

Rupture Status of the Southeastern Fault Segment of the June 20, 1990 (Mw 7.4) Rudbar Earthquake

Ali Misaghi^{1✉}, Mohammad Raeesi²

1. Assistant professor, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Iran. E-mail: ali.misaghi@khu.ac.ir

2. Seismologist, SeisAnalysis AS, Bergen, Norway. E-mail: mr@seisanalysis.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 13 November 2024
Received in revised form 26 November 2024
Accepted 27 November 2024

Keywords:
Landslide, strong motion, slip, Rudbar.

ABSTRACT

In this study, we investigate the spatial distribution of landslides, strong motion data, and seismic intensity patterns associated with the June 20, 1990, earthquake, with a moment magnitude (Mw) of 7.4. Our primary objective is to elucidate the rupture status of the southeastern segment, Zard Geli, of the coseismic rupture by integrating geological and seismological data. Our findings indicate that the southeastern segment experienced only a partial rupture during the 1990 earthquake. This partial rupture is evidenced by the disproportionate distribution and density of landslides along the surface rupture. The incomplete rupture of this segment suggests that it retains a considerable amount of accumulated strain energy that was not fully released during the 1990 event. Consequently, this segment remains a potential source for future seismic activity. These findings have implications for seismic hazard assessment and risk mitigation in the region. This study highlights the need for continued monitoring and detailed geological and seismological investigations to better anticipate and mitigate the effects of future earthquakes.

Introduction

The June 20, 1990, earthquake in northern Iran, with a moment magnitude (Mw) of 7.4, is one of the most devastating seismic events in recent history of the region. This catastrophic earthquake resulted in widespread destruction, with reported fatalities ranging from 13,000 to 40,000 individuals. It also caused an estimated 60,000 to 105,000 injuries and left approximately half a million people homeless. The surface rupture associated with this earthquake extended over 80 kilometers and was oriented at an azimuth of approximately 300 degrees. This rupture consisted of three distinct segments: Baklor, Kabateh, and Zard Geli, measuring 10 kilometers, 33 kilometers and 34 kilometers respectively from northwest to southeast (Fig. 1) (Berberian et al., 1992; Berberian and Walker, 2010).

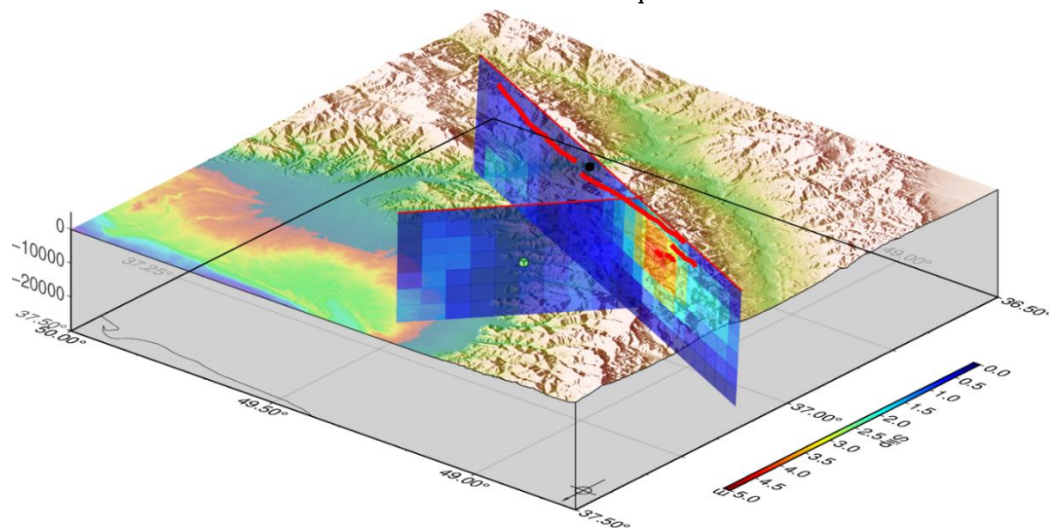
Several puzzling features characterized this earthquake. In particular, almost all the

