

## طراحی شبکه در سیستم های حمل و نقل

مروری کلی بر مدل های مکان یابی تسهیلات و بررسی

مسئله ی مکان یابی تسهیلات / طراحی شبکه

(Facility Location/Network Design Problem)

دانشگاه کردستان

دکتر قادری

### تعریف کلی از حوزه ی مکان یابی تسهیلات

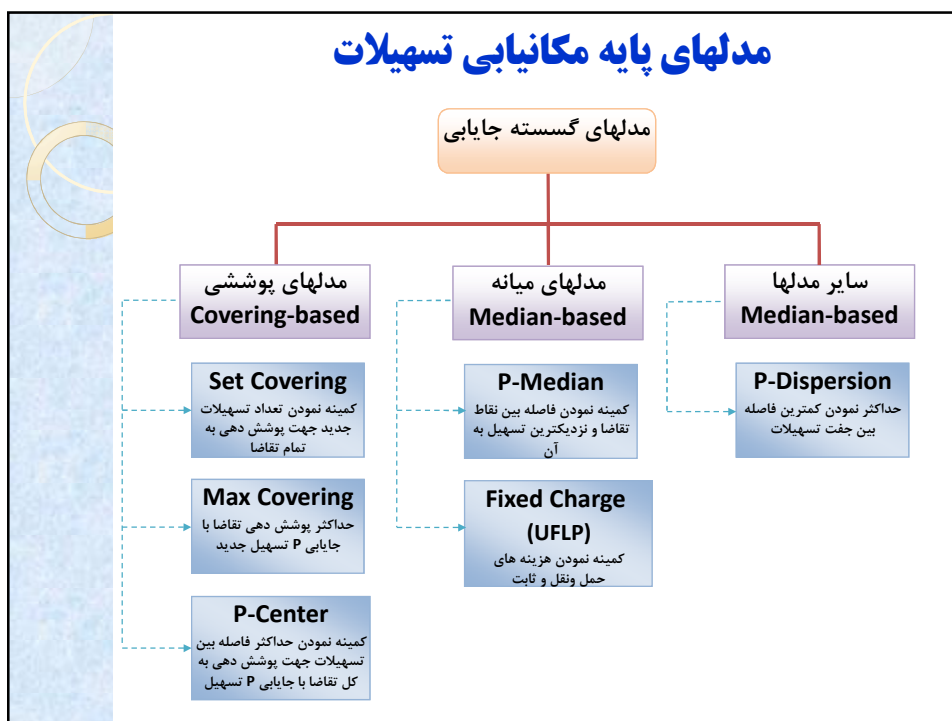
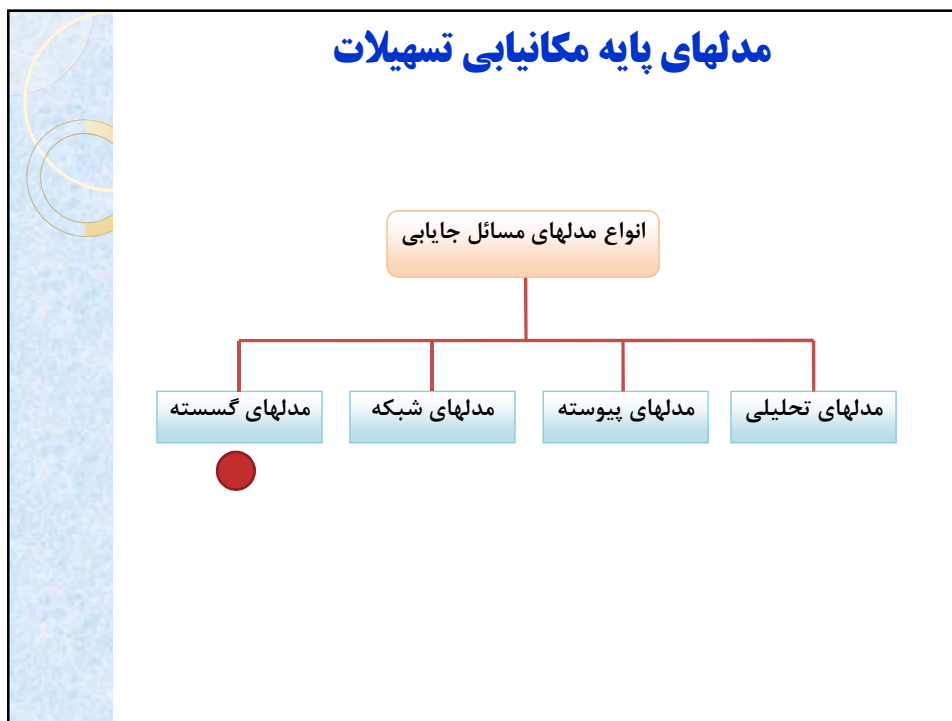
- مکانیابی تسهیلات:

