

Original Research Paper

# The first paleoseismological research on the Dorud fault: insights from the Darb Astana trench, southwestern Iran

Zahra Kamali<sup>1,2</sup>\*, Hamid Nazari<sup>3</sup>, Syrus Esmaili<sup>4</sup>, and Mahmoud Reza Hayhat<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

<sup>2</sup> Geological Survey of Iran, Khorram Abad, Iran

<sup>3</sup> Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Geological Survey of Iran, Tabriz, Iran

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received: 2025 January 22

Accepted: 2025 April 12

Available online: 2025 July 22

### Keywords:

Main recent fault

Zagros mountains

Dorud fault

Paleoseismology

## ABSTRACT

The Dorud fault is a key seismic segment of the young Zagros fault, stretching northwest-southeast from the Arjang area to Borujerd. This study examines the latest tectonic movements, young tectonic phenomena, and paleoseismology of the Dorud segment near Darb Astaneh village in eastern Dorud county. To achieve this, a 45-meter trench was dug in the NE-SW direction across the Dorud fault zone, revealing 9 paleo seismic events on the trench's eastern wall. These earthquakes had magnitudes ranging from 6.6 to 7.4 and a mean return period of approximately  $104 \pm 7$  years. The findings suggest that large earthquakes triggered by the Dorud fault can produce magnitudes up to 7.4, surface ruptures of around 45 km, and slips of up to  $3.83 \pm 0.1$  m per event, consistent with the EvI', EvII', and 1909 events attributed to repeated fault movement.

## 1. Introduction

Paleoseismology studies with a geomorphologic viewpoint on tectonically active areas are essential for modern seismic hazard assessment and determining the seismic potential of seismogenic faults over much more extended periods than instrumental measurements; moreover, these studies provide tightly constrained data for the location, size, and recurrence


of large earthquakes associated with surface rupture in recent geological time, which are critical for the assessment of seismic potential and hazards along active faults. The Zagros Mountain range (Figure 1-a), one of the main structural zones of SW Iran, which includes a large number of Iran's devastating earthquakes, is a fold-and-thrust belt at the

\* Corresponding author: Zahra Kamali; E-mail: zahrakamali@birjand.ac.ir

### Citation:

Kamali, Z., Nazari, H., Esmaili, S., and Hayhat, M.R., 2025. The first paleoseismological research on the Dorud fault: insights from the Darb Astana trench, southwestern Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 35(2), 136, 123-144. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.501250.2177>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2025.501250.2177

 dor: 20.1001.1.10237429.1404.35.2.7.0



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

leading edge of the Arabia–Eurasia continental collision zone, which accounts for about one-third of the collision zone’s overall 20 to 30 mm/year convergence rate. The perceptible impact of large-magnitude earthquakes and the intervening destructive episodes of historical and antique cultural heritage sites located in earthquake-prone areas near active faults (especially in the Zagros) are of scientific, architectural, engineering, cultural, and social significance. The Main Recent Fault (MRF), located on the northwestern side of the Zagros Mountains, is the most active fault system in the region where the convergence of the Arabian and Eurasian plates is oblique to the range’s trend. The oblique convergence is consummated by the spatial separation of the strike–slip and reverse components on parallel faults. It seems that a significant portion of the strike–slip mechanism is spent along the MRF. The fault trace in the northern margin of the Zagros range depicted by Ambraseys and Melville is equivalent to what is now known as the MRF, but there was no field evidence for the strike–slip component; only vertical displacements were observed (north-east side down). The MRF is divided into five major segments (from Kamyaran to Arjanak), including the Doroud, Nahavand, Garun, Sahneh, and Morvarid segments.

## 2. Research methodology

To study paleoseismology, a trench, TC, was excavated across the Doroud Fault scarp and a nearby pond using a combination of hand and machine tools. The pond was chosen for its accumulation of recent sediments that record seismic events, having formed due to fault activity in the hanging wall of the Doroud Fault and being close to the epicenter of the 1909 earthquake. After scraping and cleaning the trench walls, a string grid was installed to define 1m × 1m panels, each of which was photographed with overlapping images. Sedimentary layers were classified into separate units based on characteristics such as color, particle size, and texture. The sequence of ground-rupturing events was determined through analysis of strata relationships, sediment thickness, soft sediment deformation, and fissures. Radiocarbon and optically stimulated luminescence dating of sediment samples were used to constrain the ages of stratigraphic units and the corresponding seismic events.

## 3. Results

Our paleoseismological investigation of the trench photomosaic and logs revealed a main fault plane distinguishable by the distinct colors of the sediments, allowing us to identify at least nine paleo-earthquakes in two

fault zones, named  $Ev_1$  to  $Ev_9$  from youngest to oldest. These events occurred between approximately 1225-1275 years ago and 71-61 ka years ago.

The most recent earthquake event,  $Ev_1$ , is supported by three independent lines of evidence. The abrupt upward terminations of two fault strands in Log fault zone A, capped by the most recent pond deposit, provide evidence for this event. The age of this event is constrained by the age of sample DT1-C10 ( $25 \pm 1250$  Cal BP) and the displacement of the base of unit 2 along the faults. The magnitude of the earthquake that caused this event is estimated to be  $M_w \sim 7.4$ , with a surface rupture length of 79.79 km, subsurface rupture length of 87.09 km, and average slip of 0.74 m.

A second paleo-earthquake event is recognized in Log fault zone A, characterized by a fissure fill at the base of units 1-2' and two faults (F2' and F3') younger than  $1360 \pm 35$  BP. This event postdates  $1360 \pm 35$  BP and predates  $3440 \pm 25$  Cal BP, with a similar magnitude and seismic parameters to  $Ev_1$ .

A third event in Log fault zone B is interpreted along fault F2, which ruptured unit 22 after its deposition. This event postdates  $1560 \pm 255$  Cal BP and has a calculated moment magnitude of  $M_w \sim 6.1$ .

A fourth event is identified with faults F4, F9, and F10 in Log fault zone B, characterized by a tiny fracture and the abrupt upward terminations of two fault strands sealed by the surface soil. These events contribute to our understanding of the diverse paleoseismic history of the trench.

These faults and fractures are younger than  $1720 \pm 30$  Cal BP, which is the age obtained for sample DT1-C7 collected in unit 16-a. The event horizon of this event is the base of the 16-a unit. Moreover, this event indicates the occurrence of an earthquake after the time of the deposited unit 16-a. The calculated moment magnitude is  $M_w \sim 6.1$ , and the average surface and average subsurface rupturing lengths were 12.88 and 14 km, respectively. The average subsurface rupture width was 7.9 km, the rupture area was 117 km<sup>2</sup>, and the average slip was 0.71 m.

The fifth event can be interpreted with the cutting units 4 and C1 and rupturing along F2 in Log fault zone B. The event horizon of this event is the base of unit 22. This event occurred after the deposition of unit C1. Hence, it postdates  $2385 \pm 35$  Cal BP, the age obtained for sample DT1-C6 collected in unit C1, and predates  $1720 \pm 30$  Cal BP, which is the age obtained for sample DT1-C7 collected in unit 16-a. Its calculated moment magnitude is  $M_w \sim 6.6$ . Moreover, the average surface and average subsurface rupture lengths were 19.49 and 22 km, respectively, the average subsurface

rupture width and average rupture area were 10.96 km and 234 km<sup>2</sup>, and the average slip was 0.72 m. The sixth event was identified with colluvial wedge unit C1 in Log fault zone B, which overlies and has eroded into the underlying units 1, 2, 3, and 4, as a colluvial wedge developed following a surface rupture in Event 6. Unit 4 is cut by fault F2. The colluvial wedge deposits resulting from the degradation of a fault scarp erosion which formed as a result of the normal component of the F2 fault; therefore, the deposits of wedge C1 are the result of the erosion and sedimentation of a mixture of units 4 and 16-a indicating the earthquake occurrence before the deposited unit C1 and after unit 4. We evaluated the maximum wedge thickness of 21.74 cm, which shows a vertical displacement of 19.43 cm at the top of unit 4. The event horizon of this event is the base of the C1 unit. This event occurred after the deposition of unit 4, which is a colluvial wedge sample DT1-C6, dated  $2385 \pm 35$  Cal BP. Hence, it postdates  $2385 \pm 35$  Cal BP. The seventh event is identified with faults F1, F2, F3, and F4 in Log fault zone B; the faults affect units younger than unit 4. These faults are younger than  $3235 \pm 25$  Cal BP, which is the age obtained for sample DT1-C5 collected in unit 4. This event occurred after the deposition of unit 4; hence, it postdates  $3235 \pm 25$  Cal BP. Several distinct abruptly terminating upward fault strands, with the most demonstrative ones observed between 18 and 20 m, provide evidence for event Ev7. The faults F1, F2, F3, and F4 cut through unit 4 and abruptly terminate at the base of unit 16-a. Unit 4 is associated with average vertical displacements along the faults F1, F2, F3, and F4 with a range of  $100 \pm 4$  cm. The event horizon has therefore been set at the base of unit 4. The calculated moment magnitude is  $M_w \sim 7.2$ , and other calculated seismic parameters are given in Table 4. The eighth event is evidence of faults abruptly terminating upward and cutting units along the faults in Log fault zone B. This event was found only in the southwestern part of zone B and well-characterized by the abruptly terminating upward fault F11 at the base of units 3 and F10, cutting through the lower units 3, 2, and 1. Unit 3 is associated with vertical displacements along the F10 that are about  $60 \pm 3$  cm (at the base of unit 3). Therefore, the event horizon of the seven paleoearthquake is set at the base of unit 3. This event occurred after the deposition of unit 3; hence, it was younger than  $8375 \pm 35$  Cal BP, which is the age obtained for sample DT1-C20 collected in unit 3. Using the fault plane parameters and the same equation linking them to the earthquake magnitude obtains  $M_w \sim 7$ , and other calculated seismic parameters are given in Table 4. The ninth event is indicated by unit 2 being offset by faulting in Log fault zone

B. This event can be interpreted as a fault termination, with the fault F5 cutting through unit 2 and faults F6, F7, and F8 abruptly terminating upward at the base of unit 2. This event is associated with vertical displacements in unit 2 along the F5, which was calculated to be an average of  $50 \pm 0.1$  cm (at the bottom of unit 2). Therefore, the event horizon is set at the base of unit 2. This event occurred after the deposition of unit 2. Hence, it is younger than  $66.62 \pm 5$  ka, which is the age obtained for sample Dt1 IRSL 2 collected in the middle of unit 2. Using the fault plane parameter Tables 4 and 5 and the same equation linking them to the earthquake magnitude obtains  $M_w \sim 6.8$ .

#### 4. Discussions

Our paleoseismological study along the Doroud Fault is the first of its kind. The Darbe-Astaneh trench site, located near the epicenter of the 1909 earthquake, was chosen for its high sedimentary potential, evident from remote sensing and field observations. The site exhibited well-defined surface deformation and adequate deposits for age determinations. Our investigation reveals that the Doroud Fault has experienced several large, infrequent, and irregular earthquakes. We identified nine paleoearthquakes in the trench, with at least eight large earthquakes ( $M_w \sim 5.5$ ) occurring within the last  $8375 \pm 35$  Cal BP, and one older event likely predating  $66.62 \pm 5$  ka. The most recent event occurred at  $1250 \pm 25$  Cal BP. Notably, the fault hosted four earthquakes with magnitudes greater than  $M_w \sim 7$  and four with magnitudes greater than  $M_w \sim 6$  within the last  $66.62 \pm 5$  ka.

The clustering of seven seismic events within a short time interval suggests that the Doroud Fault's seismic behavior is characterized by earthquake clustering. The occurrence of seven large earthquakes ( $M_w > \sim 6$ ) over the last  $\sim 3.3$  ka supports this notion. However, two seismic gaps were observed: one between 3260 Cal BP and 8350 Cal BP, and another between 8350 Cal BP and 66 ka. These gaps may be attributed to the non-preservation of sedimentary layers rather than the absence of seismic activity, a common issue in paleoseismology.

This result demonstrates a bimodal behavior of seismic activity in the area. From the youngest paleoearthquake ( $1250 \pm 25$  BP) to the 1909 earthquake (approximately  $700 \pm 37$  years old), no earthquakes with  $M_w \sim 5.5$  or greater have been reported along the Doroud Fault. In contrast, other segments of the Main Recent Fault (MRF) experienced seismic activity during this period, indicating a seismic migration from southeast to northwest. Historical records,

such as the destruction of Dinor in 913 and 1008, and the 1316 earthquake, support this migration pattern.

In the twentieth century a seismic gap was observed in the southeastern part of the Nahavand segment, which was eventually ruptured during the 1909 ( $M_w \sim 7.4$ ) and 2006 ( $M_w \sim 6.1$ ) earthquakes along the Doroud segment of the Zagros Main Recent Fault. These events, occurring approximately 100 years apart, mark the beginning of a new seismic cluster. Our findings suggest that the Doroud Fault's seismic behavior is characterized by clustering, with a recurrence interval of approximately  $700 \pm 37$  years. By combining paleoseismic and seismic data, we can construct a nearly complete seismic catalog for events with magnitudes greater than 6 for the Doroud Fault. The fault's geometrical, kinematical, and seismic behavior characteristics indicate its potential to generate earthquakes with  $M_w \sim 7.4$  and surface ruptures. The Doroud Fault's seismic behavior, as revealed by our paleoseismological study, has significant implications for seismic hazard assessment and risk mitigation in the region. The identification of earthquake clustering and the recurrence interval of approximately  $700 \pm 37$  years suggests that the fault is capable of producing large, destructive earthquakes at relatively short intervals. The fact that the fault has experienced four earthquakes with magnitudes greater than  $M_w \sim 7$  and four with magnitudes greater than  $M_w \sim 6$  within the last  $66.62 \pm 5$  ka underscores the potential for significant seismic activity in the future.

The seismic gaps observed in the record, particularly the one between 3260 Cal BP and 8350 Cal BP, may indicate periods of reduced seismic activity or non-preservation of sedimentary layers, rather than a complete absence of earthquakes. However, the presence of these gaps highlights the complexity of the fault's seismic behavior and the need for further research to fully understand the underlying mechanisms driving earthquake activity.

The migration of seismic activity from southeast to northwest along the Main Recent Fault, as suggested by historical records and our paleoseismic data, has important implications for seismic hazard assessment and risk mitigation. The fact that other segments of the fault have experienced significant seismic activity during periods of quiescence along the Doroud Fault segment suggests that the fault system as a whole is capable of producing large, destructive earthquakes.

Our study demonstrates the value of combining paleoseismic and seismic data to construct a comprehensive seismic catalog for the Doroud Fault. By integrating these different lines of evidence, we can gain a more complete understanding of the

fault's seismic behavior and improve our ability to predict future seismic activity. The geometrical, kinematical, and seismic characteristics of the fault, including its potential to generate earthquakes with  $M_w \sim 7.4$  and surface ruptures, highlight the need for continued monitoring and research to mitigate the seismic hazard posed by the Doroud Fault.

The results of our study have significant implications for the regional seismic hazard assessment, particularly in the context of the Zagros Main Recent Fault, which is a major seismic hazard in the region. The identification of the Doroud Fault as a significant seismic source, capable of producing large, destructive earthquakes, highlights the need for continued research and monitoring to improve our understanding of the fault's seismic behavior and to develop effective strategies for mitigating the associated seismic hazard. Furthermore, our study demonstrates the importance of paleoseismology in providing critical information on the long-term seismic behavior of faults, which is essential for developing robust seismic hazard assessments and effective risk mitigation strategies.