aftershocks occurred north of the mapped surface rupture, covering an unusually wide area of about 100 kilometers. This distribution implies that the northern block acted as the hanging wall, despite field observations suggesting uplift in the southern block. Additionally, the rupture followed the highlands, which contrasts with the typical lowland rupture patterns commonly observed on the Iranian plateau. Another anomaly was the principal compression axis inferred from the seismological data, which significantly diverged from the geodetic motion vectors of the region. Furthermore, various reported hypocentral locations of the event do not coincide with the projection of the nearly vertical fault plane. Previous studies have attempted to explain these inconsistencies. For instance, Raeesi (2024) offers explanations for these anomalies and presents a kinematic slip distribution for the Rudbar earthquake, indicating minimal slip

Cite this article: Misaghi, A., Raeesi, M. (2024). Rupture Status of the Southeastern Fault Segment of the June 20, 1990 (Mw 7.4) Rudbar Earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 18 (5), 646-663. <https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.5.1015221>



To resolve these uncertainties, we analyze additional data, including strong motion records, intensity distribution, and landslide patterns, to further investigate the rupture characteristics. By integrating these diverse datasets, we aim to further investigate the rupture status of the 1990 earthquake.



Materials and Method

The rationale for using these diverse data sets is to provide additional support for our findings, which are based on robust slip inversion methods. By integrating these data sources, we aim to reinforce the interpretation of the rupture characteristics outlined by Raeesi (2024). Given the significant role of rupture directivity in understanding observational patterns, we provide further details on the theory of forward directivity in the following section.

The azimuthal variation of near-source ground motion in earthquakes demonstrates that the spatial extent of faulting is a key factor in shaping waveforms and amplitudes (Archuleta and Hartzell, 1981). When the rupture propagates towards a site at a velocity close to the shear wave velocity, most of the seismic energy arrives as a single large pulse at the start of the motion record (Somerville et al., 1997). This pulse is significantly shorter than the time it would take for the rupture to traverse the entire length of the fault (Archuleta and Hartzell, 1981). This phenomenon is known as forward rupture directivity, in contrast to backward directivity, which occurs when the rupture propagates away from the site (Somerville, 2003).

Forward rupture directivity occurs under two conditions: the rupture front should propagate toward the site, and the slip direction on the fault

should align with the site (Somerville, 2003; Somerville et al., 1997). This can be quantified using the directivity parameter, defined as $\Gamma = \cos(\theta)/c$, where θ is the site azimuth relative to the rupture propagation azimuth, and c represents the wave velocity (Ammon et al., 2006; Velasco et al., 1994). Directivity effects are significant when the rupture front velocity is comparable to the wave velocity of the phase being analyzed (Wald and Heaton, 1994).

The period of the near-source pulse is influenced by source parameters such as rise time and fault dimensions, which typically increase with earthquake magnitude (Somerville, 2003). Directivity effects become pronounced at periods greater than about 0.6 seconds and are generally observed perpendicular to the fault plane (Somerville et al., 1997).

Rupture directivity effects have been documented in several significant earthquakes, including the June 28, 1992 (Mw 7.3) Landers earthquake (Ammon et al., 1993; Kanamori et al., 1992; Velasco et al., 1994), the January 17, 1994 (Mw 6.7) Northridge earthquake (Howard et al., 2005), the January 16, 1995 (Mw 6.9) Kobe earthquake (Irikura et al., 1996), and the February 6, 2023 (Mw 7.8) Turkey earthquake (Pavlenko and Pavlenko, 2023).

Results

Forward Rupture Directivity

All rupture analyses for the 1990 Rudbar earthquake suggest that the rupture propagated predominantly or entirely in a southeastward

direction (Campos et al., 1994; Choy and Zedník, 1997; Raeesi, 2024). The ABBAR station, located 7.5 km south of the western end of rupture, provides an optimal case to evaluate the credibility of a unilateral rupture (Fig. 4).

