

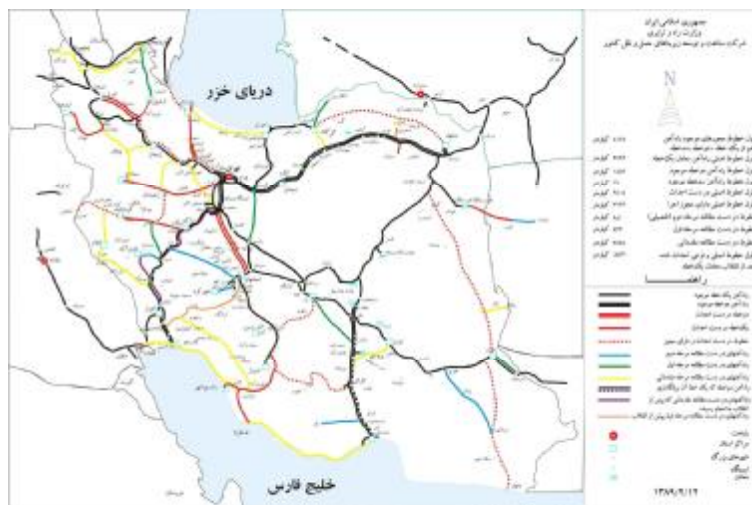
طراحی شبکه در سیستم های حمل و نقل:

سیستمهای حمل و نقل ریلی Railroad Transportation Systems

دانشگاه کردستان
دکتر قادری



وضعیت زیرساخت ریلی کشور



طرحهای راه آهن موجود ، در دست ساخت و مطالعه



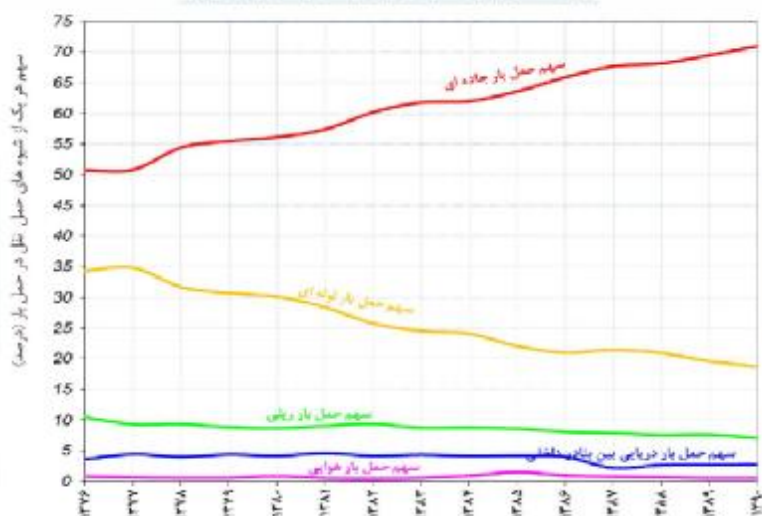
نگاه کلی بر وضعیت حمل و نقل ریلی کشور

وضعیت چگالی خطوط ریلی ایران در مقایسه با کشورهای همسایه و آسیا (۲۰۰۸)



3

وضعیت سهم هر یک از بخش های حمل و نقل در بخش بار



4

نگاه کلی بر وضعیت حمل و نقل ریلی کشور

▪ ارزش افزوده بخش حمل و نقل در سال ۱۳۸۸:

➤ بیشترین سهم: حمل و نقل جاده ای ۹۱٪

➤ کمترین سهم: حمل و نقل ریلی با ۱/۸٪

▪ در سال ۱۳۷۵ میزان بار جابجا شده جاده ای نسبت به ریل ۷ برابر بوده است

در حالی که این نسبت در سال ۱۳۸۸ به ۱۵ برابر افزایش یافته است!

▪ میزان بار جابجا شده ریلی و جاده ای در طول این سال ها به ترتیب ۳ و ۹

درصد رشد داشته است.

▪ تعداد واگن های باری (لکوموتیو) در سرویس در سال ۱۳۹۰: ۱۹۷۷۱ (۴۳۹ از

(۷۵۰

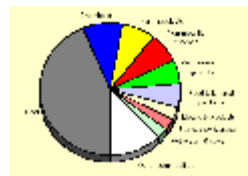
5

Overview of US Freight Railroads

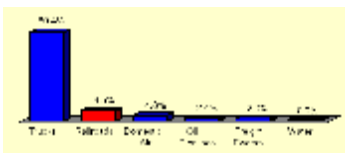
▪ US railroads carry about 30 million carloads per year.

▪ Total revenue: \$40 billion per year.

▪ Major goods transported:



▪ Intercity freight revenue:



6

The Railroad Network

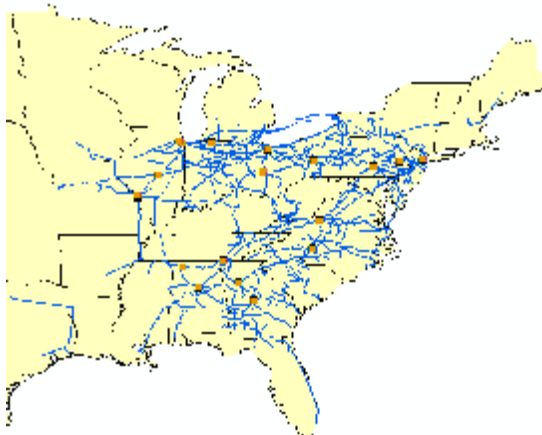
- A typical rail network spans 20,000 to 50,000 track miles.



7

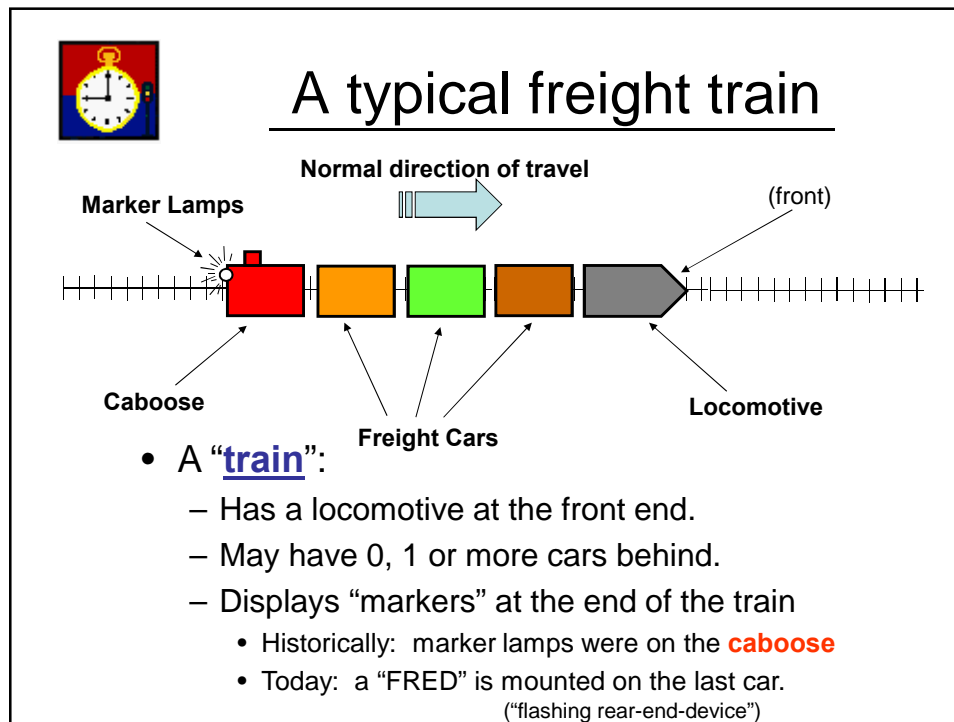
Role of Yards in Railroads

- Railroad yards act as hubs where cars change trains.



- Classification, Freight, Marshalling, Shunting, or Switching yards

8



YARD SWITCHING

- A Yard is a collection of parallel tracks.
- It is controlled by the Yardmaster.
- A Yard is used to:
 - receive an arriving train
 - break down cars in an arriving train
 - sort cars into groups going to next destinations.
 - make up a train going to a destination



- It is NOT used as “storage” for cars not in use.

What is a Railroad Switching Yard?

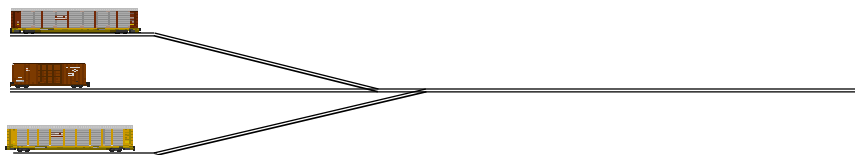
- A place where a diesel railroad locomotive that has seen its better days on the mainline is used for the assembly of trains.
- The “old” diesel railroad locomotive is used to attach and detach rail cars and position them in sequence to travel to different sites.
- Place where “switch” locomotives are left idling.



CN S4s 8193 and 8192 switch cars.



