهش داده شوند [32]، [33]. برای دریافت جزئیات بیشتر به [26] مراجعه کنید. این مسئله به صورت آنلاین است و مثلاً، تأخیر قابل انتظار از دو قطار که به سمت دیگر در حرکت‌اند. به هر حال، بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی متمرکز دارای مشکل مدیریت تأخیر هستند. بحران موجود در بررسی عملکرد اکتشافی و روش‌های مختلف، در مطالعه [50] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، ظرفیت زیرساخت نادیده گرفته می‌شود و صرفاً اطلاعات مربوط به تأخیرهای اولیه (بدون پیش آگاهی) ثبت می‌شوند. Gatto et al. [32]، روشی تئوری را برای تجزیه و تحلیل نظری با اطلاعات محدود برای برنامه‌ریزی ترافیک ارائه کرده‌اند. Bauer and Schöbel [4]، قوانین ساده‌ای را ارائه کردند که می‌تواند نتیجه برنامه‌ریزی را به صورت آفلاین و پویا ارائه نماید.

D. بحث

اغلب روش‌ها مشکلات مربوط به حالات آبشاری و تا خیراتی را که به صورت آبشاری بر روی سایر قطارها تاثیر دارند در نظر می گیرند. به عنوان مثال، حل یکی از آن‌ها بر اساس ترکیب راه‌حل‌های پایه ای است که دارای مشکلاتی است. این روش‌ها غالباً در عمل و در تحقیقات دانشگاهی استفاده می‌شوند و نیاز به سطوح متفاوتی از جزئیات دارند: زمان‌بندی مجدد دارای دقتی در حدود چند ثانیه تا چند ساعت است. به طوری که روش‌های rolling stock و Crew بهتر هستند و می‌توانند تا چند دقیقه یا چند روز را برنامه‌ریزی کنند. مشکل اصلی این روش‌های متوالی این است که محدودیت‌های زیر مسائل متفاوت از هم هستند و باید به صورت جداگانه بررسی گردند.

روش‌های کمتری قادر به حل مسائلی با بیش از دو محدودیت هستند. برای مثال، مدیریت تأخیر و زمان‌بندی مجدد مسیر قطارها [27]. زمان‌بندی rolling stock and crew در [36] و [40] بررسی شده‌اند. چنین روش‌های شبیه‌سازی شده برای حل مسائل کلی بهینه هستند و پاسخ‌های بهینه‌ای را تولید می‌کنند.

6. نتیجه‌گیری

این مقاله اغلب روش‌های آنلاین (مثل تنوع عملیات مرتبط)و پویا (مثل بررسی زمان تکامل با داشتن دانش کم) در برنامه‌ریزی ترافیک راه‌آهن را مورد بررسی قرارداد. ما روش‌هایی را برای مسئله ترافیک راه‌آهن و زمان‌بندی آن با استفاده از اطلاعات ناقص و کامل بررسی کردیم. نتیجه تجزیه و تحلیل ارائه‌شده نشان می‌دهد که برخی از مشکلات همچنان به صورت مسئله باز باقی مانده‌اند که بهتر است در آینده بررسی گردند: یکپارچه‌سازی مشکلات مختلف، تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان، تعیین بهترین تأخیر و انتشار تأخیر و پیش آگاهی از رخداد تأخیر و دریافت مشکلات مرتبط دیگر برای مسافران.

محققان عملیات راه‌آهن از روش‌های آفلاین و الگوریتم‌های مدل‌سازی شده توسط ریاضیات بهره می‌برند [52]. بسیاری از چالش‌ها همچنان برای تحقیقات آتی نگه داشته شده‌اند:

1) بسیاری از روش‌های تحقیقاتی موجود تمایل به استفاده از بهینگی جهانی با در نظر گرفتن محدودیت‌های اضافی را دارند. در واقع توجه به دانش آینده به تنهایی، اطلاعات خوبی برای بهینه‌سازی روش (که اطلاعات می‌توانند به صورت ناقص و یا کامل جمع‌آوری گردند) هستند. این اطلاعات دارای مشکلاتی هستند: برنامه‌های انجام‌شده نیاز به برنامه‌ریزی مجدد بر اساس مسیر قطارها و ظرفیت هر یک از آن‌ها دارند. به طور کلی مسیرهای انتخاب‌شده برای هر قطار به طور کلی به وضعیت جاری قطار، سرعت، تعداد مسافران، تعداد و زمان توقف و موارد دیگر بستگی دارد (به عنوان مثال [15] را ببینید). علاوه بر این، امکان شدنی بودن هر یک از راه‌حل‌های ارائه‌شده در سطح میکروسکوپی باید بررسی گردند. زیرا هیچ‌گونه خطایی در چنین برنامه‌ریزی‌هایی قابل جبران نخواهد بود.

