

## Application of Catastrophe Theory in Optimum Site Selection for Spatial Development of Cities Based on Natural Hazards and Variables (Case Study: Tabriz Metropolis)

Mansour KheirizadehArouq<sup>1\*</sup>, Dr.Marziyeh Esmailpour<sup>2</sup>

1- Ph.D of Geomorphology, University of Tabriz

2-Assistant Professor of Geography and Urban Planning, University of Maragheh



KheirizadehArouq, M & Esmailpour, M. (2021). [Application of Catastrophe Theory in Optimum Site Selection for Spatial Development of Cities Based on Natural Hazards and Variables (Case Study: Tabriz Metropolis)]. *Geography and Development*, 19 (62), 1-30, <http://dx.doi.org/10.22111/J10.22111.2021.6001>  
doi: <http://dx.doi.org/10.22111/J10.22111.2021.6001>

Received:01/07/2019

Accepted :15/12/2019

### Keywords:

Site selection, City's spatial- physical development, Physical geography, Catastrophe theory, Tabriz.

### ABSTRACT

In order to avoid subjectivism, catastrophe theory functions were used to the integration of different variables in the context of geographic information system. Decrease in decision making uncertainty during weighting process and to some extent in classification uncertainty, high flexibility in type and number of variables, and consideration of spatial differentiation of variables are the most important advantages of this model. The comparison between the results of this model and field and geographic facts indicates high efficiency and validity of used model. Feasibility of spatial-physical development of Tabriz using catastrophe theory showed that because of special geomorphologic, geologic, soil and hydrologic conditions, there are not suitable zones for the spatial- physical development in the surrounding of the city. The best zones for outer development of the city is located in the southwest of the peri-urban areas between Tabriz and Sahand new town. Although, the physical development of the city in these zones- in the form of towns- will require high cost for the preparation of lands. Therefore considering environmental unsuitable conditions of city's surrounding, it would be better to plan the physical-spatial development with regard to the city's inner potentials (such as renovation of old texture).

Copyright©2021, Geography and Development. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-noncommercial 4.0 International License which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cited.

### Extended Abstract

#### 1- Introduction

N

owadays high ratio of world population (more than 50 percent) live in urban areas (Yang and Li, 2013: 186). Urban planning requires understanding of lands on which cities are built. Along with the

human and biological environment, the natural environment should also be known and used in the process of spatial planning. The natural environment has various components including geology, topography, soil, hydrology, climate, and environmental hazards (Lein, 2003: 70). All of these components should be evaluated and synthesized in a comprehensive and systematic approach. More importantly, the physical development of cities and even many villages without regard to dangerous tectonic, geomorphic and climatic processes has transformed natural processes into natural hazards and risks. All of the above mentions the importance of paying attention to the aspects related to the natural environment of planning and urban development plans. In the present study, the appropriate areas for the spatial-physical

#### \*Corresponding Author:

Mansour KheirizadehArouq

Address: Department of Geomorphology  
University of Tabriz

Tel: +98(9147366202)

E-mail: m\_kheirizadeh@yahoo.com

development of Tabriz metropolis are evaluated considering the environmental variables and hazards. Catastrophe theory in the context of the GIS is used for the integration of these variables. Weighting methods are mainly classified into two groups: subjective and objective methods. In subjective weighting methods, the weights are assigned according to the knowledge and judgment of decision makers. On the other hand, objective weighting methods uses mathematical models to assign weights. Analytical hierarchy process (AHP), weighted linear combination (WLC) weighted aggregation method, weighted sum model (WSM) are some objective weighting approaches (Ahmed et al., 2015: 539-549). Therefore, such methods are criticized for its inability to avoid subjectivity and to incorporate the inherent uncertainty (Su et al., 2011: 737-746). In catastrophe model, the importance of each criterion to the other is calculated through its internal mechanism, therefore the disadvantage of subjectivism decreases greatly (Ahmed et al., 2015: 539-549).

## 2-Methods and Material

In the catastrophe theory, function variables of the system is divided into dependent state and control variables. Dependent state variables are internal variables of the system and control variables are external effective factors while system is running (Xiao-jun et al., 2014: 463-477). For example in the current study, land suitability for the urban development is state or response variable and distance to fault, slope, lithology, etc. are control variables. Catastrophe theory is the study of potential function  $V(x_i c_a)$ , in which  $x_i$  is the state variable and  $c_a$  is the control variable (Xiao-jun et al., 2014: 463-477). Rather than weights assigned by the users, catastrophic fuzzy membership functions determine the dependency of state variables on control variables. Different control variables have different effects on the state variable. First, this assessment was classified into several sub-systems with different indicators according to internal mechanism of the system. The initial data is normalized using catastrophe theory and fuzzy mathematics to give optimal or cleanest data. The

multidimensional catastrophe fuzzy membership functions assign values ranging from 0 to 1 to resolve incompatibility of various initial data. There are seven catastrophe models namely, fold catastrophe, cusp catastrophe, dovetail catastrophe, butterfly catastrophe, swallowtail catastrophe, hyperbolic umbilical catastrophe and parabola umbilical catastrophe (Ahmed et al., 2015: 539-549).

As different control variables have different effects on the state variable, the site selection system or land suitability was classified into several sub-systems. Each sub system includes some factor or indicator related to site selection. In the case of Tabriz, these sub systems can be divided into three general groups: hydrological indicators including groundwater table and flood hazard; geologic and geomorphologic indicators such as elevation, slope, landforms, distance to fault, lithology, soil and slope instability; land cover indicators including land use and vegetation cover.

As the range and unit of main data is different, it is not possible to use those units for data analysis, so normalization of data is necessary. Normalization process makes the data dimensionless, thus remove inappropriateness of indicators (Ahmed et al. 2015). In the present study, complementary principle was used in order to calculate the catastrophe progression of each control variable. Strong spatial variability of natural variables has caused that catastrophe function type of most of the indicators to be wigwam. After weighting each indicator, related layers were combined using geographic information system.

## 3-Results and Discussion

The result of natural variables overlaying using catastrophe theory indicate that spatial-physical development of Tabriz encounters obstacles and limitations. Topographic and tectonic conditions have a basic role in optimum site selection for spatial development of Tabriz. So that elevation, slope and distance to fault are in a higher priority. Strong spatial differentiation of these variables have had a fundamental role in high priority based on complementary principle of them. The spatial development of Tabriz in the north, northeast and northwest parts encounters limitations. The most

important limitations are uneven topography, steep slopes, slope instability, some loose and unstable formations specially marls, and above all north Tabriz fault. In fact, the north and northeast parts are considered as the most inappropriate areas for spatial development of Tabriz and it must be prevented in this zones. Because of Sahand volcanic mass, spatial development of the city in the southeast and southern parts encounters limitation. Although there are suitable zones in the parts of west and southwest of the city for the spatial-physical development, but it is important to note that there are high quality agricultural lands in these areas. Therefore Tabriz city has many limitations to spatial development. These limitations are resulted from geomorphologic hazards (especially north Tabriz fault), uneven topography, high groundwater level, and existence of high quality agricultural lands. In fact, smooth and low slope lands are not suitable for spatial development of city because of existence of fertile agricultural lands or marshland and high groundwater level. In a comparative manner, suitable areas for the physical development of the city were located in the southwest of the peri-urban area between Tabriz city and Sahand new town.

#### 4- Conclusion

In order to avoid subjectivism, catastrophe theory functions were used to the integration of different variables in the context of geographic information system. Decrease in decision making uncertainty during weighting process and to some extent in classification uncertainty, high flexibility in type and number of variables, and consideration of spatial differentiation of variables are the most important advantages of this model. The comparison between the results of this model and field and geographic facts indicates high efficiency and validity of used model. Feasibility of spatial-physical development of Tabriz using catastrophe theory showed that because of special geomorphologic, geologic, soil and hydrologic conditions, there are not suitable zones for the spatial- physical development in the

surrounding of the city. The best zones for outer development of the city is located in the southwest of the peri-urban areas between Tabriz and Sahand new town. Although, the physical development of the city in these zones- in the form of towns- will require high cost for the preparation of lands. Therefore considering environmental unsuitable conditions of city's surrounding, it would be better to plan the physical-spatial development with regard to the city's inner potentials (such as renovation of old texture).

**Keywords:** Site selection, City's spatial- physical development, Catastrophe theory, Tabriz.

#### 5- References

- Esfandiari, Fariba; Massoud Rahimi; Mansour Kheirizadeh (2018). Spatial assessment and prediction of landslide occurrence using statistical models of uncertainty factor and logistic regression (Study area: Khalkhal-Sarcham road), quantitative geomorphological research. Seventh year. No. 2. Pages 45-19.  
[http://www.geomorphologyjournal.ir/article\\_80782.html](http://www.geomorphologyjournal.ir/article_80782.html)
- Jadari Ayouzi, Jamshid (1982). Kaboudan Desert, Geomorphological Characteristics, Geographical Research, No. 0. Serial Issue 1060. Pages 1-27.  
[https://journals.ut.ac.ir/article\\_14258\\_0.html](https://journals.ut.ac.ir/article_14258_0.html)
- Kheirizade Aroogh, Mansour (2016). Morphodynamic analysis and lateral changes of Zarrinehrood river channel (from Shahindej to Urmia lake), PhD thesis under the guidance of Mohammad Hossein Rezaei, Moghaddam and Masoumeh Rajabi, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz.
- Rustaei, Shahram; Iraj Jabbari (2011). Geomorphology of Urban Areas, Third Edition. Side Publications.
- Roustaei, Shahram and Behrooz Sari Sarraf (2006). Zoning of effective environmental hazards in the physical development of Tabriz, Geographical Quarterly of Sarzamin, Third Year, No.10, PP.110-126.  
[http://journals.srbiau.ac.ir/article\\_5955.html](http://journals.srbiau.ac.ir/article_5955.html)
- East Azarbaijan Province Program and Budget Organization (2017). Summary of Demographic Results of the General Population and Housing Census of 2016, East Azarbaijan Governorate.  
[https://www.ostan-as.ir/Uploads/User/1669/files/ea\\_sarshomari\\_95.pdf](https://www.ostan-as.ir/Uploads/User/1669/files/ea_sarshomari_95.pdf)
- Soil and Water Research Organization. Assessment map of resources and land potential of East Azerbaijan province.

- Geological Survey of Iran. Geological maps 100000: 1, Tabriz, Bostanabad, Khoja and Esco sheets with reports.
- Sorori, Rahim (2008). Applied Geography and Land Management, Third Edition, Samat Publication.
- Mohammadzadeh, Rahmat (1997). An Introduction to the Rapid Physical Development of the City and Its Consequences, Journal of Political-Economic Information. Vol.11.Number8-7(116-115). PP.222-227. <https://www.sid.ir/fa/Journal/ViewPaper.aspx?ID=105205>
- Mokarami, Marzieh; Saeed Neghaban (2004). Landform Classification Using Topographic Position Index (TPI) (Case Study: Southern Region of Darab County), Geographical Information Quarterly (Sepehr). Volume 23. Number 92. Pages 57-65. [http://www.sepehr.org/article\\_13507.html](http://www.sepehr.org/article_13507.html)
- Environmental Consulting Engineers (2012). Development plan (comprehensive) of the city of Tabriz. General Department of Roads and Urban Development of East Azerbaijan Province.
- Ahmed, Kamal; Shahid, Shamsuddin; Bin Harun, Sobri; Ismail, Tarmizi; Nawaz, Nadeem; Shamsudin, Supiah (2015). Assessment of groundwater potential zones in an arid region based on catastrophe theory. Earth Science Informatics, Vol. 8, Issue. 3, PP. 539-549. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0173-3>
- Alcántara-Ayala, Irasema; Goudie, Andrew. S (2010). Geomorphological Hazards and Disaster Prevention. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807527>
- Cameron, T and Ackerman, P. E (2012). HEC-GeoRAS, GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS@10. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/downloads.aspx>
- Chen, Yu; Song, Guobao; Yang, Fenglin; Zhang, Shushen; Zhang, Yun; Liu, Zhenyu (2012). Risk Assessment and Hierarchical Risk Management of Enterprises in Chemical Industrial Parks Based on Catastrophe Theory. International Journal of Environmental Research & Public Health, Vol. 9, Issue.12,PP.4386-4402. <https://doi.org/10.3390/ijerph9124386>
- Douglas, Ian; Goode, Davi; Houck, Mike; Wang, Rusong (2011). The Routledge Handbook of Urban Ecology. Routledge. <https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.4324/9780203839263>
- HEC (Hydrologic Engineering Center). (2010). HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual. U. S. Army Corps of Engineers. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Jenness, Jeff (2006). Topographic Position Index (TPI) V. 1.2. <http://www.jennessent.com>.
- Lein, James K. (2003). Integrated environmental planning. Blackwell Science Ltd. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470999233>
- Netzband, M; Stefanov, W. L; Redman. C. (2007). Applied Remote Sensing for Urban Planning, Governance and Sustainability, Springer, Berlin, 278 p. <https://www.springer.com/gp/book/9783540255468>
- Sadeghfam, Sina; Hassanzadeh, Yousef; Nadiri, Ata Allah; Khatibi, Rahman (2016). Mapping groundwater potential field using catastrophe fuzzy membership functions and Jenks optimization method: a case study of Maragheh-Bonab plain, Iran. Environmental Earth Sciences, 75: 545. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-015-5107-y>
- Su, Shiliang; Li, Dan; Yu Xiang; Zhang, Zhonghao; Zhang, Qi; Xiao, Rui; Zhi, Junjun; Wu, Jiaping (2011). Assessing land ecological security in Shanghai (China) based on catastrophe theory. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol. 25, Issue. 6, PP. 737-746. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00477-011-0457-9>
- Szabo, J; David, L; Loczy, D (2010). Anthropogenic Geomorphology: A Guide to Man-Made Landforms. Springer. 298p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-90-481-3058-0>
- Tian-jun, Zhang; Shu-xin, Ren; Shu-gang, Li; Tian-cai, Zhang; Hong-jie, Xu. (2009). Application of the catastrophe progression method in predicting coal and gas outburst. Mining Science and Technology, Vol. 19, PP. 430-434. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60080-6](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60080-6).

