



The Qumis Earthquake of 856 CE: A Review of Paleoseismological Studies of the Astaneh Fault System, Central Alborz

Hamid Nazari¹✉, Jean- François, Ritz², Magali Rizza³, Salamati Rizza⁴, Shenon Mahan⁵, Mohammad Ali Shokri⁶, Jean-Luk Michelot⁷, Michel Massault⁸, Mohammad Foroutan⁹, Shirin Zarei¹⁰

1. Corresponding author, Unesco Chair on Coastal Geo-Hazard Analysis, Research Institute for Earth Sciences, Tehran-Iran.

Email: hamidnazari@gmail.com

2. Laboratoire Géosciences Montpellier - UMR 5243, Université de Montpellier, France. Email: jean-francois.ritz@umontpellier.fr

3. Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement, Cerege, France. Email: rizza@cerege.fr

4. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. Email: salamati.reza@gmail.com

5. US Geological Survey, Box 25046, M.S. 974, Denver CO 80225, USA. Email: smahan@usgs.gov

6. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. Email: Geo.persian@gmail.com

7. Umr Ides, Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France. Email: jean-francois.ritz@umontpellier.fr

8. Umr Ides, Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France. Email: jean-francois.ritz@umontpellier.fr

9. Faculty of Geology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: foroutan.md@ut.ac.ir

10. Unesco Chair on Coastal Geo-Hazard Analysis, Research Institute for Earth Sciences, Tehran, Iran.

Email: shirinzareii368@yahoo.com

Article Info Abstract

Article Type:
Research Article

Article History:

Received:
13 May 2023

In Revised Form:
6 August 2023

Accepted:
4 November 2023

Published Online:
18 April 2024

Keywords:

The Astaneh Fault is classically described as the source of the most destructive seismic event in the history in Northeastern Iran, the 856 CE Qumis earthquake with an estimated magnitude between 7.4 and 7.9. In this article, based on the results obtained from paleoseismological researches from trenches AT1, AT2, AT3, AT4 and AT5 along the Astaneh Fault, we will determine the magnitude of past earthquakes and their aftershocks. The paleoseismological study along the fault in the two argillic sagpond of Playa and Graben structures provides evidence of 5 to 8 earthquakes in the past, which were determined by using the luminescence and radiocarbon age dating. The youngest seismic rupture was observed in the AT5 trench in the period of 700 ± 20 years BP and 1370 ± 140 years IRSL age, which can be consistent with the historical rupture of the Qumes earthquake. Analysis and measurement of morphological analysis along the fault zone estimates the equivalent displacement of 3.9 ± 0.3 meters for the penultimate earthquake. The surface rupture indicates a moment magnitude between 7.3 and 7.5, comparable to the magnitude estimated for the historical 856 Qumis event. The distribution of past events over time shows a quasi-periodic seismic pattern with a mean return period of 1800 ± 230 years.

Continental Tectonics, Alborz, Astaneh Fault, Qumis earthquake, Paleoseismology

Cite this: The Author(s): Nazari H., Ritz J-F., Rizza M., Salamati R., Mahan Sh., Shokri M., Michelot J-L., Massault M., Foroutan M., Zarei Sh. 2024. The Qumis Earthquake of 856 CE: A Review of Paleoseismological Studies of the Astaneh Fault System, Central Alborz. Journal of Archaeological Studies / No. 1, Vol.16, Serial No. 34 / Winter-Spring- (299-328) .DOI: [10.22059/jarcs.2023.358711.143202](https://doi.org/10.22059/jarcs.2023.358711.143202)



1. Introduction

Iran is one of the most earthquake-prone continental regions in the world, due to the convergence of the Arabian and Eurasian plates at a rate of about 25 mm per year, (Nilfroushan et al., 2003; Vernant et al., 2004a; Masson et al., 2007), (Figure 1). The Astaneh left-lateral strike slip Fault, with a length of more than 80 km, is classically described as the source of the most destructive seismic event in the history in North-Eastern Iran, the 856 Qumis earthquake with an estimated magnitude between 7.4 and 7.9, (Figures 2 and 3).

The only contemporary evidence about the Qumis earthquake (Qomes, Ghomes in arabic; the current city of Damghan) that occurred on the 2nd day of 235 AH (December 22nd, 856 AD) is mentioned by Tahman Al-Bayhaqi, (856 CE) (after Berberian, 2014) is: all the houses were destroyed, many people were killed nearly 47 years after the earthquake, Ibn Roste Esfahani 281-282 CE (903AD), (after Berberian, 2014) from the area he visited and wrote that, from the city of Kumesh towards the village of Hadadeh (near present-day Deh Molla), the houses and caravanserais that were destroyed by the earthquake are still visible. Ambraseys and Melville (1982), Hollingsworth et al., (2010) and Mousavi et al., (2013) determined a magnified magnitude of $M \sim 7.9$ for this earthquake with 200,000 casualties for the Qumis earthquake. There is no doubt that the report of such a high number of killings could be due to a mistake or the accumulation of casualties caused by several nearby earthquakes in recent years.

In this article, based on the results obtained from paleoseismological research from trenches AT1, AT2, AT3, AT4 and AT5 along the Astaneh Fault, (Figures 5 and 6) we will determine the magnitude of past earthquakes and their return period. The paleoseismological study along the fault in the two argillic sagpond of Playa and Graben structures provides evidence of 5 to 8 earthquakes in the past, which were determined by using the luminescence and radiocarbon age dating, (Tables 1 and 2). The youngest seismic rupture was observed in the AT5 trench in the period of 700 ± 20 years BP and 1370 ± 140 years IRSL age, which can be consistent with the historical rupture of the Qumis earthquake, (Figures 16 and 21).

Analysis and measurement of morphological analysis along the fault zone estimates the equivalent displacement of 3.9 ± 0.3 meters for the penultimate earthquake. The surface rupture indicates a moment magnitude between 7.3 and 7.5, comparable to the magnitude estimated for the historical 856 Qumis event. The distribution of past events over time shows a quasi-periodic seismic pattern with a mean return period of 1800 ± 230 years. From the catalogue of seismic history, it is known that periods of activity alternate with periods of silence along the fault or a group of fault segments (Grant and Sieh, 1994, Rubin and Sieh, 1997; Nicol et al., 2009). Paleoseismological evidence along strike-slip faults shows that faults may move at a faster rate in terms of kinematics over short time periods (500 years) than over long time periods (about 50 to 100,000 years), indicating the occurrence of cluster earthquakes, (Marco et al., 1996; Weldon et al., 2004; Daeron et al., 2007; Nicol et al., 2009). To explain this instability of fault activity (c. al. al., 2004; Dolan et al., 2007), since long-term slip rate analysis may not detect changes in the seismic activity, it is important to study the timing and distribution of single-fault events along active faults.

This article combines and compares the results obtained from paleoseismological studies on 5 trenches AT1, AT2, AT3, AT4, AT5 (part of the data and results obtained from trenches AT3 and AT4 have already been presented, Shokri et al. , 2009 & Hollingsworth et al., 2010) that attempting to present a model of the event Earthquakes caused by the repeated movement of the Astaneh fault system in central Alborz (northern Iran) as the source of the devastating Qumis earthquake of magnitude $M \geq 7.4$ in 856 AD in the eastern part of the Alborz Highlands (Ambraseys and Melville, 1982; Berberian and Yeats, 1999). Here, in addition to the geomorphological studies (telemetry, satellite imagery and ground surveys) necessary for the selection of the site of the paleoseismological trenches in the two structures of graben and playa, respectively west and east of the trace of fault, calculation and measurement of rick angle and slip rate of Astaneh fault system was carried out using digitization of 1:50,000 scale topographic

The historical earthquake of 856 AD Qumis: A review of paleoseismological studies of the Astaneh 301 maps, large-scale three-dimensional mapping by kinematic GPS, field observations, and optical luminescence and radiocarbon dating. Based on this, the average value of the left tilt angle on the Astaneh fault plane along the Cheshme Ali - Astaneh valley is about 5 degrees (Figure 4) and the slip rate of the faulting is estimated at about 2 mm per year. More information previously in Hollingsworth et al., 2010; discussed in Rizza et al., 2011. The importance and application of the fault cutting angle in the transfer of displacements measured in the vertical section of the wall of paleoseismological trenches towards the fault plane and the application of geometric corrections according to the kinematic mechanism of the fault on the vertical displacements visible for each paleoseismic event in paleoseismological trench logging data (Figures 8, 10, 13, 15 and 16), according to the method presented in Nazari 2006. For the use of similar cases in the measurement geometric displacements on the fault plane, you can refer to: Nazari et al., 2009, Nazari et al., 2014, and Nazari et al., 2021.

The history of past earthquakes in connection with the movements of the Astaneh fault confirm that the fault is most likely the source of the historic Qumis earthquake in 856 CE, which has devastated the area of Damghan today with a lot of killing. The occurrence of six earthquakes in the last 12 thousand years with a regular return period of 1600 to 2100 years indicates a seismic cycle along the Astaneh fault in a quasi-periodic model. The morphological data of both playa and graben sites can be compared with a predictive sliding model. For the historic Qumis earthquake, the seismic displacement is estimated to be 3.9 ± 0.3 meters, and for the previous 2 events, similar displacements (between 2.7 and 4.9 meters) are estimated. The morphotectonic and paleoseismological analysis along the Astaneh fault allows us to estimate the moment magnitude (M_w) of the last three earthquakes using the empirical relationship of Wells and Coppersmith, 1994 for strike-slip faults with Taking the average displacement of 0.3 ± 3.9 meters for the Qumis earthquake, we estimate between 7.53 and 7.59. These estimated magnitudes are consistent with previous estimated magnitudes of 7.4 to 7.9 for the historical Qumis event (Ambraseys and Melville, 1982; Berberian and Yeats, 1999). In trench AT5, for three older observed events, with equivalent ruptures between 2.7 and 4.9 meters, moment magnitude M_w of 7.43 provided up to 7/63 (Wells and Coppersmith, 1994). These results indicate the magnitude of the moment M_w of the past earthquakes resulting from the movement of the Astaneh fault in the range between 7.4 and 7.6. Although, it seems that the Astaneh Fault today it is in its period of seismic quiescence with only little micro-seismic activity.

The results obtained from this research are an example of the path of historical earthquake chronology, recognition of seismic sources (faults) and relevant seismicity, which underlines the inevitable need to use paleoseismological and geoarchaeological methods, in reading and investigating the ups and downs of ancient civilizations due to a natural disaster like this earthquake.



مجله مطالعات باستان‌شناسی

شاپای الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۲۸۸

<https://jarcs.ut.ac.ir>



زمین لرزه تاریخی AD 856 کومس: مروری بر مطالعات پارینه لرزه‌شناسی سامانه گسلی آستانه، البرز مرکزی

حمید نظری^۱، ژان فرانسوا ریتز^۲، مگالی ریژا^۳، رضا سلامتی^۴، شنون ماهان^۵، محمدعلی شکری^۶، ژان لوک میشل^۷، میشل مسلوت^۸، محمد فروتن^۹، شیرین زارعی^{۱۰}

hamidnazarii@gmail.com

jean-francois.ritz@umontpellier.fr

rizza@cerege.fr

salamati.reza@gmail.com

smahan@usgs.gov

geo.persian@gmail.com

jean-francois.ritz@umontpellier.fr

jean-francois.ritz@umontpellier.fr

foroutan.md@ut.ac.ir

shirinzareei1368@yahoo.com

۱: نویسنده مسئول کرسی یونسکو در مخاطرات زمین‌شناسی ساحلی، پژوهشکده علوم زمین، تهران، ایران. رایانامه:

۲: دپارتمان علوم زمین، UMR 5243 دانشگاه مونت پلیه، مونت پلیه، فرانسه، رایانامه:

۳: مرکز اروپایی تحقیقات و آموزش در علوم زمین زیست‌محیطی، سرژ، فرانسه، رایانامه:

۴: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، صندوق پستی: ۱۳۱۸۵-۱۴۹۴ تهران، ایران. رایانامه:

۵: سازمان زمین‌شناسی آمریکا، صندوق پستی: 25046, M.S. 974، ایالات متحده آمریکا. رایانامه:

۶: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، صندوق پستی: ۱۳۱۸۵-۱۴۹۴ تهران، ایران. رایانامه:

۷: UMR IDES، دانشگاه پاریس - جنوب، ۹۱۴۰۵ ارس، فرانسه، رایانامه:

۸: UMR IDES، دانشگاه پاریس - جنوب، ۹۱۴۰۵ ارس، فرانسه، رایانامه:

۹: دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه:

۱۰: کرسی یونسکو در مخاطرات زمین‌شناسی ساحلی، پژوهشکده علوم زمین، تهران، ایران. رایانامه:

اطلاعات مقاله چکیده

گسل آستانه به‌طور کلاسیک به‌عنوان سرچشمه ویرانگرترین رخداد لرزه‌ای تاریخی در شمال خاوری ایران یعنی زمین‌لرزه ۸۵۶ کومس با بزرگی تخمینی بین ۷/۴ تا ۷/۹ توصیف می‌شود. در این مقاله بر پایه نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش‌های پارینه لرزه‌شناسی برآمده از تراشه‌های پنج‌گانه AT1، AT2، AT3، AT4 و AT5 در راستای گسل آستانه به تعیین بزرگای لرزه‌های گذشته و دوره بازگشت آنها می‌پردازیم. مطالعه پارینه لرزه‌شناسی در دو ساختمان کفه گلی پلایا و گراین در راستای گسله، شواهدی از ۵ تا ۸ رخداد لرزه‌ای کهن را ارائه می‌نماید که با استفاده از تاریخ‌گذاری لومینسانس و رادیو کربن تعیین سن شده‌اند. جوان‌ترین گسیخت لرزه‌ای در تراشه AT5 در بازه زمانی BP 700 ± 20 سال و 140 ± 1370 سال سن IRSL دیده شد که می‌تواند منطق بر گسیخت تاریخی زلزله کومس باشد. واکاوی و اندازه‌گیری‌های ریخت زمین‌ساختی در امتداد پهنه گسلی جابه‌جایی هم ارز $3/9 \pm 0/3$ متر را برای زمین‌لرزه پیش از آخر برآورد می‌نماید. گسیختگی سطحی نشان‌دهنده بزرگای گشتاوری بین $7/3$ و $7/5$ قابل مقایسه با بزرگی تخمینی برای رخداد تاریخی کومس است. توزیع رخدادهای گذشته در طول زمان نشانگر یک الگوی لرزه‌ای شبه دوره‌ای با دوره بازگشت میانه 230 ± 1800 سال است.

نوع مقاله:
علمی - پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۲/۲۳

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۲/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۸/۱۳

تاریخ انتشار:
۱۴۰۳/۰۱/۳۰

واژه‌های کلیدی: نو زمین‌ساخت قاره‌ای، البرز، گسل آستانه، زمین‌لرزه کومس، پارینه لرزه‌شناسی

استناد: نظری، حمید؛ ریتز، ژان فرانسوا؛ ریژا، مگالی؛ سلامتی، رضا؛ ماهان، شنون؛ شکری، محمدعلی؛ میشل، ژان لوک؛ مسلوت، میشل؛ فروتن، محمد؛ زارعی، شیرین؛ (۱۴۰۳-۱۴۰۲): زمین‌لرزه تاریخی AD 856 کومس: مروری بر مطالعات پارینه لرزه‌شناسی سامانه گسلی آستانه، البرز مرکزی: مجله مطالعات باستان‌شناسی، دوره ۱۶، شماره ۱، زمستان و بهار - پیاپی ۳۴ - (۲۹۹-۳۲۸).