عملیات طبقه بندی در ایستگاه



A wagon spends two-thirds of its time in a marshalling yard



Wagon detention time represents blocked capital

Yard operations

عملیات های ایستگاه ریل

■ فعالیت های ایستگاه ریل:

- ورود قطار به ایستگاه و بازرسی آن
- طبقه بندی یا مرتب نمودن
- انتظار برای اتصال واگنها، لکوموتیو و ...
- مرتب نمودن یا مونتاژ قطار
- بازرسی خروجی و اعزام قطار

13

انواع مختلف ایستگاه ها

- طبقه بندی ایستگاه های راه آهن با توجه به اندازه، ساختار و منابع که بر روی تراکم (ترافیک) و تأخیر فرایند واگن بار در ایستگاه اثر می گذارند.

■ انواع ایستگاه ها

- Simple yard
- Single-ended flatyard
- Double-ended flatyard
- directional flatyard
- Hump yard

الگوی به بزرگی

14

انواع مختلف ایستگاه ها

Simple yard

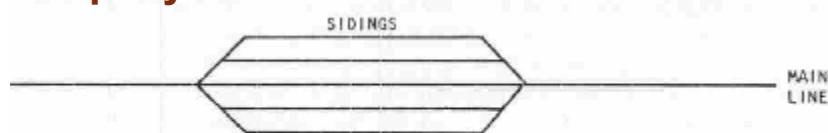


Fig. 1. Simple yard.

- اعزام گروه کوچکی از واگنها
- تأخیرات این گروه از ایستگاه ها بیشتر تأخیرات کاری ناشی از حرکت قطارها است.
- تغییرات خدمه
- اتصالات زمان بندی شده با سایر قطارها

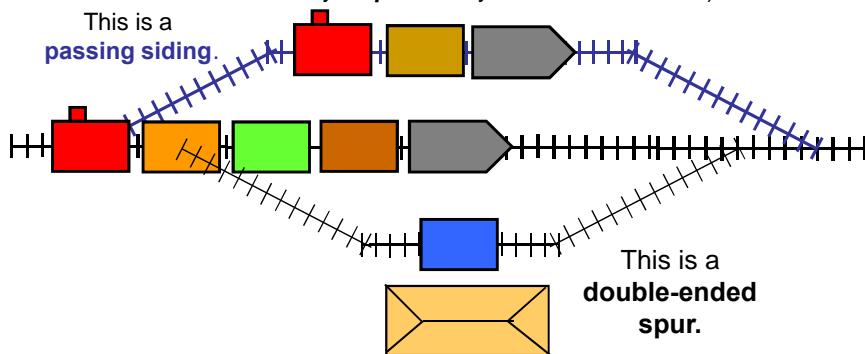
15



خطوط کناری

(This slower eastbound train has taken the *siding* so that it may be *passed* by a faster train behind).

This is a *passing siding*.



انواع مختلف ایستگاه ها

Single-ended flatyard

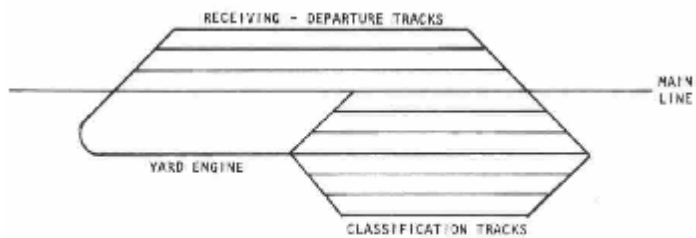


Fig. 2. Single-ended flatyard.

○ ساده ترین ایستگاه دارای منابع دائمی switching

17

انواع مختلف ایستگاه ها

Double-ended flatyard

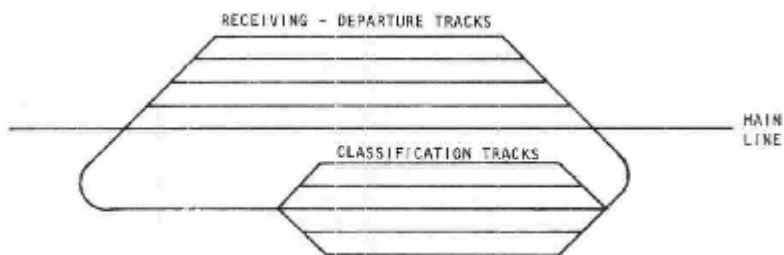


Fig. 3. Double-ended flatyard.

18

انواع مختلف ایستگاه ها

Directional flatyard

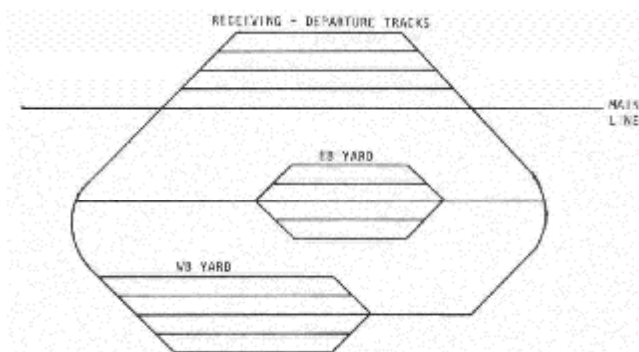


Fig. 4. Directional flatyard.

19

انواع مختلف ایستگاه ها

Hump Yards

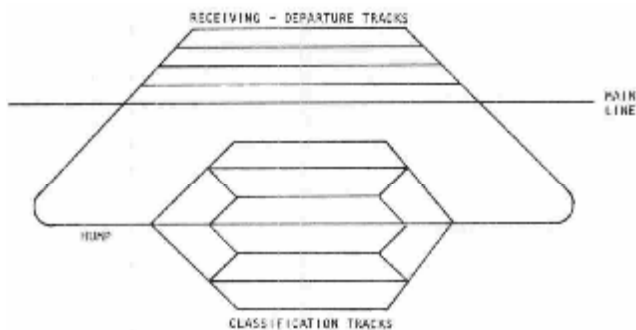


Fig. 5. Hump yard.



20

مدل سازی عملیات های ایستگاه ریل

■ فعالیت های ایستگاه ریل:

➤ ورود قطار به ایستگاه و بازرسی آن

➤ طبقه بندی یا مرتب نمودن

➤ انتظار برای اتصال واگنها، لکوموتیو و ...

➤ مرتب نمودن یا مونتاژ قطار

➤ بازرسی خروجی و اعزام قطار

• زمان تصادفی؛
• غیر گلوگاه؛
• اضافه نمودن خدمه
بازرسی به راحتی
==> محاسبه زمان به
سادگی

21

مدل سازی عملیات های ایستگاه ریل

➤ طبقه بندی و مونتاژ قطار:

■ استفاده از مدل های نظریه صف (بسته به نوع ایستگاه و تعداد

وسایل خدمت رسانی دارد)

■ زمان های خدمت رسانی (شامل: زمان طبقه بندی و زمان مونتاژ

قطار) مشخص می باشد. (البته بستگی به: ترکیب ایستگاه، منابع در

دسترس، سیاست طبقه بندی قطار و حجم ترافیک دارد)

■ استفاده از مدل های صف چند سروری (دو عملیات مستقلند یا نه)

■ تعداد تسهیلات خدمت رسانی = تعداد قطارهایی که همزمان طبقه

بندی یا مونتاژ خواهند شد.

22

مدل سازی عملیات های ایستگاه ریل

➤ طبقه بندی و مونتاژ قطار: (ادامه)

- فرایندهای طبقه بندی و مونتاژ به صورت آماری مستقل بوده و فرایندهای پواسون دارند.
- شکل مدل صف آنها $M/G/s$ (M: ورود و اعزام توزیع پواسون؛ G: خدمت رسانی توزیع عمومی نظیر نمایی، ارلنگ و قطعی؛ S: تعداد کانال های خدمت رسانی) می باشد.

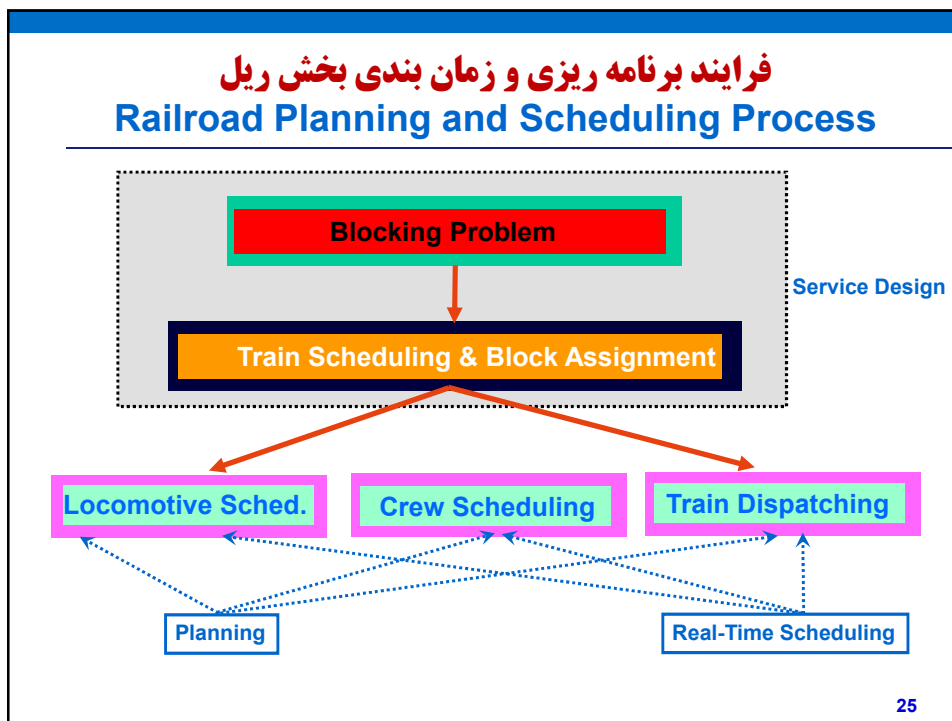
23

مدل سازی عملیات های ایستگاه ریل

➤ انتظار برای اتصال واگنها، لکوموتیو و ...