Forward directivity is characterized by the arrival of strong energy at the onset of the recording, particularly evident in velocity and displacement records. It is typically associated with a fault-normal component that is significantly larger than the fault-parallel component (Somerville et al., 1997).

To investigate this, we rotated the two horizontal components of the ABBAR recordings by 120 degrees clockwise to align them with the fault-parallel and fault-normal directions (Fig. 2). This rotation angle corresponds to the azimuth of the displacement field at the recording location. Velocity and displacement records were obtained by integrating the acceleration records once and twice, respectively. A high-pass filter with a cutoff frequency of 0.1 Hz was applied to remove long-period artifacts.

No evidence of forward directivity, such as a prominent initial energy arrival, was observed. Furthermore, the fault-parallel displacement was significantly larger than the fault-normal component, contradicting the characteristics of forward directivity. Additionally, the broadening of the displacement record, shown in the lower panel of Fig. 3, suggests a successive receding rupture without constructive interference towards the recording station, indicative of backward directivity.

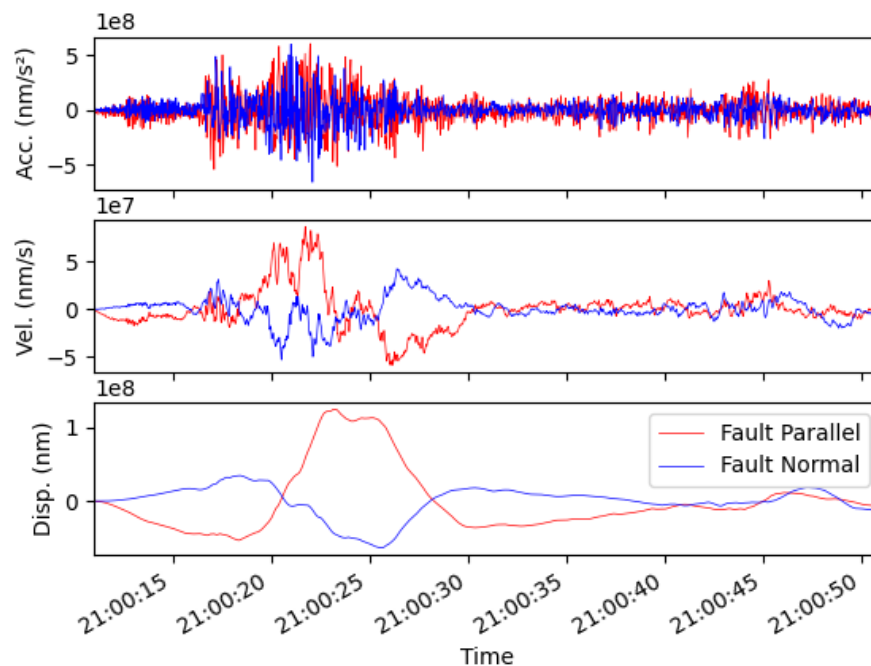


Fig. 2. The upper panel illustrates the rotated horizontal components of ground acceleration, aligned to fault-parallel and fault-normal directions, as recorded by the ABBAR accelerometer, the only near-source instrument available for the Rudbar earthquake of June 20, 1990. The subsequent panels display velocity and displacement time series obtained by integrating the acceleration records and applying a high-pass filter with a cutoff frequency of 0.1 Hz. For the location of the accelerometer relative to the surface rupture, refer to Fig. 4.

Strong Motion Pattern

The strong motion recordings from the Building and Housing Research Center (BHRC) of Iran for the 1990 earthquake were used to plot the acceleration distribution (Fig. 3). A notable feature of this distribution is the significantly

slower decline in acceleration toward the southeast. Although Fig. 3 displays the maximum transverse components, the same pattern is observed in both the vertical and longitudinal components.

