Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Spring 2025, Vol. 15(1): 1 - 26

Research Article

Evaluating current-day vertical deformation in the North Tehran transpressional zone using a global positioning system and precise leveling data

Hamid Maddahi[1], Aziz Rahimi[1]*, Masoomeh Amighpey[2]

1- Department of Geology, Faculty of Science, Golestan University, Gorgan, Iran
2- Geodesy and Land Surveying Department, Iran National Cartographic Center, Tehran, Iran

Keywords: *Central Alborz, GPS, North Tehran Transpressional zone, Precise leveling, Vertical displacement*

1-Introduction

The Iranian plateau is between the Arabian and Eurasian plates and is one of the world's most tectonically and seismically active regions (Fig 1a). The northeastward convergence of these plates caused widespread deformation, including crustal shortening and uplifting (Allen et al., 2003; Guest et al., 2006; Berberian and Yeats, 2016; McKenzie, 2020). From a seismic, geodetic, and tectonic point of view, it is necessary to investigate the deformation and surface movements of the earth in areas with a high human population. The northern Iran is one of these regions, which is extremely geodynamically unstable and has been associated with large and numerous earthquakes in the Alborz Mountain range and the South Caspian basin since long ago (Fig. 1c). For example, we can refer to the seismic activities such as 1957 Mw 7 Sangchal (Bandpey), 1990 Mw 7.3 Rudbar-Manjil, and the 2004 Mw 6.4 Firouzabad-Kojur (Beldeh) and also newer and smaller examples such as the 2017 Mw 5.2 Mallard and the 2020 Mw 5.1 Damavand. The direct relationship between earthquakes and the motion of tectonic plates has made the necessity of monitoring the surface movements of the earth's crust and the displacements caused by the function of tectonic structures such as fault zones clearer than in the past. One of the consequences of tectonic events is the vertical crustal movements in the form of uplift or subsidence. Today, using such technologies, humans can observe these changes and movements on a millimeter scale. The geodetic-inferred vertical crustal deformation is rigorously evaluated all over the world (Wang and Shen, 2020; Pan et al., 2021; Yanqiang et al., 2022; Jianliang et al., 2023; Chousianitis et al., 2024). Therefore, this paper discusses the vertical deformation analysis and estimates the current-day vertical displacement rate in the North Tehran structural zone located in the south-central Alborz range (Fig. 1b) using two geodetic techniques: GPS and precise leveling. The Alborz Mountain range extends over 900 km (Solaymani Azad et al., 2011) with a width of ~100 km (Allen et al., 2003) and is located on the southern side of the Caspian Sea. This range is a complex orogenic belt that underwent shortening and uplift during the Tertiary (Alavi, 1996). North Tehran Fault (NTF), Mosha-Fasham Fault (MFF), Purkan-Vardij Fault (PVF), Emamzadeh Davud Fault (EDF), Taleghan Fault (TLF), and Kandovan Fault (KDF) are the most important geologic structures in this area (Fig. 1c).

2- Materials and methods

Global positioning system (GPS) data and precise leveling are efficient and accurate techniques used in this research to estimate the vertical movements of the earth's surface in the North Tehran transpressional zone. For this reason, we have analyzed the observation data of 8 IPGN stations over the ten years from 2010 to 2020, distributed in the Northern Tehran structural zone and its surrounding areas (Table 1). Moreover, the precise leveling data of the Chalus line were collected by the National Cartographic Center (NCC) during 11 years in two stages (1992 and 2003).

* Corresponding author: a.rahimi@gu.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2024.47346.2462
Received: 2024-07-11
Accepted: 2024-11-06

ISSN: 2717-0764
CC BY

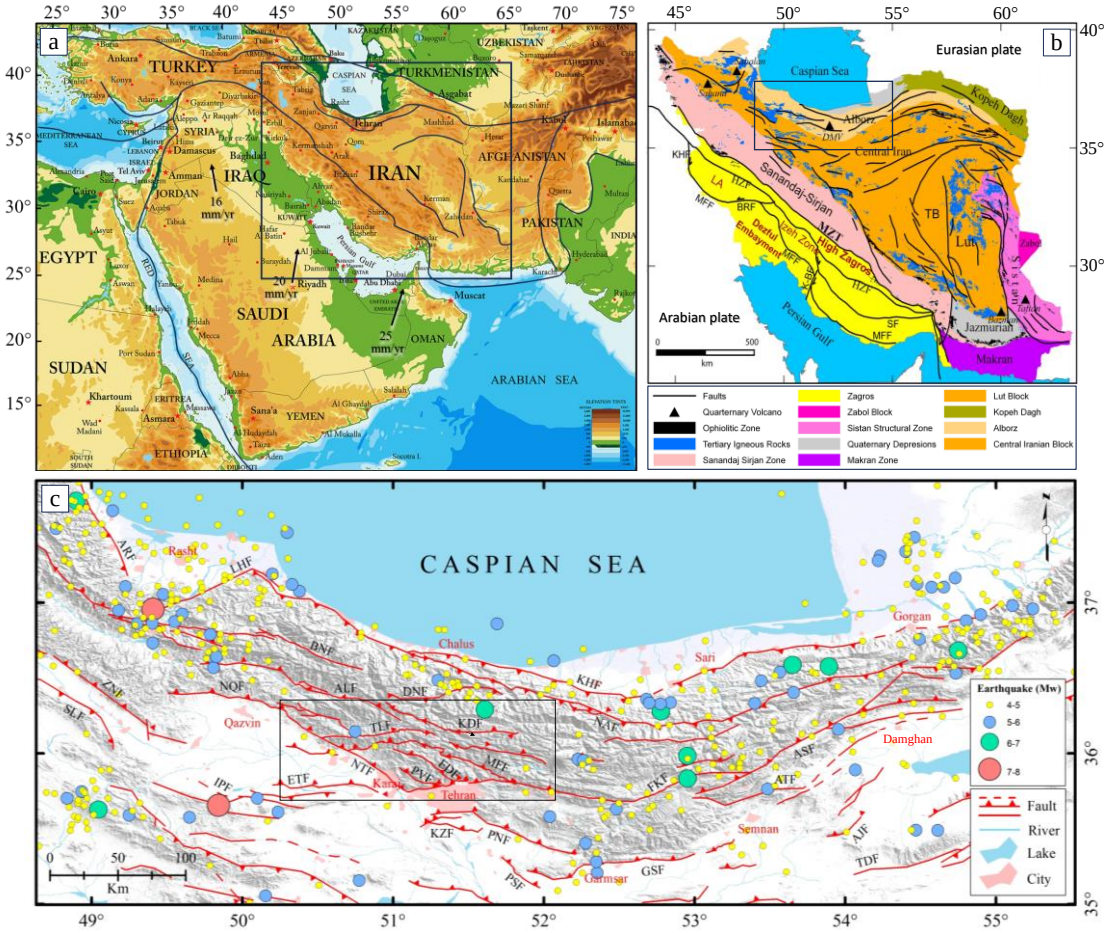


Fig. 1. Geographic and tectonic location of the study area. (a) SRTM-based Digital Elevation Model of the Middle East region. The black lines and the black frame show the main faults and the location of Fig. (b). (b) The structural-sedimentary zones of Iran (taken from Teknik and Ghods, 2017), the black frame shows the location of Fig. (c). (c) Seismotectonic map of northern Iran. Instrumental seismicity of the region from 1900-2024 (from the USGS). The black frames indicate the location of the North Tehran structural zone and surrounding areas. Abbreviations: NTF: North Tehran fault, PVF: Purkan-Vardij Fault, EDF: Emamzadeh Davud Fault, MFF: Mosha-Fasham Fault, TLF: Taleghan Fault, KDF: Kandovan Fault, DNF: Dasht-e-Nazir Fault, NAF: North Alborz Fault, KHF: Khazar Fault, BNF: Banan Fault, LHF: Lahijan Fault, ARF: Astara Fault, NQF: North Qazvin Fault, ALF: Alamut Fault, ZNF: Zanjan Fault, SLF: Soltanieh Fault, IPF: Ipak Fault, ETF: Eshtehard Fault, KZF: Kahrizak Fault, PNF: Parchin Fault, PSF: Pishva Fault, GSF: Garmsar Fault, FKF: Firuzkuh Fault, ATF: Atari Fault, ASF: Astaneh Fault, AJF: Anjilu Fault, TDF: Torud Fault.

Table 1. The IPGN stations used in this research are relative to the Eurasian reference frame.

Station	Lat.	Lon.	Ui (m)	Uf (m)	VU (mm/yr)
ABSD	35.6612	52.0912	1972.63958	1972.67095	3.137
ARNG	35.9284	51.0749	1865.53793	1865.57304	3.511
GARM	35.985	51.6457	2513.36792	2513.39554	2.762
HSGD	36.0067	50.747	1619.12078	1619.14957	2.879
PLOR	35.8496	52.064	2278.60334	2278.63549	3.215
PLZI	35.6303	51.971	1700.27992	1700.30707	2.715
TEHN	35.6973	51.3341	1194.56867	1194.58973	2.106
TLGN	36.1436	50.745	2151.96517	2152.01201	4.684

ISSN: 2717-0764
CC BY

3- Results and discussions

The IPGN data have been processed using the GAMIT/GLOBK 10.6 software. The IPGN is tied to the International Terrestrial Reference Frame, ITRF2014, using the GAMIT software in the first step. Then, using GLOBK software to determine the velocity field of vertical movements, the observations have been combined with the daily observations of 4 global networks (eura, igs1, igs2, igs3) prepared by SOPAC (Scripps Orbits and Permanent Array Center). Finally, the velocities have been calculated relative to the Eurasian reference frame. The processing output is presented as a vertical displacement field map (Fig. 2) and as one of the most important processing outputs, i.e., time series. It is possible to monitor and calculate the rate of movements and displacements of the earth's surface using the time series. These outputs show that the highest uplift is visible in the TLGN station at a rate of ~4.68 mm/yr (Fig. 2). This can be caused by the function of the fold-thrust complex in this area, which Guest et al. (2006) refer to as the thin-skinned zone. The TEHN station located in the Tehran metropolitan area on the NTF foot-wall shows the lowest uplift rate of about 2.1 mm/yr. This vertical deformation in the polio-quaternary sedimentary sequence is related to the slip across the inner-city recent reverse faults such as the Mahmudieh, Davudieh, and Pardisan. Time series analysis of different stations also expresses that the rising rate has not been the same and uniform during time and has fluctuated in the ten years from 2010 to 2020. The results of GPS data processing and interpretation in the present study show the average uplift rate of over 3 mm/yr for the North Tehran structural zone in the mentioned period.

Vernant et al. (2004) also estimated a shortening rate of 5±2 mm/yr for Central Alborz using GPS data from 2000 through 2002. Furthermore, high-precision leveling data obtained from the benchmarks located along the Chalus line during 11 years in two stages (1992 and 2003) is the second method used in this paper. The southern flank of central Alborz along the Chalus line between the KF and NTF shows a vertical displacement of the uplift type. The hanging wall of the NTF (the distance between the surface traces of this fault and the Purkan-Verdij thrust) relatively has a higher vertical deformation potential compared to other areas, and it is uplifting at a rate of ~1.5 mm/yr. Collectively, it can be said that the uplift rate of central Alborz is decreasing along the Chalus line from the NTF to the north so that in the vicinity of the Taleghan fault, this rate reaches ~1 mm/yr (Fig. 3). This can be a confirmation on the reduction of dip-slip/compressive component of the existing faults. On the contrary, these structures' strike-slip component dominates in the mentioned direction. In other words, the strike-slip component is dominant in steeper-dipping faults, and the thrusting component is dominant in shallower-dipping faults, such as the NTF.

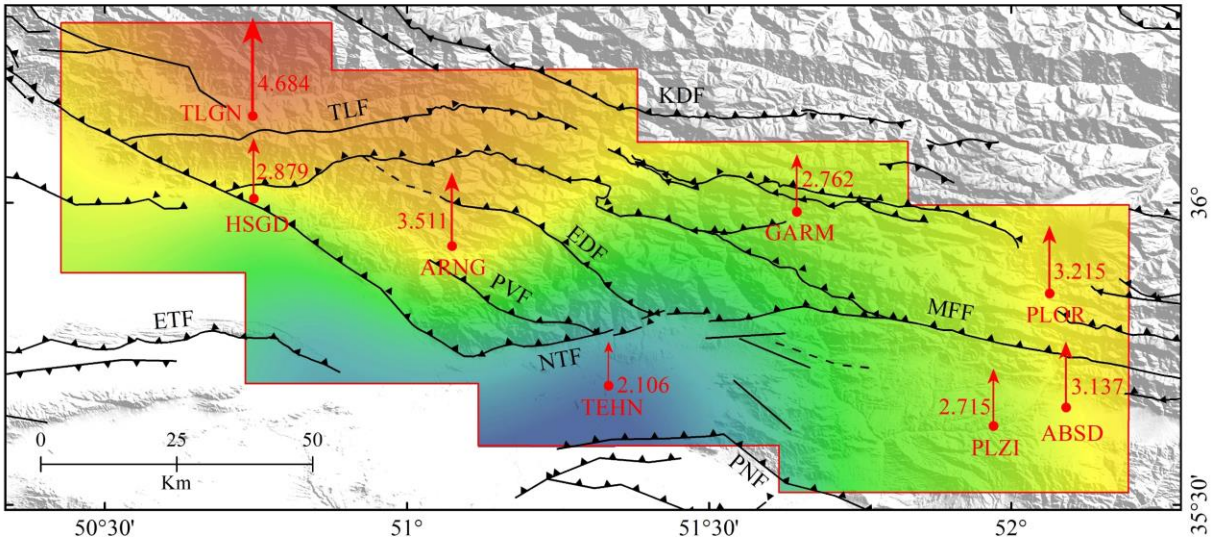


Fig. 2. The heat map resulted from interpolating the height change rate of different IPGN stations superimposed on the SRTM-based digital elevation model.

ISSN: 2717-0764
CC BY

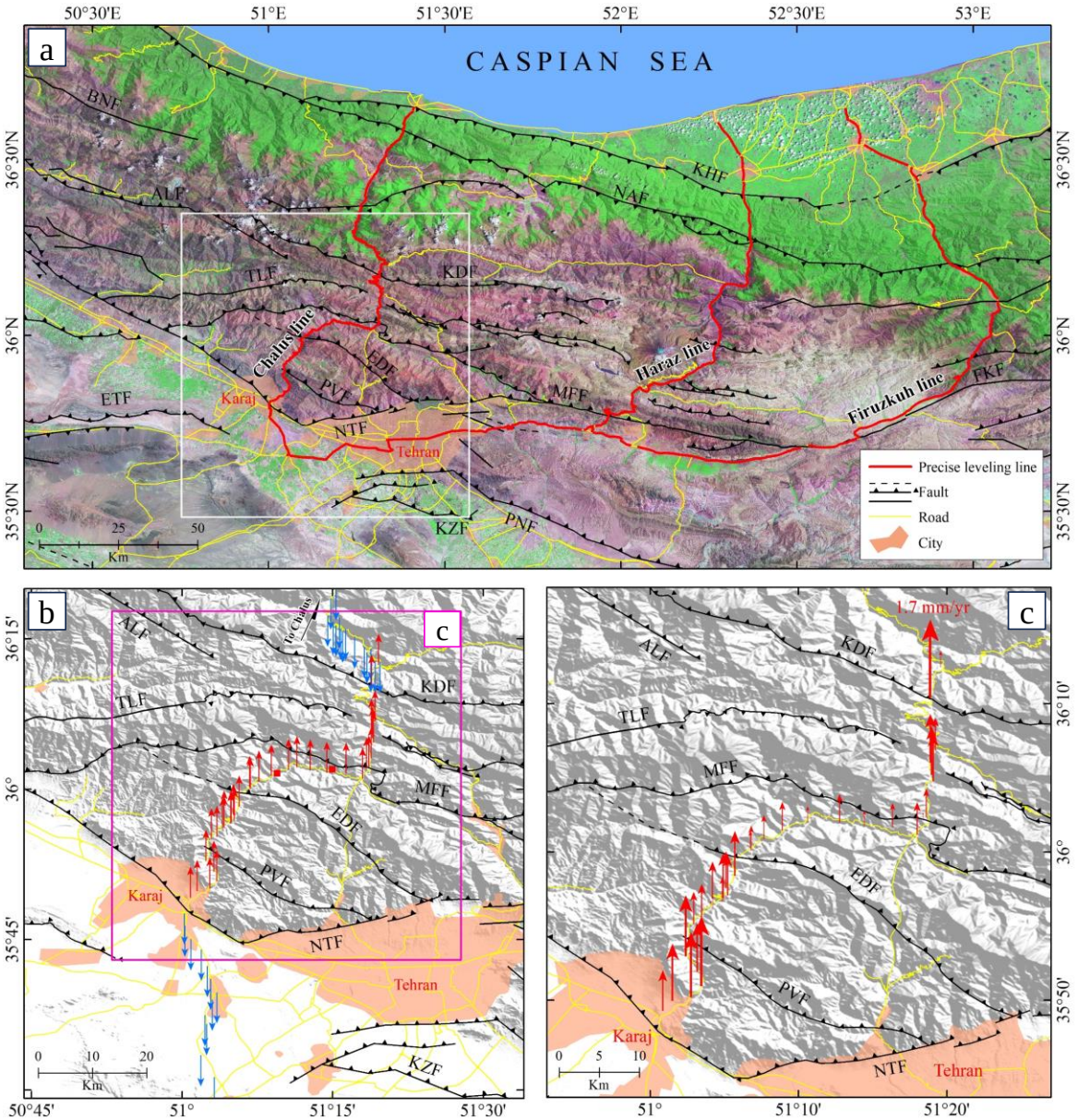


Fig. 3. (a) location of the Chalus, Haraz, and Firuzkuh lines (red lines), which have precise leveling stations along themselves superimposed on the Mr. SID satellite imagery of central Alborz. The Chalus line passes through the middle parts of the North Tehran structural zone. The white frame shows the location of Fig. (b). (b) Superimposing precise leveling stations on the SRTM-based digital elevation model. The red and blue arrows, without respecting the scale, show the uplift and subsidence, respectively, at the location of the precise leveling stations. The purple frame represents the location of Fig. (c). (c) Illustration of uplift rate calculated at precise leveling stations between North Tehran and Kandovan faults. Abbreviations are the same as in Fig. 1.

