

Research Article

Assessing seismic hazards of blind thrusts by surface deformation: Kheyrabad anticline, Eastern Iran

Mohammad Amir Alimi^{1*}

Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Mining Engineering, Civil and Chemistry, -1 Birjand University of Technology

Keywords: *Blind thrust, Seismic hazard, Area balancing, Kheyrabad anticline, Iran*

1-Introduction

The sequence of moderate to large earthquakes in California without surface rupture revealed the importance of identifying seismic sources related to hidden faults in seismic hazard analysis. Naturally, blind thrust systems are created in the margins between active orogenic belts and young sedimentary basins (less than 5 million years) (Lin and Stein, 1989). They appear by the growth of folds on the surface. Without exaggeration, the most dangerous faults in the world are reverse faults and active folds associated with blind thrusts, which are often located near urban areas and unfortunately neglected (Stein and Yeats, 1989; McCalpin and Carver, 1996). The study of historical and instrumental earthquakes from 839-2008 AD in Iran shows that many destructive earthquakes resulted from the activity of blind thrusts (Berberian, 2014). In the east of Iran, following the earthquakes of recent decades, the study of the blind thrusts of Sefidabeh (Berberian et al., 2000; Parson et al., 2006; Copley and Reynolds, 2014), the Tabas active fold (Berberian, 1979; King et al. al., 1981; Walker et al., 2003-2015; Copley, 2014), the blind thrust of Ferdows (Walker et al., 2004) and the Birjand anticline (Walker and Khatib, 2006). Previous studies investigated the coseismic deformations after the earthquake using the focal mechanism of the earthquake, satellite images, and field observations. To assess seismic hazards of blind thrusts and to know the location of the fault, the capability to generate the largest earthquake of its nature and its recurrence are important (McCalpin and Carver, 1996). This study uses geomorphological indicators to assess seismic hazards of the Kheyrabad anticline in the north of Birjand city.

2-Material and methods

Kheyrabad fold is located north of Birjand city and on the southern Shekarab mountain range. Field measurements from a structural cross-section through the Kheyrabad anticline indicate fault-propagation folding above a 38° northeastward-dipping blind thrust fault, which probably reaches into a horizontal detachment at a depth of ~500 meters. In this study, to know the features of Kheyrabad blind thrust in-depth, the area balance method has been used. Assuming that the lateral transport of material on the horizontal decollement at depth reaches equilibrium by a material rise at the surface, it is possible to approximate slip rate and crustal shortening measurements using area balancing. This method is used in determining the long-term slip rate in the blind thrusts system of California (Shaw and Suppe, 1996; Rivero et al., 2000) as well as determining the rate of horizontal shortening in the north of Neyshaboor (Hollingsworth et al., 2010) and Tabas blind thrusts (Walker et al., 2015) has been used. In this research, 42 topographic sections have been drawn perpendicular to the axial trace of the Kheyrabad anticline.

3-Results and discussions

Based on mapped profiles, the average depth of the detachment is 533 meters, and the shortening of 1.1% has been calculated. By choosing the Pleistocene period (12,000-1,650,000 years), the average slip rate on

* Corresponding author: malimi@birjandut.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2023.43491.2367

Received: 2023-04-25

Accepted: 2023-07-03

the Kheyraabad fault system is estimated to be 0.006-0.75 mm per year. The empirical relations of Wells and Coppersmith (1994) were used to determine the magnitude of characteristic earthquakes and the average displacement to assess the characteristics of the blind fault of Kheyraabad. Also, the relation of Aki (1966) was used to determine the seismic moment. The area of the rupture surface, if the total length of the fault ruptures during an earthquake, is:

$$(Equation 1) \quad R_a = R_w \times S_l, \quad R_w = H / \sin \sigma$$

R_w : Downtip rupture width, R_a : Rupture area, S_l : Segment length, H : Depth to detachment, σ : Dip

$$(Equation 2) \quad M_w = 4.33 + 0.9 \log(R_a)$$

$$(Equation 3) \quad \log(AD) = 0.08 M_w - 0.74$$

$$(Equation 4) \quad M_0 = \mu \times R_a \times AD \quad (\mu = 3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2)$$

M_w : Moment magnitude, R_a : Rupture area (Km^2), AD : Average displacement (m), M_0 : Seismic moment, μ : crustal rigidity

In the above relationships, the dip of the fault plane is assumed 38 degrees, the length of the rupture is 3 km, and the depth of the seismic layer is 0.533 km using field survey data. Therefore, the seismic characteristics of Kheyraabad blind thrust will be according to Table 1.

Table 1. Seismic characteristics of Kheyraabad blind thrust.

Seismic moment (N.m)	Average displacement (m)	Moment magnitude (M_w)
3.37×10^{10}	0.43	4.7

Also, earthquake recurrence has been estimated using the fault coseismic's long-term slip rate and displacement.

$$(Equation 5) \quad RI = \frac{AD}{LTS}$$

RI : recurrence (in years), AD : average displacement (m), and LTS is the long-term slip rate (m/yr)

If we assume the long-term slip rate of Kheyraabad blind thrust to be 0.75 mm per year, the recurrence of an earthquake with a magnitude of 4.7 is estimated to be 577 years. In this study, to investigate the amount of strain related to the Kheyraabad fault system, the amount of crustal shortening was calculated using the balance of marl layers (along eight faults). In the north of the Birjand trench, reverse faults and thrusts in a distance of 612 meters have caused bending and displacement of sedimentary units. As a result of the activity of these faults, an overlap is created between the shifted layers, which can be used to calculate the amount of shortening.

Table 2. Determining the deformation parameters in the Kheyraabad thrust system.

Fault	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	Sum
Dip	20	35	35	26	55	35	35	50	
Offset (cm)	300	300	65	80	330	55	125	70	1325
Overlap (cm)	282	246	53.2	72	189.3	45	102.4	45	1035
Uplift (cm)	102.6	172.2	37.2	35.1	270.3	31.5	71.7	53.6	774.4

It is possible to estimate the uplift, horizontal shortening, and slip rate of the Kheyraabad fault system in the Pleistocene period (1650000-12000 years) and compare it with the values obtained from the area balance, using the information in Table 2.

4-Conclusion

In assessing the seismic risk of blind thrusts, finding the exact location of the fault and slip rate and determining the characteristic or maximum earthquake (M_{max}) and its recurrence is essential. Since paleoseismological studies are difficult and expensive, the area balance method is suitable for determining the seismic parameters of blind thrusts, which can be used in the first step of seismic risk studies of such faults and lead to relatively accurate and quick estimates. In this method, the fault slip, horizontal shortening, and uplift rates have been estimated as 0.75, 0.59, and 0.46 mm/year, respectively, which shows that the fault activity rate is average. According to the amount of slip (0.75 mm/yr), the activity rate of the fault is medium, and based on the displacement (0.43 m), the risk of the Kheyraabad fault zone is considered moderate. Therefore, only low and medium-importance buildings in the fault zone will be allowed to reduce the seismic hazard, provided that effective engineering methods are used and the fault boundary is respected.