2) به منظور ارائه راه‌حلی بهینه در مناطقی که به توزیع امکانات نیاز دارند (مثل مدیریت ترافیک راه‌آهن)، برخی از تحقیقات از روش‌های ترکیبی برای شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند (برای جزئیات بیشتر [27] و [52] را ببینید). با چنین رویکردی، یکی از اولین راه حل‌ها برای توزیع امکانات، استفاده از مدل های ریاضی و ابتکاری در مقیاس بزرگ در حد شبکه راه‌آهن است. سپس تمامی نیازمندی‌ها باید بررسی گردند تا تنگناهای احتمالی شناسایی گردند.

3) هدف مطالعات اخیر، حل مشکل تغییر زمان به صورت بهینه برای داشتن برنامه ترافیک بدون رخداد آسیب و خطا در حین اجرا است. بدین منظور، الگوریتم‌ها و روش‌هایی مثل [23] و [81] ارائه‌شده‌اند. اما این الگوریتم‌ها محدود به نظر می‌رسند زیرا صرفاً می‌توانند یک نوع از مسیرهای تک جهته یا دو جهته را بررسی کنند و در آن‌ها مسیرها باید "متقابلاً منحصربه‌فرد فرد" باشند. این مشکلات برای تعریف روش‌های جدید و نیاز به راه‌کارهای جدید کافی است.

4) آزمون‌هایی برای ارزیابی و مقایسه مدل ها و رویکردها مورد نیاز است. این موارد منجر به بررسی محدودیت‌های تکرارشونده‌ای می‌شوند که تا کنون در روش‌های ارائه‌شده مورد بررسی قرار نگرفته است. زیرا معمولاً محدودیت‌های تکرارشونده منجر به عدم اطمینان در جریان داده‌ها می‌گردند. استقرار سیستم های پیشرفته (مثل کنترل قطار اروپا) کیفیت بالایی را در زمان واقعی برای تغییر زمان فراهم می‌کند.

5) اگر هدف ارائه روشی برای استفاده عملی از زمان‌بندی در زمان واقعی و با در نظر گرفتن انتشار تأخیر باشد، راه‌کارهای موجود ممکن است در زمان واقعی و به صورت آنلاین پاسخگو نباشند (برای مثال [80] را ببینید). علاوه بر این، افزایش تلاش در جمع‌آوری و حفظ داده‌ها نیاز به استفاده از روش‌های هوشمند جمع‌آوری داده دارند.

6) روش‌هایی که برای مدیریت ترافیک راه‌آهن تا کنون ارائه‌شده‌اند، از اطلاعات قطعی استفاده می‌کنند. درحالی‌که معمولاً در واقعیت اطلاعات غیرقطعی هستند و نیاز به پیش آگاهی از وضعیت آینده دارند (به عنوان مثال [28] را ببینید).

7) تا کنون، روش‌های خودکار مدیریت ترافیک در بسیاری از سیستم های کنترل ترافیک استفاده شده است. با این حال، این سیستم ها اساس دارای تجسم اطلاعات آتی و یا مدیریت سیستم های اطلاعاتی نیستند. بنابراین توابع اصلی که معمولاً باید برای مدیریت مورد استفاده قرار گیرند، به حوادث آتی بستگی دارند و باید همواره حوادث آتی پیش‌بینی گردند.

برخی از این چالش‌ها در دانشگاه‌ها و تحقیقات دانشگاهی به عنوان پروژه‌های تحقیقاتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و پروژه‌های اخیر در [82] و [65] نشان داده شده است. با این وجود امکان وجود تحقیقات بیشتر نیز وجود دارد.

REFERENCES

[1] A. R. Albrecht, D. M. Panton, and D. H. Lee, "Rescheduling rail networks with maintenance disruptions using problem space search," Comput. Oper. Res., vol. 40, no. 3, pp. 703–712, Mar. 2013.

[2] T. Albrecht, A. Binder, and C. Gassel, "An overview on real-time speed control in rail-bound public transportation systems," in Proc. 2nd Int. Conf. Models Technol. ITS, Leuven, Belgium, 2011, pp. 1–4.