4- Conclusion

Analyzing IPGN stations and the time series prepared for each of them and the analysis of precise leveling data indicate that the North Tehran structural zone is undergoing a progressive deformation due to the transpressional tectonic regimes. This deformation predominantly occurs in vertical displacement/uplift around the NTF and left-lateral displacement around the Mosha and Taleghan faults. It can be said that the deformation within the study area is changing in style and intensity across and along the transpressional zone, so its western parts have a higher uplift rate than the eastern areas. In the south of the NTF, the uplift rate is significantly reduced, and even in the southwestern parts of the city of Tehran until Hashtgard city,

ISSN: 2717-0764
CC BY

intense land subsidence is observed which mainly resulted from the excessive groundwater withdrawal. However, tectonically, south-verging displacements of a stack of thrust slices have, in turn, their roles.

5-References

Alavi, M., 1996. Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountains system in northern
Iran. Journal of Geodynamics 21(1), 1–33. https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00009-7.

Allen, MB., Ghassemi, MR., Shahrabi, M., Qorashi, M., 2003. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. Journal of Structural Geology 25, 659–679. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00064-0.

Chousianitis, K., Sboras, S., Mouslopoulou, V., Chouliaras, G., Hristopulos, DT., 2024. The upper crustal deformation field of Greece inferred from GPS data and its correlation with earthquake occurrence. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 129, e2023JB028004. https://doi.org/10.1029/2023JB028004.

Guest, B., Stocklin, DF., Grove, M., Axen, GJ., Lam, PS., Hassanzadeh, J., 2006. Thermal histories from the central Alborz Mountains, northern Iran: implications for the spatial and temporal distribution of deformation in northern Iran. Bulletin of geological Society of America 118, 1507–1521. https://doi.org/10.1130/B25819.1.

Jianliang Nie, Jie Tian, Xinwei Guo, Bin Wang, Xiaoyun Liu, Yaxuan Cheng, 2023. Pengtao Jiao, Vertical deformation analysis based on combined adjustment for GNSS and leveling data. Geodesy and Geodynamics 14, 5, 477-484, https://doi.org/10.1016/j.geog.2023.03.003.

McKenzie, D., 2020. The structure of the lithosphere and upper mantle beneath the Eastern Mediterranean and Middle East. Mediterr. Geoscience Revision 2, 311–326. https://doi.org/10.1007/s42990-020-00038-1.

Pan, Y., Hammond, WC., Ding, H., Mallick, R., Jiang, W., Xu, X., 2021. GPS imaging of vertical bedrock displacements: Quantification of two-dimensional vertical crustal deformation in China. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 126, e2020JB020951. https://doi. org/10.1029/2020JB020951.

Solaymani Azad, S., Ritz, JF., Abbasi, MR., 2011. Left-lateral active deformation along the Mosha–North Tehran fault system (Iran); morphotectonics and paleoseismological investigations. Tectonophysics 497, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.09.013.

Vernant, P., Nilforoushan, F., Chery, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, JF., Sedighi, M., Tavakoli, F., 2004. Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data. Earth Planet. Sci. Lett 223, 177–185. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.04.017.

Yanqiang Wu, Zhijiang Zheng, Jianliang Nie, Liu Chang, Guangli Su, Haiquan Yin, Hongbao Liang, Yajin Pang, Changyun Chen, Zaisen Jiang, Wanju Bo, 2022. High-Precision Vertical Movement and Three-Dimensional Deformation Pattern of the Tibetan Plateau. JGR Solid Earth 127, 4, https://doi.org/10.1029/2021JB023202.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Maddahi, H., Rahimi, A., Amighpey, M., 2025. Evaluating current-day vertical deformation in the North Tehran transpressional zone using a global positioning system and precise leveling data. Adv. Appl. Geol. 15(1), 1-26.

DOI: 10.22055/aag.2024.47346.2462
URL: https://aag.scu.ac.ir/article_19722.html

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

برآورد جابجایی قائم کنونی پهنه ترافشارشی شمال تهران با استفاده از داده‌های سامانه موقعیت یاب جهانی و ترازیابی دقیق

حمید مداحی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان، استان گلستان

عزیز رحیمی*

دانشیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان، استان گلستان

معصومه آمیغ پی

اداره کل نقشه برداری زمینی و زمین سنجی، سازمان نقشه برداری کشور، تهران، ایران

* a.rahimi@gu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۱ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۰۸/۱۶

چکیده

امروزه تکنیک‌های ژئودتیک در تحلیل و برآورد نرخ دگریختی کنونی نواحی مختلف زمین‌ساختی زمین نقش بسزایی را ایفا می‌کنند. در پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های سامانه موقعیت یاب جهانی و ترازیابی دقیق به ارزیابی دگریختی قائم کنونی پهنه ساختاری شمال تهران واقع در دامنه جنوبی البرز مرکزی پرداخته شده است. پردازش و تحلیل داده‌های حاصل از شبکه ایستگاه‌های دائمی ژئودینامیک ایران (IPGN) بیانگر بالاآمدگی مشخص در سراسر این پهنه می‌باشد. قسمت‌های غربی پهنه ساختاری شمال تهران از نرخ بالاآمدگی بیشتری نسبت به نواحی شرقی‌تر برخوردار هستند. در مقابل، بارگذاری ناشی از عملکرد ورقه‌های راندگی در این پهنه ترافشارشی موجب کاهش چشم‌گیر نرخ بالاآمدگی و حتی پایین افتادگی نواحی جنوبی در پیش‌بوم تهران شده است. تحلیل سری زمانی داده‌های IPGN نیز حاکی از این است که رژیم‌های زمین‌ساختی، تنش‌های وارده بر منطقه و دگریختی حاصل از آن‌ها در گذر زمان در حال تغییر بوده است، به طوری که می‌توان گفت، از دیرباز تا کنون پدیده زمین‌ساخت وارون در منطقه رخ داده است. تحلیل داده‌های ترازیابی دقیق نیز حاکی از این است که بیشترین نرخ بالاآمدگی، پیرامون گسل‌های اصلی منطقه که از سازوکار غالب راندگی برخوردار هستند و گاهی ساختارهای فراجسته را تشکیل داده‌اند مشاهده می‌شود. تلفیق داده‌های سامانه موقعیت یاب جهانی و ترازیابی دقیق بیانگر این است که نرخ بالاآمدگی از راندگی شمال تهران به سمت شمال روندی کاهشی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: *البرز مرکزی، پهنه ترافشارشی شمال تهران، ترازیابی دقیق، جابجایی قائم، سامانه موقعیت یاب جهانی.*

۱- مقدمه

تحلیل دگریختی کنونی پوسته در مناطقی با زمین‌ساخت جنبا می‌تواند در درک عمیق‌تر فرآیندهای زمین‌ساختی و بهبود ارزیابی مخاطرات لرزه‌ای بسیار کارگشا باشد. از دیدگاه لرزه شناختی، ژئودتیک و زمین‌ساختی، بررسی دگریختی و حرکات سطحی زمین در مناطقی با جمعیت انسانی بالا بسیار ضروری است. شمال ایران یکی از این مناطق است که به لحاظ ژئودینامیکی به شدت جنبا است و از دیرباز تاکنون با زمین‌لرزه‌های بزرگ و پرشماری در رشته‌کوه‌های البرز و حوضه خزر جنوبی همراه بوده است (شکل ۱c) (Ambraseys and Melville, 1982; Tatar et al., 2007; Berberian and Yeats, 2016). از جمله این فعالیت‌های لرزه‌ای می‌توان به زمین‌لرزه ۱۳۳۶ سنگچال (بندپی) با بزرگای گشتاوری ۷، زمین‌لرزه ۱۳۶۹ رودبار- منجیل با بزرگای گشتاوری ۷/۳، زمین‌لرزه ۱۳۸۳ فیروزآباد-کجور (بلده) با بزرگای گشتاوی۶/۳ و نمونه‌های جدیدتر و کوچکتری همچون زمین‌لرزه ۱۳۹۶ ملارد با بزرگای گشتاوری ۵/۲ و زمین‌لرزه ۱۳۹۹ دماوند با بزرگای گشتاوری ۵/۱ اشاره نمود (Maddahi et al., 2022). روی هم رفته، زمین‌لرزه‌های ویرانگر شمال ایران از سال ۱۹۵۳ تا به امروز باعث جان باختن حدود ۵۵۰۰۰ نفر انسان شده است (Rashidi and Derakhshani, 2022). ارتباط مستقیم بین رخداد زمین‌لرزه‌ها و جابجایی صفحات زمین‌ساختی، لزوم پایش

حرکات سطحی زمین و جابجایی‌های ناشی از عملکرد ساختارهای زمین‌ساختی همچون پهنه های گسلی را بیش‌تر از گذشته روشن ساخته است.

یکی از پیامدهای ناشی از رخدادهای زمین‌ساختی، حرکات قائم پوسته به صورت بالاآمدگی و یا فرونشست است. امروزه با استفاده از فن‌آوری‌ها و داده‌های مختلف، بشر قادر به پایش این تغییرات و حرکات در مقیاس میلی‌متر شده است. در این بین می‌توان به داده‌های سیستم موقعیت یاب جهانی و ترازیابی دقیق اشاره نمود که به شکلی روزافزون در سراسر دنیا در حال استفاده می باشد (Pan et al., 2021; Yanqiang et al., 2022; Jianliang et al., 2023; Chousianitis et al., 2024). در ایران نیز طی سال‌های اخیر افراد مختلفی با استفاده از روش‌های ژئودتیک به پایش و تحلیل حرکات سطحی پوسته در نواحی مختلف کشور پرداخته‌اند. عمده این مطالعات بر پایه داده‌های GPS صورت گرفته‌اند و حرکات افقی زمین را مورد ارزیابی قرار داده‌اند (Nilforoushan et al. 2003; Vernant et al. 2004; Djamour et al. 2010; Raeesi et al., 2017; Khorrami et al., 2019, Rashidi and Derakhshani, (2022). در این بین، برآورد حرکات قائم چندان مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین در این مقاله با بهره‌گیری از روش‌های ابزاری یاد شده، به تحلیل و ارزیابی دگریختی و برآورد نرخ جابجایی قائم کنونی پهنه ترافشارشی شمال تهران پرداخته شده است. این پهنه ساختاری با روند عمومی غرب شمال غرب- شرق جنوب شرق در دامنه جنوبی البرز مرکزی و در شمال کلان‌شهرهایی همچون تهران و کرج قرار دارد.

۲- جایگاه زمین ساختی

به لحاظ زمین‌ساختی، ایران بخشی از کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا است (Alavi, 1996; Allen et al., 2003; Zanchi et al., 2006) و توسط بلوک‌های به نسبت صلب و غیر لرزه‌ای عربی در جنوب غرب، توران در شمال شرق و هلمند در شرق احاطه شده است. با در نظر گرفتن بلوک‌های توران و هلمند به عنوان بخشی از صفحه صلب اوراسیا، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که وضعیت کنونی زمین‌ساخت ایران ناشی از همگرایی صفحات عربی و اوراسیا می‌باشد (Vernant et al., 2004; McKenzie, 2020; Civiero et al., 2023) (شکل ۱a) و این به نوبه خود منجر به دگریختی‌هایی در قالب کمربندهای کوهزایی زاگرس، البرز و کپه داغ؛ همچنین گسل‌های راستالغز بزرگی که بلوک‌های ایران مرکزی، لوت و حوضه خزر جنوبی را در بر گرفته‌اند می‌شود (Vernant et al., 2004). پهنه ترافشارشی شمال تهران به لحاظ تقسیمات زمین‌شناختی در پهنه ساختاری- رسوبی البرز واقع شده است (شکل ۱b). رشته کوه البرز با درازایی حدود ۹۰۰ کیلومتر (Solaymani Azad et al., 2011) و پهنای تقریبی ۱۰۰ کیلومتر (Allen et al., 2003) در حاشیه جنوبی دریای خزر قرار دارد. این رشته کوه، یک کمربند کوهزایی پیچیده است که در طول ترشیری متحمل کوتاه شدگی و بالاآمدگی شده است (Alavi, 1996). به تقریب تمام این کوتاه شدگی با حرکت در طول گسل های معکوس که از شیب عمومی به سمت شمال و جنوب برخوردار هستند و با ساختارهایی همچون تاقدیس‌های فرادیواره‌ای و ناودیس‌های فرودیواره‌ای همراه می‌باشند صورت گرفته است (Yassaghi and Madanipour, 2008). کمربند البرز در طول به سه بخش شرقی، غربی و مرکزی تقسیم می شود. البرز مرکزی به عنوان طویل‌ترین بخش، حدود ۶۰۰ کیلومتر درازا دارد و در طول ساحل جنوبی دریای خزر از قزوین تا دامغان کشیده شده است. البرز غربی نیز به بخشی از رشته کوه که در حد فاصل قزوین تا تالش و البرز شرقی هم به بخشی از کمربند که بین دامغان و رشته کوه های کپه داغ واقع شده است اطلاق می شود (Solaymani Azad et al., 2011). البرز تحت تأثیر یک دگریختی کنونی است که توسط گسل‌های مهمی با سازوکارهای معکوس و راستالغز چپ‌بر که به تقریب موازی روند رشته کوه هستند اداره می‌شود (Jackson et al., 2002; Hollingsworth, 2007). مؤلفه راستالغز چپ‌بر در طول گسل‌هایی با روند غرب شمال غرب- شرق جنوب شرق که مرتبط با رخدادهای زمین‌ساختی پیش از پلیوسن هستند تنها در البرز غربی و مرکزی مشاهده می‌شوند (Allen et al., 2003; Landgraf et al., 2009; Ballato et al., 2013).

گسل‌های اصلی رشته کوه البرز که از سازوکار کنونی غالب معکوس برخوردار هستند بیش‌تر در حاشیه‌های شمالی (برای مثال گسل های خزر و شمال البرز) و جنوبی (برای مثال گسل-های شمال تهران و گرمسار) آن به چشم می‌خورند. در حالی که، گسل‌هایی با سازوکار غالب راستالغز چپ‌بر (برای مثال قسمت‌هایی از گسل‌های مشا و طالقان) بیش‌تر در قسمت‌های داخلی کمربند متمرکز هستند. بر اساس Jackson و همکاران (۲۰۰۲) این بخش‌بندی واتنش، نتیجه فشارش مایل ناشی از همگرایی به تقریب شمالی- جنوبی صفحات عربی- اوراسیا و

حرکت حوضه خزر جنوبی به سمت شمال غرب نسبت به اوراسیا می‌باشد. مطالعات سامانه موقعیت یاب جهانی حاکی از این است که به طور کلی بخش بندی واتنش در تمامی کمربند البرز شامل یک کوتاه شدگی شمالی- جنوبی با نرخ ۲±۵ میلی‌متر در سال و یک بُرش چپ‌بر با نرخ ۴±۲ میلی‌متر در سال می‌باشد (Vernant et al., 2004). به طور تفکیکی، این مقدار شامل دگریختی با سازوکار راستالغز چپ‌بر با نرخ حدودی ۷ و ۳ میلی متر در سال و دگریختی با سازوکار معکوس با نرخ حدودی ۲ و ۶ میلی‌متر در سال به ترتیب در بخش‌های شرقی و غربی البرز می‌باشد (Djamour et al., 2010; Mohammadi Nia et al., 2023).