## کاربرد توابع تئوری کاتاستروف در مکان‌یابی بهینه توسعه فضایی شهرها بر اساس متغیرها و مخاطرات طبیعی (مورد: کلان‌شهر تبریز)

دکتر منصور خیری‌زاده آروق<sup>۱\*</sup>، دکتر مرضیه اسمعیل‌پور<sup>۲</sup>

### چکیده

این تحقیق با هدف کاربست توابع تئوری کاتاستروف در مکان‌یابی توسعه فضایی-کالبدی شهرها در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام گرفت. تقریباً همه مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بر وزن‌دهی کارشناسی استوار بوده و تحت الشعاع سلیقه و قضاوت تصمیم‌گیران قرار می‌گیرند. در روش ارزیابی مبتنی بر تئوری کاتاستروف، اهمیت هر یک از معیارها با استفاده از مکانیسم درونی سیستم محاسبه شده و در نتیجه ذهن‌گرایی ناشی از قضاوت تصمیم‌گیران تا حد زیادی کاهش می‌یابد. این روش‌شناسی در مکان‌یابی توسعه فضایی کلان‌شهر تبریز مورد استفاده قرار گرفت. در طی دهه‌های اخیر، توسعه فضایی گسترده‌ای در سطح شهر تبریز صورت گرفته‌است. توسعه شهر در اغلب موارد به دلیل فقدان فضاهای مطلوب شهرسازی در پهنه‌های نامناسب و حتی مخاطره‌آمیز، از جمله حریم گسل تبریز، اتفاق افتاده‌است. نتایج مدل مذکور انطباق بالایی با واقعیت‌های میدانی نشان داد. مطابق با نتایج، هیچ منطقه‌ای از پیرامون شهر تبریز مناسب توسعه و عمران شهری نیست و محیط طبیعی، تنگناها و تهدیدات زیادی را به توسعه فضایی-کالبدی شهر تحمیل می‌کند. این محدودیت‌ها و مخاطرات ناشی از توپوگرافی نامساعد و خشن در شمال و جنوب شهر، عبور گسل فعال و بزرگ تبریز از نیمه شمالی شهر، لیتولوژی سست و ناپایداری‌های دامنه‌ای در شمال منطقه مطالعاتی، وجود اراضی کشاورزی مرغوب و حاصلخیز در جنوب‌غربی شهر و در نهایت، پراکندگی شوره‌زارها و بالابودن سطح آب‌های زیرزمینی در غرب منطقه مطالعاتی است. لاجرم توسعه فضایی-کالبدی شهر می‌تواند به شکل تخریب و نوسازی بافت‌های فرسوده شهری (توسعه درون‌زا) و ایجاد شهرک‌هایی در جنوب شهر مادر صورت گیرد.

جغرافیا و توسعه، شماره ۶۲، بهار ۱۴۰۰  
تاریخ دریافت: ۹۸/۰۴/۱۰  
تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۹/۲۴  
صفحات: ۳۰-۱



واژه‌های کلیدی:  
مکان‌یابی، توسعه فضایی-کالبدی شهر، جغرافیای طبیعی، تئوری کاتاستروف، تبریز.

### مقدمه

کشورهای در حال توسعه و دگرگونی چشم‌اندازهای شهری در کشورهای توسعه‌یافته در زمره چالش‌های بزرگ در زمینه رفاه جوامع انسانی و محیط‌زیست جهانی خواهد بود (Netzbant et al, 2007: 1). در طی روند توسعه شهرها، ممکن است مناطق بالقوه خطرناک، از قبیل دشت‌های سیلابی یا دامنه‌های پرشیب و عمیقاً هوازده، اشغال شده و گروه‌های انسانی در معرض ریسک قرار گیرند. به دلایل مذکور، تلفات جانی و مالی ناشی از مخاطرات ژئومورفولوژیک در حال افزایش است (Alcántara-Ayala & Goudie, 2010: 1). در واقع، افزایش جمعیت و سکنی‌گزینی انسان در

امروزه بخش قابل توجهی از جمعیت جهان (بیش از ۵۰ درصد) در مناطق شهری زندگی می‌کنند. رشد شهری معمولاً چندین دهه تداوم می‌یابد و به همین دلیل در زمره مهم‌ترین روندهای سطح زمین به‌شمار می‌آید (Yang and Li, 2013: 186). توسعه شهری ماهیت سطح زمین را به‌طور اساسی تغییر می‌دهد. در واقع، نقش انسان به‌عنوان عامل تغییر زمین‌شناسی و ژئومورفیک در هیچ‌جایی مشخص‌تر از مناطق شهری نیست (Douglas et al., 2011: 159). در دهه‌های پیش‌رو، افزایش سریع شهرهای بزرگ در

۱. دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول)

۲. استادیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

\* m\_kheirizadeh@tabrizu.ac.ir  
m.esmaeilpour@maragheh.ac.ir

مکانی به کار بسته شوند. محیط طبیعی دارای اجزا و مؤلفه‌های مختلفی است که شامل زمین‌شناسی (ویژگی‌های سطحی و زیرسطحی، کنترل‌های ژئومورفیک)، توپوگرافی (شکل، ترکیب و پایداری دامنه‌ها)، خاک (نوع خاک، ترکیب و بافت خاک، خواص خاک، ویژگی‌های ژئوتکنیک)، هیدرولوژی (ویژگی‌های آب‌های سطحی، الگوهای زهکشی حوضه‌های آبخیز، سیستم‌های آب زیرزمینی، ویژگی‌های دشت سیلابی)، اقلیم (الگوهای منطقه‌ای و سینوپتیک، میکروکلیم، رخداد‌های حدی) و مخاطرات محیطی (زمین‌لرزه‌ها، زمین‌لغزش‌ها، فرونشست، خشکسالی) می‌شود (Lein, 2003: 70). تمامی این مؤلفه‌ها می‌بایست در یک چارچوب و نگرش فراگیر و نظام‌مند مورد ارزیابی و سنتز قرار گیرند. مهم‌تر اینکه توسعه کالبدی شهرها و حتی بسیاری از روستاها بدون توجه به فرایندهای خطرناک تکتونیک، ژئومورفیک و اقلیمی صورت گرفته است. این امر باعث تبدیل فرایندهای طبیعی به مخاطرات طبیعی و ریسک شده است. تمامی موارد مذکور اهمیت توجه به جنبه‌های مرتبط با محیط طبیعی برنامه‌ریزی‌ها و طرح‌های عمران شهری را گوشزد می‌کند. در پژوهش حاضر، پهنه‌های مناسب توسعه فضایی-کالبدی کلان‌شهر تبریز با در نظر گرفتن متغیرها و مخاطرات طبیعی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این زمینه برای تلفیق و یکپارچه‌سازی این متغیرها از توابع تئوری کاتاستروف در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده می‌شود. تئوری کاتاستروف، از شاخه توپولوژی ریاضیات نشأت می‌گیرد. این تئوری در سال ۱۹۷۲، توسط یک ریاضی‌دان فرانسوی به نام رنه تام<sup>۱</sup> با انتشار کتابی تحت عنوان «پایداری ساختاری و موفونز<sup>۲</sup>» بنیان نهاده شد (You & Zhang, 2015: 4937-4965; Wang et al., 2011: 356-362). تئوری کاتاستروف، یک تئوری ریاضیاتی است که پدیده‌های ناپیوسته را براساس

پهنه‌های مستعد خطر، منجر به وقوع بلایا شده است (Alcántara-Ayala & Goudie, 2010:270). بنابراین برنامه‌ریزی شهری خوب و کارآ، مستلزم شناخت و درک صحیح زمینی است که شهرها بر روی آن ساخته می‌شوند. برخی از شهرها بر روی نهشته‌های یخچالی ساخته شده‌اند که در شرایط اشباع از آب، تمایل به حرکت و ناپایداری دارند. برخی دیگر بر روی زمین‌های سنگ‌آهک حفره‌ای قرار گرفته‌اند که مسائل و مشکلاتی در زمینه فونداسیون ایجاد می‌کنند و ممکن است در معرض فروریزش قرار گیرند. تعدادی از آن‌ها بر روی رس‌های انقباضی-تورمی<sup>۱</sup> بنا شده‌اند. این گونه رس‌ها در صورت خشک شدن می‌توانند باعث فرونشست شوند. تقریباً در همه مناطق، ساخت‌وساز شهری بر روی اراضی شیب‌دار و تپه‌ماهوری می‌تواند به‌طور بالقوه محرک زمین‌لغزش باشد (Douglas et al., 2011: 100). در این زمینه، استراتژی‌های مؤثر پیشگیرانه نه تنها منجر به صرفه‌جویی ده‌ها میلیارد دلار خواهد شد، بلکه زندگی ده‌ها هزار نفر را نیز نجات خواهد داد؛ بنابراین منابع مالی‌ای که در حال حاضر برای مداخله و امداد رسانی صرف می‌شوند، می‌توانستند برای بهبود و ارتقاء توسعه عادلانه و پایدار اختصاص داده شوند (Alcántara-Ayala & Goudie, 2010:277). شناخت ویژگی‌های طبیعی، اجتماعی و اقتصادی محیط جغرافیایی، از یک طرف موجب وسعت بینش و آگاهی از محیط می‌شود و از طرف دیگر، امکان هرگونه حرکت سنجیده و اندیشیده در محیط را از سوی انسان در قالب یک سیستم منظم فراهم می‌سازد؛ بنابراین شناخت اجزا و عناصر و عوامل سازنده و مؤثر در محیط، لازمه و پیش‌شرط هرگونه حرکت اندیشیده از طرف انسان است که برای اعمال مدیریت بر محیط و در محیط صورت می‌گیرد (سرور، ۱۳۸۷: ۲۸)؛ بنابراین در کنار محیط انسانی و بیولوژیک، می‌بایست محیط طبیعی نیز شناخته شده و در فرایند برنامه‌ریزی‌های

و بر معایب موجود در ذهن‌گرایی و عدم قطعیت غلبه می‌یابد (Su et al., 2011: 737-746).

هدف اساسی تئوری کاتاستروف رفتار با پدیده‌های ناپیوسته است ( Ahmed et al., 2015: 539-549; Xiao-jun et al, 2014: 463-477). تئوری کاتاستروف در تلاش برای احتساب معقولانه پدیده تغییر ناپیوسته در رفتار (خروجی‌ها) ناشی از تغییر پیوسته در پارامترها (ورودی‌ها) در یک سیستم مشخص ارائه شده است (Su et al., 2011: 737-746); از این رو به‌ویژه برای مطالعه سیستم‌هایی با عملکردهای داخلی ناشناخته، قابل اجرا است (Chen et al., 2012: 4386-4402). تئوری کاتاستروف با توجه به ویژگی‌های دیالکتیک و مزایای آن به‌عنوان یک ساختار ریاضیاتی ساده توأم با معنای فیزیکی روشن، اخیراً در چندین مطالعه غیرمکانیکی ناپیوسته به کار بسته شده است. در این رابطه می‌توان به ارزیابی امنیت اکولوژیک زمین زغال‌سنگ و گاز (Tian- Jun et al, 2009: 430-434)، ارزیابی پهنه‌های بالقوه آب زیرزمینی ( Ahmed et al., 2015: 539-549 Sadeghfam et al., 2016: 1-19) ارزیابی امنیت آب ( Xiao- Jun et al., 2014: 463-477; Wang et al., 2011: 356-362) ارزیابی آسیب‌پذیری اجتماعی در برابر سیلاب‌ها ( You & Zhang, 2015: 4937-4965) و ارزیابی پتانسیل فرسایش کناره مجرای رودخانه‌ها (خیری‌زاده، ۱۳۹۵: ۱-۱۹۳) اشاره کرد.

هدف اصلی پژوهش حاضر کاربرد توابع تئوری کاتاستروف در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌منظور یکپارچه‌سازی فاکتورهای تأثیرگذار در مکان‌یابی بهینه توسعه فضایی- کالبدی شهرها است. روش‌شناسی مزبور با دارا بودن بنیان ریاضیاتی و عدم دخالت تصمیم‌گیران در فرایند وزن‌دهی می‌تواند در ارزیابی سریع و مطلوب پهنه‌های مناسب توسعه فضایی شهرها مورد استفاده قرار گیرد. این روش‌شناسی در شهر تبریز به کار بسته شد.

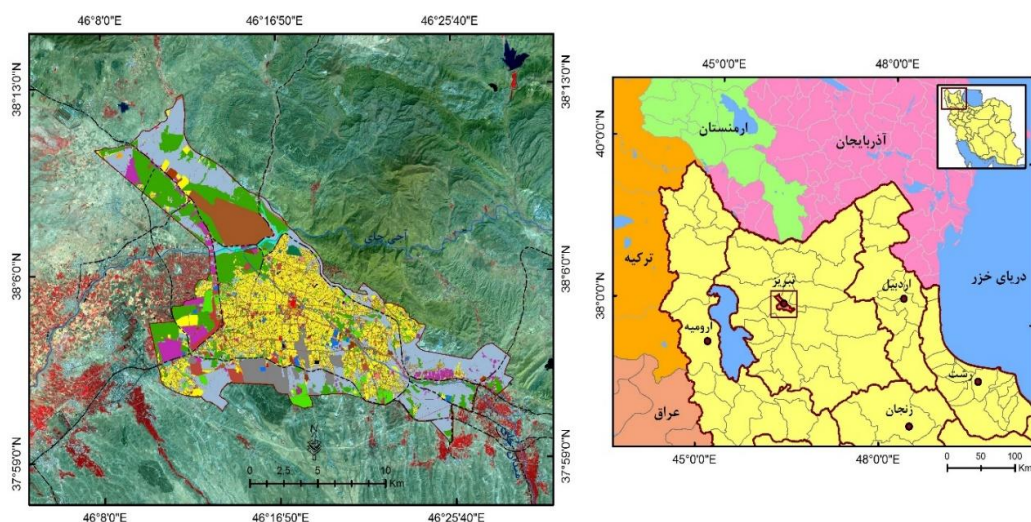
توپولوژی و تئوری پایداری ساختاری مطالعه می‌کند (Wang et al, 2011: 356-362).