## 5. Conclusion

Our analysis of the Doroud Fault in southwest Zagros has yielded new insights into its activity, revealing a hidden strike-slip fault with a relatively high slip rate. This suggests that the fault has produced large earthquakes ( $M_w 6.6-7.4$ ) in the past and plays a significant role in accommodating dextral displacement and crustal shortening. Trenching investigations indicate approximately nine paleoearthquakes have occurred along the fault in the last  $66.62 \pm 5$  ka years, with an average recurrence interval of  $\sim 104 \pm 7$  years for earthquakes with a magnitude greater than 5.5. Given the 2006 earthquake, the next event is expected to occur within the next  $\sim 90$  years, potentially by the early 22nd century. Paleoseismology studies suggest the fault is capable of producing earthquakes with magnitudes over 7.4 and a total slip rate of  $3.83 \pm 0.1$  m. A large earthquake on the Doroud Fault is predicted to result in an extensive surface rupture of approximately 45 km. Our analysis of the Doroud Fault in southwest Zagros has yielded new insights into its activity, revealing a hidden strike-slip fault with a relatively high slip rate. This suggests that the fault has produced large earthquakes ( $M_w 6.6-7.4$ ) in the past and plays a significant role in accommodating dextral displacement and crustal shortening. Trenching investigations indicate approximately nine paleoearthquakes have occurred along the fault in the last  $66.62 \pm 5$  ka years, with an average recurrence interval of  $\sim 104 \pm 7$  years for earthquakes with a magnitude greater than

5.5. Given the 2006 earthquake, the next event is expected to occur within the next ~90 years, potentially by the early 22nd century. Paleoseismology studies suggest the fault is capable of producing earthquakes with magnitudes over 7.4 and a total slip rate of  $3.83 \pm 0.1$  m. A large earthquake on the Doroud Fault is predicted to result in an extensive surface rupture of approximately 45 km. Furthermore, the fault's geometry and kinematics indicate a complex interaction with adjacent faults, potentially influencing the regional stress field and seismic hazard. The Doroud Fault's seismic behavior is also characterized by a high degree of variability in earthquake recurrence intervals, which may be attributed

to the fault's interaction with the surrounding tectonic framework. Additionally, the presence of folding and thrusting in the region suggests that the Doroud Fault is part of a larger deformation system, with significant implications for our understanding of the regional seismic hazard. To better constrain the fault's seismic potential, further investigations are needed to refine the paleoseismic record and quantify the fault's contribution to the regional seismic budget. Moreover, the integration of geological, geophysical, and geodetic data will be essential for developing a comprehensive understanding of the Doroud Fault's behavior and its role in the regional tectonic framework.

# نخستین مطالعات پارینه لرزه‌شناسی گسل دورود: ترانسه درب آستانه (جنوب باختر ایران)

زهره کمالی\*<sup>۱</sup>، حمید نظری<sup>۲</sup>، سیروس اسماعیلی<sup>۳</sup> و محمود رضا هیهات<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

<sup>۲</sup> اداره کل زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی زاگرس (لرستان)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، خرم‌آباد، ایران

<sup>۳</sup> پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

<sup>۴</sup> اداره کل تبریز، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تبریز، ایران

## چکیده

گسل دورود، یکی از اصلی‌ترین قطعات لرزه‌زای گسل جوان زاگرس که از نزدیکی منطقه ارجنگ در روندی شمال‌باختری-جنوب‌خاوری تا بوجود امتداد یافته است. در این پژوهش نتایج برآمده از مطالعه آخرین جنبش‌های زمین‌ساختی پهنه گسلی جوان اصلی زاگرس، پدیده‌های ریخت زمین‌ساختی جوان و نیز پارینه لرزه‌شناسی قطعه دورود در نزدیکی روستای درب آستانه در خاور-جنوب‌خاور شهرستان دورود ارائه می‌شود. با این هدف با حفر ترانسه‌ای به درازای ۴۵ متر در راستای NE-SW مطالعات پارینه لرزه‌شناسی بر روی برکه فرونشستی در پهنه گسل دورود انجام گرفت. با بررسی دیواره خاوری ترانسه عمود بر راستای گسل دورود ۹ رخداد لرزه‌زای کهن شناسایی شد، این زمین‌لرزه‌ها بزرگای بین  $6/6 \leq Mw \leq 7/4$  و میانگین دوره‌بازگشت تقریبی  $7 \pm 104$  سال به‌دست آمده است. بر این اساس، در تطابق با زمین لرزه‌های رخدادهای  $EvI'$ ،  $EvII'$  و  $1909$  گسل دورود مسبب زمین‌لرزه‌های بزرگی می‌باشد، از این‌رو، توانایی ایجاد زمین‌لرزه‌های با بزرگای تا  $7/4$  و گسیختگی سطحی با طول تقریبی ۴۵ کیلومتر و لغزش در هر رویداد تا  $3/83 \pm 0/1$  متر را می‌باشد.

## اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:

گسل جوان اصلی

رشته کوه زاگرس

گسل دورود

پارینه لرزه‌شناسی

## ۱- پیش‌نوشتار

رودخانه‌های متعددی از جمله رودخانه‌های گهر و ماربر می‌باشد، همچنین تشکیل دریاچه گهر نیز به احتمال حاصل لغزش عظیمی (پیش از سال ۱۲۶۸ ه.ش) در ضمن رخداد زمین‌لرزه‌های مخرب و ویرانگر و در نهایت مسدود شدن دره گهر بوده است. این گسل با درازای نزدیک به ۱۰۰ کیلومتر توان ایجاد زمین‌لرزه‌ای به بزرگی  $7/1$  درجه ریشتر را دارا می‌باشد (Tchalenko and Braud, 1974).

پارینه لرزه‌شناسی به عنوان یک دانش بین‌رشته‌ای، میان علوم زلزله‌شناسی و زمین‌شناسی بوده که به بررسی زمین‌لرزه‌های پیش از تاریخ می‌پردازد. برای محفوظ ماندن آثار حاصل از زمین‌لرزه‌های پارینه، رسوب‌گذاری باید به طور پیوسته و هم‌زمان با گسلش صورت گرفته باشد، همچنین نرخ رسوب‌گذاری با فرسایش در تعادل باشد، چنانچه نرخ فرسایش بالا باشد موجب آشفستگی در توالی چینه‌ای و از بین رفتن آثار زمین‌لرزه‌های پارینه خواهد شد. نرخ رسوب‌گذاری بالا سبب تدفین

رشته کوه زاگرس، به ویژه کمر بند چین‌خورده-رانده آن به دلیل دارا بودن گسل‌ها و چین‌های بزرگ و منظم و زمین لرزه‌های فراوان در ایران اهمیت ویژه‌ای دارد. سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های زاگرس بیشتر نشان‌دهنده گسلش معکوس بزرگ زاویه (با شیب صفحه گسلی  $40^\circ$  تا  $50^\circ$  درجه) و امتداد نزدیک به موازی با روند شمال باختری-جنوب‌خاوری (روند چین‌های ناحیه‌ای) می‌باشد (زند سلیمی، ۱۳۸۸). منطقه مورد مطالعه در پهنه چین‌خورده-رانده زاگرس واقع شده است. گسل اصلی عهد حاضر زاگرس یک گسل کواترنری با عملکرد راست‌لغز راست‌بر است که نخستین بار از سوی چالنگو و براد (Tchalenko and Braud, 1974) معرفی شد (شکل ۱). رویداد زمین‌لرزه ویرانگر سوم بهمن ماه ۱۲۸۷ سیلاخور با بزرگای  $7/4$  جابه‌جایی مولفه راست‌لغز راست بر  $0/8$  تا  $1$  متر و مولفه قائم حدود  $0/25$  تا  $0/4$  متر بوده است (Bachmanov et al., 2004). گسل دورود در طول خود مسیر عبور

\* نویسنده مسئول: زهره کمالی؛ E-mail: zahrakamali@birjand.ac.ir

## ماخذنگاری:

کمالی، ز.، نظری، ح.، اسماعیلی، س. و هیهات، م.ر.، ۱۴۰۴، نخستین مطالعات پارینه لرزه‌شناسی گسل دورود: ترانسه درب آستانه (جنوب باختر ایران). فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۵(۲)، ۱۳۶، ۱۲۳-۱۴۴. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.501250.2177>

doi: 10.22071/gsj.2025.501250.2177

doi: 20.1001.1.10237429.1404.35.2.7.0

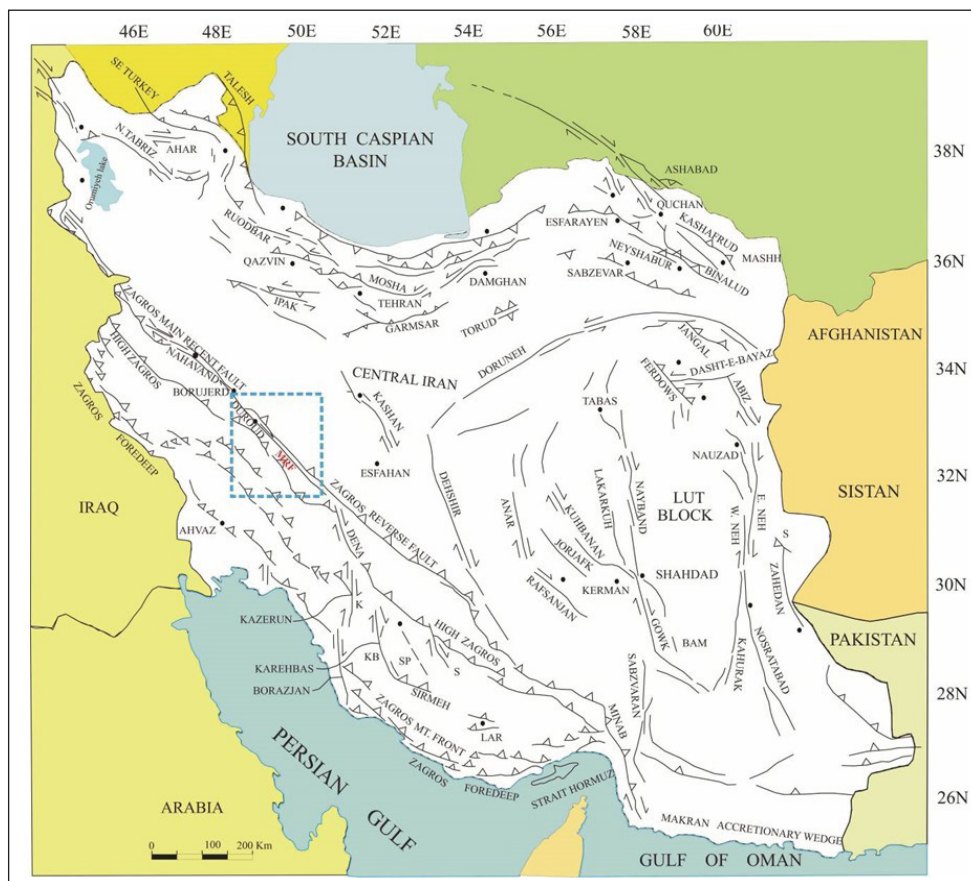
حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

گرفته‌اند. جایگاه حفر ترانشه باید اثر گسل با دقت بالا (در گستره‌های با پهنای کمتر از ۲۰ متر) قابل شناسایی باشد. بیشتر مطالعات انجام گرفته بر روی گسل دورود در راستای تحلیل خطر زمین لرزه با استفاده از داده‌های کاتالوگ لرزه‌ای صورت گرفته است. در این پژوهش سعی بر این است تا با استفاده از حفاری و مطالعه ترانشه‌های پارینه لرزه‌شناسی، سن سنجی شواهد رخداد زمین لرزه‌های پارینه به روش لومینسانس نوری و کربن ۱۴ در گستره زمانی هولوسن مورد بررسی قرار گیرد. پارینه لرزه‌شناسی بر روی گسل دورود به روش مستقیم و با حفر ترانشه عمود بر امتداد گسل انجام گرفته است.

آثار زمین لرزه‌های پارینه در ژرفای زیاد و عدم دسترسی به آنها خواهد شد. محل حفر ترانشه‌ها باید در رسوبات سست و نرم انتخاب گردد، زیرا در این گونه نهشته‌ها، امکان ثبت دگرشکلی‌های ناشی از زمین لرزه‌های پارینه بیشتر بوده و مواد مناسب برای سنجایی نیز در آنها یافت می‌شود، همچنین نهشته‌ها باید جوان باشند زیرا هدف، شناسایی زمین لرزه‌های رخ داده در بازه زمانی پلیستوسن پایانی- هولوسن است (McCalpin, 2009). برای یافتن اثر گسلش در نهشته‌های جوان بریده شده، بهتر است محلی انتخاب شود، که ارتفاع پله گسل کمتر باشد زیرا به طور معمول پله‌های گسلی که ارتفاع زیادتری دارند، قدیمی‌تر بوده و در اثر چندین زمین لرزه شکل



شکل ۱- نقشه گسل‌های اصلی ایران (خط چین آبی محدوده مورد مطالعه گسل دورود را نشان می‌دهد) (برگرفته از کمالی و همکاران- (Kamali et al., 2023).

Figure 1. Map of the main faults of Iran (the blue dashed line shows the studied area of the Dorud fault) (After Kamali et al., 2023).

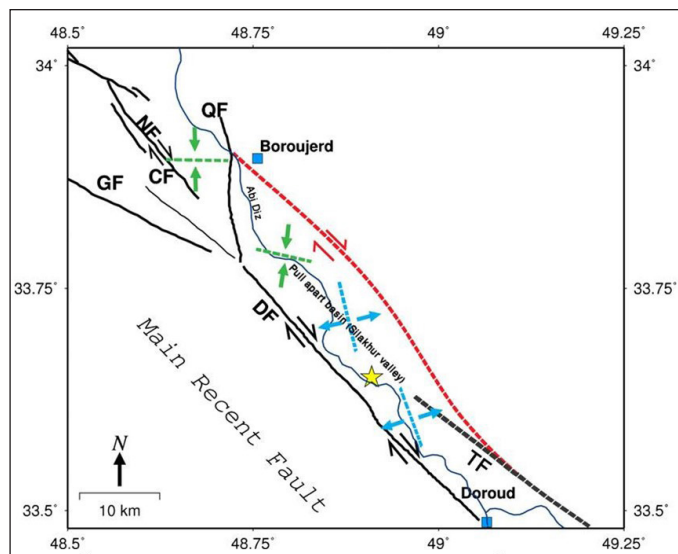
فعال ایران به عنوان گسل کوتاه‌تری (جوان) معرفی کردند، دلیل آن را جابه‌جایی عوارض سطحی کوتاه‌تری بیان داشتند. گسل جوان اصلی زاگرس با طول تقریبی ۱۳۵۰ کیلومتر از بندرعباس شروع تا شمال‌باختر وارد خاک ترکیه می‌شود، به سمت شمال‌باختر گسل با رفتار راست‌الغزی به‌عنوان گسل اصلی جوان زاگرس شناخته شده است. این گسل از جنوب‌خاور به سمت شمال‌باختر شامل ۷ قطعه: گسل نهاوند، گسل گارون، گسل صحنه و گسل مروارید گسل جوان اصلی زاگرس به سوی شمال‌باختر با گسل پیرانشهر امتداد می‌یابد (Tchalenko and Braud, 1974)، در واقع گسل جوان اصلی زاگرس یک پهنه باریک متشکل از قطعات گسلی منفرد با آرایش پلکانی است که در یک پهنه برشی راست‌بر بین ایران مرکزی و نوار

منطقه مورد مطالعه در پهنه چین‌خورده-رانده زاگرس واقع شده است (Talebian and Jackson, 2004). زاگرس چین‌خورده بخشی از محدوده چین‌خورده-رانده زاگرس است، کمر بند چین‌خورده رانده زاگرس (ZFTB) به واسطه فروافتادگی دزفول به دو ایالت فارس و لرستان تقسیم می‌شود. تغییرات ساختاری و توپوگرافی سبب تقسیم‌بندی این کمر بند به دو قلمرو با روندهای SW, NE شده است (Agard et al., 2011).