مکانیابی تسهیلات عبارت است از یافتن مکان برای یک یا چند تسهیل به نحویکه هدف یا اهداف خاصی بهینه گردد. مانند: هزینه حمل و نقل، ارائه خدمات عادلانه به مشتریان و ... (Drezner,2004)

- مسائل مکانیابی تسهیلات از اجزاء بحرانی در برنامه ریزی استراتژیک سازمان های دولتی و شرکت های بزرگ خصوصی محسوب می شود.

به طور کلی در مسائل مکانیابی ممکن است جنبه های متعدد زیر مطرح گردند:

- چه تعداد تسهیل بایستی ایجاد شوند؟
- این تسهیلات در چه مکانی باید قرار بگیرند؟
- یک وسیله به چه مشتریان مشخصی باید سرویس دهد؟
- این تسهیلات باید در چه اندازه ای باشند؟



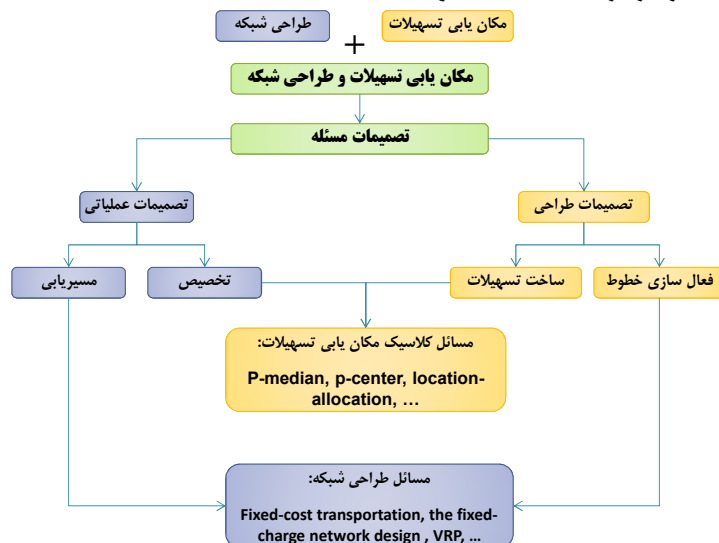
## بررسی مسئله ی مکان یابی تسهیلات / طراحی شبکه

### ✓ Uncapacitated Facility Location / Network Design Problem

- Maximum Covering Facility Location / Network Design Problem
- Capacitated Facility Location Network Design Problem
- Selection and Design of Links and Facility Location in Multi Objective Structure
- Solutions to Facility Location–Network Design Problems
- Bi-objective Combinead Facility Location and Network Design
- ...

## تعریف مسئله مکان یابی تسهیلات و طراحی شبکه

- در این مسئله، هدف مکان یابی تسهیلات و تصمیم گیری جهت ساخت یا عدم ساخت خطوط شبکه به گونه ای است که تقاضای مشتریان برآورده شده و مجموع هزینه های مختلف در نظر گرفته شده، کمینه شود.



6

- **نمایز بین مدل های کلاسیک مکان یابی و مسائل مکان یابی تسهیلات/طراحی شبکه**

(1) ساختار شبکه و ارتباط بین گره ها از قبل مشخص و تعریف شده

(2) ارتباط مستقیم بین گره ها و تسهیلات

با وجود اینکه توپولوژی شبکه اصلی ممکن است اثر عمیقی بر روی مکان بهینه تسهیلات داشته باشد، ولی همه مدل های کلاسیک، تسهیلات را بر روی یک شبکه مفروض و از پیش تعیین شده مکان یابی می کنند.

### موضوعات مرتبط با جایابی تسهیلات/طراحی شبکه عبارتند از:

- **مسائل طراحی شبکه (NDP)**

- شبکه متشکل از تعدادی گره و یال است که در آن، تعدادی کالا از مراکز (گره های مبدأ) به مراکز دیگر (گره های مقصد) تحت پاره ای از محدودیت های واقعی، انتقال یابند. از جمله معروف ترین مسائل NDP می توان به مسئله یافتن کوچک ترین درخت فراگیر (MSTP)، مسئله فروشنده دوره گرد (TSP) مسئله کوتاه ترین مسیر (SPP) اشاره کرد.
- در این دسته مسائل، بحث مکان یابی مطرح نمی باشد.