[3] M. Almodóvar and R. García-Ródenas, "On-line reschedule optimization for passenger railways in case of emergencies," Comput. Oper. Res., vol. 40, no. 3, pp. 725–736, Mar. 2013.

[4] R. Bauer and A. Schöbel, "Rules of thumb: Practical online-strategies for delay management," Public Transp., vol. 6, no. 1/2, pp. 85–105, Jan. 2014.

[5] A. Berger, A. Gebhardt, M. Müller-Hannemann, and M. Ostrowski, "Stochastic delay prediction in large train networks," in Proc. 11th Workshop Algorithmic Approaches Transp. Modelling, Optim., Syst., Saarbrücken, Germany, 2011, pp. 1–12.

[6] M. Boccia, C. Mannino, and I. Vasliyev, "The dispatching problem on multitrack territories: Heuristic approaches based on mixed integer linear programming," Networks, vol. 62, no. 4, pp. 315–326, Dec. 2013.

[7] G. Budai, G. Maróti, R. Dekker, D. Huisman, and L. G. Kroon, "Rescheduling in passenger railways: The rolling stock rebalancing problem," J. Scheduling, vol. 13, no. 3, pp. 281–297, Jun. 2010.

[8] T. Buker and E. Wendler, "Defining efficient modelling of delay distribution functions," in Proc. 3rd Int. Conf. Railway Oper. Modelling Anal. RailZurich, Zurich, Switzerland, 2009, pp. 1–21.

[9] G. Caimi, M. Fuchsberger, M. Laumanns, and M. Lüthi, "A model predictive control approach for discrete-time rescheduling in complex, central railway station areas," Comput. Oper. Res., vol. 39, no. 11, pp. 2578–2593, Nov. 2012.

[10] M. Carey, "Optimizing scheduled times, allowing for behavioral response," Transp. Res. B, Methodol., vol. 32, no. 5, pp. 329–342, Jun. 1998.

[11] M. Carey and A. Kwiecinski, "Stochastic approximation to the effects of headways on knock-on delays of trains," Transp. Res. B, Methodol., vol. 28, no. 4, pp. 251–267, Aug. 1994.

[12] Y. Cheng, "Hybrid simulation for resolving resource conflicts in train traffic rescheduling," Comput. Ind., vol. 35, no. 3, pp. 233–246, Apr. 1998.

[13] S. Cicerone, G. D. Stefano, M. Schachtebeck, and A. Schöbel, "Dynamic algorithms for recoverable robustness problems," in Proc. 8th Workshop Algorithmic Approaches Transp. Modeling, Optim., Syst., Dagstuhl, Germany, 2008, pp. 1–20.

[14] J. F. Cordeau, P. Toth, and D. Vigo, "A survey of optimization models for train routing and scheduling," Transp. Sci., vol. 32, no. 4, pp. 380–404, Nov. 1998.

[15] F. Corman, A. D'Ariano, D. Pacciarelli, and M. Pranzo, "Optimal interarea coordination of train rescheduling decisions," Transp. Res. E, Logist.Transp. Rev., vol. 48, no. 1, pp. 71–88, Jan. 2012.

[16] F. Corman, A. D'Ariano, M. Pranzo, and I. A. Hansen, "Effectiveness of dynamic reordering and rerouting of trains in a complicated and densely occupied station area," Transp. Planning Technol., vol. 34, no. 4, pp. 341– 362, May 2011.

[17] F. Corman, A. D'Ariano, G. Longo, and G. Medeossi, "Robustness and delay reduction of advanced train dispatching solutions under disturbances," in Proc. 12th World Conf. Transp. Res., Lisboa, Portugal, 2010, pp. 1–12.

[18] F. Corman and E. Quaglietta, "Closing the loop in railway traffic management," in Proc. 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, USA, 2014, pp. 1–17.

[19] F. Corman, A. D'Ariano, and I. A. Hansen, "Evaluating disturbance robustness of railway schedules," J. Intell. Transp. Syst., Technol., Planning, Oper., vol. 18, no. 1, pp. 106–120, Jan. 2014.

[20] F. Corman, A. D'Ariano, D. Pacciarelli, and M. Pranzo, "Evaluation of green wave policy in real-time rail traffic management," Transp. Res. C, Emerging Technol., vol. 17, no. 6, pp. 607–616, Dec. 2009.

[21] Y. P. Cui and H. Zhuang, "Analysis on differences of railway CTC system in China and foreign countries," (in Chinese), Railway Transp. Econom., vol. 35, no. 4, pp. 16–21, Apr. 2013.