گسل جوان اصلی زاگرس یک گسل کوتاه‌تری با عملکرد راست‌الغز راست‌بر است، که اولین بار از سوی چالنگو و براد (Tchalenko and Braud, 1974) معرفی شد. حسامی (Hessami, 2001) گسل جوان اصلی زاگرس را در نقشه گسل‌های

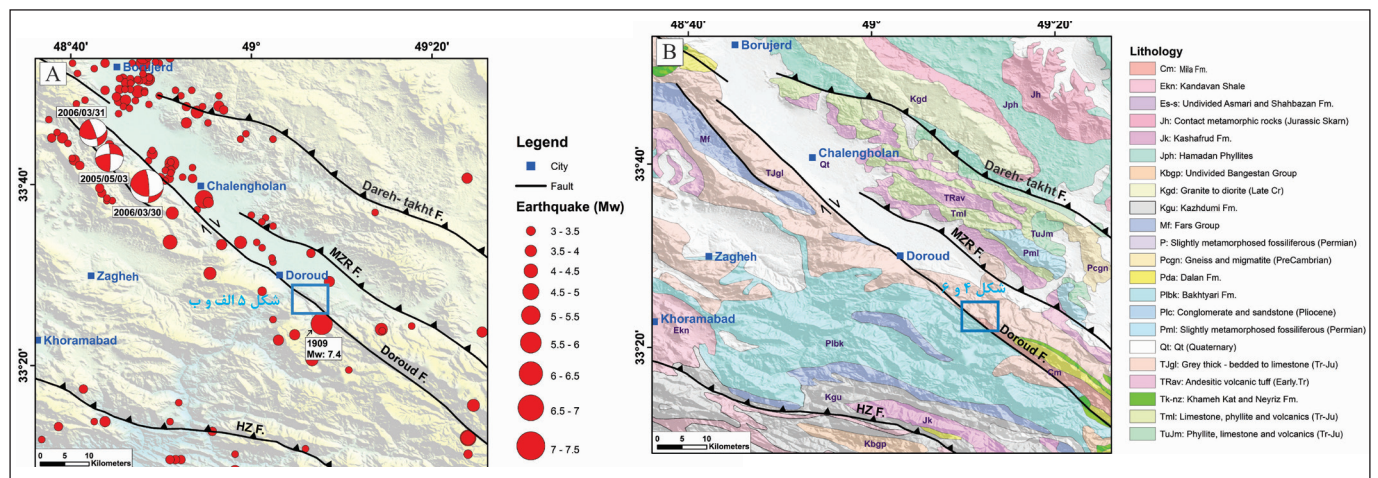
پیرانشهر و مروارید) که در یک سکون لرزه‌ای قرار دارند، فعال‌تر هستند (Tchalenko and Braud, 1974; Berberian, 1995; Mirzaei, 2003). ملک‌زاده و همکاران (Malekzade et al., 2007) بر این باورند که طول قطعات گسلی در امتداد گسل جوان اصلی زاگرس به سمت شمال‌باختر افزایش می‌یابد، و علت آن را افزایش نرخ لغزش بیان کردند، در این صورت فعالیت لرزه‌ای در امتداد آن‌ها بیشتر خواهد بود. گسل دورود با موقعیت  $50^{\circ}$  تا  $48/30^{\circ}$  خاوری و  $33^{\circ}$  تا  $34^{\circ}$  عرض شمالی و طول تقریبی ۱۲۱ کیلومتر با راستای شمال‌باختر- جنوب‌باختر به گسل نهاوند می‌رسد (کمالی و همکاران، ۱۳۹۷) (شکل ۳).

چین‌خورده-رانده زاگرس شکل گرفته است. عملاً همه قطعات گسل جوان اصلی زاگرس در سه دسته برش‌های ریدل (گسل دورود، گسل نهاوند و گسل مروارید)، برش‌های نوع P (گسل صحنه) و ساختارهای کششی (گسل قلعه حاتم، فرونشست دشت سیلاخور و نهاوند) قرار دارند (Tchalenko and Braud, 1974; Berberian, 1995; Mirzaei, 2003). بر اساس مطالعات سپهوند و همکاران (Sepahvand et al., 2012) گسل قلعه حاتم گسل عادی (نرمال) نیست بلکه گسلی امتدادلغز راست‌بر است (شکل ۲). گسل‌های دورود، نهاوند و صحنه نسبت به قطعات شمال‌باختری (گسل‌های



شکل ۲- مناطق کششی با خط چین و پلکان‌های آبی رنگ و مناطق فشارشی با خط چین و پلکان‌های سبز رنگ محدوده حوضه دره سیلاخور DF: گسل دورود، QF: گسل قلعه حاتم، CF: گسل کویلدر، CF: گسل قلعه آبرده، NF: گسل نهاوند و TF گسل پیشنهادی چالنگو و براد (Tchalenko and Braud, 1974) و خط چین قرمز گسل تشخیص داده شده از مطالعه داده‌های لرزه‌ای زمین‌لرزه ۲۰۰۶ در سمت شمال خاوری دشت سیلاخور توسط سپهوند و همکاران (Sepahvand et al., 2012).

Figure 2. Tension zones with dashed line and blue arrows and compressive zones with dashed line and green arrows in the Silakhor basin area DF: Dorud Fault, QF: Ghale- Hatem Fault, GF: Collider Fault, CF: Absardeh Fault, NF: Nahavand Fault and TF Tchalenko and Braud (1974) proposed fault and the red dashed line is the fault diagnosed from the study of seismic data 2006 earthquake in the north-eastern side of Silakhor Plain by (Sepahvand et al., (2012).



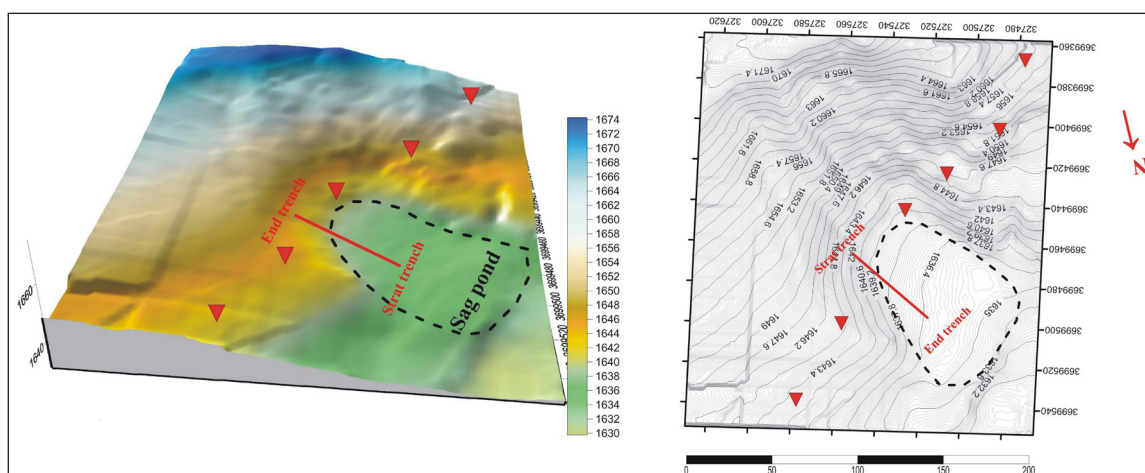
شکل ۳- (a) نقشه رو مرکز زمین‌لرزه‌های رخ داده گسل دورود، (b) نقشه زمین‌شناسی گستره گسل (Kamali et al., 2023).

Figure 3- a) Epicenter earthquakes map of that occurred on the Dorud fault, b) Geological map of the fault area (Kamali et al., 2023).

## ۲- روش پژوهش

از این‌رو، پس از انجام بررسی‌های دفتری بر روی تصاویر هوایی ماهواره‌ای Aster با دقت مکانی ۱۵ و داده‌های توپوگرافی سه بعدی DEM (با تفکیک مکانی ۱۰ متر)، نقشه‌های زمین‌شناسی (۱:۲۵۰۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰۰)، گزارشات، مقالات موجود بر روی گسل دورود و بازدید صحرایی در نزدیکی رو مرکز زمین‌لرزه ۱۹۰۹ در مسیر جاده گهر نرسیده به روستای درب آستانه بر روی برکه فرونشستی که این منطقه مشاهده و بررسی شد، به‌عنوان جایگاه حفاری انتخاب گردید (شکل ۴).

بررسی داده‌های در دسترس دستگاهی (سایت‌های USGS, NERC، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله) و تاریخی (Berberian, 2014; Ambraseys, 2001; Ambraseys and Melville, 1982) نشان از زمین‌لرزه قدیمی با بزرگای  $M=7.4$  در محدوده گسل دورود دارد. بنابراین در انتخاب جایگاه حفر ترانشه، عامل وجود زمین‌لرزه‌ای بزرگ در نزدیکی جایگاه حفاری در نظر گرفته شده است. همچنین شواهد ریخت‌زمین‌ساختی در منطقه نشان از جنبش گسل دورود در بازه کوتاه‌تری است



شکل ۴- مدل ارتفاعی تهیه شده با استفاده از برداشت‌های GPS سه فرکانسه در محل ترانشه درب آستانه با موقعیت جغرافیایی (39S, 327515E, 3699442N) برکه فرونشستی با خط چین مشکی ابتدا و انتهای ترانشه با خط قرمز نیز بر روی تصویر و اثر سطحی گسل با مثلث‌های قرمز مشخص شده است.

Figure 4. The 3-D model obtained of the GPS (RTK) surveying of the Darb-e-astaneh trench-digging area with geographical location (39S, 327515E, 3699442N). The pond is marked with a black dotted line, the beginning and end of the trench are also marked with a red line on the image, and the red triangles indicate fault trace.

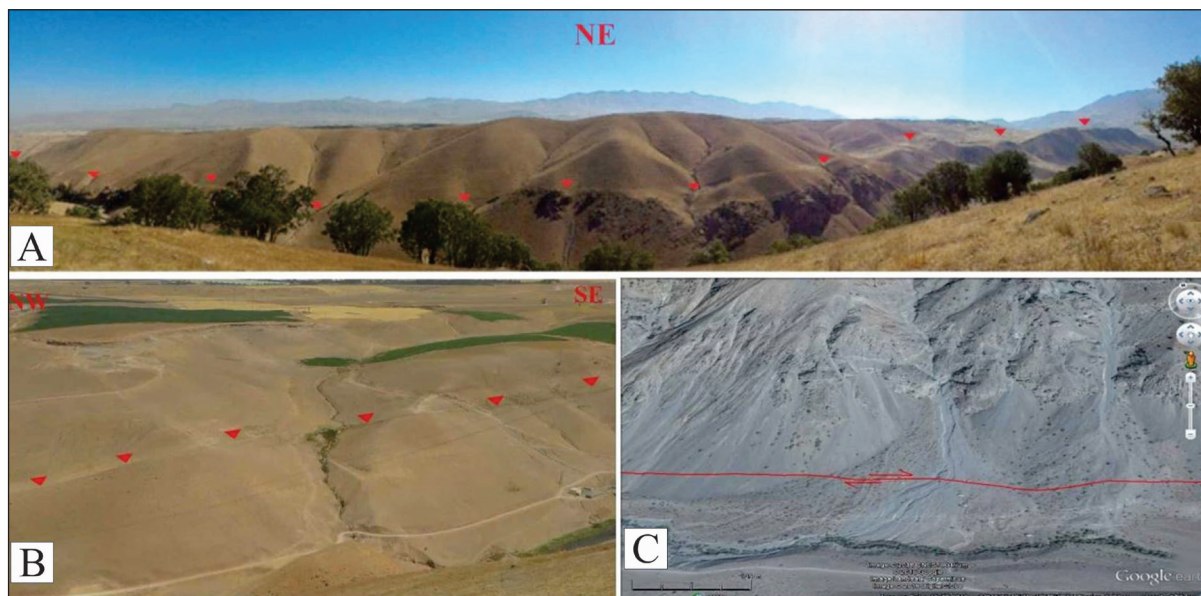
جوان در اطراف منطقه حفاری از عوامل انتخاب این جایگاه برای حفاری بودند (شکل ۵). طول این ترانشه حدود ۴۰ متر با پهنای ۱/۵ متر و ژرفای بین ۳/۵ تا ۴ متر می‌باشد، راستای ترانشه N54E و عمود بر روند گسل دورود N320 حفر گردیده است، موقعیت جغرافیایی ابتدا ترانشه و انتهای ترانشه به ترتیب  $33^{\circ} 25' 14''$  و  $49^{\circ} 08' 42''$  و  $33^{\circ} 25' 13''$  و  $49^{\circ} 08' 40''$  می‌باشد (شکل ۶). پس از حفاری با تمیز کردن دیواره خاوری و شبکه‌بندی ۱ متر در ۱ متر لوگ پارینه‌لرزه‌شناسی ۳۱ متر از دیواره جنوب‌خاوری با مقیاس ۱:۲۰ تهیه گردید (شکل ۷). در ترانشه دو پهنه گسلی A و B در گستره‌های ۰ تا ۴ و ۱۴ تا ۲۴ شناسایی شده است (شکل ۸).

## ۳- داده‌ها و اطلاعات

### ۳-۱- انطباق زمین‌لرزه‌های پارینه

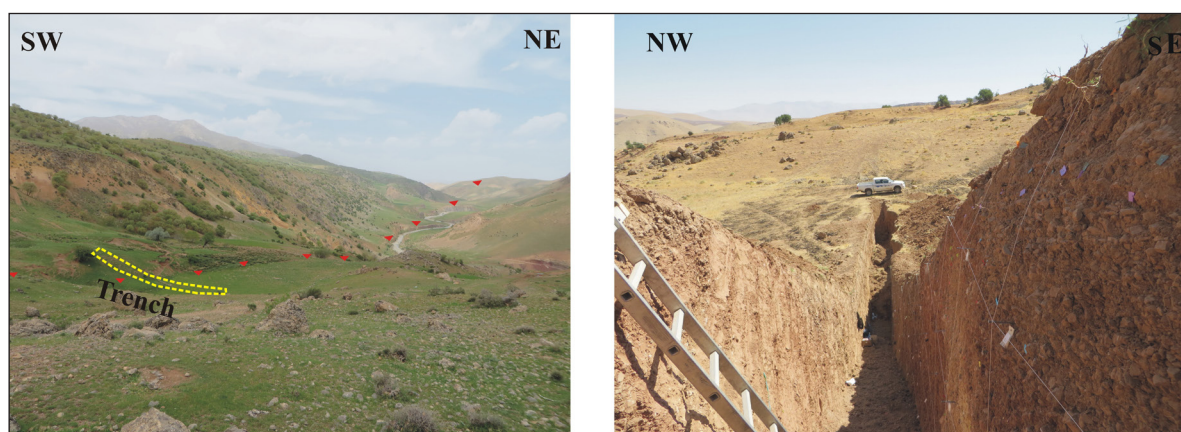
با استفاده از نتایج حاصل از سن‌سنجی نمونه‌های با دو روش  $C^{14}$  و OSL و انطباق زمان‌چینه در سراسر ترانشه سعی شد، تا زمین‌لرزه‌های شناسایی شده در بلوک‌های مختلف با یکدیگر مقایسه و ارتباط زمانی آن‌ها برقرار گردد. بنابراین، دست کم ۹ زمین‌لرزه پارینه در ترانشه درب آستانه شناسایی شده است، شکل ۸ انطباق لوگ دو پهنه گسلی (A و B) داخل ترانشه را بر روی دیواره نشان می‌دهد.

از جمله دلایل انتخاب این محل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:  
 - احتمال جوان بودن سن رویدادهای لرزه‌ای پارینه با توجه به ارتفاع کم افزاز گسل،  
 - شواهد ریخت‌زمین‌ساختی دلالت بر وجود محیط برکه فرونشستی،  
 - وجود آبراهه‌های جابه‌جاشده کوچک (جوان) و کچ‌شدگی مخروط‌افکنه‌ها (شکل ۵)،  
 - قرارگیری مناطق مسکونی و نظامی چون صنایع زرهی بنی‌هاشم،  
 - خط راه آهن دورود- شهرستان‌های دورود، ازنا و بروجرد،  
 - حدود صدها روستا با جمعیت بیش از ۵۰۰ هزار نفر در حریم گسل دورود،  
 - دسترسی آسان به اثر گسل جهت حفاری و تهیه لوگ از دیواره‌ها،  
 مدل ارتفاعی تهیه شده با استفاده از برداشت GPSRTK در شکل ۴ آورده شده است که در آن محل ترانشه درب آستانه با خط بنفش مشخص شده همچنین ابتدا و انتهای ترانشه نیز مشخص شده است. ترانشه درب آستانه بر روی محل گسیخت سطحی زمین‌لرزه ۱۹۰۹ سیلاخور در ۱ کیلومتری روستای درب آستانه و ۲ کیلومتری رومرکز زمین‌لرزه ۱۹۰۹ در فاصله ۹/۵ کیلومتر جنوب خاوری شهرستان دورود در مسیر جاده گهر در منطقه حفاظت شده اشتران‌کوه حفاری شد. شواهد صحرایی همچون گسیختگی راست‌بر کاتال‌های آبراهه‌ها، کچ‌شدگی مخروط‌افکنه، برکه فرونشستی و پله گسلی از جمله شواهد دگرریختی