DOI: 10.22059/jarcs.2023.358711.143202



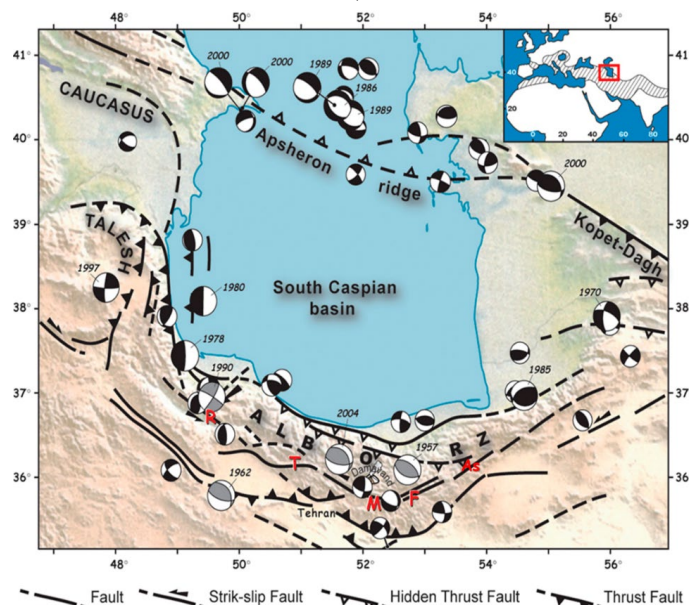
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

به نظر می‌رسد که رخداد زمین‌لرزه کومس که در سال ۸۵۶ میلادی شهر دامغان و روستاهای پیرامون آن را به ویرانی کشیده است (Ambraseys and Melville, 1982; Berberian and Yeats, 1999)، امروزه تنها با فعالیت ریز لرزه‌ای اندکی در دوره سکون لرزه‌ای خود به سر می‌برد.

۳. زمین‌ساخت گسترده مورد پژوهش

ایران یکی از لرزه‌خیزترین مناطق قاره‌ای در جهان است که به دلیل همگرایی صفحات عربستان و اوراسیا با نرخ در حدود ۲۵ میلی‌متر در سال، سبب فشردگی و کوتاه‌تر شدن رشته‌کوه‌های زاگرس، البرز، کپه داغ و همچنین نواحی فرورانش مکران و شمال باختر و حوضه کاسپین جنوبی شده است (Nilforoushan et al., 2003; Vernant et al., 2004a; Masson et al., 2007). رشته‌کوه البرز منطبق بر کمربند فعالی است که حوضه کاسپین جنوبی را از سوی جنوب در برمی‌گیرد، (شکل ۱).

تغییر شکل در بخش‌های مرکزی و خاوری البرز مرکزی در درازای گسل‌های امتداد لغز با روند NE-SW در بخش خاوری و NW-SE در بخش باختری البرز مرکزی قابل تقسیم‌بندی است، (Jackson et al., 2002; Allen et al., 2003; Ritz et al., 2006; Hollingsworth et al., 2008).

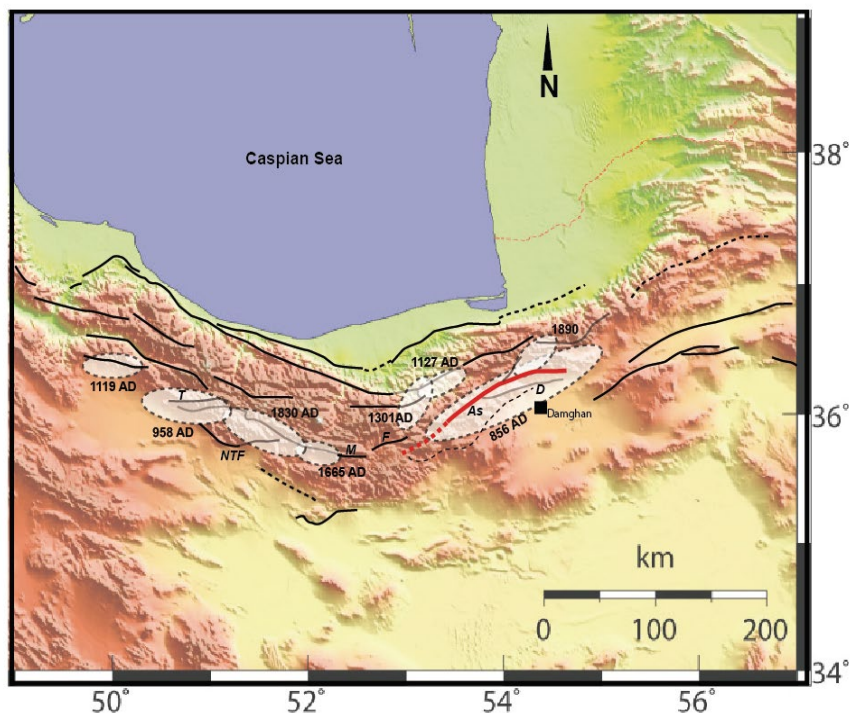


شکل ۱: نقشه لرزه زمین‌ساخت از کاسپین جنوبی و سرزمین‌های پیرامونی آن (Nazari 2006; Ritz et al., 2006)، نشانگر گسل‌های فعال و سازوکار زمین‌لرزه‌های بزرگ در گستره کوه‌های البرز در جنوب و پشته آبشرون در شمال حوضه. از باختر به خاور در بخش مرکزی جنوبی البرز مرکزی سامانه برشی چپ‌گرد فعال و لرزه‌زا به ترتیب گسل‌های رودبار، تالقان، مشا، فیروزکوه و آستانه به ترتیب با حروف سرخ‌رنگ R, T, M, F, و As نام‌گذاری شده‌اند.

Figure 1: Seismotectonic map of the South Caspian Basin and its surrounding lands (Nazari 2006; Ritz et al., 2006), showing active faults and mechanisms of large earthquakes in the Alborz Mountains in the south and the Apsheron Ridge in the North of the basin. From west to east, in the southern central part of the central Alborz, the active and seismogenic left-lateral shear system, the Rudbar, Taleghan, Mesha, Firouzkoh and Astaneh faults are respectively named with red letters R, T, M, F and As.

در حال حاضر نرخ کرنش تراکشی در سراسر رشته‌کوه با مؤلفه کوتاه شدگی شمالی - جنوبی 2 ± 5 میلی‌متر در سال و برشی چپ‌گرد به میزان 2 ± 4 میلی‌متر در سال (Vernant et al., 2004b) در امتداد گروه سامانه‌ای از گسل‌های امتداد لغز چپ‌گرد در بخش مرکزی - جنوبی کوهستان یعنی از باختر به خاور در بهنه گسل‌های تالقان، مشا، فیروزکوه و آستانه با نرخ لغزش ۱ تا ۲ میلی‌متر در سال برآورد می‌شود، (Ritz et al., 2006; Nazari et al., 2009; Solaymani et al., 2011b).

(Rizza et al., 2011). دگرشکلی انباشته در پهنه البرز مرکزی و جنبش چپ لغز گسل‌های فعال با چرخش ساعت‌گرد حوزه کاسپین جنوبی (Ritz et al., 2006, Nazari 2015) که با داده‌های GPS نیز (Djamour et al., 2010) مطابقت دارد در هم‌سنجی قابل قبولی با زمین‌لرزه‌های تاریخی سترگ قرار می‌گیرد، (Ambraseys and Melville, 1982; Berberian and Yeats, 1999; Berberian and Yeats, 2001). در پیشینه تاریخی، لبه جنوبی رشته‌کوه البرز بین طول‌های خاوری ۵۰ تا ۵۵ درجه، زلزله‌های ۸۵۶ (Ms~7.4)، ۹۵۸ (Ms~7.7)، ۱۱۱۹ (Ms~6.5)، ۱۱۲۷ (Ms~6.8)، ۱۳۰۱ (Ms~6.7)، ۱۶۶۵ (Ms~6.5)، ۱۸۳۰ (Ms~7.1) و ۱۸۹۰ پس از میلاد (Ms~7.2) را تجربه نموده است، (شکل ۲).



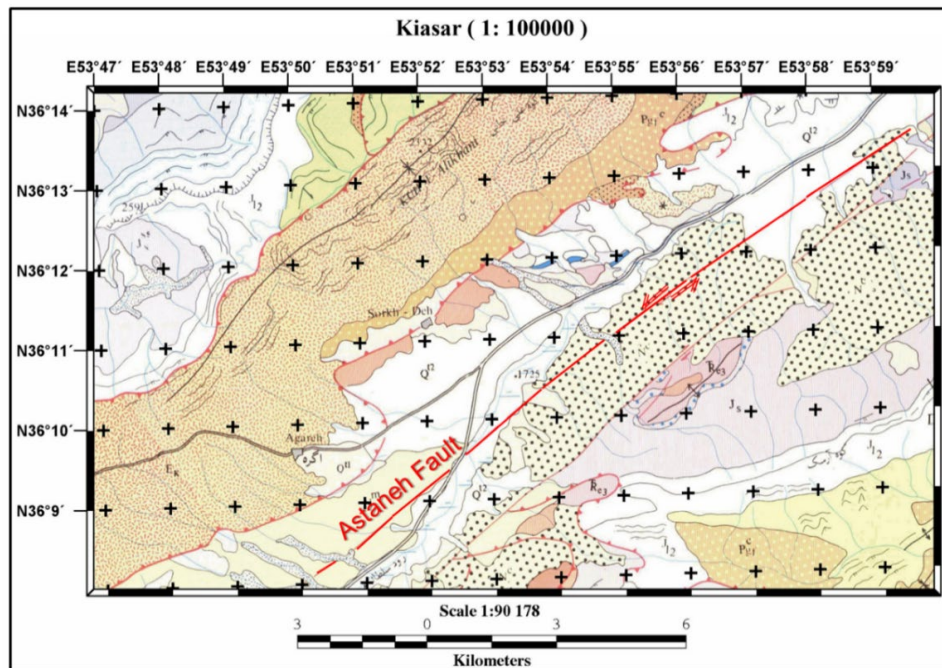
شکل ۲: پهنه مه لرزه‌ای زمین‌لرزه‌های تاریخی در گستره البرز مرکزی (Ambraseys and Melville, 1982; Berberian and Yeats, 1999). گسله‌های اصلی فعال با رنگ سیاه و گسله آستانه (موضوع این پژوهش) با رنگ سرخ به نقشه درآمده است.

Figure 2: Map of the historical earthquake damaged zone in the central Alborz region (Ambraseys and Melville, 1982; Berberian and Yeats, 1999), indicating main active faults in black and the Astaneh fault (the subject of this study) in red.

بررسی پارینه لرزه‌شناسی در امتداد گسل‌های فعال که سرچشمه این زلزله‌های تاریخی هستند نشانگر فواصل بلندمدت چند هزار ساله با زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای ۶/۵ در مقیاس ریشتر و بزرگ‌تر از آن می‌باشند، (Ritz et al., 2003; Ritz et al., 2006; Nazari et al., 2009; Solaymani et al., 2011b; Nazari et al., 2014; Nazari et al., 2021).

۴. زمین‌شناسی و ریخت‌شناسی گسل آستانه

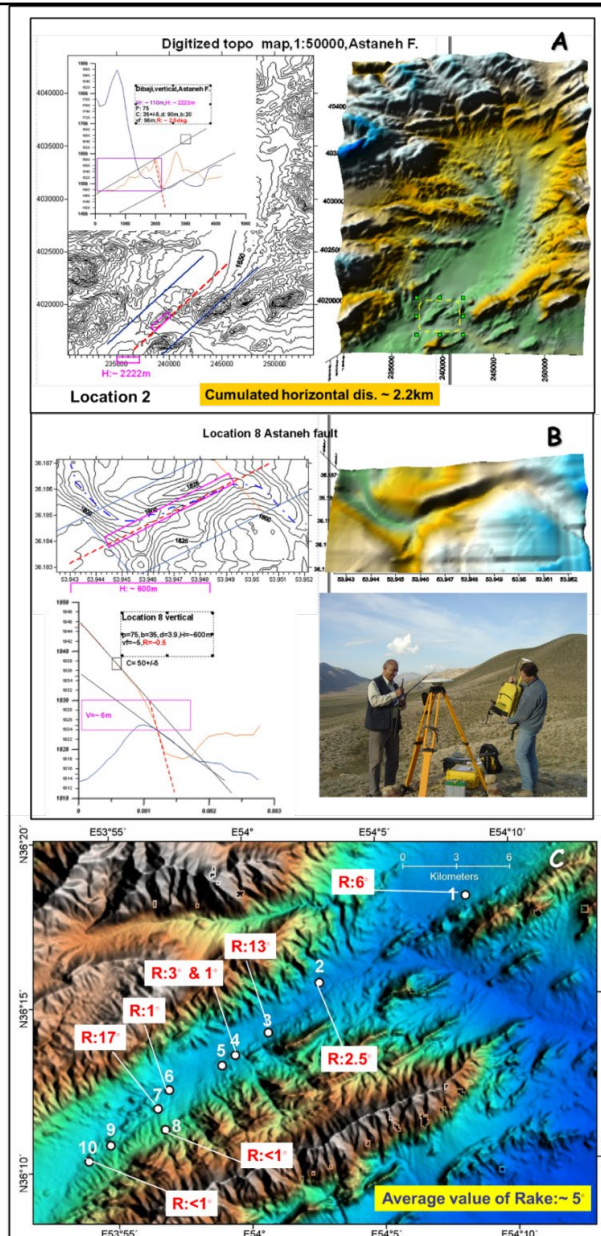
گسل راستا لغز چپ‌گرد آستانه با درازایی بیش از ۸۰ کیلومتر متشکل از پاره گسل‌هایی با راستای عمومی $N60^{\circ}$ در میانه دره آستانه - چشمه‌علی در شمال دامغان که انباشته از نهشته‌های جوان پلیو کواترنری است که با سازوکار (راست‌گرد) پیش از این به اشتباه به نقشه درآمده است، (Saidi and Akbarpour, 1992)، (شکل ۳). در دو سوی صفحه گسل، سنگ نهشته‌هایی از بایوزوییک و مزوزوییک در کناره جنوبی و سازندهای مزوزوییک و سنوزوییک در کناره شمالی رخنود دارند، (شکل ۳).



شکل ۳: بریده‌ای از نقشه زمین‌شناسی کیاسر در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ با تغییرات (Saidi and Akbarpour, 1992). گسله آستانه با رنگ سرخ و سازو کار ویرایش شده مشخص است.

Figure 3: A part of the Geological map of Kiyasar, scale of 1:100,000 (modified after Saidi and Akbarpour, 1992), the Astaneh fault is presented by red line with the edited mechanism.

این گسل در همبستگی با گسل‌های دامغان و شمال دامغان از جنوب باختری در پیوند با سامانه گسل شاهرود قرار می‌گیرد، (Hollingsworth et al., 2008 ; Hollingsworth et al., 2010). پهنه گسل آستانه با شواهد آشکاری از گسیختگی نهشته‌های کواترنری و جابجایی‌های چپ‌گرد از چندین متر تا چند صد متر در دو سوی دره آستانه (Hollingsworth et al., 2010) با نرخ لغزش میانگین $1/6 \pm 1/9$ میلی‌متر در سال گزارش شده است، (Rizza et al., 2011) که با اندازه‌گیری‌های GPS نیز قابل هم‌سنجی است، (Djamour et al., 2010). در این پژوهش افزون بر مطالعات ریخت زمین‌ساختی (دورسنجی و بررسی‌های میدانی) مورد نیاز برای جانمایی اجرای ترانسه‌های پارینه لرزه‌شناسی در دو ساختگاه گرابن و پلایا به ترتیب در باختر و خاور راستای گسله، محاسبه و اندازه‌گیری زاویه افت گسل و نرخ لغزش بر سامانه گسلی آستانه با استفاده از رقومی سازی نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، نقشه‌برداری سه بعدی بزرگ مقیاس با بهره‌گیری از (GPS kinematic)، مشاهدات میدانی و آزمایش‌های سن‌سنجی با روش‌های لومینسانس نوری و رادیو کربن ۱۴ به انجام رسید. بر همین پایه مقدار میانه زاویه ریک (افت) چپ‌گرد بر صفحه گسلی آستانه در امتداد دره چشمه‌علی - آستانه حدود ۵ درجه (شکل ۴) و میزان نرخ لغزش گسلی حدود ۲ میلی‌متر بر سال برآورد شده است. اطلاعات بیشتر پیش از این در (Hollingsworth et al., 2010; Rizza et al., 2011) به بحث گذاشته شده است.



شکل ۴: نمایی از نقشه سه بعدی رقومی از دره آستانه، a: نقشه توپوگرافی رقومی شده در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و مراحل محاسبه زاویه ریک در سایت ۲ با جابجایی انباشته افقی ۲٫۲ کیلومتری، b: نمایی از نقشه توپوگرافی و رقومی سه بعدی نقشه‌برداری شده با جی بی اس کینماتیک از سایت ۸، c: مدل رقومی زمین (SRTM) در گستره شمال دامغان و دره آستانه به همراه جانمایی ترانشه‌ها و اندازه‌گیری زاویه ریک در امتداد گسله آستانه.