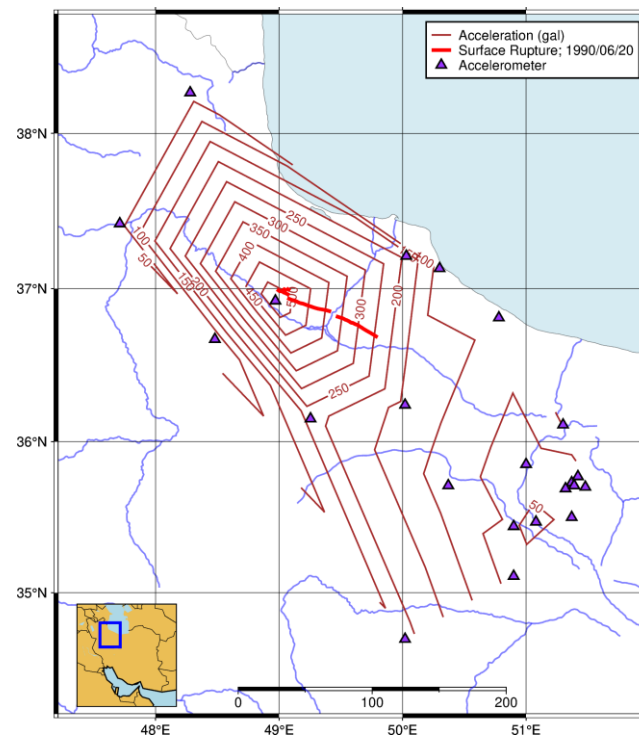


Fig. 3. The red lines represent the segments of the surface rupture (M. Berberian et al., 1992). The triangles indicate the locations of accelerometers that recorded the 1990 Rudbar earthquake. The closest station to the surface rupture is ABBAR, situated approximately 7.5 km away. The contours depict transverse component of acceleration in 50 gal intervals.

Intensity Pattern

The delineated intensity distribution is depicted in Fig. 4 (Berberian et al., 1992). The intensity contours are observed to be broader on the southeastern side compared to the northwestern side. This difference may be partially attributed to the larger population centers located in the central and eastern parts. Additionally, the presence of other rupture segments, including the Manjil thrust to the south and the Hajideh fault to the north, which run subparallel to the Zard Geli segment, also contributes to this pattern (Fig. 4).

Earthquake Triggered Landslides

Several landslides were triggered by the 1990 Rudbar-Manjil earthquake (Mw 7.3) in northern Iran. Ghaedi Vanani et al. (2021) revised the landslide inventory using stereoscopic aerial photographs and field data, identifying 223 landslides with a total area of 11.3 km² and a volume of 3.8×10^8 m³. They utilized a digital elevation model (DEM) and GIS software to

analyze the spatial distribution and size of these landslides. The studies show that the distance from the fault surface rupture was identified as the most significant factor influencing landslide size. Landslides closer to the fault were generally larger, indicating the strong impact of seismic activity on landslide magnitude. The study found that landslide area was primarily dependent on seismic factors such as peak ground acceleration (PGA) and distance from the epicenter. In contrast, landslide volume is more influenced by geological factors, including lithology and topographic features like slope and elevation. They employed the Principal Component Analysis (PCA) method and validated the selection of specific controlling factors for predicting landslide occurrence. Their analysis showed that most landslides occurred in areas with specific geological and topographic characteristics, confirming the relevance of these factors in landslide prediction models.

Their spatial distribution analysis revealed that landslides were more frequent and larger in

certain geological settings, particularly in areas with steep slopes and specific rock types. This finding underscores the importance of geological context in understanding landslide patterns. The study emphasizes the need for integrating both seismic and geological factors in landslide hazard assessments. This comprehensive approach can enhance the accuracy of landslide predictions and inform better land-use planning and disaster management strategies.

As Fig. 4 shows, numerous landslides were triggered in the aftermath of the earthquake. These landslides delineate the central and western rupture segments but significantly deviate from the fault trace along the eastern segment. The largest landslides are found on the

slopes adjacent to the NE-directed Sefid Rud. Additionally, substantial rockslides and landslides occurred along the central segment of Kabateh.