هر یک از بخش‌های شرقی، غربی و مرکزی البرز الگوی زمین‌ساختی خود را دارند. بخش مرکزی با روند عمومی شرقی- غربی تحدب مشخصی به سمت جنوب و هندسه ای V شکل را نشان می‌دهد و قسمت‌های شرقی و غربی آن به ترتیب دارای گسل‌هایی با راستاهای غالب شمال شرق- جنوب غرب و شمال غرب-جنوب شرق می‌باشند (شکل c۱). کمربند البرز در نتیجه رخدادهای زمین‌ساختی گوناگونی شکل گرفته است، از جدایش آن از سرزمین گندوانا در اردوویسین- سیلورین گرفته تا کوهزایی سیمرین در تریاس پایانی که ناشی از بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس و برخورد بلوک‌های ایران و توران (صفحه اوراسیا) بوده است (مانند Berberian and King, 1981, Berberian Zanchi et al., 2009, Horton et al., 2008 and King, 1981; Horton et al., 2008; Zanchi et al., 2009; Trifonov et al., 2022) و در نهایت مراحل کنونی دگریختی درون قاره‌ای که مرتبط با همگرایی مورب بین صفحات عربی و اوراسیا می‌باشد (Zanchi et al., 2006). این همگرایی در اثر حرکت اقیانوس نئوتتیس به سمت شمال شرق و آغاز فرورانش آن به زیر اوراسیا در تریاس تا ژوراسیک پایانی (Berberian and King, 1981; Agard et al., 2011; Hassanzadeh and Wernicke, 2016) صورت گرفته که در نهایت منجر به برخورد صفحات قاره‌ای یاد شده در ترشیری شده است (Sengor, 1979; Hatzfeld and Molnar, 2010). شروع این برخورد در ائوسن پایانی (Ballato et al., 2011) بوده و در میوسن به اوج خود رسیده است (Allen et al., 2004; McQuarrie and Van Hinsbergen, 2013). مشاهدات سامانه موقعیت یاب جهانی نرخ همگرایی کنونی ۲۲ میلی‌متر در سال را بین صفحات عربی و اوراسیا برآورد کرده است (Vernant et al., 2004). از آنجا که دگریختی حاصل از برخورد، به تدریج به سمت نواحی درون صفحه‌ای همچون البرز و ایران مرکزی منتقل می‌شود، این امر به در نهایت منجر به فرورانش صفحه حوضه خزر جنوبی به زیر صفحه اوراسیا در طول گسل آپشرون- سیل می‌شود (Rashidi et al., 2023).

سازمان یافتگی دوباره صفحات زمین‌ساختی و حرکت رو به شمال غرب حوضه خزر جنوبی نسبت به اوراسیا در پلیو- کواترنر که با چرخش ساعتگرد آن همراه بوده است باعث تغییر رژیم زمین‌ساختی البرز از فشارش شمالی-جنوبی به ترافشارش چپ‌بر با راستای شمال شمال شرق- جنوب جنوب غرب شده است (Allen et al., 2002). در حال حاضر، حوضه خزر جنوبی با نرخ ۶ میلی‌متر در سال به سمت شمال غرب در حال حرکت است (Vernant et al., 2004). یکی از ساختارهای فعال اصلی که متأثر از همگرایی مورب صفحات زمین‌ساختی است سامانه گسلی آستانه – فیروزکوه- مشا می‌باشد. در این راستا یک جابجایی چپ‌بر تقریباً ۳۰ کیلومتری در طول گسل مشا برآورد شده است (Allen et al., 2003) که شکل دهنده لوزی ترافشارشی بین تهران و کرج می باشد (Guest et al., 2006). گسل‌های شمال تهران و قزوین با روند عمومی شرقی- غربی در بخش پیشانی جنوبی کمربند و در طول ادامه غربی گسل مشا واقع شده‌اند و با حرکت غالب راندگی شناخته می‌شوند. این گسل‌ها شواهدی روشن و مشخص از فعالیت زمین‌ساختی اخیر را نشان می‌دهند (Jackson et al., 2002; Allen et al., 2003; Ashtari et al., 2005) البرز کماکان منطقه‌ای با دگریختی جنبای شدید را بین فلات پایدارتر ایران و صفحه اوراسیا در شمال نشان می‌دهد (برای مثال Guest et al., 2006; Ballato et al., 2011). کوتاه شدگی البرز مرکزی با استفاده از اندازه‌گیری‌های سامانه موقعیت یاب جهانی 5±2 (Vernant et al., 2004) میلی‌متر در سال برآورد شده است. الگوی دگریختی کنونی این رشته کوه با مجموعه‌ای از چین‌های دو سویه، گسل‌های راستالغز چپ‌بر و گسل‌های معکوس/ راندگی که به تقریب موازی روند عمومی کمربند هستند مشخص می‌شود (Jackson et al., 2002; Allen et al., 2003). حضور ولکانیک‌ها و ولکانوکلاستیک‌های سازند کرج که بخش عمده‌ای از منطقه مورد مطالعه در این پژوهش را در بر می‌گیرند، نشان‌دهنده تشکیل یک حوضه پشت کمانی کششی در شمال پهنه فرورانش عربی- اوراسیا می‌باشد

(Verdel et al., 2011; Ballato et al., 2011). این ولکانیک‌ها به طور عمده از نوع مافیک تا حدواسط هستند (Honarmand et al., 2024). نهشته‌های آواری سازندهای هزاردره و کهریزک نیز شاهدی بر تشکیل حوضه پیش‌بوم در طول دامنه جنوبی البرز قلمداد می‌شوند (Ballato et al., 2008). امروز، این نهشته‌های پلیو- کواترنر در اثر عملکرد گسل‌های لرزه‌زایی همچون پردیسان، داوودیه و محمودیه به شکلی فعال در حال دگریختی هستند (مانند Tchalenko et al., 1974; Solaymani Azad et al., 2011; Talebian et al., 2016; Berberian and Yeats, 2016).

۳- عناصر ساختاری

۳-۱- گسل شمال تهران

از گسل شمال تهران به عنوان یک گسل مرزی که از شمال غرب قزوین در غرب تا نیکنام ده در شرق گسترش دارد و واحدهای سنگ- چینه‌ای ائوسن البرز (سازند کرج) را بر روی نهشته‌های نئوژن و کواترنری پیش‌بوم تهران رانده است یاد می‌شود (Tchalenko et al., 1974; Allen et al., 2003; Berberian and Yeats, 2016). این گسل که Guest و همکاران (۲۰۰۶) از آن تحت عنوان راندگی فرحزاد- کرج نیز نام برده‌اند بیش از ۱۷۵ کیلومتر درازا و شیبی به سمت شمال دارد. روند این گسل در فاصله بین شهرهای تهران و کرج تغییر کرده و هندسه ای V شکل به خود گرفته است (Ritz et al., 2012). گسل شمال تهران گسلی است با سازوکار مورب لغز (معکوس/ راندہ با مؤلفه چپ‌بر) (Alavi, 1996). در شمال شهر تهران چین‌ها و گسل‌هایی با روند شمال غرب- جنوب شرق ساختارهای قدیمی‌تر با روند شرقی- غربی و شمال شمال شرق- جنوب جنوب غرب را منحرف و جابجا کرده‌اند و گمان می‌رود که این رویداد، حاصل یک حرکت راست بر قدیمی در طول گسل شمال تهران باشد (Allen et al., 2003). پهنه گسلی شمال تهران شامل چندین قطعه گسلی به تقریب موازی با آرایش پلکانی راست پله است. احتمالاً در شرق لشکرک، پایانه شرقی راندگی شمال تهران به گسل مشا می‌پیوندند (Tchalenko et al., 1974; Allen et al., 2003; Bachmanov et al., 2004).

۳-۲- گسل مشا

اثر سطحی سیگموئیدال گسل مشا که از آن با نام گسل مشا- فشم نیز یاد می‌شود درازایی بالغ بر ۲۲۰ کیلومتر و شیبی متغیر بین ۳۵ تا ۷۰ درجه به سمت شمال دارد (Tchalenko et al., 1974; Allen et al., 2003). گسل مشا از سه قطعه شرقی، غربی و مرکزی تشکیل شده است (Tchalenko et al., 1974; Berberian and Yeats, 1999; Moinabadi and Yassaghi, 2007). پایانه شرقی این گسل با سازوکار چپ‌بر در نزدیکی پایانه غربی گسل جنبای فیروزکوه قرار دارد (Allen et al., 2003). پایانه غربی آن نیز موازی با گسل جنبای طالقان است و از سازوکار غالب چپ‌بر برخوردار است. کوتاه‌شدگی ابتدایی گسل مشا چیزی حدود ۴ کیلومتر برآورد شده است. تحلیل خش‌لغزهای صفحه گسل توسط Bachmanov و همکاران (۲۰۰۴) سازوکار غالب راستالغز را در قطعه شرقی و میزان مشابهی از حرکت راستالغز و معکوس را در قطعه مرکزی نشان می‌دهد. چین‌هایی با روند شرقی- غربی که توسط گسل مشا بریده شده‌اند، نشان‌دهنده یک سازوکار قدیمی‌تر غالباً راست‌بر هستند که بعدها با یک گسلش چپ‌بر جایگزین شده است. این مشاهدات اهمیت گسل مشا به عنوان یک ساختار قدیمی که کوتاه شدگی ناشی از تغییر رژیم زمین‌ساختی طی همگرایی صفحات عربی و اوراسیا را در خود جای داده است نشان می‌دهند. Allen و همکاران (۲۰۰۳) نرخ لغزش ۷ میلی‌متر در سال را برای قطعه شرقی و بخش شرقی قطعه مرکزی گسل محاسبه کرده‌اند. اما، Ritz و همکاران (۲۰۰۶) نرخ لغزش چپ‌بر ۲±۰/۱ میلی‌متر در سال با یک مؤلفه نرمال ناچیز را محاسبه کرده‌اند. نشانگرهای جنبشی از یک گسلش معکوس با مؤلفه چپ‌بر در نزدیکی پایانه غربی حکایت دارند (Guest et al. 2006). چندین زمین‌لرزه ویرانگر در منطقه مورد مطالعه روی داده است که به لغزش قطعه‌های مختلف گسل مشا و احتمالاً جنبش گسل‌های پنهان در پیش‌بوم نسبت داده می‌شوند (Tchalenko et al., 1974; Ambraseys and Melville, 1982; Berberian and Yeats, 2001). بزرگ‌ترین و ویرانگرترین این زمین‌لرزه‌ها در سال‌های ۹۵۸، ۱۶۶۵، ۱۸۳۰ و ۱۹۳۰ میلادی رخ داده‌اند.

۳-۳- گسل پورکان- وردیج

گسل پورکان- وردیج یک گسل با سازوکار غالب راندگی و روند عمومی شمال غرب- جنوب شرق است که در پایانه جنوب شرقی خود به راندگی شمال تهران متصل می‌شود. این گسل در طول خود چندین خمش طولی را نشان می‌دهد که با عملکرد خود تاقدیس‌ها و ناودیس‌هایی از نوع چین‌های خم

گسلی با روند شمال شرق- جنوب غرب را در فرادیواره گسل سبب شده‌اند. علاوه بر این، تاقدیس‌ها و ناودیس‌هایی بزرگ با هندسه باز و روندی شمال غرب- جنوب شرق که از نوع چین-های فرادیواره‌ای محسوب می‌شوند نیز در طول این گسل به چشم می‌خورد (Guest et al. 2006). از بارزترین این چین خوردگی‌ها می‌توان به ناودیس کرج (Guest et al. 2006) اشاره کرد. پژوهش‌های جدید نشان می‌دهند این سیمای ساختاری، یک گسل راندگی قدیمی است که تا حدی مؤلفه راستالغز چپ‌بر نیز دارد.

۳-۴- گسل امام زاده داوود

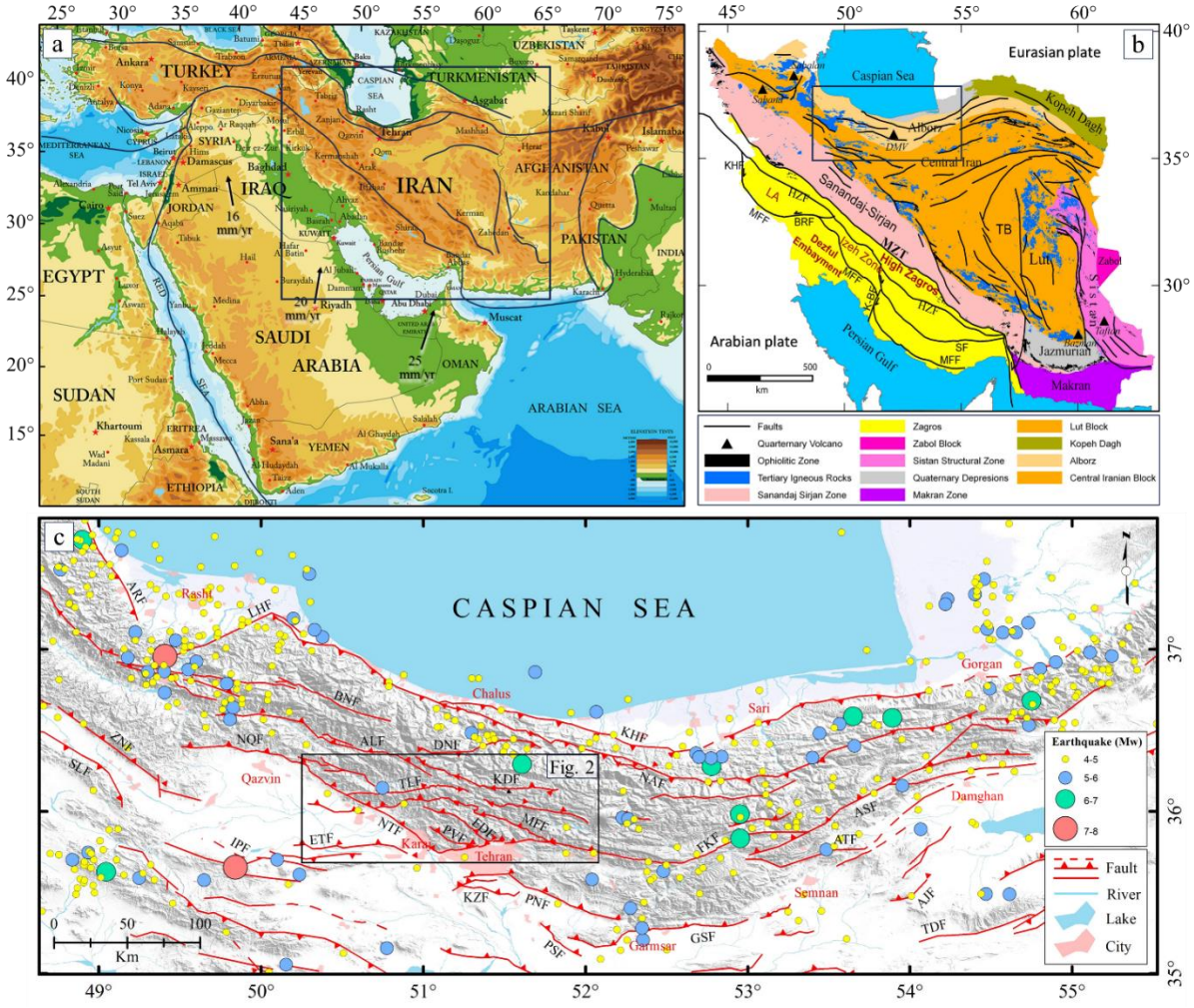
گسل امامزاده داوود که Guest و همکاران (۲۰۰۶) از آن با نام جدید دروانه یاد می‌کنند با روند عمومی شمال غرب- جنوب شرق و شیب ۷۰ درجه‌ای به سمت شمال شرق در مرکز لوزی ساختاری شمال تهران واقع شده است (Landgraf et al., 2009). این گسل که با عملکرد خود موجب راندگی واحدهای قدیمی‌تر سازند کرج بر روی واحدهای جوان‌تر آن شده است، در پایانه جنوب شرقی خود در حوالی منطقه ولنجک به گسل شمال تهران می‌پیوندد. این گسل از سمت شمال غرب نیز به احتمال به گسل مشا متصل می‌شود و در آن نواحی چین‌هایی تنگ و فشرده از نوع چین های انتشار گسلی را به وجود آورده است (Guest et al., 2006). Allen و همکاران (۲۰۰۳) با توجه به حضور چین‌خوردگی‌هایی با روند شمال شرق- جنوب غرب در حوالی این گسل یک سازوکار ترافشارشی راست‌بر قدیمی را برای آن پیشنهاد داده اند. Guest و همکاران (۲۰۰۶) رژیم کینماتیکی کنونی حاکم بر این گسل را از نوع ترافشارشی چپ‌بر در نظر گرفته اند. نقشه گسل‌های منطقه در شکل۳a نمایش داده شده است. اغلب این گسل‌ها در راستای غرب شمال غرب- شرق جنوب شرق آرایش یافته‌اند.