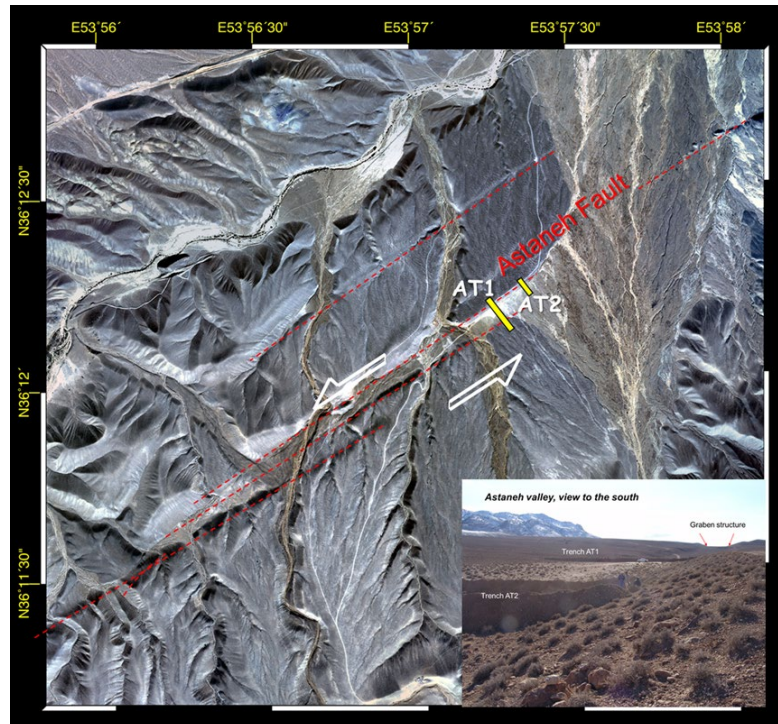
Figure 4: A digital view of the Astaneh Valley, a: The digital topographic map, scale of 1:50,000 and the stages of calculating the rick angle at site 2 with a cumulative horizontal displacement of 2.2 km, b: a view of a 3D topographic (DEM) with GPS kinematics from site 8, c: DEM from SRTM data in the area of North Damghan, along the Astaneh valley with the locations of the rick angle measurement.

اهمیت و کاربرد زاویه ریک گسل در انتقال جابجایی‌های اندازه‌گیری شده در برش قائم از دیواره ترانشه‌های پارینه لرزه‌شناسی به صفحه گسل و اعمال تصحیحات هندسی متناسب با سازو کار جنبشی گسله بر جا به جایی‌های شاقولی قابل مشاهده برای هر رخداد لرزه‌ای در لوگ ترانشه‌های پارینه لرزه‌شناسی (شکل‌های ۸، ۱۰، ۱۳، ۱۵ و ۱۶)، بر پایه روش

ارائه شده در (Nazari 2006) است. برای کاربری موارد مشابه در اندازه‌گیری جابجایی‌های هندسی در صفحه گسل می‌توان به: (Nazari et al., 2009, Nazari et al., 2014, Nazari et al., 2021) نگاه کرد.

۵. بررسی‌های پارینه لرزه‌شناسی

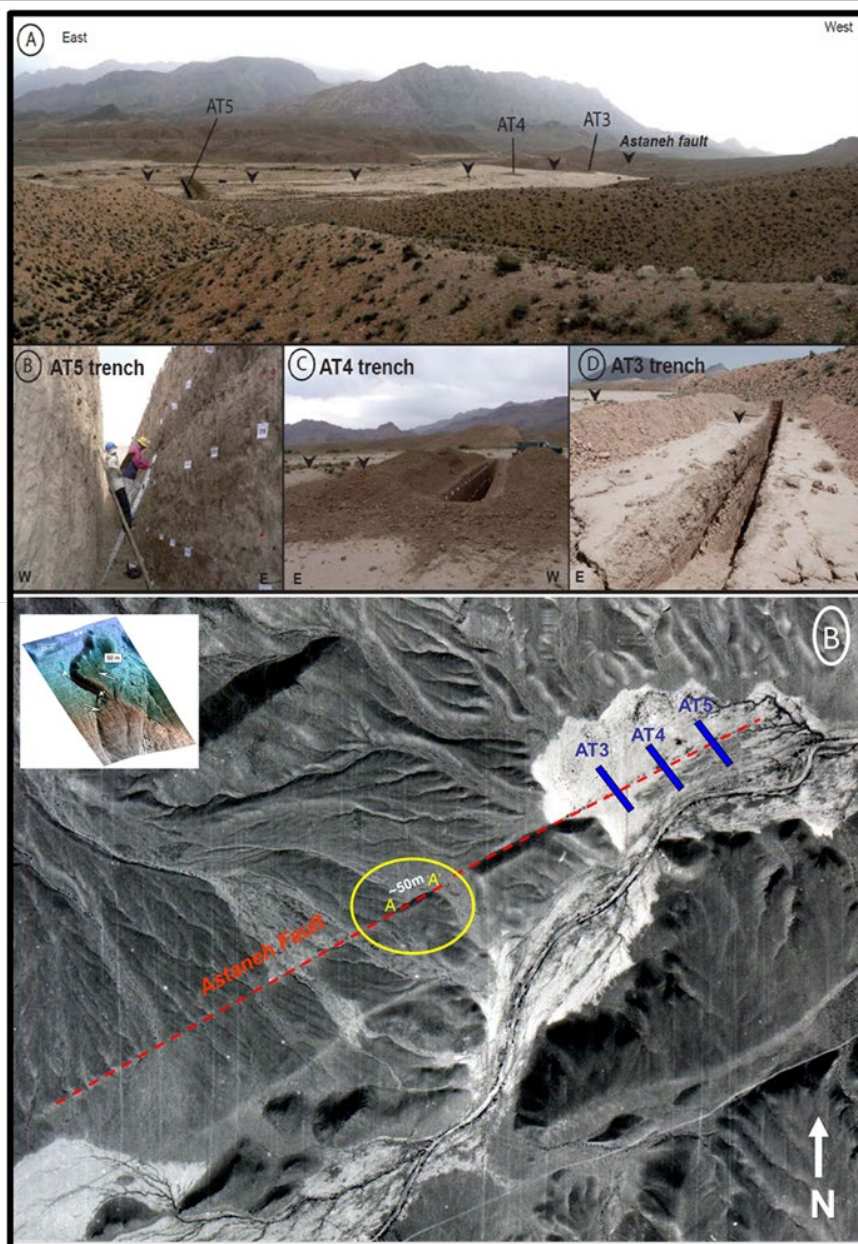
در این پژوهش به ترتیب در دو سایت خاوری کفه گلی (پلایا) و باختری گرابن با فاصله نزدیک به ۲۰ کیلومتر در امتداد گسل به ترتیب با ۳ و ۲ ترانشه حفر شده با بیشینه درازای تقریبی ۶۰ متر و بیشینه ژرفای نزدیک به ۷ متر که طی سال‌های ۲۰۰۶-۲۰۰۸ با استفاده از بیل مکانیکی حفر و مطالعه گردیده است می‌پردازیم، (شکل ۵ و ۶).



شکل ۵: نمایی از بخش باختری سامانه گسلی آستانه (خط‌چین‌های سرخ) بر تصویر ماهواره‌ای Quik Bird، ساختگاه گرابن و دو ترانشه حفر شده AT1, AT2 (مستطیل‌های زرد) و نمای صحرائی از ترانشه‌های حفر شده در حوضه فروافتاده گرابن.

Figure 5: A view of the western part of the Astaneh fault system (red dashed lines) on the Quik Bird satellite image, includes the graben structure and two dug trenches AT1 and AT2 (yellow rectangles) with a field view of the trenches.

سایت پلایا متأثر از رسوب‌گذاری و فرسایش ناشی از سیلاب‌های حاصل از یک رودخانه پیچان (مئاندری) است که با گسل آستانه در راستای خاوری-باختری به‌گونه‌ای آشکار بریده شده است، (شکل 6A). در این ساختگاه ۳ ترانشه عمود بر راستای گسله آستانه حفر شده است که پیشتر بخشی از داده‌های حاصل از ترانشه‌های AT3 و AT4 در آن به همراه نتایج برآمده از بررسی‌های ریخت زمین ساختی ارائه شده است، (Rizza et al., 2011 و Shokri et al., 2009)، (شکل 6B).



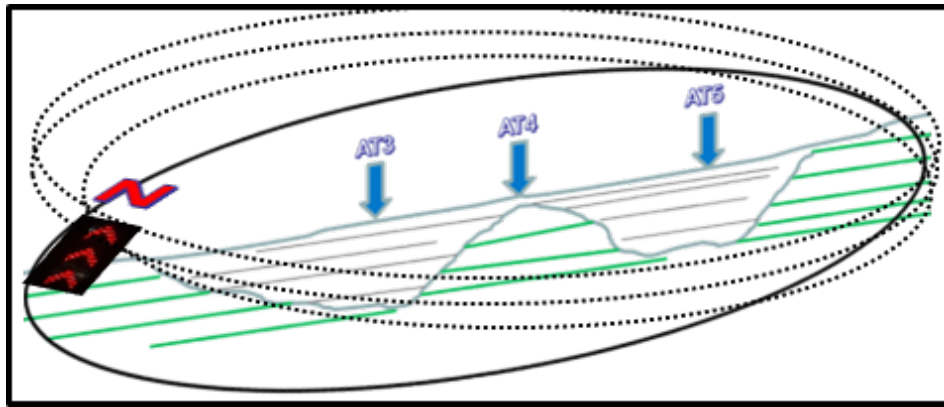
شکل ۶: A: نمای از سه‌گانه ترانشه AT3, AT4, AT5 حفر شده در سایت پلایا در کفه گلی در بخش خاوری سامانه گسلی آستانه، B: جانمایی سایت پلایا و ترانشه‌ها (مستطیل‌های آبی) برعکس هوایی در مقیاس ۱:۵۵۰۰۰، گسله آستانه با خط چین سرخ و جابجایی چپگرد ۵۰ متری اندازه‌گیری شده در بیضی زرد مشخص شده است. مدلی سه بعدی از این جابجایی (Hollingsworth et al., 2010) در گوشه بالا و چپ عکس هوایی مونتاژ شده است.

Figure 6: A: The three excavated trenches AT3, AT4, AT5 at the playa site in the mud plain in the eastern part of the Astaneh fault system, B: the location of site of the playa and the trenches (blue rectangles) on the aerial photo at scale 1: 55,000, the Astaneh fault is marked with a red dashed line and the measured 50-meter horizontal displacement is marked with a yellow ellipse. A three-dimensional model of this displacement (Hollingsworth et al., 2010) is assembled in the upper-left corner of the aerial photo.

در این نوشتار، به ارائه، بازخوانی و هم‌سنجی نتایج برآمده از ۳ ترانشه AT3, AT4, AT5 در بخش سایت پلایا و دو ترانشه AT1 و AT2 که در سایت گراین حفاری شده‌اند ارائه می‌شود. همه ترانشه در راستای عمود بر ۳ پاره گسل در دو

سایت جداگانه با استفاده بیل مکانیکی اجرا و مطالعه شده است. در چهار ترانشه AT1-AT4 دیواره خاوری به صورت 1×1 متر مربع شبکه‌بندی شد. در ترانشه AT5 نیز همچون چهار ترانشه دیگر شبکه‌بندی بر روی دیواره خاوری، ولی با دقت بیشتر در چهار گوشه‌های 0.5×0.5 مترمربعی انجام شد و افزون بر آن، یک ترانشه کوچک نیز در راستای $N145^\circ E$ با طول ۱ متر و عمق ۱ متر به صورت دستی در فاصله ۲ متری از خاور ترانشه اصلی با هدف مشاهده دقیق درزه‌ها و شکاف‌های جوان نزدیک به سطح زمین حفر گردید (شکل ۶ و ۷).

با توجه به نزدیکی دو ترانشه AT3 و AT4 در کفه گلی سایت پلایا، نظر به اینکه سن لایه‌های زیرین در ترانشه AT3 کم و بیش در ردیف سنی لایه‌های بالایی ترانشه AT4 قرار می‌گیرد می‌توان چنین انگاشت که بر اثر کارکرد فرسایشی رودخانه میاندردی در حوضه پلایایی، ترانشه AT4 بر پشته و برجستگی کهن تراز نهشته‌های جوان موقعیت مکانی ترانشه AT3 ته نشست یافته در محور پیچان رودخانه حفر شده است. بدیهی است که ریختار توپوگرافی کهن بستر به فراخور با پوششی از رسوبات سیلتی و رسی که با گسل آستانه بریده شده است به‌طور کامل پوشیده می‌گردد، (شکل ۶ و ۷).

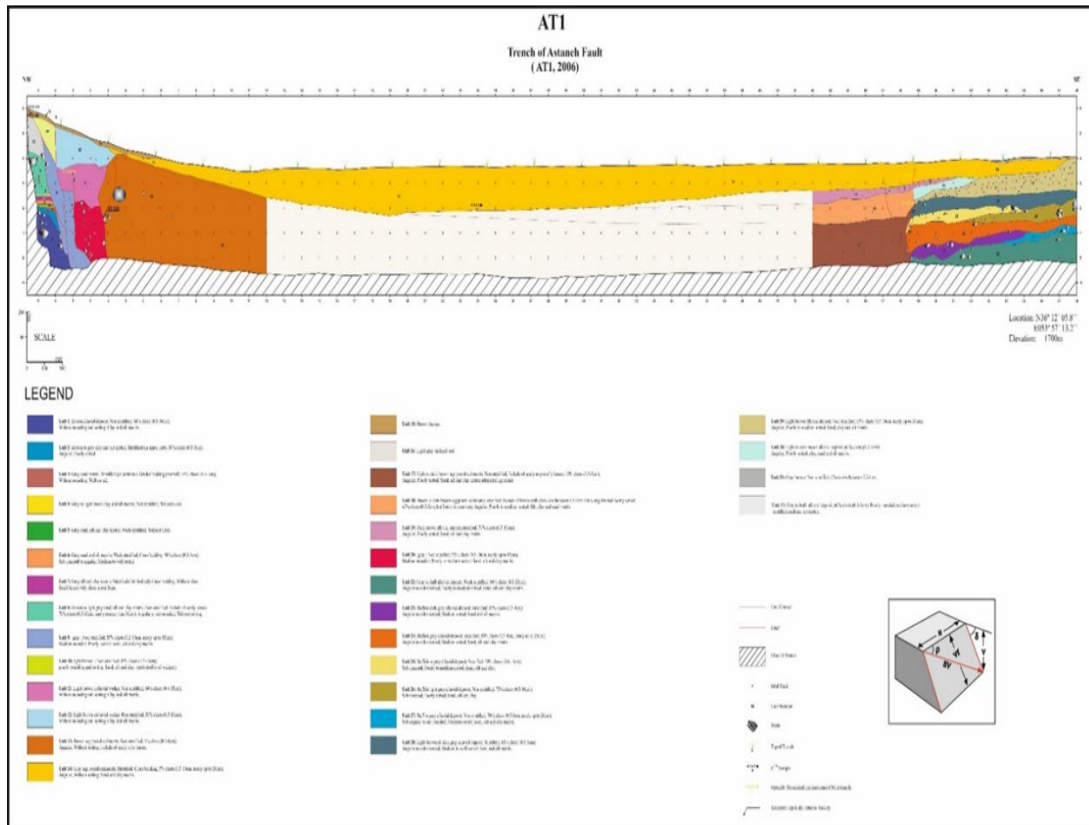


شکل ۷: مدل شماتیک سه‌بعدی از حوضه پلایایی و توپوگرافی زیر بستر کفه گلی به همراه جانمایی تقریبی موقعیت مکانی ۳ ترانشه AT3، AT4، AT5 نسبت به پستی‌وبلندی‌های زیرسطحی (Paleorelief) پنهان در زیر پوشش رسوبات آرژیلی کفه گلی.

Figure 7: A 3D schematic model of the playa basin and the covered paleorelief, with the approximate location of the 3 trenches AT3, AT4, AT5 relative to the lowlands and the subsurface Paleorelief which is hidden by argillaceous young deposits.