Notably, the sparsity of landslides along the southeastern Zard Geli segment is intriguing. This segment runs through dense forests, which help reduce landslides by facilitating water drainage and stabilizing the soil through an extensive root network. Landslides occurring parallel and south of the Zard Geli segment approximately coincide with the Manjil thrust, which has been the subject of ongoing debate regarding whether the observed deformation is attributed to sliding (Berberian et al., 1992) or faulting (Zaré and Moinfar, 1994).

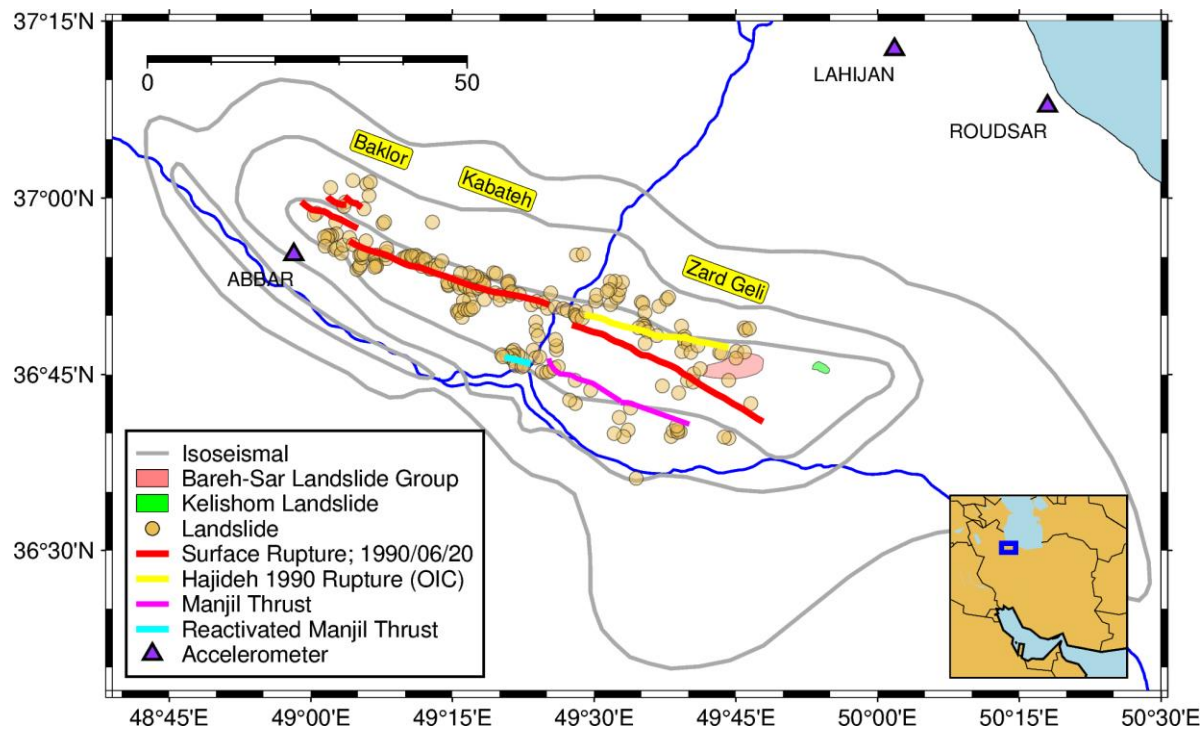


Fig. 4. Landslides triggered by the 1990 Rudbar earthquake are depicted as circles of equal size, though some are significantly larger than the majority (Ghaedi Vanani et al., 2021). The most notable landslides are located along the banks of the Sefid Rud River and along the central segment. Contours represent intensity levels, with three categories: VII, VIII-, and VIII+ to X (Berberian et al., 1992). The blue lines indicate rivers, with the northeast trending river being the Sefid Rud. The field-mapped fault segments are represented by thick red lines (Berberian and Walker, 2010). The yellow line represents the newly identified Hajideh fault, as outlined in the OIC study (Ajrloou et al., 2021). The Manjil thrust is shown in magenta, with the cyan segment indicating the portion that experienced approximately 50 cm of uplift during the 1990 earthquake (Zaré and Moinfar, 1994). The patches depicting the historical Bareh-Sar and Kelishom landslides are estimated based on satellite imagery. The Bareh-Sar patch encompasses several significant landslides.