در مدل‌سازی GIS به‌منظور به‌دست‌آوردن اهمیت نسبی یک‌معیار نسبت به معیار دیگر، وزن‌دهی صورت می‌گیرد. بدین‌منظور، روش‌های وزن‌دهی مختلفی توسعه یافته‌اند که عمدتاً به روش‌های ذهنی<sup>۱</sup> و عینی<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش‌های وزن‌دهی ذهن‌گرایانه، وزن‌ها براساس دانش و قضاوت سلیقه‌ای یا ترجیحی تصمیم‌گیران حاصل می‌شوند. از سوی دیگر، در روش‌های وزن‌دهی عینی، مدل‌های ریاضیاتی برای استخراج وزن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از روش‌های وزن‌دهی ذهن‌گرایانه می‌توان به ترکیب خطی وزنی (WLC)، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، روش تجمع وزنی (WAM)، مدل جمع وزنی (WSM) و... اشاره کرد (Ahmed et al., 2015: 539-549). این مدل‌ها با توجه به رویه وزن‌دهی و رتبه‌بندی شاخص‌ها براساس اهمیت آن‌ها، به‌صورت یک فرایند ناپیوسته عمل می‌کنند. در نتیجه، چنین روش‌هایی اغلب به‌علت ناتوانی در اجتناب از ذهن‌گرایی و ترکیب درجه‌ای از عدم قطعیت ذاتی مورد انتقاد قرار می‌گیرند (Su et al, 2011: 737-746). در این چارچوب، روش ارزیابی مبتنی بر تئوری کاتاستروف<sup>۳</sup> سلیقه تصمیم‌گیران را شامل نمی‌شود بلکه اهمیت یک معیار بر معیار دیگر را به‌واسطه مکانیسم درونی آن محاسبه می‌کند و از این رو، ذهن‌گرایی را به‌شدت کاهش می‌دهد ( Ahmed et al., 2015: 539-549). در روش مذکور هیچ وزنی برای شاخص‌ها وجود ندارد، اما اهمیت نسبی هر شاخص در نظر گرفته می‌شود، به‌طوری‌که می‌تواند تأثیر ذهن‌گرایی بر نتایج ارزیابی را کاهش دهد ( You & Zhang, 2015: 4937-4965); بنابراین روش ارزیابی مبتنی بر تئوری کاتاستروف وزن‌ها را با استفاده از اعداد مطلق تعیین نمی‌کند. در عوض، تمامی شاخص‌ها را یکپارچه ساخته

## منطقه مورد مطالعه

شهر تبریز با وسعتی حدود ۲۵۰۵۶ هکتار، در ۳۸ درجه و ۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۵ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۲۸ دقیقه طول شرقی واقع شده است. متوسط ارتفاع شهر حدود ۱۴۶۰ متر از سطح دریاهای آزاد برآورد شده است. این شهر در گوشه شمال غربی کشور و در امتداد محور بین‌المللی تهران-بازرگان که ایران را به اروپا متصل می‌سازد، قرار گرفته است (شکل ۱). تبریز پرجمعیت‌ترین شهر استان آذربایجان شرقی و از پرجمعیت‌ترین شهرهای کشور است. ۴۵ درصد جمعیت استان در شهرستان تبریز و بیش از ۴۰ درصد تنها در شهر تبریز ساکن هستند. براساس نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۵، جمعیت شهرستان تبریز ۱۷۷۳۰۳۳ نفر و جمعیت مرکز این شهرستان ۱۵۵۸۶۹۳ نفر برآورد شده است (سازمان برنامه و بودجه استان آذربایجان شرقی، ۱۳۹۶).

تبریز یک ناحیه مادرشهری با پیچیدگی شرایط محیطی، اداری و صنعتی است و توسعه صنایع و رشد سریع جمعیت، در حال حاضر مشکلات ژئومورفولوژیک زیادی را برای این ناحیه به وجود آورده است (روستایی و جباری، ۱۳۹۰: ۱۶۶). توسعه کالبدی سریع، سبب شده است تا علاوه بر پیدایش کوی‌ها و شهرک‌های جدید در اطراف شهر، برخی از روستاهای منطقه نیز در آن ادغام شده و وارد محدوده شهر شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که در نتیجه رشد شهر تبریز، اراضی زراعی مستعد، باغات و همین‌طور حدود ۱۰ روستا در داخل بافت فیزیکی شهر قرار گرفته و در نهایت با توسعه فیزیکی شهر در آن ادغام شده‌اند؛ برای نمونه روستاهای بارنج در شرق، لاله، لواسان و امامیه در جنوب و جنوب غربی، قراملک در سمت غرب و ائل‌گلی در جنوب شرقی را می‌توان نام برد و آرام‌آرام و به تدریج باسمنج نیز جذب تبریز می‌شود (محمدزاد، ۱۳۷۶: ۲۲۴).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی شهر تبریز

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

شیب، لندفرم‌ها (ژئومورفولوژی)، لیتولوژی، فاصله از گسل، خاک، سطح آب زیرزمینی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، مخاطره زمین لغزش و مخاطره سیلاب. برای تهیه لایه‌های موضوعی ارتفاع، شیب و

## مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی تناسب اراضی با هدف توسعه فضایی-کالبدی شهر تبریز از ۱۱ متغیر طبیعی استفاده شد. این متغیرها عبارت‌اند از: ارتفاع،

همچنین نحوه اجرای دو مدل مذکور به کرات توسط محققان مختلف به کار بسته شده‌اند، از توضیحات بیشتر در این زمینه اجتناب می‌شود. در واقع هدف اساسی پژوهش حاضر معرفی روش‌شناسی مبتنی بر تئوری کاتاستروف در جهت ترکیب لایه‌های موضوعی مختلف در بستر GIS با مقاصد مکان‌یابی و تناسب اراضی (در اینجا مکان‌یابی توسعه فضایی شهر تبریز) است؛ بنابراین روش‌شناسی مذکور با جزئیات بیشتری تبیین می‌شود.

در تئوری کاتاستروف، متغیرهای تابع<sup>۶</sup> سیستم به متغیرهای حالت<sup>۷</sup> وابسته و متغیرهای کنترل<sup>۸</sup> تقسیم می‌شوند. متغیرهای حالت وابسته، متغیرهای درونی سیستم هستند و متغیرهای کنترل، فاکتورهای مؤثر خارجی حین اجرای سیستم هستند (Xiao-jun et al, 2014: 463-477)؛ به عنوان مثال، در تحقیق حاضر، تناسب اراضی به منظور توسعه شهری متغیر حالت یا پاسخ و فاصله از گسل، شیب، سنگ‌شناسی و... متغیرهای کنترل هستند. تئوری کاتاستروف مطالعه تابع پتانسیل  $V(X_i; C_a)$  است، که در آن  $X_i$  متغیر حالت و  $C_a$  پارامتر کنترل است (Xiao-jun et al, 2014: 463-477).

این روش، تحلیل سلسله‌مراتبی، تابع مطلوبیت<sup>۹</sup> و ارزیابی فازی را در جهت به دست آوردن توابع عضویت فازی کاتاستروف از طریق عملیات نرمالیزه کردن مجموعه دو حالت<sup>۱۰</sup> بهم مرتبط می‌سازد. وابستگی متغیرهای حالت به متغیرهای کنترل توسط توابع عضویت فازی کاتاستروفیک و نه وزن‌های تخصیص یافته توسط کاربران، تعیین می‌شود؛ علاوه بر این، در تئوری کاتاستروف متغیرهای کنترل مختلف اثرات متفاوتی بر متغیرهای حالت دارند. در ابتدا، این سیستم به زیرسیستم‌هایی با شاخص‌های مختلف مطابق با

لندفرم‌های منطقه مطالعاتی، از تصاویر DEM منطقه با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر مربوط به ماهواره ALOS-PALSAR استفاده شد.<sup>۱</sup> با ذکر این نکته که برای شناسایی لندفرم‌های منطقه، روش طبقه‌بندی ارائه شده توسط ویس<sup>۲</sup> (۲۰۰۱) و جنس<sup>۳</sup> (۲۰۰۶) به کار بسته شد. در این روش طبقه‌بندی، از شاخصی موسوم به شاخص موقعیت توپوگرافیک<sup>۴</sup> یا TPI استفاده می‌شود و براساس آن، ۱۰ نوع لندفرم قابل تشخیص است (مراجعه شود به: اسفندیاری و همکاران، ۱۳۹۷؛ مکرم و نگهبان، ۱۳۹۳). به منظور تهیه لایه‌های پوشش زمین و پوشش گیاهی (شاخص NDVI) از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر مربوط به اوایل تابستان ۱۳۹۷ استفاده شد.<sup>۵</sup> لایه تراز آب زیرزمینی از طریق درون‌یابی داده‌های چاه‌های پیژومتری دشت تبریز (آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی) حاصل شد. لایه خاک منطقه براساس نقشه ارزیابی منابع و قابلیت اراضی استان آذربایجان شرقی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ (مؤسسه تحقیقات خاک و آب) تهیه شد. لایه‌های فاصله از گسل و لیتولوژی منطقه مطالعاتی از روی نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (سازمان زمین‌شناسی کشور) به دست آمد. نقشه حساسیت زمین‌لغزش منطقه براساس روی هم‌گذاری فازی لایه‌های ارتفاع، شیب، لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه‌ها، پوشش گیاهی و لندفرم‌ها حاصل شد. صحت نقشه مذکور از طریق انطباق آن با زمین‌لغزش‌های گذشته منطقه مورد تأیید قرار گرفت. همچنین، نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب رودخانه‌های اصلی منطقه (میدان چای و آجی چای) با استفاده از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS تهیه شد (شکل ۲). با عطف به اینکه روش‌های آماده‌سازی و تهیه لایه‌های موضوعی و

6-Function variables  
7-Dependent state variables  
8-Control variables  
9-Utility function  
10-Bifurcation set

1-<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>  
2-Weiss  
3-Jenness  
4-Topographic Position Index (TPI)  
5-<https://eos.com/landviewer/>

دارد که عبارت‌اند از: کاتاستروف فولد<sup>۱</sup>، کاتاستروف کاسپ<sup>۲</sup>، کاتاستروف دم‌فاخته‌ای<sup>۳</sup>، کاتاستروف پروانه‌ای<sup>۴</sup>، کاتاستروف دم‌چلچله‌ای<sup>۵</sup>، کاتاستروف پیربولیک اومبیلیک<sup>۶</sup> و کاتاستروف پارابولا اومبیلیک<sup>۷</sup> (Xiao-jun et al., 2014: 463-477; Ahmed et al., 2015: 539-549). این مدل‌ها در جدول (۱) نشان داده شده‌است. در این جدول، X نشان‌دهنده متغیر حالت و a، b، c و d نشان‌دهنده متغیر کنترل هستند.

مکانیسم درونی سیستم مورد ارزیابی طبقه‌بندی می‌شود. داده‌های اولیه با استفاده از تئوری کاتاستروف و ریاضیات فازی برای حاصل‌شدن داده‌های بهینه یا مطلوب‌ترین<sup>۱</sup> نرمالیزه می‌شوند. توابع عضویت فازی کاتاستروف چندبعدی، مقادیری را در دامنه ۰ تا ۱ برای حل ناسازگاری داده‌های اولیه مختلف اختصاص می‌دهند (Ahmed et al., 2015: 539-549; Wang et al., 2011: 356-362). هفت مدل کاتاستروف وجود

جدول ۱: هفت نوع مدل کاتاستروف

مدل کاتاستروف	پارامترهای کنترل	متغیرهای حالت	تابع پتانسیل
فولد	۱	۱	$V_a(x) = 1/3x^3 + ax$
کاسپ	۲	۱	$V_{ab}(x) = 1/4x^4 + 1/2ax^2 + bx$
دم‌فاخته‌ای	۳	۱	$V_{abc}(x) = 1/5x^5 + 1/3ax^3 + 1/2bx^2 + cx$
پروانه‌ای	۴	۱	$V_{abcd}(x) = 1/6x^6 + 1/4ax^4 + 1/3bx^3 + 1/2cx^2 + dx$
دم چلچله‌ای (ویگ‌وام)	۳	۲	$V_{abc}(x, y) = x^3 - xy^2 + a(x^2 + y^2) + bx + cy$
البیتیک اومبیلیک	۳	۲	$V_{abc}(x, y) = x^3 - xy^2 + a(x^2 + y^2) + bx + cy$
پارابولیک اومبیلیک	۴	۲	$V_{abc}(x, y) = x^2y + y^4 + ax^2 + by^2 + cx + dy$

مأخذ: (Ahmed et al., 2015: 539-549; Xiao-jun et al., 2014: 463-477)

تبریز این زیرسیستم‌ها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم‌بندی کرد: شاخص‌های هیدرولوژیک شامل متغیرهای سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی و مخاطره سیلاب؛ شاخص‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیک شامل متغیرهای ارتفاع، شیب، لندفرم‌ها، فاصله از گسل، لیتولوژی، خاک و ناپایداری‌های دامنه‌ای؛ شاخص‌های پوشش زمین شامل کاربری اراضی و پوشش گیاهی.

روش‌شناسی مبتنی بر تئوری کاتاستروف به‌منظور مکان‌یابی بهینه توسعه فضایی شهر تبریز شامل چهار گام اصلی زیر است:

#### - ایجاد سیستم شاخص

از آنجایی که متغیرهای کنترل مختلف اثرات متفاوتی بر روی متغیر حالت دارند، سیستم مکان‌یابی یا تناسب اراضی ابتدا به چندین زیرسیستم تقسیم‌بندی شد. هر زیرسیستم شامل تعدادی فاکتور یا شاخص مرتبط با مکان‌یابی است. در مطالعه موردی شهر

- 1-Optimal or cleanest
- 2-Fold catastrophe
- 3-Cusp catastrophe
- 4-Dovetail catastrophe
- 5-Butterfly catastrophe
- 6-Swallowtail catastrophe
- 7-Hyperbolic umbilical catastrophe
- 8-Parabola umbilical catastrophe

## - نرمال سازی شاخص‌ها

از آنجا که دامنه و واحدهای داده‌های اصلی با یکدیگر متفاوت هستند، استفاده از همان واحدها در تحلیل داده‌ها امکان‌پذیر نبوده و نرمالیزه کردن داده‌ها ضرورت می‌یابد. فرایند نرمالیزه سازی، داده‌ها را بی‌بعد ساخته و از این طریق، عدم تناسب شاخص‌ها را رفع می‌کند. در پژوهش حاضر، معادلات زیر در جهت نرمالیزه سازی لایه‌های رستری هر یک از شاخص‌ها مورد استفاده قرار گرفتند (Ahmed et al., 2015: 539-549). معادله مورد استفاده در جهت نرمالیزه سازی شاخص‌های «بزرگ‌تر بهتر»

$$x'_i = \frac{x_i - x_{i(\min)}}{x_{i(\max)} - x_{i(\min)}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

معادله مورد استفاده در جهت نرمالیزه سازی شاخص‌های «کوچک‌تر بهتر»

$$x'_i = 1 - \frac{x_i - x_{i(\min)}}{x_{i(\max)} - x_{i(\min)}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن،  $i$  شاخص یا صفت،  $x_i$  مقدار اولیه  $i$  و  $x_{i(\max)}$  و  $x_{i(\min)}$  مقادیر حداکثر و حداقل هستند.