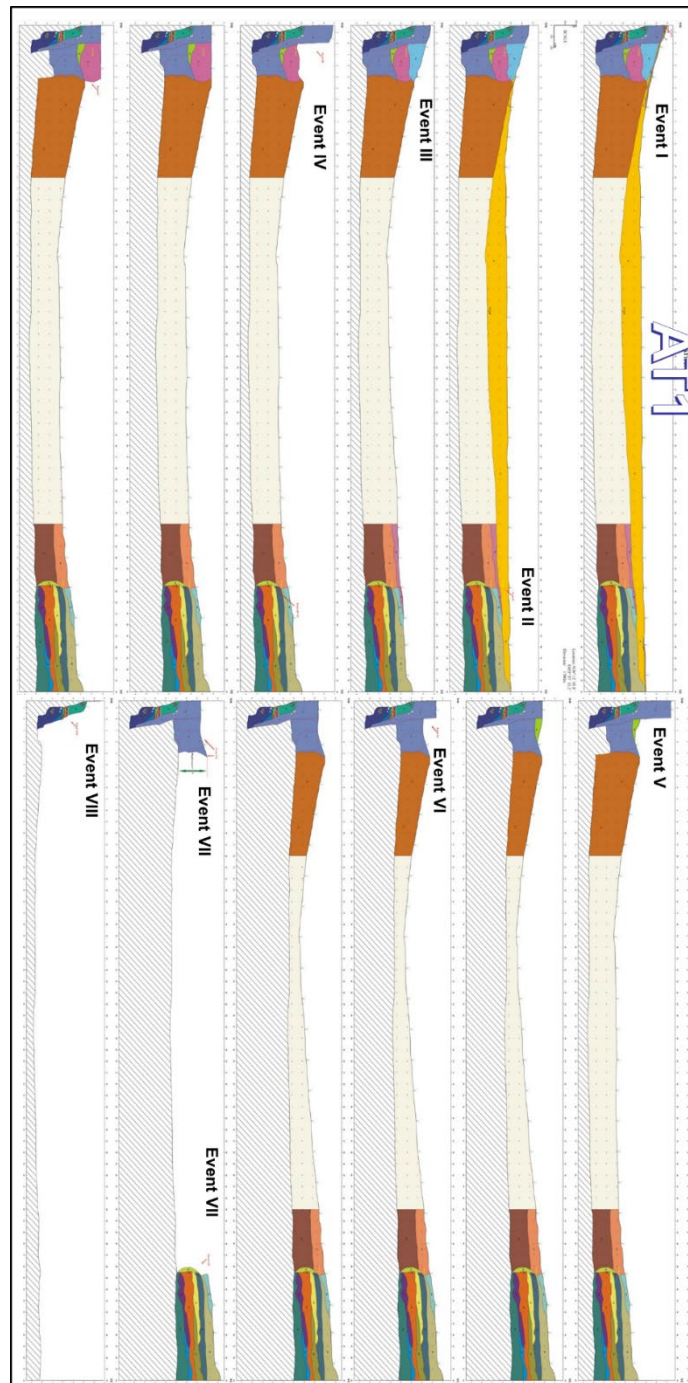
۵-۱. ترانشه‌ها و تفسیر پارینه لرزه‌ها

ترانشه AT1: این ترانشه با درازای ۵۸ متر و ژرفای ۵-۷ متر با راستایی شمال باختری - جنوب خاوری در ارتفاع ۱۷۰۰ متری از سطح دریا، در یک خاستگاه گرابن شکل ناشی از چیدمان نردبانی عمود بر دو پاره گسله از سامانه گسلی آستانه در سال ۲۰۰۶ حفر و پس از تهیه لوگ (نقشه‌برداری رخنون‌های دیواره ترانشه در مقیاس) مورد مطالعه قرار گرفت، (شکل ۸). بازسازی سناریوی لرزه‌ای لوگ ترانشه AT1 نشانگر شواهدی از ۷-۸ رخداد لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری بزرگ‌تر از ۵،۶ به ترتیب در افق‌های لرزه‌ای ۱۵، ۱۴، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹، ۱۳ و ۸ است، (شکل ۹). جابجایی قائم قابل‌اندازه‌گیری در سناریوی لرزه‌ای برای ۷ دیرینه زمین‌لرزه بین ۰،۳ تا ۳ متر با بیشینه جابجایی قائم اندازه‌گیری شده برای رخداد سوم در جابجایی واحد ۹ است. پس از تصحیحات هندسی (Nazari, 2006) و با توجه به زاویه ریک میانه برآورد شده برای گسل آستانه ≥ 5 درجه، (شکل ۴) بزرگای زمین‌لرزه‌های قابل بازسازی از داده‌های به‌دست‌آمده از لوگ ترانشه AT1 بین ۵،۶ تا ۷،۵ Mw خواهد بود.



شکل ۸: لوگ تهیه‌شده از دیواره خاوری ترانشه ATI در سایت گرابن و شرح واحدهای تفکیک‌شده، دوباره گسل از سامانه گسلی آستانه نمایش داده شده در شکل ۵ در شمال و جنوب ترانشه دیده می‌شود. لایه‌های زیرین در بخش میانی دیواره به سبب یکنواختی و نبود تغییرات تفکیک نشده است. بلوک دیاگرام ارائه‌شده در لژاند بر گرفته از Nazari 2006 نشانگر هندسه انتقال میزان جابجایی شاقولی قابل‌اندازه‌گیری از لوگ ترانشه بر صفحه گسل (متناسب با زاویه ریک، شکل ۴) است.

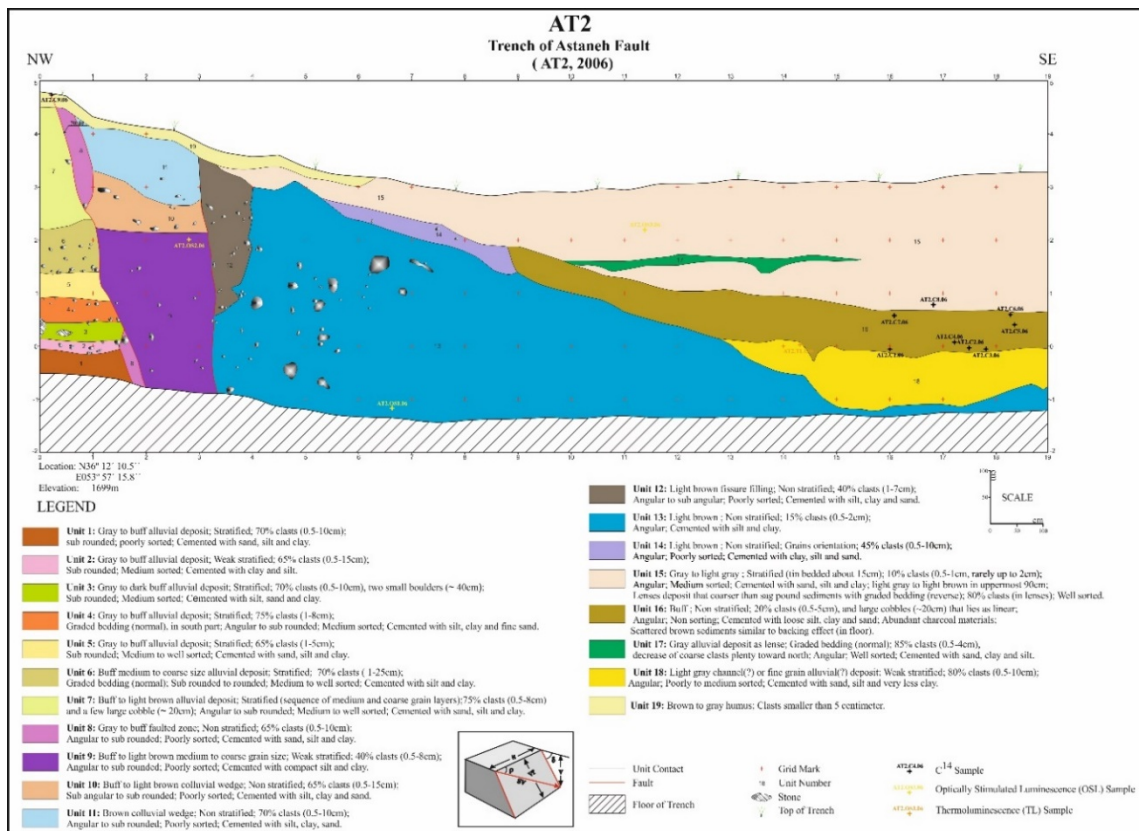
Figure 8: The log prepared from the eastern wall of the ATI in the site of graben and its relevant description, two en-echelon segments of the Astaneh fault system shown in Figure 5 can be seen in the north and south of the trench. In the middle part of the trench the lower layers are not separated in detail due to uniformity and lack of stratigraphical changes. The block diagram presented in the legend taken from Nazari 2006 shows the geometry and trajected amount of vertical displacement that can be measured from the log to the fault plane (corresponding to the Rick angle, Figure 4).



شکل ۹: بازسازی سناریوی لرزه‌ای گسله آستانه بر پایه لوگ تهیه‌شده از ترانشه AT1 و جانمایی دیرینه لرزه‌های ۸ گانه ناشی از جنبش چندباره گسل در گذشته.

Figure 9: Reconstruction of the seismic scenario of the Astaneh fault based on the log prepared from the AT1 and the 8 paleo seismic events.

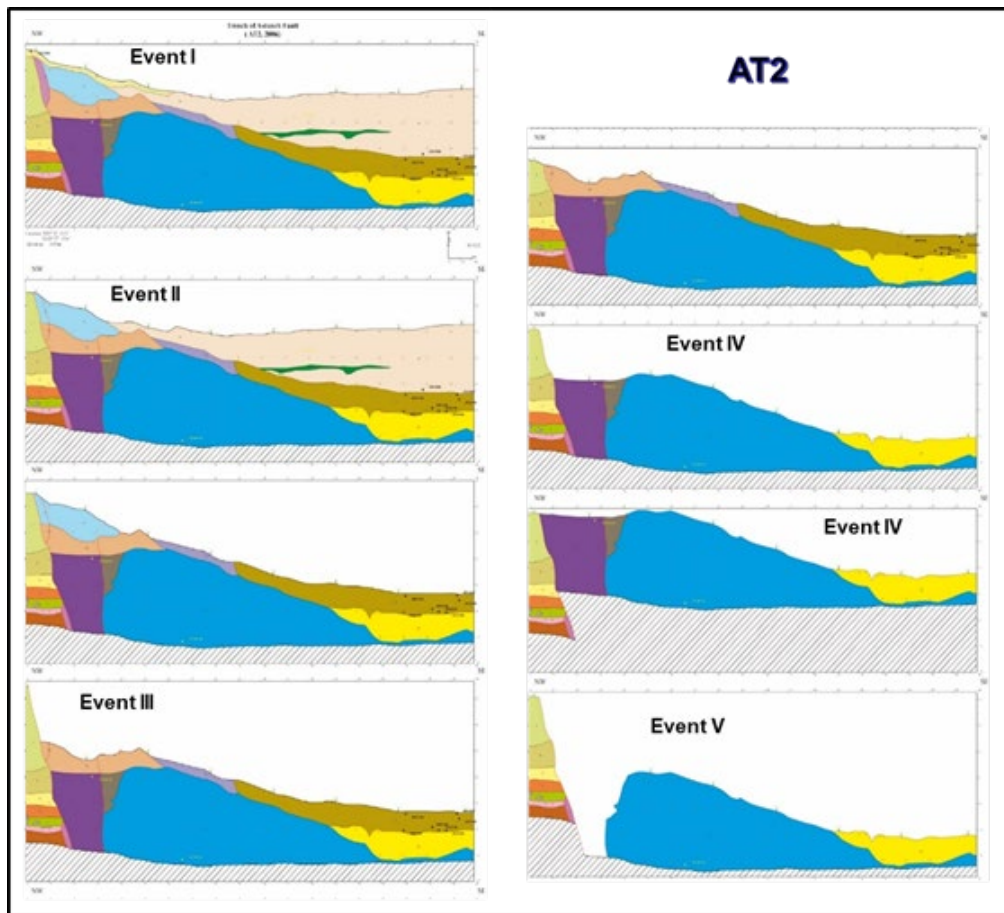
ترانشه AT2: این ترانشه مشابه با ترانشه AT1 با درازای ۱۹ متر و ژرفای ۴-۷ متر با راستایی شمال باختری-جنوب خاوری، در همان خاستگاه موسوم به گرابن عمود بر پاره گسله شمالی گرابن و در سوی باختری ترانشه AT1 در سال ۲۰۰۶ حفر و سپس مطالعه گردید، (شکل ۱۰).



شکل ۱۰: نمایی از لوگ تهیه‌شده از دیواره خاوری ترانشه AT2 به همراه شرح واحدهای تفکیک‌شده در آن. تمرکز نمونه‌برداری رادیو کربن مشخص‌شده در واحد ۱۶ (بخش جنوبی لوگ) ناشی از محل افروختن آتش (اجاق‌های باستانی)، انباشتگی مواد آلی و قطعات زغالی است. بلوک دیاگرام ارائه‌شده در لژاند برگرفته از Nazari 2006 نشانگر هندسه انتقال میزان جابجایی شاقولی قابل اندازه‌گیری از لوگ ترانشه بر صفحه گسل (متناسب با زاویه ریک، شکل ۴) است.

Figure 10: A view of the log prepared from the eastern wall of trench AT2 with the description of the detected units. The radiocarbon C14 sampling identified in unit 16 (southern part of Lug) is caused by the place of fire (ancient stoves) and accumulation of organic matter and charcoal pieces. The block diagram presented in the legend taken from Nazari 2006 shows the transfer geometry of the amount of vertical displacement that can be measured from the trench log on the fault plane (corresponding to the Rick angle, Figure 4).

بازسازی سناریوی لرزه‌ای ترانشه AT2 نشانگر شواهدی از ۵ یا ۶ رخداد لرزه‌ای با بزرگای ≥ 6.5 به ترتیب در افق لرزه‌ای ۱۹، ۱۱، ۱۰، ۱۲ و ۱۳ است، (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: بازسازی سناریوی لرزه‌ای از پارینه لرزه‌های قابل مشاهده و اندازه‌گیری در ترانشه AT2 حفر شده بر شاخه شمالی گسله در سایت گرین (نمایش داده شده در شکل ۵) و جانمایی رخداد‌های پنج‌گانه حاصل از جنبش چند باره گسله آستانه با بزرگای گشتاوری سترگ‌تر از ۶٫۵ در گذشته.

Figure 11: Seismic scenario reconstruction of paleoearthquakes measured in the AT2, dug on the northern branch of the fault in the graben site (shown in Figure 5) and the location of the five paleoseismic, $M_w \geq 6.5$.

جابجایی قابل اندازه‌گیری در سناریوی لرزه‌ای برای ۵ یا ۶ دیرینه زمین‌لرزه بین ۱ تا ۲٫۵ متر با بیشینه جابجایی قائم اندازه‌گیری شده برای رخداد پنجم در جابجایی واحد ۹ است. پس از تصحیحات هندسی (Nazari, 2006) و با توجه به زاویه ریک میانه برآورد شده برای گسل آستانه ≥ 5 درجه، (شکل ۴) بزرگای زمین‌لرزه‌های قابل بازسازی از لوگ ترانشه AT2 کم و بیش مشابه با آنچه در ترانشه AT1 برآورد شد در بازه زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای گشتاوری ۶٫۵ تا ۷٫۵ خواهد بود.

ترانشه AT3: این ترانشه با درازای ۲۳ متر و ژرفای ۴ متر با راستای شمال، شمال باختری - جنوب، جنوب خاوری در ارتفاع ۱۵۳۰ متری از سطح دریا، نخستین ترانشه حفر شده در کفه گلی از یک حوضه پلایایی در باختر چشمه‌علی است که با گسله آستانه بریده شده است. ترانشه AT3 عمود بر امتداد گسلش در سال ۲۰۰۶ در لبه باختری کفه گلی حفر و ۱۸ متر آن بس از تهیه لوگ مورد مطالعه قرار گرفته است. بیشتر در (Hollingsworth et al., 2010) به بخشی از داده‌های برآمده از مطالعات پارینه لرزه‌شناسی بر این ترانشه پرداخته شده است، (شکل ۱۳).