Optical Image Correlation

Optical image correlation techniques revealed traces of the Rudbar fault in a separate study ([Ayorlou et al., 2021](#)). By analyzing aerial images from various time periods, the researchers found dislocations reaching 6.5 meters along the Zard Geli segment. They delineated fault segments and identified a new fault segment, Hajideh, that corresponds to the strip of landslides located north of the Zard Geli segment (Fig. 4). However, the computed dislocations along the Zard Geli segment appear to be implausible. Notably, the correlation between large dislocations and the presence of forests and inclinations is strong. Furthermore, these dislocations largely coincide with areas that exhibit an absence of landslides. In some images, the polarity of the anomalies appears to reverse, and different pairs of images demonstrate significantly varying levels of

dislocation, particularly along the Zard Geli segment.

Focal Mechanism

The study area has relatively few moderate earthquakes with available focal mechanism. However, a two-month investigation yielded 65 focal mechanisms, primarily covering the eastern half of the 1990 earthquake surface rupture, including full coverage of the Zard Geli segment ([Tatar and Hatzfeld, 2009](#)). These seismic events are predominantly characterized by strike-slip and reverse mechanisms, with a smaller proportion exhibiting normal faulting. While most of the focal mechanisms suggest a nodal plane subparallel to the 1990 surface rupture, some of the larger seismic events indicate a north-south nodal plane. These north-south trending events are primarily reverse faulting.