5-References

- Aki, K., 1966. Generation and propagation of G-waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment released energy and stress-strain drop from the G-wave spectrum. *Bulletin of Earthquake Research Institute, Tokyo University* 44, 73–88. <https://doi.org/10.15083/0000033586>
- Berberian, M., 1979. Earthquake faulting and bedding thrust associated with the Tabas-e-Golshan (Iran) earthquake of September 16, 1978. *Bulletin of the Seismological Society of America* 69, 1861–1887. <https://doi.org/10.1785/BSSA0690061861>
- Berberian, M., 2014. Earthquakes and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau. Elsevier, p. 699. <https://www.elsevier.com/books/earthquakes-and-coseismic-surface-faulting-on-the-iranian-plateau/berberian/978-0-444-63292-0>
- Berberian, M., Jackson, J.A., Qorashi, M., Talebian, M., Khatib, M.M. and Priestley, K., 2000. The 1994 Sefidabeh earthquakes in eastern Iran: Blind thrusting and bedding-plane slip on a growing anticline, and active tectonics of the Sistan suture zone. *Geophysical Journal International* 142, 283–299. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00158.x>
- Copley, A. and Reynolds, K., 2014. Imaging topographic growth by long-lived postseismic afterslip at Sefidabeh, east Iran. *Tectonics* 33, TC003462. <https://doi.org/10.1002/2013TC003462>
- Copley, A., 2014. Postseismic afterslip 30 years after the 1978 Tabas-e-Golshan (Iran) earthquake. observations and implications for the geological evolution of thrust belts. *Geophysical Journal International*. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu023>
- Hollingsworth, J., Fattahi, M., Walker, R.T, Talebian, M., Bahroudi, A., Bolourchi, M., Jackson, J.A. and Copley, A., 2010. Oroclinal bending, distributed thrust and strike-slip faulting, and the accommodation of Arabia-Eurasia convergence in NE Iran since the Oligocene. *Geophysical Journal International* 181, 1214–1246. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04591.x>
- King, G., Soufleris, C. and Berberian, M., 1981. The source parameters, surface deformation and tectonic setting of three recent earthquakes. Thessaloniki (Greece); Tabas-e-Golshan (Iran); and Carlisle (U.K.). *Disasters* 5, 36–46. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.1981.tb01127.x>
- Lin, J., Stein, R.S., 1989. Coseismic folding, earthquake recurrence and the 1987 source mechanism at Whittier Narrows, Los Angeles Basin, California. *Geophysical Journal International* 94, 9614–9632. <https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09614>
- McCalpin, J.P., Carver, G.A., 1996. Paleoseismology of Compressional Tectonic Environments. *International Geophysics* 62, 183–270, [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(96\)80072-6](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(96)80072-6).
- Parsons, B., Wright, T., Rowe, P., Andrews, J., Jackson, J., Walker, R., Khatib, M., Talebian, M., Bergman, E. and Engdahl, E.R., 2006. The 1994 Sefidabeh (eastern Iran) earthquakes revisited: new evidence from satellite radar interferometry and carbonate dating about the growth of an active fold above a blind thrust fault. *Geophysical Journal International* 164, 202–217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02655.x>
- Rivero, C., Shaw, J.H., Mueller, K., 2000. Oceanside and Thirty-mile Bank blind thrusts: Implications for earthquake hazards in coastal southern California. *Geology* 28, 891–894. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28%3C891:OATBBT%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28%3C891:OATBBT%3E2.0.CO;2)

- Shaw, J.H., Suppe, J., 1996. Earthquake hazards of active blind-thrust faults under the central Los Angeles Basin, California. *Journal of Geophysical research* 101, 8623–8642. <https://doi.org/10.1029/95JB03453>
- Stein, R.S., Yeats, R.S., 1989. Hidden earthquakes. *Scientific American* 260, 48–57. <https://www.jstor.org/stable/24987283>
- Walker, R. and Khatib, M.M., 2006. Active faulting in the Birjand region of NE Iran, *Tectonics* 25, TC4016, <https://doi.org/10.1029/2005TC001871>.
- Walker, R., Jackson, J., Baker, C., 2003. Surface expression of thrust faulting in eastern Iran: source parameters and surface deformation of the 1978 Tabas and 1968 Ferdows earthquake sequences. *Geophysical Journal International* 152, 749–765. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01886.x>
- Walker, R., Jackson, J., Baker, C., 2004. Active faulting and seismicity of the Dasht-e Bayaz region, eastern Iran. *Geophysical Journal International* 157, 265–285. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.02179.x>
- Walker, R.T., Khatib, M.M., Bahroudi, A., Schnabel, C., Rode's, A., Fattahi, M., Talebian, M. and Bergman, E., 2015. Coseismic, Geomorphic, and Geologic fold growth associated with the 1978 Tabas earthquake fault in eastern Iran. *Geomorphology* 237, 98-118. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.02.016>
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994. Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84, 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Alimi, M., 2024. Title Assessing seismic hazards of blind thrusts by surface deformation: Kheyrad anticline, eastern Iran. *Adv. Appl. Geol.* 13(4), 1032-1047.

DOI: 10.22055/AAG.2023.43491.2367

https://aag.scu.ac.ir/article_18654.html

©2023 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

ارزیابی خطرات لرزه‌ای راندگی‌های پنهان با استفاده از دگرریختی سطحی: تاکدیس خیرآباد، خاور ایران

محمدامیر علیمی

استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند

malimi@birjandut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱

چکیده

در این پژوهش، خطر لرزه‌ای مرتبط با گسل راندگی پنهان خیرآباد در شمال بیرجند، خاور ایران، بررسی شده است. اندازه‌گیری‌های میدانی از برش ساختاری تاکدیس خیرآباد، نشان‌دهنده وجود چین گسترش گسلی در بالای گسل راندگی پنهان با شیب ۳۸ درجه به سمت شمال خاوری است که احتمالاً در عمق ۵۰۰ متری به یک سطح جدایشی افقی می‌رسد. در این تحقیق، به منظور ارزیابی خطر لرزه‌ای گسل پنهان خیرآباد، فراسنج‌هایی نظیر نرخ لغزش متوسط، زمین‌لرزه بیشینه (M_{max}) و دوره بازگشت آن بررسی شده است. در گسل‌های پنهان تخمین نرخ لغزش و کوتاه‌شدگی پوسته امری دشوار بنظر می‌رسد، اما می‌توان با فرض معادل‌سازی مواد انتقال یافته بر روی سطح جدایشی افقی در عمق با مواد خارج شده در سطح و استفاده از روش موازنه مساحت، نرخ لغزش و کوتاه‌شدگی را برآورد کرد. با این روش، نرخ لغزش گسل، کوتاه‌شدگی افقی و برخاستگی به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۴۶ و ۰/۵۹ میلی‌متر در سال تخمین زده شده است. با استفاده از معادله رگرسیونی بین بزرگی زمین‌لرزه و مساحت گسیختگی، بزرگی زمین‌لرزه بیشینه ۴/۷ برآورد شده است. همچنین با استفاده از روابط تجربی بین بزرگی، جابه‌جایی هم‌لرز و نرخ لغزش، دوره بازگشت این زمین‌لرزه ۵۷۷ سال پیش‌بینی می‌شود. با توجه به نرخ لغزش به‌دست آمده (۰/۷۵ میلی‌متر در سال)، درجه فعالیت گسل پنهان خیرآباد متوسط در نظر گرفته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: راندگی پنهان، خطر لرزه‌ای، موازنه مساحت، تاکدیس خیرآباد، ایران.

۱- مقدمه

در دهه هشتاد میلادی، توالی زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی متوسط تا بزرگ در کالیفرنیا که بدون گسیختگی سطحی بودند اهمیت شناسایی سرچشمه‌های لرزه‌ای مرتبط با گسلش پنهان، در تحلیل خطر لرزه‌ای را آشکار کرد. بطور طبیعی سامانه‌های راندگی پنهان در حاشیه کمربندهای کوهزایی فعال و حوضه‌های رسوبی جوان (سن کمتر از ۵ میلیون سال) ایجاد می‌شوند (Lin and Stein, 1989) و با رشد چین‌خوردگی‌ها در سطح تظاهر می‌یابند. بدون اغراق بیشتر گسل‌های خطرناک در دنیا نیز گسل‌های معکوس و چین‌های فعال مرتبط با راندگی‌های پنهان هستند که اغلب در مجاورت نواحی شهری واقع شده‌اند و کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند (Stein and Yeats, 1989; McCalpin and Carver, 1996).

مطالعه زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگامی در بازه زمانی ۲۰۰۸-۸۳۹ میلادی در ایران نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های مخرب فراوانی نتیجه فعالیت راندگی‌های پنهان بوده‌اند

(Berberian, 2014). در خاور ایران نیز در پی زمین‌لرزه‌های دهه‌های اخیر، مطالعاتی در خصوص راندگی‌های پنهان سفیدابه (Berberian et al., 2000; Parson et al., 2006; Copley and Reynolds, 2014)، چین فعال طبس (Berberian, 1979; King et al., 1981; Walker et al., 2004) و تاکدیس بیرجند (Walker et al., 2004) انجام شده است. در مطالعات پیشین، پس از وقوع رخداد لرزه‌ای، با استفاده از سازوکار کانونی زمین‌لرزه، تصاویر ماهواره‌ای و برداشت‌های میدانی به بررسی دگرریختی‌های ایجاد شده هم‌زمان با زمین‌لرزه، پرداخته شده است. در این تحقیق سعی شده است علاوه بر شناسایی گسل‌های پنهان پیرامون شهر بیرجند، با محاسبه فراسنج‌های لرزه‌ای، امکان پیش‌بینی وقوع زمین‌لرزه‌های مخرب فراهم گردد تا از بروز خطرات ناشی از آن پیشگیری شود.