## - محاسبه تابع عضویت فازی و تصمیم‌گیری

## چندمعیاره مبتنی بر تئوری کاتاستروف

تصادف کاتاستروف<sup>۱</sup> هر متغیر کنترل می‌تواند از روی تابع فرعی (وابسته) فازی اولیه<sup>۲</sup> مبتنی بر فرمول‌های نرمالیزه سازی محاسبه شود. در طی فرایند محاسبه، دو اصل به کار گرفته می‌شود: اصل مکمل<sup>۳</sup> و اصل غیرمکمل<sup>۴</sup>. اصل مکمل بدین معنی است که متغیرهای کنترل، مکمل همدیگرند، به طوری که هر یک از آن‌ها تمایل دارند تا به مقدار میانگین برسند؛ یعنی  $x = (xa + xb + xc + xd)/4$ . از سوی دیگر، اصل غیرمکمل به این اشاره دارد که متغیرهای کنترل یک سیستم، شامل  $a$ ،  $b$ ،  $c$ ، و  $d$ ، نمی‌توانند جایگزین یکدیگر شوند؛ بنابراین هنگام یافتن مقدار متغیر حالت  $X$  با استفاده از فرمول‌های نرمالیزه سازی، کوچک‌ترین مقادیر متغیر حالت متناظر با متغیرهای کنترل است، یعنی  $x = \min \{xa, xb, xc, xd\}$  کل سیستم انتخاب می‌شوند (Ahmed et al., 2015: 356-362; Wang et al., 2011: 539-549). در پژوهش حاضر، اصل مکمل برای محاسبه تصاعد کاتاستروف هر متغیر کنترل مورد استفاده قرار گرفت. توابع عضویت فازی کاتاستروف هر شاخص مطابق جدول (۲) محاسبه می‌شود.

جدول ۲: توابع عضویت فازی کاتاستروف

نام	متغیر حالت	متغیر کنترل	فرمول نرمال کردن
کاسپ	۱	۲	$x_a = a^{1/2}$ and $x_b = b^{1/3}$
دُم چلچله‌ای	۱	۳	$x_a = a^{1/2}$ and $x_b = b^{1/3}$ and $x_c = c^{1/4}$
پروانه‌ای	۱	۴	$x_a = a^{1/2}$ and $x_b = b^{1/3}$ and $x_c = c^{1/4}$ and $x_d^{1/5}$
ویگ‌وام	۱	۵	$x_a = a^{1/2}$ and $x_b = b^{1/3}$ and $x_c = c^{1/4}$ and $x_d^{1/5}$ and $x_e^{1/6}$

مأخذ: Ahmed et al., 2015: 539-549

1-Catastrophe progression

2-Initial fuzzy subordinate function

3-Complementary

4-Non-complementary

$$SZ = \sum_{i=1}^{11} w_i \times Layer_i \quad \text{رابطه (۳)}$$

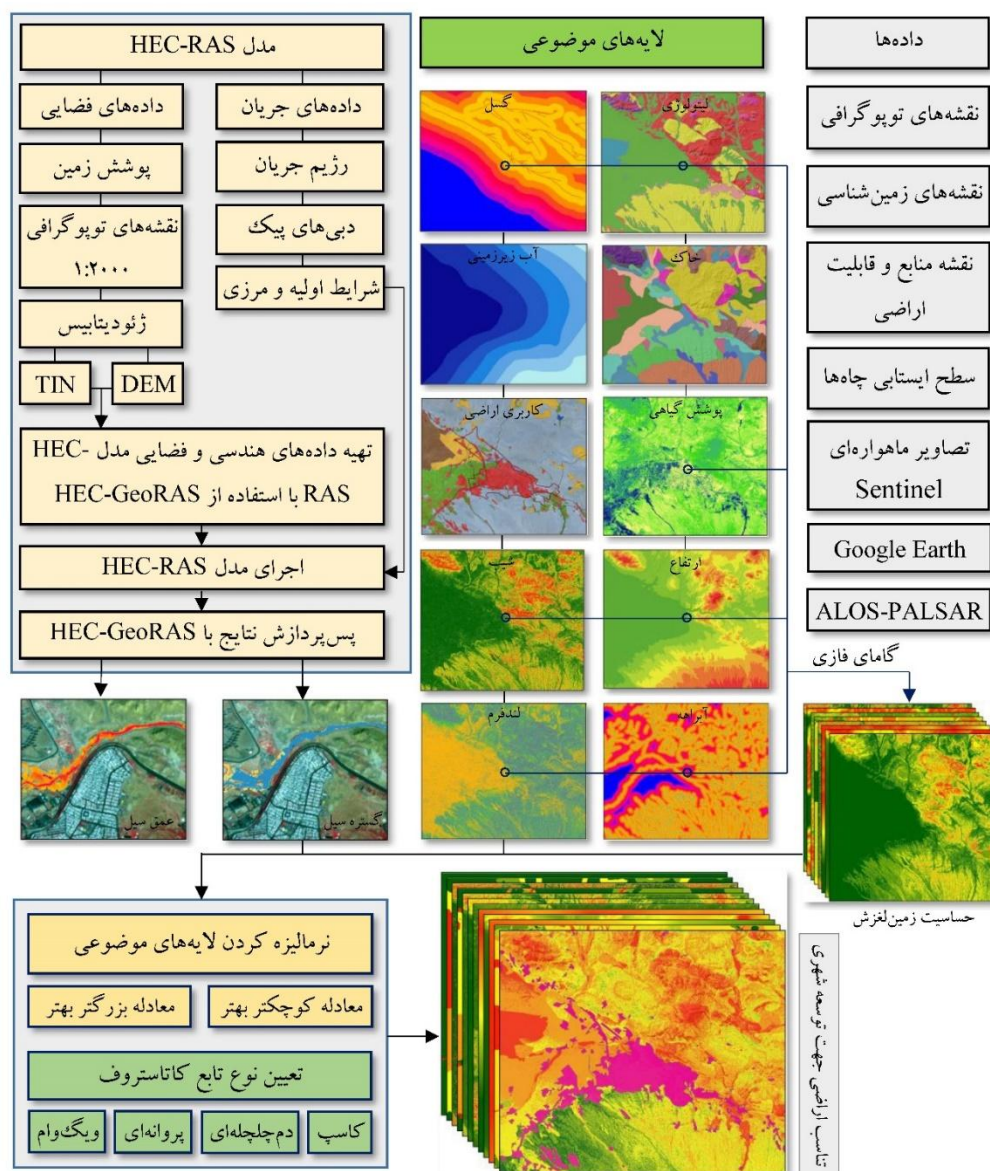
که در آن  $w_i$  وزن هر لایه و  $Layer_i$  لایه رستری نرمال شده متناظر است.

داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر و روند اجرای کار در شکل (۲) ارائه شده است.

تغییرپذیری و افتراق فضایی بالای متغیرهای طبیعی منطقه باعث شده است که اکثریت شاخص‌ها از نوع تابع کاتاستروف ویگ‌وام باشند.

- تلفیق لایه‌ها و ارزیابی پهنه‌های مناسب به منظور توسعه فضایی شهر

پس از تعیین وزن هر شاخص در طی مراحل قبل، لایه‌های مربوطه در چارچوب یک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) تلفیق شدند:



شکل ۲: فلوجارت پژوهش

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

## یافته‌ها

در پژوهش حاضر فرض شد که تمامی اجزا و مؤلفه‌های سیستم طبیعی محدوده و پیراشهر تبریز با یکدیگر در ارتباط تعاملی بوده و بر مورفولوژی شهر تأثیرگذارند. ژئومورفولوژی بر خصوصیات خاک، سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی، مخاطرات طبیعی و... تأثیر قاطعی دارد. خاک و سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی به نوبه خود بر پوشش گیاهی منطقه تأثیرگذارند. در ادامه، سیستم‌های شاخص مدل مورد استفاده به‌اختصار تبیین می‌شوند.

توزیع سطوح مختلف شیب در منطقه مطالعاتی به تبعیت از وضعیت ناهمواری‌ها و سیمای مورفولوژی منطقه شکل گرفته‌است (شکل ۳: الف و ب). جهت شیب منطقه توسط روند عمومی ناهمواری‌ها (توده آتشفشانی سهند در جنوب و ارتفاعات عینالی در شمال) و همچنین دو رودخانه عمده منطقه (میدان چای و آجی چای) کنترل می‌شود. هسته اصلی

شهر تبریز بر روی اراضی هموار و کم‌شیب جلگه تبریز شکل گرفته‌است. در طی دهه‌های اخیر، توسعه شهر در جهت شمال و شمال‌شرقی بر روی اراضی پرشیب و ناپایدار پایکوه‌های عینالی صورت گرفته‌است. با عطف به نقشه‌های توزیع فضایی ارتفاعات و شیب منطقه (شکل ۳: الف و ب) و شیب‌های مناسب برای توسعه شهری (جدول ۳) می‌توان نتیجه گرفت که متغیرهای ارتفاع و شیب محدودیت‌های زیادی را در قسمت‌های شمالی و جنوبی شهر به‌منظور توسعه فضایی-کالبدی ایجاد می‌کنند؛ درحالی‌که قسمت‌های مرکزی و غربی منطقه مطالعاتی شامل اراضی هموار و مسطحی هستند که شیب‌هایی برابر با ۰ تا ۵ درصد دارند و حداقل از نظر شیب و ارتفاع، مناسب‌ترین پهنه‌ها برای توسعه شهری هستند؛ هرچند در قسمت‌های غربی، شیب بسیار کم می‌تواند منشأ مشکلاتی در زمینه زهکشی و هدایت رواناب‌ها و فاضلاب شهری باشد.

جدول ۳: متوسط زاویه شیب، توسعه ساخت‌وساز و عملیات خاکبرداری و تسطیح

زاویه شیب	پتانسیل توسعه، خاکبرداری و تسطیح موردنیاز
تا ۵ درصد	نواحی با پتانسیل توسعه آسان و اقتصادی؛ تراس‌بندی ضروری نیست؛ تسطیح و خاکبرداری تنها به ایجاد شبکه فاضلاب و زهکشی محدود می‌شود؛ پستی و بلندی محدودیت خاصی در زمینه تراکم ساخت‌وساز یا ابعاد ساختمان‌ها ایجاد نمی‌کند.
۵ - ۱۲ درصد	افزایش هزینه‌های توسعه؛ تسطیح و خاکبرداری اجتناب‌ناپذیر است؛ توسعه صرفاً با تراس‌بندی و تسطیح شیب‌ها امکان‌پذیر است؛ توسعه تا حدودی محدود می‌شود.
۱۲ - ۲۵ درصد	این نواحی با هزینه و نیروی کار قابل توجه، تراس‌بندی و احداث دیوارهای نگهدارنده توسعه پیدا می‌کنند. تغییر و تبدیل توپوگرافیک عمده‌ای موردنیاز است و اساساً ناهمواری و پستی و بلندی تعیین‌کننده نوع توسعه خواهد بود.
۲۵ - ۳۵ درصد	سطوح با پتانسیل محدود برای توسعه شهری؛ ساخت و ساز با تراکم پایین همراه با ساختمان‌های با ابعاد و اندازه‌های کوچک مجاز است.
بیشتر از ۳۵ درصد	سطوح نامناسب برای توسعه شهری.

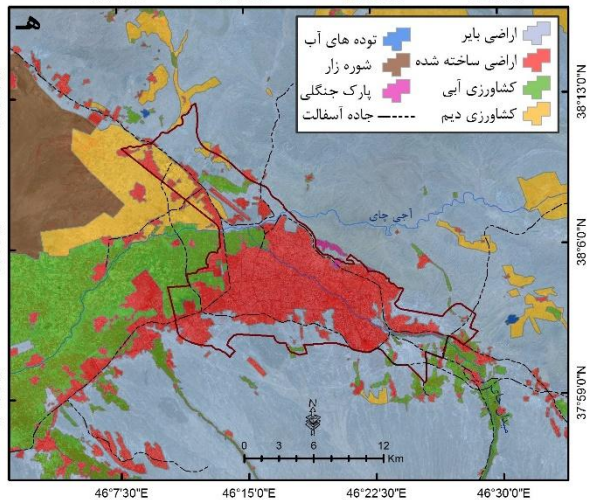
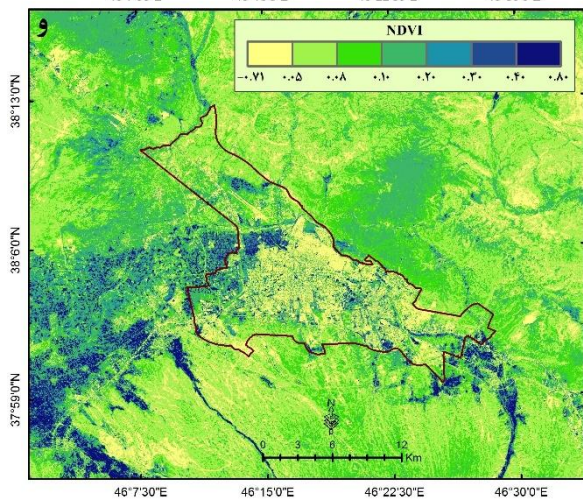
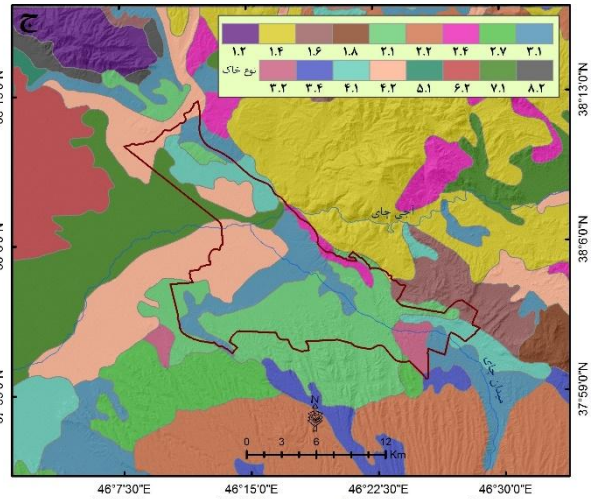
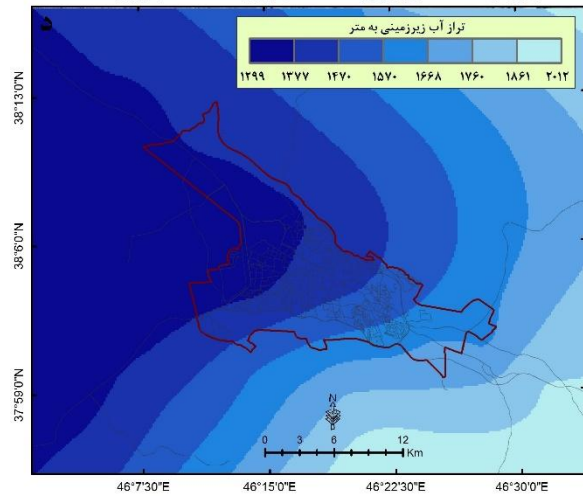
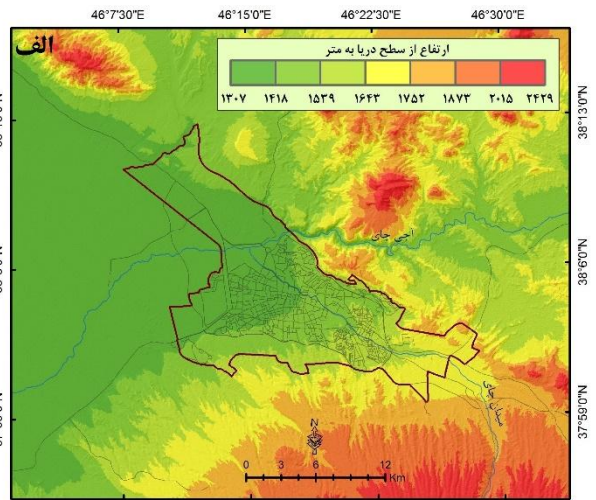
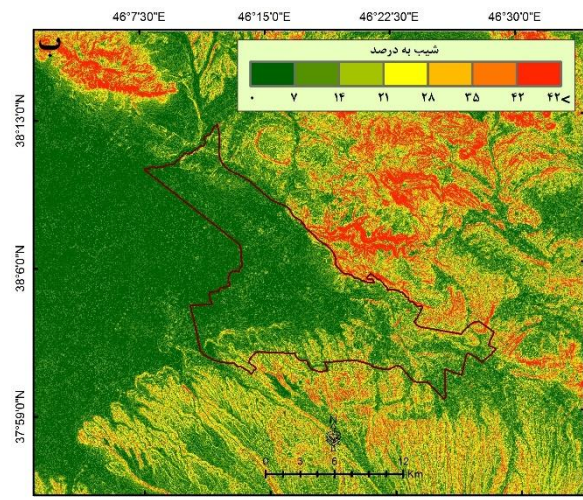
مأخذ: (Szabo et al., 2010: 182)

در نقشه مطالعات ارزیابی منابع و قابلیت اراضی (مؤسسه تحقیقات خاک و آب) شامل: تیپ اراضی کوه‌ها با واحدهای فرعی (۰.۲)، (۰.۴)، (۰.۶) و (۰.۸).