- تأخیر اتصال برابر فاصله زمانی است که واگن بعد از طبقه بندی و تا زمان شروع عملیات مونتاژ قطار منتظر می ماند.
 - استفاده از سیستم های Bulk (batch) service queue:
- $$M/E_k/1$$

24



State-of-the-Art in Railroad Planning

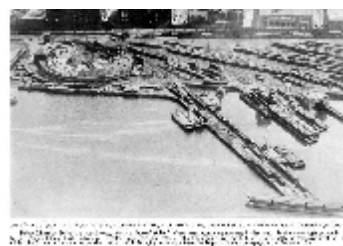
- Railroad planning and scheduling problems are very large-scale and very difficult discrete optimization problems.
- Almost all railroad planning and scheduling problems are solved manually.
- There are teams of 10-20 highly experienced personnel for solving each problem.

26

Railroad Blocking Problem(RBP)

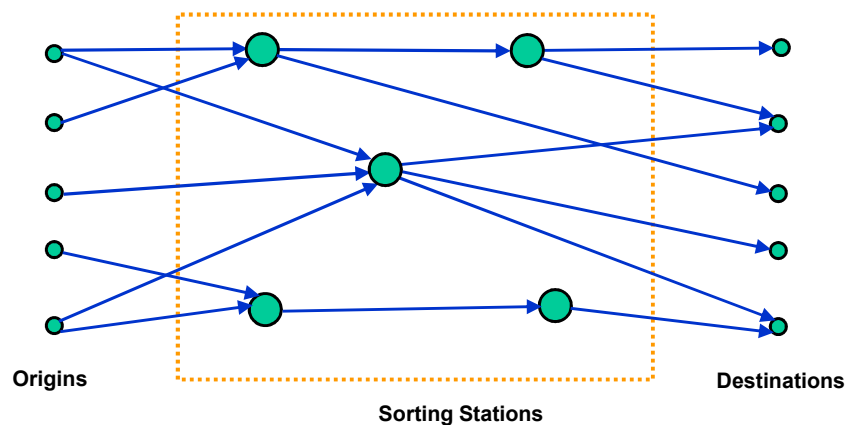
Ref:

- [1] Newton, H.N., Barnhart, C. and Vance, P.M. (1998)
"Constructing railroad blocking plans to minimize handling costs", Transportation Science, 32, 330-345.
- [2] Ahuja, R.K., Jha, K.C. and Liu, J. (2007) "Solving real-life railroad blocking problems", Interfaces, 37, 404-419.



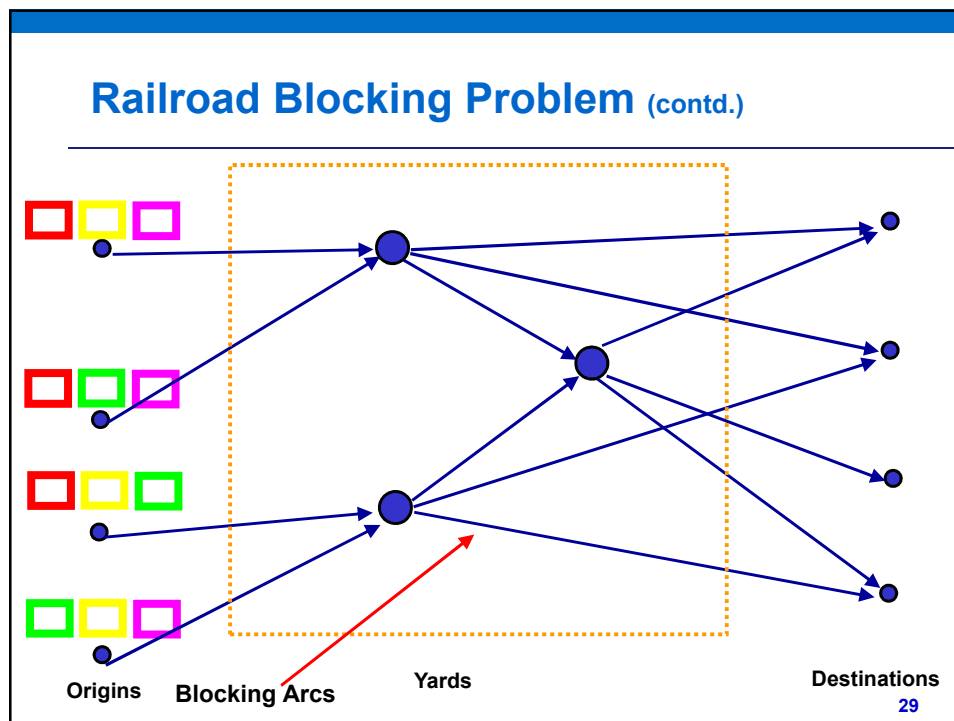
27

Package Delivery Problem



Design the sorting network and route all packages in it to minimize the weighted sum of travel times and sortings.

28



Railroad Blocking Problem

- **Shipments:**
 - Origin-Destination shipments or commodities
 - Size: 50,000 to 100,000 shipments per month
 - Each shipment contains different number of cars
 - Average of 10 cars per shipment
- **Trains:**
 - Thousands of trains per month
 - An O-D shipment is carried by several trains
- **Design the network on which commodities flow.**

30

Railroad Blocking Problem

- ❖ The shipment, or *commodity*, may pass through many classification yards on its route from origin to destination. At these yards, the incoming traffic, which may consist of several shipments, is *reclassified (sorted and grouped together)* to be placed on outgoing trains.
- ❖ On average, each reclassification results in a **one day delay** for the shipment.
- ❖ In addition, the classification process is **labor and capital intensive** because many workers and large quantities of equipment are needed to sort the traffic, and construction and maintenance of large yards is necessary to handle the sorting task

31

بلاک و نحوه تشکیل آن

- ❖ To **prevent shipments from being reclassified** at every yard they pass through, **several shipments** may be grouped together to form a **block**.
- ❖ A block has associated with it an OD pair which may or may not be the OD pair of any of the individual cars contained in the block.
- ❖ After a shipment is placed in a block, it is not reclassified until it reaches the destination of that block.

32

Railroad Blocking Problem

- ❖ The blocking plan determines how to **aggregate** a large number of shipments into **blocks of shipments** as they travel from origins to destinations .
- ❖ **The objective of railroad blocking** is to choose which blocks to build at each yard and to determine the sequences of blocks that deliver each shipment to minimize the total miles that the shipments travel and their intermediate handlings (or reclassifications).
- ❖ **یک نوع مسئله یکپارچه سازی: (شبهات زیاد با شرکت های پستی – مثال: شکل (۲) منبع [2])**

33

هزینه های مسئله RBP

- ❖ Costs based on the **distance traveled** (car-miles), the **time elapsed** (car-hours) and the **reclassifications** (handlings) required to deliver each commodity.
- ❖ Other costs are **usage fees** for links belonging to other railroads and premiums for using routings that are serviced by older, less efficient locomotives. **Link-specific costs**, depending on the grades involved or congestion in an urban area, might also be included, as well as **link or station-dependent labor and equipment costs**. There may also be a **fixed cost associated with choosing to build a given block**.

34

شبکه ریل در مسئله تشکیل بلاک قطار

- ❖ شبکه فیزیکی ریل: متشکل از خطوط به عنوان یال و ایستگاه ها به عنوان گره (مثال شکل ۱ مقاله [1])
- ❖ متشکل از بلاک ها به عنوان یال و ایستگاه به عنوان گره (مثال: شکل ۱ اسلاید ۲۹)

35

در نظر گیری مواردی جهت ارسال کالا توسط ریل:

- ❖ Classification capacity
- ❖ Priority classes:
 - ❖ For example, express traffic (e.g., automotive parts or intermodal) must be delivered in a few days (usually two or three days) while non-express traffic (e.g., general merchandise) may be in transit for one to two weeks.

36

محدودیت های مسئله

- ❖ constraints on the maximum number of times each commodity in each priority class is reclassified.
- ❖ constraints on the number of blocks built and the total volume of cars handled at each terminal.

