



## Topology evaluation of Tehran subway network utilizing a bi-level mixed index for subway networks ranking

Amir Reza Mahdavi<sup>1</sup>, Amir Reza Mamdoohi<sup>2,\*</sup>, Mahdiah Allahviranloo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Graduate, Transportation Planning Department of Civil & Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Transportation Planning Department of Civil & Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Groove School of Engineering, The City College of New York, United States of America

**ABSTRACT:** As an essential infrastructure of cities, public transit networks have special importance in decreasing traffic congestion and air pollution and subway system is considered as the most efficient mode of public transit due to being green and mass transit. In this study, a mixed evaluation index composed of two components of shape and service points is proposed. The shape point is calculated utilizing network length, topology characteristics, station density, and average edge length (integer value between zero and ten). Annual passenger and passenger per unit length are used to calculate the service point (between zero and one). The study evaluated and compared subway networks for 52 cities around the world where according to this analysis New York city subway system is ranked 1, with a score of 8.506, and Tehran is ranked 29, with the score of 4.39. We also classified subway networks into three groups based on their connectivity and complexity indices using fuzzy c-means (FCM) clustering method and Tehran's subway system is classified as partially accessibility network. Results of proposed classification based on network complexity and connectivity using fuzzy c-means methods indicate that the Tehran subway is the developed subway system but London, Tokyo, and New York are the more developed subway system. Results of regression models based on the world trend for primary predicting of the needed number of stations and length of a network show that currently, length and number of stations of the Tehran subway network should be equal to 206.3 km (31.1 km deficiency) and 147 (8 stations deficiency), respectively.

### Review History:

Received: 2019-05-27

Revised: 2019-07-23

Accepted: 2019-08-13

Available Online: 2019-10-23

### Keywords:

Bi-level mixed index

Evaluation of subway networks

Subway networks classification

Subway

Tehran.

## 1. INTRODUCTION

Subway plays an important role in public transit of megacities because it utilizes clean fuel and has a large capacity. In this paper, the topology of subway networks is evaluated and ranked using a mixed index.

## 2. LITERATURE REVIEW

Formally the subway network is modeled as an undirected graph  $G(N, E)$  where  $N$  is a node-set and  $E$  is an edge set [1]. The nodes and edges correspond to stations and inter-station-spacing respectively. In previous studies [1-4], a mixed index involving various aspects of the subway network topology is not provided. Therefore, proposing a mixed index for evaluating and scoring of subway networks is the main purpose of this research.

## 3. METHODOLOGY

Based on connectivity and complexity indices and using the fuzzy c-means clustering method, 52 subway networks are categorized into three classes: under-developed, developed,

and advanced subway networks (Figure 2). based on the number of stations and the average length of lines utilizing fuzzy boundaries subway networks are classified into three groups: 1- regional accessibility (systems with longer lines and lower number of stations providing faster services), 2- local coverage (systems with shorter lines and many stations), and 3- regional coverage (a mix of the two).

Based on the equations (1) - (3) and lexicographic method, the topology point ( $P_N$ : an integer value between 0 and 10), the service point ( $P_S$ : a float number between 0 and 1), and the bi-level mixed index ( $P_T$ : is the sum of two other points) of each subway network is calculated and ranked. Annual passengers and number of passengers per unit length of network ( $x_{sj}$ ) are only effective factors on the service point while station density, average edge length, the total length of network, and average of connectivity, complexity, and cycle availability ( $x_{nj}$ ) are effective factors on the topology point (all indicators scaled into [0,1]).

$$P_N = \text{round} \left( 10 \times \frac{\sum_{j=1}^4 x_{nj}}{4} \right) \quad (1)$$

\*Corresponding author's email: armamdoohi@modares.ac.ir



$$P_S = \frac{\sum_{j=1}^2 x_{Sj}}{2} \tag{2}$$

$$P_T = P_N + P_S \tag{3}$$

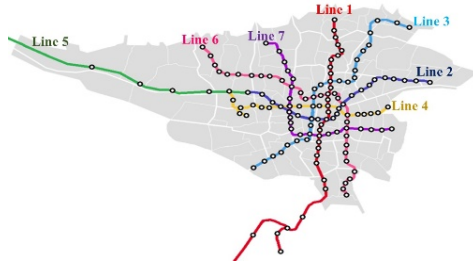


Fig. 1. Subway network of Tehran

Table 1. Tehran subway network properties

Index	Value
Total number of stations	139
Total number of transfer stations	19
Total number of edges	143
Total length of network (km)	175.2
Cycle availability	0.03
Network Complexity	1.05
Network Connectivity	0.35
Average of edges length (m)	1200
Station density (station/km <sup>2</sup> )	0.19

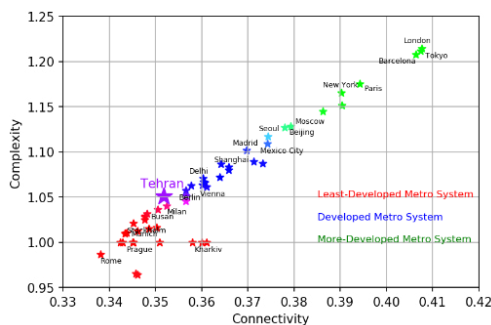


Fig. 2. Results of fuzzy c-means clustering for 52 cities in the world based on connectivity and complexity indices

Two regression models are developed for estimation of the number of needed stations and total length.

#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

Tehran subway network operating since 1998, currently consists of 7 lines (Figure 1). Line 5 serves suburban area between Tehran and Karaj (Table 1).

Based on connectivity and complexity indices utilizing fuzzy c-means clustering method (Figure 2), approximately the Tehran subway is recognized as a developed subway network while London and Tokyo subways are identified as advanced subway systems (network with many alternative routes [4]). Some cities like Rome and Prague have a least-developed subway network (network with few alternative paths [4]).

In this paper subway networks are classified utilizing

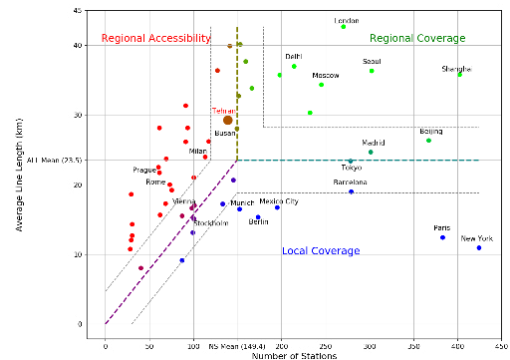


Fig. 3. Results of subway networks classification based on average line length and number of stations with fuzzy boundaries

Table 2. Ranking and details of scores of 52 subway networks in the world

Rank	City	Type*	Topology Score	Service Score	Total Score
1	New York	LC	8	0.51	8.51
2	London	RC	7	0.55	7.55
3	Barcelona	LC	6	0.48	6.48
...					
29	Tehran	RA	4	0.39	4.39
...					
52	Minsk	RA	2	0.06	2.06

\* LC: Local Coverage, RC: Regional Coverage, RA: Regional Acc

**Table 3. Results of regression model for total length of subway network based on world trend**

Independent Variable	Coefficient	p-value
Constant	27.89	0.12
GDP (USb\$)	0.18	0
Asia * GDP	-0.16	0.03
Population (millions)	16.98	0
America * Population	-12.45	0.09
Europe * Population	17.87	0.05
Area of city (km <sup>2</sup> )	0.03	0.01
Europe * Area of cities	-0.09	0.01
Model Significance	Adj R <sup>2</sup> = 0.797	F=29.01

**Table 4. Results of regression model for total number of subway network stations based on world trend**

Independent Variable	Coefficient	p-value
Constant	26.58	0.05
GDP (USb\$)	0.15	0
Asia * GDP	-0.07	0.1
Population (millions)	12.12	0
Europe * Population	4.86	0.1
Model Significance	Adj R <sup>2</sup> =0.73	F=34.71

proposed fuzzy boundaries (subway networks place on fuzzy boundaries get traits of both groups). Results indicate that the Tehran subway network places on the fuzzy boundary within regional accessibility and regional coverage groups.

According to the proposed mixed topology evaluation index (Table 2), the New York subway is the best network from topological aspects (with a score of 8.506). The rank of the Tehran subway is equal to 28 among 52 cities (with a score of 4.390).

**5. CONCLUSIONS**

- Results indicate that the Tehran subway is the developed subway system but London, Tokyo, and New York are the more developed subway system.
- Results show that Tehran subway network places on the boundary within the regional accessibility and the regional coverage class.

- Ranks of Tehran and New York subway networks are equal to 29 (with a score of 4.390) and 1 (with a score of 8.506), respectively.
- GDP, continent (dummy variable), city area, and population are the only significant variables in estimating the needed length of a subway network (with adjusted R<sup>2</sup> = 0.797).
- In estimating number of stations, significant variables are GDP, continent, and city population (with adjusted R<sup>2</sup> = 0.73).