۳-۵- گسل طالقان

پهنه گسلی طالقان یک ساختار چپ‌بر- معکوس است که روندی شرقی- غربی دارد. درازای این گسل حدود ۶۵ کیلومتر است و شیبی تند به سمت جنوب دارد. گسل طالقان در واقع پس-راندگی گسل مشا محسوب می‌شود و بر روی فرادیواره این گسل تشکیل شده است (Yassaghi and Madanipour, 2008). هندسه و سازوکار راندگی گسل‌های طالقان و مشا باعث تشکیل ساختار فراجسته و برونزد واحدهای پروتروزوئیک و مزوزوئیک در حدفاصل این دو گسل شده است. قسمت شرقی گسل طالقان با عملکرد راندگی خود سنگ‌های پالئوزوئیک و پرکامبرین در سمت جنوب را در مقابل سازند کرج و کنگلومراهای میوسن حوضه طالقان در سمت شمال قرار داده‌اند. این در حالی است که قسمت غربی گسل که از مؤلفه حرکتی غالب چپ‌بر (مانند Guest et al. 2006; Solaymani Azad et al., 2011; Landgraf et al., 2013) برخوردار می‌باشد واحدهای سنگی پالئوزوئیک و مزوزوئیک را در سمت جنوبی در کنار سازند کرج به سن ائوسن در سمت شمالی قرار داده است. گسل طالقان یکی از بزرگ‌ترین عوامل تهدید لرزه‌ای برای شهرهای تهران و کرج است و می‌تواند عامل بسیاری از زمین‌لرزه های کهن و ویرانگر همچون زمین‌لرزه ۹۵۸ میلادی با بزرگای نسبی ۷/۷ قلمداد شود. زمین‌لرزه ۸ نوامبر۱۹۶۶ صمغ آباد طالقان، احتمالاً به سبب جنبش این گسل روی داده است. احتمال می‌رود که گسل طالقان در زمین‌لرزه ۱۱۰۱ میلادی طالقان با بزرگی ۶/۱ نیز مؤثر بوده است (برای مثال Berberian and Yeats, 1999).

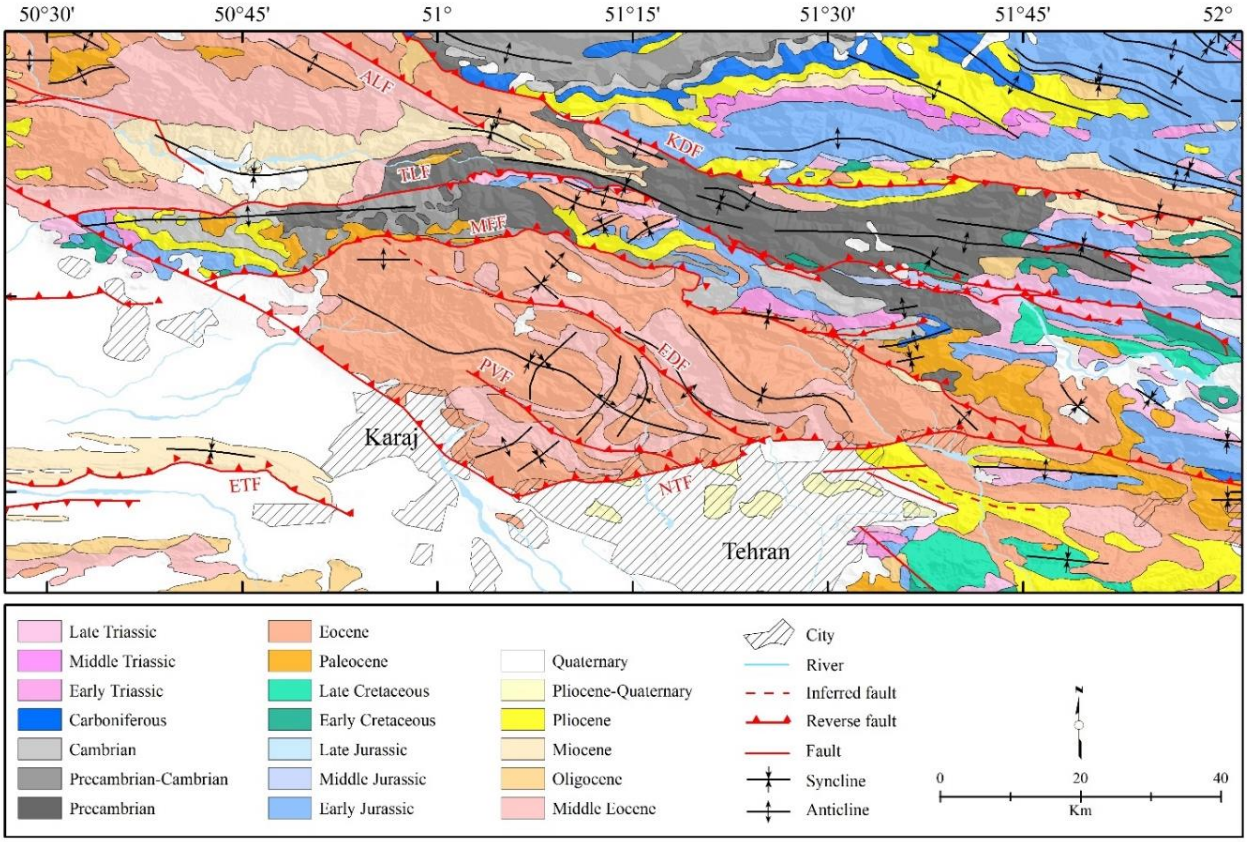
۳-۶- گسل کندوان

این گسل به تقریب در ستیغ البرز مرکزی واقع شده و با روند تقریبی غرب، شمال غرب- شرق، جنوب شرق از نزدیکی آتشفشان دماوند تا علم کوه امتداد دارد و واحدهای سنگی پالئوزوئیک و مزوزوئیک را به سمت جنوب بر روی سازند ائوسن کرج و نهشته‌های جوان‌تر رانده است. در ناحیه کندوان شیب این گسل ۳۰ تا ۶۰ درجه به سمت شمال می‌باشد، اما در ناحیه علم کوه شیب گسل افزایش می‌یابد. گسل کندوان دارای مؤلفه راستالغز راست‌بر نیز هست و مرز زیرپهنه های پالئوزوئیک مرکزی و ترشیری مرکزی را تشکیل داده و به نظر می‌رسد حوضه البرز شمالی را از حوضه البرز جنوبی در ائوسن جدا می-کرده است (Aghanabati, 2006). درازای این گسل ۲۰۰ کیلومتر برآورد شده است (Yassaghi and Naeimi, 2011).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و زمین‌ساختی محدوده مورد مطالعه. (a) مدل ارتفاعی رقومی منطقه خاور میانه که بر پایه تصاویر SRTM تهیه شده است. خطوط و کادر سیاه رنگ به ترتیب گسل‌های اصلی و موقعیت شکل (b) را نشان می‌دهند، (b) پهنه‌های ساختاری- رسوبی ایران (برگرفته از تکنیک و قدس، ۲۰۱۷)، کادر سیاه رنگ موقعیت شکل (c) را نشان می‌دهد و (c) نقشه لرزه زمین‌ساخت شمال ایران. زمین‌لرزه‌های دستگاهی منطقه مربوط به سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۴ (برگرفته از سازمان زمین شناسی ایالات متحده آمریکا). کادر سیاه رنگ موقعیت شکل ۲ را نشان می‌دهد. کوته‌نوشت‌ها: NTF: گسل شمال تهران، PVF: گسل پورکان- وردیج، EDF: گسل امام زاده داوود، MFF: گسل مشا- فشم، TLF: گسل طالقان، KDF: گسل کندوان، DNF: گسل دشت نظیر، NAF: گسل شمال البرز، KHF: گسل خزر، BNF: گسل بنان، LHF: گسل لاهیجان، ARF: گسل آستارا، NQF: گسل شمال قزوین، ALF : گسل الموت، ZNF : گسل زنجان، SLF: گسل سلطانیه، IPF: گسل ایپک، ETF: گسل اشتهارد، KZF: گسل کهریزک، PNF: گسل پارچین، PSF: گسل پیشوا، GSF: گسل گرمسار، FKF: گسل فیروزکوه، ATF: گسل عطاری، ASF: گسل آستانه، AJF: گسل انجیلو، TDF: گسل ترود.

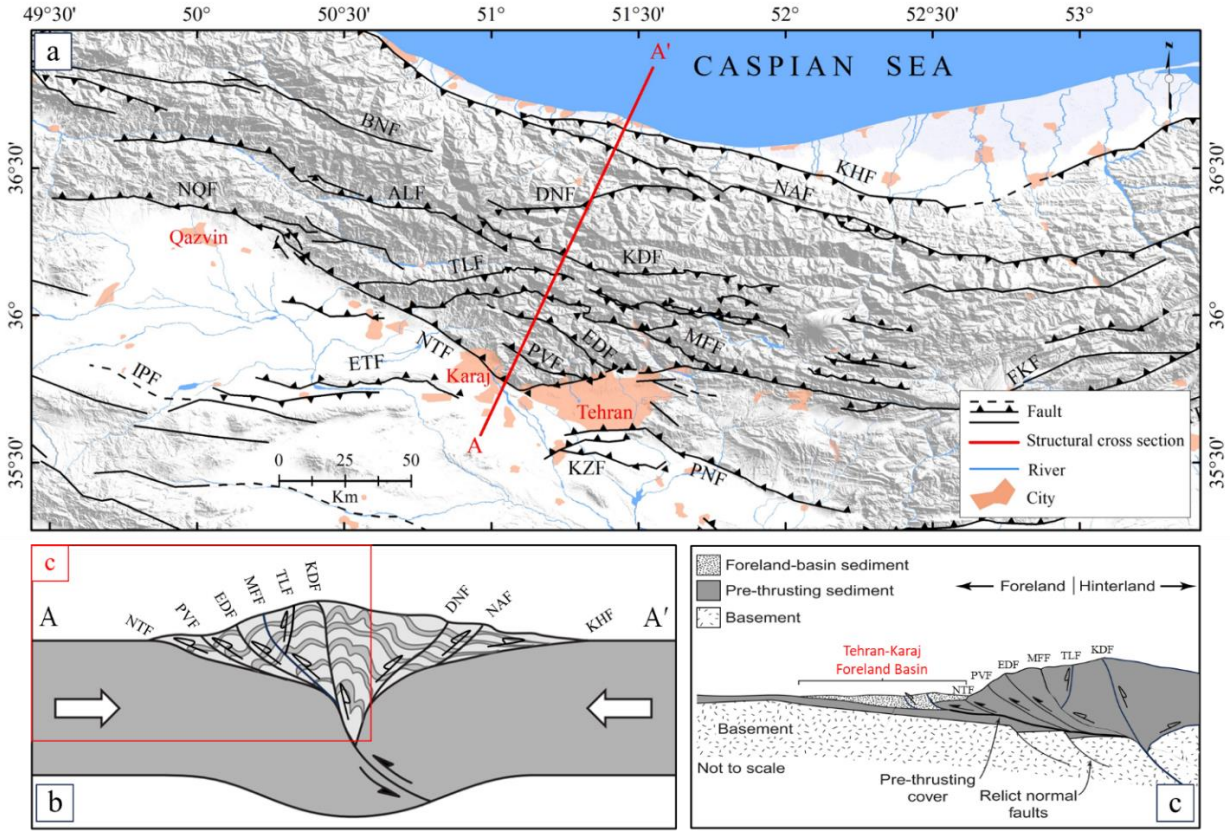
Fig. 1. Geographic and tectonic location of the study area. (a) SRTM-based Digital Elevation Model of the Middle East region. The black lines and the black frame show the main faults and the location of Fig. (b), respectively. (b) The structural-sedimentary zones of Iran (taken from Teknik and Ghods, 2017), the black frame shows the location of Fig. (c) and (c) Seismotectonic map of the northern Iran. Instrumental seismicity of the region from 1900-2024 (from the USGS). The black frames indicate the location of Fig. (2). presented in the following sections. Abbreviations: NTF: North Tehran fault, PVF: Purkan-Vardij Fault, EDF: Emamzadeh Davud Fault, MFF: Mosha-Fasham Fault, TLF: Taleghan Fault, KDF: Kandovan Fault, DNF: Dasht-e-Nazir Fault, NAF: North Alborz Fault, KHF: Khazar Fault, BNF: Banan Fault, LHF: Lahijan Fault, ARF: Astara Fault, NQF: North Qazvin Fault, ALF: Alamut Fault, ZNF: Zanjan Fault, SLF: Soltanieh Fault, IPF: Ipak Fault, ETF: Eshtehard Fault, KZF: Kahrizak Fault, PNF: Parchin Fault, PSF: Pishva Fault, GSF: Garmsar Fault, FKF: Firuzkuh Fault, ATF: Atari Fault, ASF: Astaneh Fault, AJF: Anjilu Fault, TDF: Torud Fault.



شکل ۲– نقشه زمین‌شناسی پهنه ترافشارشی شمال تهران و نواحی پیرامون آن. بخش عمده این پهنه را سازند کرج به سن ائوسن پوشانده است. قدیمی ترین واحدهای سنگ‌چینه ای منطقه که متعلق به پرکامبرین و کامبرین هستند در حد فاصل گسل‌های مشا و طالقان، همچنین در فاصله بین گسل های طالقان تا کندوان رخنمون دارند. کوته‌نوشت‌ها مشابه با شکل ۱.

Fig. 2. Geologic map of the North Tehran transpressional zone and its surrounding areas. The major part of this area is covered by Eocene Karaj Formation. The oldest rock units of the region, which belong to the Precambrian and Cambrian, are outcrops in the distance between Mosha and Taleghan faults, as well as in the distance between Taleghan and Kandovan faults. Abbreviations same as Fig. (1).

هندسه و سازوکار گسل‌های اصلی منطقه همراه با داده‌های کینماتیک و زمین‌ساختی گوناگون حاکی از این هستند که پهنه ساختاری شمال تهران را می‌توان یک دوپشته (Duplex) ترافشارشی در نظر گرفت (برای مثال Guest et al. 2006؛ Landgraf et al., 2009؛ Ballato et al., 2013؛ Berberian and Yeats, 2016). چنانچه در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، این پهنه ساختاری را می‌توان یک پهنه ترافشارشی یا نیم گل ساخت مثبت نیز در نظر گرفت (Maddahi et al., 2024). از سیماهای ساختاری دارای اهمیت در این منطقه می‌توان به ساختارهای فراجسته (Pop-up) (Yassaghi and Madanipour, 2008) و فروجسته (Pop-down) طالقان که به ترتیب در حدفاصل گسل‌های مشا- طالقان و طالقان- کندوان شکل گرفته‌اند اشاره نمود. چنانچه در ادامه خواهیم دید، این ساختارها به لحاظ نرخ حرکات قائم نسبت به نواحی پیرامون خود از تفاوت چشم‌گیری برخوردار هستند. حوضه پیش‌بوم تهران نیز از دیگر نمودهای زمین‌ساختی است که در حال حاضر در اثر حرکت رو به بالای ورقه‌های راندگی پهنه ترافشارشی شمال تهران و بارگذاری ناشی از آن به نوبه خود متحمل دگریختی قائم می‌شود.



شکل ۳– (a) پیاده‌سازی گسل‌های اصلی منطقه بر روی مدل ارتفاع رقومی. خط قرمز رنگ مسیر بُرش عرضی ساختاری ارائه شده در شکل (b) را نشان می‌دهد، (b) تصویری شماتیک از بُرش عرضی ساختاری البرز مرکزی که بیانگر شکل‌گیری یک گل ساخت مثبت در کمربند البرز مرکزی می‌باشد. کادر قرمز رنگ نشان‌دهنده موقعیت شکل (c) می‌باشد، و (c) مدل ساختاری پیشنهادی برای دامنه جنوبی البرز مرکزی و پهنه ترافشارشی شمال تهران همراه با تشکیل حوضه پیش‌بوم تهران در جنوب این ارتفاعات (بر پایه Pluijm and Marshak, 2004). کوته‌نوشت‌ها مشابه با شکل ۱.

Fig. 3. (a) Main faults of the region superimposed on the SRTM-based Digital Elevation Model. The red line shows the structural cross section presented in Fig. (b), (b) Schematic cartoon of the structural cross section of the central Alborz, which shows the formation of a positive flower structure across the central Alborz range. The red frame indicates the location of Fig. (c), and (c) Proposed current-day structural model of the south-central Alborz and the North Tehran transpressional zone along with the illustration of the Tehran foreland basin in the toe of the heights (Based on Pluijm and Marshak, 2004). Abbreviations same as Fig. (1).

۴- روش پژوهش

هدف از انجام این پژوهش برآورد جابجایی قائم کنونی پهنه ساختاری شمال تهران با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته ژئودتیک است. طی سال‌های اخیر، علم ژئودزی و کاربرد آن در زمینه کینماتیک و دینامیک دگریختی پوسته زمین جایگاه ویژه‌ای در میان دانشمندان علوم زمین پیدا کرده است. زیرا با پیدایش و گسترش تکنیک‌های ژئودتیک و به دنبال آن امکان تعیین موقعیت بسیار دقیق می‌توان تغییرات مکانی سطح زمین اعم از جابجایی‌های افقی و قائم را در طول زمان پایش کرد. داده‌های سامانه موقعیت یاب جهانی و ترازیابی دقیق از تکنیک‌های کارآمد و دقیقی هستند که در پژوهش حاضر به منظور برآورد حرکات قائم زمین در پهنه ترافشارشی شمال تهران مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه به تفصیل به ارائه هر یک از این روش‌ها پرداخته شده است.