- **مسائل جایابی - مسیریابی Location\_Routing**

- برنز (Bruns) مسئله مکانیابی - مسیریابی را «برنامه ریزی مکان با در نظر گیری جنبه های برنامه ریزی مسیر» تعریف نموده است.

### کاربردهای مسائل مکان یابی تسهیلات / طراحی شبکه

#### • برنامه ریزی منطقه ای:

شاید مهم ترین کاربرد مستقیم این مدل ها، طراحی زیرساخت های حمل و نقل است (برای مثال در توسعه کشور). در چنین مواردی، دولت ممکن است ساخت یک سیستم بزرگراه جدید و همچنین مکانیابی تسهیلات دولتی مثل دفاتر پست، مدارس، ایستگاه های آتش نشانی و پایگاه های نظامی را به طور همزمان مورد بررسی قرار دهد.

#### • ماشین های هدایت کننده اتوماتیک (AGV):

امروزه برای جابجایی مواد در کارخانجات تولیدی به طور گسترده ای از **AGV** استفاده می شود (در اصل یک شبکه حمل و نقل را شکل می دهند که وسایل نقلیه روی آن تردد می کنند).

#### • شبکه خطوط هوایی (Airline Network)

در آمریکا پروازهای بدون توقف بین بسیاری از شهرها وجود داشت. اما امروزه بسیاری از آنها بعضاً شامل **hubs** & **spokes** هستند. یک فرودگاه **Hub**، پروازهای ارتباط دهنده ای را بین سایر فرودگاه های کوچکتر فراهم می کند. یک **spoke**، یک پرواز ارتباط دهنده است. با وجود اینکه شبکه های **hubs & spokes** معمولاً مستلزم این است که مسافران پروازهای خود را تغییر دهند، ولی در عوض ارتباطات زود به زودی را بین شهرها برقرار می کنند. واضح است که سطح ارتباطات فراهم شده توسط این شبکه ها بستگی به توپولوژی آنها و مکانهای **hub** دارد.

### کاربردهای مسائل مکانیابی تسهیلات و طراحی شبکه

#### • شبکه های ارتباطی:

معمولاً مشتریان به وسیله سیم های مسی و یا کابلهای نوری و با کمک **switching centers** به یکدیگر متصل می شوند. همچنین شرکت های تلفنی به منظور ترکیب تماسها، از دستگاه های متمرکز کننده و یا مرکب بهره می گیرند. این دستگاهها با قرارگیری در گره شبکه باعث کاهش تعداد تماس ها و در نتیجه کاهش ظرفیت مورد استفاده کابل ها می گردد. به همین دلیل این مسئله بین **switching centers** یا تسهیلاتی متمرکز کننده از یک سو، و تعداد کابل های مرتبط و کاهش ظرفیت های موردنیاز شبکه از سوی دیگر، موازنه برقرار می کند. این موازنه می بایست بصورت همزمان در نظر گرفته شود.

#### • شبکه انتقال قدرت:

این شبکه ها از لحاظ ساختاری مشابه سیستم های ارتباطی می باشند.

#### • شبکه های خط لوله:

در سیستم های انشعاب خط لوله جهت انتقال نفت، آب یا گاز، موازنه هزینه های عملیاتی و ثابت پمپاژ و هزینه های پمپاژ، به میزان و اندازه لوله های احداث شده وابسته است. برای مثال در جنوب کالیفرنیا در منطقه ای که کمبود آب بسیار شایع می باشد، برنامه ریزان با مطالعه راههایی برای حداکثرسازی استفاده مجدد از آب های هدر رفته می باشند که بصورت یک شبکه شامل بازسازی و انتقال تسهیلات، خطوط لوله کانال ها و مسیرها است.

## شرح مدل عمومی

مدل های Network location **جانمایی بهینه تسهیلات** و **پیکربندی شبکه اصلی** را به صورت **همزمان** تعیین می کنند.