37

Problem Description

Given:

- A set of shipments with different origins/destinations

➤ Decision Variables:

- Design the blocking network
- Route all shipments over the blocking network

➤ Constraints:

- Maximum number of arcs we can build at a node
- Volume of shipments passing through a node is limited

➤ Objective Function:

- Minimize the weighted sum of distance traveled by shipments and their node handlings

38

Size of the Problem

- **Network size:**
 - 1,000 origins
 - 2,000 destinations
 - 300 yards
- **Number of network design variables:**
 - $1,000 \times 300 + 300 \times 300 + 300 \times 2,000 \approx 1$ million
- **Number of flow variables:**
 - 50,000 commodities flowing over 1 million potential arcs

39

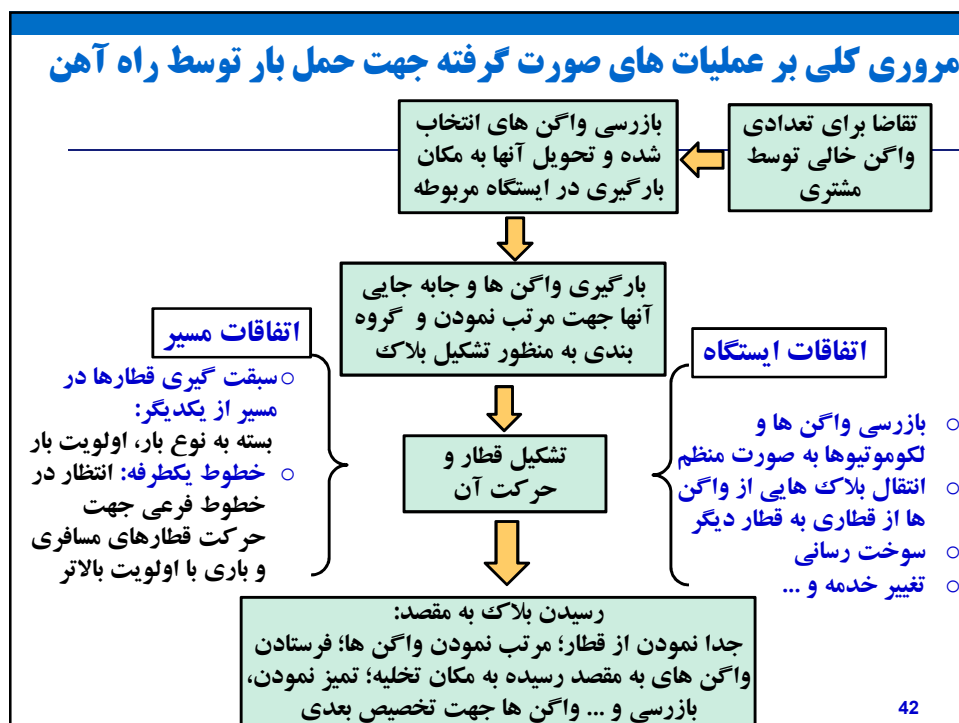
Difficulty of the Problem

- Network design problems are hard nuts.
- Problems with only a few hundred network design variables can be solved to optimality.
- Railroads want a near-optimal and implementable solution within a few hours of computational time.

40

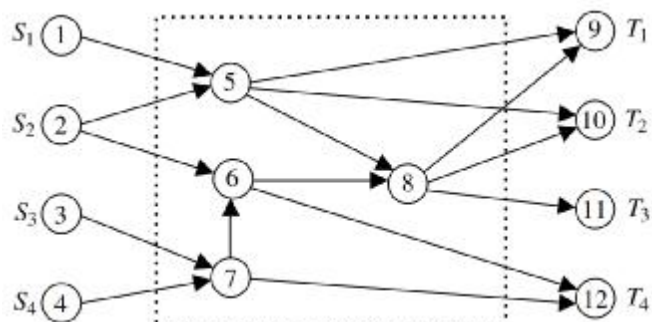
Railroad Blocking Problem

جلسه آینده: مدل سازی ریاضی مسئله



Railroad Blocking Problem

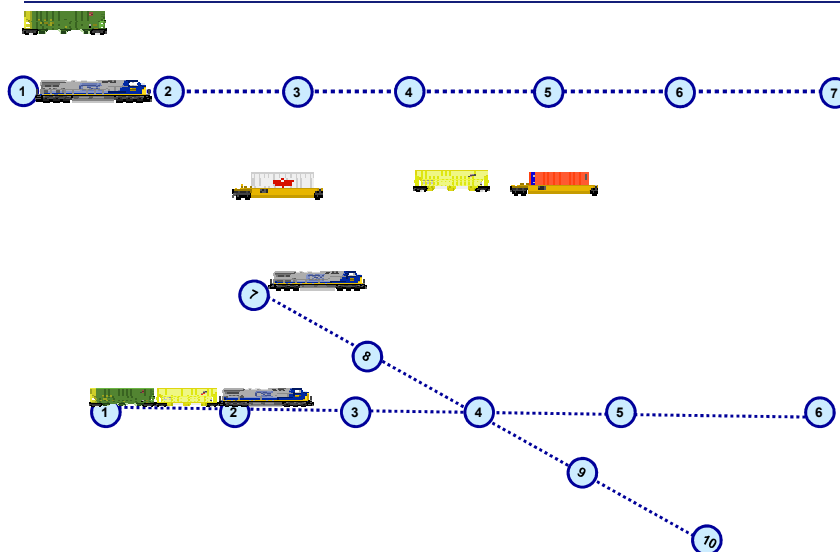
The solution to the blocking problem consists of creating a blocking plan and routing different shipments over this network.



A blocking network consists of nodes representing yards and arcs representing blocks

43

Flow of Blocks on Trains



44

Strategic Decisions with long time horizons and major capital investments.

- Network design and improvement. Track abandonment.
- Location of terminals and major classification facilities within large terminals.
- Highly aggregate routing decisions. Long-term planning of train services.

Tactical decisions with medium-term planning horizons and focus on effective allocation of existing resources rather than major acquisitions.

- Train selection and traffic routing: What trains should run and what should the required frequency of each train be to accommodate traffic demand?
- Train makeup: What groups (or blocks) of traffic should a train be allowed to carry (its take-list at a given terminal of its itinerary)?
- Terminal classification policy: Into what groups or blocks should the incoming traffic to the terminal be consolidated?
- Allocation of classification work among terminals: What is the total amount of classification work performed in the system? How should this workload be distributed among the various terminals to account for the fact that they might have different technological capabilities?

Operational decisions with day-to-day activities in a fairly detailed and dynamic environment.

- Train timetables: Determining arrival/departure times of each train at any intermediate station of its itinerary.
- Track scheduling and priority policy.
- Engine Scheduling
- Empty car distribution
- Yard receiving and dispatching policies.
- Line-haul and yard maintenance operations.

طبقه بندی تصمیمات در راه آهن
Assad's Taxonomy

45

مثال: بررسی یک سیستم ریل متشکل از ۴ ایستگاه

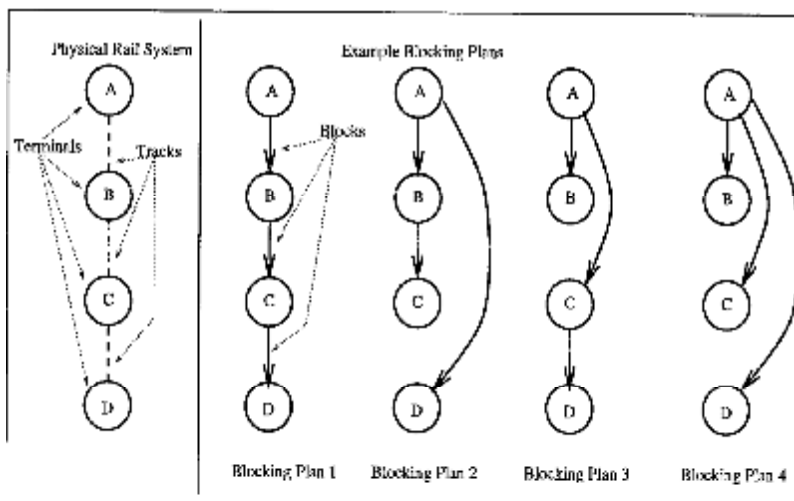


Figure 3.1: Physical rail system and four blocking plans

46

اطلاعات مثال داده شده

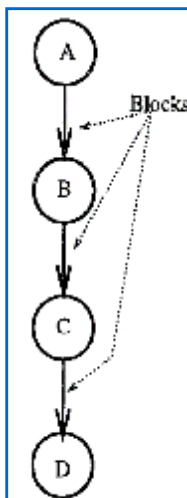
- We define commodities as origin-destination pairs of terminals.
- بنابراین تعداد کل جفت کالاها در این مثال، می تواند برابر با ترکیب ۲ از ۴ یعنی ۶ باشد.
- The only commodities assumed are : A->B with 100 cars, A->C with 80 cars, and A->D with 90 cars.
- محدودیت های مسئله (تعداد واگن های طبقه بندی شده و تعداد بلوک های ساخته شده در ایستگاه ها)
(به علت وجود محدودیت منابع طبقه بندی در ایستگاه ها)
- Terminal A has volume capacity of 270 cars which is its minimum since 270 cars originate there. Terminal B and C can each block 90 cars.
- Terminal A can build 2 blocks whereas each of the other terminals can only build one block.