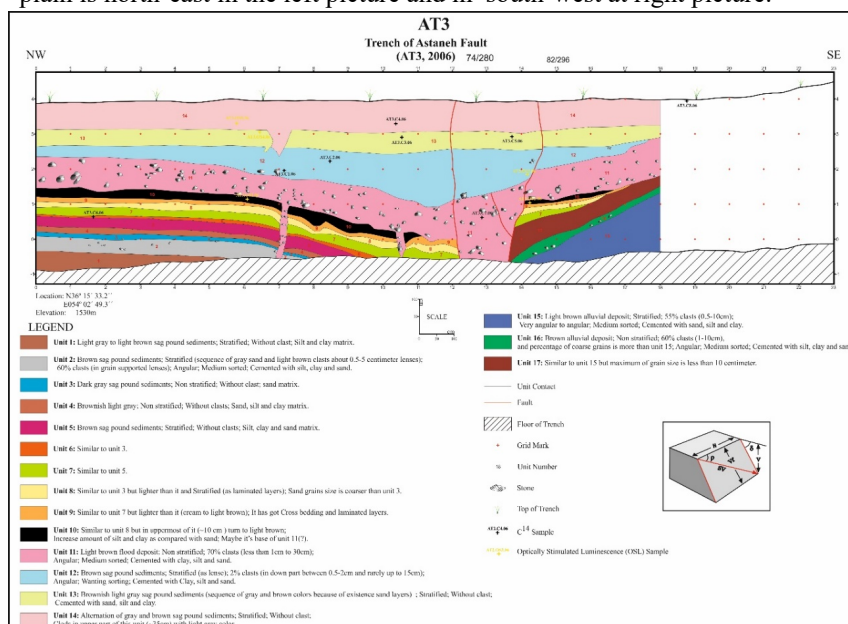
در فاصله ۱۵۰-۱۰۰ متری باختر ترانشه AT3 و در راستای خط اثر برش گسله بر کفه رسی در حوضه پلایایی، با گذر بیش از ۱۱۴۰ سال از رخداد زمین‌لرزه ویرانگر ۸۵۶ کومس، همچنان نشانه‌هایی از گسیخت سطحی هم‌لرز در میان

نهشته‌های بادزن آبرفتی باقی است که با توجه راستا و هندسه گسله و فاصله اندک از ترانشه و کفه رسی بیراه نیست اگر آن را از جمله گسیخت های سطحی هم‌لرز بجای مانده در پیوند با آخرین زمین‌لرزه به نقشه درآمده در ترانشه های سه‌گانه AT3, AT4 و AT5 (زمین‌لرزه کومس) انگاشت، (شکل ۱۲).



شکل ۱۲: در سوی چپ تصویر: نمایی از خط اثر گسله آستانه (پیکان‌های سرخ) در خاستگاه مطالعات پارینه لرزه‌شناسی در حوضه پلایا و نمایی از ترانشه AT3 (پیش از حفر ترانشه های AT4 و AT5) و در سمت راست شکل در ادامه باختری گسل آستانه گسیخت سطحی بجای مانده از آخرین زلزله (زمین‌لرزه ۸۵۶ کومس) سترگ در منطقه دیده می‌شود. سوی نگاه در کفه رسی، (در تصویر چپ) شمال خاوری و در (تصویر راست) جنوب باختری است.

Figure 12: On the left side of the picture: a view of the Astaneh fault (red arrows) in the paleoseismological studies of Playa basin and a view of the AT3 trench (before digging of the AT4 and the AT5) and on the right side of the figure, further west The surface rupture threshold fault left over from the last historical earthquake (856 Qumis earthquake). The direction of the view on the mud plain is north-east in the left picture and in south-west at right picture.

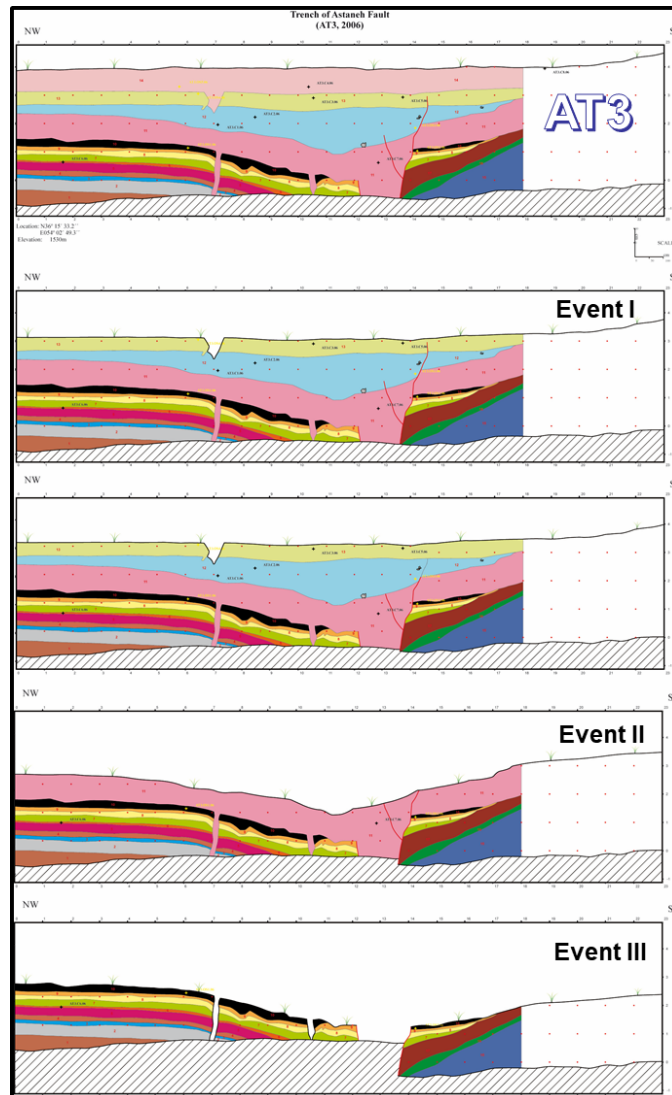


شکل ۱۳: لوگ تهیه شده از دیواره خاوری ترانشه AT3 حفر شده در کفه گلی سایت پلایا به همراه شرح واحدهای تفکیکی، جاممایی شده در شکل ۶ بلوک دیاگرام ارائه شده در لژاند برگرفته از Nazari 2006 نشانگر مقادیر قابل اندازه‌گیری هندسی و انتقال میزان جابجایی شاقولی قابل اندازه‌گیری برای جابجایی هر واحد تفکیک شده در دو سوی خط گسل به نقشه درآمده در لوگ ترانشه بر صفحه گسل (متناسب با زاویه ریک، شکل ۴) است.

Figure 13: A log prepared from the eastern wall of trench AT3 excavated in the mud plain of the Playa site along with the legend of the units, localized in Figure 6. The block diagram presented in the legend taken from Nazari 2006 showing the geometric measurable values of the displacement. The measurable vertical displacement of the base of each separated unit on both sides of the fault line which are mapped in the trench's log on the fault plane (proportional to the Rick angle, Figure 4).

سناریوی لرزه‌ای ترانشه AT3 نشانگر شواهدی از ۳ رخداد لرزه‌ای با بیشینه بزرگای گشتاوری ۷,۴ به ترتیب در افق لرزه‌ای ۱۳، ۱۱ و ۱۰ است، (شکل ۱۴).

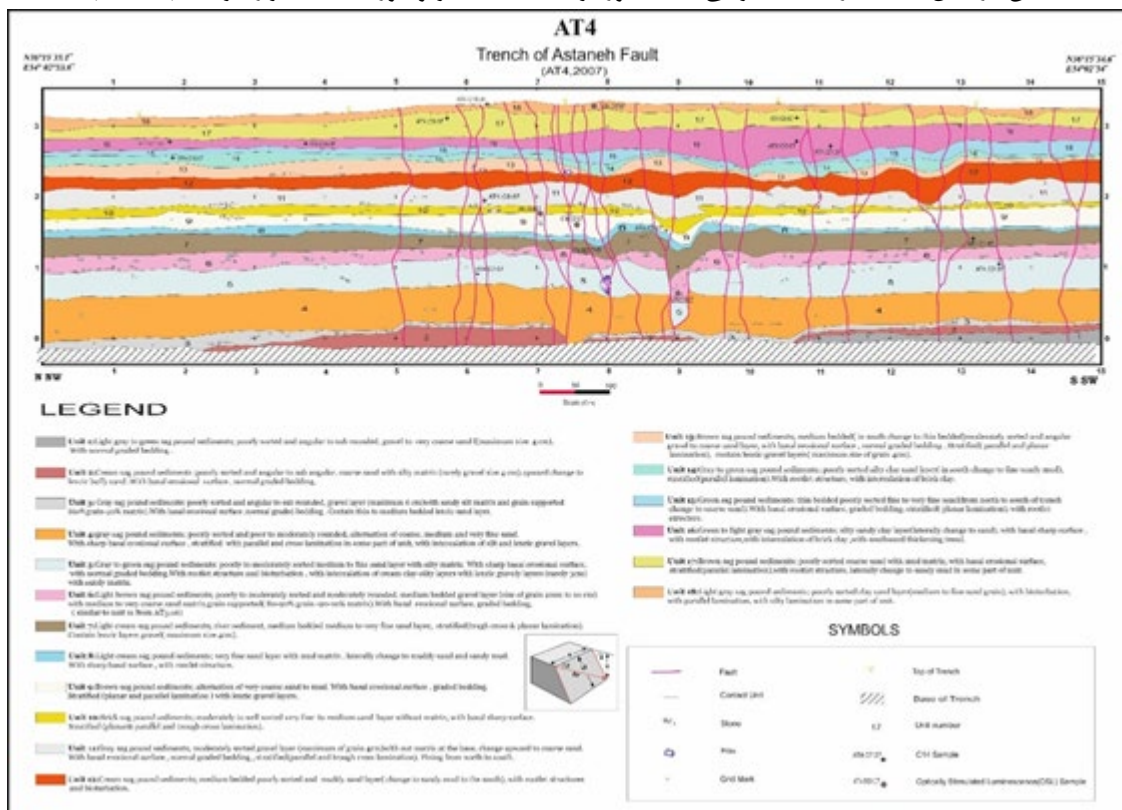
جابجایی قایم قابل اندازه‌گیری در سناریوی لرزه‌ای برای ۳ دیرینه زمین‌لرزه با بیشینه جابجایی قایم اندازه‌گیری شده حدود ۱ متر برای رخداد سوم در جابجایی واحد ۱۰ است؛ که همچون ترانشه‌های AT1 و AT2 پس از تصحیحات هندسی (Nazari, 2006) و با توجه به زاویه ریک میانه برآورد شده برای گسل آستانه ≥ 5 درجه، (شکل ۴) بزرگای زمین‌لرزه‌های قابل بازسازی از لوگ ترانشه AT3 نیز کم و بیش مشابه با آنچه در ترانشه AT1 برآورد شد در بازه زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی گشتاوری بزرگ‌تر از ۷ خواهد بود. برای شناخت بیشتر رفتار لرزه‌ای و جزئیات دقیق‌تر در میزان جابجایی‌های اندازه‌گیری شده و بزرگای برآورد شده برای زمین‌لرزه‌ها به (Hollingsworth et al., 2010) رجوع شود.



شکل ۱۴: بازسازی سناریوی لرزه‌ای از لوگ تهیه شده از دیواره خاوری ترانشه AT3 در ساختمانگاه پلایا از بخش خاوری گسله آستانه به همراه جانمایی سه رخداد لرزه‌ای کهن اندازه‌گیری شده در آن. زمین‌لرزه ویرانگر ۸۵۶ میلادی (کومیس) در هم‌زمانی با رویداد نخست است.

Figure 14: Reconstruction of the seismic scenario from the log of the eastern wall of the AT3 in the Playa basin, eastern part of the Astaneh fault along with the location of the three paleoseismic events detected. The devastating historical earthquake of 856 AD (Qumis) coincided with the first event.

ترانشه AT4: این ترانشه با درازای ۱۵ متر و ژرفای ۳-۴ متر با راستای شمال، شمال باختری - جنوب، جنوب خاوری در ارتفاع ۱۵۳۰ متری از سطح دریا، در یک خاستگاه پلایایی که با گسله آستانه بریده شده است به گونه‌ای عمود بر امتداد گسلش در سال ۲۰۰۷ در فاصله تقریبی ۱۰۰ خاور ترانشه AT3 حفر و مورد مطالعه قرار گرفت، (شکل ۱۵).



شکل ۱۵: نمایی از لوگ تهیه شده از مطالعه دیواره خاوری ترانشه AT4 حفر شده در کفه گلی حوضه پلایا (جانمایی شده در شکل ۶) در بخش خاوری گسله آستانه به همراه راهنما و شرح واحدهای تفکیک شده. بلوک دیاگرام ارائه شده در لژاند برگرفته از Nazari 2006 نشانگر هندسه انتقال میزان جابجایی شاقولی قابل اندازه‌گیری از لوگ ترانشه بر صفحه گسل (متناسب با زاویه ریک، شکل ۴) است.

Figure 15: A view of the log prepared from the study of the eastern wall of the AT4 trench dug in the playa basin (shown in Figure 6) in the eastern part of the Astaneh fault along with the description of the separated units. The block diagram presented in the legend taken from Nazari 2006 shows geometrical method for trajectory of the amount of vertical displacement that can be measured from the trench log on the fault plane (corresponding to the Rick angle, Figure 4).

به نظر می‌رسد که دلیل تفاوت آشکار در نسبت تاریخ‌گذاری لایه‌های بالایی و پایینی به نقشه درآمد در این ترانشه نسبت به لایه‌های گاه‌نگاری شده در دو ترانشه پیرامونی (چپ و راست) آن همان‌گونه که در شکل ۷ ارائه شده است ناشی از کارکرد فرسایشی حاصل از سیلاب‌های فصلی و رسوب‌گذاری چندباره نهشته‌های رودخانه بر بستر فرسوده و دگر ریخت شده کهن باشد.

بازسازی سناریوی لرزه‌ای این ترانشه پیش از این در (Shokri et al., 2009) ارائه شده است. لوگ مطالعه شده از ترانشه AT4 نشانگر شواهدی از ۵ رخداد لرزه‌ای به ترتیب در افق لرزه‌ای ۱۸، ۱۷، ۱۱، ۹ و ۵ است، (شکل ۱۵).

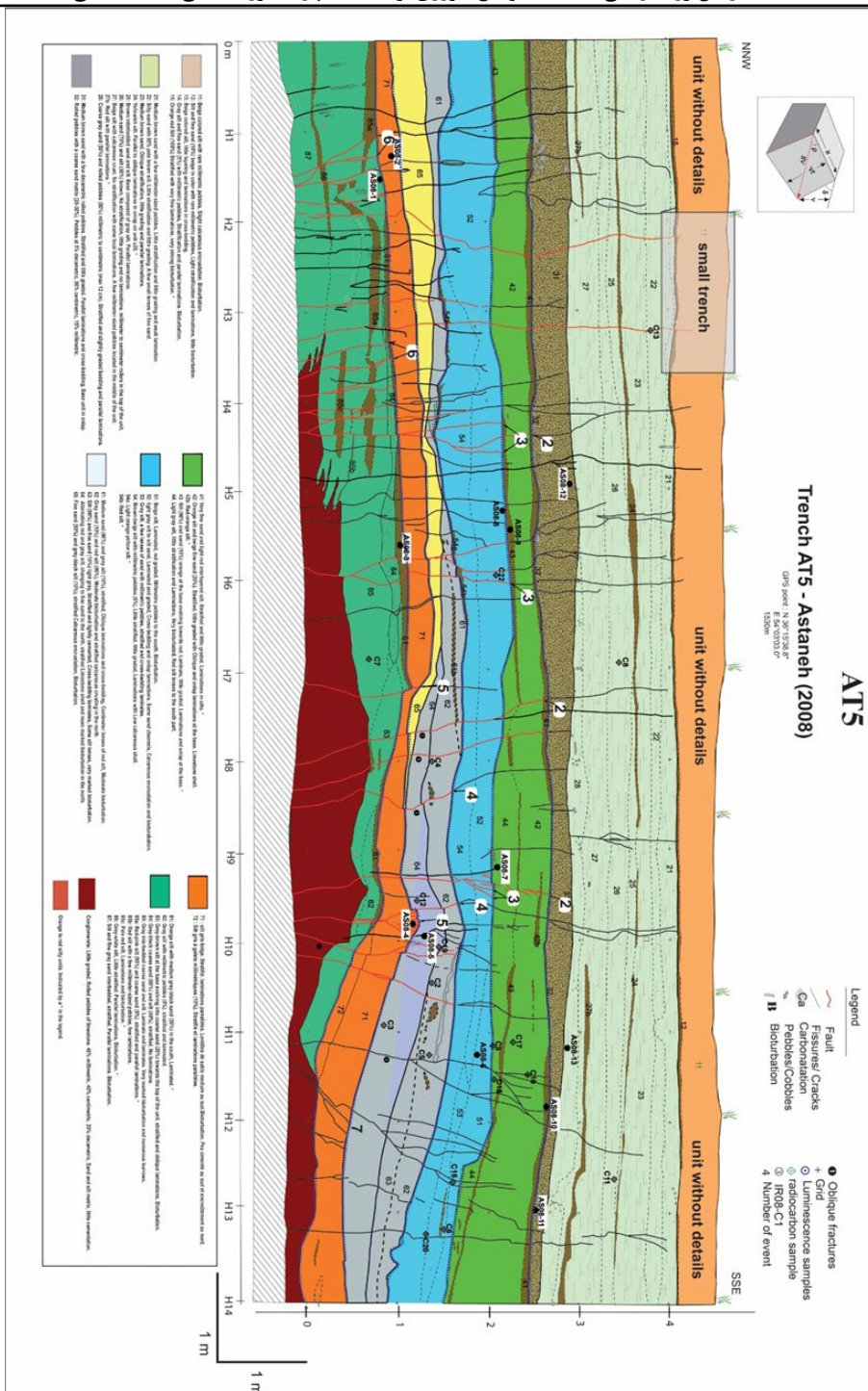
جا به جایی شاقولی قابل اندازه‌گیری در دیواره خاوری ترانشه AT4 نسبت به دیگر ترانشه‌های اجرا شده بر گسله آستانه به مراتب کوچک‌تر ≥ 0.5 متر در واحد ۵ به‌عنوان افق لرزه‌ای کهن‌ترین رخداد لرزه‌ای مشاهده شده در ترانشه AT4 می‌نماید. اگرچه با توجه به زاویه ریک گسله بس از اعمال تصحیحات هندسی انتقال جابجایی شاقولی بر

جابجایی بر سطح گسل به مراتب بزرگ‌تر و هم‌ارز جابجایی‌های شناخته شده برای رخداد زمین‌لرزه‌های میانه تا بزرگ (≥ 6.5 Mw) خواهد بود.