[22] A. D'Ariano and T. Albrecht, "Running time re-optimization during realtime timetable perturbations," in WIT Transactions on the Built Environment, vol. 88. Southampton, U.K.: WIT Press, 2006, pp. 531–540.
[23] A. D'Ariano and M. Pranzo, "An advanced real-time train dispatching system for minimizing the propagation of delays in a dispatching area under severe disturbances," Netw. Spatial Econ., vol. 9, no. 1, pp. 63–84, Mar. 2009.
[24] T. Dewilde, P. Sels, P. Cattrysse, and P. Vanteenwegen, "Improving the robustness in railway station areas," Eur. J. Oper. Res., vol. 235, no. 1, pp. 276–286, May 2014.
[25] A. Diaz, M. O. Gonzalez, and P. Gonzalez-Torre, "On-line timetable rescheduling in regional train services," Transp. Res. B, Methodol., vol. 33, no. 6, pp. 387–398, Aug. 1999.
[26] T. Dollevoet, "Delay management and dispatching in railways," Ph.D. dissertation, Erasmus Univ. Rotterdam, Rotterdam, The Netherlands, 2013.
[27] T. Dollevoet, F. Corman, A. D'Ariano, and D. Huisman, "An iterative optimization framework for delay management and train scheduling," Flexible Serv. Manuf. J., pp. 1–26, DOI: 1007/510696-013-9187-2.
[28] U. Dolder, M. Krista, and M. Voelcker, "RCS—Rail Control System. Real-time train run simulation and conflict detection on a netwide scale based on updated train positions," in Proc. 3rd Int. Conf. Railway Oper. Modelling Anal. RailZurich, Zürich, Switzerland, 2009, pp. 1–15.
[29] M. J. Dorfman and J. Medanic, "Scheduling trains on a railway network using a discrete event model of railway traffic," Transp. Res. B, Methodol., vol. 38, no. 1, pp. 81–98, Jan. 2004.
[30] J. L. Espinosa-Aranda and R. García-Ródenas, "A demand-based weighted train delay approach for rescheduling railway networks in real time," J. Rail Transp. Planning Manage., vol. 3, no. 1/2, p. 1–13, Feb.–May 2013.
[31] W. Fang, J. Sun, X. Wu, and X. Yao, "Re-scheduling in railway networks," in Proc. 13th U.K. Workshop Comput. Intell., Guildford, U.K., 2013, pp. 342–352.
[32] M. Gatto, R. Jacob, L. Peeters, and P. Widmayer, "Online delay management on a single train line," in Proc. 4th Int. ATMOS Conf., Dagstuhl,Germany, 2004, pp. 306–320.
[33] L. D. Giovanni, G. Heilporn, and M. Labbé, "Optimization models for thedelay management problem in public transportation," Eur. J. Oper. Res.,vol. 189, no. 3, pp. 762–774, Sep. 2008.
[34] R. M. P. Goverde, "A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks," Transp. Res. C, Emerging Technol., vol. 18, no. 3,pp. 269–287, Jun. 2010.
[35] Q. Gu, X. Lu, and T. Tang, "Energy saving for automatic train control in moving block signaling system," in Proc. 14th Int. IEEE Conf. Intell.Transp. Syst., USA, 2011, pp. 1305–1310.
[36] K. Haase, G. Desaulniers, and J. Desrosiers, "Simultaneous vehicle and crew scheduling in urban mass transit systems," Transp. Sci., vol. 35, no. 3, pp. 286–303, Aug. 2001.
[37] I. A. Hansen and J. Pachl, Railway Timetable & Traffic. Hamburg, Germany: Eurailpress, 2008.
[38] S. Harrod, "Modeling network transition constraints with hypergraphs," Transp. Sci., vol. 45, no. 1, pp. 81–97, Feb. 2011.
[39] P. G. Howlett and P. Pudney, "Energy-efficient train control," in Advances in Industrial Control. London, U.K.: Springer-Verlag, 1995.
[40] D. Huisman and A. P. M. Wagelmans, "A solution approach for dynamic vehicle and crew scheduling," Eur. J. Oper. Res., vol. 172, no. 2, pp. 453–471, Jul. 2006.
[41] M. T. Isaai and N. P. Cassaigne, "Predictive and reactive approaches to the train-scheduling problem: A knowledge management perspective," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev., vol. 31, no. 4, pp. 476–484, Nov. 2001.
[42] Problem Description and Released Data set for Problem Solving Competition 2012, Informs-RAS (The Institute for Operations Research and the Management Sciences, Railway Applications Section), Catonsville, MD, USA, 2012. [Online]. Available: http:// www.informs.org/Community/RAS/Problem-Solving-Competition/2012-RAS-Problem-Solving-Competition