**6. REFERENCES**

[1] G. Laporte, J. A. Mesa, F. A. Ortega, F. Perea. Planning rapid transit networks. *Socio-Economic Planning Sciences*, 45(3) (2011) 95-104.

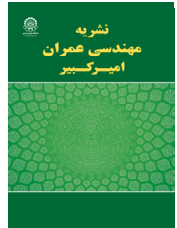
[2] S. Derrible, C. Kennedy. Applications of graph theory and network science to transit network design. *Transport reviews*, 31(4) (2011) 495-519.

[3] J. Zhang, M. Zhao, H. Liu, X. Xu. Networked characteristics of the urban rail transit networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(6) (2013) 1538-1546.

[4] N. Sharav, S. Bekhor, Y. Shiftan. Network Analysis of the Tel Aviv Mass Transit Plan. *Urban Rail Transit*, 4(1) (2018) 23-34.

<p><b>HOW TO CITE THIS ARTICLE</b></p> <p>A.R. Mahdavi, A.R. Mamdoohi, M. Allahviranloo, <i>Topology evaluation of Tehran subway network utilizing a bi-level mixed index for subway networks ranking, Amirkabir J. Civil Eng., 52(12) (2021) 737-740.</i></p> <p>DOI: <a href="https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16436.6226">10.22060/ceej.2019.16436.6226</a></p>	
--	---





## ارزیابی توپولوژی شبکه متروی تهران با استفاده از یک شاخص ترکیبی برای رتبه‌بندی شبکه‌های مترو

امیررضا مهدوی<sup>۱</sup>، امیررضا ممدوحی<sup>۲\*</sup>، مهدیه الله‌ویرنلو<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، نام، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، Groove School of Engineering, City College of New York, United States

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۳-۰۶

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۵-۰۱

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۵-۲۲

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۸-۰۱

### کلمات کلیدی:

شاخص ترکیبی

ارزیابی

مترو

رتبه‌بندی

تهران

**خلاصه:** شبکه‌های حمل و نقل همگانی، به عنوان یکی از زیرساخت‌های اساسی شهرها، در کاهش آلودگی هوا و ازدحام ترافیک نقش مهمی را ایفا می‌نمایند. برای انتخاب راهکار مناسب جهت توسعه شبکه مترو، به عنوان یکی از کاراترین شیوه‌های حمل و نقل همگانی، از شاخص‌های ارزیابی استفاده می‌گردد. در این پژوهش، شاخصی جهت ارزیابی شبکه‌های مترو ارائه می‌گردد که از ۴ معیار طول شبکه، ویژگی‌های توپولوژی، تراکم ایستگاه و متوسط طول کمان برای امتیاز شکل شبکه (عدد صحیحی بین صفر و ۱۰) و از دو معیار تعداد مسافر سالیانه و تعداد مسافر بر واحد طول به عنوان امتیاز سرویس‌دهی (بین صفر و یک) استفاده می‌گردد. بر اساس این شاخص شبکه متروی تهران با کسب امتیاز ۴/۳۹۰ در رتبه ۲۹ و شبکه متروی نیویورک با کسب امتیاز ۸/۵۰۶ در رتبه اول در بین ۵۲ شهر جهان قرار می‌گیرند. بر اساس معیارهای پیچیدگی و اتصال شبکه و با توجه به خوشه‌بندی فازی می‌توان گفت شبکه متروی تهران در مرز شبکه‌های متروی توسعه یافته قرار دارد. از طرفی با در نظر گرفتن معیارهای متوسط طول خط و تعداد ایستگاه‌های شبکه و مرزهای فازی ارائه شده، متروی تهران در مرز شبکه‌های دسترسی منطقه‌ای و پوشش منطقه‌ای قرار می‌گیرد. همچنین با توجه به مدل‌های رگرسیون ارائه شده برای تخمین اولیه طول و تعداد ایستگاه‌های شبکه مترو بر اساس روند جهانی، شهر تهران باید دارای شبکه‌ای با طول ۲۰۶/۳ کیلومتر طول (۳۱/۱ کیلومتر کمبود) و ۱۴۷ ایستگاه (۸ ایستگاه کمبود) باشد.

### مقدمه

که بر اساس آمارهای ارائه شده، هزینه ساخت یک کیلومتر مترو در حدود ۸۰ تا ۱۶۰ میلیون دلار است [۱]. همچنین بر اساس معیارهای مختلفی که برای طراحی یا توسعه شبکه مترو یک شهر وجود دارد، می‌توان شبکه‌های متفاوتی را به منظور ایجاد یا توسعه پیشنهاد داد. اما برای انتخاب مناسب‌ترین شبکه از بین شبکه‌های پیشنهادی باید بتوان آن‌ها را با یکدیگر از جنبه‌های مختلف مقایسه نمود. همچنین بسیار بدیهی است که یک ارزیابی مناسب و درست از شبکه حمل و نقل ریلی شهری، دید بسیار مناسب‌تری را به مهندسان حمل و نقل و برنامه‌ریزان و مدیران شهری جهت برنامه‌ریزی برای بهبود وضعیت شبکه می‌دهد. از این‌رو همواره یکی از چالش‌های مهم مهندسان حمل و نقل ارائه راهکارهایی جهت ارزیابی شبکه حمل و نقل همگانی به‌ویژه مترو هزینه ساخت یا توسعه بسیار زیاد آن است به نحوی

یکی از زیرساخت‌های حیاتی شهرها سیستم حمل و نقل همگانی آن‌ها است. در کلان‌شهرها معمولاً برای سرویس‌دهی بهتر به شهروندان، سیستم حمل و نقل همگانی متشکل از چندین شیوه‌ی متفاوت همانند اتوبوس عادی، اتوبوس‌های تندرو و ویژه، راه‌آهن سبک شهری و مترو و... است. یک سیستم حمل و نقل همگانی مناسب علاوه بر اینکه می‌تواند باعث کاهش ازدحام ترافیک، افزایش دسترسی و کاهش آلودگی هوا شود، می‌تواند باعث افزایش عدالت اجتماعی و زیباسازی فضای شهر گردد [۱]. در بین شیوه‌های مختلف حمل و نقل همگانی، مترو به دلیل مزایایی همچون ظرفیت زیاد و پاک بودن همواره از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است [۱]. از معایب شبکه‌های مترو هزینه ساخت یا توسعه بسیار زیاد آن است به نحوی

هدف پژوهش پیش‌رو، ارزیابی توپولوژی شبکه متروی شهر تهران

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: armamdoohi@modares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



$$S = \frac{R}{|N_{ISS}|} \quad (4)$$

○ مستقیم بودن سرویس<sup>۶</sup> (DS): نسبت تعداد مسیرهای مستقیم (بدون نیاز به تعویض خط) به تعداد کل مسیرهای شبکه NDP تعداد مسیرهای بدون نیاز به تعویض خط و NIDP تعداد مسیرهای نیازمند تعویض خط)

$$S = \frac{NDP}{NDP + NIDP} \quad (5)$$

گسترده‌گی سیستم<sup>۷</sup> یکی از شاخص‌های پیشنهاد شده برای ارزیابی شبکه حمل و نقل ریلی است [۶]. به دلیل اینکه برای محاسبه این شاخص از رابطه‌ای شبیه به رابطه محاسبه محیط دایره استفاده می‌گردد، این شاخص را با نماد  $\pi$  نمایش می‌دهند (رابطه (۶)). برای محاسبه این شاخص طول کل شبکه (R) را تقسیم بر طول بزرگ‌ترین کوتاه‌ترین مسیر (LSP) شبکه می‌نمایند. می‌توان گفت طول کل شبکه و بزرگ‌ترین کوتاه‌ترین مسیر به ترتیب نقش محیط و قطر یک دایره را ایفا می‌نمایند. لازم به ذکر است بزرگ‌ترین کوتاه‌ترین مسیر، مسیری از شبکه حمل و نقل ریلی است که دورترین نقاط شبکه را به یک دیگر متصل می‌نماید.

$$\pi = \frac{R}{LSP} \quad (6)$$

متوسط جریان در هر ایستگاه ( $\theta$ ) و متوسط طول شبکه بر مسافر (t) دو نماگر دیگری هستند که در ادبیات تخصصی برای ارزیابی شبکه پیشنهاد شده‌اند [۶]. متوسط جریان در هر ایستگاه از تقسیم تعداد کل مسافران (AP) بر تعداد ایستگاه‌های شبکه ( $|N_S|$ ) محاسبه می‌گردد (رابطه (۷)) همچنین برای محاسبه متوسط طول طول شبکه بر مسافر کافی طول کل شبکه (R) را بر تعداد کل مسافران (AP) تقسیم نمود (رابطه (۸)).

$$\theta = \frac{AP}{|N_S|} \quad (7)$$

$$t = \frac{R}{AP} \quad (8)$$

در مطالعاتی دیگر دو شاخص اثربخشی مسافر بر شبکه<sup>۸</sup> و اثربخشی مسافر بر صفحه<sup>۹</sup> برای ارزیابی شبکه پیشنهاد گردیده‌است

با فرض بهره‌برداری از خطوط ۶ و ۷ با استفاده از شاخص‌های مطرح شده در ادبیات تخصصی و ارائه یک شاخص ترکیبی برای رتبه‌بندی ۵۲ شبکه‌ی متروی دنیا است. در بخش بعدی مرور ادبیات تخصصی سپس روش‌شناسی، مدل‌سازی و تحلیل و در نهایت نتیجه‌گیری پژوهش ارائه می‌گردد.