ترانشه AT5: این ترانشه با درازای ۵۰ متر و ژرفای ۴ متر با راستای شمال، شمال باختری-جنوب، جنوب خاوری ($N155^\circ E$) در ارتفاع ۱۵۳۰ متری از سطح دریا، در همان ساختگاه پلایایی که با گسله آستانه بریده شده است عمود بر امتداد گسلش در فاصله تقریبی ۱۰۰ متری خاور ترانشه AT4 و ۲۰۰ متری خاور ترانشه AT3 در سال ۲۰۰۸ حفر که به سبب یکنواختی چینه‌ای تنها ۱۴ متر آن مورد مطالعه قرار گرفت، (شکل ۱۶).

شکل‌های ۱۶ و ۲۰ از ترانشه اصلی و ترانشه کوچک کناری AT5 نشانگر شواهدی از شش رخداد لرزه‌ای به ترتیب در افق‌های لرزه‌ای ۱۲، ۴۲، ۵۲، (۶۱ و ۶۲)، ۷۱ و (۸۱ و ۸۳) برای رویدادهای شش‌گانه مشاهده شده است.

بر همین پایه با توجه به نزدیکی دو ترانشه AT4 و AT5 جابجایی‌های شاقولی قابل اندازه‌گیری در دیواره خاوری ترانشه AT5 نیز حتی در لایه‌های پایینی لوگ با جابجایی انباشته فراتر از $1 \geq$ متر در واحدهایی همچون ۷۱، ۸۱ و ۸۳ به‌عنوان کهن‌ترین دو افق لرزه‌ای مشاهده شده در ترانشه AT5 در ساختگاه خاوری مطالعات پارینه لرزه‌شناسی موسوم به سایت پلایا نمی‌نماید. این جابجایی‌های شاقولی در افق‌های لرزه‌ای جوان‌تر به سبب عملکرد سازوکار راستا لغزی چیره در گسل آستانه، با گذر از چهارمین افق لرزه‌ای (واحد ۵۲) به سوی لایه‌های بالایی لوگ در نزدیکی سطح زمین کم‌کم ناپدید می‌شود.



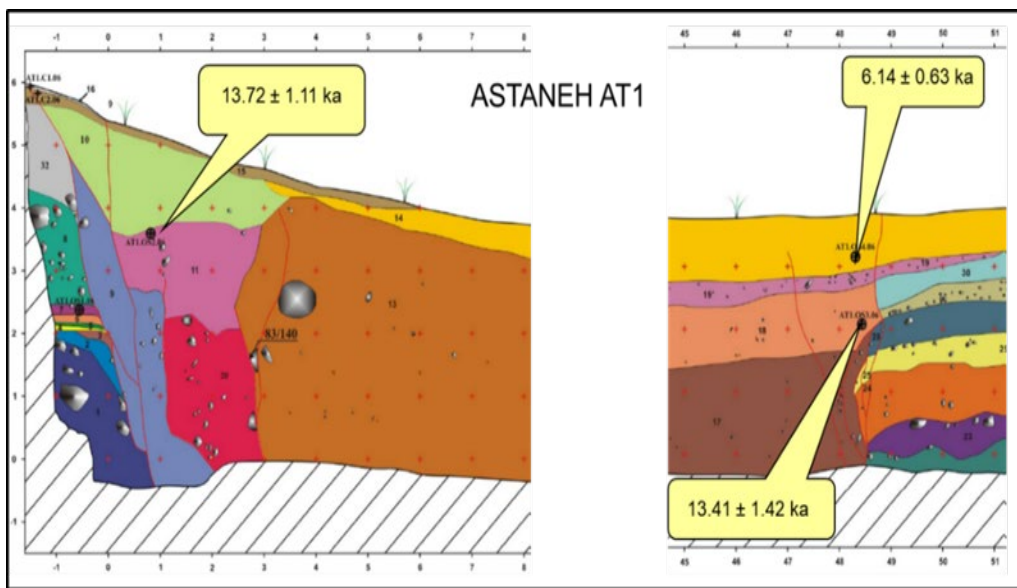
شکل ۱۶: نمایی از لوگ تهیه‌شده از مطالعه دیواره خاوری ترانشه AT5 حفرشده در کفه گلی حوضه پلایا (جانمایی شده در شکل ۶) در بخش خاوری گسله آستانه به همراه راهنما و شرح واحدهای تفکیکی. بلوک دیگرام ارائه‌شده در بالای تصویر برگرفته از Nazari 2006 نشانگر هندسه انتقال میزان جایجایی شاقولی قابل اندازه‌گیری از لوگ ترانشه بر صفحه گسل (متناسب با زاویه ریک، شکل ۴) است.

Figure 16: A view of the log prepared from the study of the eastern wall of trench AT5 excavated in the clay plain of the playa basin (placed in Figure 6) in the eastern part of the Astaneh fault along with the guide and description of the separate units. The block diagram presented at the top of the image taken from Nazari 2006 shows the geometry tranjection of the amount of vertical displacement (corresponding to the Rick angle, Figure 4).

۵-۲. سن سنجی دیرینه لرزه‌ها

برای تعیین سن رویدادهای لرزه‌ای از همه ترانسه‌های پنج‌گانه نمونه‌هایی را برای تعیین سن به دو روش لومینسانس و روش رادیو کربن از واحدهای چینه‌ای تفکیک‌شده جمع‌آوری و آنالیز شده است. اگرچه بخشی از داده‌های برآمده از ترانسه AT3 بیش از این توسط (Hollingsworth et al., 2010) و AT4 توسط (Shokri et al., 2009) منتشر شده است، ولی در این نوشتار ضمن پرداختن دوباره به دو ترانسه AT3 و AT4 حفر شده در حوضه پلایا (کفه گلی)، به شرح جزئیاتی از نتایج به‌دست‌آمده از ترانسه‌های AT1، AT2، AT3 و AT5 نیز می‌پردازیم. از آنجا که پیش از این، در مجموعه انتشارات مربوط به همین پژوهش، ریخت زمین ساخت و برآورد نرخ لغزش گسله آستانه به‌تفصیل به بحث گذاشته شده است، (Shokri et al., 2009; Hollingsworth et al., 2010; Rizza et al., 2011) در نوشتار پیش روی بسیار گذرا و کوتاه خواهد آمد.

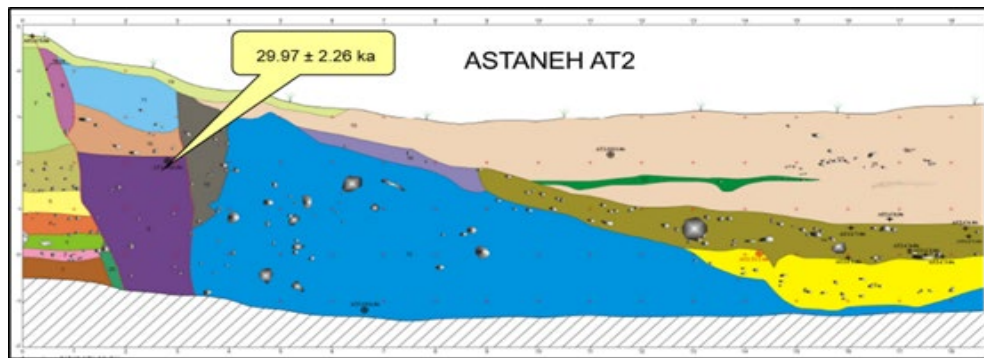
لازم به یادآوری است که برخلاف تعداد قابل توجه سن سنجی‌های انجام شده بر هر ۵ ترانسه اجراشده در دو ساختگاه گرابن و پلایا، نظر به موقعیت مکانی ترانسه‌های حفرشده (AT4) و یا نبود داده کافی از نتایج آزمایش‌های رادیو کربن در مورد ترانسه‌های AT1 و AT2 (شکل ۱۷ و ۱۸)، فقط در دو ترانسه AT3 و AT5 نشانه‌های دقیق بر پایه آزمایش‌های سن سنجی از گسلش (گسیخت سطحی هم‌لرز) همساز با زمین‌لرزه سترگ و ویرانگر ۸۵۶ کومس دیده و گزارش شده است، (شکل ۱۹ و ۲۱).



شکل ۱۷: برشی از لوگ ترانسه AT1 با نگاه نزدیک بر جایجایی واحدها و جانمایی نقاط نمونه‌برداری و سن به‌دست‌آمده از سن سنجی لومینسانس برای نمونه‌های مشخص‌شده.

Figure 17: A fault close up of the log (AT1) showing sample locations and the OSL age.

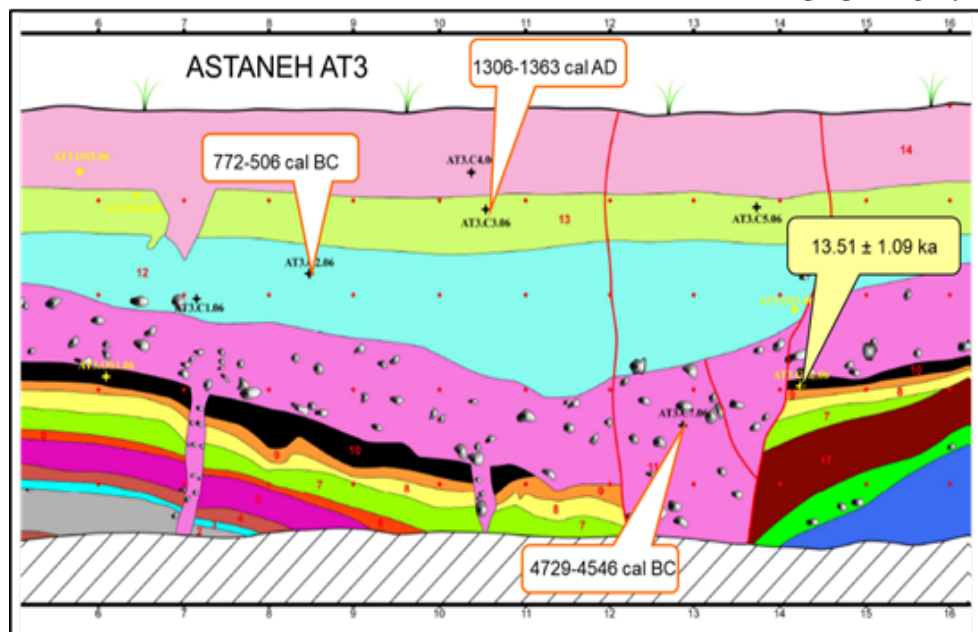
اگرچه دو پاره گسله شمالی و جنوبی به نقشه درآمد در سایت گرابن (بخش باختری گسله آستانه) چه در تصاویر ماهواره‌ای و چه بر دیواره ترانسه آشکارا سطح زمین را بریده‌اند، (شکل ۵ و ۸) ولی به سبب عدم سن سنجی مورد نیاز در واحد ۱۵ امکان تدقیق جوان‌ترین رخداد به‌صورت عددی فراهم نیست. با این وجود نظر به‌به موقعیت مکانی و سن به‌دست‌آمده از واحدهای ۱۴ و ۱۱ به‌عنوان دومین و چهارمین افق لرزه‌ای مشاهده‌شده در لوگ AT1، (شکل ۹ و ۱۷) احتمال هم‌زمانی رخداد نخست در افق لرزه‌ای ۱۵ با زمین‌لرزه کومس دور از ذهن نیست.



شکل ۱۸: برشی از لوگ ترانشه AT2 با نگاه نزدیک بر جایجایی واحدها ناشی از رخداد زمین‌لرزه‌های کهن و جانمایی تنها سن سنجی لومینسانس انجام‌شده در افق لرزه‌ای ۹.

Figure 18: A section of the AT2 trench with a close up at the shifted units by paleo earthquakes as well as location of the only luminescence dating performed in seismic horizon 9.

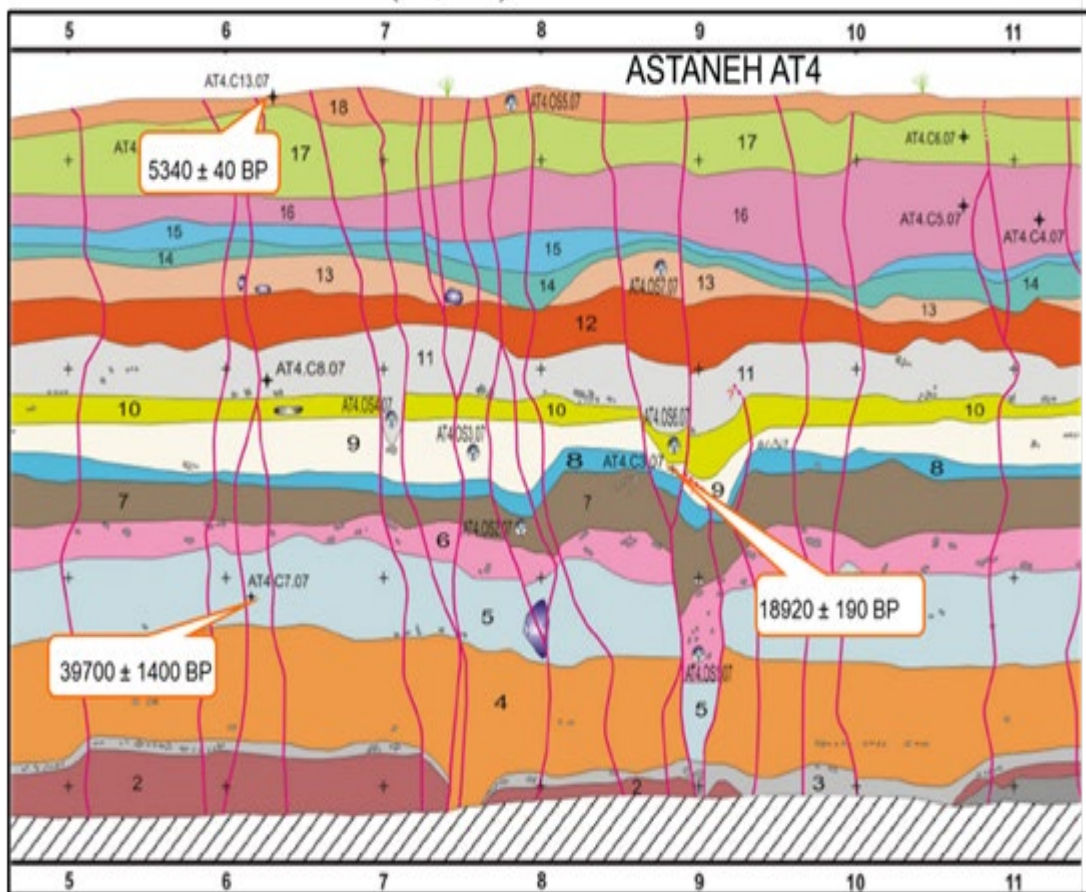
این ترانشه در موقعیت خاوری نسبت به ترانشه AT1 تنها بر شاخه شمالی گراین که آشکارا به سطح زمین می‌رسد حفر شده است، (شکل ۵). ولی به سبب عدم سن سنجی موردنیاز در واحد ۱۹ (جوان‌ترین افق لرزه‌ای) امکان تدقیق جوان‌ترین رخداد به صورت عددی فراهم نیست. اگرچه با توجه به موقعیت مکانی و سن به‌دست‌آمده از بالاترین بخش واحد ۹ به‌عنوان زمان پیش از رخداد لرزه‌ای چهارم (شکل ۱۱ و ۱۸)، تعیین زمان دیرینه لرزه‌های جوان‌تر مشاهده‌شده در افق‌های لرزه‌ای بالاتر ممکن نیست ولی اگر تفسیر ارائه‌شده در مورد گسلش سطحی و سن واحد ۱۵ در بخش شمالی ترانشه AT1 و پیوند احتمالی آن را با زمین‌لرزه ۸۵۶ کومس بپذیریم، ناگزیر با توجه به نزدیکی مکانی دو ترانشه AT1 و AT2 احتمال هم‌زمانی و هم‌سازی جوان‌ترین رخداد لرزه‌ای مشاهده‌شده در هر دو ترانشه حفر شده در سایت گراین با زمین‌لرزه کومس منطقی می‌نماید.