[43] R. V. Iyer and S. Ghosh, “DARYN-A distributed decision-making algorithm for railway networks: Modeling and simulation,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 44, no. 1, pp. 180–191, Feb. 1995.
[44] J. Jacobs, “Reducing delays by means of computer-aided ‘on-the-spot’ rescheduling,” in Computers in Railways IX. Southampton, U.K.: WIT Press, 2004.
[45] J. Jespersen-Groth et al., “Disruption management in passenger railway transportation,” in Lecture Notes in Computer Science, vol. 5868. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009, pp. 399–421.
[46] J. Jespersen-Groth and J. Clausen, “Optimal reinsertion of cancelled train lines,” Informat. Math. Modelling, Tech. Univ. Denmark, Lyngby, Denmark, 2006.
[47] A. Kauppi, J. Wikström, B. Sandblad, and A. W. Andersson, “Future train traffic control: Control by re-planning,” Cognit., Technol. Work, vol. 8, no. 1, pp. 50–56, Jan. 2006.
[48] P. Kecman and R. M. P. Goverde, “An online railway traffic prediction model,” in Proc. 5th Int. Conf. Railway Oper. Modelling Anal., Copenhagen, Denmark, 2013, pp. 448–467.
[49] M. B. Khan and X. Zhou, “Slack time allocation in robust double-track train timetabling applications,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 11, no. 1, pp. 81–89, Mar. 2010.
[50] N. Kliewer and L. Suhl, “A note on the online nature of the railway delay management problem,” Networks, vol. 57, no. 1, pp. 28–37, Mar. 2010.
[51] H. Ko, T. Koseki, and M. Miyatake, “Application of dynamic programming to optimization of running profile of a train,” in Computers in Railways IX. Southampton, U.K: WIT Press, 2004.
[52] L. G. Kroon et al., “The new Dutch timetable: The OR revolution,” Interfaces, vol. 39, no. 1, pp. 6–17, Jan./Feb. 2009.
[53] T. Kunifuji, H. Ito, Y. Saimi, and K. Mori, “A proposal of autonomous online expansion technology for real-time system and its application to railway signalling system,” in Proc. 10th Int. Symp. Auton. Decentralized Syst., 2011, pp. 73–80.
[54] R. Larsen, M. Pranzo, A. D’Ariano, D. Pacciarelli, and F. Corman, “Susceptibility of optimal train schedules to stochastic disturbances of process times,” Flexible Serv. Manuf. J., pp. 1–26, DOI: 10.1007/s10696-013-9187-2.
[55] T. S. Lee and S. Ghosh, “Stability of RYNSORD: A decentralized algorithm for railway networks under perturbation,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 50, no. 1, pp. 287–301, Jan. 2001.
[56] M. Luethi, “Improving the efficiency of heavily used railway networks through integrated real-time rescheduling,” Ph.D. dissertation, Eidgenoessische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Zürich, Switzerland, 2009, 18615.
[57] C. Mannino and A. Mascis, “Real-time traffic control in metro stations,” Oper. Res., vol. 57, no. 4, pp. 1026–1039, Jul./Aug. 2009.
[58] A. Mascis, D. Pacciarelli, and M. Pranzo, “Scheduling models for shortterm railway traffic optimization,” in Computer-aided Systems in Public Transport, vol. 600. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008, ser. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, pp. 71–90.
[59] M. Mazzarello and E. Ottaviani, “A traffic management system for real-time traffic optimization in railways,” Transp. Res. B, Methodol., vol. 41, no. 2, pp. 246–274, Feb. 2007.
[60] L. Meng and X. Zhou, “Robust single-track train dispatching model under a dynamic and stochastic environment: A scenario-based rolling horizon approach,” Transp. Res. B, Methodol., vol. 45, no. 7, pp. 1080–1102, Aug. 2011.
[61] L. Meng and X. Zhou, “Simultaneous train rerouting and rescheduling on an N-track network: A model reformulation with network-based cumulative flow variables,” Transp. Res. B, Methodol., vol. 67, pp. 208–234, Sep. 2014.
[62] S. Mu and M. Dessouky, “Scheduling freight trains traveling on complex networks,” Transp. Res. B, Methodol., vol. 45, no. 7, pp. 1103–1123, Aug. 2011.