## مرور ادبیات

در مطالعات پیشین محققان شاخص‌ها و راهکارهای مختلفی را به منظور ارزیابی شبکه حمل و نقل ریلی شهری بر مبنای نظریه گراف و برخی مفاهیم حمل و نقلی ارائه نموده‌اند که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته خواهد شد. به منظور به کار بردن این شاخص‌ها، ابتدا شبکه حمل و نقل ریلی شهری را تبدیل به گراف معادل دو بعدی<sup>۱</sup> (صفحه‌ای) می‌نمایند که آن را با نماد  $G(N_S, N_{ISS})$  نمایش می‌دهند که در آن  $N_S$  مجموعه ایستگاه‌های شبکه و  $N_{ISS}$  مجموعه فضاهای بین ایستگاهی<sup>۲</sup> یا کمان‌ها هستند. شاخص‌های زیر به منظور ارزیابی توپولوژی شبکه حمل و نقل ریلی شهری پیشنهاد گردیده‌است [۲-۵]:

○ دسترسی حلقه<sup>۳</sup> ( $\alpha$ ): نسبت تعداد حلقه‌های موجود در گراف معادل به تعداد کل حلقه‌های ممکن

$$\alpha = \frac{|N_{ISS}| - |N_S| + 1}{2|N_S| - 5} \quad (1)$$

○ پیچیدگی شبکه<sup>۴</sup> ( $\beta$ ): نسبت تعداد کمان‌های موجود به تعداد گره‌ها در گراف معادل

$$\beta = \frac{|N_{ISS}|}{|N_S|} \quad (2)$$

○ اتصال شبکه<sup>۵</sup> ( $\gamma$ ): نسبت تعداد کمان‌های موجود به بیشینه تعداد کمان‌های ممکن در گراف معادل

$$\gamma = \frac{|N_{ISS}|}{3(|N_S| - 2)} \quad (3)$$

○ طول کل شبکه (R): طول خالص کل شبکه بدون در نظر گرفتن هم‌پوشانی خطوط

○ متوسط طول کمان (S):

- 1 Planar Graph
- 2 Inter-Stations Spacing
- 3 Cycle Availability
- 4 Network Complexity
- 5 Network Connectivity

- 6 Directness of Service
- 7 System Spread
- 8 Passenger / Network
- 9 Passenger / Plane

آن‌ها برای بررسی این شاخص سه معیار اتصال گره<sup>۶</sup>، اتصال خط<sup>۷</sup> و اتصال ناحیه‌ای<sup>۸</sup> را در نظر گرفتند. یافته‌های آن‌ها حاکی از آن بود که بر اساس معیار اتصال گره، مرکز شهر تهران بهترین شرایط را دارد و از نظر معیار اتصال خط، مناطق ۱۲ و ۱۶ شهرداری تهران نسبت به سایر مناطق وضعیت بهتری دارند. در نهایت مطالعه آن‌ها حاکی از آن بود که مناطقی که زیرساخت‌های اتوبوسرانی و مترو بیشتری دارند، نسبت به سایر مناطق از اتصال ناحیه‌ای بیشتری برخوردار هستند [۱۵].

در مطالعه‌هایی دیگر بر اساس دو معیار پیچیدگی و اتصال شبکه، شبکه‌های مترو در سه سطح حداقل توسعه یافته<sup>۹</sup>، توسعه یافته<sup>۱۰</sup> و بیشتر توسعه یافته<sup>۱۱</sup> تقسیم‌بندی شده‌اند [۱۱ و ۱۶ الی ۱۸]. در مطالعه‌ای دیگر بر اساس دو معیار متوسط طول هر خط و تعداد کل ایستگاه‌ها، شبکه‌های مترو در ۳ دسته طبقه‌بندی شده‌اند، گروه اول شبکه‌های مترو دسترسی منطقه‌ای<sup>۱۲</sup> هستند این شبکه‌ها دارای متوسط طول خط زیاد و تعداد ایستگاه‌های کم هستند. گروه دوم شبکه‌های مترویی با پوشش منطقه‌ای<sup>۱۳</sup> نام گذاری شده‌اند که دارای متوسط طول خط زیاد و تعداد ایستگاه‌های زیاد هستند. در نهایت گروه سوم که دارای متوسط طول خط کم و تعداد ایستگاه‌های زیاد هستند، شبکه‌های پوشش محلی<sup>۱۴</sup> نام گذاری شده‌اند [۱۱].

در مطالعه‌ای دیگر، حقی و همکاران به ارزیابی رضایتمندی شهروندان از طراحی و جانمایی ایستگاه‌های مترو پرداختند و نتیجه گرفتند که عوامل موثر بر کیفیت ایستگاه‌های مترو شامل دسترسی، زیبایی، تسهیلات رفاهی ثانویه و نگهداری و مراقبت است. همچنین اقدامات اولویت‌دار برای افزایش رضایتمندی مردم از ایستگاه مترو احداث پارکینگ دوچرخه و موتور، بهبود دسترسی و حرکت معلولین و رنگ آمیزی و تصاویر دیوارها است [۱۹].

نصرتیان در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود به ارزیابی درجه پایداری محل ایستگاه‌های متروی شهر تهران پرداخت [۲۰]. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که حدود ۴۰ درصد از ایستگاه‌های متروی شهر تهران در شرایط ناپایدار قرار دارند. در مطالعه‌ای دیگر

[۷ و ۸]. شاخص اثربخشی مسافر بر شبکه بیانگر مجموع نسبت زمان سفرهای بین تمامی زوج مبدأ - مقصدهای روی شبکه به زمان سفر کل شبکه است. در حالی که شاخص اثر بخشی مسافر بر صفحه نسبت زمان سفر مسافران در شبکه حمل و نقل ریلی شهری و شبکه معابر شهری را مورد بررسی قرار می‌دهد.

متوسط درجه ایستگاه [۹] و پوشش شبکه [۱۰ و ۱۱] از دیگر شاخص‌های ارزیابی شبکه هستند. درجه هر ایستگاه ( $d_i$ ) بیانگر تعداد کمان‌های متصل به آن ایستگاه است. برای محاسبه متوسط درجه ایستگاه (AD) از رابطه ۹ استفاده می‌شود. پوشش شبکه نیز بیان می‌کند که چه نسبتی از مساحت شهر (A بر حسب کیلومتر مربع) توسط شبکه حمل و نقل ریلی شهری پوشش داده می‌شود (رابطه ۱۰). برای محاسبه پوشش شبکه فرض می‌شود که هر ایستگاه تا شعاع ۵۰۰ متری اطراف خود را پوشش می‌دهد.

$$AD = \frac{1}{|N_s|} \sum_i d_i \quad (9)$$

$$CVG = \frac{|N_s| \times \pi (0.5)^2}{A} \quad (10)$$

لوینسون<sup>۱</sup> برای ارزیابی ساختار شبکه شاخص‌های همچون اتصال شبکه، میزان درختی بودن<sup>۲</sup>، میزان حلقه‌ای بودن<sup>۳</sup>، دسترسی و انترویی<sup>۴</sup> را در نظر گرفت و با استفاده از این شاخص‌ها وضعیت ۵۰ شهر ایالات متحده آمریکا را بررسی نمود. نتایج حاکی از آن بود که هر چه جمعیت شهر بیشتر باشد، میزان اتصال شبکه بیشتر است [۱۲]. در مطالعه دیگری که توسط ونگ و همکاران انجام شد، با استفاده از نظریه گراف میزان تقویت‌شدگی در ۳۳ شبکه‌ی متروی دنیا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که شبکه متروی شهرهای توکیو و رم به خاطر داشتن مسیرهای جایگزین بیشتر، بهترین شرایط را از نظر تقویت‌شدگی در بین این ۳۳ شهر دارند [۱۳]. در مطالعه دیگری فنگ<sup>۵</sup> و همکاران با ترکیب معیارهای ترافیکی و شبکه، شبکه متروی شهر پکن را ارزیابی نمودند. نتایج حاکی از آن بود که مدل چند لایه استفاده شده، بهتر می‌تواند الگوهای ترافیکی شبکه مترو را تحلیل نماید [۱۴]. ممدوحی و زارعی به بررسی شاخص اتصال بین شیوه‌های مختلف حمل و نقل همگانی در شهر تهران پرداختند.