خورده و رانده کرتاسه بالایی (افیولیت ملانژ) و پالئوژن (آندزیت) می باشد که در دامنه جنوبی با رسوبات کنگلومرای، مارنی نئوژن و آبرفت های کواترنری هم مرز است. سامانه گسلی شکراب، به طول تقریبی ۳۸ کیلومتر، در مرز بین کوهستان و دشت بیرجند، با سازوکار غالب مایل لغز (راستالغز چپگرد با مؤلفه معکوس) فعالیت کرده است (شکل a۲). وجود پادگانه های آبرفتی و کج شدگی گراول های رودخانه ای در بخش شمالی رودخانه شور نشانه پویایی پیشانی جنوبی رشته کوه های شکراب می باشد (Walker and Khatib, 2006).

توزیع خردلرزه ها در فاصله زمانی ۲۰۲۳-۲۰۰۶ که توسط شبکه لرزه نگاری محلی ثبت شده (مرجع زمین لرزه ها از فهرست اطلاعاتی ISC)، بیانگر توزیع رومرکز خردلرزه ها پیرامون گسل های لرزه زای شناخته شده منطقه می باشد (شکل b۱). همانطوری که ملاحظه می شود تعدادی از رومرکز خردلرزه ها در شمال تاقدیس بیرجند و گسل شکراب پراکنده شده اند.

۳- چین هم لرز (رانندگی پنهان) خیرآباد

چین خوردگی خیرآباد در شمال شهر بیرجند و در حاشیه جنوبی رشته کوه شکراب واقع است (شکل a۲). روند محور چین شمال باختری - جنوب خاوری است. مطالعات صحرایی، شواهدی از گسلش و خمش واحدهای رسوبی را در کانال حفر شده واقع در شمال شهر بیرجند، نشان می دهد. کانال در راستای عمود بر محور چین و به عمق ۱۰-۵ متر چین خیرآباد را بریده است. در ترانسه مذکور، رسوبات گراولی (کواترن پسین) و مارنی (نئوژن) کج شده و توسط گسل های معکوس بریده شده اند (شکل b۲). این گسل ها به دو صورت عمل کرده اند: الف- گسل های معکوسی که با راستای غالب N290-330، شیب بین ۵۵-۲۸ درجه به سمت شمال خاوری دارند و با کاهش شیب در عمق به سطح جدایشی زیرین می پیوندند. این گسل ها باعث خمش واحدهای رسوبی شده اند که با کمک لایه کلیدی مارن در زمینه رسوبات گراولی قابل بررسی هستند (شکل b۲). در این مطالعه با توجه به برداشت های صفحات گسلی در ترانسه، میانگین شیب صفحه گسل خیرآباد ۳۸ درجه محاسبه شد که در محاسبات استفاده شده است؛ ب- گسل های معکوسی که شیبی بین ۵۰-۲۵ درجه به سمت جنوب باختری دارند و باعث برش واحدهای رسوبی (با جابجایی بیشینه ۸۰ سانتیمتر) شده اند. این گسل ها به عنوان گسل های رانندگی

در تحلیل خطر لرزه ای رانندگی های پنهان، شناخت مکان گسل، قابلیت ایجاد بزرگترین زمین لرزه سرشتی (بیشینه) و دوره بازگشت آن اهمیت دارد (McCalpin and Carver, 1996). به منظور دستیابی به این اطلاعات، فراسنج هایی نظیر مساحت شکست زیر سطحی، نرخ لغزش و گشتاور لرزه ای، با استفاده از مطالعه چین خوردگی های هم لرز، محاسبه شده است. هدف این مطالعه، ارزیابی خطر لرزه ای تاقدیس خیرآباد واقع در شمال شهر بیرجند با بهره گیری از شاخص های ریخت زمین ساختی است. اهمیت مطالعه در تصحیح نقشه های خطر لرزه ای منطقه، ملاحظات در ایمن سازی زیرساخت های زمینی و زیرزمینی شهری نظیر ساختمان ها، راه ها، خطوط انتقال آب، گاز و ... در شهر بیرجند می باشد.

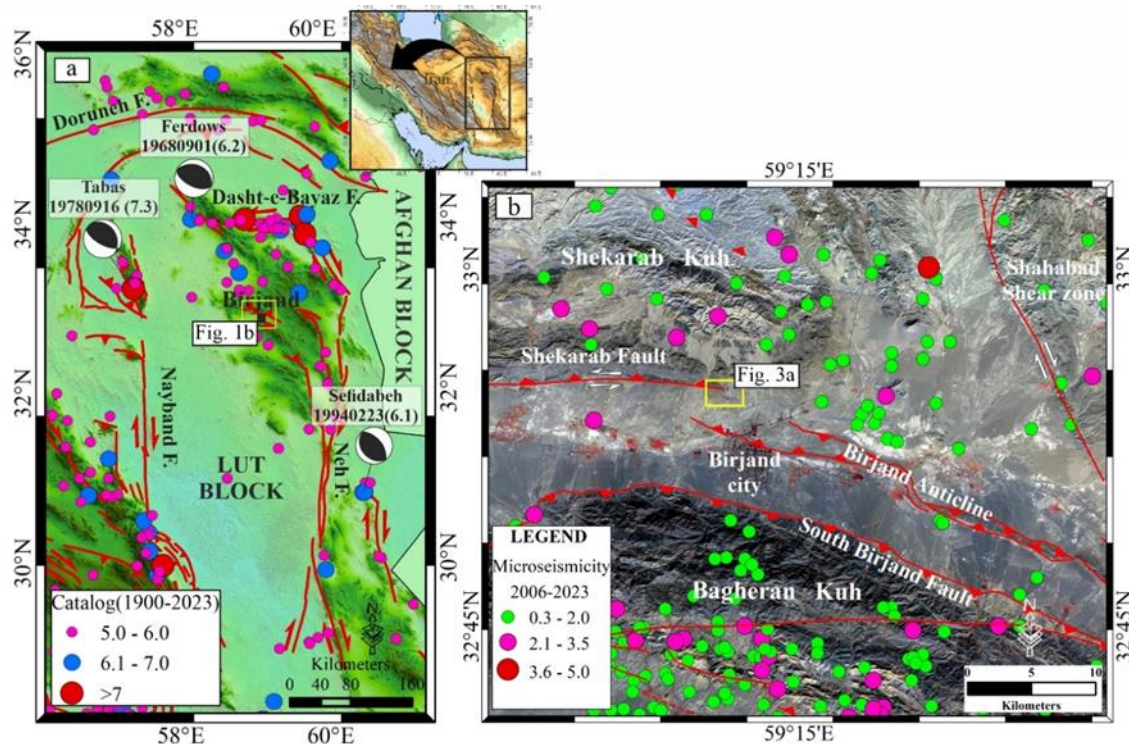
۲- لرزه خیزی و زمین شناسی منطقه

لرزه خیزی در فلات ایران، حاصل دگرشکلی فعال بر روی گسل های رانندگی و راستالغز است که در نتیجه ترافشارش مایل برخوردی ایجاد شده اند. در فلات ایران بیشتر زمین لرزه های با بزرگی متوسط تا بزرگ در ارتباط با گسل های معکوس بوده و در مواردی بدون گسیختگی سطحی می باشند (Berberian, 2014). در خاور ایران، زمین لرزه هایی نظیر فردوس (۱۹۶۸)، طبس گلشن (۱۹۷۸)، سفیدابه (۱۹۹۴) از جمله رویدادهای لرزه ای مخربی بوده اند که در نتیجه فعالیت گسل های پنهان ایجاد شده اند (شکل a۱ و جدول ۱). این زمین لرزه ها گسیختگی های همزمان با لرزه را در سطح ایجاد کرده اند که در پاسخ به رشد تاقدیس در فرادیواره رانندگی پنهان شکل گرفته است (Berberian, 2014).