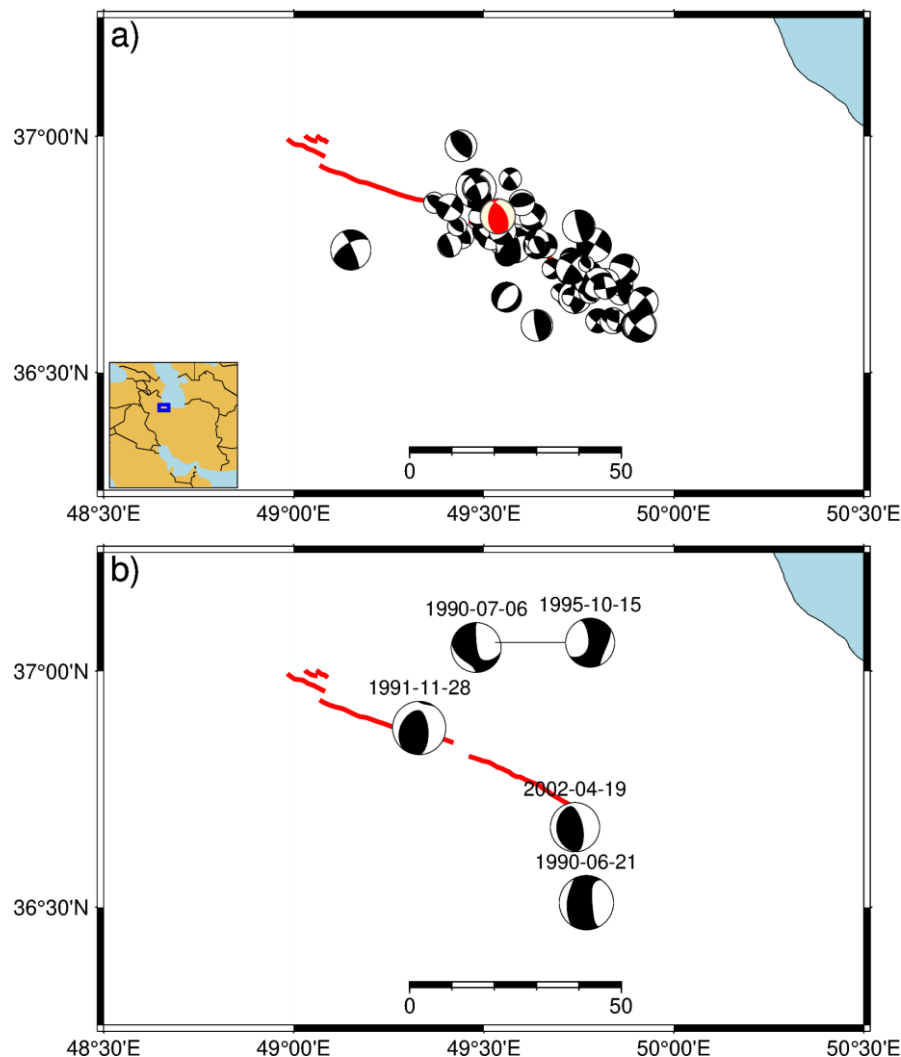


Fig. 5. a) Black focal mechanisms represent solutions determined by Tatar and Hatzfeld (2009) based on data from a temporary local seismic network operating during June and July 1998. This network covered the clustered area. The red lines indicate surface rupture segments of the 1990 Rudbar earthquake. The red focal mechanism corresponds to the November 1, 2024, earthquake with a magnitude of 3.7. b) Focal mechanisms reported by the Global Centroid Moment Tensor (CMT) catalog for the period following the 1990 Rudbar earthquake up to January 2025.

Global Centroid Moment Tensor (CMT) solutions for the study area are sparse, with only five focal mechanisms available. This scarcity, while limiting detailed analysis, underscores the dominant tectonic processes in the region. Among these five Global CMT solutions, three exhibit north-south trending reverse faulting mechanisms (Fig. 5b). This observation provides significant evidence for the primary post-event tectonic regime, which suggests sustained westward motion of the blocks located east of the 1990 surface rupture.

The focal mechanism of a recent magnitude 3.7 earthquake, which occurred on November 1,

2024, is consistent with the north-south trending reverse faulting mechanisms, as illustrated by the red focal mechanism in Fig. 5a.

Discussion

The spatiotemporal distribution of the 1990 Rudbar earthquake was meticulously determined by Campos et al. (1994) through the inversion of teleseismic body-wave data. Their comprehensive analysis included an assessment of rupture directivity, revealing clear evidence of eastward propagation from the epicenter. They reported that the earthquake was preceded by a foreshock occurring approximately 10 seconds

prior to the main event, which could not be resolved using broadband data. Their findings indicated an initial bilateral rupture; however, the northwestern propagation ceased after 10 seconds, while southeastern propagation continued at a rupture velocity of approximately 2.5 km/s. They identified nine subevents, noting that the main moment release occurred at the epicenter and at subevents located 20, 30, and 40 km southeast of the epicenter, with these four subevents arranged in order of increasing moment release.

In a separate study, Choy and Zedník (1997) synthesized teleseismic P waves using a forward modeling approach to derive four subevents associated with the 1990 Rudbar earthquake. Although they acknowledged a bilateral rupture, their results indicated four successive subevents propagating from northwest to southeast. They also discussed a minor foreshock occurring about 10 seconds prior to the main rupture; however, they did not model it due to its small magnitude.

Raeesi (2024) employed two different slip inversion methods (Ji et al., 2002; M. Kikuchi and Kanamori, 1991; Masayuki Kikuchi and Kanamori, 1982) and obtained nearly identical slip distributions along the main fault of the 1990 Rudbar earthquake. Additionally, they utilized the capabilities of the method described in Ji et al. (2002) to derive slip distributions across multiple fault planes. The results suggested a complex rupture involving at least two strike-slip faults. The rupture initiated on the NE-trending Lahijan fault in a right-lateral manner, which is referred to in other studies as the foreshock (Campos et al., 1994; Choy and Zedník, 1997). After five seconds, the rupture on the second and principal NW-trending Rudbar fault plane began at its northwestern end and propagated unilaterally toward the southeast (Fig. 1).