به تبعیت از ژئومورفولوژی منطقه، بخش قابل توجهی (حدود ۷۰ درصد) از خاک‌های شمال و جنوب منطقه مطالعاتی جزو خاک‌های جوان و تکامل‌نیافته است که

به طوری که در غربی ترین قسمت های منطقه مطالعاتی، فاصله سطح آب زیرزمینی از سطح زمین به ۰/۶ متر کاهش می یابد. این در حالی است که در برخی از قسمت های شرقی و جنوب شرقی، فاصله سطح آب زیرزمینی از سطح زمین به حدود ۲۰۰ متر نیز می رسد. در حالت کلی قسمت های غربی منطقه به دلیل بالا بودن سطح آب های زیرزمینی مناسب توسعه و عمران شهری نیست. این شرایط خاکشناسی - در ارتباط با اقلیم و ژئومورفولوژی - در پراکندگی پوشش زمین (شکل ۳: ه) و پوشش گیاهی (شکل ۳: و) منطقه، انعکاس یافته است؛ به طوری که مقادیر شاخص NDVI نشان دهنده پایین بودن تراکم پوشش گیاهی در منطقه است. در حدود ۸۶ درصد از منطقه مطالعاتی مقدار شاخص NDVI کمتر از ۰/۱۴ (اراضی بایر) است. مقادیر بسیار پایین این شاخص عمدتاً در دامنه های پرشیب رشته کوه عون ابن علی (عینالی)، پایکوه های توده آتش فشانی سهند و سطح شوره زارها دیده می شوند. تنها ۳/۵ درصد از منطقه دارای مقادیر نسبتاً بالای شاخص NDVI (بیشتر از ۰/۳۶) است و اغلب شامل اراضی کشاورزی است؛ بنابراین بخش اعظمی (حدود ۶۴ درصد) از اراضی شمالی و جنوبی شهر تبریز شامل اراضی بایر یا با پوشش گیاهی بسیار ضعیف است و از این نظر محدودیتی برای توسعه شهری وجود ندارد. همچنین حدود ۱۱ درصد از منطقه جزو اراضی ساخته شده است که عمدتاً منطبق بر شهر تبریز و شهر جدید سهند است.

۱)؛ تیپ اراضی تپه ها با واحدهای فرعی (۱. ۲)، (۲. ۲)، (۲. ۴) و (۲. ۷) و تیپ اراضی فلات ها و تراس های فوقانی با واحدهای فرعی (۱. ۳)، (۲. ۳) و (۳. ۴) هستند (شکل ۳: ج). این خاک ها به علت کم عمق بودن و تناسب پایین برای فعالیت های کشاورزی، محدودیت خاصی را برای توسعه شهری ایجاد نمی کنند. کاربری اساسی این خاک ها عمدتاً به صورت اراضی بایر و مراتع ضعیف تا متوسط است. خاک های تیپ اراضی دشت ها دارای واحدهای فرعی (۱. ۴)، (۲. ۴)، (۱. ۵)، (۲. ۶)، (۱. ۷) و (۲. ۸) هستند. چهار واحد (۱. ۴)، (۲. ۴)، (۱. ۵) و (۲. ۸) شامل خاک های نیمه عمیق تا عمیق با بافت سنگین و تکامل پروفیلی هستند که عموماً زیرکشت نباتات آبی و باغات و در بعضی قسمت ها دیم کاری هستند. این خاک ها مناسب ترین خاک های منطقه برای فعالیت های کشاورزی بوده و جزو محدودیت های توسعه فضایی شهر، به خصوص در جنوب غرب منطقه، محسوب می شوند. دو واحد (۲. ۶) و (۱. ۷) اراضی پست و شور اطراف رودخانه آجی چای و کویر کبودان هستند (در رابطه با کویر کبودان در شمال شرق دریاچه اورمیه مراجعه شود به: جداری عیوضی، ۱۳۶۱) که به علت بالا بودن سطح آب های زیرزمینی (شکل ۳: د)، شیب بسیار کم، زهکشی نامناسب، خاصیت گران روی به هنگام زلزله و سایر موارد از محدودیت های توسعه فیزیکی شهر به حساب می آیند. نقشه تراز آب های زیرزمینی منطقه مطالعاتی (شکل ۳: د) نیز نشان دهنده روند کاهشی سطح ایستابی آب های زیرزمینی در جهت غرب است؛





شمالی و شمال شرقی که دارای واحدهای مارنی هستند، نیازمند لحاظ کردن احتمال ناپایداری‌های دامنه‌ای است. عدم توجه به این مهم می‌تواند منجر به مسائل و مشکلات عدیده و حتی خسارات مادی و جانی فراوان شود. احداث ده‌ها واحد مسکونی در انتهای محله خلیل‌آباد در شمال شهر در طی سال‌های اخیر، نمونه‌ای بسیار مشخص در زمینه نادیده گرفتن فرایندهای ژئومورفولوژیک است. این مناطق علاوه بر اینکه در مجاورت گسل فعال و بزرگ تبریز قرار گرفته‌اند، به دلیل وجود سازندهای حساس، در معرض ناپایداری‌های دامنه‌ای نیز هستند. احداث واحدهای مسکونی بر روی این سازندها به دلیل افزایش بار بر روی دامنه‌ها می‌تواند محرک زمین‌لغزش باشد؛ بنابراین در یک حالت تطبیقی، در بخش‌هایی از شهر و پیرامون آن که دارای سازندهای مارنی هستند، زمین‌لغزش احتمال وقوع بالاتری دارد؛ از این رو وقتی سایر شرایط، به خصوص حضور آب و شیب مناسب یا تکان‌ها و ارتعاشات ناشی از زلزله فراهم باشد، پتانسیل بالایی برای لغزش خواهند داشت. این امر به دلیل حضور گسل بزرگ تبریز در این مناطق از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و رخداد زمین‌لغزش می‌تواند به عنوان یکی از مهم‌ترین پیامدهای ثانویه زلزله محسوب شود.

در برابر مخاطره زمین‌لرزه مربوط به مکان‌یابی نامناسب و عدم لحاظ گسل بزرگ تبریز در توسعه ساخت‌وسازها است. در واقع منطقه‌ای که باید به عنوان حریم گسل در نظر گرفته شده و به کاربری‌هایی مانند فضاهای سبز شهری اختصاص یابد، به صورت متراکمی به زیر ساخت‌وسازهای شهری رفته است. این امر باعث افزایش قابل توجه آسیب‌پذیری شهر نسبت به مخاطره زلزله شده است. متأسفانه، این روند در حال حاضر نیز تداوم دارد.

مطابق با نقشه حساسیت زمین‌لغزش (شکل ۳: ی)، قسمت‌هایی از محدوده قانونی شهر در شمال و شمال شرق و جنوب شهر (با احتمال کم‌تر) در معرض گسیختگی توده‌ای و زمین‌لغزش قرار دارند. در یک حالت تطبیقی، قسمت‌های شمالی شهر تبریز که منطبق بر پایکوه‌ها و دامنه‌های رشته‌کوه عینالی هستند، از حساسیت بالاتری نسبت به وقوع زمین‌لغزش برخوردارند. قسمت‌های جنوبی شهر که منطبق بر پایکوه توده آتشفشانی سهند است، در درجه بعدی اهمیت قرار دارد. وقوع زمین‌لغزش‌ها در شهرک ولی‌عصر (مراجعه شود به روستایی و ساری‌صراف، ۱۳۸۵)، ۴۲ متری و خلیل‌آباد در شمال شهر دلالت بر این امر دارد (شکل ۴)؛ بنابراین هرگونه ساخت‌وساز و توسعه فضایی شهر در این قسمت‌ها، به خصوص در بخش‌های



شکل ۴: الف) وقوع زمین‌لغزش در امتداد جاده وادی رحمت به دیزل‌آباد، ب) رانش زمین در محله ۴۲ متری، ج) به دلیل مکان‌یابی نامناسب، ده‌ها واحد مسکونی در آخر خلیل‌آباد در معرض زمین‌لغزش قرار دارند.

نمودارهای حاصل، توزیع لوگ پیرسون تیپ ۳ به عنوان بهترین توزیع انتخاب شد. به منظور محاسبه پهنه‌های سیل‌گیر رودخانه‌های آجی‌چای و میدان‌چای، از مدل HEC - RAS (HEC, 2010) به همراه اکستنشن HEC-GeoRAS (Cameron & Ackerman, 2012) در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. در شکل ۵ پهنه‌های سیل‌گیر این رودخانه‌ها نشان داده شده است.

سیلاب، یکی دیگر از مخاطراتی است که می‌بایست در مکان‌یابی توسعه فضایی-کالبدی شهرها مورد توجه قرار گیرد. در پژوهش حاضر برای محاسبه دبی پیک سیلاب‌های رودخانه‌های آجی‌چای و میدان‌چای برای دوره‌های بازگشت مختلف، انواع توابع توزیع متداول شامل توزیع نرمال، لوگ نرمال ۲ پارامتری، لوگ نرمال ۳ پارامتری، گامبل اکستریمال تیپ ۱، پیرسون تیپ ۳ و لوگ پیرسون تیپ ۳ برازش داده شد. با توجه به

جدول ۴: دبی پیک سیلاب‌های با دوره‌های بازگشت و احتمال وقوع مختلف با استفاده از توزیع

لوگ پیرسون تیپ ۳ برای ایستگاه‌های آخولا (آجی‌چای) و هروی (میدان‌چای)

انحراف معیار	دبی پیک محاسباتی	ایستگاه	انحراف معیار	دبی پیک محاسباتی	ایستگاه	احتمال وقوع	دوره بازگشت
۱/۲	۹/۱	هروی	۱۷/۵	۸۷/۹	آخولا	۰/۵۰۰	۲
۱/۸	۱۲/۹		۱۹/۰	۱۱۸/۵		۰/۶۶۷	۳
۲/۸	۱۸/۳		۱۸/۸	۱۴۹/۹		۰/۸۰۰	۵
۵/۰	۲۶/۷		۲۷/۵	۱۸۳/۸		۰/۹۰۰	۱۰
۱۰/۲	۴۰/۴		۵۶/۰	۲۱۷/۳		۰/۹۶۰	۲۵
۱۶/۷	۵۳/۲		۸۲/۹	۲۳۶/۴		۰/۹۸۰	۵۰
۲۶/۱	۶۸/۴		۱۱۱/۳	۲۵۱/۴		۰/۹۹۰	۱۰۰
۳۹/۳	۸۶/۴		۱۳۹/۹	۲۶۳/۲		۰/۹۹۵	۲۰۰

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

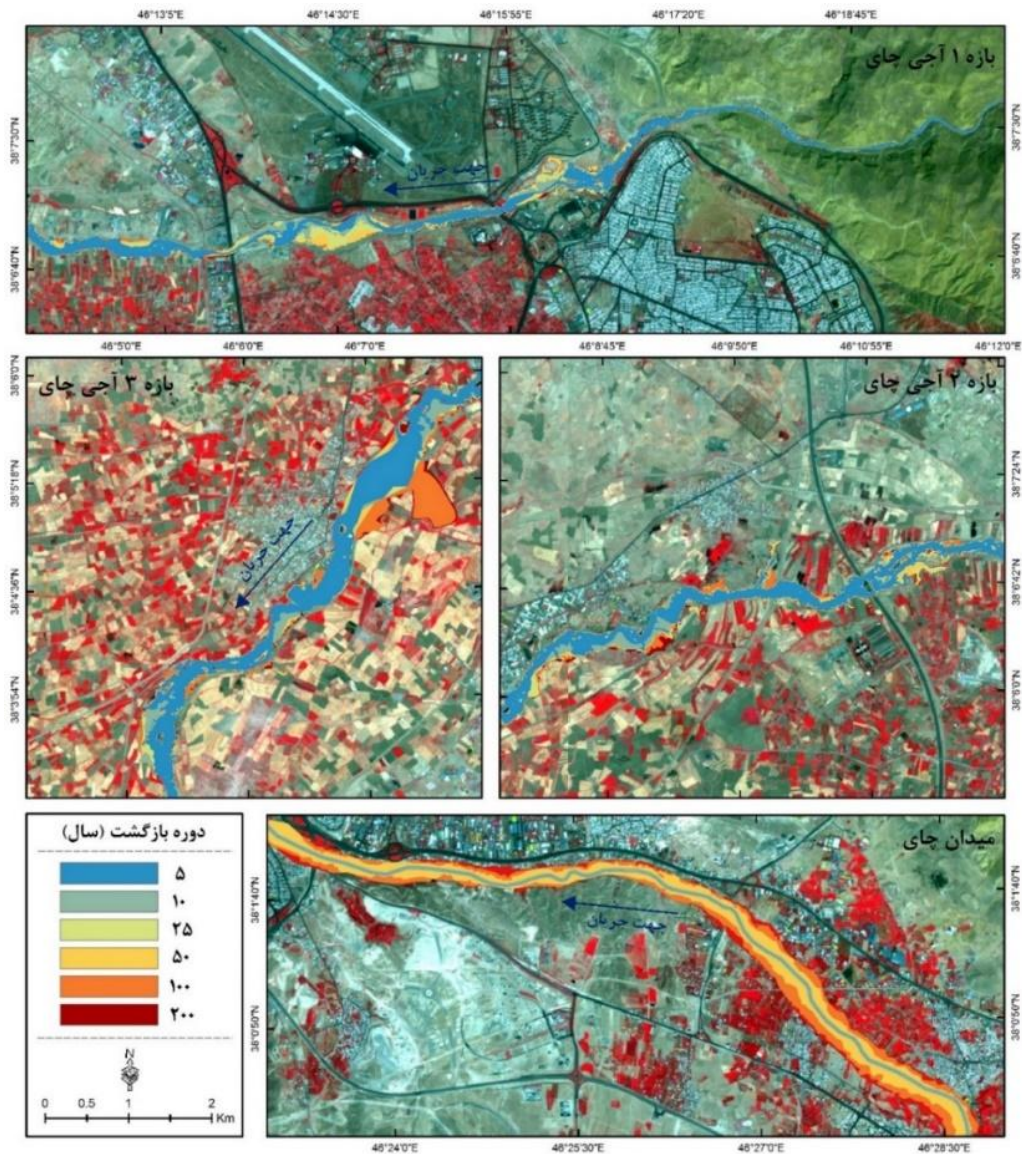
مخاطراتی را برای اراضی کشاورزی پیرامون و بخش‌هایی از روستاهای مجاور رودخانه ایجاد می‌کند. مساحت پهنه‌های سیل‌گیر رودخانه آجی‌چای در بازه مطالعاتی برای دوره‌های بازگشت ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال به ترتیب برابر با ۴۷۱، ۵۵۰، ۶۱۲، ۶۵۲، ۷۸۹ و ۸۱۹ هکتار است. رودخانه آجی‌چای قبل از ورود به محدوده قانونی شهر تبریز (محله رضوان شهر منطقه ۴ شهرداری) در دره‌ای کم‌عرض جریان می‌یابد که به صورت عرضی رشته‌کوه‌های عینالی را قطع کرده است؛ بنابراین به دلیل کم‌عرض بودن دره و عدم توسعه دشت سیلابی، محدوده‌های سیل‌گیر رودخانه نیز بسیار محدود بوده و عرض سیل‌گیری تقریباً منطبق بر سیلاب‌های ۵ ساله است. سیلاب‌های با دوره بازگشت