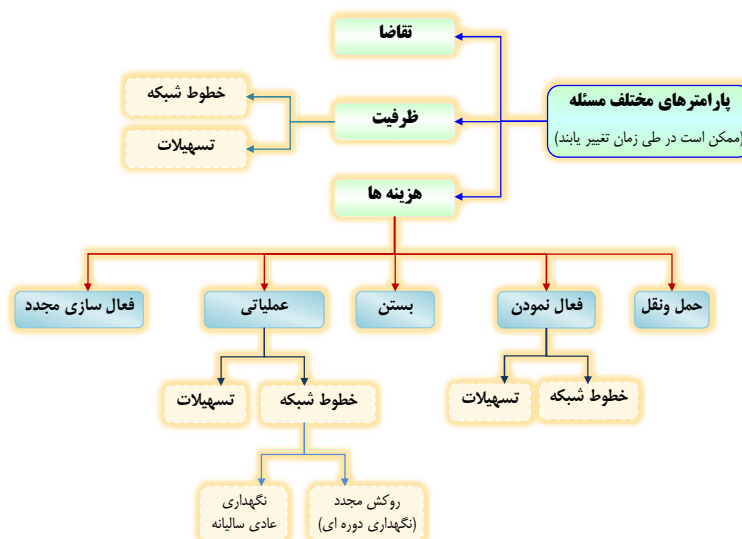
تعدادی از سوالاتی که توسط مدل های Network design مورد بررسی قرار می گیرند:

1. چه تعدادی لینک باید ایجاد شود؟
2. لینک ها در چه مکانی باید ساخته شوند، یا به عبارتی کدام گره ها باید به هم مرتبط شوند؟
3. ظرفیت لینک ها چقدر باید باشد؟

فرضیات مسئله جانمایی تسهیلات بدون محدودیت ظرفیت - طراحی شبکه
۱. هر گره نشان دهنده یک نقطه تقاضا است.
۲. تسهیلات فقط می توانند بر روی گره ها مستقر شوند.
۳. بر روی هر گره فقط یک وسیله می تواند مستقر شود.
۴. شبکه، یک سیستم customer-to-server است
۵. کلیه هزینه سفرها متقارن هستند.
۶. همه لینک های شبکه جهت دار هستند.

## تعریف مسئله

□ در شکل زیر، پارامترهای مختلف مسئله آورده شده اند.



## شرح مدل عمومی

### پارامترها

- $N$ : مجموعه گره های شبکه
- $L$ : مجموعه لینک های شبکه ( شامل لینک های کاندید)
- $d_i$ : تقاضا در گره  $i$
- $M$ : مجموع تقاضای شبکه
- $t_{ij}$ : هزینه حمل به ازای هر واحد جریان بر روی لینک  $(i, j)$
- $f_i$ : هزینه ثابت قرار دادن یک وسیله در گره  $i$
- $c_{ij}$ : هزینه ساخت لینک  $(i, j)$

### متغیرهای تصمیم

- $\left. \begin{array}{l} 1 \text{ اگر یک وسیله در گره } i \text{ قرار داده شود} \\ 0 \text{ در غیر اینصورت} \end{array} \right\} z_i$
- $\left. \begin{array}{l} 1 \text{ اگر لینک } (i, j) \text{ ساخته شود} \\ 0 \text{ در غیر اینصورت} \end{array} \right\} x_{ij}$
- $Y_{ij}$ : جریان تقاضا بر روی لینک  $(i, j)$
- $W_i$ : تقاضایی که توسط یک وسیله در گره  $i$  برآورده میشود

## شکل کلی مدل عدد صحیح مختلط (مدل اولیه، داسکین ۱۹۹۳)

Minimize  $\sum_{(i,j)} t_{ij} Y_{ij} + \sum_i f_i z_i + \sum_{(i,j)} c_{ij} x_{ij}$

subject to

$$\sum_j Y_{ji} + d_i = \sum_j Y_{ij} + W_i, \quad i \in N$$

$$W_i \leq M z_i, \quad i \in N$$

$$Y_{ij} \leq M x_{ij}, \quad (i, j) \in L$$

$$Y_{ij} \geq 0, \quad x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad (i, j) \in L, \quad W_i \geq 0, \quad z_i \in \{0, 1\}, \quad i \in N$$

**محدودیت اول:** جریان های ورودی به یک گره باید با جریان های خروجی از آن گره برابر باشد

**محدودیت دوم:** تقاضایی که توسط یک گره برآورده می شود تنها زمانی می تواند مثبت باشد که یک وسیله در گره قرار گیرد.

**محدودیت سوم:** جریان بر روی یک لینک، تنها زمانی می تواند مثبت باشد که آن لینک ساخته شده باشد.

## مثال

شبکه ای با شش گره را در نظر بگیرید. در این مسئله یک شبکه ی زیرساختی مفروض است که در آن همه گره ها با کمترین تعداد لینک به هم متصل شده اند و لینک های کاندید اضافه به صورت خط چین نشان داده شده اند.