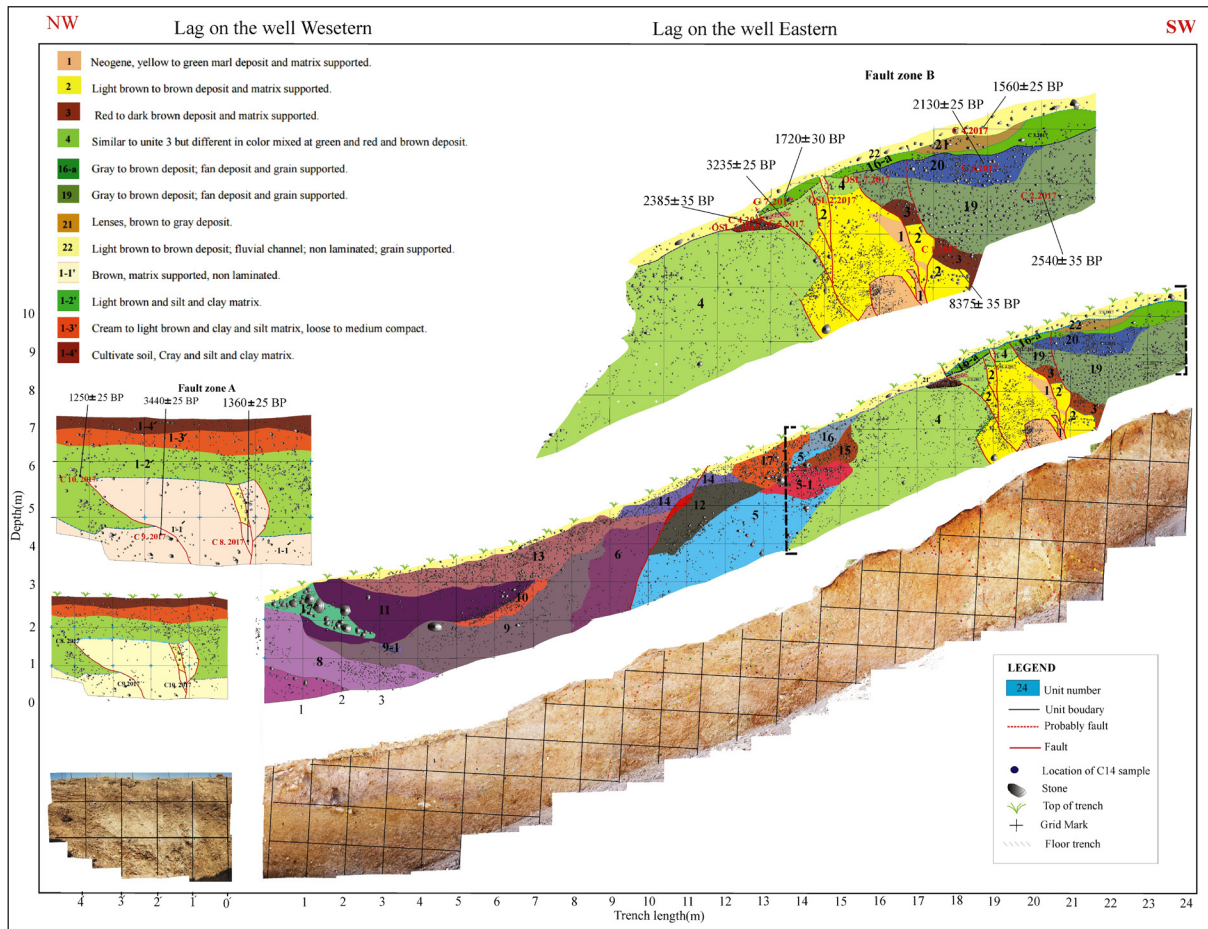
شکل ۵- شواهدی از عملکرد گسل دورود a و b) آبراهه‌های جابه‌جا شده (جنوب اراضی صنایع زرهی بنی هاشم) (سوی نگاه شمال تا شمال‌خاور) (39S, 324656 E,) (c) مخروط‌افکنه کج شده در مسیر جاده گهر (3701892 N و (39S, 337338 E, 3689237 N).

Figure 5. Evidence of the Dorud Fault's across: a, b) Displaced drainage (south of Bani Hashem Armored Industries Lands) (looking north to northeast) (39S, 324656 E, 3701892 N) and c) Tilted fan the Gohar Road (39S, 337338 E, 3689237 N).



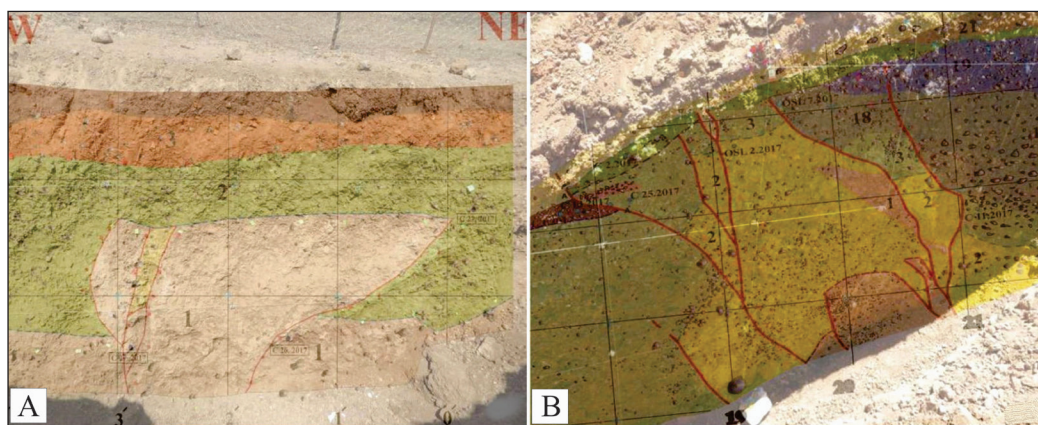
شکل ۶- تصویر صحرایی سایت حفاری شماره ۱ با خط چین زرد نشان داده شده در ۵۰۰ متری روستای درب آستانه در مسیر جاده گهر در فاصله ۱ کیلومتر از رومرکز زمین لرزه ۱۹۰۹ بر روی برکه فرونشستی است (اثر سطحی گسل گسل با مثلث‌های قرمز و محل حفاری با خط چین زرد مشخص است) (39S, 327498 E, 3699432 N) (Kamali et al., 2023).

Figure 6. Field photograph excavation site No. 1 shown with a yellow dashed line, 500 meters from Darb-e- astaneh village on the Gohar road, 1 km from the epicenter of the 1909 earthquake, on a pond (the red triangles indicate fault trace and the excavation location is indicated by a yellow dashed line) (39S, 327498 E, 3699432 N) (Kamali et al., 2023).



شکل ۷- در پایین عکس یکپارچه شده از دیوار ترانسه و بالا لوگ‌های تهیه شده از پهنه‌های گسلی A و B ترانسه درب آستانه، این ترانسه در امتداد N54E حفر شده است (Kamali et al., 2023)

Figure 7. Below is a Photomosaic from the trench wall and above interpretative log A and B zones, this trench was excavated along the N54E (Kamali et al., 2023).



شکل ۸- انطباق لوگ تهیه شده از دو پهنه گسلی ترانسه درب آستانه با دیواره ترانسه، (a) پهنه گسلی B و (b) پهنه گسلی A (موقعیت جغرافیایی 327442E, 3699501N)

Figure 8. Correspondence of the log prepared from the two fault zones of the Darb-e-astaneh trench with the trench wall, a) fault zone B and b) fault zone A (geographical location 327442E, 3699501N).

زیرسطحی ۱۰/۸۳ کیلومتر و مساحت منطقه گسیختگی ۲۳۸/۸۱ کیلومتر مربع محاسبه شد (جدول ۲).

**Ev<sub>3</sub>**: بریده شدن واحد ۴ و تشکیل افزاز گسل توسط گسل‌های F2 است دلالت بر رخداد زمین‌لرزه‌ای برابر با Ev<sub>3</sub> دارد. با توجه به عدد سنی حاصل از نمونه DT1.2017.C7 برابر با ۱۷۲۰±۳۰BP سن رخداد Ev<sub>3</sub> پیش از این زمان و پس از نهشتگی واحد ۴ برابر با سن نمونه DT1.2017.C5 برابر با ۲۲۳۵±۲۵BP بوده است (شکل‌های ۹-i و j). مجموعه مؤلفه جابه‌جایی قائم بر روی شاخه گسلی F3 برابر با ۱۹±۰/۴ سانتی‌متر افق لرزه‌ای این رویداد در قاعده a-۱۶ بین طول ۱۷ تا ۲۴ ترانسه را شامل می‌شود. بیشینه بزرگای لرزه‌ای ۶/۷۸ و کمینه بزرگای لرزه‌ای ۶/۵ می‌باشد (جدول ۱)، همچنین طول گسیختگی سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۴۱/۳۰-۱۴/۱۹ و ۲۱/۸۷ کیلومتر، پهنای شکستگی زیرسطحی ۱۴/۵۸ کیلومتر و مساحت منطقه شکستگی ۴۶۰/۲۵ کیلومتر مربع و مؤلفه لغزش شیئی برابر ۰/۱۸±۰/۱ متر و لغزش امتدادی برابر با ۰/۱۲±۰/۲ متر محاسبه شد (جدول ۲).

**Ev<sub>4</sub>**: نهشته‌های گوه واریزه‌ای C1 حاصل از فرسایش افزاز گسل شکل گرفته در نتیجه مولفه شیب‌لغزی گسل F2 به صورت عادی (نرمال)، بیانگر رخداد زمین‌لرزه پیش از نهشتگی واحد C1 و پس از واحد ۴ است (شکل‌های ۹-k و l). بیشینه ستبرای گوه برابر با ۲۱/۷۳cm و جابه‌جایی قائم بالای واحد ۴ (نزدیک‌ترین جابه‌جایی به واحد C1) نیز ۱۹/۴۳ cm اندازه‌گیری شده است. از این‌رو، رسوبات گوه واریزه‌ای حاصل فرسایش و رسوب‌گذاری مخلوطی از واحدهای ۴ و a-۱۶ می‌باشد. افق لرزه‌ای این رویداد قاعده واحد C1 است. با توجه به عدد سنی حاصل از نمونه DT1.2017.C6 برابر با ۲۳۸۵±۳۵BP سن رخداد Ev<sub>3</sub> پیش از این زمان و پس از نهشتگی واحد ۴ بوده است (جدول ۱). افق لرزه‌ای این رویداد در قاعده C1 بین طول ۱۷/۳۰ تا ۱۸/۳۰ ترانسه می‌باشد.

**Ev<sub>5</sub>**: قطع شدگی واحد ۴ به ترتیب توسط گسل‌های F1، F2، F3، F4 و دفن گسل‌های F1 و F3 توسط نهشته‌های واحد ۴ که دلالت بر رخداد زمین‌لرزه‌ای برابر با Ev<sub>5</sub> دارد (شکل‌های ۹-m و n). مجموعه مؤلفه جابه‌جایی قائم بر روی شاخه گسل‌های F1، F2، F3، F4 برابر با ۱۰±۴ سانتی‌متر با توجه به عدد سنی حاصل از نمونه DT1.2017.C5 برابر با ۲۲۳۵±۲۵BP سن رخداد Ev<sub>5</sub> پیش از این زمان و پس از نهشتگی واحد ۳ به سن ۸۳۷۵±۳۵BP بوده است. بیشینه بزرگای لرزه‌ای ۷/۳۶ و کمینه بزرگای لرزه‌ای ۷/۲ می‌باشد (جدول ۱)، همچنین طول گسیختگی سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۱۵۸/۰۶-۴۶/۹ و ۹۵/۲۷ کیلومتر، پهنای شکستگی زیرسطحی ۹۱/۳۴ کیلومتر و مساحت منطقه شکستگی ۲۱۸۸/۲۵ کیلومتر مربع و مؤلفه لغزش شیئی برابر ۰/۱±۰/۹۸ متر و لغزش امتدادی برابر با ۰/۲±۰/۳۶ متر محاسبه شده است (جدول ۲). افق لرزه‌ای این رویداد در قاعده ۴ بین طول ۱۸/۳ تا ۱۹/۶ ترانسه را شامل می‌شود.

**Ev<sub>6</sub>**: قطع شدگی واحدهای ۳ به ترتیب توسط گسل‌های F10 و دفن گسل F11 توسط نهشته‌های واحد ۲۰ و همچنین دفن گسل F11 دلالت بر رخداد زمین‌لرزه‌ای برابر با Ev<sub>6</sub> دارد (شکل‌های ۹-o و p). با توجه به عدد سنی حاصل از نمونه DT1.2017.C2 برابر با ۸۳۷۵±۳۵BP سن رخداد Ev<sub>6</sub> پیش از این زمان و پس از نهشتگی واحد ۲ به سن ۶۶۶۲۰±۵۰۰۰ بوده است (جدول ۱). مجموعه مؤلفه جابه‌جایی قائم بر روی شاخه گسل F10 برابر با ۶۰±۳ سانتی‌متر بیشینه بزرگای لرزه‌ای ۷/۱۸ و کمینه بزرگای لرزه‌ای ۷/۰۹ می‌باشد همچنین طول گسیختگی سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۱۱۷/۴-۳۲/۵ و ۶۸/۹۸ کیلومتر، پهنای شکستگی زیرسطحی ۲۳/۱۲ کیلومتر و مساحت منطقه شکستگی ۱۳۲۷/۳۴ کیلومتر مربع و مؤلفه لغزش شیئی برابر ۰/۱±۰/۵۹ متر و لغزش امتدادی برابر با ۱/۳۱±۰/۲ متر محاسبه شد (جدول ۲). افق لرزه‌ای این رویداد در قاعده ۳ بین طول ۲۰/۵ تا ۲۱/۶ ترانسه را شامل می‌شود.

**Ev<sub>7</sub>**: قطع شدگی واحد ۲ به ترتیب توسط گسل‌های F5، F6، F7، F8 و دفن این گسل‌ها توسط نهشته‌های واحد ۲ پوشیده شده است و همچنین دفن گسل‌های F7،

پس از انطباق رویدادها در سراسر ترانسه، از آخرین زمین‌لرزه (جوان‌ترین) تا اولین رویداد شناسایی شده در ترانسه به ترتیب با اعداد یونانی (Ev) مشخص شده‌اند. رخدادهای Ev<sub>1</sub> تا Ev<sub>7</sub> به پهنه گسلی B و رخدادهای شناسایی شده Ev<sub>1</sub>، Ev<sub>2</sub>، Ev<sub>3</sub> به پهنه گسلی A تعلق دارند.

**Ev<sub>1</sub>**: قطع شدگی واحد ۱-۱' به ترتیب توسط گسل‌های F1' و F4' و دفن این گسل توسط نهشته‌های واحد ۲-۲' پوشیده شده است و همچنین دفن گسل‌های F1 و F4 دلالت بر رخداد زمین‌لرزه‌ای برابر با Ev<sub>1</sub> دارد. با توجه به عدد سنی حاصل از نمونه DT1.2017.C10 برابر با ۱۲۵۰±۲۵BP سن رخداد Ev<sub>1</sub> پیش از این زمان و پس از نهشتگی واحد ۱-۱' به سن ۱۳۶۰±۲۵BP بوده است (شکل‌های ۹-a و b). این رویداد برابر با جوان‌ترین رخداد زمین‌لرزه ثبت شده در پهنه گسلی ابتدای ترانسه درب آستانه و بر روی گسل دورود است. مجموعه مؤلفه جابه‌جایی قائم بر روی شاخه گسل‌های F1' و F4' برابر با ۱۸۰±۶ سانتی‌متر، بیشینه بزرگای لرزه‌ای ۷/۶ و کمینه بزرگای لرزه‌ای ۷/۴ می‌باشد (جدول ۱)، همچنین طول گسیختگی سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۷۰/۴۶-۱۳۳/۹۶ و ۱۳۳/۹۶ کیلومتر، پهنای شکستگی زیرسطحی ۳۵/۵۶ کیلومتر و مساحت منطقه شکستگی ۳۵۵۶/۳۱ کیلومتر مربع و مؤلفه لغزش شیئی برابر ۱/۷۶±۰/۱ متر و لغزش امتدادی برابر با ۱۱/۵۷±۰/۲ متر محاسبه شد. افق لرزه‌ای این رویداد در قاعده واحد ۲-۲' بین طول ۰' تا ۱' و ۲/۸' تا ۴-۴' ترانسه را شامل می‌شود (جدول ۲). شوربخانه، به دلیل کمبود اطلاعات از زمین‌لرزه‌های تاریخی نمی‌توان انطباقی بین نتایج به‌دست آمده با داده‌های تاریخی برقرار کرد، چرا که حدود ۲۵۶ سال اختلاف نشان مشاهده می‌شود.