با وجود اینکه آجی‌چای اراضی وسیعی را زهکشی می‌کند (تقریباً ۹۲۰۰ کیلومترمربع)، اما در سال‌های اخیر به علت احداث بندها و سدهای متعدد بر روی انشعابات آن، دبی رودخانه تا حد زیادی کاهش یافته و کنترل شده است. این امر علاوه بر کاهش قابل توجه دبی رودخانه در قسمت‌های پایین دست (محدوده تبریز)، باعث کاهش دبی‌های اوج نیز شده است؛ به طوری که برای ایستگاه آخولا واقع در مصب رودخانه مقدار دبی محاسباتی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در حدود ۲۵۱ مترمکعب در ثانیه محاسبه شد (جدول ۴). این مقدار دبی و حتی دبی با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله (۲۶۳ مترمکعب در ثانیه) قادر به سرریزی و پخش گسترده در دشت سیلابی رودخانه نیست و تنها

بالا آمدن آب از بستر رودخانه به سطح خیابان‌های اطراف می‌شود، چنانکه در سال ۱۳۷۶ بلوار آذربایجان را به شدت تخریب کرد. قسمتی از رودخانه میدان‌چای که در محدوده شهر تبریز واقع شده، دارای طولی معادل با ۱۵ کیلومتر و شیب متوسط  $\frac{1}{3}$  درصد و عرض بستر متغیر ۲۵ تا ۶۶ متر بوده و مساحت اراضی اشغال‌شده توسط رودخانه در حدود ۷۰ هکتار است (روستایی و ساری‌صراف، ۱۳۸۵). نقشه پهنه‌بندی سیلاب آبراهه اصلی میدان‌چای نشان می‌دهد که سیلاب‌های با دوره بازگشت ۵۰ ساله و بالاتر می‌توانند مخاطراتی را متوجه واحدهای مسکونی، صنعتی، زیرساخت‌ها و تأسیسات شهری مجاور رودخانه سازند (شکل ۵). در واقع توسعه تبریز در جهت دره لیقوان و میدان‌چای باعث شده است که بعضی از تأسیسات شهری به تدریج در بستر سیلابی مستقر شوند. در چند سال اخیر، علاوه بر افزایش تأسیسات شهری، تعداد خانه‌ها و ویلاهای ساخته‌شده نیز در داخل دره و سطوح دشت سیلابی بسیار افزایش یافته و بر اثر این ساخت‌وسازها، علاوه بر انتقال مواد ساختمانی به دشت سیلابی و داخل بستر اصلی رود، احداث دیوار در اطراف ویلاها به صورت فزاینده‌ای بستر رود را تنگ کرده است. گاهی دیوارکشی پیرامون ویلاها و زمین‌های خریداری شده در وسط دشت سیلابی، تا کناره بستر دائم و کانال اصلی رود نیز کشیده شده که این امر به ابعاد مخاطرات احتمالی در آینده و میزان آشفته‌گی‌های فعلی در بستر رود و دشت سیلابی افزوده است (روستایی و جباری، ۱۳۹۰).

بالتر تنها بر عمق آب و انرژی رودخانه تأثیر می‌گذارند. رودخانه پس از گذر از این دره وارد مناطق شهرداری ۴ و تبریز می‌شود. کاربری اساسی اطراف این بازه شامل مناطق نظامی نیروی هوایی و فرودگاه تبریز، کاربری کشاورزی و فضای سبز و در مقیاس محدودتر کاربری‌های مسکونی و صنعتی است. رودخانه در این بازه دارای بستری عریض و تا حدودی گودافتاده است. با توجه به کاهش محسوس دبی در سال‌های اخیر، بستر فعلی توانایی انتقال سیلاب‌های رودخانه از سطح شهر را داراست. با وجود این، لایروبی بستر، حفظ و رعایت حریم رودخانه و نظارت بر توسعه فیزیکی پیرامون آن ضروری است؛ از این رو مخاطره سیلاب‌های ناشی از رودخانه آجی‌چای به دلیل اثرات کنترلی سدهای متعدد تا حد زیادی کاهش یافته است. از طرفی، به دلیل وجود ساختار کوهستانی عینالی در شمال شهر تبریز، مخاطره سیلاب این رودخانه به بخش‌هایی از غرب شهر محدود شده است.

در واقع، شهر تبریز عمدتاً متأثر از حوضه آبریز میدان‌چای و شاخه‌های فرعی آن است که از سمت جنوب و دامنه سهند به سمت این شهر جریان می‌یابند. بخش عمده جریانات ناشی از بارندگی در ناحیه جنوب‌شرقی توسط رودخانه میدان‌چای زهکشی می‌شود که حداکثر ظرفیت تخلیه مسیل داخل شهر حدود ۱۰۸ مترمکعب در ثانیه است، اما در قسمت‌های پایین دست این رودخانه و حوالی بلوار آذربایجان بستر رودخانه به قدری از رسوبات انباشته شده که تقریباً با زمین‌های اطراف رودخانه همسطح شده است و باعث



شکل ۵: پهنه‌های سیل‌گیر رودخانه آجی‌جای و میدان‌جای در منطقه مطالعاتی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

جدول ۵: جزئیات روش وزن دهی کاتاستروف به منظور تلفیق سیستم‌های شاخص مؤثر بر مکان‌یابی بهینه توسعه فضایی شهر تبریز

وزن	اولویت مبتنی بر اصل مکمل	عضویت فازی کاتاستروف	تابع کاتاستروف	نرمال‌سازی مقادیر میانگین	انحراف معیار	میانگین	شاخص‌ها	پارامترهای کنترل	لایه داده
۱/۰	۰/۷۳۹	۱/۰۰۰	ویگ‌وام	۱/۰۰۰	۱/۸۷۲	۳/۵۰۷	ملایم	$۷ \leq$ کلاس ۱	شیب
		۰/۹۴۳		۰/۸۳۷	۲/۱۰۰	۹/۷۵۱	نسبتاً ملایم	$۷ < ۲ \leq$ کلاس	
		۰/۸۹۶		۰/۶۴۴	۱/۹۷۱	۱۷/۱۹۶	متوسط	$۱۴ < ۳ \leq$ کلاس	
		۰/۸۵۷		۰/۴۶۲	۲/۰۴۰	۲۴/۱۷۰	تند	$۲۱ < ۴ \leq$ کلاس	
		۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	۱۴/۶۶۸	۴۱/۹۱۷	بسیار تند	$۲۸ > ۵$ کلاس	
۰/۹	۰/۷۰۸	۱/۰۰۰	ویگ‌وام	۱/۰۰۰	۳۱/۶۶	۱۳۵۷/۰	ارتفاع کم	$۱۳۱۱ < ۱ \leq$ کلاس	ارتفاع
		۰/۹۰۷		۰/۷۴۵	۴۱/۲۴	۱۵۱۷/۷	ارتفاع نسبتاً کم	$۱۴۳۷ < ۲ \leq$ کلاس	
		۰/۸۵۲		۰/۵۲۷	۴۰/۹۶	۱۶۵۵/۳	ارتفاع متوسط	$۱۵۸۶ < ۳ \leq$ کلاس	
		۰/۷۸۰		۰/۲۸۹	۴۷/۴۸	۱۸۰۵/۳	ارتفاع زیاد	$۱۷۳۰ < ۴ \leq$ کلاس	
		۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	۷۰/۸۷	۱۹۸۷/۲	ارتفاع بسیار زیاد	$۱۸۹۶ < ۵ \leq$ کلاس	
۰/۸	۰/۷۰۰	۰/۰۰۰	ویگ‌وام	۰/۰۰۰	۹۷۹/۷	۱۳۹۱/۳	بسیار خطرناک	$۰ \leq ۱$ کلاس	فاصله از گسل
		۰/۶۰۰		۰/۲۱۶	۱۴۶۰/۲	۵۶۵۲/۴	خطرناک	$۳۴۹۳ < ۲ \leq$ کلاس	
		۰/۹۰۵		۰/۶۷۱	۱۷۵۶/۳	۱۱۳۷۵/۸	با خطر متوسط	$< ۳ \leq$ کلاس ۱۴۶۲۱ ۸۵۴۰	
		۰/۹۹۳		۰/۹۶۶	۱۹۹۰/۹	۱۷۷۶۱/۸	با خطر نسبتاً کم	$< ۴ \leq ۲۱۶۰۸$ کلاس ۱۴۶۲۱	
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۲۷۲۲/۳	۲۵۳۹۱/۴	با خطر کم	$< ۵ \leq ۳۲۹۹۵$ کلاس ۲۱۶۰۸	
۰/۴	۰/۶۷۴	۰/۰۰۰	ویگ‌وام	۰/۰۰۰	۲۹/۴	۱۳۴۷/۰	تراز بسیار پایین	$۱۲۹۹ \leq ۱$ کلاس	تراز آب زیرزمینی
		۰/۶۰۳		۰/۲۱۹	۳۶/۵	۱۴۶۳/۳	تراز پایین	$۱۴۰۵ < ۲ \leq$ کلاس	
		۰/۸۳۰		۰/۴۷۴	۳۹/۱	۱۵۹۸/۸	تراز متوسط	$۱۵۳۱ < ۲ \leq ۱۶۶۵$ کلاس	
		۰/۹۳۷		۰/۷۲۲	۳۸/۷	۱۷۳۰/۵	تراز بالا	$۱۶۶۵ < ۲ \leq ۱۸۰۵$ کلاس	
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۵۱/۹	۱۸۷۷/۸	تراز بسیار بالا	$۱۸۰۵ < ۲ \leq ۲۰۱۱$ کلاس	

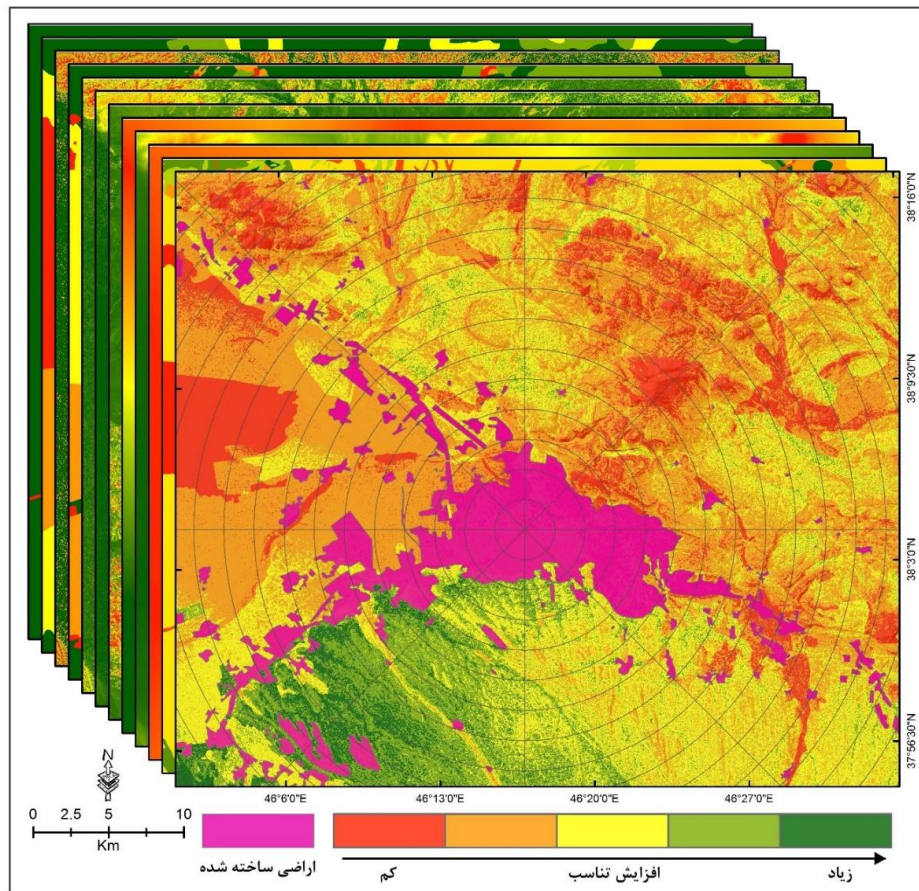
ادامه جدول ۵: جزئیات روش وزن دهی کاتاستروف به منظور تلفیق سیستم‌های شاخص مؤثر بر مکان‌یابی بهینه توسعه فضایی شهر تبریز