[63] S. Narayanaswami and N. Rangaraj, “Scheduling and rescheduling of railway operations: A review and expository analysis,” Technol. Oper.Manage., vol. 2, no. 2, pp. 102–122, Dec. 2011.
[64] L. K. Nielsen, L. Kroon, and G. Maróti, “A rolling horizon approach for disruption management of railway rolling stock,” Eur. J. Oper. Res.,vol. 220, no. 2, pp. 496–509, Jul. 2012.
[65] ONTIME Consortium, Optimal Networks for Train Integration Management across Europe—ONTIME, 2013. [Online]. Available: http://www ontime-project.eu
[66] P. Pellegrini, G. Marlière, and J. Rodriguez, “Real time railway traffic management modeling track-circuits,” in Proc. 12th Workshop Algorithmic Approaches Transp. Modelling, Optim., Syst., Saarbrücken, Germany,2012, pp. 1–12.
[67] X. Rao, M. Montigel, and U. Weidmann, “Railway capacity optimization by integration of real-time rescheduling and automatic train operation,” in Proc. IT Rail, Zürich, Switzerland, 2013, pp. 1–12.
[68] E. Quaglietta, F. Corman, and R. M. P. Goverde, “Stability analysis of railway dispatching plans in a stochastic and dynamic environment,”J. Rail Transp. Planning Manage., vol. 3, no. 4, pp. 137–149,Nov. 2013.
[69] I. Sahin, “Railway traffic control and train scheduling based on intertrain conflict management,” Transp. Res. B, Methodol., vol. 33, no. 7, pp. 511–534, Sep. 1999.
[70] A. A. M. Schaafsma and M. M. G. P. Bartholomeus, “Dynamic traffic management in the schiphol bottleneck,” in Proc. 2nd Int. Conf. Railway Oper. Modelling Anal., Hannover, Germany, 2007, pp. 1–18.
[71] J. Törnquist, “Railway traffic disturbance management-An experimental analysis of disturbance complexity, management objectives and limitations in planning horizon,” Transp. Res. A, Pol. Pract., vol. 41, no. 3, pp. 249–266, Mar. 2007.
[72] S. Tschirner, A. W. Andersson, and B. Sandblad, “Improved railway service by shared traffic information,” in Proc. 1st IEEE Int. Conf. Intell.Rail Transp., Beijing, China, 2013, pp. 117–122.
[73] T. J. J. Van den Boom and B. De Schutter, “On a model predictive control algorithm for dynamic railway network,” in Proc. 2nd Int. Conf. Railway Oper. Modelling Anal., Hannover, Germany, 2007, pp. 1–16.
[74] G. Vernazza and R. Zunino, “A distributed intelligent methodology for railway traffic control,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 39, no. 3,pp. 263–270, Aug. 1990.
[75] M. Vromans, R. Dekker, and L. G. Kroon, “Reliability and heterogeneity of railway services,” Eur. J. Oper. Res., vol. 172, no. 2, pp. 647–665,Jul. 2006.
[76] P. Wang, Y. Zhou, J. Chen, Y. Wang, and P. Wu, “Real-time train scheduling and control based on model predictive control,” in Proc. 2nd WRI Global Congr. Intell. Syst., Wuhan, China, 2010, pp. 47–50.
[77] R. Wuest, F. Laube, S. Roos, and G. Caimi, “Sustainable global service intention as objective for controlling railway network operations in real time,” in Proc. 8th World Congr. Railway Res., Seoul, Korea, 2008, pp. 1–13.
[78] C. Yan and L. Yang, “Mixed-integer programming based approaches for the movement planner problem: Model, heuristics and decomposition,” INFORMS RAS Problem Solving Competition, Phoenix, AZ, USA, 2012, First Prize Winner.
[79] T. Yoko and T. Norio, “Robustness indices for train rescheduling,” in Proc. 1st Int. Conf. Railway Oper. Modelling Anal., Delft,The Netherlands, 2005, pp. 1–12.
[80] J. Yuan and I. A. Hansen, “Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays,” Transp. Res. B, Methodol., vol. 41, no. 2, pp. 202–217, Feb. 2007.
[81] X. Zhou and M. Zhong, “Single-track train timetabling with guaranteed optimality: Branch-and-bound algorithms with enhanced lower bounds,” Transp. Res. B, Methodol., vol. 41, no. 3, pp. 320–341, Mar. 2007.
[82] C. Zaroliagis, ARRIVAL Deliverable D7.3, 2009, Final Report.