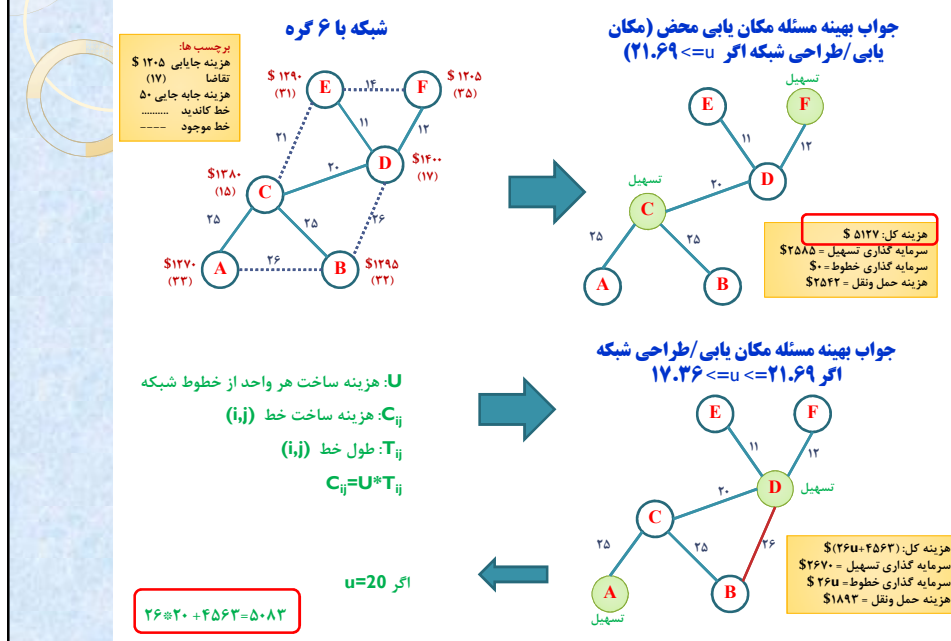
سوال هایی که مطرح این است:

(1) ۲ تسهیل را در کجا قرار بدهیم؟

(2) آیا بهبود در شبکه به صورت همزمان سودمند است؟

برای تجزیه و تحلیل،  $u$  را هزینه ساخت یک واحد طول تعریف نموده، لذا هزینه ساخت هر لینک برابر است با  $u t_{ij} = C_{ij}$ . با این روش، هزینه ساخت هر لینک مستقیماً متناسب با اندازه آن است، که معمولاً این مسئله در واقعیت درست است.

### چرایی در نظر گیری مسئله همزمان مکان یابی تسهیلات و طراحی شبکه





### بهبود فرمولاسیون قبلی مسئله (Melkote, S. and M.S. Daskin, 2001)

#### فرمولاسیون قوی (۲)

محدودیت های "بزرگ" نقاط ضعف اصلی مدل هستند. بنابراین این محدودیت ها را تا حد امکان تجزیه می کنیم.

فرمولاسیون را به صورت زیر تفکیک می نماییم:

"کالای"  $k$  را جوری تعریف می کنیم که تقاضایی باشد که از گره  $k$  آغاز می گردد.

#### انواع گره ها:

(1) اگر یک وسیله را در گره  $i$  مستقر کنیم، در بهیگی، آن وسیله کلیه تقاضاهای داخلی را برآورده می سازد. ما این گره ها را **گره های تسهیل (Facility Nodes)** می نامیم.

(۲) اگر وسیله ای را در گره  $i$  قرار ندهیم، همه تقاضاهای داخلی برای برآورده شدن به مکان دیگری منتقل می شوند. چنین گره هایی را **گره های انتقال (Transshipment Nodes)** می نامیم

$t_{ij}^0$  هزینه سفر هر واحد جریان بر روی یال  $(i, j)$

به طوری که هزینه های سفر برای هر لینک بر حسب کالا تعریف می شود:

$t_{ij}^k$  هزینه سفر کالای  $k$  بر روی یال  $(i, j)$   $t_{ij}^k d_k = (i, j)$

همچنین، می توان با تعاریف زیر، متغیرهای  $Y_{ij}$  و  $W_i$  بیشتر تفکیک کرد:

$Y_{ij}$  جریان کالای  $k$  بر روی یال  $(i, j)$

$W_i^k$  نسبتی از کالای نوع  $k$  که توسط تسهیل واقع شده در گره  $i$  خدمت رسانی می کنند.