47

- One performance metric of a blocking plan is the total number of classifications necessary to deliver all commodities.
- برحسب شاخص تعداد کل طبقه بندی ها، چهار طرح مختلف بلاکینگ برای این مسئله بررسی می شوند.

48

طرح بلاکینگ نخست



Blocking Plan 1

- At terminal A all three commodities are sorted to move to terminal B; At terminal B, commodity A→B has reached its destination and leaves the system.
- Commodities A → C and A → D are blocked to be move to terminal C; and so on.
- Using this blocking plan, the 100 cars for commodity A→B each use one block, (A,B), the 80 cars for commodity A→C each use two blocks, (A,B) and (B,C), and the 90 cars for commodity A→D each use three blocks, (A,B),(B,C),(C,D).

تعداد کل کلاسه بندی ها در این طرح برابر با ۵۳۰ می باشد که به صورت زیر قابل محاسبه است:

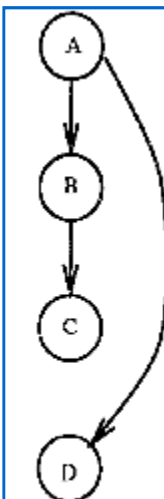
$$(100+80+90) + (80+90) + 90 = 530$$

آیا طرح (۱) موجه است یا نه؟

- The strategy of building blocks only between adjacent terminals, as in blocking plan 1, is referred to as "short blocking."

49

طرح بلاکینگ دوم



Blocking Plan 2

- Blocking plan 2 provides a "direct" block from terminal A to terminal D.
- Cars which travel in block (A,D) will still move along the physical track through terminals B and C, but since they are pre-sorted for terminal D, they do not require classification resources at B or C.
- To deliver the three commodities using this blocking plan requires 350 classifications, since the 90 cars of Commodity A→D now require only one block, (A,D).

تعداد کل کلاسه بندی ها در این طرح برابر با ۳۵۰ می باشد که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$(100+80+90) + (80) = 350$$

آیا طرح (۲) موجه است یا نه؟

50

طرح بلاکینگ سوم و چهارم

- Similar calculations show that blocking plans 3 and 4 require 360 and 270 classifications, respectively.
- However, blocking plan 4 is infeasible since it requires three blocks for terminal A which has a maximum of two blocks.
- Always blocking commodities directly to their destination, as in blocking plan 4, is referred to as "**long blocking**."
- So blocking plan 2 with 350 handlings is optimal with **respect to the total number of classifications required**. However, if the number of cars which could be blocked at B is reduced to less than 80 (or equivalently, the volume of commodity $A \rightarrow C$ were more than 80), then blocking plan 2 would be infeasible and Blocking Plan 3 with 360 handlings would be optimal.

51

مدل سازی مسئله Railroad Blocking Problem

➤ متغیرهای تصمیم: متشکل از دو گروه متغیر تصمیم:

- Blocking decisions: What is the blocking network? (i.e., how many blocks are made, and what is the origin-destination of each block?)
- Shipment-block sequencing decisions: How is each origin-destination shipment routed over the blocking network?

52

Railroad Blocking Problem

محدودیت های ظرفیت

➤ ظرفیت بلاکینگ گره ها (ایستگاه ها)

- بسته به نوع ایستگاه (ساده، flat و hump)
- دارای هزینه های مختلف ایجاد بلاکینگ

➤ ظرفیت جابه جایی واگن ها در گره ها

- تعداد واگن های عبوری از ایستگاه ها
- فرستادن بیش از حد واگن منجر به:
- ایجاد تراکم
- شکست عملیات ها

➤ ظرفیت جریان بلاک ها

- ظرفیت مشخصی برحسب تعداد واگن هایی که بر روی یک بلاک جریان می یابد
- هر بلاک بایستی حداقل تعداد مشخصی از واگن ها را جابه جا نماید.

53

Railroad Blocking Problem

تابع هدف مسئله

➤ کمینه نمودن هزینه های جریان تحویل کلیه کالاها

- هزینه کلاسه بندی و کلاسه بندی مجدد کالا در گره ها
- هزینه کلاسه بندی ثابت بوده و از آن صرف نظر می شود.
- با این حال هزینه کلاسه بندی مجدد متغیر بوده و به مسیر کالا وابسته است.
- هزینه جابه جایی کالا برحسب واگن-فاصله از مبدا به مقصد
- هزینه جریان بر روی یک یال بلاکینگ به صورت خطی با طول بلاک (i,j) متناسب است؛ و برابر با کوتاهترین مسیر در شبکه فیزیکی ریل از گره i به گره j دارد.

54

<p>N: set of nodes denoting the stations where shipments originate, terminate, or are swapped. We use the index i to denote a station in the node set.</p> <p>A: set of potential blocking arcs in $N \times N$, i.e., $(i, j) \in A$ if a block can be built from node i to node j.</p> <p>$G = (N, A)$: blocking network.</p> <p>$\delta^+(i)$: set of arcs in A emanating from i.</p> <p>$\delta^-(i)$: set of arcs in A entering node i.</p> <p>K: set of shipments; we use index k to denote a shipment.</p> <p>$o(k)$: origin of shipment $k \in K$.</p> <p>$d(k)$: destination of shipment $k \in K$.</p> <p>v_k: number of cars in shipment $k \in K$.</p> <p>m_{ij}: cost of flow per car in block $(i, j) \in A$. In general, this cost is proportional to the length of the block.</p> <p>h_i: cost of classifying a car at node $i \in N$.</p> <p>u_{ij}: maximum number of cars that can flow on block $(i, j) \in A$.</p> <p>d_i: maximum volume of cars that can be handled at node $i \in N$.</p> <p>b_i: maximum number of blocks that can be created at node $i \in N$.</p>	<p>پارامترهای مدل:</p>
---	------------------------

55

Railroad Blocking Problem

متغیرهای تصمیم مدل:

The blocking problem has two sets of binary decision variables: y_{ij} and x_{ij}^k . The variable y_{ij} takes value one if we decide to build the arc $(i, j) \in A$, and is zero otherwise. The decision variable x_{ij}^k is v_k if shipment k flows on the arc $(i, j) \in A$, and is zero otherwise.

56

Railroad Blocking Problem

مدل MIP مسئله:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} m_{ij} x_{ij}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \delta^+(i)} h_i x_{ij}^k \quad (1a)$$

subject to

$$\sum_{(i,j) \in \delta_i^+} x_{ij}^k - \sum_{(i,j) \in \delta_i^-} x_{ij}^k = \begin{cases} v_k & \text{if } i = o(k), \\ 0 & \text{if } i \neq o(k) \text{ or } d(k), \\ -v_k & \text{if } i = d(k) \end{cases}$$

for all $k \in K$, (1b)

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq u_{ij} y_{ij} \quad \text{for all } (i,j) \in A, \quad (1c)$$

$$\sum_{(i,j) \in \delta^+(i)} y_{ij} \leq b_i \quad \text{for all } i \in N, \quad (1d)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \delta^-(i)} x_{ij}^k \leq d_i \quad \text{for all } i \in N, \quad (1e)$$

$$y_{ij} = 0 \text{ or } 1 \quad \text{for each } (i,j) \in A, \quad \text{and} \quad x_{ij}^k = 0 \text{ or } v_k$$

for all $(i,j) \in A$ and all $k \in K$. (1f)

57

Railroad Blocking Problem

مدل MIP مسئله:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} m_{ij} x_{ij}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \delta^+(i)} h_i x_{ij}^k \quad (1a)$$

subject to

$$\sum_{(i,j) \in \delta_i^+} x_{ij}^k - \sum_{(i,j) \in \delta_i^-} x_{ij}^k = \begin{cases} v_k & \text{if } i = o(k), \\ 0 & \text{if } i \neq o(k) \text{ or } d(k), \\ -v_k & \text{if } i = d(k) \end{cases}$$

for all $k \in K$, (1b)

محدودیت های (1b) همراه با (1f) که در ارتباط با تعادل جریان می باشند نشان می دهند که جریان کالا تنها بر روی یک مسیر در شبکه بلاکینگ اتفاق می افتد.

$$y_{ij} = 0 \text{ or } 1 \quad \text{for each } (i,j) \in A, \quad \text{and} \quad x_{ij}^k = 0 \text{ or } v_k$$

for all $(i,j) \in A$ and all $k \in K$. (1f)

58

Railroad Blocking Problem

مدل MIP مسئله:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} m_{ij} x_{ij}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \delta^+(i)} h_i x_{ij}^k \quad (1a)$$

subject to

$$\sum_{(i,j) \in \delta_i^+} x_{ij}^k - \sum_{(i,j) \in \delta_i^-} x_{ij}^k = \begin{cases} v_k & \text{if } i = o(k), \\ 0 & \text{if } i \neq o(k) \text{ or } d(k), \\ -v_k & \text{if } i = d(k) \end{cases}$$

for all $k \in K$, (1b)

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq u_{ij} y_{ij} \quad \text{for all } (i,j) \in A, \quad (1c)$$