6 Node Connectivity  
7 Line Connectivity  
8 Regional Connectivity  
9 Least-Developed Metro System  
10 Developed Metro System  
11 More-Developed Metro System  
12 Regional Accessibility  
13 Regional Coverage  
14 Local Coverage

1 Levinson  
2 Treeness  
3 Circuity  
4 Entropy  
5 Feng

$$P_N = \text{round} \left( 10 \times \frac{\sum_{j=1}^4 X_{Nj}}{4} \right) \quad (11)$$

$$P_S = \frac{\sum_{j=1}^2 X_{Sj}}{2} \quad (12)$$

$$P_T = P_N + P_S \quad (13)$$

که در روابط فوق،  $X_{N1}$  امتیاز طول کل شبکه،  $X_{N2}$  امتیاز شکل شبکه (میانگین سه نامگر اتصال  $(\gamma)$ ، پیچیدگی  $(\beta)$  و در دسترس بودن حلقه  $(\alpha)$ )،  $X_{N3}$  امتیاز تراکم ایستگاه<sup>۳</sup> در واحد سطح،  $X_{N4}$  امتیاز متوسط طول کمان،  $X_{S1}$  امتیاز تعداد مسافران سالیانه<sup>۴</sup> شبکه،  $X_{S2}$  امتیاز تعداد مسافر بر واحد طول<sup>۵</sup> شبکه،  $P_N$  امتیاز توپولوژی شبکه (یک عدد صحیح در بازه صفر تا ۱۰)،  $P_S$  امتیاز سرویس‌دهی شبکه (یک عدد اعشاری در بازه صفر و یک) و  $P_T$  امتیاز کل شبکه هستند. در این سیستم امتیازدهی سطح اول رتبه‌بندی براساس توپولوژی شبکه و سطح دوم بر اساس سرویس‌دهی شبکه مترو است. بدین صورت که ابتدا شبکه‌های مترو بر اساس امتیاز توپولوژی مرتب می‌شوند و چنانچه دو شبکه مترو دارای امتیاز توپولوژی یکسان باشند، شبکه با امتیاز سرویس‌دهی بیشتر، در رتبه بالاتر قرار خواهد گرفت. تمامی ۶ معیاری که در روابط (۱۱) و (۱۲) آورده شده‌اند، ابتدا با استفاده از تبدیل‌های خطی زیر در بازه صفر و یک قرار می‌گیرند سپس در روابط فوق قرار داده می‌شوند. لازم به ذکر است که اگر بزرگ‌تر بودن ملاک بهتر بودن آن معیار باشد از رابطه (۱۴) و اگر کوچک‌تر بودن آن، ملاک بهتر بودن آن معیار (متوسط طول کمان) باشد از رابطه (۱۵) برای تبدیل استفاده می‌شود.

$$X_m = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$X_m = -\frac{x - x_{max}}{x_{max} - x_{min}} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

دلیل استفاده از طول کل شبکه ( $R$ ) آن است که هر چه طول یک شبکه بیشتر باشد، آن شبکه نقاط بیشتری از شهر را پوشش می‌دهد در نتیجه شبکه بهتر خواهد بود. دسترسی حلقه  $(\alpha)$ ، پیچیدگی

موسیوند و حق‌شناس به ارزیابی شبکه متروی اصفهان پرداختند [۲۱]. نتایج کار آن‌ها بیانگر آن بود که شبکه متروی شهر اصفهان از لحاظ سرانه جمعیت نزدیک به متوسط و از لحاظ دسترسی بالاتر از متوسط جهانی قرار دارد.

در ادبیات تخصصی، هر یک از مطالعات به ارزیابی تنها یک جنبه مختلف از یک شبکه حمل و نقل ریلی شهری پرداخته‌اند. از این رو در پژوهش جاری سعی بر آن است، شاخص ترکیبی که در برگیرنده ویژگی‌های مختلف توپولوژی و سرویس‌دهی یک شبکه حمل و نقل ریلی شهری است، ارائه گردد و با استفاده از آن شبکه متروی شهرهای مختلف دنیا بررسی گردد.

### روش‌شناسی

در این پژوهش برای تحلیل و مدل‌سازی داده‌های ۵۱ شهر جهان به همراه شهر تهران جمع‌آوری شد. ملاک انتخاب این شهرها نوع و پراکندگی از نظر جمعیت، مساحت، کشور، قاره، سال تاسیس شبکه مترو و... بوده‌است.

ابتدا با در نظر گرفتن دو معیار اتصال و پیچیدگی، شبکه‌های مترو در سه دسته: کمتر توسعه یافته، توسعه یافته و بیشتر توسعه یافته تقسیم‌بندی می‌شوند. در این پژوهش به جای استفاده از مرزهای دقیق ارائه شده در ادبیات تخصصی [۱۱ و ۱۶ الی ۱۸] از روش خوشه‌بندی فازی<sup>۱</sup> برای دسته‌بندی استفاده می‌شود. همچنین شبکه‌های مترو از نظر پوشش با توجه به معیارهای متوسط طول خطوط شبکه و تعداد کل ایستگاه‌های شبکه به سه دسته دسترسی منطقه‌ای (شبکه با متوسط طول خطوط زیاد و تعداد ایستگاه‌های کم)، پوشش منطقه‌ای (شبکه با متوسط طول خطوط زیاد و تعداد ایستگاه‌های زیاد) و پوشش محلی (شبکه با متوسط طول خطوط کم و تعداد ایستگاه‌های زیاد) تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۱]. با توجه به ماهیت فازی این نوع دسته‌بندی، در پژوهش پیش رو، علاوه بر مرزهای دقیق از مرزهای فازی نیز به جهت جلوگیری از تغییرات ناگهانی استفاده می‌گردد.

به منظور ارزیابی و مقایسه شبکه‌های مترو با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره لکسیکوگراف<sup>۲</sup>، سیستم امتیازدهی دو سطحی مطابق با روابط (۱۱) الی (۱۳) پیشنهاد می‌گردد:

3 Station Density  
4 Annual passengers  
5 Passengers per unit length

1 Fuzzy c-means (FCM)  
2 Lexicographic



طول کمان طراحی شده‌اند. بنابراین طول کوتاه‌تر کمان موجب کاهش کارایی شبکه نخواهد شد.

هر چه یک شبکه بتواند به تعداد مسافر سالیانه بیشتری در سال سرویس بدهد، نشان‌دهنده بهتر بودن ناوگان شبکه و دسترسی بهتر شبکه به نواحی مختلف شهر است. لازم به ذکر است که در این جا به دلیل در دسترس نبودن داده‌های کافی از رقابت شیوه‌های مختلف سفر با شیوه مترو صرف نظر شده‌است. همچنین نماگر تعداد مسافر بر واحد طول شبکه بیان می‌کند هر یک کیلومتر از طول شبکه به چند مسافر سرویس‌دهی می‌نماید. واحد طول شبکه هر اندازه بتواند به تعداد مسافر بیشتری سرویس‌دهی نماید شبکه کارا تر خواهد بود.

بر اساس داده موجود ۵۱ شهر جهان و همچنین شهر تهران، ابتدا با استفاده از روابط (۱۱) الی (۱۳) امتیاز شبکه متروی هر کدام از آن‌ها محاسبه می‌گردد و شهرها بر اساس امتیاز کسب شده رتبه‌بندی می‌شوند. همچنین با توجه به اینکه طول شبکه و تعداد ایستگاه‌های شبکه از نماگرهای بسیار مهم در بحث توپولوژی شبکه هستند، به منظور تعیین متغیرهای تاثیرگذار بر آن‌ها و ارائه تخمین اولیه از آن‌ها بر اساس داده ۵۱ شهر جهان (به جز شهر تهران) و با استفاده از رگرسیون دو مدل برای تخمین اولیه تعداد ایستگاه‌ها و طول مورد نیاز شبکه مترو بر اساس روند جهانی ارائه می‌گردد.