به علاوه مشاهدات زیر نیز انجام می گیرند:


$$Y_{ij}^k = X_{ij}^k, \quad (i, j) \in L$$


$$W_i^k = Z_i^k, \quad i \in N$$

روابط فوق به این معناست که، انتقال تقاضا از گره  $i$  به خارج، با استفاده از یک لینک خارج شونده معادل است با ساخت آن لینک و برآورده ساختن تقاضای کالا در گره  $i$  ام که با ایجاد یک تسهیل در  $i$  برابر است. این ملاحظات این امکان را خواهد داد که متغیرهای  $Y_{ij}^k$  و  $W_i^k$  از فرمولاسیون حذف شوند. لذا فرمولاسیون نهایی به صورتیکه در زیر آورده شده، نشان داده شده است

UFLNDP/S2)	Minimize	$\sum_{(i,j) \in L} \sum_{k \in N, k \neq i} t_0^k Y_{ij}^k + \sum_{(i,j) \in L} t_0^i X_{ij} + \sum_{(i,j) \in L} c_0 X_{ij} + \sum_{n \in N} f_i Z_i$	(1-2)
یا توجه به:			
		$Z_i + \sum_{j \in N} X_{ij} = 1, \quad i \in N,$	(2-2)
		$X_{ki} + \sum_{j \in N, j \neq k} Y_{ij}^k = \sum_{j \in N} Y_{ij}^k + W_i^k \quad i, k \in N: i \neq k, (k, i) \in L,$	(3-2)
		$\sum_{j \in N, j \neq k} Y_{ij}^k = \sum_{j \in N} Y_{ij}^k + W_i^k \quad i, k \in N: i \neq k, (k, i) \notin L,$	(4-2)
		$Z_k + \sum_{j \in N, j \neq k} W_j^k = 1, \quad k \in N$	(5-2)
		$Y_{ij}^k \leq X_{ij}, \quad (i, j) \in L, k \in N: i \neq k$	(6-2)
		$W_i^k \leq Z_i \quad i, k \in N: i \neq k$	(7-2)
		$X_{ij} + X_{ji} \leq 1 \quad (i, j) \in L,$	(8-2)
		$\sum_{n \in N} Z_i = \rho$	(9-2)
		$Y_{ij}^k \geq 0, \quad X_{ij} \in \{0,1\} \quad (i, j) \in L, k \in N: k \neq i$	(10-2)
		$W_i^k \geq 0, \quad Z_i \in \{0,1\} \quad i, k \in N: k \neq i$	(11-2)

UFLNDP/S2)	Minimize	$\sum_{(i,j) \in L} \sum_{k \in N, k \neq i} t_0^k Y_{ij}^k + \sum_{(i,j) \in L} t_0^i X_{ij} + \sum_{(i,j) \in L} c_0 X_{ij} + \sum_{n \in N} f_i Z_i$	(1-2)
یا توجه به:			
		$Z_i + \sum_{j \in N} X_{ij} = 1, \quad i \in N,$	(2-2)
		$X_{ki} + \sum_{j \in N, j \neq k} Y_{ij}^k = \sum_{j \in N} Y_{ij}^k + W_i^k \quad i, k \in N: i \neq k, (k, i) \in L,$	(3-2)
		$\sum_{j \in N, j \neq k} Y_{ij}^k = \sum_{j \in N} Y_{ij}^k + W_i^k \quad i, k \in N: i \neq k, (k, i) \notin L,$	(4-2)
<b>Flow conservation conditions:</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>محدودیت شماره (2-2): بیان کننده این مطلب است که تقاضای گره <math>i</math> توسط تسهیل قرار گرفته در گره <math>i</math> برآورده می شود (در صورتیکه اتفاق بیفتد) و یا به خارج حمل می گردد.</li> <li>محدودیت های (3-2) و (4-2): محدودیت های بقای جریان می باشند. محدودیت شماره (3-2) بیان می کند کالای نوع <math>k</math> که به گره <math>i</math> وارد می شود، برابر است با کل کالای نوع <math>k</math> که از <math>i</math> خارج شده یا توسط تسهیل قرار گرفته در گره <math>i</math> خدمت دهی می شود <math>(k, i) \in L</math>. محدودیت های شماره (4-2) مشابه محدودیت های شماره (3-2) می باشند با این اختلاف که <math>(k, i) \notin L</math>. از آنجاکه در این حالت <math>(k, i) \notin L</math> می باشد، لذا متغیرهای <math>X_{ki}</math> وجود نداشته و در رابطه آورده نمی شود.</li> </ul>			