محدودیت های (1c) بیانگر این موضوع است که کالاهای تنها زمانی بر روی یک یال جریان می یابند که آن یال ساخته شده باشد و کل جریان آن یال کمتر یا مساوی ظرفیت آن یال باشد.

$$y_{ij} = 0 \text{ or } 1 \quad \text{for each } (i,j) \in A, \quad \text{and} \quad x_{ij}^k = 0 \text{ or } v_k$$

for all $(i,j) \in A$ and all $k \in K$. (1f)

59

Railroad Blocking Problem

مدل MIP مسئله:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} m_{ij} x_{ij}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \delta^+(i)} h_i x_{ij}^k \quad (1a)$$

subject to

محدودیت های (1d) و (1e) به ترتیب، تعداد بلاک های ایجاد شده در هر گره و تعداد واگن های جابه جا شده در هر گره را محدود می نمایند.

$$\sum_{(i,j) \in \delta^+(i)} y_{ij} \leq b_i \quad \text{for all } i \in N, \quad (1d)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \delta^-(i)} x_{ij}^k \leq d_i \quad \text{for all } i \in N, \quad (1e)$$

$$y_{ij} = 0 \text{ or } 1 \quad \text{for each } (i,j) \in A, \quad \text{and} \quad x_{ij}^k = 0 \text{ or } v_k$$

for all $(i,j) \in A$ and all $k \in K$. (1f)

60

Railroad Blocking Problem

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} m_{ij} x_{ij}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \delta^+(i)} h_i x_{ij}^k \quad (1a)$$

subject to

$$\sum_{(i,j) \in \delta_i^+} x_{ij}^k - \sum_{(i,j) \in \delta_i^-} x_{ij}^k = \begin{cases} v_k & \text{if } i = o(k), \\ 0 & \text{if } i \neq o(k) \text{ or } d(k), \\ -v_k & \text{if } i = d(k) \end{cases}$$

for all $k \in K$, (1b)

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq u_{ij} y_{ij} \quad \text{for all } (i,j) \in A, \quad (1c)$$

$$\sum_{(i,j) \in \delta^+(i)} y_{ij} \leq b_i \quad \text{for all } i \in N, \quad (1d)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \delta^-(i)} x_{ij}^k \leq d_i \quad \text{for all } i \in N, \quad (1e)$$

$$y_{ij} = 0 \text{ or } 1 \quad \text{for each } (i,j) \in A, \quad \text{and} \quad x_{ij}^k = 0 \text{ or } v_k$$

for all $(i,j) \in A$ and all $k \in K$. (1f)

مدل MIP مسئله:

اندازه مسئله: (مثلاً برای CSX)

تعداد مبادی: ۱۰۰۰

تعداد مقاصد: ۲۰۰۰

تعداد ایستگاه ها: ۳۰۰

تعداد کالاها: ۵۰۰۰۰ در ماه

تعداد کل بلاک های بالقوه

(1000 × 300 (origins to yards) + 300 × 300 (yards to yards) + 300 × 2000

(yards to destinations)) ≈ 1 million

تعداد کل بلاک های ممکن: ۸۰۰۰

بنابراین انتخاب ۸۰۰۰ بلاک از بین ۱ میلیون بلاک بالقوه!

تعداد کل متغیرهای جریان بیش از صدها میلیارد متغیر

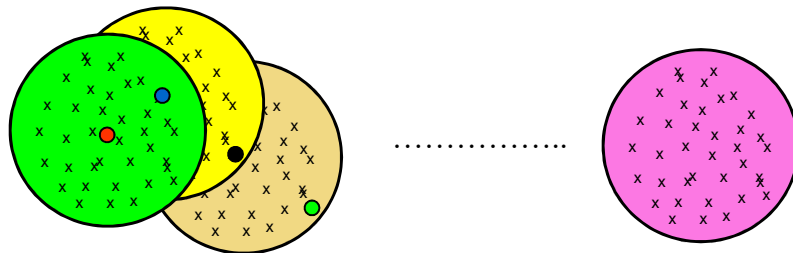
Railroad Blocking Problem

مروری بر کارهای صورت گرفته در ادبیات موضوع:

- Keaton (1989, 1992) develops a **nonlinear MIP** for the blocking Problem
- Huntley et al. (1995) develops a **simulated annealing** approach
- Gorman (1998) proposes a **genetic algorithm** for the problem.
- Newton et al. (1998) model the blocking problem as a **network-design model** and formulate it as a **MIP**. They develop **column generation** and **branch-and-price** algorithms to solve it.
- Barnhart et al. (2000) use the same formulation and propose the **Lagrangian relaxation** technique to **decompose** the problem into two subproblems. Their approaches focus on determining a **near-optimal solution**.
- Ahuja et al. (2007) developed an algorithm using an emerging technique known as **very large-scale neighborhood VLSN** search that is able to solve the problem **to near optimality** using **one to two hours** of computer time on a standard workstation computer.

Neighborhood Search Algorithms

- Start with a feasible solution x
- Define a neighborhood of x
- Identify an improved neighbor y
- Replace x by y and repeat



63

VLSN Search

- Quality of the local optimal solution
 - Better as the size of the neighborhood increases
 - Running time increases with the increase in size
- VLSN Search
 - Very large neighborhoods
 - Neighborhoods enumerated implicitly
 - Use of network/discrete optimization algorithms

64

VLSN search algorithm for solving RBP

algorithm *Blocking*;

begin

construct an initial feasible solution of the blocking problem;

while the current solution is not locally optimal **do**

begin *[one pass]*

for each node $i = 1$ to n **do**

begin

delete all the blocks made at node i and reroute the shipments flowing on the deleted blocks;

enumerate all candidate blocks at node i and determine potential savings of each such block if it is built;

add a candidate block with the maximum savings, revise potential savings of candidate blocks, and repeat this step until either the blocking capacity of node i is met or there is no candidate block with positive savings;

end;

end; *[one pass]*

end;

VLSN iteratively improves the current blocking solution by replacing it with its neighbor solution until the solution can no longer be improved.

This algorithm has two important subroutines:

- 1) constructing the initial feasible solution
- 2) reoptimizing the blocks originating at a node.

65

جلسه آینده:
مسئله مسیریابی در راه آهن



Train Design Problem

Ref:

Routing :

- [1] Crainic, T.G., Ferland, J.-A., and Rousseau, J.-M. (1984) "A tactical planning model for rail freight transportation", *Transportation Science*, 18, 165-184.
- [2] Crainic, T.G., Florian, M., and Leal, J.-E. (1990) "A model for the strategic planning of national freight transportation by rail", *Transportation Science*, 24, 1-24.

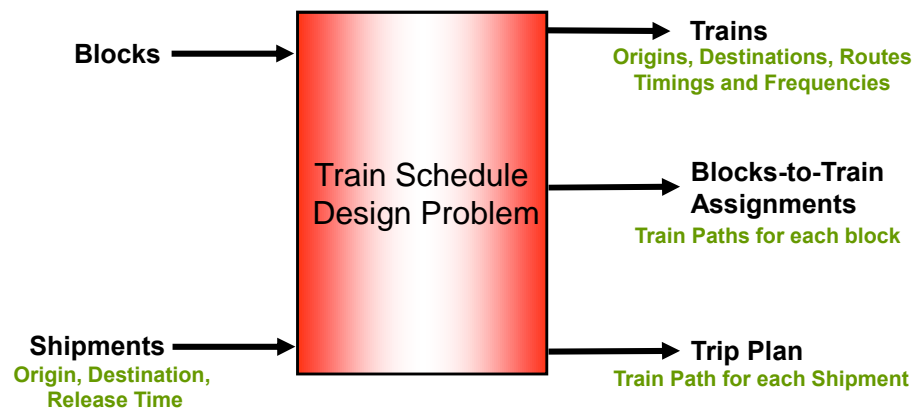
Routing & Scheduling:

- [3] Gorman, M.F. (1998) "An application of genetic and tabu searches to the freight railroad operating plan problem", *Annals of Operations Research*, 78, 51-69.