شهر بیرجند بین دو رشته کوه باقران در جنوب و شکراب در شمال محصور شده است. از نموده های رانندگی پنهان در بین این دو رشته کوه، تاقدیس بیرجند است که با روند شمال باختر - جنوب خاور، به طول تقریبی ۳۷ کیلومتر و عرض حدود ۲-۴ کیلومتر در واحدهای سخت شده کنگلومرای، مارن، توف، مارن توفی نئوژن و گراول های آبرفتی کواترنری در دشت بیرجند گسترده شده است (شکل b۱ و a۲). زمین لرزه ۲۶ بهمن ۹۲۷ ه. ش (۱۵۴۹/۰۲/۱۵ میلادی) بیرجند، با بزرگی تقریبی (Ms=6.7)، به فعالیت رانندگی پنهان بیرجند نسبت داده می شود (شکل a۲) که بنظر می رسد کانون آن در محل روستای بجد بوده است (Berberian, 2014). رشته کوه های شکراب با روند خاوری - باختری، شامل واحدهای سنگی چین

واقع در فرادیواره راندگی‌هایی که در عمق فعالیت دارند خم می‌شود.

پستی نامیده می‌شوند (شکل ۲b). چین خیرآباد در نتیجه عملکرد سامانه راندگی پنهان در الگوی چین گسترش گسلی ایجاد شده است (Alimi, 2017). در این الگو واحدهای سنگی



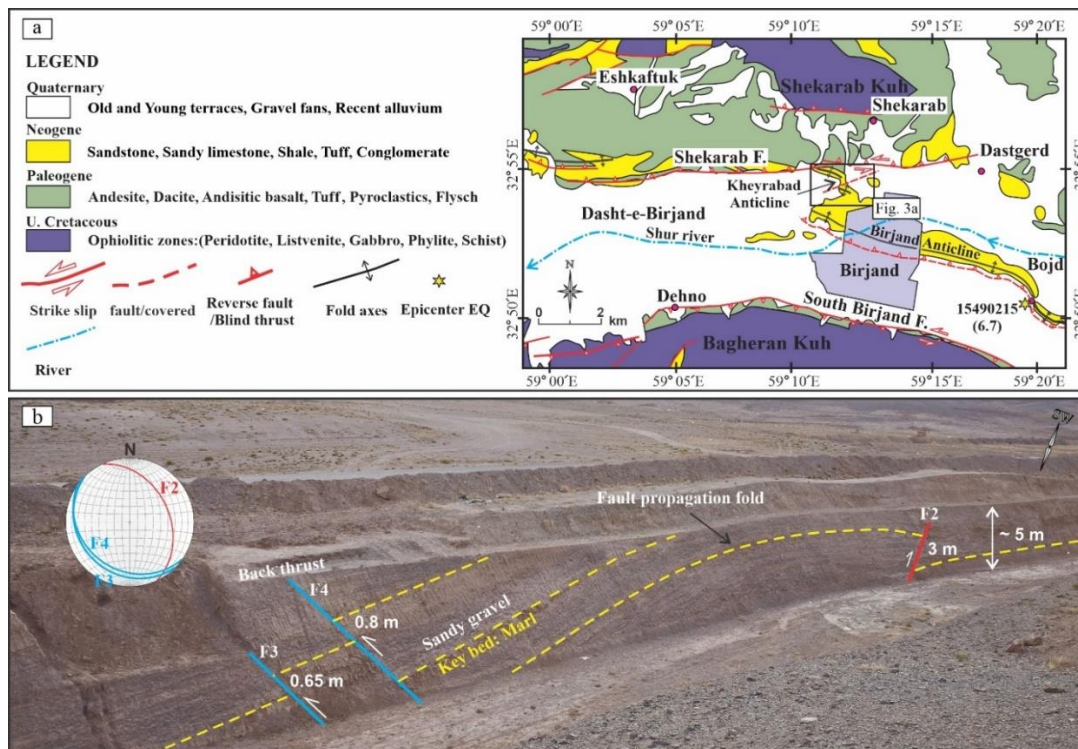
شکل ۱- (a) توزیع زمین‌لرزه‌های بالای (M_n) ۵ در دوره زمانی ۱۹۰۰-۲۰۲۳ میلادی، بیانگر فعالیت گسل‌های اصلی خاور و مرکز ایران است. مرجع کانون رومرکزی زمین‌لرزه‌ها از (Engdhal, et al., 1998- 2006; NEIC) و (b) توزیع خردلرزه‌ها در گستره مورد مطالعه حاکی از فعالیت منطقه است. مرجع کانون رومرکزی زمین‌لرزه‌ها از (ISC)

Fig. 1. (a) Distribution of earthquakes above (M_n) 5 in the period of 1900-2023, indicates the activity of the main faults in the east and center of Iran. The epicenter reference of earthquakes from (Engdhal, et al., 1998- 2006; NEIC) and (b) The distribution of earthquakes indicates the activity of the region in the studied area. The epicenter reference of earthquakes from ISC.

جدول ۱- زمین‌لرزه‌های ثبت شده تاریخی و دستگامی در گستره خاور ایران اشاره شده در متن (Engdahl et al., 1998; Berberian et al., 2000; Walker et al., 2004; Berberian, 2014).

Table 1. Historically and instrumentally recorded earthquakes from the east of Iran region mentioned in the text (Engdahl et al., 1998; Berberian et al., 2000; Walker et al., 2004; Berberian, 2014).

Fault	Rake	Dip	Strike	M_w	Depth	Lon.	Lat.	Date
Brijand Thrust				6.7		59.33	32.84	15490215
Ferdows	85	54	115	6.2	8	58.21	34.03	19680901
Tabas	155	16	355	7.2	9	57.38	33.25	19780916
Sefidabeh	96	29	143	6.1	9	60.55	30.90	19940223



شکل ۲- (a) نقشه ساختاری و زمین شناسی ساده شده منطقه، با اصلاحاتی از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند (Eftekhari Nezhad et al., 1986) و (b) خمیدگی واحدهای گراول و مارن در فرادریواره گسلش راندگی (F₂) در کانال انتقال آب در شمال بیرجند محرز است. چین در نتیجه رشد گسل F₂ شکل گرفته است و راندگی های پشتی (F₃ و F₄) یال چین را بریده اند.

Fig. 2. (a) Simplified structural and geological map of area, modified after the 1: 100,000 scale geological map Brigand and (b) The bending of the gravel and marl units is obvious in hanging wall above thrust fault (F₂) in the water transfer channel in the north of Birjand. Fold forming ahead of a propagating fault tip F₂ and back thrusts (F₃ and F₄) cuts through a fold limb.

۴- روش مطالعه

در این مطالعه، به منظور شناخت ویژگی های راندگی پنهان خیرآباد در عمق از روش موازنه مساحت استفاده شده است. اساس این روش بر این فرض استوار است که در واتنش دو بعدی، مساحت ورقه رانده در مقطع عرضی طی جریان دگرشکلی تغییر نمی کند یعنی مساحت جابه جا شده در عمق با مساحت اضافه شده بالای تراز منطقه ای برابر خواهد بود ($S_d = S_e = S$) (شکل ۳c). این فرض بیشتر در بخش های خارجی کمربند چین خورده - رانده صادق است. این روش در تعیین نرخ لغزش بلندمدت در سامانه راندگی های پنهان کالیفرنیا (Shaw and Suppe, 1996; Rivero et al., 2000) و نیز تعیین نرخ کوتاه شدگی افقی در شمال نیشابور (Hollingsworth et al., 2010) و راندگی های پنهان طبس (Walker et al., 2015) استفاده شده است.