شکل ۱۹: نمای نزدیک از سن سنجی‌های لومینسانس و کربن ۱۴ انجام‌شده بر نهشته‌های ترانشه AT3 از سری ترانشه‌های اجراشده بر کفه گلی از سایت پلایا در بخش خاوری سامانه گسلی آستانه.

Figure 19: Close-up view of luminescence and carbon 14 dating locality performed on the AT3 trench in the site of Playa, eastern part of the Astaneh fault system.

نتایج برآمده از ارائه نخستین بخش از پژوهش‌های پارینه لرزه‌شناسی اجرا شده بر گسله آستانه (ترانشه AT3، شکل ۱۹) نشان از رخداد سه زمین‌لرزه بزرگ در بازه زمانی ۱۲ هزار سال گذشته، از جمله زلزله ۸۵۶ کومس با دوره زمانی منظم ۳ تا ۴ هزار ساله دارد، (Hollingsworth et al., 2010).



شکل ۲۰: نمایی از لوگ تهیه شده از دیواره خاوری ترانشه AT4 از سری ترانشه‌های ساختگاه خاوری مطالعات پارینه لرزه‌شناسی گسله آستانه به همراه جانمایی نمونه‌های سنسنجی شده و نتایج معنی‌دار در همسنجی با داده‌های به‌دست‌آمده از دو ترانشه خاوری (AT5) و باختری (AT3) آن در همان سایت.

Figure 20: A view of the log prepared from the eastern wall of trench AT4 from the series of trenches of the eastern paleoseismological site along Astana fault with the placement of dated samples and significant results in comparison with the obtained data from the two eastern (AT5) and western (AT3) trenches in the same site.

در ترانشه AT4 بر خلاف به سطح رسیدن آشکار دسته درزه‌ها و گسل‌های مشاهده‌شده، برش سطحی کفه گلی و حتی نشانه‌هایی از جوشش ماسه در راستای گسلش در سایت مطالعات دیده می‌شود ولی به سبب قدیمی بودن نسبی چینه‌های ترانشه AT4 (شکل ۲۰)، ناشی از ناهم‌واری و فرسایش زیر بستر در عملکرد سیلاب‌های دوره‌ای رودخانه‌ای (شکل ۷) در همسنجی با دو ترانشه کناری آن (AT3، AT5)، (شکل ۱۹ و ۲۱) اگرچه ثبت و تدقیق رخداد لرزه‌ای ۸۵۶ بر این ترانشه ناممکن می‌نماید، ولی رد اثر گسلش هم‌لرز با این رویداد ویرانگر بر این ترانشه و داده‌های برآمده از لوگ تهیه شده از دیواره آن بی‌تردید آسان نخواهد بود! جزئیات بیشتر در مورد دلیل انتخاب نمونه‌های انتخاب‌شده برای سنسنجی لومینسانس و رادیو کربن، رویداد لرزه‌ای، افق رخداد و سن به‌دست‌آمده در جداول ۱ و ۲ خلاصه شده است:

AT1				
Sample	Unit	Description	Event horizon	Age ka
AT1.OS4.06	14	Pre event 1(S)	14	6.14 ± 0.63
AT1.OS3.06	18	Post event 2(S)	28	13.41 ± 1.42
AT1.OS2.06	11	Post event 3(N)	11	13.72 ± 1.11
AT2				
AT2.OS2.06	9	Pre event 3	9	29.97 ± 2.26
AT3				
AT3.OS2.06	10	Pre event 3	10	11.62 ± 0.65
AT5				
AS08-2	71	Pre event 5- Post event 6	71	5260 ± 850
AS08-3	13	Pre event 2	13	9930 ± 1150
AS08-4	71	Pre event 5	71	8680 ± 270
AS08-5	64	Post event 5	64	7650 ± 890
AS08-7	44	Post event 3	44	6150 ± 940
AS08-8	52	Pre event 3	52	4700 ± 220
AS08-10	41	Pre event 2	41	3760 ± 320
AS08-11	31	Post event 2	41-42	2751 ± 180
AS08-16	11(ww)	Pre event 1	11(ww)	1370 ± 140

جدول ۱: نتایج حاصل از سن سنجی لومینسانس و چرایی انتخاب نمونه‌ها با توجه به دیرینه افق‌های لرزه‌ای در هر دو سایت پژوهشی پلایا و گرابن در دو بخش خاور و باختر گسله آستانه

Table 1: The results of luminescence dating, the paleo-seismic event horizons in both research sites of the playa and the graben in the eastern and western parts of the Astaneh fault.

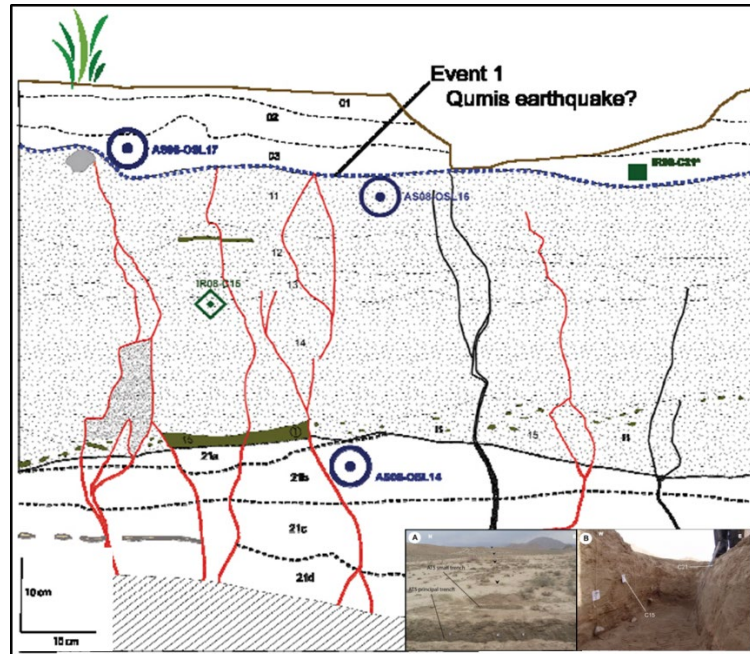
Sample	Unit	Description	Event horizon	Age Cal BP
AT3				
IR AT3-C2-06	12	Post event 2	11	2485 ± 30
IR AT3-C7-06	11	Pre event 2, Post event 3	11, 10	5805 ± 40
IR AT3-C3-06	13	Pre event 1	13	565 ± 30
AT4				
IR AT4-C7-07	5	Pre event 5	5	39700 ± 1400
IR AT4-C13-07	17	Pre event 1	18	5340 ± 40
IR AT4-C3-07	9	Pre event 4	9	18920 ± 190
AT5				
IR AT5-C3-08	64	Post event 5	71	12380 ± 180
IR AT5-C5-08	62	Pre event 4	62	7780 ± 90
IR AT5-C7-08	85	Pre event 6	81	7550 ± 40
IR AT5-C8-08	26	Pre event 1	21	860 ± 60
IR AT5-C9-08	51	Pre event 3	51	11105 ± 920
IR AT5-C10-08	42	Pre event 2	42	7350 ± 70
IR AT5-C11-08	26	Pre event 1	21	830 ± 80
IR AT5-C12-08	64	Post event 5	71	9390 ± 90
IR AT5-C13-08	22	Pre event 1	21	860 ± 60
IR AT5-C18-08	44	Post event 3	51	5180 ± 130
IR AT5-C21-08	3(small Trench)	Post event 1	3(Small Trench)	700 ± 20
IR AT5-C22-08	52	Pre event 3	52	5810 ± 90

جدول ۲: نتایج حاصل از سن سنجی رادیو کربن و چرایی انتخاب نمونه‌ها با توجه به دیرینه افق‌های لرزه‌ای در ترانشه‌های اجرا شده بر سایت پلایا، بخش خاوری گسله آستانه

Table 2: The results of radiocarbon dating, the suggested paleo-seismic event horizons in the trenches on the Playa site, the eastern part of the Astaneh fault.

سن نمونه‌های آنالیز شده در ترانشه AT5 بین ۶۸۰ تا ۱۲۰۲۰ سال (BP) قرار دارند. آخرین رویداد یا به عبارتی جوان‌ترین شکستگی را با یک نمونه زغال چوب (IR-C21-08) جمع‌آوری شده از واحد ۳ در یک ترانشه کوچک تکمیلی در کنار ترانشه اصلی (شکل ۲۱) و یک نمونه لومینسانس (AS08-16) در واحد ۱۱ از ترانشه اصلی محدود کردیم. نمونه رادیو کربنی سن BP 700 ± 20 سال و نمونه لومینسانس سن $1,370 \pm 140$ سال (IRSL) را نشان می‌دهد. زمان زمین لرزه کومس (۸۵۶ میلادی) در بازه زمانی تعریف شده در بین این دو محدوده سنی قرار دارد. برای تعیین زمان آخرین رویداد لرزه‌ای رخ داده از نمونه لومینسانس داخل واحد درشت رودخانه‌ای ۳۱ (AS08-11) و در داخل واحد رسی قرمز

رنگ ۴۱ (AS08-10) استفاده شده است که نمایانگر زمان پیش و پس از رویداد است، (شکل ۱۶). بر این اساس بازه زمانی گسیخت سطحی $2,751 \pm 180$ سال (IRSL) تعیین می‌شود که بررسی این نمونه‌های لومینسانس نشان می‌دهند که زمان مربوط به هر کدام بین $2,940 \pm 560$ سال (OSL) تا $3,760 \pm 320$ سال (IRSL) است.



شکل ۲۱: لوگ تهیه شده از ترانشه کوچک حفر شده در کناره خاوری ترانشه AT5 به همراه جانمایی و سن سنجی تعیین‌کننده ثبت زمین‌لرزه تاریخی ۸۵۶ میلادی که تمدن و شهر کومس را در جنوب باختری دامغان امروزی به ویرانی کشید. A: موقعیت ترانشه کوچک نسبت به اثر برش جوان گسله آستانه (سه‌گوشه‌های سیاه) و ترانشه اصلی و B: نمایی داخلی از درون ترانشه کوچک.

Figure 21: A log prepared from a small trench dug on the eastern side of the AT5 trench along with the location and chronology determining the record of the historical earthquake of 856 AD. A: The position of the small trench relative to the young shear effect of the Astaneh fault (black triangles) and the main trench (AT5), and B: a view of the inside of the small trench.

در این پژوهش با استفاده از دو نمونه رادیو کربنی IR-C22-08 و IR-C18-08 زمان رویداد سوم را بین سال‌های $5,180 \pm 130$ و $5,810 \pm 90$ پیش از میلاد محدود کرده‌ایم. برای به دست آوردن سن رویداد چهارم، از سن رادیو کربن (BP) $5,810 \pm 90$ از نمونه C22 و همچنین یک نمونه رادیو کربنی (AS08-5) به همراه سه نمونه رادیو کربن (C12, C13, C5) از واحدهای ۶۲ و ۶۴ به ترتیب سنی $7,650 \pm 890$ سال (OSL)، $7,780 \pm 90$ cal BP، $9,390 \pm 90$ cal BP و $12,380 \pm 180$ cal BP سال استفاده شده است، (شکل ۱۶، جدول ۱ و ۲).

بر همین پایه، رخداد پنجم بر پایه ست سنجی نمونه‌ای از واحد ۷۱ (AS08-4) با سن آن $8,680 \pm 270$ سال (IRSL) تعیین می‌شود. به این ترتیب سن به‌دست‌آمده برای نمونه IR-C5-08 به دلیل خطاهای کمتر نسبت به AS08-5 است، این رویداد را بین $7,780 \pm 90$ سال و $8,680 \pm 270$ سال محدود نماید؛ و در نهایت برای تعیین سن رویداد آخر (کهن‌ترین رخداد لرزه‌ای قابل مشاهده در دیواره ترانشه با توجه به ژرفای حفاری)، از دو نمونه لومینسانس نوری گرفته‌شده از واحد ۷۱ (AS08-2) و واحد ۸۱ (AS08-3) به ترتیب سنی $5,260 \pm 850$ سال (OSL) و $9,930 \pm 1,150$ سال (OSL) مشخص گردد، (شکل ۱۶، جدول ۱ و ۲).

فواصل تکرار و دوره بازگشت زمین‌لرزه‌های به تقویم کشیده شده از این پژوهش بر اساس نتایج برآمده از آزمایش‌های سن سنجی لومینسانس و کربن ۱۴ انجام‌شده بر واحدهای تفکیک‌شده ترانشه AT5 و ترانشه کوچک کناری

آن، (شکل ۱۶، ۲۱ و جداول ۱ و ۲)، با توجه به رخداد ۶ زمین‌لرزه کهن در بازه زمانی 700 ± 20 سال تا $9,930 \pm 1,150$ سال، میانگین فاصله تکراری حدود 1800 ± 230 سال را برای گسل آستانه به دست می‌دهد.

۵-۳. هم‌سنجی داده‌های پارینه لرزه‌شناسی سایت پلایا

تلفیق و ارزیابی نتایج برآمده از مطالعات پارینه لرزه‌شناسی از ترانسه AT5 و آنچه پیش از این توسط Hollingsworth و همکاران (2010) منتشر شده است امکان مقایسه فواصل زمانی و سن گسلش‌های گذشته آن می‌پردازیم. در ترانسه AT3 تنها سه رویداد ۱۲ هزار سال گذشته شناسایی شده در حالی که در AT5 شش رویداد در ۱۰ هزار سال گذشته شناسایی شده است؛ اما تفسیرهای دیرینه لرزه‌ها نشان می‌دهد که زلزله اخیر محدوده ۱۳۰۶ سال قبل از میلاد و ۵۰۶ سال قبل از میلاد (ترانسه AT3) بین ۲۷۰۰ تا ۶۷۰۰ سال پیش وقوع کرده است، در حالی که در ترانسه AT5 رویداد دوم بین ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ سال پیش و رویداد سوم بین ۵۰۷۰ تا ۵۹۰۰ سال پیش اتفاق افتاده است. آخرین رویداد در ترانسه AT3 بین ۶۵۰۰ تا ۱۲۲۷۰ سال پیش شناسایی شده، در حالی که در ترانسه AT5 سه زلزله بین ۵۷۰۰ تا ۷۸۰۰ سال پیش (E4)، ۷۶۰۰ تا ۸۹۵۰ سال پیش (E5) و ۸۴۰۰ تا ۱۱۰۰۰ سال پیش (E4) شناسایی شده است. در ترانسه AT3 در واحد ۱۱ از نهشته‌های سیلاب آبرفتی درشت دانه با کف فرسایشی به نقشه درآمد (شکل ۱۴) پایانه گسلش نشانگر دو رویداد ۲ و ۳ است. گمان می‌کنیم که فرآیندهای فرسایشی رودخانه‌ای علت فرسایش ویژگی‌ها و ساختار چینه‌شناسی نهشته‌ها باشند در حالی که این شواهد در ترانسه AT5 به سبب دوری از محور رودخانه حفظ شده‌اند.