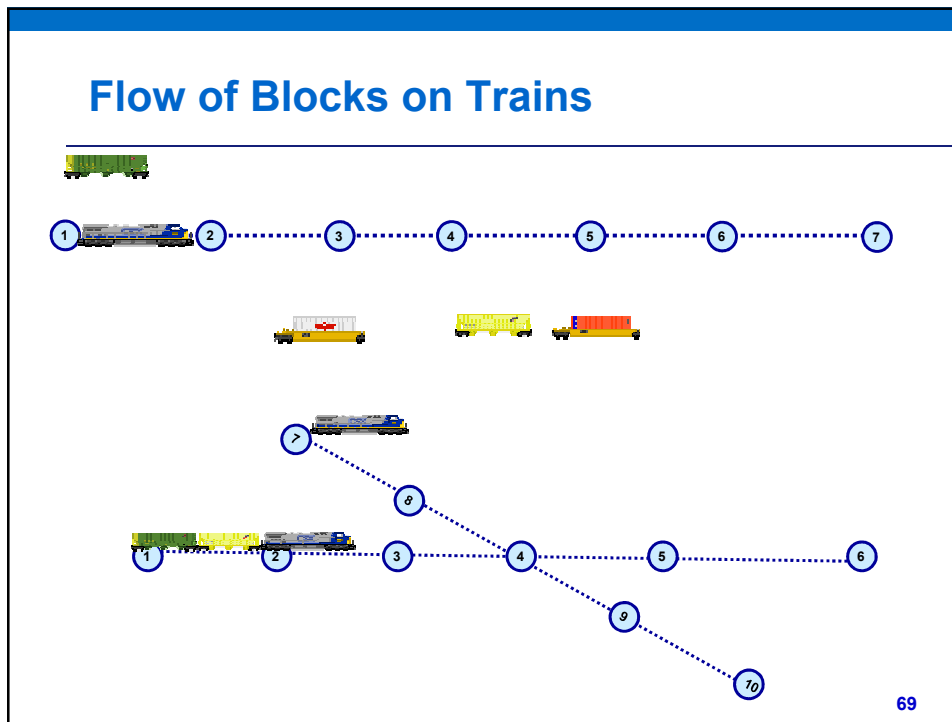


67

Train Design Problem



68



مسئله عرضه بار توسط راه آهن

- توالی از تصمیمات اتخاذ شده توسط مدیریت جهت تقاضای حمل و نقل
- تقاضا بر حسب میزان حجم ترافیک که بایستی بین مبادی و مقاصد از ایستگاه ها در شبکه جابه جا شود بیان می گردد.
- مدیریت بایستی سیاست هایی عملیاتی (Operating Policies) را به نحوی مشخص نماید که به تخصیص و استفاده مؤثر از منابعی نظیر: واگن ها، لکوموتیوها، خدمه، تسهیلات ایستگاهها و ... منجر شود.

مسئله عرضه بار توسط راه آهن

➤ سیاست هایی عملیاتی (Operating Policies) :

- ❑ **Line policies:** Determine **what trains** will be run on a network, on **what routes**, **how often**, following **what schedule** (if any) and **what priority rules** will govern meets and overtakes on the **tracks**. Line policies also specify the **routing of traffic through the network**, the **assignment of traffic to trains and empty car and locomotive flows**.
- ❑ **Yard policies:** Yard policies specify the operations performed on the traffic passing through the yard: **receiving**, **inspection**, **classification**, **assembly**, **connection** and **so on**.

71

مدل برنامه ریزی تاکتیکال جابه جایی بار توسط راه آهن

➤ تصمیمات در راه آهن بسته به حیطه کاری، افق برنامه ریزی، میزان سرمایه گذاری و سطح مدیریت درگیر در آن در سطوح مختلف اتخاذ خواهند شد.

➤ مدل بررسی شده در سطح تصمیم گیری تاکتیکال قرار گرفته و متشکل از اجزاء زیر در مسئله است:

- 1) **Train routing:** on what routes should trains run, at what speed priority and at what frequencies?
- 2) **Traffic routing:** for each traffic class, what train sequence should be used and what operations should be performed on the cars at each intermediary stop?

72

مدل برنامه ریزی تاکتیکال جابه جایی بار توسط راه آهن

- 3) **Blocking strategies:** what blocks should be built at each yard?
- 4) **Makeup strategies:** what blocks should each train carry?
- 5) **Allocation of classification work among yards:** how should classification work be distributed among the various yards, to fully use their capacities and avoid congestion?

73

مدل برنامه ریزی تاکتیکال جابه جایی بار توسط راه آهن

- هدف از بررسی مسئله، ارائه یک مدل بهینه سازی بوده به نحویکه بتواند اثرات متقابل بین سیاست های مسیریابی قطار و ترافیک بار؛ استراتژی های بلاکینگ و ترکیب سازی؛ و تخصیص حجم کار طبقه بندی مابین ایستگاهها برحسب هزینه های تأخیر و عملیاتی را در نظر بگیرد.
- هدف از مدل ارائه شده تعیین یک برنامه زمانی جزئی نبوده بلکه تعیین بهترین استراتژی های عملیاتی جهت کاهش هزینه ها و ارائه خدمت با کیفیت خوب (برحسب تأخیر حمل و نقل و قابلیت اطمینان) مد نظر می باشد.

74

مدل ریاضی مسئله:

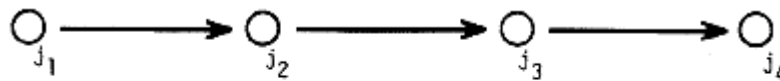
- Suppose that the **physical network** is represented by a **directed graph** $G_{ph} = (N, A_{ph})$ where **N** is the set of nodes (yards and junction points) and **A_{ph}** is the set of links representing the track sections between yards.
- For each origin-destination pair in the network, **traffic demand** is assumed to be specified **in terms of cars** (or any other equivalent measure of **tonnage**) to be moved **between the two yards**.
- Furthermore, since different costs are incurred to handle different types of goods, traffic demand has to be divided into different classes. Thus, a **traffic class** $m = (O, D, C)$ is associated with a specific origin-destination pair (O, D) , $O, D \in N$ and a commodity C , and d^m denotes the traffic demand of commodity C from O to D . Let **M** be the set of all traffic classes.

75

مدل ریاضی مسئله:

➤ شبکه فیزیکی و خدمت مسئله مورد بررسی:

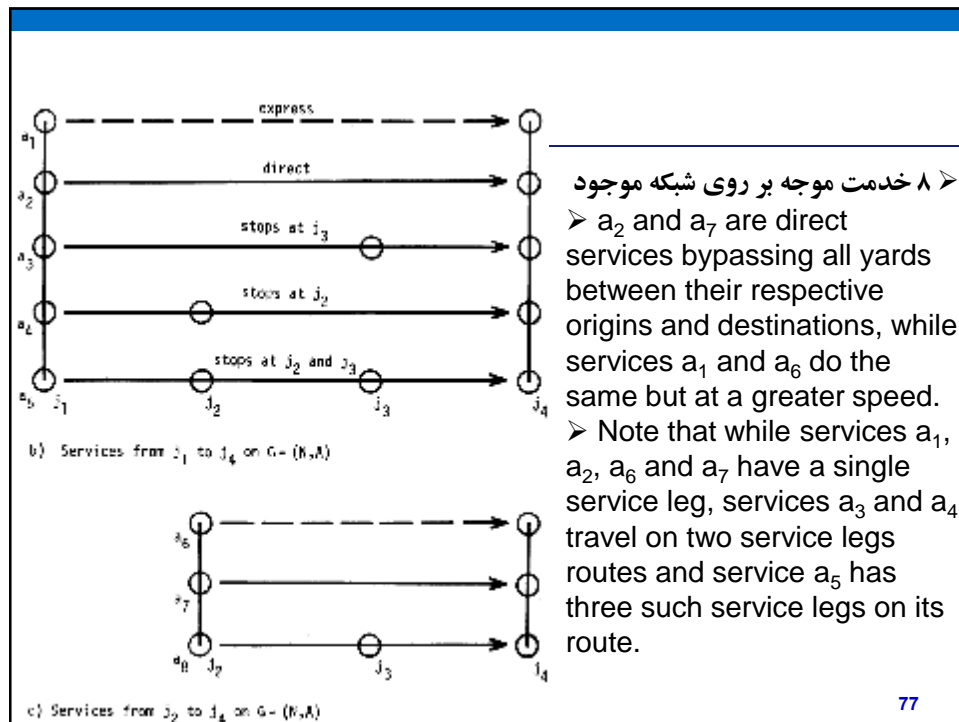
- Based on the **physical network** G_{ph} , the **service network** $G = (N, A)$ specifies the set of feasible routes on which **train services** may be operated.



a) $G_{ph} = (N, A_{ph})$

- **service leg** (بخش خدمت), defined as the route traveled between two consecutive stops,

76



77

A service $a_i \in A$ is thus characterized by:

- (i) An origin $O(a_i) \in N$
- (ii) A destination $D(a_i) \in N$
- (iii) A path (sequence of arcs in A_{ph} from $O(a_i)$ to $D(a_i)$) in $G_{ph}: T_i^v$
- (iv) A set of intermediate stops T_i^s
- (v) A set of service legs T_i^p
- (vi) A specification $v(a_i)$ of the type of service in terms of speed and priority.

For a given service a_i , a train is formed at the origin $O(a_i)$ and maintains its identity throughout its route T_i^v until its destination $D(a_i)$. On its way, the train stops at the yards in T_i^p to drop off and/or pick up traffic, bypassing all the other yards (located on the service legs in T_i^p) on its route.