	UFLNDP/S2) Minimize $\sum_{(i,j) \in L} \sum_{k \in N, k \neq i} t_{ij}^k Y_{ij}^k + \sum_{(i,j) \in L} t_{ij}^i X_{ij} + \sum_{(i,j) \in L} c_{ij} X_{ij} + \sum_{i \in N} f_i Z_i \quad (1-2)$
	با توجه به:
	$Z_i + \sum_{j \in N} X_{ij} = 1, \quad i \in N, \quad (2-2)$
	$X_{ki} + \sum_{j \in N, j \neq k} Y_{ij}^k = \sum_{j \in N} Y_{ij}^k + W_i^k \quad i, k \in N: i \neq k, (k, i) \in L, \quad (3-2)$
	$\sum_{j \in N, j \neq k} Y_{ij}^k = \sum_{j \in N} Y_{ij}^k + W_i^k \quad i, k \in N: i \neq k, (k, i) \notin L, \quad (4-2)$
	$Z_k + \sum_{j \in N, j \neq k} W_j^k = 1, \quad k \in N \quad (5-2)$
	محدودیت شماره (۵-۲) بیان می‌کند که هر کدام از کالاها نهایتاً بایستی توسط یکی از تسهیلات قرار گرفته در گره‌ها خدمت‌دهی شود.

	UFLNDP/S2) Minimize $\sum_{(i,j) \in L} \sum_{k \in N, k \neq i} t_{ij}^k Y_{ij}^k + \sum_{(i,j) \in L} t_{ij}^i X_{ij} + \sum_{(i,j) \in L} c_{ij} X_{ij} + \sum_{i \in N} f_i Z_i \quad (1-2)$
	با توجه به:
	$Z_i + \sum_{j \in N} X_{ij} = 1, \quad i \in N, \quad (2-2)$
	$X_{ki} + \sum_{j \in N, j \neq k} Y_{ij}^k = \sum_{j \in N} Y_{ij}^k + W_i^k \quad i, k \in N: i \neq k, (k, i) \in L, \quad (3-2)$
	$\sum_{j \in N, j \neq k} Y_{ij}^k = \sum_{j \in N} Y_{ij}^k + W_i^k \quad i, k \in N: i \neq k, (k, i) \notin L, \quad (4-2)$
	$Z_k + \sum_{j \in N, j \neq k} W_j^k = 1, \quad k \in N \quad (5-2)$
	$Y_{ij}^k \leq X_{ij}, \quad (i, j) \in L, k \in N: i \neq k \quad (6-2)$
	$W_i^k \leq Z_i \quad i, k \in N: i \neq k \quad (7-2)$
	$X_{ij} + X_{ji} \leq 1 \quad (i, j) \in L, \quad (8-2)$
	محدودیت شماره (۶-۲): جریان یافتن کالای نوع $k$ بر روی خط $(i, j)$ که با $Y_{ij}^k$ نشان داده می‌شود تنها در صورتی امکان‌پذیر است که یال $(i, j)$ فعال شده باشد.
	محدودیت شماره (۷-۲): خدمت‌رسانی به محصول $k$ ام در گره $i$ تنها در صورتی معنی‌دار خواهد بود که گره $i$ ام فعال شده باشد.
	محدودیت شماره (۸-۲): حداکثر تنها یکی از جهت‌های یال $(i, j)$ فعال می‌شود.

UFLNDP/S2) Minimize  $\sum_{(i,j) \in L} \sum_{k \in N, k \neq i} t_{ij}^k Y_{ij}^k + \sum_{(i,j) \in L} t_{ij}^i X_{ij} + \sum_{(i,j) \in L} c_{ij} X_{ij} + \sum_{i \in N} f_i Z_i$  (1-2)

با توجه به:

$$Z_i + \sum_{j \in N} X_{ij} = 1, \quad i \in N, \quad (2-2)$$

$$X_{ki} + \sum_{j \in N, j \neq k} Y_{ij}^k = \sum_{j \in N} Y_{ij}^k + W_i^k, \quad i, k \in N: i \neq k, (k, i) \in L, \quad (3-2)$$

$$\sum_{j \in N, j \neq k} Y_{ij}^k = \sum_{j \in N} Y_{ij}^k + W_i^k, \quad i, k \in N: i \neq k, (k, i) \notin L, \quad (4-2)$$

$$Z_k + \sum_{j \in N, j \neq k} W_j^k = 1, \quad k \in N \quad (5-2)$$

$$Y_{ij}^k \leq X_{ij}, \quad (i, j) \in L, k \in N: i \neq k \quad (6-2)$$

$$W_i^k \leq Z_i, \quad i, k \in N: i \neq k \quad (7-2)$$

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1, \quad (i, j) \in L, \quad (8-2)$$

$$\sum_{i \in N} Z_i = p \quad (9-2)$$

$$Y_{ij}^k \geq 0, \quad X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i, j) \in L, k \in N: k \neq i \quad (10-2)$$