### مدل‌سازی و تحلیل

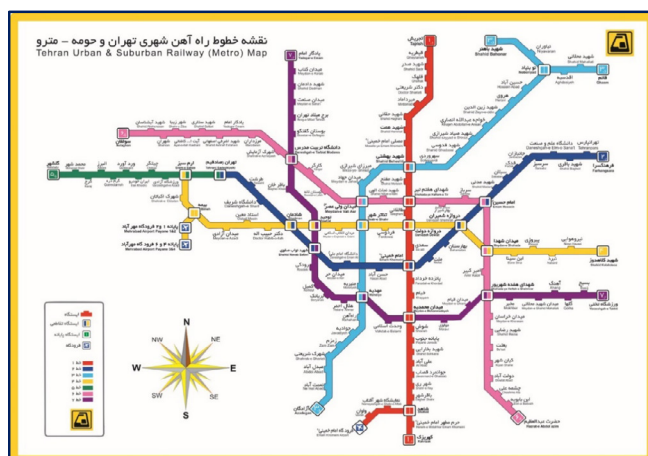
با فرض بهره‌برداری از خطوط ۶ و ۷، نقشه خطوط متروی شهر تهران به صورت شکل ۱ است که دارای طول ۱۷۵/۵ کیلومتر و تعداد ایستگاه

شبکه (β) و اتصال شبکه (γ) نماگرهای هندسه شبکه هستند که بیانگر رابطه‌ی بین تعداد کمان‌ها و تعداد گره‌های گراف معادل شبکه حمل و نقل ریلی شهری هستند. با توجه به اینکه هر چه این معیارها بزرگ‌تر باشند، شبکه تقویت‌شده‌تر خواهد بود (به دلیل وجود مسیرهای جایگزین بیشتر)، از میانگین این سه نماگر در محاسبه امتیاز شبکه استفاده شده است. همچنین مطابق با مطالعات پیشین مشخص می‌گردد که در ادبیات تخصصی برای میزان پوشش شبکه فرض شده است که هر ایستگاه تا شعاع ۵۰۰ متری خود را پوشش می‌دهد و بر این اساس رابطه (۱۰) برای نسبت پوشش شبکه ارائه شده‌است [۱۰ و ۱۱]. اما مشکل این رابطه آن است که اگر دو ایستگاه به یک‌دیگر نزدیک باشند امکان همپوشانی وجود دارد در نتیجه ممکن است رابطه مقدار پوشش شبکه را بیش از مقدار واقعی تخمین بزند. بنابراین در پژوهش جاری به جای استفاده از رابطه (۱۰) برای پوشش شبکه، از تراکم ایستگاه ( $N_{SD}$ ) برحسب تعداد ایستگاه در کیلومتر مربع استفاده می‌گردد. متوسط طول کمان‌ها (فضاهای بین ایستگاهی) از دیگر نماگرهایی است که برای محاسبه امتیاز شبکه استفاده شده است. هر چه متوسط طول کمان‌ها کمتر باشد یعنی ایستگاه‌های شبکه به یک‌دیگر نزدیک‌تر هستند و پوشش و دسترسی شبکه بهتر است. شاید در نگاه اول این انتظار به وجود آید که هر چه متوسط طول کمان‌ها کوچک‌تر باشد، تعداد توقف‌ها (ایستگاه‌ها) در واحد طول بیشتر خواهد شد و در نتیجه کارایی شبکه افت خواهد کرد. اما لازم به ذکر است از آنجایی که در طراحی شبکه‌های مترو قید حداقل طول کمان‌ها به منظور جلوگیری از کاهش کارایی شبکه به دلیل توقف‌های زیاد در نظر گرفته می‌شود، از این‌رو شبکه‌های مترو موجود با در نظر گرفتن حداقل

جدول ۱. مشخصات شبکه متروی شهر تهران

Table 1. Properties of Tehran metro network

مقدار	نماگر/ شاخص ارزیابی شبکه	مقدار	نماگر/ شاخص ارزیابی شبکه
1/050	پیچیدگی شبکه (β)	19	تعداد کل ایستگاه‌های تبادلی بین خطوط (NTS)
0/352	اتصال شبکه (γ)	3	تعداد کل ایستگاه‌های تبادلی درون خطی
0/204	مستقیم بودن سرویس‌ها (DS)	139	تعداد کل ایستگاه‌ها (Ns)
1200	متوسط طول کمان‌ها (S) (متر)	146	تعداد کل کمان‌ها (N <sub>ISS</sub> )
39/2	طول بزرگ‌ترین کوتاه‌ترین مسیر (کیلومتر)	175/2	طول کل شبکه (R) (کیلومتر)
4/470	گسترده‌گی سیستم (π)	6	تعداد خطوط شبکه (NL)
2/144	درجه متوسط هر ایستگاه (AD)	8	تعداد حلقه‌های موجود در شبکه (C)
0/190	تراکم ایستگاه (N <sub>SD</sub> ) (ایستگاه بر کیلومتر مربع)	0/029	دسترسی حلقه (α)
		3/560	جمعیت تحت پوشش شبکه (میلیون نفر)



شکل ۱. نقشه خطوط متروی شهر تهران و حومه

Fig. 1. Urban and suburban metro lines of Tehran

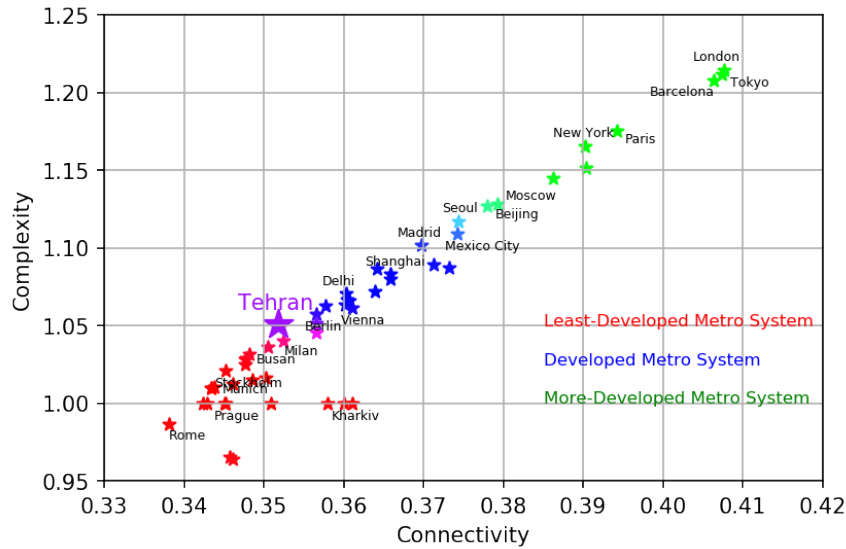
جدول ۲. رتبه‌بندی و جزئیات امتیاز ۵۲ شبکه متروی دنیا

Table 2. Ranking and detailed points of 52 metro network in the world

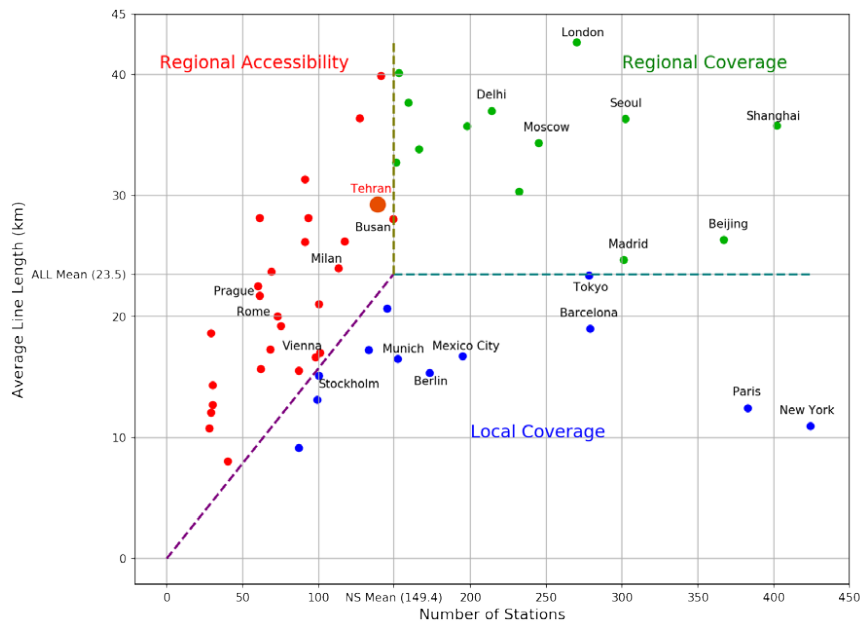
رتبه	شهر	نوع*	امتیاز توپولوژی	امتیاز سرویس دهی	امتیاز کل	رتبه	شهر	نوع*	امتیاز توپولوژی	امتیاز سرویس دهی	امتیاز کل
1	نیویورک	LC	8	0/506	8/506	27	چنگدو	RC	4	0/404	4/404
2	لندن	RC	7	0/546	7/546	28	استکهلم	LC	4	0/394	4/394
3	بارسلونا	LC	6	0/482	6/482	29	تهران	RA	4	0/390	4/390
4	سئول	RC	6	0/408	6/408	30	ناگویا	RA	4	0/313	4/313
5	توکیو	LC	6	0/391	6/391	31	سانتیاگو	LC	4	0/286	4/286
6	پاریس	LC	6	0/281	6/281	32	وین	RA	4	0/279	4/279
7	شانگهای	RC	5	0/682	5/682	33	اوساکا	LC	4	0/265	4/265
8	پکن	RC	5	0/670	5/670	34	لوس آنجلس	RA	3	0/509	3/509
9	مسکو	RC	5	0/560	5/560	35	روتردام	RA	3	0/481	3/481
10	واشنگتن	RA	5	0/505	5/505	36	تیانجین	RA	3	0/469	3/469
11	مادرید	RC	5	0/504	5/504	37	تاشکن	RA	3	0/446	3/446
12	مونخ	LC	5	0/409	5/409	38	هامبورگ	RA	3	0/432	3/432
13	برلین	LC	5	0/396	5/396	39	لیل	RA	3	0/418	3/418
14	شن ژن	RC	5	0/385	5/385	40	مارسی	RA	3	0/324	3/324
15	بوستن	RA	5	0/384	5/384	41	تورنتو	RA	3	0/317	3/317
16	سنگاپور	RA	5	0/353	5/353	42	رم	RA	3	0/294	3/294
17	تایپه	RA	5	0/293	5/293	43	میلان	RA	3	0/286	3/286
18	مکزیکو سیتی	LC	5	0/262	5/262	44	مونترال	RA	3	0/273	3/273
19	بوینس آیرس	LC	5	0/104	5/104	45	آتن	RA	3	0/255	3/255
20	گوانگژو	RC	4	0/486	4/486	46	سن پیترزبورگ	RA	3	0/254	3/254
21	شیکاگو	LC	4	0/483	4/483	47	خارکیف	RA	3	0/205	3/205
22	اسلو	RA	4	0/469	4/469	48	لیون	RA	3	0/189	3/189