**Ev<sub>2</sub>**: شکستگی پر شده با نهشته‌های رسوبی واحد ۲-۲' پر شده است Ev<sub>2</sub>' دلالت بر رخداد زمین‌لرزه‌ای پیش از زمان نهشتگی واحد ۲-۲' دارد. این شکستگی با بیشینه ژرفای و عرض به ترتیب برابر با ۶۲/۳۷cm و ۱۱/۸۷cm در قاعده واحد ۱-۱' دیده می‌شود (شکل‌های ۹-e و d). با توجه به عدد سنی حاصل از نمونه DT1.2017.C8 برابر با ۱۳۶۰±۳۵BP، سن رخداد Ev<sub>2</sub>' پیش از این زمان و پس از نهشتگی واحد ۱-۱' به سن ۳۴۴۰±۲۵BP بوده است (جدول ۱). بیشینه بزرگای لرزه‌ای ۷/۶ و کمینه بزرگای لرزه‌ای ۷/۴ می‌باشد، همچنین طول گسیختگی سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۷۰/۴۶-۱۳۳/۹۶ و ۱۳۳/۹۶ کیلومتر، پهنای شکستگی زیرسطحی ۳۵/۵۶ کیلومتر، مساحت منطقه شکستگی ۳۵۵۶/۳۱ کیلومتر مربع و افق لرزه‌ای این رویداد قاعده واحد ۲-۲' بین طول ۱' تا ۴/۱۰' ترانسه را شامل می‌شود (جدول ۲).

**Ev<sub>3</sub>**: بریده شدن خاک سطحی توسط گسل F2 از نظر سنی پس از نهشته شدن واحد ۲۲ (خاک سطحی) نمونه DT1. 2017.C4 سن برابر با ۱۵۶۰±۲۵BP، مجموع جابه‌جایی قائم روی سطح گسل F2 برابر ۹/۳۷ سانتی‌متر است (شکل‌های ۹-n و f). بیشینه بزرگای لرزه‌ای ۶/۵ و کمینه بزرگای لرزه‌ای ۵/۷ می‌باشد (جدول ۱)، همچنین طول گسیختگی سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۲۱/۰۳-۸/۳۱ و ۲۱/۸۷ کیلومتر، پهنای شکستگی زیرسطحی ۱۰/۸۳ کیلومتر و مساحت منطقه شکستگی ۲۳۸/۸۱ کیلومتر مربع و مؤلفه لغزش شیئی برابر ۰/۱±۰/۸۸ متر و لغزش امتدادی برابر با ۰/۲±۰/۲ متر محاسبه شد (جدول ۲). این رویداد برابر با جوان‌ترین رخداد زمین لرزه ثبت شده در پهنه گسلی B ترانسه درب آستانه و بر روی گسل دورود است.

**Ev<sub>4</sub>**: شکاف با نهشته‌های رسوبی خاک سطحی سست پر شده است. واحد ۲۳ دلالت بر رخداد زمین‌لرزه‌ای پیش از زمان نهشتگی واحد ۲۳ دارد. دفن گسل‌های F10 و F9 توسط خاک سطحی این شکستگی با بیشینه ژرفای و عرض به ترتیب برابر با ۳۴/۲ cm و ۷/۲۴cm در قاعده واحد ۲۳ دیده می‌شود، با توجه به عدد سنی حاصل از نمونه DT1.2017.C4 برابر با ۱۵۶۰±۲۵ BP، سن رخداد Ev<sub>4</sub> قبل از این زمان و پس از نهشتگی واحد a-۱۶ بوده است (شکل‌های ۹-g و h). افق لرزه‌ای این رویداد قاعده واحد ۲۳ بین طول ۱۸ تا ۲۴ ترانسه را شامل می‌شود. بیشینه بزرگای لرزه‌ای ۶/۵ و کمینه بزرگای لرزه‌ای ۵/۷ می‌باشد (جدول ۱)، همچنین طول گسیختگی سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۲۱/۰۳-۸/۳۱ و ۲۱/۸۷ کیلومتر، پهنای گسیختگی

همچنین طول گسیختگی سطحی و زیرسطحی به ترتیب ۲۸/۰۵-۹۵/۲۷ و ۶۱/۸ کیلومتر، پهنای شکستگی زیرسطحی ۲۱/۲۸ کیلومتر و مساحت منطقه شکستگی ۱۰۹۶/۲۸ کیلومتر مربع و مولفه لغزش شیبی برابر ۰/۴۷±۰/۱ متر و لغزش امتدادی برابر با ۰/۸۴±۰/۲ متر محاسبه شد (جدول ۲). این رویداد در قاعده ۲ بین طول ۱۹/۶ تا ۲۰/۷ ترانسه را شامل می‌شود.

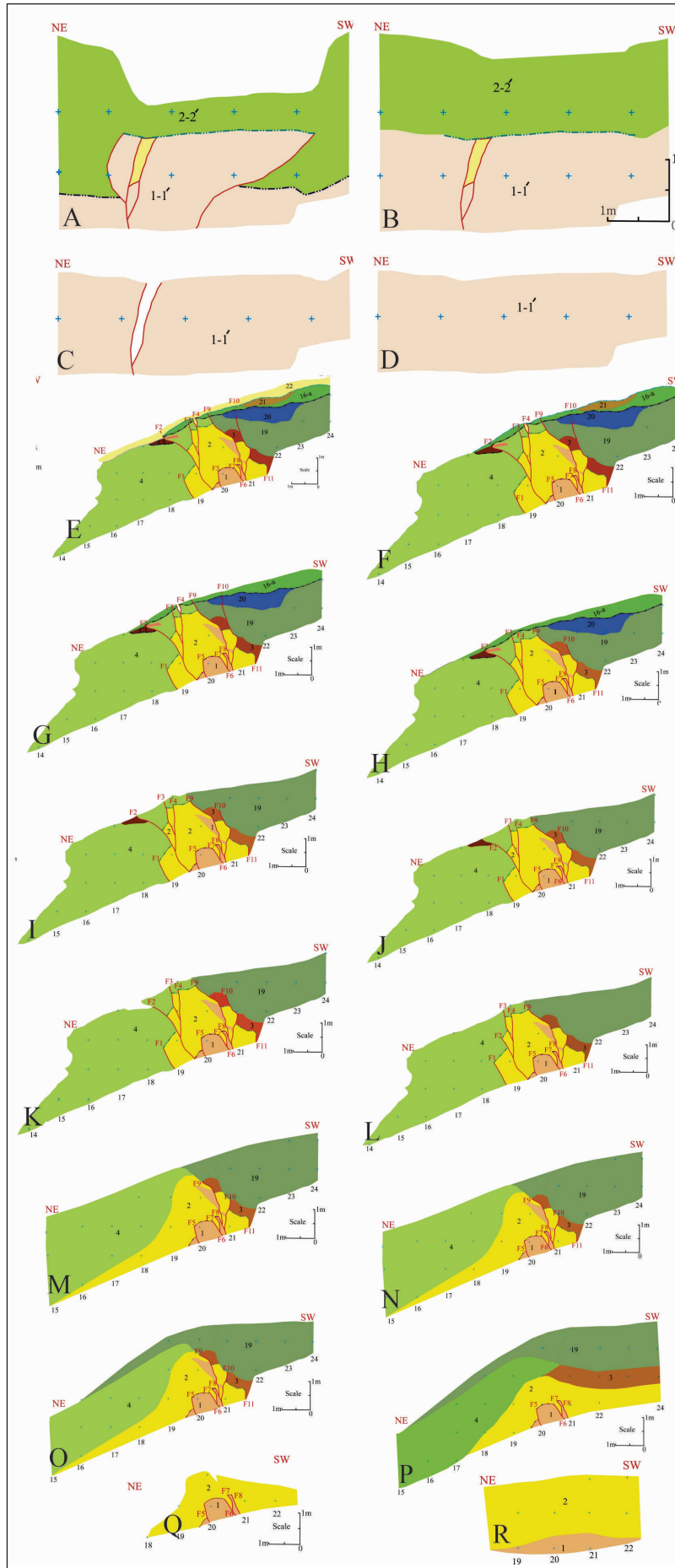
F6، F5 و F8 دلالت بر رخداد زمین لرزه‌ای برابر با  $E_{v7}$  دارد. با توجه به عدد سنی حاصل از نمونه DT1.2017.OSL2 برابر با ۶۶۶۲۰ سن رخداد  $E_{v6}$  پیش از این زمان و پس از نهشتگی واحد ۱ بوده است (شکل‌های ۹-q و ۲). مجموعه مؤلفه جابه‌جایی قائم بر روی شاخه گسل‌های F5، F6، F7 و F8 برابر با ۵۰±۰/۱ سانتی‌متر افق لرزه‌ای بیشینه بزرگای لرزه‌ای ۷/۱۸ و کمینه بزرگای لرزه‌ای ۶/۹ می‌باشد (جدول ۱)،

جدول ۱- برآورد مقادیر جابه‌جایی و بزرگای زمین لرزه‌های پارینه شناسایی شده در ترانسه درب آستانه دو پهنه گسلی A و B.

Table 1. Estimated displacement and magnitude values of identified paleoearthquakes in the Darb-e-astaneh trench of two fault zones A and B

Event	Age Cal BP	Event Horizon	Units	V (m)	H(m)	Ds (m)	Ss (m)	Net slip(m)	$M_w(AD)_{SS}$	$M_w(MD)_{SS}$	$M_w(AD)_N$	$M_w(MD)_N$	$M_w(AD)_G$	$M_w(MD)_G$	$M_w$
I	After 1560	Base of Unit 22	22	0.093±0.1	0.14	0.08±1	0.02±0.1	0.19±0.1	6.4	6.03	6.31	6.22	6.33	6.29	6.34
II	Before 1560-1720	Base of Unit22	22	Fissure size similar $E_{v1}$	0.16±0.10	0.08±0.1	0.02±0.1	0.19±0.1	6.4	6.03	6.31	6.22	6.33	6.29	6.34
III	Before 1720-2385	Base of Unit16-a	16-a	0.194±0.10	0.34±0.1	0.18±0.1	0.12±0.1	0.4±0.1	6.68	6.26	6.5	6.39	6.6	6.46	6.59
IV	Before 2385-3235	Base of C1	C1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	Before 3235-8375	Base of Unit4	4	1.04±0.10	1.87±0.1	0.98±0.1	3.61±0.1	2.14±0.1	7.33	6.84	6.99	6.85	7.2	6.94	7.1
VI	Before 8375-66620	Base of Unit3	3	0.63±0.10	1.13±0.1	0.59±0.1	1.31	1.29±0.1	7.13	6.68	6.85	6.71	7.02	6.79	7
VII	Before 66620	Base of Unit2	2	0.5±0.10	0.9±0.1	0.47±0.1	0.84±0.1	1.03±0.1	7.05	6.6	6.78	6.59	6.94	6.72	6.8
I'	Before 1250-1360	Base of Unit2	2	3.83±0.10	3.35±0.1	1.76±0.1	11.57±0.1	3.83±0.1	7.55	7.03	7.15	7.03	7.4	7.12	7.4
II'	Before 1360-3440	Base of Unit2	2	Fissure size similar $E_{v1}'$	3.35±0.1	1.76±0.1	11.57±0.1	3.83±0.1	7.55	7.03	7.15	7.03	7.4	7.12	7.4

Eq. (1) Net Slip=  $V_f / \sin \text{Rake} (\sim 29^\circ)$ , Eq. (2) Net Slip=  $H / \cos \text{Rake} (\sim 29^\circ)$ , Eq. (3) SS:  $MW = 7.04 + 0.89 \log(AD)$  (Wells and Coppersmith, 1994), Eq. (4) SS:  $MW = 6.81 + 0.78 \log(MD)$  (Wells and Coppersmith, 1994), Eq. (5) N:  $MW = 6.78 + 0.65 \log(AD)$  (Wells and Coppersmith, 1994), Eq. (6) N:  $MW = 6.61 + 0.71 \log(MD)$  (Wells and Coppersmith, 1994), Eq. (7) G:  $Mw = 6.93 + 0.82 \log(AD)$  (Wells and Coppersmith, 1994), Eq. (8) G:  $MW = 6.69 + 0.74 \log(MD)$  (Wells and Coppersmith, 1994), Eq. (9)  $D_s = (V \cdot \sin^{-1} \delta)$  (Hanks and Kanamori, 1979), Eq. (10) Net Slip=  $(D_s^2 + S_s^2)^{0.5}$  (Hanks and Kanamori, 1979 (AD: Average Displacement, MD: Maximum Displacement,  $V_f$ : Vertical component of displacement projected along the fault, V: Vertical Separation, H: Horizontal component of displacement,  $\delta$ : Dip of the fault plane, MW: Moment Magnitude,  $D_s$ : dip slip,  $S_s$ : strike slip



شکل ۹- چگونگی واحدهای برداشت شده در ترانشه درب آستانه در زمان رویداد زمین لرزه  $Ev_{1-1}$  تا  $Ev_7$ ، پهنه گسلی A:  $Ev_{1-1}$ : بریده شدن واحد ۱-۱' توسط دو گسل شمالی و جنوبی در این پهنه گسلی، از نظر سنی حدود ۱۲۵۰ سال پیش است (a پس از رخداد و b پیش از آن)،  $Ev_{1-2}$ : شکستگی پرشده توسط واحد ۲-۲' از نظر سنی ۱۳۶۰ سال پیش است (c پس از رخداد و d پیش از آن)، و در پهنه گسلی B:  $Ev_1$ : بیانگر آخرین نهشت واحد ۲۲ است (e پس از رخداد و f پیش از آن)،  $Ev_2$ : شکستگی پر شده توسط واحد ۲۲ (خاک سطحی) معرف رخداد دوم در حدود ۱۵۶۰ سال پیش است پس از نهشته شدن a-۱۶ و پیش از واحد ۲۲ است (g پس از رخداد و h پیش از آن)،  $Ev_3$ : بریده شدن نهشته‌های گوه واریزه ای C1 نشان از رویداد سوم در حدود ۱۷۲۰ سال پیش، قبل از نهشت واحد a-۱۶ و پس از نهشت C1 است (i پس از رخداد و j پیش از آن)،  $Ev_4$ : نهشت گوه واریزه ای C1 بعد از تشکیل افزاز گسلی، رسوبات از واحد ۴ در پله گسلی نهشت می‌کند. از نظر زمانی حدود ۲۳۸۵ سال قبل است (k پس از رخداد و l پیش از آن)،  $Ev_5$ : تدفین گسل های F1 و F3 و بریده شدن واحد ۴ از نظر سنی حدود ۳۲۳۵ سال پیش است (m پس از رخداد و n پیش از آن)،  $Ev_6$ : تدفین گسل F11 و بریده شدن واحد ۳ از نظر سنی حدود ۸۳۷۵ سال پیش است (o پس از رخداد و p پیش از آن)،  $Ev_7$ : تدفین گسل های F6، F7 و F8 و بریده شدن واحد ۲ توسط گسل F5 از نظر سنی ۶۶۶۲۰ سال قبل است (q پس از رخداد و r پیش از آن).

Figure 9. How the units extracted in the Darb-e-Astaneh trench at the time of the earthquake  $Ev_{1-1}$  to  $Ev_7$ , fault zone A  $Ev_{1-1}$ : The cutting of unit  $Ev_{1-1}$  by the two northern and southern faults in this fault zone is about 1250 years ago. (a post-event and b pre-event),  $Ev_{1-2}$ : The fissure-filled with unit 2-2' is 1360 years old in age (c post-event and d pre-event), and in fault zone B  $Ev_1$ : Indicates the last earthquake event at the Darb-e- astaneh trench is younger than 1560 years and after the deposition of unit 22, (e post-event and f pre-event),  $Ev_2$ : The fissure-filled with unit 22 (surface soil) represents the second event about 1560 years ago, after the deposition of a-16 and before unit 22 (g post-event and h pre-event),  $Ev_3$ : The cutting of the C1 wedge deposits represents the third event about 1720 years ago, before the deposition of unit a-16 and after the deposition of C1 (i post-event and j pre-event),  $Ev_4$ : The deposition of the C1 alluvial wedge after the formation of the fault zone, deposits sediments from Unit 4 in the fault step. It is dated about 2385 years ago (k post-event and l pre-event),  $Ev_5$ : The burial of faults F1 and F3 and associated with cutting of Unit 4 is dated about 3235 years ago (m post-event and n pre-event),  $Ev_6$ : The burial of fault

F11 and associated with cutting of Unit 3 is dated about 8375 years ago (o post-event and p pre-event),  $Ev_7$ : The burial of faults F6, F7 and F8 and associated with cutting of Unit 2 by fault F5 is dated 66620 years ago (q post-event and r pre-event).