وزن	اولویت مبتنی بر اصل مکمل	عضویت فازی کاتاستروف	تابع کاتاستروف	نرمال‌سازی مقادیر میانگین	انحراف معیار	میانگین	شاخص‌ها	پارامترهای کنترل	لایه داده
۰/۲	۰/۶۴۲	۱/۰۰۰	دُم چلچله‌ای	۱/۰۰۰	۰/۰۲۷	۰/۰۶۴	بایر	$۰/۱ \leq \text{کلاس ۱} \leq ۰/۷$	پوشش گیاهی
		۰/۹۲۵		۰/۷۹۳	۰/۰۲۶	۰/۱۲۹	تراکم پایین	$۰/۱ < \text{کلاس ۲} < ۰/۱$	
		۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	۰/۱۴۴	۰/۳۸۰	تراکم متوسط	$۰/۱۸ \leq \text{کلاس ۳} < ۰/۲$	
۰/۵	۰/۶۷۶	۱/۰۰۰	ویگ‌وام	۱/۰۰۰	۰/۰۶۵	۰/۰۵۵	بسیار پایین	$۰ \leq \text{کلاس ۱} \leq ۰/۲۰۲$	مخاطره زمین لغزش
		۰/۸۷۴		۰/۶۶۷	۰/۰۶۰	۰/۳۰۵	پایین	$۰/۴۱۴ \leq \text{کلاس ۲} < ۰/۲۰۲$	
		۰/۷۹۹		۰/۴۰۷	۰/۰۵۴	۰/۵۰۱	متوسط	$۰/۶۰۶ \leq \text{کلاس ۳} < ۰/۴۱۴$	
		۰/۷۰۸		۰/۱۷۸	۰/۰۴۵	۰/۶۷۳	بالا	$۰/۷۶۵ \leq \text{کلاس ۴} < ۰/۶۰۶$	
		۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	۰/۰۳۳	۰/۸۰۷	بسیار بالا	$۰/۹۲۸ \leq \text{کلاس ۵} < ۰/۷۶۵$	
۰/۶	۰/۶۸۳	۰/۰۰۰	ویگ‌وام	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	تناسب بسیار کم	واحد ۶.۲	خاک
		۰/۶۳۰		۰/۲۵۰	۰/۰۰۰	۲/۰۰۰	تناسب کم	واحد ۷.۱	
		۰/۸۴۱		۰/۵۰۰	۰/۰۰۰	۳/۰۰۰	تناسب متوسط	واحدهای ۰.۲، ۰.۴، ۰.۱، ۰.۴، ۰.۲، ۰.۱، ۰.۸، ۰.۱، ۰.۵	
		۰/۹۴۴		۰/۷۵۰	۰/۰۰۰	۴/۰۰۰	تناسب بالا	واحدهای ۰.۱، ۰.۳، ۰.۴، ۰.۳، ۰.۲، ۰.۳	
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۵/۰۰۰	تناسب بسیار بالا	واحدهای ۰.۲، ۰.۴، ۰.۲، ۰.۲، ۰.۸، ۰.۱، ۰.۴، ۰.۲، ۰.۱، ۰.۶، ۰.۲، ۰.۱، ۰.۲، ۰.۱	
۰/۳	۰/۶۴۹	۰/۰۰۰	پروانه‌ای	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	تناسب بسیار کم	آبراهه‌های عمیق، زهکش‌های مرتفع، دامنه‌های فوقانی، قله‌ها	لندفرم
		۰/۶۹۳		۰/۳۳۳	۰/۰۰۰	۲/۰۰۰	تناسب کم	دره‌های کم‌عمق، دره‌های یو-شکل، تپه‌های محلی در دره‌ها	
		۰/۹۰۴		۰/۶۶۷	۰/۰۰۰	۳/۰۰۰	تناسب نسبتاً زیاد	دامنه‌های فراخ، تپه‌های کوچک در دشت‌ها	
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۴/۰۰۰	تناسب زیاد	دشت‌ها	

ادامه جدول ۵: جزئیات روش وزن دهی کاتاستروف به منظور تلفیق سیستم‌های شاخص مؤثر بر مکان‌یابی بهینه توسعه فضایی شهر تبریز

وزن	اولویت مبتنی بر اصل مکمل	عضویت فازی کاتاستروف	تابع کاتاستروف	نرمال‌سازی مقادیر میانگین	انحراف معیار	میانگین	شاخص‌ها	پارامترهای کنترل	لایه داده
۰/۷	۰/۶۹۵	۰/۰۰۰	ویگ‌وام	۰/۰۰۰	۰/۷۳۸	۱/۸۴۲	بسیار سست	توده‌های لغزشی، کفه‌های نمکی، تپه‌های ماسه‌ای، آبرفت‌های منفصل	لیتولوژی
		۰/۷۰۵		۰/۳۵۰	۰/۰۰۰	۴/۰۰۰	نسبتاً سست	مارن، تراس‌ها و دشت‌های گراولی جوان	
		۰/۸۴۶		۰/۵۱۳	۰/۰۰۰	۵/۰۰۰	با سستی متوسط	تراس‌های قدیمی، کنگلومرای تحکیم‌نیافته، ماسه‌سنگ همراه مارن	
		۰/۹۲۴		۰/۶۷۵	۰/۰۰۰	۶/۰۰۰	نسبتاً پایدار	ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومرای مستحکم	
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۸/۰۰۰	پایدار	سنگ‌های آذرین	
۰/۶	۰/۶۸۳	۰/۰۰۰	ویگ‌وام	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱	تناسب بسیار کم	ساخته‌شده، آب، پارک جنگلی	کاربری اراضی
		۰/۶۳۰		۰/۲۵۰	۰/۰۰۰	۲	تناسب کم	اراضی کشاورزی آبی	
		۰/۸۴۱		۰/۵۰۰	۰/۰۰۰	۳	تناسب متوسط	شوره‌زار	
		۰/۹۴۴		۰/۷۵۰	۰/۰۰۰	۴	تناسب زیاد	اراضی کشاورزی دیم	
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۵	تناسب بسیار زیاد	اراضی بایر، مراتع ضعیف	
۰/۱	۰/۵۰۰	۰/۰۰۰	کاسپ	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱	خطرناک	سیل با دوره بازگشت ۲۵ سال	مخاطره سیل
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۲	نسبتاً بی‌خطر	سیل با دوره بازگشت بیش از ۲۵ سال	

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸



شکل ۶: نقشهٔ پهنه‌بندی تناسب توسعهٔ فضایی-کالبدی شهر تبریز

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

طبقه‌بندی تناسب اراضی کاسته شد. با توجه به نقشهٔ پهنه‌بندی (شکل ۶) و واقعیت‌های میدانی، می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- شرایط توپوگرافیکی و تکتونیک نقش بسیار اساسی و تعیین‌کننده در مکان‌یابی بهینهٔ توسعهٔ فضایی شهر تبریز دارند. این امر در مدل‌سازی توسعهٔ فضایی بهینهٔ شهر با استفاده از تئوری کاتاستروف نیز به وضوح انعکاس یافته‌است؛ به طوری که لایهٔ داده‌های ارتفاع، شیب و فاصله از گسل، از اولویت بالاتری برخوردار شده‌اند (جدول ۵). افتراق فضایی شدید این متغیرها نقش اساسی در بالابودن اولویت مبتنی بر اصل مکمل این متغیرها داشته‌است.

نتیجهٔ روی هم‌گذاری متغیرهای طبیعی با استفاده از توابع تئوری کاتاستروف (جدول ۵) نشان می‌دهد که توسعهٔ فضایی-کالبدی شهر تبریز با موانع، محدودیت‌ها و تنگناهای شدیدی روبه‌رو است. هنگامی که لایهٔ نهایی با توجه به ارزش‌های به‌دست آمده به پنج کلاس مساوی طبقه‌بندی شد، تنها حدود ۲۰۹ هکتار از منطقهٔ مورد مطالعه (۱/۰ درصد) در کلاس با تناسب خیلی زیاد قرار گرفت که آن هم به صورت لکه‌هایی در سطح منطقه پراکنده شده‌اند. واقعیت‌های میدانی نیز تأییدکنندهٔ نتایج مدل مورد استفاده است. در واقع، هیچ منطقه‌ای از اطراف شهر تبریز مناسب توسعهٔ فضایی-کالبدی نیست و به‌ناچار از میزان سخت‌گیری

به منظور آماده سازی زمین یا تسطیح و خاک برداری است. هرچند در حالت تطبیقی و به ناچار این پهنه ها می توانند - مشروط به اقدامات مهندسی - برای اهداف توسعه فضایی شهر مورد استفاده قرار گیرند.

- در قسمت هایی از غرب شهر تبریز (اراضی غرب خط راه آهن تبریز- مراغه) اراضی بسیار هموار و مسطحی وجود دارد که دارای شیب بسیار پایین (۰/۵ در هزار) بوده و منطبق بر شوره زارهای اطراف آجی چای است. این اراضی به دلایل مختلف، مناسب شهرسازی نیستند. یکی از مهم ترین محدودیت های این اراضی مربوط به شیب بسیار پایین است که مسائل و مشکلات زیادی را در رابطه با دفع رواناب های سطحی و فاضلاب شهری به بار خواهد آورد. همچنین در این بخش از منطقه مطالعاتی، سطح آب زیرزمینی بالا بوده و به دلیل واقع شدن در مصب رودخانه آجی چای، دارای شرایط کویری است. از طرف دیگر باد غالب تبریز از جهت شرق به غرب می وزد و در نتیجه دود کارخانجات ناحیه صنعتی شهر تبریز را به این قسمت منتقل می کند. این امر می تواند با آلودگی ناشی از ترافیک شهری توأم شده و مشکلات بسیار زیادی را موجب شود.

- هرچند در قسمت هایی از غرب و جنوب غرب پیرامون شهر تبریز پهنه های نسبتاً مناسبی به منظور توسعه فضایی-کالبدی شهر وجود دارد؛ اما باید توجه داشت که در این مناطق اراضی مرغوب کشاورزی حضور دارند. وجود خاک های حاصلخیز حاکی از قابلیت و توان طبیعی این قسمت ها برای فعالیت های کشاورزی است. اصولاً شهرهای مراکز ناحیه ای، عمدتاً در عرصه های با قابلیت بالای کشت اسکان یافته اند و در دهه های اخیر به موازات افزایش مهاجرت های روستایی و بالابودن نرخ رشد جمعیت، تغییرات کالبدی سریعی را پذیرفته اند و از این رهگذر، اراضی پیرامونی که اصولاً در زمینه «قانون حفظ کاربری

- توسعه فضایی شهر تبریز در جهت شمال، شمال شرقی و شمال غربی با محدودیت ها و تنگناهای بسیار زیادی مواجه است. مهم ترین محدودیت ها مربوط به حضور توده کوهستانی عینالی و در نتیجه توپوگرافی ناهموار، شیب های تند، ناپایداری های دامنه ای، وجود برخی سازندهای زمین شناسی سست و ناپایدار به خصوص حضور مارن ها و مهم تر از همه، عبور گسل بزرگ و خطرناک تبریز است. در سال های اخیر ساخت و سازهای زیادی در برخی از قسمت های شمالی (شمال شرقی) شهر به خصوص در محدوده شهرک های رشدیه، باغمیشه و ولی عصر بدون توجه به لیتولوژی، ناپایدارهای دامنه ای و گسل شمال تبریز صورت گرفته است. در حالی که این مناطق جزو حریم گسلش محسوب شده و ساخت و ساز در این مناطق ممنوع است. در واقع توسعه شهر در این قسمت ها بدون توجه به محدودیت ها و مخاطرات ژئومورفولوژیک و زمین شناسی صورت گرفته و می گیرد. این امر آسیب پذیری ناشی از مخاطرات محیطی را به شدت افزایش می دهد. می توان گفت قسمت های شمالی و به خصوص شمال شرقی نامناسب ترین مناطق برای توسعه فضایی شهر تبریز محسوب می شوند (شکل ۵) و باید از توسعه فضایی شهر در این پهنه ها جداً جلوگیری شود.

- توسعه فضایی شهر تبریز در قسمت های جنوب شرقی و جنوبی نیز به دلیل وجود توده آتشفشانی سهند با محدودیت مواجه است؛ بنابراین عوامل ژئومورفولوژیک نقش قاطعی در کاهش تناسب این پهنه ها به منظور توسعه بهینه شهر ایفا می کنند. به طوری که این اراضی با فراوانی توزیع فضایی شیب های تند و سطوح تپه ماهوری از سایر اراضی متمایز می شوند. اراضی هموار یا با شیب کم، عمدتاً به صورت لکه های کوچک و بزرگ در این پهنه توزیع شده اند. در نتیجه ساخت و ساز در این قطع ها مستلزم هزینه های سنگین

اراضی زراعی و باغ‌ها» (مصوب ۳۱ خرداد ۱۳۷۴) و «آیین‌نامه اجرایی قانون فوق» (مصوب ۲۴ دی ۱۳۷۴) هیئت وزیران، باید وظیفه تولید غذا را برای جمعیت روبه‌رشد داشته باشند، اغلب به انواع ساخت‌وسازها اختصاص یافته‌اند (سرور، ۱۳۸۷: ۱۱۵)؛ بنابراین همچنانکه توان‌های محیط طبیعی در این محدوده پیراشهری نشان می‌دهد، تدوین برنامه‌های پیشنهادی در افق آتی لزوم توجه به این سیستم طبیعی را باید در درجه اول اولویت‌های اجرایی قرار دهد؛ بنابراین کاربری‌های کشاورزی یکی از مهم‌ترین کاربری‌های عمده در برخی از قطعات‌های غربی و جنوب‌غربی پیراشهر است و اهمیت زیادی در تأمین بخشی از نیازهای شهر به محصولات کشاورزی، زیبایی، گردشگری و کاهش آلودگی هوای شهر دارند.