در این پژوهش، عمود بر اثر محوری تاقدیس خیرآباد، ۴۲ مقطع توپوگرافی رسم شده است (شکل ۳a). در این مقاطع مساحت برخاسته بالای سطح مرجع (ارتفاع ۱۵۲۰ متر بالای سطح تراز دریا) محاسبه شد (S_e). این مساحت همان مساحت کسر شده (S_d) از عمق است که با جابه جایی در امتداد یک سطح جدایشی و انتقال مواد در راستای سامانه گسلی خیرآباد به سطح منتقل شده است.

$$S = S_e = S_d = D \times H \rightarrow D = S/H \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$H = W \times \tan \sigma \quad (\text{رابطه ۲})$$

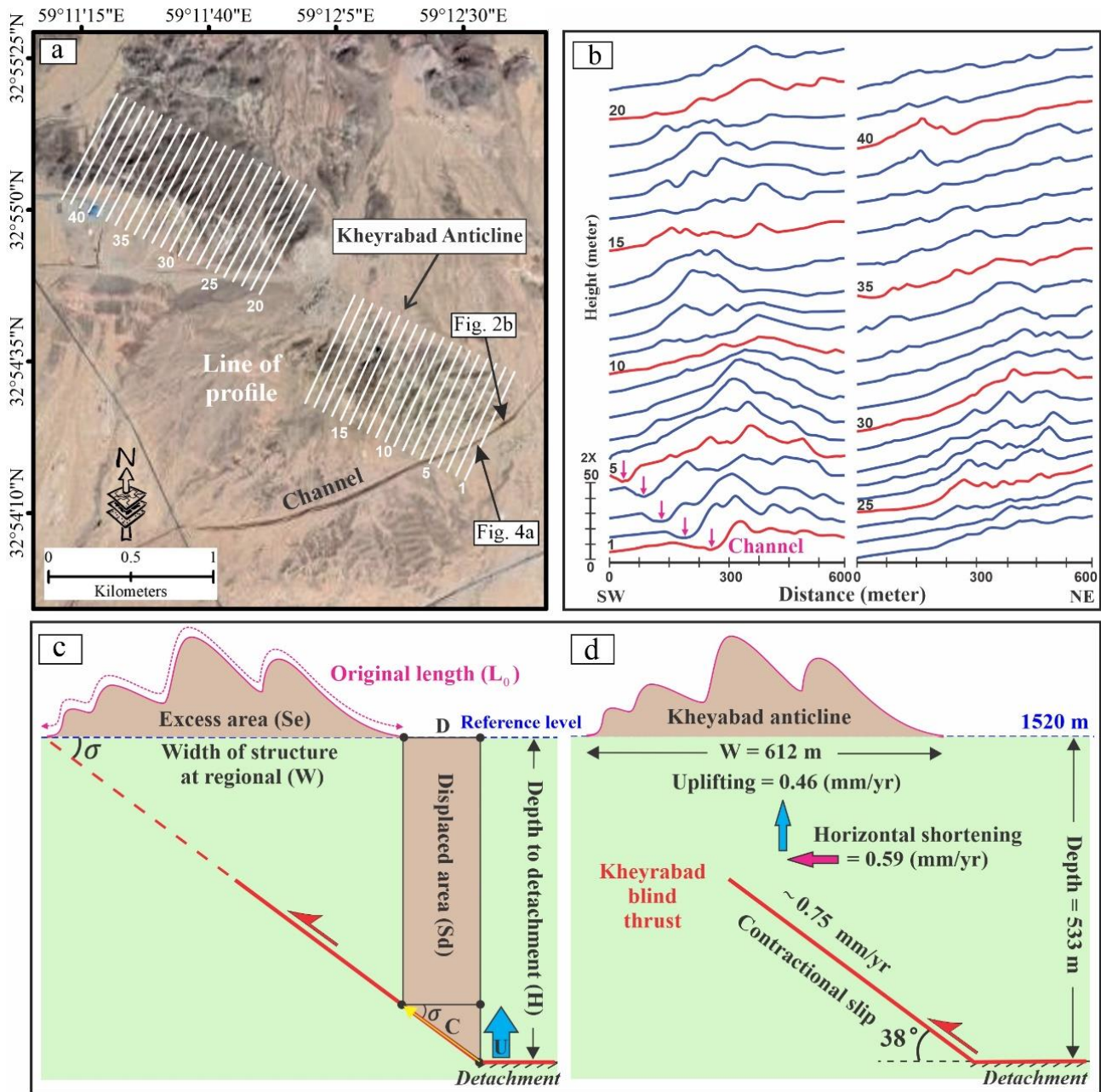
$$C = D / \cos \sigma \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$U = D \times \tan \sigma \quad (\text{رابطه ۴})$$

S_e : مساحت بالای سطح مرجع ۱۵۲۰ متر، D : کوتاه شدگی افقی، H : عمق سطح جدایشی، W : عرض مقطع در سطح مرجع، C : لغزش انقباضی، U : برخاستگی.

میزان لغزش متوسط بر روی سامانه گسلی خیرآباد ۰/۷۵-
۰/۰۰۶ میلیمتر در سال برآورد می‌شود (شکل ۳d). قابل ذکر
است علت انتخاب بازه زمانی طولانی فوق‌الذکر، عدم امکان
سن‌سنجی مطلق در این تحقیق می‌باشد.

نتایج محاسبات برای مقاطع ۱ الی ۴۲ در جدول ۲ آمده
است. براساس مقاطع رسم شده عمق متوسط سطح جدایشی
۵۳۳ متر و کوتاه‌شدگی ۱/۱ درصد محاسبه گردیده است. با
انتخاب دوره زمانی پلیستوسن (۱۶۵۰۰۰-۱۲۰۰۰ سال)،



شکل ۳- (a) تصویر ماهواره‌ای Google earth از تاقدیس خیرآباد، در راستای خطوط سفید رنگ مقاطع توپوگرافی ترسیم شده‌اند، (b) مقاطع توپوگرافی ۱-۴۲ که در روش موازنه مساحت استفاده شده است، (c) فراسنج‌های روش موازنه مساحت جهت ارزیابی خطر لرزه‌ای راندگی‌های پنهان (River et al., 2000; Groshong, 2006) و (d) مقطع عرضی ساده شده‌ای که اجزای اصلی موازنه مساحت در تخمین نرخ لغزش را نشان می‌دهد.

Fig. 3. (a) Google earth satellite image of Kheyraabad anticline, topographic cross-sections are plotted along the white lines, (b) 1-42 topographic cross-sections used in the area balancing method, (c) Parameters of the area-balancing method to assess the seismic risk of blind thrusts (River et al., 2000; Groshong, 2006) and (d) Simplified cross-section showing the main components of the area-balancing slip-rate estimation.

جدول ۲- تعیین فراسنج‌های لرزه‌ای راندگی پنهان خیرآباد در مقاطع رسم شده در شکل ۳b.

Table 2. Determining the seismic parameters of Kheyraabad blind thrust in the cross sections drawn in Figure 3b.

Profile	Original length (L ₀) m	With of structure (W) m	Excess area (S) m ²	Depth (H) m	Horizontal shortening (D) m	Shortening (%D)	Uplifting (U) m	Contractional slip (C) m
1	595.0	590	4236.3	461.0	9.2	-1.5	7.2	11.7
2	586.2	582	3907.3	454.7	8.6	-1.5	6.7	10.9
3	587.6	585	2755.9	457.1	6.0	-1.0	4.7	7.7
4	582.0	580	3774.7	453.1	8.3	-1.4	6.5	10.6
5	580.5	578	5009.8	451.6	11.1	-1.9	8.7	14.1
6	587.3	582	6877.0	454.7	15.1	-2.5	11.8	19.2
7	576.3	570	7440.5	445.3	16.7	-2.8	13.1	21.2
8	587.7	582	8164.0	454.7	18.0	-3.0	14.0	22.8
9	589.6	583	4737.3	455.5	10.4	-1.8	8.1	13.2
10	587.2	582	4837.3	454.7	10.6	-1.8	8.3	13.5
11	596.2	590	5048.4	461.0	11.0	-1.8	8.6	13.9
12	598.3	591	4126.2	461.7	8.9	-1.5	7.0	11.3
13	592.3	589	2861.7	460.2	6.2	-1.0	4.9	7.9
14	592.0	588	3082.8	459.4	6.7	-1.1	5.2	8.5
15	593.1	589	1396.1	460.2	3.0	-0.5	2.4	3.9
16	595.3	591	1324.9	461.7	2.9	-0.5	2.2	3.6
17	594.4	589	3713.4	460.2	8.1	-1.4	6.3	10.2
18	591.8	588	4162.3	459.4	9.1	-1.5	7.1	11.5
19	590.8	588	2139.2	459.4	4.7	-0.8	3.6	5.9
20	765.7	761	3260.3	594.6	5.5	-0.7	4.3	7.0
21	760.5	757	2500.0	591.4	4.2	-0.6	3.3	5.4
22	758.3	756	1587.5	590.7	2.7	-0.4	2.1	3.4
23	760.3	758	1347.0	592.2	2.3	-0.3	1.8	2.9
24	760.7	758	2007.3	592.2	3.4	-0.4	2.6	4.3
25	766.3	761	1718.4	594.6	2.9	-0.4	2.3	3.7
26	771.2	764	3110.7	596.9	5.2	-0.7	4.1	6.6
27	772.2	764	3958.0	596.9	6.6	-0.9	5.2	8.4
28	773.7	767	4469.4	599.2	7.5	-1.0	5.8	9.5
29	772.9	766	4661.3	598.5	7.8	-1.0	6.1	9.9