دسته کمتر توسعه یافته، توسعه یافته و بیشتر توسعه یافته تقسیم‌بندی می‌شوند. هر چه مقدار اتصال و پیچیدگی شبکه بیشتر باشد، شبکه مقاوم‌تر خواهد بود و در صورت بروز حوادث می‌تواند کارایی خود را بهتر حفظ نماید. در این پژوهش، با توجه به ماهیت فازی این دسته‌بندی‌ها، از روش خوشه‌بندی فازی FCM استفاده شده است (شکل ۲)، که شهر تهران بین گروه توسعه یافته و کمتر توسعه یافته قرار می‌گیرد. بر این اساس، شبکه متروی شهرهایی همچون لندن، توکیو، پاریس و نیویورک در گروه شبکه‌های بیشتر توسعه یافته قرار می‌گیرند، در حالی که شبکه متروی شهرهایی همچون شانگهای، مادرید و دهلی در دسته توسعه یافته قرار خواهند گرفت. می‌توان گفت شبکه متروی شهرهایی

۱۳۹ خواهد بود. با توجه به اینکه خط ۵ (صادقیه - گلشهر) به حومه تهران سرویس‌دهی می‌نماید در تحلیل و ارزیابی شبکه متروی شهر تهران از آن صرف نظر گردیده است. شاخص‌های مطرح در بخش مرور ادبیات برای شهر تهران در جدول ۱ آورده شده است. همچنین با توجه به اطلاعات گردآوری شده می‌توان بیان نمود که تا سال ۲۰۱۸ شبکه متروی شهر شانگهای چین دارای بیشترین طول (۶۴۴ کیلومتر) و شبکه متروی شهر نیویورک ایالات متحده آمریکا دارای بیشترین تعداد ایستگاه (۴۲۴ ایستگاه) در سراسر دنیا هستند. امتیاز محاسبه شده شبکه‌های مترو در جدول ۲ آورده شده است. شبکه‌های مترو بر اساس مقدار اتصال و پیچیدگی شبکه به سه



شکل ۲. نتایج خوشه‌بندی فازی FCM برای ۵۲ شهر جهان بر اساس شاخص‌های اتصال و پیچیدگی  
 Fig. 2. Results of fuzzy c-means clustering for 52 cities in the world based on connectivity and complexity indices

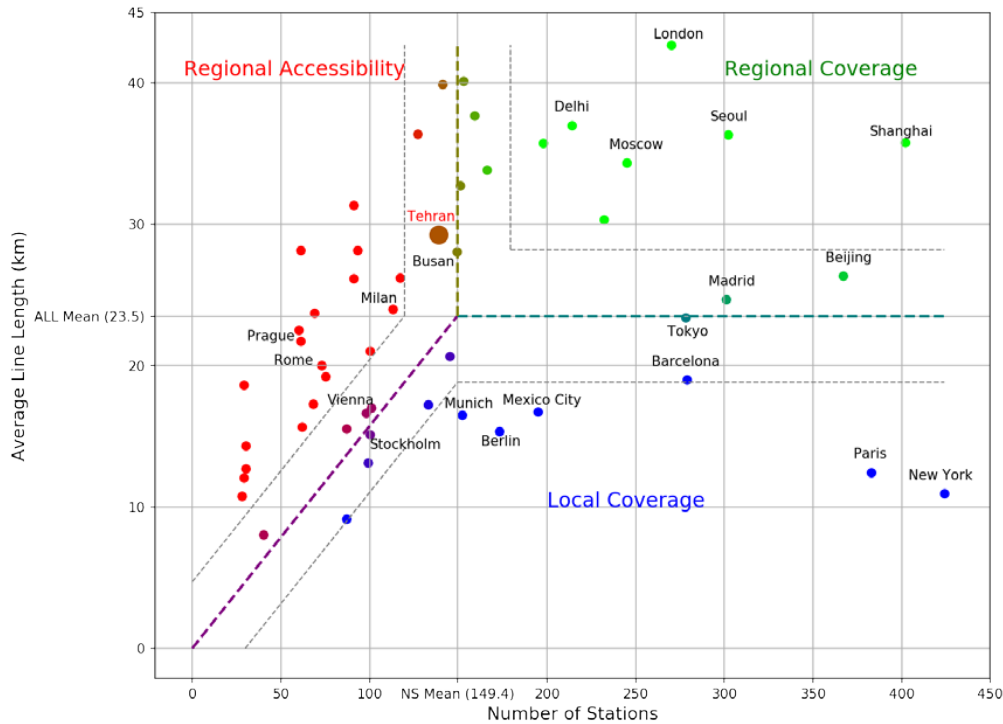


شکل ۳. نتایج تقسیم‌بندی شبکه‌های مختلف بر اساس معیارهای متوسط طول خط و تعداد ایستگاه‌های شبکه  
 Fig. 3. Results of metro network classification based on average line length and number of stations

خط زیاد و تعداد ایستگاه زیاد را شبکه‌های پوشش منطقه‌ای (RC) و شبکه‌های دارای متوسط طول خط کم و تعداد ایستگاه‌های زیاد را شبکه‌های پوشش محلی (LC) می‌نامند. برای این گروه‌بندی، از میانگین متوسط طول خط ( $ALL_{mean}$ ) و میانگین تعداد ایستگاه‌های ( $NS_{mean}$ ) شبکه‌های متروی مورد بررسی استفاده می‌گردد (شکل ۳). مطابق با شکل ۳ می‌توان گفت که شبکه متروی تهران در گروه شبکه‌های دسترسی منطقه‌ای (RA) قرار می‌گیرد که این مرزبندی

همانند مونیخ، پراگ، رم و روتردام جز شبکه‌های کمتر توسعه یافته و شبکه متروی شهرهای پکن، مسکو و سنئول در مرز شبکه‌های بیشتر توسعه یافته قرار دارند.