$$W_i^k \geq 0, \quad Z_i \in \{0, 1\} \quad i, k \in N: k \neq i \quad (11-2)$$

## نکات مدل:

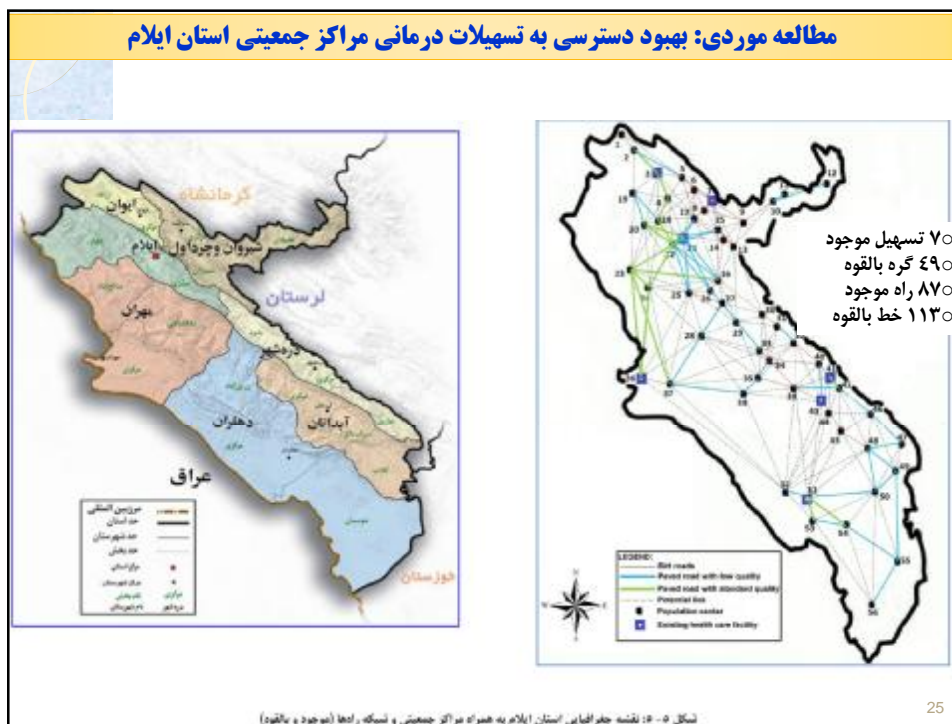
✓ این مدل تعمیمی از مسئله جانمایی  $p$  وسیله است، همچنین به عنوان P-UFLP شناخته می شود. اگر هزینه های ثابت را از تابع هدف حذف کنیم، این مدل تبدیل به بسط مدل  $p$ -median می شود.

✓ مسئله UFLNDP یک NP-hard است.

✓ در مسئله UFLNDP خاصیت Single-Assignment برقرار است به این معنا که هر تقاضا به طور کامل به نزدیک ترین وسیله اختصاص می یابد. در نتیجه تا زمانی که تقاضاها عدد صحیح هستند، در جواب بهینه متغیرهای  $W_i$  و  $Y_{ij}$  همواره عدد صحیح هستند.


✓ جواب بهینه برای این فرمولاسیون جواب بهینه سیستم Server-to-Customer را نیز می دهد.

✓ یک حل بهینه برای UFLNDP شامل  $p$  وسیله و  $p - |N|$  لینک می باشد. (در جواب بهینه، گره های وسیله هیچ لینک خارج شونده ای ندارند و بقیه گره ها دقیقاً یک لینک دارند)



## References

- Melkote, S., *Integrated Models of Facility Location and Network Design*. 1996, Doctor of Philosophy Thesis, NORTHWESTERN UNIVERSITY: EVASTON, ILLINIOS
- Melkote, S. and M.S. Daskin, *An Integrated Model of Facility Location and Transportation Network Design*. Transportation Research Part A, 2001.
- Ghaderi, A., Jabalameli, M.S., "Modeling the budget-constrained dynamic uncapacitated facility location-network design problem and solving it via two efficient heuristics: A case study of health care", *Mathematical and Computer Modelling*, 57, p.382-400, 2013



## Next Session: Railroad Transportation System

- a) Yard operations:
  - Petersen, E.R. (1977a) "Railyard Modeling. Part I. Prediction of Put-Through Time", *Transportation Science*, 11, 37-49.
- b) Railcar grouping (blocking):
  - Newton, H.N., Barnhart, C. and Vance, P.M. (1998) "Constructing railroad blocking plans to minimize handling costs", *Transportation Science*, 32, 330-345.
  - Ahuja, R.K., Jha, K.C. and Liu, J. (2007) "Solving real-life railroad blocking problems", *Interfaces*, 37, 404-419