۵- بحث

۵-۱- سامانه موقعیت یاب جهانی

سامانه موقعیت یاب جهانی یکی از روش‌های کارآمد ژئودتیک است که با استفاده از آن می‌توان دگریختی و حرکات پوسته‌ای

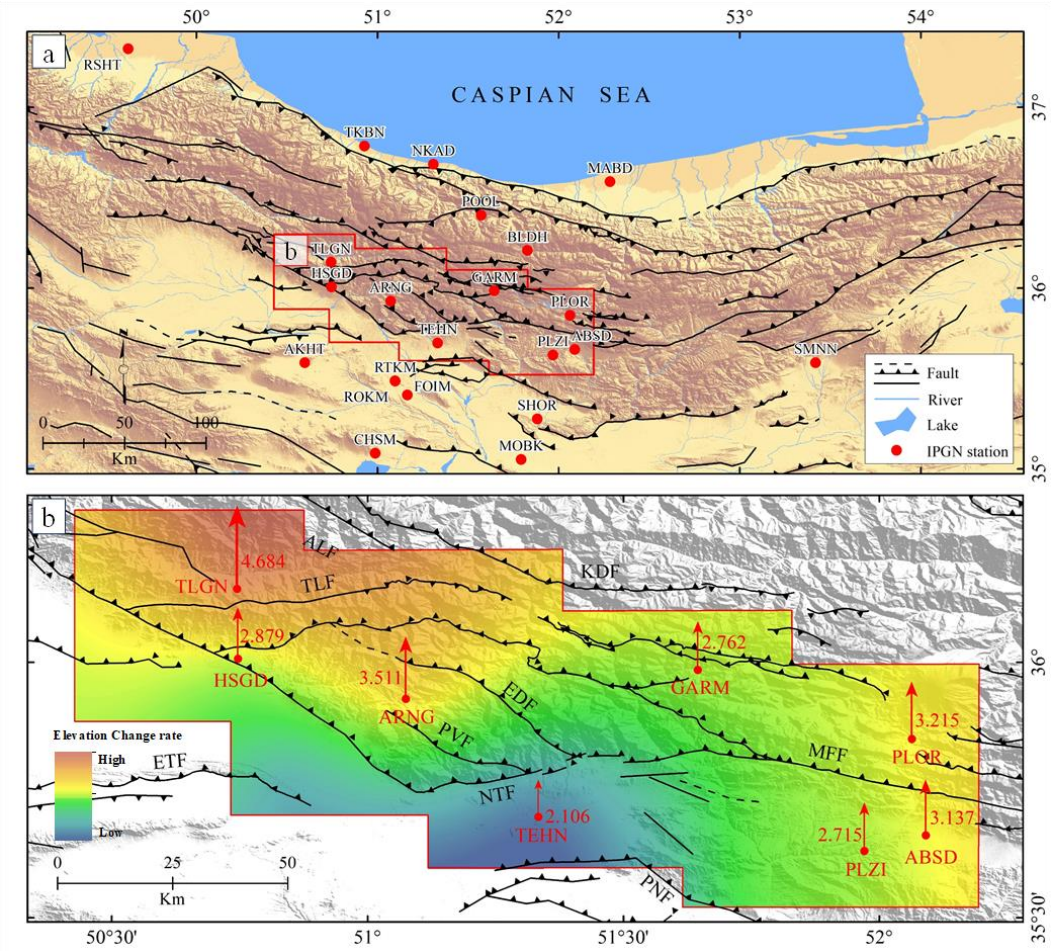
را با قدرت تفکیک زمانی بالا پایش کرد. به منظور مطالعه دگریختی کنونی پوسته، چند شبکه GPS در بازه زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۳ در گستره سرزمین ایران بنا نهاده شد. Raeesi و همکاران (۲۰۱۷) تمامی مطالعات پیش از خود را در یک میدان سرعت با چارچوب مرجع یکسان تلفیق نمودند. به دنبال زمین- لرزه بم در سال ۲۰۰۳ با بزرگای گشتاوری ۶/۵ (Talebian and Jackson, 2004) سازمان نقشه‌برداری کشور شبکه ایستگاه‌های دائمی ژئودینامیک ایران (IPGN) را در سراسر کشور و به منظور اندازه‌گیری های پیوسته و دائمی GPS راه اندازی کرد. در حال حاضر تعداد ایستگاه‌های این شبکه به ۱۳۵ مورد افزایش یافته است. طراحی شبکه و بهینه‌سازی موقعیت ایستگاه‌ها توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و همچنین دانشگاه‌های مونت پولیه، گرنوبل- آلپ و استراسبورگ فرانسه و با در نظرگیری زمین‌ساخت، پتانسیل لرزه‌خیزی و تراکم جمعیت منطقه صورت گرفته است. این مناطق شامل البرز مرکزی، شمال غرب، شمال شرق و زاگرس می‌باشد. البرز مرکزی دارای ۲۹ ایستگاه دائمی GPS است (شکل a۴). مطالعات Khorrami و همکاران (۲۰۱۹) نشان می‌دهد که سبک و شدت دگریختی چه در طول و چه در عرض کمربند کوهزایی البرز تغییر می کند. در این پژوهش از داده‌های مربوط به ۸ ایستگاه IPGN که در پهنه ساختاری شمال تهران و نواحی پیرامون آن واقع شده‌اند استفاده شده است. مشخصات مربوط به این ایستگاه‌ها در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

داده‌های خام ایستگاه‌های IPGN مربوط به بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ابتدای ۲۰۲۰ هستند. این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار GAMIT/GLOBK 10.6 پردازش شده‌اند. در ابتدا در محیط نرم‌افزاری GAMIT به منظور اتصال شبکه TEHN به چارچوب مرجع ITRF 2014 (International Terrestrial Reference Frame)، ایستگاه‌های IGS (International GNSS Service) که دارای توزیع جهانی هستند وارد فرایند پردازش شده‌اند. سپس با استفاده از نرم‌افزار GLOBK برای تعیین میدان سرعت حرکات قائم، شبکه مشاهدات به دست آمده با شبکه مشاهدات روزانه شبکه جهانی (eura, igs1, igs2, igs3) که توسط SOPAC (Scripps Orbits and Permanent Array Center) تهیه شده‌اند ترکیب و سرانجام سرعت‌ها نسبت به چارچوب مرجع اوراسیا محاسبه شده‌اند. خروجی پردازش به صورت نقشه میدان جابجایی قائم (شکل b۴) و یکی از مهم‌ترین خروجی‌های پردازش یعنی سری‌های زمانی ارائه شده است (شکل ۵). با استفاده از سری‌های زمانی می‌توان نرخ حرکات و جابجایی‌های سطحی زمین را پایش و محاسبه نمود. بردار سرعت جابجایی قائم ایستگاه‌های IPGN بیش‌ترین میزان بالاآمدگی را در ایستگاه طالقان (TLGN) و با نرخی برابر با ۴/۶۸ میلی‌متر در سال نشان می‌دهد. این مسأله می‌تواند ناشی از عملکرد مجموعه چین- راندگی‌های موجود در این منطقه که Guest و همکاران (۲۰۰۶) از آن تحت عنوان پهنه نازک پوست یاد می‌کنند باشد. قسمت‌های غربی این پهنه که ایستگاه طالقان نیز در آنجا واقع شده است حدود ۴۰ کیلومتر پهنا دارد و از چین‌های باز و گسل‌هایی معکوس با شیب زیاد به سمت جنوب تشکیل شده است. از جمله این گسل‌ها می توان به راندگی تکیه (Guest et al., 2006) اشاره نمود. ایستگاه ارنگه (ARNG) با نرخ بالاآمدگی ۳/۵۱ میلی‌متر در سال نیز از دگریختی پوسته‌ای قائم قابل توجه در این ناحیه حکایت دارد. این مسأله را می‌توان در ارتباط با عملکرد فشارشی راندگی‌های شمال تهران، پورکان- وردیج و امام زاده داوود که با بالاآمدگی و حرکات قائم در فرادیواره خود همراه هستند در نظر گرفت. ایستگاه‌های پلور (PLOR) و آبسرد (ABSD) در قسمت‌های شرقی گسل مشا بالاآمدگی بیش از ۳ میلی‌متر در سال را در این ناحیه نشان می‌دهند که به نوبه خود نشان از وجود مؤلفه زمین‌ساختی فشارشی در کنار مؤلفه راستالغز چپ- بر گسل مشا دارد. این دستاورد منطبق با نتایج حاصل از مطالعات Tatar و همکاران (۲۰۱۲) است. ایشان با بررسی رخدادهای لرزه‌ای و حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها در قسمت‌های شرقی گسل مشا، سازوکار غالب راستالغز چپ‌بر با مؤلفه فشارشی را برای این گسل و نواحی پیرامون آن تشخیص داده‌اند. نکته جالب توجه کاهش مؤلفه فشارشی با حرکت به سمت جنوب (فرودیواره گسل مشا) و رخداد برخی حرکات لرزه‌ای با مؤلفه کششی در حوالی ایستگاه (PLZI) است (Ritz et al. 2006).

جدول ۱- ایستگاه‌های IPGN استفاده شده در این پژوهش نسبت به چهارچوب مرجع اوراسیا
(U_i: ارتفاع اولیه، U_f: ارتفاع نهایی، V_u: نرخ تغییرات ارتفاعی)

Table 1. The IPGN stations used in this research, which are relative to the Eurasian reference frame
U_i: Initial elevation, U_f: final elevation, U_v: elevation change rate

Station	Lat.	Lon.	Ui(m)	Uf(m)	VU (mm/yr)
ABSD	35.6612	52.0912	1972.63958	1972.67095	3.137
ARNG	35.9284	51.0749	1865.53793	1865.57304	3.511
GARM	35.985	51.6457	2513.36792	2513.39554	2.762
HSGD	36.0067	50.747	1619.12078	1619.14957	2.879
PLOR	35.8496	52.064	2278.60334	2278.63549	3.215
PLZI	35.6303	51.971	1700.27992	1700.30707	2.715
TEHN	35.6973	51.3341	1194.56867	1194.58973	2.106
TLGN	36.1436	50.745	2151.96517	2152.01201	4.684



شکل ۴- (a) موقعیت ایستگاه‌های IPGN شمال ایران بر روی مدل ارتفاعی رقومی که بر پایه تصاویر SRTM تهیه شده است. کادر قرمز رنگ موقعیت شکل (b) را نشان می‌دهد، و (b) نقشه نرخ تغییرات ارتفاعی ایستگاه‌های مختلف IPGN بر روی مدل ارتفاعی رقومی.

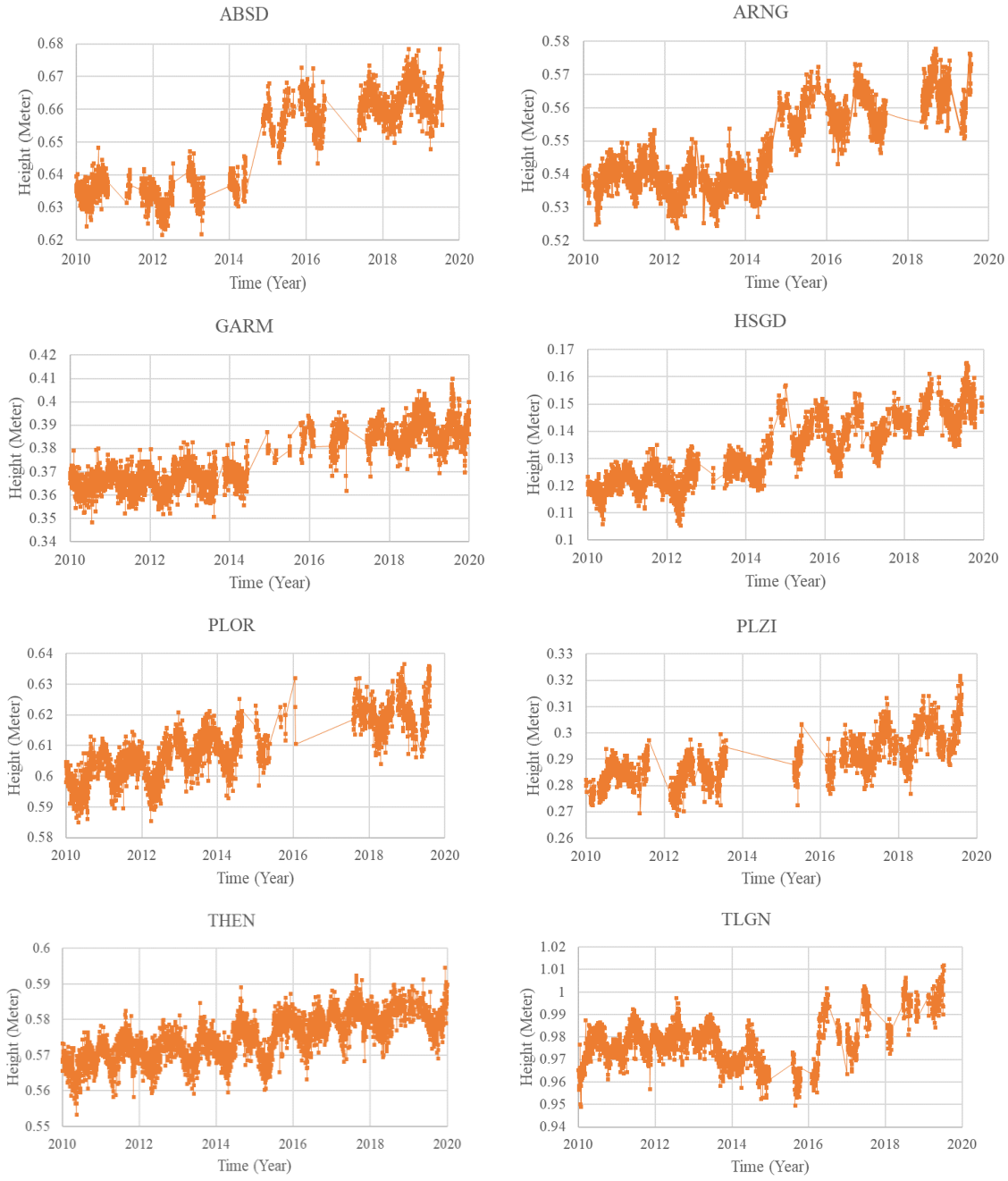
Fig. 4. (a) IPGN stations in northern Iran implemented on the SRTM-based digital elevation model. The red frame shows the location of Fig. (b), and (b) Heat-map resulted from the interpolation of the height change rate of different IPGN stations superimposed on the SRTM-based digital elevation model.

نقشه نرخ تغییرات ارتفاعی و بردار جابجایی ایستگاه‌های موجود در قسمت‌های شرقی گسل مشا نیز گویای این مطلب هستند. به طوری که نرخ بالاآمدگی در ایستگاه (PLZI) به ۲/۷۱ میلی‌متر در سال کاهش می‌یابد. افرادی همچون Ritz و همکاران (۲۰۰۶) و Ashtari و همکاران (۲۰۰۵) حتی قسمت-های شرقی گسل مشا را یک گسل تراکششی با مؤلفه غالب چپ‌بر می‌دانند. به طور کلی، نتایج حاصل از پردازش و تفسیر داده‌های سامانه موقعیت یاب جهانی در پژوهش حاضر، نرخ میانگین بالاآمدگی بیش از ۳ میلی‌متر در سال را برای پهنه ساختاری شمال تهران در فاصله سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. Vernant و همکاران (۲۰۰۴) نیز با استفاده از داده-های سامانه موقعیت یاب جهانی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ نرخ کوتاه‌شدگی ۲±۵ میلی‌متر در سال را برای البرز مرکزی برآورد کرده‌اند. ایستگاه تهران (TEHN) کم‌ترین نرخ بالاآمدگی برابر با ۲/۱۰۶ میلی‌متر در سال را نشان می‌دهد. با حرکت از این ایستگاه به سمت غرب جنوب غرب با نرخ جابجایی قائم منفی بسیار شدیدی روبرو می‌شویم، به طوری که در دشت‌های موجود در فرودیواره راندگی شمال تهران در حد فاصل شهرهای تهران تا کرج و حتی هشتگرد، فرونشستی بسیار چشم‌گیر را شاهد هستیم. نقشه نرخ تغییرات ارتفاعی ایستگاه-های IPGN (شکل b۴) مؤید این پدیده است. عمده این فرونشینی زمین، حاصل از برداشت بی رویه از منابع آب‌های زیرزمینی است (Mahmoudpour et al., 2013; Haghshenas haghighi and Motagh, 2021). با این حال، از نقش عوامل زمین‌ساختی و پایین افتادگی فرودیواره راندگی شمال تهران نیز نباید غافل شد. بارگذاری ناشی از عملکرد ورقه‌های راندگی به سمت جنوب به نوبه خود موجب پایین-افتادگی نواحی جنوبی و تشکیل پیش‌بوم جنوبی البرز (پیش‌بوم تهران) در جنوب ارتفاعات البرز شده است (برای مثال Tchalenko et al., 1974; Berberian et al., 1985; Solaymani Azad et al., 2011). این حوضه پیش‌بوم در گذر زمان توسط رسوبات حاصل از فرسایش ورقه های راندگی پر شده است (شکل c۳). تحلیل سری‌های زمانی مربوط به ایستگاه‌های مختلف نشان می‌دهد که نرخ بالاآمدگی در گذر زمان یکسان و یکنواخت نبوده و در بازه زمانی ۱۰ ساله از ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ در نوسان بوده است. به عنوان مثال، در ایستگاه طالقان که بیش‌ترین نرخ بالاآمدگی را به خود اختصاص داده است، در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ میزان تغییرات ارتفاعی ناچیز بوده است. در حالی که از این تاریخ به بعد نرخ بالاآمدگی روندی به شدت افزایشی به خود گرفته است. بنابراین، می‌توان گفت رژیم‌های زمین‌ساختی، تنش‌های وارده بر منطقه و دگرریختی حاصل از آن‌ها در گذر زمان در حال تغییر بوده است. این همان چیزی است که مورد بحث بسیاری از زمین‌شناسان بوده و حتی پدیده زمین‌ساخت وارون (برای مثال Yassaghi, 2001; Zanchi et al., 2006; Yassaghi and Madanipour, 2008) و تغییر رژیم کششی به فشارش و یا بالعکس را در این پهنه ساختاری- رسوبی گزارش کرده‌اند.