ادامه جدول ۲

30	767.9	762	5174.5	595.3	8.7	-1.1	6.8	11.0
31	768.2	764	5224.9	596.9	8.8	-1.1	6.8	11.1
32	765.0	760	2933.9	593.8	4.9	-0.6	3.9	6.3
33	770.2	765	3936.7	597.7	6.6	-0.9	5.1	8.4
34	769.2	764	3662.7	596.9	6.1	-0.8	4.8	7.8
35	768.2	763	2944.5	596.1	4.9	-0.6	3.9	6.3
36	763.2	759	2824.7	593.0	4.8	-0.6	3.7	6.0
37	762.2	759	3190.3	593.0	5.4	-0.7	4.2	6.8
38	761.9	759	3891.8	593.0	6.6	-0.9	5.1	8.3
39	772.0	766	6008.9	598.5	10.0	-1.3	7.8	12.7
40	769.9	764	2115.9	596.9	3.5	-0.5	2.8	4.5
41	762.2	760	1135.1	593.8	1.9	-0.3	1.5	2.4
42	766.6	763	1365.9	596.1	2.3	-0.3	1.8	2.9
Mean				532.7	7.1	-1.08	5.5	9.0
Rate (mm/y) in Pleistocene				0.004-0.59		0.003-0.46		0.005-0.75

$$M_w = 4.33 + 0.9 \log(R_a) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\log(AD) = 0.08 M_w - 0.74 \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$M_0 = \mu \times R_a \times AD \quad (\mu = 3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2) \quad (\text{رابطه ۸})$$

M_w : بزرگی گشتاوری، R_a : مساحت شکست (Km^2)، AD : جابه‌جایی متوسط (m)، M_0 : گشتاور لرزه‌ای و μ : صلبیت پوسته‌ای.

با استفاده از اطلاعات برداشت میدانی، میانگین شیب صفحه گسل خیرآباد ۳۸ درجه و طول گسیختگی ۳ کیلومتر به دست آمد. همچنین میانگین عمق لایه لرزه‌زا در روش موازنه مساحت ۰/۵۳۳ کیلومتر (جدول ۲) محاسبه شده است. با بکارگیری این مقادیر در روابط فوق، خصوصیات لرزه‌ای رانندگی پنهان خیرآباد مطابق جدول ۳ خواهد بود.

۵- بحث

۵-۱- ویژگی‌های سرچشمه لرزه‌ای رانندگی پنهان خیرآباد

به منظور برآورد ویژگی‌های گسل پنهان خیرآباد، از روابط تجربی Wells و Coppersmith (۱۹۹۴) در تعیین بزرگی زمین‌لرزه سرشتی و جابه‌جایی متوسط و نیز از رابطه Aki (۱۹۶۶) برای تعیین گشتاور لرزه‌ای استفاده شده است. مساحت سطح گسیختگی در صورتی که در زمان وقوع زمین‌لرزه تمامی طول گسل گسیخته شود عبارتست از:

$$R_a = R_w \times S_1, R_w = H / \sin \sigma \quad (\text{رابطه ۵})$$

R_w : عرض شکست در جهت فروشیب، R_a : مساحت شکست، S_1 : طول قطعه گسلی (طول پهنه چین خورده-بالا آمده).

جدول ۳- خصوصیات لرزه‌ای راندگی پنهان خیرآباد.

Table 3. Seismic characteristics of Kheyraabad blind thrust.

Seismic moment (N.m)	Average displacement (m)	Moment magnitude (M_w)
3.37×10^{10}	0.43	4.7

این گسل‌ها در زمین لرزه طیس گلشن (۱۹۷۸) دیده شده است (Berberian, 1979).

در این مطالعه، به منظور بررسی مقدار واتنش مرتبط با سامانه گسلی خیرآباد، مقدار کوتاه‌شدگی پوسته با استفاده از موازنه لایه‌های مارن (در راستای ۸ گسل) محاسبه شد. در کانال انتقال آب‌های سطحی در شمال بیرجند، گسل‌های معکوس و راندگی در فاصله‌ای به طول ۶۱۲ متر باعث خمش و جابه‌جایی واحدهای رسوبی شده است (اشکال b۲ و a۴). در اثر فعالیت این گسل‌ها، همپوشانی بین لایه‌های جابه‌جا شده ایجاد می‌شود (شکل b۴) که با استفاده از آن مقدار کوتاه‌شدگی مطابق روابط ۱۰ و ۱۱ قابل محاسبه است (Davis et al., 2012):

$$\text{Overlap} = \Delta l = O \times \cos \sigma \quad (\text{رابطه } ۱۰)$$

$$\% \text{ shortening} = (l_f/l_0) - 1 \times 100 \quad (\text{رابطه } ۱۱)$$

ΔL : همپوشانی بین لایه جابه‌جا شده توسط گسل، O : جدایش لایه در جهت شیب، L_f : طول نهایی (طول دگرریختی ناشی از چین خیرآباد=۶۱۲ متر)، L_0 : طول اولیه.

بدین ترتیب با در نظر گرفتن شیب گسلش و جدایش لایه‌های مارن، مجموع طول کوتاه شده ناشی از گسل‌های معکوس و راندگی برداشت شده در ترانشه (گسل‌های F_1-F_8)، ۱۰/۳۵ متر تعیین شد (جدول ۴). طول منطقه دگرریخت شده ناشی از فعالیت راندگی خیرآباد ۶۱۲ متر اندازه‌گیری شده است، بنابراین در معادله ۱۱ خواهیم داشت:

$$\% \text{ shortening} = \left(\frac{612}{612 + 10.35} - 1 \right) \times 100 = -1.66\%$$

مقدار کوتاه‌شدگی به دست آمده در این روش ۱/۶۶ درصد است که به مقدار تخمین زده شده در روش موازنه مساحت (۱/۱ درصد) نزدیک می‌باشد.

در این مطالعه، با استفاده از نرخ لغزش بلندمدت و جابه‌جایی هم‌لرزه گسل، دوره بازگشت زمین لرزه‌ها نیز برآورد شده است. در اینجا فرض بر این است که بیشترین لغزش بلندمدت گسل در زمین لرزه‌های بزرگ ایجاد می‌شود (Shaw and Suppe, 1996).

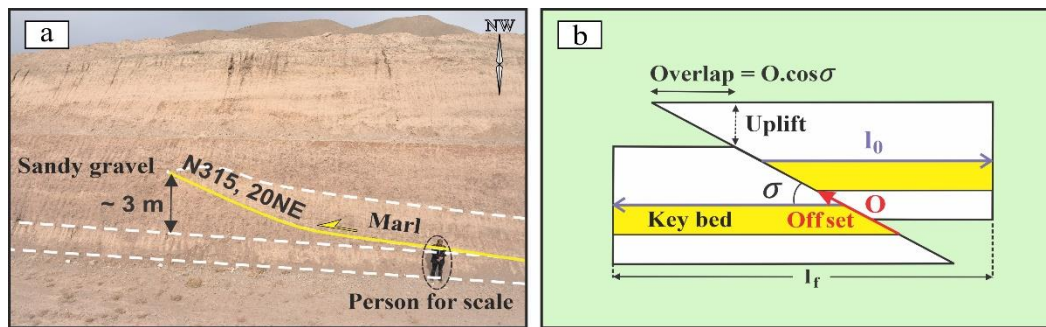
$$RI = \frac{AD}{LTS} \quad (\text{رابطه } ۹)$$

RI: دوره بازگشت زمین لرزه (در سال)، AD: جابه‌جایی متوسط (m) و LTS نرخ لغزش بلندمدت (بر حسب متر در سال).