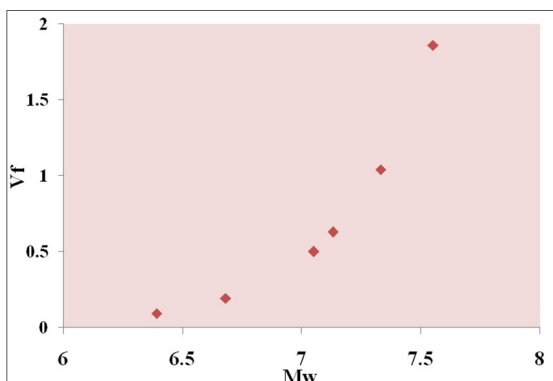
جدول ۲- نتایج حاصل از بررسی پارامترهای (AD, SRL, DRL, WID, RA) و u با استفاده از معادلات (۱۱ تا ۱۷).

Table 2. Results of survey the parameters (AD, SRL, DRL, WID, RA and u) using equations (11 to 17).

Event	MW	Average displacement(m) (Wells and Coppersmith 1994)	Surface Rupture Length(km) (Leonard 2010)	Surface Rupture Length(km) (Wells and Coppersmith 1994)	Subsurface Rupture Length(km) (Wells and Coppersmith 1994)	Subsurface Rupture width(km) (Wells and Coppersmith 1994)	Rupture Area(km <sup>2</sup> ) (Wells and Coppersmith 1994)	Maximum slip(m) (Kim and Anderson 2005)
I	6.3	0.14	16.98	8.31-21.03	19	9.77	186	0.71
II	6.3	0.14	16.98	8.31-21.03	19	9.77	186	0.71
III	6.6	0.32	25.7	14.19-41.30	30	13.18	380	0.72
V	7.1	1.14	51.28	46.98-187.06	66	22.38	1230	0.74
VI	7	0.91	44.66	32.5-117.48	56	19.95	954	0.73
VII	6.8	0.54	33.88	28.05-95.27	41	16.21	602	0.73
I'	7.4	2.51	77.62	70.46-309	104	30.19	2454	0.74

Eq. (11) Average displacement(m) (Wells and Coppersmith, 1994)  $M=7.04+0.89\log(AD)$ , Eq. (12) Surface Rupture Length(km) (Leonard 2010)  $M_w = \log(L)+b$  ( $a=1.67$ ,  $b=4.24$ ), Eq. (13) Surface Rupture Length(km) (Wells and Coppersmith, 1994)  $M_w = a \log+b$  ( $a=1.12(\pm 0.13)$ ,  $b=5.16(\pm 0.08)$ ), Eq. (14) Rupture Area(km<sup>2</sup>) (Wells and Coppersmith, 1994)  $M=4.07+0.98 \log(RA)$ , Eq. (15) Subsurface rupture length(km) (Wells and Coppersmith, 1994)  $M=4.38+1.49\log(RLD)$ , Eq. (16) Subsurface rupture width(km) (Wells and Coppersmith, 1994)  $M=4.06+2.25\log(WID)$ , Eq. (17) Maximum slip(m) (Kim and Anderson, 2005)  $\log(u)=4.38+1.49\log(L_s)$ .

استفاده از معادله ولز و کوپرسمیت (Wells and Coppersmith, 1994) به صورت نمودار نمایش داده شده است.



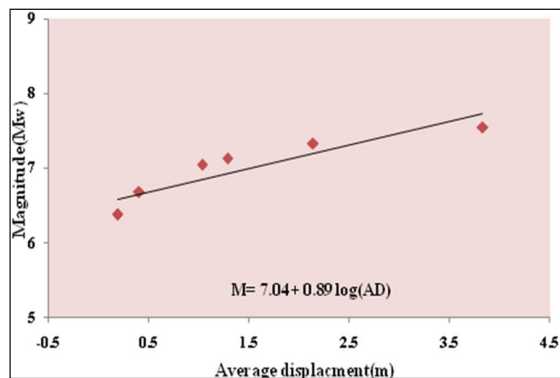
شکل ۱۰- طول جابه‌جایی قائم روی سطح گسل نسبت بزرگای زمین‌لرزه‌های رخداد مطابق با نتایج به‌دست آمده در جدول ۱ چنانچه مشخص است، هرچه بزرگا بیشتر باشد، جابه‌جایی افقی روی سطح گسل هم بیشتر است.

Figure 10. Vertical displacement length on the fault surface versus the magnitude of the earthquakes that occurred, according to the results obtained in Table (1). Hence, The higher magnitude, the larger the horizontal displacement on the fault surface.

تمامی مقادیر جابه‌جایی قائم و افقی با استفاده شواهد موجود در ترانسه برای هر رخداد لرزه‌ای پارینه و با در نظر گرفتن میانگین زوایه ریک به‌دست آمده ۲۹ درجه در سازوکار راستالغز با مولفه شیب‌لغز محاسبه شده است. بزرگای هر رخداد با استفاده از میانگین و بیشینه جابه‌جایی برآورد شده است. از این‌رو، بزرگای ۹ زمین‌لرزه پارینه شناسایی شده بر روی گسل دورود در ترانسه درب آستانه بین ۷/۴-۶/۳ در مقیاس Mw به‌دست آمد.

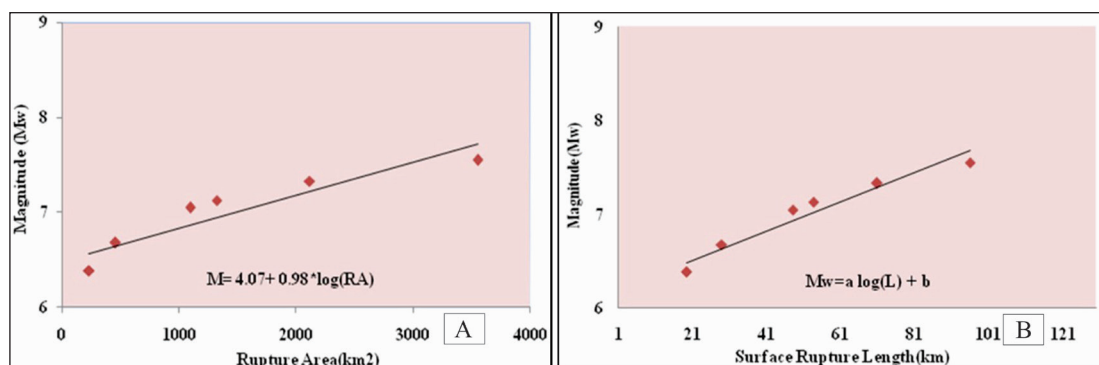
بر پایه روابط موجود میان جابه‌جایی در هر رویداد زمین‌لرزه، سازوکار گسلش مسبب زمین‌لرزه و بزرگای زمین‌لرزه (Wells and Coppersmith, 1994) بزرگای زمین‌لرزه‌های پارینه شناسایی شده در ترانسه درب آستانه در جدول ۱ آورده شده است

نسبت طول گسیخت سطحی به طول گسیخت زیرسطحی به بزرگا بستگی و رابطه مستقیم دارد. طول گسیختگی اگر بیشترین مقدار را داشته باشد، مقدار بزرگا هم بیشترین مقدار خواهد بود. متوسط جابه‌جایی زیرسطحی روی سطح گسل نسبت به بیشترین جابه‌جایی سطحی کمتر است اما نسبت به متوسط جابه‌جایی سطحی بیشتر است. تمامی پارامترهای محاسبه شده در جدول ۲ نسبت به بزرگا رابطه مستقیم دارند. هرچه بزرگا بیشتر باشد، طول گسیخت سطحی، طول گسیخت زیرسطحی، متوسط جابه‌جایی، بیشترین جابه‌جایی، عرض گسیخت زیرسطحی و مساحت (پهنه) گسیخت افزایش می‌یابند (Wells and Coppersmith, 1994). مقادیر به‌دست آمده از تمامی پارامترهای اندازه‌گیری شده نسبت به بزرگا برای منطقه با استفاده از معادلات (۱۱) تا (۱۷) محاسبه شده و در جدول ۲ آورده شده است. بر این اساس، نتایج حاصل در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ داده شده است، که همه پارامترها رابطه خطی با هم دارند. در شکل ۱۰ نتایج حاصل از محاسبه مقدار جابه‌جایی قائم روی سطح گسل با



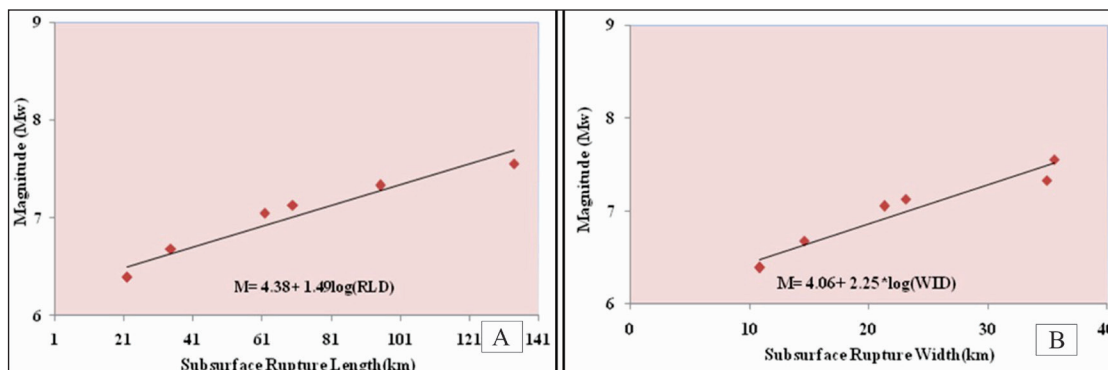
شکل ۱۱- مقادیر جابه‌جایی متوسط به‌دست آمده از رخداد‌های پارینه‌شناسی شده در ترانسه درب آستانه طبق جدول ۲ نسبت به بزرگای به‌دست آمده از رخداد با استفاده از رابطه ولز و کوپسمیت (Wells and Coppersmith, 1994).

Figure 11. Average displacement values obtained from the identified paleo-events in the Darb-e-astaneh trench according to Table 2 compared to the magnitudes obtained from the event using the relationship (Wells and Coppersmith, 1994).



شکل ۱۲- a) مقادیر مساحت پهنه شکستگی، b) طول گسیختگی سطحی به‌دست آمده از رخداد‌های پارینه‌شناسی شده در ترانسه درب آستانه طبق جدول ۲ نسبت به بزرگای به‌دست آمده از رخداد با استفاده از رابطه ولز و کوپسمیت (Wells and Coppersmith, 1994).

Figure 12- a) Values of rupture zone area, b) surface rupture length obtained from paleo-events identified in Darb-e-astaneh trench according to Table 2 versus to the magnitudes obtained from the event using the relationship (Wells and Coppersmith, 1994).



شکل ۱۳- a) مقادیر طول گسیختگی زیر سطحی و b) مقادیر پهنای گسیختگی زیر سطحی به‌دست آمده از رخداد‌های پارینه‌شناسی شده در ترانسه درب آستانه طبق جدول ۲ نسبت به بزرگای به‌دست آمده از رخداد با استفاده از رابطه ولز و کوپسمیت (Wells and Coppersmith, 1994).

Figure 13- a) Subsurface rupture length values and b) subsurface rupture width values obtained from paleo events identified in the Darb-e-astaneh trench according to Table (2) versus to the magnitudes obtained from the events using the equation (Wells and Coppersmith, 1994).

### ۳-۲- دوره بازگشت زمین لرزه‌های ترانسه درب آستانه

مقدار عددی نرخ لغزش سالانه یک گسل لرزه‌زا با دوره بازگشت رابطه معکوس دارد. بدین صورت که برای نرخ لغزش‌های میان مدت پایین، دوره بازگشت طولانی‌تری را می‌توان در نظر گرفت (McCalpin and Nishenko, 1996).

نخستین خوشه‌بندی (clustering) برحسب زمان رخداد زمین لرزه‌ها، بر روی یک قطعه از گسل توسط سیه (Sieh et al., 1989) بر روی قطعه Pallett Creek از گسل سن آندریاس انجام شده است. در این بررسی، ۱۰ زمین لرزه در جایگاه پالت کریک شناسایی شد و در چهار گروه (cluster) قرار داده شدند. به طوری که هر گروه شامل ۲ تا ۳ رخداد زمین لرزه است.

با در نظر گرفتن این موضوع که در ترانسه درب آستانه دو پهنه گسلی A و B به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است و در این دو پهنه گسلی حدود ۹ رخداد کهن شناسایی شد، که پس از بررسی و تطابق زمانی آن‌ها و وجود دو رخداد بزرگ‌تر از بازه هولوسن، این دو رخداد که به نام رخداد‌های  $Ev_9$  و  $Ev_8$  نام‌گذاری شده بود، کنار گذاشته شد، همچنین جوان‌ترین رخداد کهن  $Ev_1$  پهنه B جوان‌تر از ۱۵۶۰ سال است که سبب بریده شدن خاک سطحی شده است. به دلیل نداشتن داده‌های بیشتر سن سنجی و وجود دو رخداد پارینه‌شناسایی شده در پهنه A و نزدیک بودن بازه زمانی این دو رخداد با رخداد  $Ev_1$  به منظور بررسی دقیق‌تر و بروز خطا در محاسبه دوره بازگشت این رخداد هم صرف نظر شد. زمین لرزه‌های پارینه‌شناسایی شده در ترانسه درب آستانه را می‌توان در یک گروه جای داد (شکل ۱۴) که شامل ۶ رویداد می‌شود. دوره بازگشت میان زمین لرزه‌های رخداد درون گروه، با در نظر گرفتن دو رخداد کهن جوان‌تر نسبت به هم در بازه ۱۱۰ سال است. بر این اساس، بازه زمانی مورد بررسی بر روی گسل دورود در ترانسه درب آستانه را می‌توان به یک بخش با فعالیت لرزه‌ای و دو بخش بی‌لرزه یا با فعالیت لرزه‌ای کم تقسیم کرد. به طوری که دوره با فعالیت لرزه‌ای در حد فاصل ۱۲۷۵ تا ۱۵۸۵ و دوره بی‌لرزه و یا با فعالیت لرزه‌ای کم شامل بازه زمانی میان ۳۲۶۰ تا ۸۳۷۵ و ۸۳۷۶ تا ۶۶۶۲۰ به شمار آید، به بیان دیگر، بزرگای زمین لرزه‌های این رخدادها کمتر از مقدار مورد نیاز جهت ایجاد گسیختگی سطحی ( $Mw < 5.5$ ) و ثبت شواهد پارینه‌لرزه‌شناسی است (Wells and Coppersmith, 1994) و یا ممکن است نرخ فرسایش در منطقه خیلی بالا بوده که سبب شسته شدن افق‌های لرزه‌ای شده باشد. طول بازه زمانی با فعالیت لرزه‌ای بالا به طور میانگین در حدود  $28 \pm 220$  سال و تعداد رویداد زمین لرزه بزرگ در این بازه با ۶ رخداد است.