۵-۲- ترازیابی دقیق

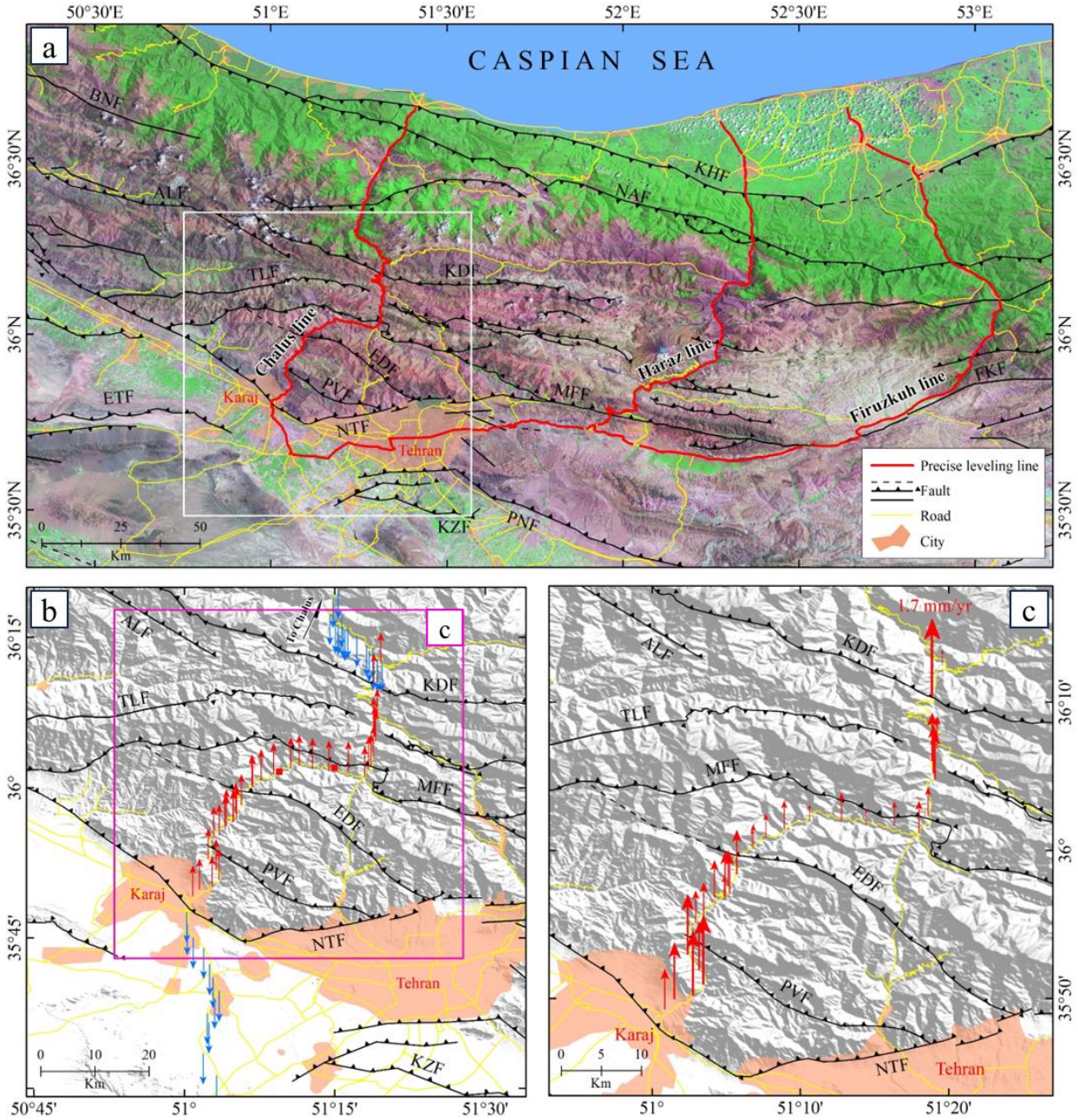
کمی‌سازی جابجایی قائم با استفاده از مقایسه داده‌های ترازیابی دقیق که در بازه‌های زمانی چندین ساله برداشت و قرائت می-شوند، یکی از تکنیک‌هایی کارآمد در پایش عملکرد گسل‌های جنبا و دگرریختی ناشی از آن ها قلمداد می‌شود (Gimén ez et al., 2009; Marín-Lechado et al., 2010). این روش بر مبنای اندازه‌گیری و مقایسه چندین باره تغییرات ارتفاعی در طول خطوط ترازیابی است و اطلاعات با ارزشی را در مورد میزان دگرریختی قائم پیرامون قطعات گسلی اصلی را در اختیار قرار می‌دهد (Jesus Galindo-Zaldívar et al, 2013). جاده‌های چالوس، هراز و فیروزکوه مهم‌ترین مسیرهای دارای ایستگاه‌های ترازیابی هستند که رشته کوه البرز را به طور عرضی قطع می کنند (شکل ۶). از این میان، جاده چالوس از قسمت‌های تقریباً مرکزی پهنه ساختاری شمال تهران و با روند کلی شمال شمال شرق- جنوب جنوب غرب عبور می‌کند. فاصله نقاط مبنا برای برداشت داده‌های ترازیابی در این جاده به طور متوسط ۱/۵ تا ۲ کیلومتر است. بنابراین، می‌توان اطلاعات سودمندی از میزان جابجایی قائم گستره ساختاری شمال تهران به عنوان بخشی از دامنه جنوبی البرز مرکزی را به دست آورد. داده‌های ترازیابی دقیق جاده چالوس طی ۱۱ سال و در دو مرحله (۱۹۹۲ و ۲۰۰۳) توسط سازمان نقشه برداری کشور برداشت شده است. این مسیر متشکل از ۹۱ نقطه مبنا است که از چالوس شروع و به کرج ختم می‌شود. نیمرخ توپوگرافی این مسیر و ادامه آن تا حوالی دشت شهریار در جنوب غرب تهران همراه با نرخ جابجایی قائم محاسبه شده در هر ایستگاه ترازیابی در شکل ۷ ارائه شده است.

پس از حذف خطاهای سیستماتیک داده‌های ترازیابی و پردازش آن ها، میزان جابجایی قائم (بالاآمدگی و یا فرونشست) در طول مسیر جاده چالوس محاسبه شده است. برای هر نقطه مبنا، دو قرائت صورت گرفته در بازه زمانی یاد شده مورد استفاده قرار گرفته است. این داده‌ها در واقع اختلاف ارتفاع هر نقطه مبنا نسبت به نقاط مبنای مجاور آن در طول مسیر و در فاصله بین دو قرائت هستند و میزان حرکات قائم نقاط مبنا را نشان می‌دهند



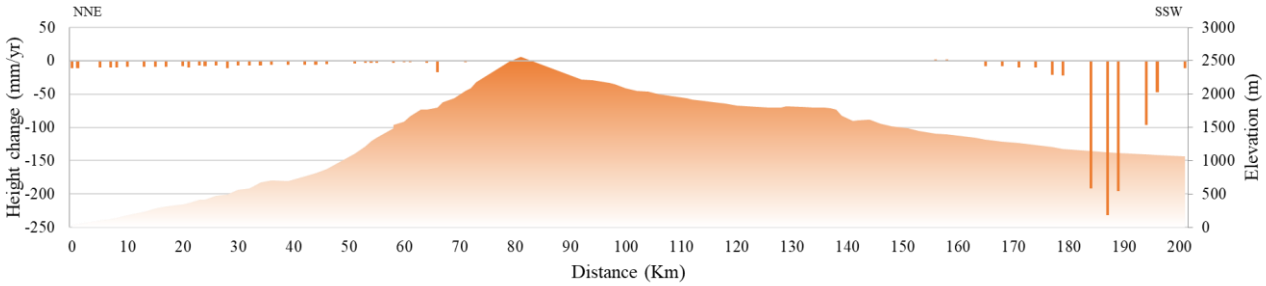
شکل ۵- سری‌های زمانی مربوط تغییرات ارتفاعی ایستگاه‌های IPGN موجود در پهنه ساختاری شمال تهران و نواحی پیرامون آن. تمامی داده‌ها بیانگر بالاآمدگی پوسته‌ای ناشی از وجود یک رژیم زمین‌ساختی با مؤلفه فشارشی در منطقه هستند. کم‌ترین نرخ تغییرات ارتفاعی در ایستگاه تهران (TEHN) و بیش‌ترین آن در ایستگاه طالقان (TLGN) مشاهده می‌شود.

Fig. 5. Time series related to height changes of existing IPGN stations in the North Tehran structural zone and its surrounding areas. All the data indicate a crustal uplift caused by the existence of a tectonic regime with a compressive component in the region. The lowest and highest rate of height changes is observed at TEHN and TLGN stations, respectively.



شکل ۶- (a) تصویر ماهواره‌ای Mr.SID البرز مرکزی همراه با نمایش جاده‌های چالوس، هراز و فیروزکوه (خطوط قرمز رنگ) که دارای ایستگاه‌های ترازیابی دقیق در طول خود هستند. در این بین، جاده چالوس از قسمت‌های میانی منطقه پهنه ساختاری شمال تهران عبور می کند. کادر سفید رنگ موقعیت شکل (b) را نشان می‌دهد، (b) پیاده سازی ایستگاه‌های ترازیابی دقیق بر روی مدل ارتفاعی رقومی که بر پایه تصاویر SRTM تهیه شده است. پیکان‌های قرمز و آبی بدون رعایت مقیاس، به ترتیب بالاآمدگی و فرونشست را در محل ایستگاه‌های ترازیابی نشان می‌دهند. کادر بنفش رنگ بیانگر موقعیت شکل (c) می‌باشد، و (c) نمایش نرخ بالاآمدگی محاسبه شده در ایستگاه‌های ترازیابی دقیق در حد فاصل گسل‌های شمال تهران و کندوان. کوته‌نوشت‌ها مشابه با شکل ۱.

Fig. 6. (a) location of the Chalus, Haraz and Firuzkuh lines (red lines) which have precise leveling stations along themselves superimposed on the Mr. SID satellite imagery of central Alborz. Chalus line passes through the middle parts of the North Tehran structural zone. The white frame shows the location of Fig. (b), (b) Superimposing precise leveling stations on the SRTM-based digital elevation model. The red and blue arrows, without respecting the scale, show the uplift and subsidence, respectively, at the location of the precise leveling stations. The purple frame represents the location of Fig. (c), and (c) Illustration of uplift rate calculated at precise leveling stations between North Tehran and Kandovan faults. Abbreviations same as Fig. 1.



شکل ۷- نیمرخ توپوگرافی البرز مرکزی در طول جاده چالوس و ادامه آن تا حوالی دشت شهریار در جنوب غرب تهران همراه با نرخ جابجایی قائم محاسبه شده در هر ایستگاه ترازیابی. نرخ بالاآمدگی میلی‌متری دامنه جنوبی البرز در مقایسه با نرخ فرونشست سرسام‌آور دشت‌های جنوب غرب تهران که تا ۲۳ سانتی متر در سال هم می‌رسد در سمت راست نمودار به خوبی مشخص است.

Fig. 7. Topographic cross section of the central Alborz along the Chalus line and its continuation to Shahriar Plain in the southwest of Tehran along with the illustration of calculated vertical displacement rate at each leveling station. According to the terrible subsidence rate of the southwest plains of Tehran city, which reaches up to 23 cm/yr, the millimeter scale uplift rate of the southern flank of central Alborz is difficult to display in this image.

فرآیند پردازش داده‌ها با استفاده از رابطه زیر صورت می‌پذیرد:

$$\Delta H_{ij} + v_{ij} = H_j - H_i$$

رابطه ۱

که در آن Hi و Hj ارتفاعات نقاط i و j ، ΔHij اختلاف ارتفاع متوسط مشاهده شده بین دو نقطه و در نهایت vij مقادیر باقیمانده می‌باشند. این مدل برای کلیه مشاهدات به‌صورت رابطه برداری زیر در می‌آید:

$$\Delta H + v = A \cdot H$$

رابطه ۲

در اینجا بردار ΔH شامل مشاهدات اختلاف ارتفاع قطعه‌ها، بردار H شامل ارتفاعات مجهول ایستگاه‌ها، بردار v شامل باقیمانده‌ها و A ماتریس ضرائب می‌باشند.

نقطه یا نقاطی که به جذرومدسنج‌ها (Tide gauges) بسته شده و یا نقاطی که دقت آن‌ها معلوم است، با استفاده از مدل زیر به صورت ثابت وزن‌دار وارد سرشکنی می‌شود:

$$H_0 + v_H = H$$

رابطه ۳

که در آن، بردار H0 شامل ارتفاع ایستگاه‌های معلوم و vHبردار مقادیر باقیمانده می‌باشد. سرشکنی شبکه به منظور محاسبه ارتفاع ایستگاه‌ها به روش کم‌ترین مربعات و با استفاده از رابطه زیر انجام می‌شود:

رابطه ۴

$$\hat{H} = (A'PA + P_0)^{-1}(A'P\Delta H + P_0 H_0)$$

در این رابطه $P = C_{\Delta H}^{-1}$ ماتریس وزن مشاهدات و $P_0 = C_0^{-1}$ ماتریس وزن ایستگاه‌های ثابت است. ماتریس واریانس- کوواریانس مشاهدات CΔH با فرض استقلال مشاهدات و تناسب واریانس‌ها با طول مسیر ترازیابی (L) به‌صورت ماتریس قطری زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$C_l \approx \eta_1 diag(\sqrt{L_i})$$

رابطه۵

که در آن η_1 متوسط خطای استاندارد خطوط ترازیابی در واحد $\frac{mm}{\sqrt{km}}$ و Li طول متوسط مسیر ترازیابی بر حسب کیلومتر است. مقادیر باقیمانده‌ها نیز پس از سرشکنی از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$\hat{v} = A\hat{H} - \Delta H$$

رابطه ۶

مقادیر باقیمانده‌های مشاهدات سرشکن شده ($\hat{v}$) در تعیین فاکتور واریانس ثانویه به کار رفته و در نهایت با اعمال این فاکتور، ماتریس واریانس- کوواریانس که بیانگر دقت مجهولات است برآورد می‌گردد:

رابطه ۷

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{v}'P\hat{v} + \hat{v}'_{H_0} P_0 \hat{v}_{H_0}}{df}$$

$$\hat{C}_{\hat{H}} = \hat{\sigma}_0^2 (A'PA + P_0)^{-1}$$

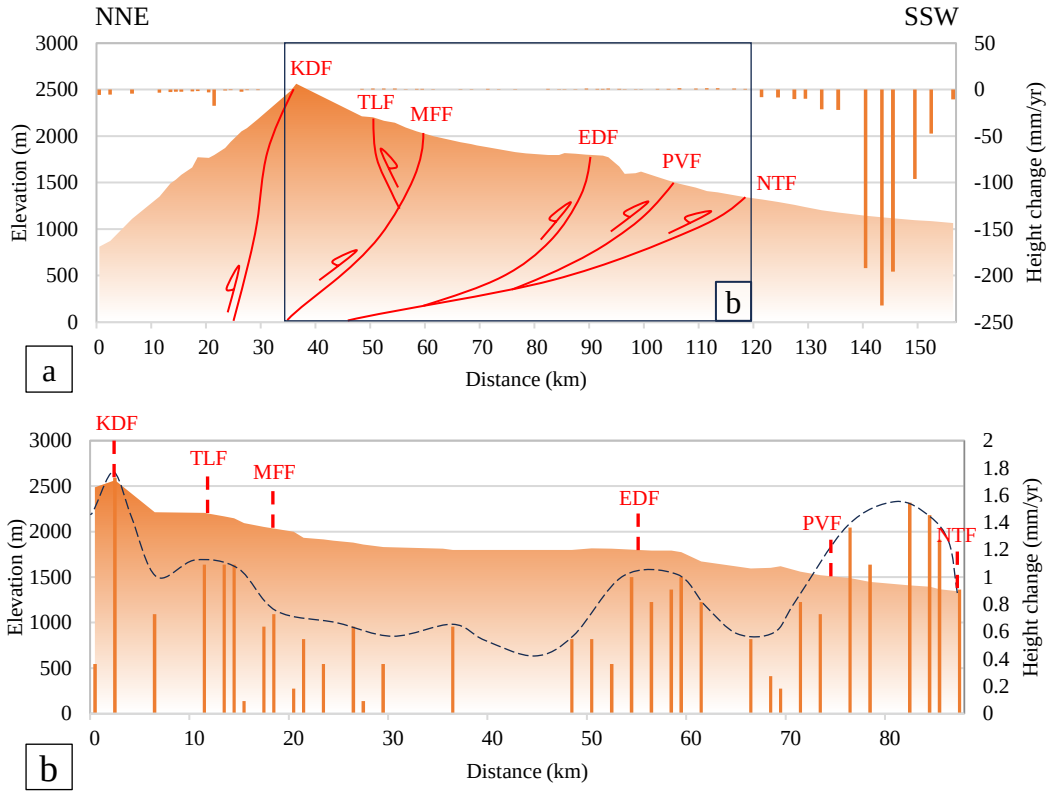
رابطه۸

در این رابطه df درجهٔ آزادی شبکه است. پس از سرشکنی دو مقطع زمانی مشاهدات، اختلاف ارتفاع در دو زمان، نشان-دهنده تغییر ارتفاعی اتفاق افتاده در هر ایستگاه می‌باشد.