حال اگر نرخ لغزش بلندمدت راندگی پنهان خیرآباد را ۰/۷۵ میلی‌متر در سال فرض کنیم دوره بازگشت زمین لرزه‌ای با بزرگی ۴/۷، ۵۷۷ سال تخمین زده می‌شود. در اینجا یادآوری می‌شود اگرچه تعیین دقیق دوره بازگشت زمین لرزه، با انجام سن‌سنجی امکان‌پذیر است اما روش فوق نیز با توجه به عدم دسترسی مستقیم به گسلش پنهان، در برآوردهای اولیه خطر لرزه‌ای کارگشاست.

۲-۵- برآورد مقدار کوتاه‌شدگی پوسته با استفاده از موازنه لایه‌های گسل خورده

در چین خیرآباد، جابه‌جایی لایه‌های مارن بر روی گسل‌های معکوس در نزدیکی سطح زمین قابل مشاهده است. مطالعه این گسل‌ها که به صورت ثانویه ایجاد شده‌اند، در ارزیابی خطرات لرزه‌ای منطقه اهمیت دارد. بررسی زمین لرزه‌های مرتبط با گسلش پنهان در سراسر جهان نشان می‌دهد که اگرچه گسیختگی راندگی پنهان زیرین مسبب ایجاد زمین لرزه‌های بزرگ بوده است اما فعالیت راندگی اصلی در عمق باعث لغزش بر روی گسل‌های معکوس سطحی می‌شود به طوری که این لغزش‌ها پس لرزه‌های بعدی را ایجاد می‌کند (Lin and Stein, 2004). نمونه‌هایی از شکستگی‌های سطحی ناشی از عملکرد



شکل ۴- (a) بالا آمدگی و جابه جایی واحد مارنی در راستای شاخه های راندگی پنهان خیرآباد (F1) و (b) مقدار کوتاه شدگی، به میزان همپوشانی و زاویه شیب (σ) گسل راندگی مرتبط است (Davis, 2012).

Fig. 4. (a) Uplift and displacement of the marl unit along the branches of Kheyraabad blind thrust (F₁ and (b) The amount of shortening is related to the overlap and dip angle (σ) of the thrust fault (Davis et al., 2012).

جدول ۴- تعیین فراسنج های دگرریختی در سامانه راندگی خیرآباد.

Table 4. Determining the deformation parameters in the Kheyraabad thrust system

Fault	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	Sum
Dip	20	35	35	26	55	35	35	50	
Offset (cm)	300	300	65	80	330	55	125	70	1325
Overlap (cm)	282	246	53.2	72	189.3	45	102.4	45	1035
Uplift (cm)	102.6	172.2	37.2	35.1	270.3	31.5	71.7	53.6	774.4

با مقادیر به دست آمده از موازنه مساحت مقایسه نمود (جدول ۵).

با استفاده از اطلاعات جدول ۴، می توان میزان نرخ لغزش، کوتاه شدگی افقی و برخاستگی سامانه گسل خیرآباد در دوره زمانی پلیستوسن (۱۶۵۰۰۰-۱۲۰۰۰ سال) را برآورد کرد و

جدول ۵- مقایسه فراسنج های حرکتی راندگی پنهان خیرآباد در روش موازنه مساحت و موازنه لایه های مارن.

Table 5. Comparison of movement parameters of Kheyraabad blind thrust in the method of area-balancing and balancing marl layers.

Method	Uplift(mm/y)	Shortening(mm/y)	Slip rate(mm/y)
Area balancing	0.003-0.46	0.004-0.59	0.006-0.75
Layer balancing	0.005-0.64	0.006-0.86	0.008-1.1
Area balancing (P ₁₋₅)	0.004-0.56	0.005-0.72	0.007-0.91

مقداری میانگین می باشد در حالی که در روش موازنه لایه ها تنها از داده های برداشت شده در راستای ترانشه استفاده گردیده است و به نظر می رسد نتایج، بیانگر کل تاقدیس نمی باشد. به منظور تحقیق در این خصوص، از مقاطع نزدیک به ترانشه (مقاطع ۵-۱)، فراسنج های حرکتی راندگی خیرآباد برآورد شد (شکل ۳b و جدول ۵). در این حالت، مقادیر به دست آمده به

همانطوری که در جدول ۵ ملاحظه می شود در یک دوره زمانی یکسان (پلیستوسن)، مقادیر برآورد شده در روش موازنه مساحت که برگرفته از مقاطع توپوگرافی می باشد با نتایج روش موازنه لایه های جدایش یافته که حاصل برداشت های صحرائی است، مطابقت ندارد. چراکه فراسنج های به دست آمده از روش موازنه مساحت برای کل تاقدیس خیرآباد محاسبه شده است و

روش موازنه مساحت، مقادیر میانگین نیمرخها در نظر گرفته می‌شود این تفاوت بین نتایج حاصله از یک نیمرخ مشخص (در اینجا ترانشه) و میانگین کل وجود خواهد داشت.

۶- نتیجه‌گیری

در ارزیابی خطر لرزه‌ای راندگی‌های پنهان یافتن مکان دقیق گسل، نرخ لغزش، تعیین زمین‌لرزه بیشینه (M_{max}) و دوره بازگشت آن اهمیت دارد. در این تحقیق نشان داده شد که با انتخاب مقاطع توپوگرافی متعدد بر روی دگرریختی سطحی راندگی پنهان می‌توان به میانگین فراسنج‌های لرزه‌ای گسل دست یافت. از آنجایی که بررسی‌های دیرینه‌لرزه‌شناسی مشکل و پرهزینه هستند، روش موازنه مساحت، روشی مناسب است که می‌تواند در نخستین گام از مطالعات خطر لرزه‌ای راندگی‌های پنهان، به تخمین‌های نسبتاً دقیق و سریعی از فراسنج‌های لرزه‌ای دست یابد. با بهره‌گیری از این روش بیشینه بزرگی زمین‌لرزه قابل انتظار برای راندگی پنهان خیرآباد ۴/۷ برآورد شده است که می‌تواند با دوره بازگشت ۵۷۷ ساله تکرار شود. همچنین نرخ لغزش انقباضی، کوتاه‌شدگی افقی و برخواستگی به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۵۹ و ۰/۴۶ میلیمتر در سال و عمق سطح جدایشی ۵۳۳ متر تخمین زده شده است. مطابق با میزان لغزش (۰/۷۵ میلیمتر در سال)، درجه فعالیت گسل پنهان خیرآباد متوسط در نظر گرفته می‌شود. لذا پیشنهاد می‌گردد در احداث ساختمان‌ها و سازه‌های زیرزمینی نظیر خطوط انتقال گاز و ... در منطقه، علاوه بر بکارگیری روش‌های مؤثر مهندسی، حریم گسل رعایت شود و از احداث ساختمان‌های با درجه اهمیت بالا خودداری گردد.

نتایج روش موازنه لایه‌ها نزدیک‌تر شده است. بنابراین روش موازنه مساحت نتایج دقیق‌تری از کل تاقدیس را به دست می‌دهد و بیان‌کننده دگرریختی در گستره‌ای است که راندگی پنهان خیرآباد عمل کرده است. در عین حال، پیشنهاد می‌شود برای دستیابی به مقادیر دقیق نرخ لغزش بلندمدت گسل، کوتاه‌شدگی افقی و برخواستگی منطقه، تلفیق نتایج مقاطع توپوگرافی و روش‌های سن‌سنجی مطلق (نظیر لومینیسانس) صورت پذیرد. در هر صورت با توجه به نتایج به دست آمده، نرخ لغزش متوسط گسل، حداکثر بین ۱/۱-۰/۷۵ می‌باشد که بر اساس تقسیم‌بندی Keller و Pinter (۲۰۰۲) درجه فعالیت گسل خیرآباد متوسط در نظر گرفته می‌شود.