78

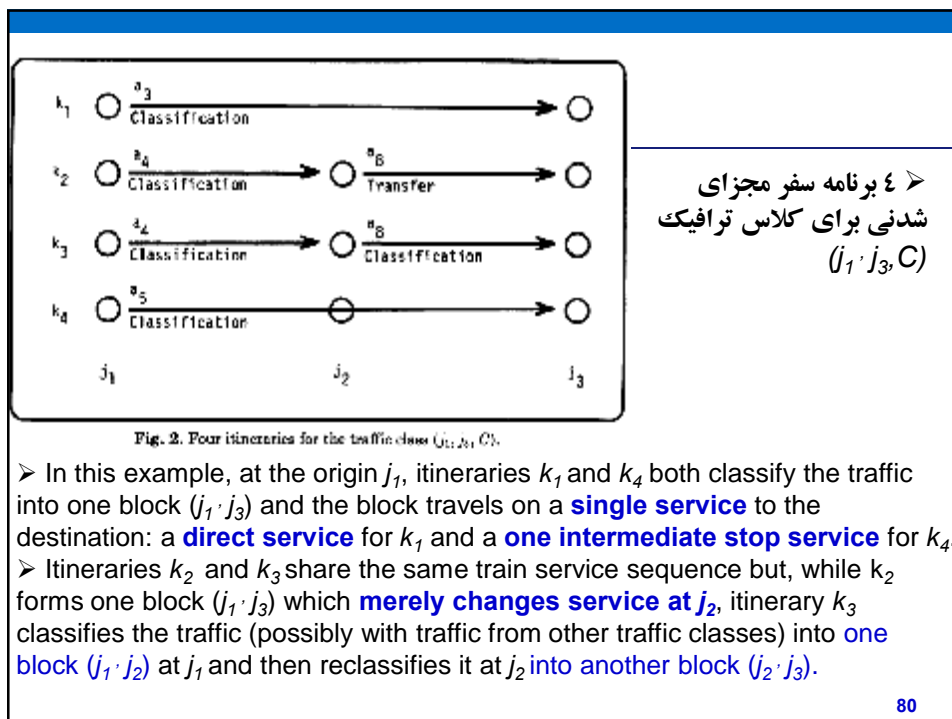
مدل ریاضی مسئله:

➤ تعداد قطارهای اعزامی بر روی مسیر در طی دوره برنامه ریزی، **فراوانی خدمت frequency of service** نامیده شده و به عنوان یکی از متغیرهای تصمیم مدل شناخته می شود.

برنامه سفر (حرکت) یا خط سیر (Itinerary):

➤ به طور کامل تعیین کننده یک سفر موجه برای یک کلاس ترافیک داده شده متشکل از مسیر طی شدن قطار و عملیات هایی (**classification or transfer**) است که در توقفات بین راهی اتفاق می افتد.

79



80

مدل ریاضی مسئله:

➤ اگر I^m مجموعه ی کل برنامه سفرهای شدنی در کلاس ترافیک m باشد.
آنگاه برای هر برنامه سفر k در I^m خواهیم داشت:

s_k^c : Set of (re)classification yards;

s_k^t : Set of transfer yards;

s_k^r : The path in G ;

s_k^u : The path in G_{ph} .

81

مدل ریاضی مسئله:

➤ برنامه های سفر اجزای اصلی مدل ریاضی را تشکیل می دهند.
➤ با انتخاب بهترین توزیع ترافیک از بین برنامه های حرکت در هر کلاس ترافیک نه تنها مسئله مسیریابی ترافیک حل خواهد شد بلکه استراتژی های بلاکینگ و ترکیب سازی و توزیع کار کلاسه بندی بین ایستگاهها انجام خواهد گرفت.

82

مدل ریاضی مسئله: متغیرهای تصمیم

➤ متغیرهای تصمیم به صورت زیر تعریف شده اند:

➤ x_k^m : تعداد واگن ها از کلاس ترافیک m که در برنامه سفر k جابه جا می شوند.

➤ t_i : فراوانی (تعداد قطارها) برای ارائه خدمت a_i

$$x_k^m \geq 0 \quad \forall m \in M \quad \forall k \in I^m$$

$$t_i \geq 0 \quad \text{and integer} \quad \forall a_i \in A.$$

83

مدل ریاضی مسئله: محدودیت های مسئله

➤ محدودیت های تقاضا:

در هر کلاس ترافیک (m)، میزان تقاضایی که توسط کلیه برنامه های حرکت مربوطه (I^m) جابه جا می شود بایستی با مقدار تقاضا برابر باشد (d^m).

$$\sum_{k \in I^m} x_k^m = d^m \quad \forall m \in M$$

➤ محدودیت های ظرفیت:

(از ارتباط بین جریان واگن ها و جریان قطارها تولید می شود)

➤ تعریف نسبت واگن/قطار (تعداد واگنهای تشکیل دهنده قطار): از لحاظ تئوری به نوع خدمت، کالا و مسیر انتخابی وابسته است. در مدل مقدار ثابت a در نظر گرفته شده است.

➤ خدمت $a_i \in A$ را در نظر بگیرید.

84

مدل ریاضی مسئله: محدودیت های مسئله

➤ بین دو ایستگاه متوالی i و j ، یک قطار در این خدمت (a_i) بدون توقف در بخش خدمت $p_{ij}^l \in T_l^p$ حرکت نموده و به میزان $X_{p_{ij}}^l$ واگن از دسته های ترافیک و برنامه های سفر مختلف جابه جا می نماید.

➤ بنابراین برای هر خدمت، a_i ، $X_{p_{ij}}^l$ حجم ترافیکی است که در مسیر p_{ij}^l از T_l^p جابه جا شده و بایستی کمتر از ظرفیت خدمت مورد بررسی باشد.

$$X_{p_{ij}}^l = \sum_{m \in M} \sum_{k \in I^m / p_{ij}^l \in \pi_k^r} x_k^m \leq a_i t_l \quad \forall a_i \in A$$

$$\forall p_{ij}^l \in T_l^p$$

85

مدل ریاضی مسئله: تابع هدف مسئله

➤ به منظور تعریف تابع هدف خواهیم داشت:

$$X^m = (x_1^m, x_2^m, \dots, x_{|J^m|}^m)^T$$

$$X = (X^1, X^2, \dots, X^{|M|})^T$$

$$T = (t_1, t_2, \dots, t_{|A|})^T$$

X^m : تعداد واگن های جابه جا شده در کلاس ترافیک m توسط برنامه های حرکت مختلف

X : تعداد واگن های جابه جا شده در کلیه کلاس ترافیک

T : فروانی خدمات مختلف

86

مدل ریاضی مسئله: تابع هدف مسئله

هزینه برنامه حرکت $Z_k^m(X, T)$ برابر با کل هزینه تأخیر و عملیاتی استفاده از برنامه k ام برای کلاس ترافیک m و هزینه خدمت $Y_l(T)$ برابر با هزینه مربوط به فراوانی خدمت a_l می باشد. بنابراین مدل نهایی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } \phi(X, T) &= \sum_{m \in M} \sum_{k \in I^m} Z_k^m(X, T) + \sum_{a_l \in A} Y_l(T) \\ \sum_{k \in I^m} x_k^m &= d^m & \forall m \in M \\ X_{p_{ij}^l} &\leq \alpha t_l & \forall a_l \in A \\ & & \forall p_{ij}^l \in T_l^p \\ x_k^m &\geq 0 & \forall m \in M \quad \forall k \in I^m \\ t_l &\geq 0 \text{ and integer} & \forall a_l \in A. \end{aligned}$$

87

مدل ریاضی مسئله: هزینه های مدل

هزینه های در نظر گرفته در تابع هدف مدل متشکل از موارد زیر است: (هزینه های خط و ایستگاه)

I. کل هزینه زمان تأخیر طبقه بندی (در هر کلاس طبقه بندی و برای هر برنامه حرکت)

○ متوسط زمان تأخیر طبقه بندی برای یک واگن

○ متوسط زمان تأخیر یکپارچه سازی بار

II. کل هزینه تأخیر فراوانی و اتصالات (زمان انتظار واگن قبل از حرکت)

III. هزینه طبقه بندی و انتقال کالا به قطاری دیگر (طبقه بندی، جدا و اضافه نمودن واگن و ...)

IV. هزینه مرتبط با تأخیر خط (تراکم)

V⁸. هزینه های عملیاتی مرتبط با خدمه، سوخت، لکوموتیو و ...

خروجی مدل ریاضی مسئله

اطلاعات گرفته شده از مدل جهت تصمیم گیری در سطح تاکتیکال:

- (i) Train selection: the values of the variables t_i determine which services will be run: if $t_i = 0$, the service α_i is not offered; if $t_i > 0$, a $v(\alpha_i)$ type of service should be run on the route α_i with frequency t_i .
- (ii) Traffic routing: the values of the variables x_k^m specify for each traffic-class what itineraries are to be used and how much traffic is to be sent along each one. Referring to the definition of an itinerary, traffic routing is thus completely specified by the path in $G_{j,k}$, the train service sequence and the operations performed at intermediary yards.
- (iii) Classification policies: the model determines the classification workload X_j for each yard. Moreover, the X_{ji} variables determine the blocking strategies for each yard: if $X_{ji} = 0$ no block for destination i is formed at yard j ; if $X_{ji} > 0$, then yard j classifies for yard i and X_{ji} cars will have that block-destination.
- (iv) Makeup policies: using the traffic routing solution and referring to the definition of an itinerary, we may specify what traffic goes on each train at each yard, thus determining the makeup policies.

89

جلسه آینده:

سیستم های حمل و نقل چندوجهی

Intermodal Transportation System