پس از پردازش داده‌های ترازیابی، میزان بالاآمدگی و فرونشست زمین در حد فاصل گسل‌های کندوان در شمال تا دشت‌های جنوب غرب تهران محاسبه و پس از انطباق این داده-ها با داده‌های زمین‌شناسی و عناصر ساختاری اصلی، امکان تحلیل تغییرات نرخ بالاآمدگی میسر شده است. گسل‌های شمال تهران، پورکان- وردیج، امام زاده داود، مشا، طالقان و کندوان به ترتیب از جنوب به سمت شمال، مهم‌ترین ساختارهای کنترل‌کننده دگریختی منطقه محسوب می‌شوند. از تحلیل داده‌های ترازیابی دقیق به عنوان ابزاری جهت شناسایی و تفکیک جابجایی قائم کنونی در حریم این گسل‌ها استفاده شده است. همانگونه که در شکل a۸ مشاهده می‌شود، دامنه جنوبی البرز مرکزی در طول جاده چالوس در حد فاصل گسل‌های کندوان و شمال تهران جابجایی قائم از نوع بالاآمدگی را نشان می‌دهند. این در حالی است ایستگاه‌های ترازیابی واقع در دامنه شمالی البرز که در واقع در نواحی شمالی تر از اثر سطحی گسل کندوان واقع شده‌اند، همگی از فرونشست این قسمت از رشته کوه البرز حکایت دارند. این تفاوت در الگوی دگریختی قائم دامنه‌های شمالی و جنوبی البرز مرکزی پیش از این نیز مورد بحث دانشمندان علوم زمین بوده است (مانند Allen et al. 2003; Guest et al. 2006). چنانچه در شکل b۸ ملاحظه می‌شود بیشترین نرخ بالاآمدگی دامنه جنوبی البرز، پیرامون گسل‌های اصلی منطقه که از سازوکار غالب معکوس برخوردار هستند در حال رخ دادن است. جز در مورد فاصله بین گسل های شمال تهران و پورکان- وردیج که به هم نزدیک هستند، میزان بالاآمدگی در تمامی فواصل بین گسلی با افت چشم‌گیری مواجه می‌شود. این مسأله را به وضوح می‌توان در حد فاصل بین گسل‌های امام زاده داوود و مشا مشاهده نمود. در فاصله بین گسل‌های طالقان و کندوان نیز نرخ بالاآمدگی با کاهش چشم‌گیری مواجه می‌شود. این مسأله را می‌توان به ساختار فروجسته موجود در حد فاصل این دو گسل نسبت داد. شیب به سمت جنوب راندگی طالقان که در واقع پس‌راندگی گسل مشا محسوب می‌شود (Yassaghi and Madanipour, 2008)، همراه با شیب به سمت شمال راندگی کندوان (مانند Guest et al. 2006; Yassaghi and Madanipour, 2008; Ballato et al., 2013) شکل‌گیری ساختار یاد شده را سبب شده است. در مقابل، حد فاصل گسل‌های مشا و طالقان که از آن تحت عنوان کوه‌های طالقان یاد می‌شود یک ساختار فراجسته است که با افزایش نرخ بالاآمدگی در آن روبرو هستیم. در واقع کوه‌های طالقان را می‌توان یک تاقدیس بزرگ، باز و ایستاده با میل ملایمی به سمت غرب دانست که یال‌های آن توسط گسل‌های طالقان در شمال و مشا در جنوب بریده شده است (Guest et al. 2006). فرادیواره راندگی شمال تهران (حد فاصل رخنمون اثر سطحی این گسل تا راندگی پورکان- وردیج) در مقایسه با دیگر نواحی از پتانسیل به نسبت بیشتری به لحاظ دگریختی قائم برخوردار است و با نرخی تا حدود ۱/۵ میلی‌متر در سال در حال بالاآمدگی است. به طور کلی، این نرخ دگریختی قائم می‌تواند نشانی بر قفل شدگی گسل در عمق باشد. Amighpey و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از داده‌های ترازیابی دقیق عمق قفل‌شدگی راندگی شمال تهران را در قسمت‌های شرقی حدود ۱/۱ و در قسمت‌های غربی تا ۱/۳ کیلومتر محاسبه کرده‌اند. نرخ لغزش عمقی گسل در قسمت‌های غربی نیز حدود ۲/۵ برابر قسمت‌های شرقی برآورد شده است. نقشه نرخ تغییرات ارتفاعی تهیه شده با استفاده از داده‌های سامانه موقعیت یاب جهانی (شکلb۴) نیز از افزایش نرخ بالاآمدگی در طول راندگی شمال تهران از شرق به غرب حکایت دارد. داده های ترازیابی در موقعیت مکانی ایستگاه ARNG همچون داده های GPS نشان از بالاآمدگی منطقه دارد. تفاوت میزان بالاآمدگی در دو روش، می تواند ناشی از ماهیت متفاوت آن ها و یا دقت روش های اندازه گیری باشد.

به طور کلی می توان گفت، نرخ بالاآمدگی البرز مرکزی در طول جاده چالوس از راندگی شمال تهران به سمت شمال در حال کاهش است، به طوری که پیرامون گسل طالقان این نرخ به حدود ۱ میلی‌متر در سال می‌رسد (شکل b۸). این مسأله می‌تواند تأییدی بر کم رنگ تر شدن مؤلفه شیب‌لغز/ فشارشی گسل‌های موجود و غالب شدن مؤلفه راستالغز آن‌ها در راستای یاد شده باشد. به عبارتی در گسل‌های پرشیب‌تر، مؤلفه راستالغز و در گسل‌های کم‌شیبی همچون گسل شمال تهران، مؤلفه راندگی غالب می‌باشد (مداحی و همکاران، ۱۴۰۲). افرادی همچون Allen و همکاران (۲۰۰۳)، Ritz و همکاران (۲۰۰۶)، Guest و همکاران (۲۰۰۶)، Solaymani Azad و همکاران (۲۰۱۱) و Landgraf و همکاران (۲۰۱۳) گسل مشا را یک

گسل ترافشارشی با مؤلفه غالب چپ‌بر در نظر گرفته‌اند. Vernant و همکاران (۲۰۰۴) نیز یک بُرش چپ‌بر با آهنگ ۴±۲ میلی‌متر در سال را در سراسر کمربند البرز گزارش کرده و بخش عمده آن را به گسل مشا نسبت داده‌اند. حتی برخی افراد همچون Ritz و همکاران (۲۰۰۶) و Ashtari و همکاران (۲۰۰۵) قسمت‌های شرقی این گسل را یک گسل تراکششی با مؤلفه غالب چپ‌بر می دانند.



شکل ۸- (a) نیمرخ توپوگرافی دامنه جنوبی البرز مرکزی همراه با نمایش گسل‌های اصلی و نرخ جابجایی قائم محاسبه شده در هر ایستگاه ترازیابی. قسمت‌هایی از دامنه شمالی البرز و ادامه مسیر چالوس- کرج به سمت جنوب نیز در این نمودار مشاهده می‌شود. نرخ بالاآمدگی میلی‌متری دامنه جنوبی البرز در مقایسه با نرخ فرونشست وحشتناک دشت‌های واقع در جنوب راندگی شمال تهران در این تصویر به چشم نمی‌آید. عمق واقعی گسل‌ها بیشتر از آن چیزی است که در این شکل شماتیک نشان داده شده است، و (b) نمایی بسته از شکل (a). خط چین سیاه رنگ تغییرات کلی بالاآمدگی در حد فاصل گسل‌های کندوان تا شمال تهران را نشان می‌دهد. کوته‌نوشت‌ها مشابه با شکل ۱.

Fig. 8. (a) Topographic cross section of the southern flank of Central Alborz range along the Chalus line and illustrating main faults and the calculated vertical displacement rate at each leveling station. Parts of the northern flank of central Alborz and the continuation of Chalus line to the south is also depicted in this image. The millimeter scale uplift rate of southern Alborz range is not visible in this picture compared to the dreadful subsidence rate of the plains located in the south of the NTF. The true depth of the faults is much more than what is imagined in this Fig., and (b) Close-up view of the Fig. (a). The black dashed-line shows the general uplift changes between Kandovan and North Tehran faults. Abbreviations same as Fig. 1.

۶- نتیجه گیری

بردار سرعت جابجایی ایستگاه‌های IPGN و سری‌های زمانی تهیه شده برای هر ایستگاه، بیانگر بالاآمدگی مشخص در سراسر پهنه ساختاری شمال تهران می‌باشند. بیشترین نرخ این بالاآمدگی‌ها در ایستگاه طالقان (TLGN) با نرخی حدود ۴/۶۸ میلی‌متر در سال مشاهده می‌شود. این مسأله می‌تواند ناشی از عملکرد مجموعه چین‌های باز و راندگی‌های پرشیب موجود در این منطقه که از آن تحت عنوان پهنه نازک پوست یاد می‌شود باشد. عملکرد غالب فشارشی راندگی‌های شمال تهران، پورکان- وردیج و امام زاده داوود نیز جابجایی قائم در فرادیواره این عناصر

ساختاری و بالاآمدگی قابل توجهی با نرخ ۳/۵۱ میلی‌متر در سال را سبب شده است. نقشه نرخ تغییرات ارتفاعی حاصل از پردازش داده‌های سامانه موقعیت یاب جهانی، گویای این است که قسمت‌های غربی پهنه ساختاری شمال تهران از نرخ بالاآمدگی بیش‌تری نسبت به نواحی شرقی‌تر برخوردار هستند. در جنوب راندگی شمال تهران، نرخ بالاآمدگی به طرز چشم-گیری کاهش و حتی در قسمت‌های جنوب غربی تهران تا هشتگرد پدیده فرونشست مشاهده می‌شود. هر چند بخش عمده این پدیده از برداشت بی رویه از منابع آب‌های زیرزمینی ناشی می‌شود، اما نقش بارگذاری ناشی از عملکرد ورقه‌های راندگی شمال تهران به سمت جنوب که به نوبه خود موجب پایین افتادگی نواحی جنوبی و تشکیل پیش‌بوم جنوبی البرز (پیش‌بوم تهران) در جنوب ارتفاعات البرز شده است را نیز نمی-توان نادیده گرفت. پردازش و تحلیل داده‌های ترازیابی دقیق در طول جاده چالوس نیز حاکی از این است که دامنه جنوبی البرز مرکزی در حد فاصل گسل‌های کندوان و شمال تهران جابجایی قائم از نوع بالاآمدگی را نشان می‌دهند. بیش‌ترین نرخ بالاآمدگی، پیرامون گسل‌های اصلی منطقه که از سازوکار غالب راندگی برخوردار هستند و گاهی ساختارهای فراجسته را تشکیل داده‌اند مشاهده می‌شود. فرادیواره راندگی شمال تهران از پویاترین قسمت‌های منطقه به لحاظ تغییرات ارتفاعی است. تلفیق داده‌های سامانه موقعیت یاب جهانی و ترازیابی دقیق نرخ بالاآمدگی از این راندگی به سمت شمال روندی کاهشی را نشان می‌دهد. این مسأله می‌تواند تأییدی بر کم رنگ‌تر شدن مؤلفه شیب‌لغز/ فشارشی گسل‌های موجود و چیرگی مؤلفه راستالغز آن‌ها در جهت یاد شده باشد. به عبارتی در گسل‌های پرشیب-تری همچون مشا، مؤلفه راستالغز و در گسل‌های کم شیب‌تری چون راندگی شمال تهران، مؤلفه فشارشی غالب می‌باشد. این همان چیزی است که در پهنه‌های ترافشارشی که حاصل جهت-گیری مایل عناصر ساختاری نسبت به رژیم‌های زمین‌ساختی هستند انتظار می رود. هر چند نرخ حرکات قائم به دست آمده با استفاده از داده‌های سیستم موقعیت یاب جهانی و ترازیابی دقیق با هم یکسان نیستند، اما انطباق مشهودی که در روند کلی نتایج حاصل از هر دو روش مشاهده می‌شود گویای این مطلب است که پهنه ساختاری شمال تهران در حال یک دگریختی پیش‌رونده ناشی از رژیم زمین‌ساختی ترافشارشی حاکم بر آن است. یکسان نبودن نرخ جابجایی‌های حاصل از دو روش مورد استفاده در این پژوهش را علاوه بر ماهیت متفاوت آن‌ها، می‌توان با بازه زمانی متفاوت ثبت و برداشت داده‌ها در ارتباط دانست. به طوری که تحلیل سری‌های زمانی مربوط به ایستگاه‌های مختلف IPGN نیز بیانگر این است که نرخ بالاآمدگی در گذر زمان یکسان و یکنواخت نبوده و حتی در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ هم در نوسان بوده است. بنابراین، می‌توان گفت رژیم‌های زمین‌ساختی، تنش‌های وارده بر منطقه و دگریختی حاصل از آن‌ها در گذر زمان در حال تغییر بوده و حتی برخی افراد پدیده زمین‌ساخت وارون را در این پهنه ساختاری- رسوبی گزارش کرده‌اند.

۷- قدردانی

پژوهش حاضر بخشی از رساله دکتری نویسنده اول است. در اینجا نویسندگان بر خود لازم می‌دانند بابت زحمات سردبیر محترم و همکارانشان در مجله، همچنین از داوران و ویراستاران گرامی که با حسن دقت و نظر به مطالعه و ارزیابی نسخه پیش-نویس مقاله پرداخته و کاستی‌ها و ایرادات علمی و فنی موجود را متذکر شدند صمیمانه سپاسگزاری نمایند.

مراجع

Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B., Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. Geological Magazine 148, 692–725. https://doi.org/10.1017/S001675681100046X.

Aghanabati, A., 2006. Geology of Iran, Geological Survey of Iran, P. 582.

Alavi, M., 1996. Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountains system in northern Iran. Journal of Geodynamics 21(1), 1–33. https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00009-7.

Allen, MB., Ghassemi, MR., Shahrabi, M., Qorashi, M., 2003. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. Journal of Structural Geology 25, 659–679. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00064-0.

Allen, MB., Jones, S., Ismail-Zadeh, A., Simmons, MD., Anderson, L., 2002. Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene– Quaternary subsidence in the South Caspian Basin. Geology 30, 9, 775–778. https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)0302.0.CO;2.

Ambraseys, NN., Melville, CP., 1982. A History of Persian Earthquakes. Cambridge, UK, Cambridge University Press.

Amighpey, M., Voosoghi, B., Arabi, S., 2016. Modeling interseismic deformation field of North Tehran Fault extracted from precise leveling observation. Tectonophysics 679, 169–179. http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2016.04.051.

Ashtari, M., Hatzfeld, D., Kamalian, N., 2005. Microseismicity in the region of Tehran. Tectonophysics 395, 193–208. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.09.011.

Bachmanov, DM., Trifonov, VG., Hessami, K., Kozhurin, AI., Ivanova, TP., Rogozhin, EA., Hademi, MC., Jamali, FH., 2004. Active faults in the Zagros and central Iran. Tectonophysics 380, 221–241, https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.021.

Ballato, P., Uba, CE., Landgraf, A., Strecker, MR., Sudo, M., Stocklin, DF., Friedrich, A., Tabatabaei, SH., 2011. Arabia-Eurasia continental collision: insights from late Tertiary foreland-basin evolution in the Alborz mountains, northern Iran. Geological Society of America Bulletin 123, 106–131. https://doi.org/10.1130/B30091.1.

Ballato, P., Nowaczyk, NR., Landgraf, A., Strecker, MR., Friedrich, A., Tabatabaei, SH., 2008. Tectonic control on sedimentary facies pattern and sediment accumulation rates in the Miocene foreland basin of the southern Alborz Mountains, northern Iran. Tectonics 27, TC6001, https://doi.org/10.1029/2008TC002278.