- با توجه به موارد گفته‌شده، شهر تبریز در زمینه توسعه فضایی بسیار محدود است. این محدودیت‌ها ناشی از مخاطرات ژئومورفولوژیک (به‌خصوص عبور گسل بزرگ تبریز)، توپوگرافی ناهموار، بالابودن سطح آب‌های زیرزمینی و وجود اراضی کشاورزی مرغوب است. درواقع اراضی هموار و کم‌شیب به‌دلیل وجود زمین‌های کشاورزی حاصلخیز یا وجود شوره‌زار و بالابودن سطح آب‌های زیرزمینی مناسب توسعه فضایی شهر نیستند؛ بنابراین هرگونه توسعه فضایی مستلزم هزینه‌های زیادی به‌منظور آماده‌سازی زمین خواهد بود. در حالت تطبیقی، مناطق مناسب برای توسعه فیزیکی شهر در جنوب منطقه پیراشهری در حد فاصل شهر تبریز و شهر جدید سهند مکان‌یابی شدند. این مناطق هرچند محدودیت‌های زیادی را در رابطه با توپوگرافی و شیب اعمال می‌کنند، اما در یک حالت تطبیقی و اجباری به‌چند دلیل اساسی می‌توانند در زمینه توسعه فضایی شهر تبریز - به‌صورت احداث شهرک‌ها - مورد توجه قرار گیرند. نخست اینکه گسل

بزرگ تبریز مهم‌ترین و جدی‌ترین مخاطره طبیعی منطقه مطالعاتی محسوب می‌شود. این گسل به‌دلیل تراکم بالای ساخت‌وساز در مجاورت آن یکی از خطرناک‌ترین گسل‌های ایران است. با توجه به پتانسیل لرزه‌زایی این گسل (حدود ۷ ریشتر) و پیامدهای ثانویه ناشی از رخداد زلزله، می‌توان به این نتیجه رسید که رعایت حریم و دوری از این گسل می‌تواند خسارات ناشی از زلزله را تا حد بسیار زیادی کاهش دهد؛ بنابراین قسمت‌های جنوبی منطقه مطالعاتی به‌دلیل دوری از گسل از امتیاز بالاتری نسبت به سایر مناطق برخوردار هستند. دوم اینکه لیتولوژی این منطقه در حالت مقایسه‌ای نسبت به سایر قسمت‌های منطقه مطالعاتی واقع در پیرامون شهر از استحکام و مقاومت بالاتری برخوردار است. درواقع می‌توان انتظار داشت که مسائل مربوط به ناپایداری پی‌سنگ و مخاطره فرونشست موجود در برخی قسمت‌های سطح شهر تبریز (به‌خصوص منطقه شمال‌شرق شهر) در این منطقه کمتر نمود خواهد یافت. با توجه به این موارد و مواردی از قبیل نبود مسائل ناشی از بالابودن سطح آب‌های زیرزمینی، قابلیت بسیار پایین این مناطق برای فعالیت‌های کشاورزی، جهت بادهای غالب منطقه، آلودگی کمتر هوا و مسائل مربوط به زیبایی‌شناختی، قطعات‌های واقع در محدوده بین شهر تبریز و شهر جدید سهند، می‌تواند به‌منظور توسعه فضایی شهر تبریز و آن هم به‌صورت احداث شهرک‌های مختلف مورد توجه قرار گیرد.

#### نتیجه

در این تحقیق استعداد اراضی و امکان‌سنجی توسعه فضایی - کالبدی شهر تبریز با توجه به پتانسیل‌ها و محدودیت‌های طبیعی مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اینکه مدل‌های مبتنی بر وزن‌دهی کارشناسی

فضایی شهر نادیده گرفته شده است. به نظر می‌رسد که روند توسعه شهر در مجاورت و حتی بر روی گسل مذکور در سال‌های آتی نیز تداوم داشته باشد.

در حالی که با توجه به توان لرزه‌زایی بالای این گسل، می‌بایست از توسعه بیشتر شهر در حریم این گسل، مانعت به عمل آید. این امر به روش‌های مختلف، از قبیل عدم صدور مجوزهای ساخت‌وساز و تبدیل منطقه حریم گسل به فضاهای سبز عملی است. همچنین اطراف رودخانه میدان‌چای در شرق منطقه، یکی از جهات توسعه فعلی شهر تبریز است که می‌بایست نظارت بیشتری در زمینه رعایت حریم رودخانه صورت گیرد. همچنین اقدامات مهندسی در زمینه کاهش مخاطره سیلاب از ضروریات منطقه به‌شمار می‌آید. در نهایت با کاهش سخت‌گیری، نتایج مدل و ارزیابی ویژگی‌های بستر جغرافیایی اراضی پیرامون شهر و فرصت‌ها، تنگناها و مخاطرات مختلف طبیعی (به‌خصوص مخاطره زلزله)، بهترین پهنه‌ها به‌منظور توسعه بیرونی شهر در جنوب پیرامون و گستره بین شهر تبریز و شهر جدید سهند واقع شده است. هرچند توسعه فضایی شهر در این پهنه‌ها - به‌صورت شهرک‌ها- مستلزم هزینه‌های کلانی برای آماده‌سازی زمین خواهد بود؛ بنابراین با عطف به شرایط نامساعد محیطی پیرامون شهر، بهتر است برنامه‌ریزی توسعه فضایی - کالبدی با توجه به پتانسیل‌های درونی (مانند نوسازی بافت‌های فرسوده) صورت گیرد. در این رابطه، کاربری‌های گسترده نظامی در جنوب شهر، به‌عنوان کاربری‌های ناسازگار، می‌تواند به خارج از محدوده شهر منتقل شوند. از این طریق اراضی قابل توجهی در اختیار شهرداری قرار گرفته که می‌تواند راه‌گشای برخی از مسائل مربوط به محدودیت فضا شود.

به‌واسطه سلیقه و قضاوت تصمیم‌گیران به‌شدت تحت‌تأثیر قرار می‌گیرند، در پژوهش حاضر به‌منظور اجتناب از ذهن‌گرایی، توابع تئوری کاتاستروف برای ترکیب و یکپارچه‌سازی متغیرهای مختلف در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد استفاده قرار گرفت. در تئوری کاتاستروف، وابستگی متغیر حالت به متغیرهای کنترل به‌واسطه توابع فازی کاتاستروف تعیین می‌شود. ویژگی اصلی این روش، ارزیابی وزن‌های شاخص‌های مورد استفاده نیست، بلکه اهمیت نسبی آن‌ها مورد توجه است. بنیان ریاضیاتی، کاهش چشمگیر عدم قطعیت تصمیم‌گیری در طی فرایند وزن‌دهی و تا حدودی کاهش عدم قطعیت کلاسه‌بندی، در نظر گرفتن افتراق فضایی متغیرها، قابلیت تکرار نتایج توسط محققان مختلف، انعطاف‌پذیری بالا در نوع و تعداد متغیرها و قابلیت استفاده در تمامی شرایط جغرافیایی (طبیعی و انسانی) از مهم‌ترین مزایای این مدل است. مقایسه نتایج این مدل با واقعیت‌های میدانی و جغرافیایی حاکم بر منطقه نشان‌دهنده اعتبار و کارایی بالای مدل مورد استفاده است.

امکان‌سنجی توسعه فضایی - کالبدی شهر تبریز با استفاده از تئوری کاتاستروف نشان داد که در پیرامون شهر تبریز به‌دلیل شرایط خاص ژئومورفولوژیک، زمین‌شناسی، خاک‌شناسی و هیدرولوژیک، پهنه‌هایی مناسب و مطلوب برای توسعه فضایی - کالبدی شهر موجود نیست و توسعه فضایی تبریز با محدودیت‌ها و تنگناهای محیطی زیادی مواجه است. حتی روند توسعه شهر تبریز در طی دهه‌ها و سال‌های اخیر، بخش عمده‌ای از سیستم شهر را در معرض مخاطرات جدی محیطی قرار داده است. در این زمینه گسل فعال شمال تبریز مهم‌ترین و جدی‌ترین چالش پیش‌روی شهر تبریز است که متأسفانه در برنامه‌ریزی‌های توسعه

## منابع

- سازمان زمین‌شناسی کشور. نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، برگه‌های تبریز، بستان‌آباد، خوجا و اسکو به‌همراه گزارشات.
- سرور، رحیم (۱۳۸۷). جغرافیای کاربردی و آمایش سرزمین، چاپ سوم، انتشارات سمت.
- محمدزاده، رحمت (۱۳۷۶). درآمدی بر توسعه فیزیکی شتابان شهر و عوارض ناشی از آن، مجله اطلاعات سیاسی-اقتصادی. دوره ۱۱. شماره ۸-۷ (۱۱۶-۱۱۵). صفحات ۲۲۷-۲۲۲.
- <https://www.sid.ir/fa/Journal/ViewPaper.aspx?ID=105205>
- مکرم، مرضیه؛ سعید نکهبان (۱۳۹۳). طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) (مطالعه موردی: منطقه جنوبی شهرستان داراب)، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر). دوره ۲۳. شماره ۹۲. صفحات ۵۷-۶۵.
- [http://www.sepehr.org/article\\_13507.html](http://www.sepehr.org/article_13507.html)
- مهندسان مشاور نقش محیط (۱۳۹۱). طرح توسعه و عمران (جامع) شهر تبریز. اداره کل راه و شهرسازی استان آذربایجان شرقی.
- Ahmed, Kamal; Shahid, Shamsuddin; Bin Harun, Sobri; Ismail, Tarmizi; Nawaz, Nadeem; Shamsudin, Supiah (2015). Assessment of groundwater potential zones in an arid region based on catastrophe theory. *Earth Science Informatics*, Vol. 8, Issue. 3, PP. 539-549.
- <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0173-3>
- Alcántara-Ayala, Irasema; Goudie, Andrew. S (2010). *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*. Cambridge University Press.
- <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807527>
- Cameron, T and Ackerman, P. E (2012). HEC-GeoRAS, GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS@10. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/downloads.aspx>
- اسفندیاری، فریبا؛ مسعود رحیمی؛ منصور خیری‌زاده (۱۳۹۷). ارزیابی و پیش‌بینی مکانی وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های آماری فاکتور قطعیت و رگرسیون لجستیک (منطقه مطالعاتی: جاده مواصلاتی خلخال-سرچم)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. سال هفتم، شماره ۲. صفحات ۴۵-۱۹.
- [http://www.geomorphologyjournal.ir/article\\_80782.html](http://www.geomorphologyjournal.ir/article_80782.html)
- جداری‌عیوضی، جمشید (۱۳۶۱). کویر کبودان، ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۰. شماره پیاپی ۱۰۶۰. صفحات ۲۷-۱.
- [https://journals.ut.ac.ir/article\\_14258\\_0.html](https://journals.ut.ac.ir/article_14258_0.html)
- خیری‌زاده آروق، منصور (۱۳۹۵). تحلیل مورفودینامیک و تغییرات جانبی مجرای رودخانه زرينه‌رود (از شاهین‌دژ تا دریاچه ارومیه)، پایان‌نامه دکتری به راهنمایی محمدحسین رضائی‌مقدم و معصومه رجبی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.
- روستایی، شهرام؛ ایرج جباری (۱۳۹۰). ژئومورفولوژی مناطق شهری، چاپ سوم. انتشارات سمت.
- روستایی، شهرام و بهروز ساری‌صراف (۱۳۸۵). پهنه‌بندی مخاطرات محیطی مؤثر در توسعه فیزیکی شهر تبریز، فصلنامه جغرافیایی سرزمین، سال سوم، شماره ۱۰، صفحات ۱۱۰-۱۲۶.
- [http://journals.srbiau.ac.ir/article\\_5955.html](http://journals.srbiau.ac.ir/article_5955.html)
- سازمان برنامه و بودجه استان آذربایجان شرقی (۱۳۹۶). چکیده نتایج جمعیتی سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵، استانداری آذربایجان شرقی.
- [https://www.ostan-as.ir/Uploads/User/1669/files/ea\\_sarshomari\\_95.pdf](https://www.ostan-as.ir/Uploads/User/1669/files/ea_sarshomari_95.pdf)
- سازمان تحقیقات خاک و آب. نقشه ارزیابی منابع و قابلیت اراضی استان آذربایجان شرقی.

- Szabo, J; David,L; Loczy, D (2010). Anthropogenic Geomorphology: A Guide to Man-Made Landforms. Springer. 298p.  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-90-481-3058-0>
- Tian-jun, Zhang; Shu-xin, Ren; Shu-gang, Li; Tian-cai, Zhang; Hong-jie, Xu. (2009). Application of the catastrophe progression method in predicting coal and gas outburst. Mining Science and Technology, Vol. 19, PP. 430-434.  
[https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60080-6](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60080-6)
- Wang, Chao; Ni, Fu-Quan; Deng, Yu; Jiang, Lin-Lin(2011). Research on the Risk Associated with Rural Drinking Water Safety Based on Catastrophe Theory. Journal of Water Resource and Protection, Vol. 3, PP. 356-362.  
<https://doi.org/10.4236/jwarp.2011.36045>
- Weiss, A (2001). Topographic Position and Landforms Analysis. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA.  
[http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc\\_18x22.pdf](http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf)
- Xiao-jun, Wang; Jian-yun, Zhang; Shahid, Shamsuddin; Xing-hui, Xia; Rui-min, He; Manting, Shang (2014). Catastrophe theory to assess water security and adaptation strategy in the context of environmental change. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. Vol. 19, Issue. 4, PP. 463-477.  
<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11027-012-9443-x>
- Yang, X; Li, J (2013). Advances in mapping from remote sensor imagery: techniques and applications, CRC Press, Taylor & Francis Group, 414 p.  
<https://www.routledge.com/Advances-in-Mapping-from-Remote-Sensor-Imagery-Techniques-and-Applications/Yang-Li/p/book/9781138072947>
- You, W. J & Zhang, Y. L (2015). Evaluation of social vulnerability to floods in Huaihe River basin: a methodology based on catastrophe theory. Natural Hazard and Earth System Sciences, Vol. 3, Issue. 8, PP. 4937-4965.  
<https://doi.org/10.5194/nhessd-3-4937-2015>
- Chen, Yu; Song, Guobao; Yang, Fenglin; Zhang, Shushen; Zhang, Yun; Liu, Zhenyu (2012). Risk Assessment and Hierarchical Risk Management of Enterprises in Chemical Industrial Parks Based on Catastrophe Theory. International Journal of Environmental Research & Public Health, Vol.9, Issue.12, PP.4386-4402.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph9124386>
- Douglas, Ian; Goode, Davi; Houck, Mike; Wang,Rusong (2011). The Routledge Handbook of Urban Ecology. Routledge.  
<https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.4324/9780203839263>
- HEC (Hydrologic Engineering Center). (2010). HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual. U. S. Army Corps of Engineers.  
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Jenness, Jeff (2006). Topographic Position Index (TPI) v. 1.2.  
<http://www.jennessent.com>.
- Lein, James K. 2003. Integrated environmental planning. Blackwell Science Ltd.  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470999233>
- Netzband, M; Stefanov, W. L; Redman. C. (2007). Applied Remote Sensing for Urban Planning, Governance and Sustainability, Springer, Berlin, 278 p.  
<https://www.springer.com/gp/book/9783540255468>
- Sadeghfam, Sina; Hassanzadeh, Yousef; Nadiri, Ata Allah; Khatibi, Rahman (2016). Mapping groundwater potential field using catastrophe fuzzy membership functions and Jenks optimization method: a case study of Maragheh-Bonab plain, Iran. Environmental Earth Sciences,75:545, PP.1-19.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-015-5107-y>
- Su, Shiliang; Li, Dan; Yu Xiang; Zhang, Zhonghao; Zhang, Qi; Xiao, Rui; Zhi, Junjun; Wu, Jiaping (2011). Assessing land ecological security in Shanghai (China) based on catastrophe theory. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol. 25, Issue. 6, PP. 737-746.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00477-011-0457-9>