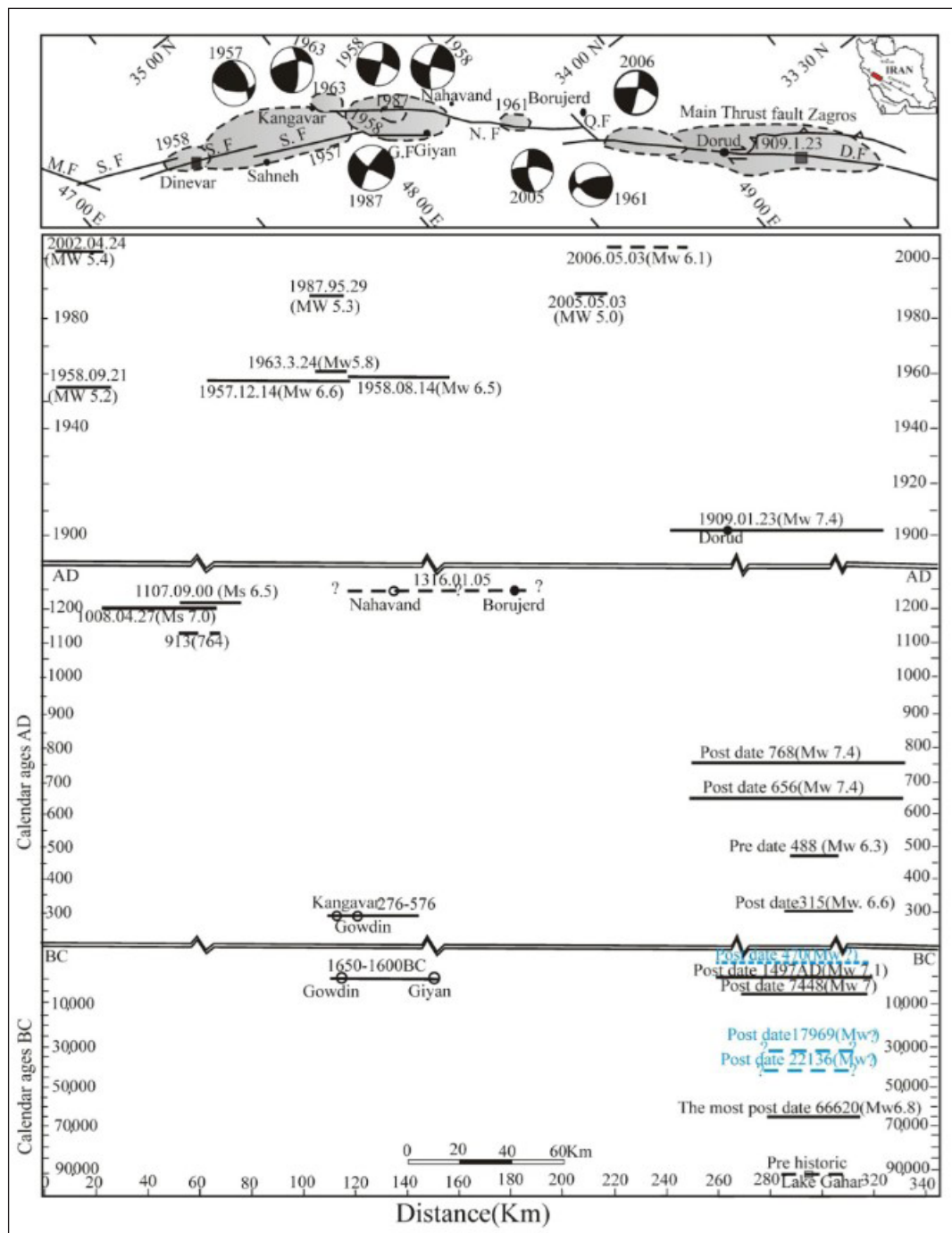
بر اساس این نتایج، احتمال وقوع رخداد زمین لرزه بزرگ بعدی بر روی گسل دورود با در نظر گرفتن دوره بازگشت تقریباً  $7 \pm 104$  سال با بزرگای تا ۷/۴ خواهد بود. این بازه زمانی را می‌توان با رسم بازه‌های زمانی کمترین و بیشترین مربوط به هر رخداد مشاهده کرد (شکل ۱۴). بر اساس نتایج حاصل و داده‌های موجود، احتمال رخداد زمین لرزه بزرگ بعدی در بخش سیلاخور در آینده نزدیک دور از انتظار نیست.

### ۴- بحث

مطالعات پیشین که در ارتباط با تحلیل فعالیت لرزه‌ای گسل دورود انجام گرفته است، به بررسی پیش لرزه و پس لرزه‌های دو زمین لرزه بزرگ منطقه در سال‌های ۱۹۰۹ و ۲۰۰۶ با استفاده از استرس کولمب و تصاویر رادار، بررسی میزان گسیخت و نبودهای لرزه‌ای در بخش شمالی گسل پرداخته‌اند. بر اساس مطالعات پیشین، گسل دورود توانایی لرزه‌ای زمین لرزه با بزرگای ۷/۱ ریشتر را دارد و دشت سیلاخور از نظر فعالیت‌های نوزمین‌ساختی با توجه به داده‌های کاتالوگ لرزه‌ای دارای نرخ فعالیت بالا می‌باشد، که در این پژوهش با انجام مطالعات پارینه‌لرزه‌شناسی به بررسی دوره بازگشت زمین لرزه، توانایی لرزه‌ای و این که زمین لرزه بعدی در کدام بخش گسل رخ خواهد داد، پرداخته شده است.

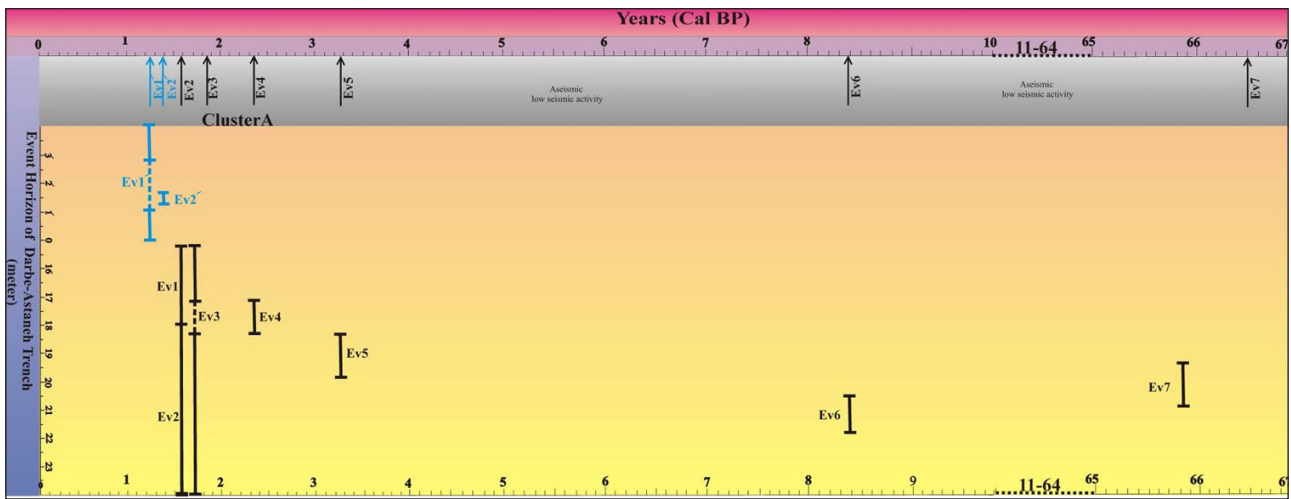
یک ترانسه در فاصله ۲ کیلومتری رومرکز زمین لرزه ۱۹۰۹ در ۱ کیلومتری روستای درب آستانه در مسیر جاده گهر بر روی برکه فرونشستی حاصل از عملکرد گسل به عنوان محیط با انرژی نسبتاً پایین که رسوبات به صورت دوره‌ای تجمع می‌یابند و شرایط تشکیل مواد آلی در این محیط فراهم است، به عنوان ساختگاه ترانسه در نظر گرفته شد. در این ترانسه ۹ رخداد لرزه‌ای پارینه‌شناسایی شد (شکل‌های ۱۴ و ۱۵)، که کهن‌ترین آن ( $Ev_9$ ) در فاصله زمانی AC ۷۱۶۲۰ تا ۶۱۶۲۰ هزار سال و جوان‌ترین رخداد در فاصله زمانی پس از ۱۲۲۵BC تا ۱۲۷۵ هزار سال به وقوع پیوسته‌اند. با توجه به این که کهن‌ترین افق لرزه‌ای نسبت نمونه سن‌یابی شده در فاصله حدود ۱۸۰ سانتی‌متر به دلیل فقدان مواد قابل نمونه‌برداری OSL (کوارتز و فلدسپات) و سن به دست آمده از این نمونه در محدوده سنی پیش از هولوسن قرار می‌گیرد، از بین ۹ رخداد مورد بررسی برای محاسبه دوره بازگشت کنار گذاشته شده است، همچنین افق رخداد  $Ev_8$  قدیمی‌تر از سن به دست آمده از واحد ۳ یعنی پیش از ۸۳۵۰ سال می‌باشد، که به احتمال زیاد، در بازه زمانی هولوسن قرار می‌گیرد. برای این منظور، این دو رخداد در مراحل اولیه محاسباتی کنار گذاشته می‌شود و سعی بر این است که رخداد‌های بازه زمانی پس از هولوسن را مورد ارزیابی قرار دهیم، همچنین در ادامه بررسی پهنه گسلی A دو رخداد پیش از ۱۲۵۰ سال شناسایی شده که به عنوان جوان‌ترین رخداد در این پهنه گسلی می‌باشند، با انطباق زمانی این دو پهنه با در نظر گرفتن این موضوع که جوان‌ترین رخداد پهنه گسلی B جوان‌تر از ۱۵۶۰ سال است، شاید بتوان احتمال انطباق این رخداد را با رخداد  $Ev_2$  شناسایی شده در پهنه گسلی A برقرار کرد. بر این اساس، جوان‌ترین رخداد پهنه گسلی در بازه زمانی BC 1720 <  $Ev$  < 1560 قرار می‌گیرد (شکل ۱۴). چنانچه در بالا اشاره شد، در این ترانسه ۶ رخداد مربوط به بازه زمانی جوان‌تر از ۸۳۵۰ سال مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو، در بازه زمانی ۱۲۵۰ تا ۳۲۶۰ که حدود  $50 \pm 2000$  سال است، ۶ رخداد با بزرگای بیشتر از ۶ به وقوع پیوسته است، ولی بازه زمانی ۳۲۶۰ تا ۸۳۵۰ حدود ۵۰۰ سال نبود لرزه‌ای مشاهده شده است، علت آن را می‌توان به نرخ بالای فرسایش به رسوب‌گذاری یا دگرشیمی نسبت داد. از جوان‌ترین رخداد پارینه‌شناسایی شده به سن ۱۲۱۰ (سن تقویمی BP) تا ۱۹۰۹ حدود  $37 \pm 700$  سال گسل مرحله بدون فعالیت لرزه‌ای را سپری کرده، با بررسی زمین لرزه‌های تاریخی رخ داده در طول گسل اصلی جوان زاگرس در این فاصله زمانی زمین لرزه‌ها به قطعات شمالی مانند نهاوند و صحنه مهاجرت کرده است، و زمین لرزه‌های رخ داده در طول گسل دورود خرد و کمتر از ۵/۵ بوده است. با در نظر گرفتن نبود چند صد ساله زمین لرزه بزرگ در طول گسل دورود، به نظر می‌رسد تنش لرزه‌ای بر روی قطعات کناری انتقال یافته است. بر این اساس، در فاصله هزاره دوم میلادی مهاجرت لرزه‌ای از جنوب‌خاور به سمت شمال‌باختر صورت گرفته است، و در اوایل قرن بیستم در سال ۱۹۰۹ زمین لرزه با بزرگای ۷/۴ و سپس زمین لرزه ۲۰۰۶ با بزرگای ۶/۱ بر روی گسل دورود رخ داده است، وقوع این دو رخداد بزرگ در بازه زمانی تقریبی ۱۰۰ سال نشان از شروع خوشه لرزه‌ای جدید دارد (شکل ۱۵). بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش رفتار لرزه‌ای گسل دورود در قالب خوشه‌ای صورت می‌گیرد، فاصله تکرار این رفتار حدود  $37 \pm 700$  سال است (شکل ۱۴) و بازه بیشترین و کمترین زمانی زمین لرزه‌ها حدود ۱۱۰ سال است، پس دوره بازگشت زمین لرزه‌های بزرگ این گسل  $7 \pm 104$  سال است که مطابق با زمین لرزه‌های کهن شناسایی شده توانایی لرزه‌ای زمین لرزه با بزرگای بین  $Mw \leq 6/6$  تا  $Mw \leq 7/4$  را دارد. از این رو، گسل دورود توانایی ایجاد زمین لرزه‌های با بزرگای تا ۷/۴ (بالای ۷) را دارد (شکل ۱۵).

به منظور بررسی دقیق‌تر جنبایی گسل دورود از داده‌های برداشت شده توسط پیمایش دستگاه RTK در سه ایستگاه استفاده شد (شکل ۱۶). مقادیر جابه‌جایی‌های تجمعی شیئی، امتدادی محاسبه شد (جدول ۳) (توضیحات بیشتر در زیر نویسی شکل ۱۷ و مقاله کمالی و همکاران (۱۳۹۷) آورده شده است).



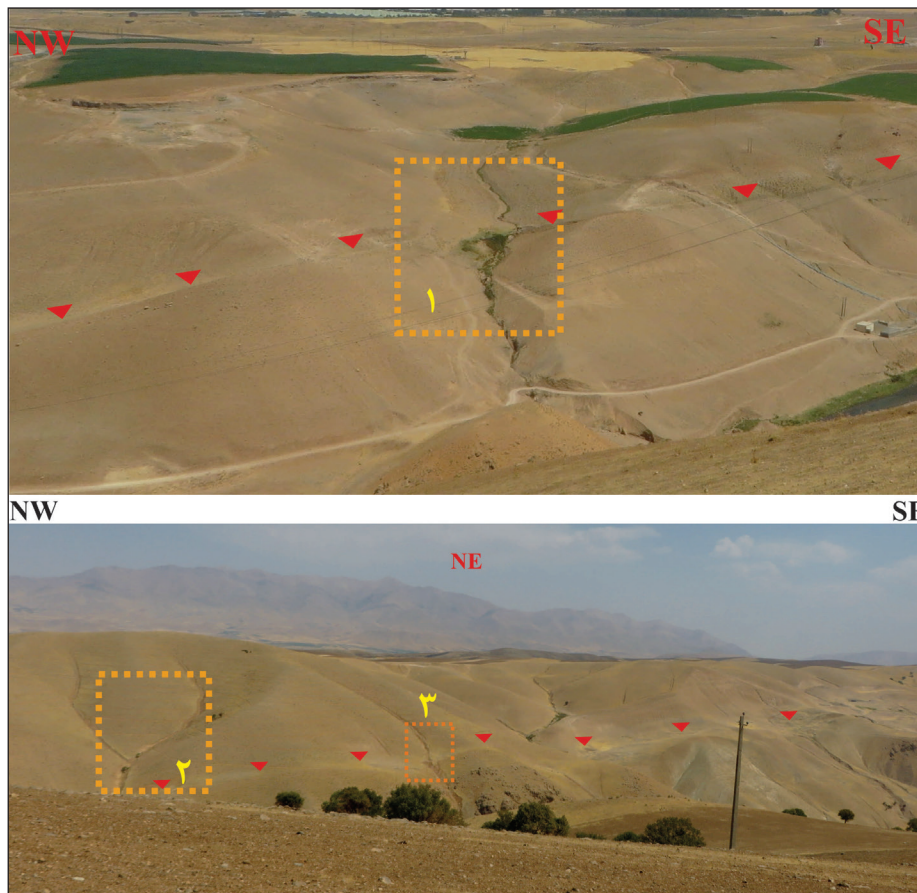
شکل ۱۴- انطباق زمین لرزه های دستگاهی، تاریخی در طول گسل اصلی زاگرس قطعات دورود (D.F)، قلعه حاتم (Q.F)، گارون (G.F)، نهاوند (N.F)، صحنه (S.F) و مروارید (M.F) و رخداد های پارینه شناسایی شده از مطالعات پارینه لرزه شناسی گسل دورود از ترانشه حفاری شده بر روی گسل دورود (سازوکار کانونی زمین لرزه های ۱۹۵۷ و ۱۹۵۸) و ۱۹۶۳ از نی و برازنگی (Ni and Barazangi, 1986) و ۱۹۸۷ از CMT Harvard و زمین لرزه ۲۰۰۶ از پیرت و همکاران (Peyret et al., 2008) با تغییر از کمالی و همکاران (Kamali et al., 2023) و بربرین (Berberain, 2014).

Figure 14. The correspondence of historical earthquakes along the main Zagros fault of the Dorud (D.F.), Qale Hatem (Q.F.), Garoon (G.F.), Nahavand (N.F.), Sahneh (S.F.) and Morvarid (M.F.) segments and the paleoseismological events identified from the paleoseismological studies of the Dorud fault from the trench excavation on the Dorud fault (focal mechanism of the 1957 and 1958 earthquakes) and 1963 from Ni and Barazangi, (1986) and 1987 from CMT Harvard and the 2006 earthquake from Peyret et al. (2008) with modification from Berberain (2014) and Kamali et al. (2023).