Ballato, P., Stockli, DF., Ghassemi, MR., Landgraf, A., Strecker, MR., Hassanzadeh, J., Friedrich, A., Tabatabaei, SH., 2013. Accommodation of transpressional strain in the Arabia-Eurasia collision zone: New constraints from (U-Th)/He thermochronology in the Alborz Mountains, north Iran. Tectonics 32, 1–18. https://doi.org/10.1029/2012TC003159.

Berberian, M., Yeats, RS., 1999. Patterns of historical rupture in the Iranian Plateau. Bulletin of the Seismological Society of America, 89, 120–139. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63292-0.00016-8.

Berberian, M., Yeats, RS., 2001. Contribution of archaeological data to studies of earthquake history in the Iranian Plateau. Paul Hancock Memorial Issue: Journal of Structural Geology 23, 563–584, https://doi.org/10.1016/ S0191-8141(00)00115-2.

Berberian, M., Yeats, RS., 2016, Tehran: An earthquake time bomb. Tectonic Evolution, Collision, and Seismicity of Southwest Asia: In Honor of Manuel Berberian's Forty-Five Years of Research Contributions. Geological Society of America Special Paper 525. https://doi.10.1130/2016.2525(04).

Berberian, M., King, GCP., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Can. Journal of Asian Earth Sciences 18 (2), 210–265. https://doi.org/10.1139/e81-019.

Berberian, M., Qorashi, M., Arzhangravesh, B., Mohajer-Ashjai, A., 1985. Recent Tectonics, Seismotectonics and Earthquake-Fault Hazard Study in the Greater Tehran Region. Geological Survey of Iran, Report no. 56, 130 [in Persian].

Brunet, M.F., Korotaev, MV., Ershov, AV., Nikishin, AM., 2003. The South Caspian Basin: a review of its evolution from subsidence modelling. Sedimentological Geology 156 (1–4), 119–148. https://doi.org/10.1016/S0037-0738(02)00285-3.

Chousianitis, K., Sboras, S., Mouslopoulou, V., Chouliaras, G., Hristopulos, DT., 2024. The upper crustal deformation field of Greece inferred from GPS data and its correlation with earthquake occurrence. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 129, e2023JB028004. https://doi.org/10.1029/ 2023JB028004.

Civiero, C., Celli, N.L., Tesauro, M., 2023. Revisiting the geodynamics of the Middle East region from an integrated geophysical perspective. Journal of Geodynamics 158, 102005. https://doi.org/10.1016/j.jog.2023.102005.

Djamour, Y., Vernant, P., Bayer, R., Nankali, HR., Ritz, JF., Hinderer, J., Hatam, Y., Luck, B., LeMoigne, N., Sedighi, M., Khorrami, F., 2010. GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz Mountain range, Iran. Geophysical Journal International 183, 1278-1301. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04811.x.

Ehteshami-Moinabadi, M., Yassaghi, A. 2007. Geometry and kinematics of the Mosha Fault, south central Alborz Range, Iran: An example of basement-involved thrusting. Journal of Asian Earth Sciences 29: 928–938. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.07.002.

Giménez, J., Borque, MJ., Gil, AJ., Alfaro, P., Estévez, A., Surinach, ˜ E., 2009. Comparison of long-term and short-term uplift rates along an active blind reverse fault zone (Bajo Segura, SE Spain). Studia Geophysica and Geodaetica 53, 81–98. https://doi.org/10.1007/s11200-009-0005-y.

Guest, B., Stocklin, DF., Grove, M., Axen, GJ., Lam, PS., Hassanzadeh, J., 2006. Thermal histories from the central Alborz Mountains, northern Iran: implications for the spatial and temporal distribution of deformation in northern Iran. Bulletin of geological Society of America 118, 1507–1521. https://doi.org/10.1130/B25819.1.

Haghshenas haghighi, M., Motagh, M., 2021. Land subsidence hazard in Iran revealed by country-scale analysis of sentinel-1 InSAR. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B3-2021, XXIV ISPRS Congress. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-155-2021.

Hassanzadeh, J., Wernicke, BP., 2016. The Neo-Tethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. Tectonics 35, 586–621. https://doi.org/10.1002/2015TC003926.

Hatzfeld, D., Molnar, P., 2010. Comparisons of the kinematics and deep structures of the Zagros and Himalaya and of the Iranian and Tibetan plateaus and geodynamic implications. Rev. Geophysics 48. https://doi.org/10.1029/2009RG000304.

Hollingsworth, J., 2007. Active Tectonics of NE Iran. PhD thesis, University of Cambridge 220.

Honarmand, M., Boon, A., Neubauer, F., Heberer, B., Li, Q., Kuiper, KF., Mason, PRD., Krijgsman, W., 2024. Geochemical constraints on the geodynamic setting of Alborz-Azerbaijan Cenozoic magmatism. Chemical Geology 645,121889. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121889.

Horton, BK., Hassanzadeh, J., Stockli, DF., Axen, GJ., Gillis, RJ., Guest, B., Amini, A., Fakhari, MD., Zamanzadeh, S.M., 2008. Detrital zircon provenance of Neoproterozoic to Cenozoic deposits in Iran: Implications for chronostratigraphy and collisional tectonics. Tectonophysics 451, 97–122. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.063.

Jackson, J., Priestly, K., Allen, MB. Berberian, M., 2002. Active tectonics of the South Caspian Basin, Geophysical Journal International 190, 1311–1324. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01588.x.

Jesus Galindo-Zaldívar, Maria Jesus Borquec, Antonio Pedrera, Carlos Marín-Lechado, Antonio José Gil, Angel Carlos López-Garrido, 2013. Deformation behaviour of the low-rate active Balanegra Fault Zone from high-precision levelling (Betic Cordillera, SE Spain). Journal of Geodynamics 71, 43–51. https://doi.org/10.1016/j.jog.2013.07.003.

Jianliang Nie, Jie Tian, Xinwei Guo, Bin Wang, Xiaoyun Liu, Yaxuan Cheng, 2023. Pengtao Jiao, Vertical deformation analysis based on combined adjustment for GNSS and leveling data. Geodesy and Geodynamics 14, 5, 477-484, https://doi.org/10.1016/j.geog.2023.03.003.

Khorrami, F., Vernant, P., Masson, F., Nilfouroushan, F., Mousavi, Z., Nankali, H., Saadat, SA., Walpersdorf, A., Hosseini, S., Tavakoli, P., Aghamohammadi, A., Alijanzade, M., 2019. An up-to-date crustal deformation map of Iran using integrated campaign-mode and permanent GPS velocities. Geophysical Journal International 217 (2), 832–843. https://doi.org/10.1093/gji/ggz045.

Landgraf, A., Ballato, P., Strecker, MR., Friedrich, A., Tabatabaei, SH. Shahpasandzadeh, M., 2009. Fault-kinematic and geomorphic observations along the North Tehran Thrust and Mosha-Fasham Fault, Alborz mountains, Iran: implications for fault-system evolution and interaction in a changing tectonic regime. Geophysical Journal International 177, 676–690. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04089.x.

Landgraf, A., Zielke, O., Arrowsmith, JR., Ballato, P., Strecker, MR., Schildgen, TF., Friedrich, AM., Tabatabaei, SH., 2013. Differentiating simple and composite tectonic landscapes using numerical fault slip modeling with an example from the south-central Alborz Mountains, Iran. Journal of. Geophysical Research of Earth Surface 118, 1792–1805.

Maddahi, H., Rahimi, A., Amighpey, M., 2022. Present-day deformation analysis of north Tehran structural zone by using precise leveling data, 2nd national biennial conference on geology of the Alborz Orogen and Caspian Sea, Golestan University, Gorgan, Iran, (in Persian).

Maddahi, H., Rahimi, A., Amighpey, M., 2022. Present-day deformation analysis of north Tehran structural zone by using precise leveling data, 2nd national biennial conference on geology of the Alborz Orogen and Caspian Sea, Golestan University, Gorgan, Iran, (in Persian).

Maddahi, H., Rahimi, A., Amighpey, M., 2024. Structural model of Mosha-North Tehran fault system, Southern flank of central Alborz, Tectonics Journal 24, 39-55 (in Persian). https://doi.org/10.22077/jt.2024.6800.1164.

Mahmoudpour, M., Khamehchiyan, M., Nikudel, MR., Ghassemi, MR., 2013. Characterization of regional land subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran, Geopersia 3 (2), 49-62. https://doi.org/10.22059/JGEOPE.2013.36014.

Marín-Lechado, C., Galindo-Zaldívar, J., Gil, AJ., Borque, MJ., de Lacy, C., Pedrera, A., López-Garrido, AC., Alfaro, P., García-Tortosa, F., Ramos, I., Rodríguez-Caderot, G., Rodríguez-Fernández, J., Ruiz-Constán, A., Sanz de Galdeano-Equiza, C., 2010. Levelling profiles and a GPS network to monitor the active folding and faulting deformation in the Campo de Dalias (Betic Cordillera, Southeastern Spain). Sensors 10, 3504–3518. https://doi.org/10.3390/s100403504.

McKenzie, D., 2020. The structure of the lithosphere and upper mantle beneath the Eastern Mediterranean and Middle East. Mediterr. Geoscience Revision 2, 311–326. https://doi.org/10.1007/s42990-020-00038-1.

McQuarrie, N., Van Hinsbergen, D., 2013. Retrodeforming the Arabia-Eurasia collision zone: age of collision versus magnitude of continental subduction. Geology 41 (3), 315–318. https://doi.org/10.1130/G33591.1.

Min Wang, Zheng-Kang Shen, 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 125, e2019JB018774. https://doi.org/ 10.1029/2019JB018774.

Mohammadi Nia, A., Rashidi, A., Khatib, MM., Mousavi, SM., Nemati, M., Shafieibafti, S., Derakhshani, R., 2023. Seismic risk in alborz: insights from geological moment rate estimation and fault activity analysis Applied Sciences 13 (10), 6236. https://doi.org/10.3390/app13106236.

Nilforoushan, F., Masson, F., Vernant, P., Vigny, C., Martinod, J., Abbassi, M., Nankali, H., Hatzfeld, D., Bayer, R., Tavakoli, F., Ashtiani, A., Doerflinger, E., Daignieres, M., Collard, P., Chery, J., 2003. GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran. Journal of Geodesy 77, 411–422. https://doi.org/10.1007/s00190-003 -0326-5.

Pan, Y., Hammond, WC., Ding, H., Mallick, R., Jiang, W., Xu, X., 2021. GPS imaging of vertical bedrock displacements: Quantification of two-dimensional vertical crustal deformation in China. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 126, e2020JB020951. https://doi. org/10.1029/2020JB020951.

Pluijm and Marshak, 2004, Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics. Second Edition, ISBN 0-393-92467-X, p 656.

Raeesi, M., Zarifi, Z., Nilfouroushan, F., Boroujeni, S. Tiampo, K., 2017. Quantitative analysis of seismicity in Iran. Pure applied Geophysics 174, 793–833. https://doi.org/10.1007/s00024-016-1435-4.

Rashidi, A., Derakhshani, R., 2022. Strain and moment rates from GPS and seismological data in Northern Iran: implications for an evaluation of stress trajectories and probabilistic fault rupture hazard. Remote Sensing (Basel) 14 (9), 2219. https://doi.org/10.3390/rs14092219.

Rashidi, A., Nemati, M., Shafieibafti, Sh., Pourbeyranvand, Sh., Derakhshani, R., Braitenberg, C., 2023. Structure and kinematics of active faulting in the northern domain of Western and Central Alborz, Iran and interpretation in terms of tectonic evolution of the region. Journal of Asian Earth Sciences 255, 105760. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105760.

Ritz, JF., Nazari, H., Balescu, S., Lamothe, M., Salamati, R., Chassemi, A., Shafei, A., Ghorashi, M., Saidi, A., 2012, Paleoearthquakes of the past 30,000 years along the North Tehran fault (Iran). Journal of Geophysical Research 117, no. B6, B06305. https://doi.org/10.1029/2012JB009147.

Ritz, J.F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafeii, A., Solaymani, S., Vernant, P., 2006. Active transtension inside Central Alborz: a new insight into the Northern Iran–Southern Caspian geodynamics. Geology 34, 477–480. https://doi.org/10.1130/G22319.1.

Sengor, A.M., 1979. Mid-Mesozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications. Nature 279, 590–593. https://doi.org/10.1038/279590a0.

Solaymani Azad, S., Ritz, JF., Abbasi, MR., 2011. Left-lateral active deformation along the Mosha–North Tehran fault system (Iran); morphotectonics and paleoseismological investigations. Tectonophysics 497, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.09.013.

Stöcklin, J., 1974. Northern Iran: Alborz Mountains, In: Spencer, A., (Ed.), Mesozoic–Cenozoic orogenic belts: data for orogenic studies. Geological Society Special Publication 4, 213-234. ISBN: 0707300479, 9780707300474

Talebian, M., Copley, AC., Fattahi, M., Ghorashi, M., Jackson, JA., Nazari, H., Sloan, RA., Walker, RT., 2016. Active faulting within a megacity: the geometry and slip rate of the Pardisan thrust in central Tehran, Iran. Geophysical Journal International 207 (3), 1688–1699. https://doi.org/10.1093/gji/ggw347.

Talebian, M., Jackson, J., 2004. A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros Mountains of Iran. Geophysical Journal International 156, 506–526. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02092.x.

Tatar, M., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Yamini Fard, F., 2012. Microseismicity and seismotectonics around the Mosha fault (central Alborz, Iran). Tectonophysics 544–545, 50–59. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.03.033.

Tatar, M., Jackson, J., Hatzfeld, D., Bergman, E., 2007. The 28 May 2004 Baladeh earthquake (Mw 6.2) in the Alborz, Iran, implications for the geology of the South Caspian Basin margin and for the seismic hazard of Tehran. Geophysical Journal International 170, 249–261. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03386.x.

Tchalenko, JS., Berberian, M., Iranmanesh, H., Baily, M., Arsovsky, M., 1974, Tectonic framework of the Tehran Region, in Materials for the Study of Seismotectonics of Iran; North-Central Iran: Tehran. Geological Survey of Iran, Report no. 29, 7–46.

Teknik, V., Ghods A., 2017, Depth of magnetic basement in Iran based on fractal spectral analysis of aeromagnetic data, Geophysical Journal International 209, 1878–1891. https://doi: 10.1093/gji/ggx132

Trifonov, VG., Hessami, K., Popov, SV., Zelenin, EA., Trikhunkov, Ya. I., Frolov, PD., Golovina, LA., Simakova, A. N., Rashidi, A., Latyshev, A. V., 2022. Development of the Southern coastal area of the Caspian Sea during the pliocene–quaternary according to biostratigraphic and magnetostratigraphic data. Stratigraphy and Geological Correlation 30(4), 273–291. https://doi.org/10.1134/S0869593822040074.

Verdel, C., Wernicke, BP., Hassanzadeh, J., Guest, B., 2011. A Paleogene extensional arc flare -up in Iran. Tectonics 30. https://doi.org/10.1029/2010TC002809. TC3008.

Vernant, P., Nilforoushan, F., Chery, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, JF., Sedighi, M., Tavakoli, F., 2004. Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data. Earth Planet. Sci. Lett 223, 177–185. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.04.017.

Yanqiang Wu, Zhijiang Zheng, Jianliang Nie, Liu Chang, Guangli Su, Haiquan Yin, Hongbao Liang, Yajin Pang, Changyun Chen, Zaisen Jiang, Wanju Bo, 2022. High-Precision Vertical Movement and Three-Dimensional Deformation Pattern of the Tibetan Plateau. JGR Solid Earth 127, 4, https://doi.org/10.1029/2021JB023202.

Yassaghi, A., 2001. Inversion tectonics in the Central Alborz Range. European Union of Geosciences (EUG XI) 335. Abstract. Symposium LS05.

Yassaghi, A., Madanipour, S., 2008. Influence of a transverse basement fault on along-strike variations in the geometry of an inverted normal fault: Case study of the Mosha fault, central Alborz range, Iran. Journal of Structural Geology 30, 1507–1519. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.08.006.

Yassaghi, A., Naeimi, A., 2011. Structural analysis of the Gachsar subzone in central Alborz range; constrain for inversion tectonics followed by the range transverse faulting. International Journal of Earth Sciences 100 (6), 1237–1249. https://doi.org/10.1007/s00531-010-0537-y.

Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi., MR., Sabouri, J. 2006. Inversion tectonics in central Alborz, Iran. Journal of Structural Geology 28: 2023– 2037. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.06.020.

Zanchi, A., Zanchetta, S., Berra, F., Mattei, M., Garzanti, E., Molyneux, S., Nawab, A., Sabouri, J., 2009. The Eo-Cimmerian (Late? Triassic) orogeny in North Iran. In: Brunet, M.F., Wilmsen, M., Granath, J. (Eds.), South Caspian to Central Iran Basins. Geological Society London, Special Publication 312, 31–55. https://doi.org/10.1144/SP312.3.