دسته‌بندی دیگری برای شبکه‌های مترو بر اساس معیارهای متوسط طول خط و تعداد کل ایستگاه‌های شبکه ارائه شده است و بر اساس آن شبکه‌های دارای متوسط طول خط زیاد و تعداد ایستگاه کم را شبکه‌های دسترسی منطقه‌ای (RA)، شبکه‌های دارای متوسط طول



شکل ۴. نتایج تقسیم‌بندی شبکه‌های مترو بر اساس معیارهای متوسط طول خط و تعداد ایستگاه‌های شبکه با مرزهای فازی  
**Fig. 4. Results of metro network classification based on average line length and number of stations with fuzzy boundaries**

۵۲ شهر مورد بررسی در رتبه ۲۹ قرار می‌گیرد، در حالی که متروی شهر نیویورک (با امتیاز ۸/۵۰۶) در رتبه اول قرار می‌گیرد. شبکه‌های متروی گروه‌های پوشش منطقه‌ای (میانگین ۵/۱۱۸ و واریانس ۱/۴۶۷) و پوشش محلی (میانگین ۵/۵۲۲ و واریانس ۱/۵۳۵) امتیاز بیشتری نسبت به شبکه‌های دسترسی منطقه‌ای (میانگین ۳/۷۴۶ و واریانس ۰/۷۸۶) کسب کرده‌اند. برای مشخص کردن معناداری اختلاف میانگین امتیاز کسب شده گروه‌های مختلف از تحلیل واریانس<sup>۱</sup> استفاده می‌گردد. نتایج حاکی از آن است که بین میانگین امتیاز کسب شده هر سه گروه از نظر آماری اختلاف معناداری وجود دارد (آماره F برابر با ۱۴/۶۳۵) اما بین دو گروه پوشش منطقه‌ای و پوشش محلی اختلاف از نظر آماری معنادار نیست (آماره F برابر با ۰/۶۷۹). با توجه به ادبیات تخصصی مشخص می‌گردد که شبکه‌های مترویی که در دو گروه پوشش منطقه‌ای و پوشش ناحیه‌ای قرار دارند، نسبت به آن‌هایی که در گروه دسترسی ناحیه‌ای قرار می‌گیرند، شرایط و عملکرد بهتری دارند. با توجه به اینکه شاخص ترکیبی ارائه شده در این پژوهش توانسته اختلاف معناداری بین گروه‌های پوشش محلی و پوشش منطقه‌ای با

دقیق چندان نمی‌تواند مطلوب باشد، زیرا شهرهایی مثل توکیو و بوسان بسیار به مرزها نزدیک هستند و یک فاصله بسیار ناچیز از مرز گروه آن‌ها را تعیین نموده‌است. این مورد برای شهرهایی همچون وین و استکهلم نیز صادق است که فاصله‌ی بسیار کمی از یک‌دیگر دارند اما در دو گروه متفاوت قرار گرفته‌اند. برای جلوگیری از این تغییرات ناگهانی، به جای مرزهای دقیق، مرزها به صورت فازی در نظر گرفته شده‌اند تا تغییرات با شیب ملایم‌تری صورت گیرد (شکل ۴). یعنی، به جای آنکه یک خط تعیین کننده مرز باشد، یک نوار، مرز بین دو ناحیه را تعیین می‌نماید و شبکه‌های مترویی که در این نوارها قرار می‌گیرند، جزئی از هر دو گروه هستند. میزان عضویت در هر گروه با درجه عضویت آن شبکه تعیین می‌گردد که این درجه عضویت با فاصله اقلیدوسی شبکه متروی از لبه‌های نوار (شکل ۴) رابطه عکس دارد. برای تعیین لبه‌های این نوارها ۲۰ درصد کمتر و بیشتر از میانگین متوسط طول خط و میانگین تعداد ایستگاه‌های شبکه در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، شبکه متروی تهران در نوار مرزی دو گروه دسترسی منطقه‌ای و پوشش منطقه‌ای قرار می‌گیرد.

بر اساس جدول ۲، متروی شهر تهران (با امتیاز ۴/۳۹۰) در بین

1 ANOVA

جدول ۳. نتایج مدل رگرسیون برای تخمین اولیه طول کل شبکه مترو بر اساس روند جهانی

Table 3. Results of regression model for total length of metro network based on world trend

رتبه	شهر	نوع*	امتیاز توپولوژی	امتیاز سرویس دهی	امتیاز کل	رتبه	شهر	نوع*	امتیاز توپولوژی	امتیاز سرویس دهی	امتیاز کل
23	دهلی	RC	4	0/468	4/468	49	پراگ	RA	3	0/071	3/071
24	بوسان	RA	4	0/464	4/464	50	نانجینگ	RC	2	0/513	2/513
25	ووهان	RC	4	0/453	4/453	51	سندای	RA	2	0/420	2/420
26	چونگ کینگ	RC	4	0/452	4/452	52	مینسک	RA	2	0/063	2/063

آن است که عدد ثابت در مدل تخمین اولیه تعداد ایستگاه‌های شبکه مترو معنادار شده‌است. همچنین از مقایسه جدول‌های ۳ و ۴ مشخص می‌گردد که مساحت شهر فقط در مدل تخمین اولیه طول شبکه معنادار شده است. جدول ۴ بیان می‌کند که با افزایش میزان تولید ناخالص داخلی و جمعیت، تعداد ایستگاه‌های مترو نیز افزایش خواهد یافت. همچنین با توجه به جدول ۳ می‌توان گفت با افزایش تولید ناخالص داخلی، جمعیت و مساحت شهر، طول شبکه مترو نیز افزایش خواهد یافت. در نهایت می‌توان گفت مطابق با نتایج جدول‌های ۳ و ۴ مشخص می‌گردد که شبکه‌های مترو واقع در قاره اروپا تعداد ایستگاه و طول بیشتری را به ازای هر یک میلیون نفر جمعیت دارند. همچنین نتایج مدل‌ها حاکی از آن است که شهرهای واقع در قاره آسیا، به طور میانگین تعداد ایستگاه و طول شبکه کمتری را به ازای یک واحد تولید ناخالص داخلی (GDP) در مقایسه با سایر نقاط دنیا دارند. مدل پیشنهادی برای تخمین طول مورد نیاز شبکه مترو بر اساس روند جهانی بیانگر آن است که شبکه‌های مترو واقع در قاره آمریکا، طول کمتری را نسبت به سایر نقاط دنیا، به ازای یک واحد جمعیت دارند. در نهایت تخمین اولیه برای شهر تهران حاکی از آن است که بر اساس روند جهانی شهر تهران در شرایط کنونی باید دارای شبکه‌ای با طول ۲۰۶/۳ کیلومتر (۳۱/۱ کیلومتر کمبود) و ۱۴۷ ایستگاه (۸ ایستگاه کمبود) باشد.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ارزیابی درست جنبه‌های مختلف شبکه حمل و نقل همگانی شهرها همواره از چالش‌های مهندسان حمل و نقل بوده‌است، زیرا بدون آن نمی‌توان برنامه‌ریزی مناسبی برای مدیریت ترافیک شهرها داشت. مترو به دلیل ویژگی‌های مثبتی، همچون ظرفیت زیاد و پاک بودن همواره از

گروه دسترسی منطقه‌ای ایجاد نماید، می‌توان گفت شاخص ارائه شده از این نظر کارایی قابل قبولی دارد.

نتایج مدل رگرسیون خطی برای تخمین تعداد ایستگاه‌ها و طول مورد نیاز برای شبکه متروی یک شهر بر اساس روند جهانی مطابق با جدول‌های ۳ و ۴ است. از آنجایی که شبکه متروی شهرهای مختلف دنیا توسط مهندسان حمل و نقل و برنامه‌ریزان شهری طراحی شده است، لذا می‌توان با در نظر گرفتن وضعیت شبکه مترو شهرهای مختلف، برآیندی از نظرات کارشناسی آن‌ها برای تخمین اولیه طول و تعداد ایستگاه مورد نیاز برای یک شهر ارائه نمود. بدیهی است برای پیشنهاد دادن دقیق طول و تعداد ایستگاه‌های مورد نیاز برای یک شهر به مطالعات بسیار دقیق و اطلاعات جامعی نیاز است. اما در اینجا سعی بر آن بوده است که با توجه به داده‌های موجود مدلی برای تخمین اولیه تعداد ایستگاه‌های مورد نیاز برای یک شهر بر اساس روند جهانی ارائه گردد. لازم به ذکر است با توجه به تعداد متغیرهای مستقل کمی که وجود داشته‌است و با توجه به ارزشمند بودن داده‌ها و همچنین توضیح‌پذیری بهتر مدل‌ها، سطح معناداری متغیرها برابر با ۱۰ درصد در نظر گرفته شده‌است. در مدل‌های ارائه شده از سه متغیر ساختگی<sup>۱</sup> با نام‌های Europe (اگر شهر مورد نظر واقع در قاره اروپا باشد یک در غیر اینصورت صفر)، Asia (اگر شهر مورد نظر واقع در قاره آسیا باشد یک در غیر این صورت صفر) و America (اگر شهر مورد نظر واقع در قاره آمریکا باشد یک و در غیر این صورت صفر) استفاده شده‌است. متغیر Pop بیانگر جمعیت شهر و متغیر Area بیانگر مساحت شهر هستند. جدول ۳ حاکی از آن است که در مدل تخمین اولیه طول شبکه مترو عدد ثابت بی معنی شده‌است، در حالی که نتایج جدول ۴ بیانگر

1 Dummy

قرار دارد. همچنین شبکه‌های متروی شهرهایی همچون لندن، توکیو، بارسلونا و نیویورک در گروه شبکه‌های بیشتر توسعه یافته قرار می‌گیرند. بر اساس دو معیار متوسط طول خط و تعداد ایستگاه‌های شبکه و با در نظر گرفتن مرزهای فازی، شبکه متروی تهران در نوار مرزی شبکه‌های دسترسی منطقه‌ای و پوشش منطقه‌ای قرار دارد. شبکه متروی لندن در گروه شبکه‌های پوشش منطقه‌ای و شبکه متروی نیویورک در گروه شبکه‌های پوشش ناحیه‌ای و شبکه متروی توکیو در نوار مرزی شبکه‌های پوشش منطقه‌ای و پوشش محلی قرار دارند. تخمین اولیه برای شهر تهران بر اساس مدل‌های رگرسیون ارائه شده برای تخمین طول و تعداد ایستگاه‌های شبکه مترو بر اساس روند جهانی حاکی از آن است که باید دارای شبکه‌ای با طول  $206/3$  کیلومتر طول ( $31/1$  کیلومتر کمبود) و  $147$  ایستگاه ( $8$  ایستگاه کمبود) باشد.