در روش موازنه مساحت برآورد عمق سطح جدایشی گسل اهمیت دارد. چراکه مساحت جابه‌جا شده متناسب با عمق سطح جدایشی گسل و میزان کوتاه‌شدگی است. زمانی این دو مساحت یکسان است که کوتاه‌شدگی به موازات لایه‌بندی رخ نداده باشد. از آنجا که این میزان در کمربندهای چین خورده کمتر از ۵ درصد است (Groshong, 2006)، از این رو فرض می‌شود که طول لایه‌ها در حین تکامل چین ثابت می‌ماند. همچنین شیب صفحه گسل با افزایش عمق ثابت در نظر گرفته شده است. بنابراین با داشتن متوسط شیب گسلش و طول دگرشکل شده می‌توان عمق سطح جدایشی گسل را در یک رابطه مثلثاتی ساده محاسبه کرد (رابطه ۱۲):

$$H = \text{Depth of detachment} = l_0 \times \tan \sigma \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$H = 622.35 \times \tan 38 = 486 \text{ m}$$

عمق سطح جدایشی محاسبه شده با استفاده از داده‌های برداشت شده در ترانشه، ۴۸۶ متر است که به میزان برآورد شده از روش موازنه مساحت (۵۳۳ متر) فاصله دارد. از آنجایی که در

مراجع

- Aki, K., 1966. Generation and propagation of G-waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G-wave spectrum. *Bulletin of earthquake Research Institute, Tokyo University* 44, 73-88. <https://doi.org/10.15083/0000033586>
- Alimi, M.A., 2017. Quaternary deformation associated with blind thrust faulting in Kheyabad anticline, north Brigand. 5th Tectonic and Structural geology of Iran congress. <http://5thtectonic.conf.riess.ac.ir/fa/congress/infoview/0/all/13013>.
- Berberian, M., 1979. Earthquake faulting and bedding thrust associated with the Tabas-e-Golshan (Iran) earthquake of September 16, 1978. *Bulletin of the Seismological Society of America* 69, 1861-1887. <https://doi.org/10.1785/BSSA0690061861>

- Berberian, M., 2014. Earthquakes and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau. Elsevier, P. 699. <https://www.elsevier.com/books/earthquakes-and-coseismic-surface-faulting-on-the-iranian-plateau/berberian/978-0-444-63292-0>
- Berberian, M., Jackson, J.A., Qorashi, M., Talebian, M., Khatib, M.M., Priestley, K., 2000. The 1994 Sefidabeh earthquakes in eastern Iran: Blind thrusting and bedding-plane slip on a growing anticline, and active tectonics of the Sistan suture zone. *Geophysical Journal International* 142, 283–299. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00158.x>
- Copley, A., and Reynolds, K., 2014. Imaging topographic growth by long-lived postseismic after slip at Sefidabeh, east Iran. *Tectonics* 33, TC003462. <https://doi.org/10.1002/2013TC003462>
- Copley, A., 2014. Postseismic after slip 30 years after the 1978 Tabas-e-Golshan (Iran) earthquake. observations and implications for the geological evolution of thrust belts. *Geophysical Journal International* 197(2), 665-679. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu023>
- Davis, G.H., Reynolds, S.J., Kluth, Ch.F., 2012. Structural geology of rocks and regions. Wiley and Sons press, p. 861. <https://ir1lib.org/dl/2054071/36c594>.
- Eftekhari Nezhad, J., Ohanian, T., Tatevosian, S., Manouchehri, M., Afaghi, A., Hosseini, Z., Qomashi, A., Afsharian Zadeh, A., Etemadi, N., 1986. Geological Map of Birjand, Scale: 1:100,000, Geological Survey of Iran, Tehran. <http://dge.mshdiau.ac.ir/images/download/geologymap/Downlodmap/birjand%20map.jpg>.
- Engdahl, E.R., Jackson, J.A., Myers, S.C., Bergman, E.A., Priestley, K., 2006. Relocation and assessment of seismicity in the Iran region. *Geophysical Journal International* 167, 761–778. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03127.x>
- Engdahl, E.R., van der Hilst, R., Buland, R., 1998. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bulletin of the Seismological Society of America* 88, 722–743. <https://doi.org/10.1785/BSSA0880030722>
- Groshong, R.H., 2006. 3-D Structural Geology. Springer Publications, P. 400. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-31055-6>
- Hollingsworth, J., Fattahi, M., Walker, R.T., Talebian, M., Bahroudi, A., Bolourchi, M., Jackson, J.A., Copley, A., 2010. Oroclinal bending, distributed thrust and strike-slip faulting, and the accommodation of Arabia-Eurasia convergence in NE Iran since the Oligocene. *Geophysical Journal International* 181, 1214–1246. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04591.x>
- ISC. Iranian Seismological Center. <http://irsc.ut.ac.ir/bulletin.php>.
- Keller, E.A., Pinter, N., 2002. Active tectonics, Earthquakes, Uplift and Landscape. Prentice Hall, P. 362. <https://www.amazon.com/Active-Tectonics-Earthquakes-Uplift-Landscape/dp/0130882305>
- King, G., Soufleris, C., Berberian, M., 1981. The source parameters, surface deformation and tectonic setting of three recent earthquakes. Thessaloniki (Greece); Tabas-e-Golshan (Iran); and Carlisle (U.K.). *Disasters* 5, 36–46. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.1981.tb01127.x>
- Lin, J., Stein, R.S., 1989. Coseismic folding, earthquake recurrence and the 1987 source mechanism at Whittier Narrows, Los Angeles Basin, California. *Geophysical Journal International* 94, 9614-9632. <https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09614>
- Lin, J., Stein, R.S., 2004. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults. *Journal of Geophysical Research* 109, B02303. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JB002607>.
- McCalpin, J.P., Carver, G.A., 1996. Paleoseismology of Compressional Tectonic Environments. *International Geophysics* 62, 183-270, [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(96\)80072-6](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(96)80072-6).
- NEIC. National Earthquake Information Center. United State Geological Survey Stop 967, National Earthquake Information Center, DFC, Denver, CO 80225-0046, USA. <http://neic.usgs.gov/>
- Parsons, B., Wright, T., Rowe, P., Andrews, J., Jackson, J., Walker, R., Khatib, M., Talebian, M., Bergman, E., Engdahl, E.R., 2006. The 1994 Sefidabeh (eastern Iran) earthquakes revisited: new evidence from satellite radar interferometry and carbonate dating about the growth of an active fold above a blind thrust fault. *Geophysical Journal International* 164, 202–217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02655.x>

- Rivero, C., Shaw, J.H., Mueller, K., 2000. Oceanside and Thirty-mile Bank blind thrusts: Implications for earthquake hazards in coastal southern California. *Geology* 28, 891–894. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28%3C891:OATBBT%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28%3C891:OATBBT%3E2.0.CO;2)
- Shaw, J.H., Suppe, J., 1996. Earthquake hazards of active blind-thrust faults under the central Los Angeles Basin, California. *Journal of Geophysical research* 101, 8623–8642. <https://doi.org/10.1029/95JB03453>
- Stein, R.S., Yeats, R.S., 1989. Hidden earthquakes. *Scientific American* 260, 48–57. <https://www.jstor.org/stable/24987283>
- Walker, R., Khatib, M.M., 2006. Active faulting in the Birjand region of NE Iran, *Tectonics* 25, TC4016, <https://doi.org/10.1029/2005TC001871>.
- Walker, R., Jackson, J., Baker, C., 2003. Surface expression of thrust faulting in eastern Iran: source parameters and surface deformation of the 1978 Tabas and 1968 Ferdows earthquake sequences. *Geophysical Journal International* 152, 749–765. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01886.x>
- Walker, R., Jackson, J., Baker, C., 2004. Active faulting and seismicity of the Dasht-e Bayaz region, eastern Iran. *Geophysical Journal International* 157, 265–285. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.02179.x>
- Walker, R.T., Khatib, M.M., Bahroudi, A., Schnabel, C., Rode's, A., Fattahi, M., Talebian, M., Bergman, E., 2015. Co-seismic, Geomorphic, and Geologic fold growth associated with the 1978 Tabas earthquake fault in eastern Iran. *Geomorphology* 237, 98-118. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.02.016>
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994. Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84, 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>