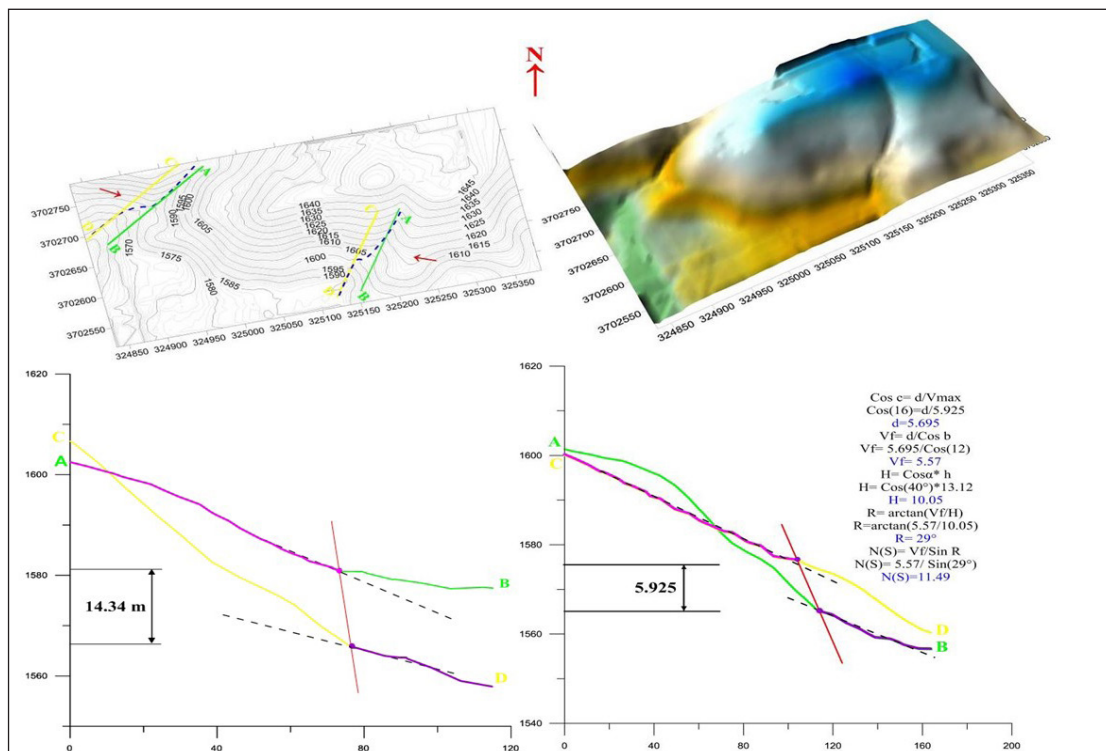
شکل ۱۵- انطباق شواهد زمین‌لرزه‌های پارینه با یکدیگر و شناسایی گروه A (خطوط آبی رنگ رخدادهای شناسایی شده مربوط به پهنه گسلی A و خطوط مشکی مربوط به پهنه گسلی B می‌باشند).

Figure 15. Adaptation of the paleoearthquake evidence with each other, and clustering. Blue bracket of the events identified for fault zone A and the black bracket associated with fault zone B. The vertical axis indicates the location of the event horizon of each event along the trench, and the bracket indicates the temporal constraints on the timing of earthquakes based on trenching studies.



شکل ۱۶- موقعیت ایستگاه‌های پیمایش شده توسط GPS دوفرکانسه و تصاویر صحرایی (مستطیل به رنگ زرد) نسبت به گسل دورود که با مثلث‌های قرمز مشخص شده است (بالا ایستگاه ۱ و پایین ایستگاه ۲ و ۳).

Figure 16. Location of stations surveyed by the GPS kinematics survey and field images (yellow rectangle) relative to the Dorud fault, which is marked with red triangles (station 1 above and stations 2 and 3 below).



شکل ۱۷- مدل ارتفاعی تهیه شده از برداشت‌های GPS دو فرکانسه و اندازه‌گیری جابه‌جایی افقی راست‌الغز راست‌بر خط‌الراس و آبراهه بریده شده با استفاده از نقشه توپوگرافی رقومی حاصل از برداشت‌های GPS کینماتیک. AB و CD: نیم‌رخ‌های عمودی در راستای خط‌الراس‌های جابه‌جا شده به منظور محاسبه مقدار تجمعی جابه‌جایی عمودی. کمترین مقدار جابه‌جایی عمودی عبارت است از مقدار اختلاف ارتفاع بین بلندترین نقطه بر روی مقاطع سبز رنگ و پست‌ترین نقطه بر روی مقطع زرد رنگ. بیشترین مقادیر جابه‌جایی عمودی عبارت است از مقدار جدایش عمودی بین تصاویر مقاطع فرودیواره و فرادیواره بر روی صفحه گسلی که در اینجا ۶۰ درجه به سمت جنوب شیب دارد. پست‌ترین نقطه بر روی مقطع زرد رنگ، بیشترین مقادیر جابه‌جایی عمودی عبارت است از مقدار جدایش عمودی بین تصاویر مقاطع فرودیواره و فرادیواره بر روی صفحه گسلی که در اینجا ۶۰ درجه به سمت جنوب شیب دارد.

Figure 17. The digital elevation model (DEM) obtained from the GPS kinematics survey and Measurement of horizontal displacement of the right-lateral strike-slip ridge and shifted crest line with by topography map based on GPS measurements. AB and CD: Vertical profiles along the offset crests' axes, with estimates of the cumulated vertical component, are shown on the diagram. The minimum value corresponds to the difference in height between the highest points in the violet footwall profiles and the lowest points in the orange hanging wall profiles which here dips 60 degrees to the south. The maximum value corresponds to the vertical separations between the projections of the footwall and hanging wall profiles on the fault, which here dips 60 degrees to the south.

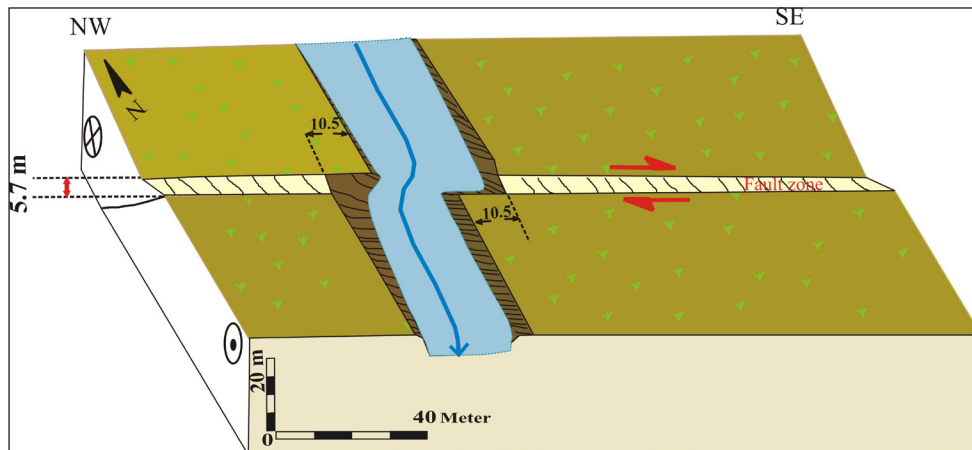
جدول ۳- میانگین میزان جابه‌جایی‌های به‌دست آمده در محل آبراهه جابه‌جاشده توسط گسل دورود، H(m): جابه‌جایی تجمعی امتدادی Vmax(m): جابه‌جایی تجمعی شیبی روی سطح زمین، Vf(m): جابه‌جایی تجمعی شیبی روی سطح گسل.

Table 3. The mean of the displacements obtained in the gully area due to Doroud Fault activity. H(m) = cumulative horizontal displacement; Vmax (m) = cumulative displacement of the slope on the ground; Vf (m) = displacement of the slope collapse on the fault surface.

H(m)	Vmax(m)	Vf(m)	Number
21.59	6.82	6.48	1
13.94	14.34	13.48	2
10.05	5.92	5.57	3

گسل که راست‌الغز راست‌بر است، بیشترین جابه‌جایی به سمت راست را می‌توان شاهد بود و در بخش چپ مدل آب‌کنند با ستبرای زیادتر مشاهده می‌شود زیرا گسل در حین فعالیت مطابق با مدل ارائه شده، به صورت راست‌بر عوارض را جابه‌جا کرده است.

در شکل ۱۸ مدل نمادینی از گسل دورود که آبراهه را در مسیر خود ۱۰/۵ متر به صورت جابه‌جایی تجمعی امتدادی و ۵/۶۹ متر به صورت جابه‌جایی تجمعی شیبی را بریده است نشان می‌دهد. طبق اندازه‌گیری صورت گرفته، مقدار جابه‌جایی افقی و شیبی تقریباً دو برابر است. در این شکل با توجه به سازوکار



شکل ۱۸- مدل نمادین تهیه شده از آبراهه جابه‌جاشده توسط پشته‌های مسدودکننده متاثر از جنبایی توسط گسل دورود، جابه‌جایی‌های امتدادی و شیبی حاصل از بررسی داده‌های حاصل از برداشت‌های GPS RTK (ایستگاه ۳) در روی آبراهه با موقعیت جغرافیایی (325157E، 3702585N).

Figure 18. A schematic model prepared of a drainage displaced by shutter ridges affected by movement by the Dorud fault, horizontal and vertical offsets resulting from the study of data from GPS RTK surveys (station 3) on the drainage with geographical location (325157E, 3702585N).

## ۵- نتیجه گیری

توانایی ایجاد گسیختگی سطحی با طول تقریبی ۴۵ کیلومتر را دارا می‌باشد. میانگین دوره بازگشت زمین‌لرزه‌های بزرگ بر روی این گسل به صورت تقریبی حدود  $7 \pm 104$  سال به دست آمده است. براساس نتایج به دست آمده در بازه زمانی  $37 \pm 700$  سال گسل دورود فاقد فعالیت لرزه‌ای بوده، که منطبق بر قرن‌های ۱۴ تا ۲۰ میلادی می‌باشد و فعالیت لرزه‌ای به شمال‌باختری گسل اصلی جوان و قطعات بعدی انتقال یافته است، سپس در قرن ۲۰ وجود دو زمین‌لرزه ۱۹۰۹ و ۲۰۰۶ در راستای گسل دورود نشان از بازگشت مجدد فعالیت لرزه‌ای بر روی این گسل می‌باشد، بر این اساس گسل دورود حدود یک قرن است که وارد سیکل خوشه‌ای جدید شده است.

نخستین دستاوردهای برآمده از مطالعات پارینه‌لرزه‌شناسی بر ترانشه درب آستانه اجرا شده بر گسله دورود در جنوب‌خاور شهر دورود، ارایه شده در این پژوهش، نشان از ۹ رخداد زمین لرزه‌ای کهن در بازه زمانی ۶۶۶۲۰ سال پیش می‌باشد (شکل ۱۵). از این ۹ رخداد، ۶ رخداد با بزرگی گشتاور لرزه‌ای بین ۶/۶ تا ۷/۴ در بازه زمانی ۳۲۵۰ تا ۱۲۵۰ سال گذشته به دست آمد، طبق نتایج به دست آمده در این مطالعه، گسل دورود در بازه زمانی  $50 \pm 2000$  سال متحمل ۶ رخداد با بزرگی بالای ۶ شده است. بر این اساس برای گسل دورود توانایی لرزه‌های زمین‌لرزه‌های با بزرگی تا ۷/۴ و میانگین لغزش به دست آمده برای هر رویداد  $1/61 \pm 0/1$  متر محاسبه گردید، همچنین

## کتابنگاری

زند سلیمی، آ.، ۱۳۸۸، بررسی علل احتمالی عدم رخنمون گسل‌های تراسی و زمین لرزه‌های پنهان مربوط به آنها در منطقه زاگرس، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، ۱۶۲ ص. کمالی، ز.، هیهات، م. ر.، نظری، ح و خطیب، م.م.، ۱۳۹۷، تحلیل ناهمسانی جنبشی گسل دورود (جنوب باختر ایران) با استفاده از فرکتال، کرنل و شواهد ریخت زمین ساختی، فصلنامه علوم زمین، پاییز ۹۷، سال ۲۸، شماره ۱۰۹، ص ۲۷ تا ۲۲، <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.87288.1125>.

## References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B., and Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process, *Geology Magazine* 1-34, <http://dx.doi.org/10.1017/S001675681100046X>.
- Ambraseys, N. N., and Melville, C. P. A., 1982. *History of Persian earthquakes*. Cambridge University Press, London, 219.
- Ambraseys, N.N., 2001. Reassessment of Earthquakes, 1900-1999, in the Eastern Mediterranean and the middle East. *Geophysics Journal International*. 145, 471-485, <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01396.x>.
- Bachmanov, D.M., Trifonov, V.G., Hessami, Kh. T., Kozhurin, T.P., Rogozhin, E.A., Hademi, M.C., and Jamali, F.H., 2004. Active faults in the Zagros and central Iran, *Tectonophysics* 380: 221-241, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.021>.
- Berberian, M., 1995. Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics, *Tectonophysics* 241:193- 224, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)00185-C](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00185-C).
- Berberian, M., 2014. Earthquakes and coseismic active faulting on the Iranian. *Developments in earth surface processes*, 17, 616, eBook ISBN: 9780444632975.
- Global CMT Web Page. <https://www.globalcmt.org/>
- Hanks, T. C., and Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. *Geophysics Research*, 84, 2348-2350, <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>.
- Hessami, K., 2001. *Active Faults Map in Iran*, International Seismology and Earthquake Engineering Institute, Tehran.
- Kamali, Z., Nazari, H., Rashidi, A., Heyhat, M. R., Khatib, M.M., and Derakhshani, R., 2023. Seismotectonics, Geomorphology and Paleoseismology of the Doroud Fault, a Source of Seismic Hazard in Zagros. *Applied Sciences*. 13 (6), 1-20. <https://doi.org/10.3390/app13063747>.
- Kamali, Z., Hayhat, M.R., Nazari, H., and Khatib, M.M., 2018. *The kinematic dissimilarity analyses of Dorud fault (Southwestern Iran), using by Fractal, Kernel and Morphotectonic, Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 28, 109. (In Persian). <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.87288.1125>.
- Kim, Y. S., and Anderson, D. J., 2005. The relationship between displacement and length of faults: a review. *Earth-Science Reviews*, 68, 317-334, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.06.003>.
- Leonard, M., 2010. Earthquake Fault Scaling: Self-consistent Relating of Rupture Length, Width, Average Displacement, and Moment Release. *Bullton Seismology Society American*. 100, 1971-1988.
- Malekzade, Z., Abbassi, M.R., Bellier, O., and Authemayou, C., 2007. Strain Partitioning in West-Central Zagros Fold and Thrust Belt: implication for Seismic Hazard Analysis, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering* 9: 85-98, [https://www.jsee.ir/article\\_240555.html](https://www.jsee.ir/article_240555.html).
- McCalpin, J.P., 2009. *Paleoseismology*. Academic Press Inc., Elsevier Inc., 2nd ed, 613, eBook ISBN: 9780080919980.
- McCalpin, J.P., and Nishenko, S.P., 1996. Holocene paleoseismicity, temporal clustering, and probabilities of future large ( $M > 7$ ) earthquakes on the Wasatch fault zone, Utah: *Journal of Geophysical Research*, V.101, no. B3, p.6233-6253, doi: 10.1029/95JB02851.
- Mirzaei, N., 2003. The most recent period of seismic activity in Dinavar segment of Main Recent Fault, Zagros mountains of western Iran, IUGG 2003, Suppro, Japan, Abstracts, P.B466.
- Ni, J. and Barazangi, M., 1986. Seismotectonics of the Zagros continental collision zone and a comparison with the Himalayas. *Journal of Geophysical Research* 91: doi: 10.1029/JB091iB08p08205. issn: 0148-0227.
- Peyret, M., Rolandone, F., Dominguez, S., Djamour, Y., and Meyer, B., 2008. Source model for the Mw 6.1, 31 March 2006, Chalan-Chulan Earthquake (Iran) from InSAR. *Terra Nova* 20, (2), 126-133, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3121.2008.00797.x>.
- Sepahvand, M. R., Yaminifard, F., Tatar, M., and Abbassi, M. R., 2012. Aftershocks study of the 2006 Silakhur earthquake (Zagros, Iran): seismological evidences for a pull-apart basin along the Main Recent Fault, Doroud segments. *Journal Seismology*, 16, 233-251, <http://dx.doi.org/10.1007/s10950-011-9266-3>.
- Sieh, K., Stuiver, M., and Brillinger, D., 1989. A more precise chronology of earthquakes produced by the San Andreas fault on Southern California, *Journal of Geophysical Research*, 94, 603-623, <https://doi.org/10.1029/JB094iB01p00603>.
- Talebian, M., and Jackson, J., 2004. A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran, *Geophysical Journal International* 156: 506-526, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02092.x>.
- Tchalenko, J. S., and Braud, J., 1974. Seismicity and structure of the Zagros (Iran): the Main Recent Fault between 33° and 35°N", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 227, 1-25, <https://doi.org/10.1098/rsta.1974.0044>.
- Wells, D. L., and Coppersmith, K. J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 84, 974-1002, <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>.
- Zand Salimi, A., 2009. *Investigation of possible causes of non-outcrop of thrust faults and their related hidden earthquakes in the Zagros region, M.s thesis, Shiraz University, 162 p. (In Persian)*.