از آن‌جا که در بسیاری از شهرها از شیوه‌هایی همانند قطار سبک شهری و اتوبوس‌های تندرو جهت سیستم تغذیه‌کننده مترو استفاده می‌شود، پیشنهاد می‌گردد برای ادامه کار شاخصی جامع‌تر با در نظر گرفتن این شیوه‌ها ارائه گردد. همچنین با توجه به اهمیت شبکه مترو بعد از بروز بحران، توصیه می‌گردد شبکه متروی تهران از نظر تقویت‌شدگی مورد ارزیابی قرار گیرد. در نهایت، توصیه می‌گردد برای توسعه شبکه مترو، خطوط جدید به نحوی جا نمایی شوند که میزان اتصال و پیچیدگی شبکه افزایش یابد تا تقویت‌شدگی آن بهبود یابد.

### قدردانی

نویسندگان لازم می‌دانند که از سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران بابت در اختیار گذاشتن داده‌های شبکه متروی تهران، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایند.

### مراجع

- [1] D. Pulido, G. Darido, R. Munoz-Raskin, J. Moody. *The urban rail development handbook*. World Bank Group Press, (2018).
- [2] W. L. Garrison, D. F. Marble. Factor-analytic study of the connectivity of a transportation network. *Papers in Regional Science*, 12(1) (1964) 231-238.
- [3] W. L. Garrison, D. F. Marble. *A prolegomenon to the*

جدول ۴. نتایج مدل رگرسیون برای تخمین اولیه تعداد کل ایستگاه‌های شبکه مترو بر اساس روند جهانی

Table 4. Results of regression model for total number of metro network stations based on world trend

مقدار P	آماره t	ضریب	متغیر مستقل
1/119	1/59	27/891	عدد ثابت
0/002	3/30	0/180	GDP (USb\$)
0/027	-2/29	-0/161	Asia * GDP
0/000	5/51	16/979	Pop (میلیون نفر)
0/088	-1/74	-12/454	America * Pop
0/048	2/03	17/867	Europe * Pop
0/008	2/80	0/031	Area (کیلومتر مربع)
0/006	-2/92	-0/091	Europe * Area
N = 51	F = 29/01	Adj R <sup>2</sup> = 0/797	معناداری و دقت مدل

جایگاه ویژه‌ای در بین شیوه‌های مختلف حمل و نقل همگانی برخوردار بوده است. در پژوهش جاری، با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چند معیاره لکسیکوگراف به منظور رتبه‌بندی شبکه‌های مترو، شاخصی دو سطحی مرکب از امتیاز توپولوژی شبکه (معیارهای طول شبکه، تراکم ایستگاه‌ها، ویژگی‌های توپولوژی شبکه، متوسط طول کمان) و امتیاز سرویس‌دهی (مسافر بر واحد طول شبکه و تعداد مسافر سالیانه) ارائه گردید. همچنین بر اساس دو معیار پیچیدگی و اتصال شبکه، شبکه‌های متروی دنیا در سه گروه کمتر توسعه یافته، توسعه یافته و بیشتر توسعه یافته با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی گروه‌بندی شدند. از طرف دیگر با توجه به دو معیار متوسط طول خط و تعداد ایستگاه‌های شبکه، شبکه‌های مترو در سه گروه دسترسی منطقه‌ای، پوشش منطقه‌ای و پوشش محلی با استفاده از مرزهای فازی گروه‌بندی شدند و با استفاده از داده‌های ۵۱ شهر دنیا مدل‌های رگرسیونی برای تخمین اولیه تعداد ایستگاه‌ها و طول شبکه بر اساس روند جهانی ارائه گردید.

بر اساس شاخص ارائه شده جهت ارزیابی و امتیازدهی به توپولوژی شبکه‌های مترو، مشخص می‌گردد که شبکه متروی تهران با کسب امتیاز  $4/390$  در رتبه ۲۹ و شبکه متروی نیویورک با کسب امتیاز  $8/506$  در رتبه اول در بین ۵۲ شهر جهان قرار می‌گیرند.

بر اساس دو معیار پیچیدگی و اتصال شبکه و با استفاده از خوشه‌بندی فازی، شبکه متروی تهران در مرز شبکه‌های توسعه یافته

- tions, 474, (2017) 19-31.
- [14] J. Feng, X. Li, B. Mao, Q. Xu, Y. Bai. Weighted complex network analysis of the Beijing subway system: Train and passenger flows. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 474, (2017) 213-223.
- [15] A. R. Mamdoohi, H. Zarei. An Analysis of Public Transit Connectivity Index in Tehran. The Case Study: Tehran Multi-Modal Transit Network. *Tema. Journal of Land Use, Mobility and Environment*, Special Issue (2016) 59-76.
- [16] S. Derrible, C. Kennedy. Characterizing metro networks: state, form, and structure. *Transportation*, 37(2), (2010) 275-297.
- [17] S. Derrible, C. Kennedy. Evaluating, Comparing, and Improving Metro Networks: Application to Plans for Toronto, Canada. *Transportation Research Record*, 2146(1), (2010) 43-51.
- [18] S. Derrible, C. Kennedy. The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(17), (2010) 3678-3691.
- [19] M. R. Haghi, M. Pouralikhani, S. Sedaghatnia. Assessment of Citizens' Satisfaction about Subway Station Design and Location, Case Study: Subway Station of Elmo Sanat in Tehran. *Transportation Engineering Journal*, Online Published, (2018) (In Persian).
- [20] F. A. Nosrati, Evaluation of Stability Degree of Tehran Metro Stations Locations, MSc Thesis, Khaje Nasirodin Toosi University, (2014).
- [21] M. Mousivand, H. Haghshenas. Structure and Evaluation Indices of World Metro Network Case Study of Isfahan Metro Network, 3<sup>th</sup> International Conference on Recent Advances in Railway Engineering, Tehran, Iran, (2013) 1-7.
- forecasting of transportation development*. Evanston, IL: Transportation Center Northwestern University (1965)
- [4] J. Lin, Y. Ban. Complex network topology of transportation systems. *Transport reviews*, 33(6) (2013) 658-685.
- [5] S. Derrible, C. Kennedy. Applications of graph theory and network science to transit network design. *Transport reviews*, 31(4) (2011) 495-519.
- [6] K. J. Kansky. Structure of transportation networks: relationships between network geometry and regional characteristics. Chicago, IL: University of Chicago Press (1963).
- [7] G. Laporte, J. A. Mesa, F. A. Ortega. Assessing the efficiency of rapid transit configurations. *Top*, 5(1) (1997) 95-104.
- [8] G. Laporte, J. A. Mesa, F. A. Ortega, F. Perea. Planning rapid transit networks. *Socio-Economic Planning Sciences*, 45(3) (2011) 95-104.
- [9] J. Zhang, M. Zhao, H. Liu, X. Xu. Networked characteristics of the urban rail transit networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(6) (2013) 1538-1546.
- [10] S. Derrible, C. Kennedy. Network analysis of world subway systems using updated graph theory. *Transportation Research Record*, 2112(1) (2009) 17-25.
- [11] N. Sharav, S. Bekhor, Y. Shiftan. Network Analysis of the Tel Aviv Mass Transit Plan. *Urban Rail Transit*, 4(1) (2018) 23-34.
- [12] D. Levinson. Network structure and city size. *PloS one*, 7(1) (2012) e29721.
- [13] X. Wang, Y. Koç, S. Derrible, S. N. Ahmad, W. J. Pino, R. E. Kooij. Multi-criteria robustness analysis of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A.R. Mahdavi, A.R. Mamdoohi, M. Allahviranloo, *Topology evaluation of Tehran subway network utilizing a bi-level mixed index for subway networks ranking*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(12) (2021) 3003-3014.

DOI: 10.22060/ceej.2019.16436.6226