۵-۴. زمان‌های تکرار و چرخه لرزه‌ای گسل آستانه

با استفاده از نتایج برآمده از پژوهش‌های پارینه لرزه‌شناسی ترانسه AT5 که سبب دقیق‌تر شدن تاریخچه زلزله‌های بزرگ ده هزار سال گذشته با فواصل زمانی بین ۱۴۰۰ تا ۲۴۰۰ سال در امتداد گسل آستانه شده است. اگرچه نتایج حاصل از این پروژه پژوهشی ممکن است نشانگر تغییرات کوچک در میزان و زمان تکرار در طول ده هزار سال گذشته باشد، اما هنوز تشخیص اینکه آیا توزیع رویدادهای قبلی به صورت منظم و یکنواخت بوده است یا خیر دشوار می‌نماید.

با در نظر گرفتن میانگین پیامد لغزش لرزه‌ای همزمان 3.9 ± 0.3 متر برای زلزله گذشته و میانگین بازه زمانی ۱۸۰۰ سال، نرخ لغزش حدود $2/1$ میلی‌متر در سال تخمین می‌زنیم که مشابه نرخ لغزش زمین‌شناسی با نرخ $1/9$ میلی‌متر در سال (Rizza et al., 2011) و با نرخ امروزی لغزش (حدود ۲ میلی‌متر سال) اندازه‌گیری شده توسط GPS است (Djamour et al., 2010). می‌توان چنین انگاشت که هیچ تغییری در نرخ لغزش در طول ۳۰ هزار سال گذشته در امتداد گسل آستانه رخ نداده است و پر بیراه نیست اگر بر این باور باشیم که جابجایی‌های چند ده متری مشاهده‌شده در راستای گسل آستانه (برای نمونه: Rizza et al., 2011) بایستی نتیجه انباشت رخدادهای لرزه‌ای کهن باشد.

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش قابل هم‌سنجی با نتایج به‌دست‌آمده برای دیگر گسله‌های فعال در لبه جنوبی البرز است. برای نمونه در بخش شمال خاوری رشته‌کوه البرز، بازه زمانی رخداد زلزله‌های بزرگ در گسل سبزواری حدود ۳۰۰۰ سال (Fattahi et al., 2006) و در بخش مرکزی، گسل مشا با هشت پارینه لرزه در ۱۰ هزار سال گذشته با بازه زمانی تکرار $1,400 \pm 200$ سال (Solaymani, 2023) و در امتداد گسل شمال تهران میانگین دوره بازگشت بین ۳۲۰۰ تا ۴۱۰۰ سال تخمین زده شده است (Ritz et al., 2012).

بررسی‌های پارینه لرزه‌شناسی در امتداد گسل تالقان نشان از رخداد ۲ تا ۳ زمین‌لرزه در ۵۳۰۰ سال گذشته و میانگین فاصله تکرار کمتر از حدود ۲۰۰۰ سال دارد (Nazari et al., 2009).

۵-۵. بزرگای رخداد زمین‌لرزه کومس و رویدادهای گذشته

تجزیه و تحلیل ریخت زمین‌ساختی و پارینه لرزه‌شناسی در امتداد گسل آستانه به ما اجازه می‌دهد که بزرگای گشتاور (M_w) سه زلزله آخر را با استفاده از رابطه تجربی (Wells and Coppersmith, 1994) برای گسل‌های امتداد

لغز با در نظر گرفتن میانگین جابجایی 3.9 ± 0.3 متر برای زمین‌لرزه کومس، بین ۷/۵۳ و ۷/۵۹ برآورد نماییم. این بزرگای برآورد شده با بزرگای تخمینی ۷/۴ تا ۷/۹ پیشین برای رویداد تاریخی کومس مطابقت دارند. (Ambraseys and Melville, 1982; Berberian and Yeats, 1999)

برای زمین‌لرزه‌های قدیمی‌تر، بررسی‌های ریخت‌شناسی در این پژوهش برای سه رویداد قدیمی‌تر مشاهده شده در ترانشه AT5، با گسیخت‌های هم‌ارز بین ۲/۷ تا ۴/۹ متر بزرگای گشتاوری Mw از ۷/۴۳ تا ۷/۶۳ (Wells and Coppersmith, 1994) را ارائه نموده است.

۶. نتیجه

در این پژوهش با بررسی‌های پارینه لرزه‌شناسی، تاریخ زمین‌لرزه‌های گذشته در پیوند با جنبش‌های گسل آستانه در شمال ایران بازسازی شده است. نتایج به‌دست‌آمده همان‌گونه که پیش‌تر نیز آمده بود (Hollingsworth et al., 2010; Nazari et al., 2014)، تأکیدی است بر این‌که گسل آستانه به احتمال زیاد سرچشمه زمین‌لرزه تاریخی کومس در سال ۸۵۶ پس از میلاد است که گستره دامغان امروزی را با کشتار زیاد به ویرانی کشیده است. رخداد شش زمین‌لرزه در بازه ۱۲ هزار سال گذشته با دوره بازگشت منظم ۱۶۰۰ تا ۲۱۰۰ سال نشان از چرخه لرزه‌ای در امتداد گسل آستانه در یک مدل شبه تناوبی دارد. داده‌های ریخت‌شناسی هر دو سایت‌های پلایا و گرابن با یک مدل پیش‌بینی پذیر لغزش قابل هم‌سنجی است. برای زمین‌لرزه تاریخی کومس جابه‌جایی لرزه‌ای 3.9 ± 0.3 متر و برای ۲ رویداد قبلی جابه‌جایی لرزه‌ای مشابه (بین ۲/۷ تا ۴/۹ متر) برآورد می‌گردد. این نتایج نشانگر بزرگای گشتاور Mw زمین‌لرزه‌های رخ داده گذشته حاصل از جنبش گسل آستانه در بازه‌ای بین ۷/۴ تا ۷/۶ است.

نتایج برآمده از این پژوهش نمونه‌ای است از چگونگی گاه‌نگاری زمین‌لرزه‌های تاریخی، شناخت سرچشمه‌های لرزه‌ای (گسل) و پیشینه لرزه‌ای همساز بر آنکه تأکیدی است بر اهمیت و نیاز ناگزیر بر به‌کارگیری روش‌های پارینه لرزه‌شناسی و زمین‌لرزه‌شناسی باستانی در بازخوانی و بررسی چگونگی برآمدن و برافتادن فرهنگ‌ها و تمدن‌های کهن!

سپاسگزاری

این پژوهش از حمایت‌های برنامه پژوهشی INSU/3F مرکز پژوهش‌های ملی فرانسه، دانشگاه مونت پلیه فرانسه، آزمایشگاه بولارد از دانشگاه کمبریج، انگلستان و سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور برخوردار بوده است. از این‌رو نویسندگان صمیمانه سپاسگزار همه پشتیبانان مادی و معنوی و همراهان پروژه می‌باشند.

منابع

- Allen M. B., Ghassemi M. R., Shahrabi M., Qorashi M. 2003. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz Range, northern Iran. *Journal of Structural Geology* 25, 659-672.
- Ambraseys N. N., Melville C. P. 1982. A history of Persian earthquakes.
- Bennett R. A., Friedrich A. M., Furlong K. P. (2004). Codependent histories of the San Andreas and San Jacinto fault zones from inversion of fault displacement rates; errata. *Geology* (Boulder) 32, 1048.
- Berberian M., Yeats R. S. 1999. Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau. *Bulletin of the Seismological Society of America* 89, 120-139.
- Berberian M., Yeats R.S., 2001. Contribution of archaeological data to studies of earthquake history in the Iranian plateau. *Journal of Structural Geology* 23, 563-584.
- Berberian M. 2014. Earthquakes and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau, Elsevier, volume 17, 1-714.
- Daeron M., Klinger Y., Tapponnier P., Elias A., Jacques E., Sursock A. 2007. 12,000-year-long record of 10 to 13 paleoearthquakes on the Yammouneh Fault, Levant fault system, Lebanon. *Bulletin of the Seismological Society of America* 97, 749-771.

- Djamour Y., Vernant P., Bayer R., Nankali H., Ritz J. F., Hinderer J., Hatam Y., Luck B., Le Moigne N., Sedighi M., Khorrami F. 2010. GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz mountain range, Iran. *Geophysical Journal International* 183, no. 3: 1287-1301.
- Dolan J. F., Bowman D. D., Sammis C. G. 2007. Long-range and long-term fault interactions in Southern California. *Geology (Boulder)* 35, 855-858.
- Fattahi M., Walker R., Hollingsworth J., Bahroudi A., Nazari H., Talebian M., Armitage S. J., Stokes, S. 2006. Holocene slip-rate on the Sabzevar thrust fault, NE Iran, determined using optically stimulated luminescence (OSL). *Earth and Planetary Science Letters* 245, 673-684.
- Grant L. B., Sieh K. 1994. Paleoseismic evidence of clustered earthquakes on the San Andreas Fault in the Carrizo Plain, California. *Journal of Geophysical Research* 99, 6819-6841.
- Hollingsworth J., Jackson J., Walker R., Nazari H., 2008. "Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since 10 Ma." *Geology*, V. 36; No. 10; PP.763-766.
- Hollingsworth J., Nazari H., Ritz J.-F., Salamati R., Talebian M., Bahroudi A., Walker R., Rizza M., Jackson J., 2010. Active tectonics of the East Alborz mountains, NE Iran; rupture of the left-lateral Astaneh fault system during the great 856AD Qumis earthquake. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 115, B12313, doi:10.1029/2009JB007185.
- Jackson J., Priestley K., Allen M., Berberian M. 2002. Active tectonics of the South Caspian Basin. *Geophysical Journal International* 148, 214-245.
- Khair K., Karakaisis G. F., Papadimitriou E. E. 2000. Seismic zonation of the Dead Sea transform fault area. *Annali di Geofisica* 43, 61-79.
- Masson F., Anvari M., Djamour Y., Walpersdorf A., Tavakoli F., Daignieres M., Nankali H., Van Corp, S. 2007. Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements; new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran. *Geophysical Journal International* 170, 436-440.
- Marco S., Stein M., Agnon A., Ron H. 1996. Long-term earthquake clustering; a 50,000-year paleoseismic record in the Dead Sea Graben. *Journal of Geophysical Research* 101, 6179-6191.
- Mousavi Z., Walpersdorf A., Walkers R.T., Tavakoli F., Pathiera E., Nankali H., Nilfouroushan F., Djamour Y., 2013. Global Positioning System constraints on the active tectonics of NE Iran and South Caspian region, *Earth Planet, Sci. Lett.* 377-378, 287-298.
- Nazari H., 2006. Analyse de la tectonique recente et active dans l'Alborz Central et la region de Teheran: Approche morphotectonique et paleoseismologique. *Science de la terre et de l'eau*. Ph.D thesis, Montpellier, Montpellier II, pp. 247.
- Nazari H., 2015. Analyse de la tectonique active en Iran: Approches morphotectonique et paleoseismologique: Implication en termes d'al'ea sismique. *G'eosciences Montpellier*, HDR thesis, Universit'e Montpellier, Montpellier, France, pp:116.
- Nazari H., Ritz J. F., Salamati R., Shafei A., Ghassemi A., Michelot J. L., Massault M., Ghorashi M. 2009. Morphological and palaeoseismological analysis along the Taleghan Fault (central Alborz, Iran). *Geophysical Journal International* 178, 1028-1041.
- Nazari H., Ritz J.-F., Walker R.T., Salamati R., Rizza M., Patnaik R., Hollingsworth J., Alimohammadian H., Jalali A., Kaveh Firouz A., Shahidi A., 2014. Palaeoseismic evidence for a medieval earthquake, and preliminary estimate of late Pleistocene slip-rate, on the Firouzkuh Strike-slip fault in the central Alborz Region of Iran. *Journal of Asian Earth Science*, No.82, P.124-135.
- Nazari H., Ritz J-F., Burg J-B., Shokri M., Haghypour N., Mohammadi Vizhehd M., Avagyan A., Fazeli Nashli H., Ensani M., 2021. Active tectonics along the Khazar fault (Alborz, Iran), *JAES*, V. 219, 104893, <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.104893>.
- Nicol A., Walsh J., Mouslopoulou V., Villamor P. 2009. Earthquake histories and Holocene acceleration of fault displacement rates. *Geology (Boulder)* 37, 911-914.

- Nilforoushan F., Masson F., Vernant P., Vigny C., Martino, J., Abbassi M., Nankali H., Hatzfeld D., Bayer R., Tavakoli F., Ashtiani A., Doerflinger E., Daignieres M., Collard P., Chery J. 2003. GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran. *Journal of Geodesy* 77, 411-422.
- Ritz J. F., Balescu S., Soleymani S., Abbassi M., Nazari H., Feghhi K., Shabanian E., Tabassi H., Y., F., Lamothe M., Michelot J. L., Massault M., Chéry J., Vernant P. 2003. Geometry, kinematics and slip-rate along the Mosha active fault, central Alborz. EGU-AGU-EUG Joint assembly.
- Ritz J. F., Nazari H., Ghassemi A., Salamati R., Shafe, A., Solaymani S., Vernant P. 2006. Active transtension inside central Alborz; a new insight into northern Iran-southern Caspian geodynamics. *Geology (Boulder)* 34, 477-480.
- Ritz J. F., Nazari H., Balescu S., Lamothe M., Salamati R., Ghassemi A., Shafei A., Ghorashi M., Saidi A. 2012. Paleoequakes of the past 30000 years along the North Tehran Fault, Iran, *Journal of Geophysical Research*, Vol 117, doi: 10.1029/2012JB009147, pp 1-15.
- Rizza M., Mahan S., Ritz J-F., Nazari H., Hollingsworth J., Salamati R., 2011. Using luminescence dating from coarse matrix material to estimate fault slip-rate in arid domain: Example of the Astaneh Fault (Iran). *Quaternary Geochronology*, doi: 10.1016 /j. quageo. 2011.03.001.
- Rubin C. M., Sieh K. 1997. Long dormancy, low slip rate, and similar slip-per-event for the Emerson Fault, eastern California shear zone. *Journal of Geophysical Research* 102, 15,319-15,333.
- Saidi A., Akbarpour M. R. 1992. Geological map of Kiyasar, Scale 1:100000, GSI.
- Shokri M., Ghorashi M., Nazari H., Salamati R., Talebian M., Ritz J-F., Mohammad khani H., Shahpasand zadeh M. 2009. Preliminary Results of Paleoseismologic Trenching along the Astaneh Fault, *Geosciences*, Vol, 18, N. 70, pp: 84-93, <http://dx. doi. org/ 10. 22071/ gs. 2009. 57378>. [In Persian].
- Solaymani Azad S. 2023. Active seismogenic faulting in the Tehran Region, north of Iran; state-of-the-art and future seismic hazard assessment prospects, *Tectonophysics*, Volume 856, 2023, 229843, ISSN 0040-1951, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229843>.
- Solaymani Azad S., Ritz J.F., Abbassi M. R. 2011b. Leftlateral active deformation along the Mosha-North Tehran fault system (Iran): Morphotectonics and paleoseismological investigations, *Tectonophysics*, 497, 1-14, doi:10.1016/j.tecto.2010.09.013.
- Vernant P., Nilforoushan F., Hatzfeld D., Abbassi M. R., Vigny C., Masson F., Nankali H., Martinod J., Ashtiani A., Bayer R., Tavakoli F., Chery J. 2004a. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International* 157, 381-398.
- Vernant P., Nilforoushan F., Chery J., Bayer R., Djamour Y., Masson F., Nankali H., Ritz J. F., Sedighi M., Tavakoli F. 2004b. Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data, *Earth and Planetary Science Letters*, 223(1-2), 177-185.
- Wallace R. E. 1987. Grouping and migration of surface faulting and variations in slip rates on faults in the Great Basin Province. *Bulletin of the Seismological Society of America* 77, 868-876.
- Weldon R. J., Scharer K. M., Fumal T. E., Biasi G. 2004. Wrightwood and the earthquake cycle; what a long recurrence record tells us about how faults work. *GSA Today* 14, 4-10.
- Wells D. L., 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.