Other forms of faulting, particularly reverse faulting, are likely to have occurred in the vicinity of the southeastern segment. Published images depicting faulting along the southeastern Zard Geli segment clearly demonstrate a

significant reverse component, as illustrated in Figure 7 of Berberian et al. (1992) and Figure 9 of Manuel Berberian and Walker (2010). There has been considerable debate regarding the nature of the deformation observed along the Manjil thrust following field excursions (Berberian et al., 1992; Berberian & Walker, 2010; Zaré and Moinfar, 1994). Zaré and Moinfar (1994) emphasize the documentation of reverse faulting along sections of the east-west Manjil thrust, noting an uplift of approximately 50 cm in the northern block. Such an observation would complicate attributing this uplift to gravitational processes, such as land sliding. Conversely, the Hajideh fault ruptured to the north of the Zard Geli segment (Ajlrou et al., 2021).

The absence of directivity in the ABBAR recordings suggests that the rupture propagated away from the station in a southeastward direction. It is important to note that ABBAR is situated at a location where slip vectors were also directed away from the station. If there had been a recording station to the north of the rupture, aligned with ABBAR's longitude, it would have shown evidence of backward rupture directivity, as inferred from the second condition for directivity discussed in Section 2.1.

Moreover, the significantly slower attenuation of acceleration in the southeast direction strongly supports the presence of southeastward directivity (Fig. 3). The intensity distribution further reinforces the concept of southeastward directivity (Fig. 4).

The dislocations derived from optical image correlation (OIC) as suggested (Ajlrou et al., 2021) are notably large and carry significant implications for hazard and risk assessments along the segment. Such substantial dislocations, whether coseismic or post-seismic, imply a reduced hazard and risk for the segment, which contrasts with findings from seismological studies (Raeesi, 2024). The dislocations obtained from OIC indicate a completely asymmetric source time function (STF), which conflicts with the various STFs derived from slip inversions (Raeesi, 2024). One might speculate that these

large dislocations occurred during post-seismic motion; however, several concerns arise regarding their validity.

The correlation of abnormal dislocation patches with slopes, forested areas, and topographical features raises questions about their authenticity. Additionally, the association with locations that exhibit an absence of landslides further casts doubt on these findings. Factors such as varying solar angles causing different shading effects (Van Puymbroeck et al., 2000), along with the growth of trees over several decades, may influence these observations. Another contributing issue could be forest creep, which might explain the lack of landslides. Furthermore, Dominguez et al. Dominguez et al. (2003) highlighted, utilizing 59 GPS recordings, that long-period artifacts in a similar OIC study in Taiwan could reach up to 15 meters due to uncertainties in satellite attitude (roll, pitch, and yaw). In the case of Rudbar, this correction was not applied, as there were no GPS measurements or rigorous assessments available to address the issue. Consequently, the effects are observable even at distant locations from the rupture, exhibiting varying amplitudes and polarities.

The anomalous distribution of landslides may suggest a coincidence with other forms of faulting in the vicinity of the third segment, as noted in other studies (Raeesi, 2024). Additionally, the size of the landslides along the third segment is considerably smaller compared to those observed elsewhere. This is notable given the presence of evidence for significant historical landslides of Bareh-Sar and Kelishom along the third segment (Fig. 4) (Berberian et al., 1992). This raises the question of why such large landslides were not triggered by the 1990 earthquake. This observation supports Raeesi (2024) conclusion that the segment is only partially ruptured, indicating a strong likelihood that it could rupture during a future major earthquake.

Furthermore, the analysis of strong motion records and intensity distribution provides additional insights into the rupture process. The attenuation patterns observed in the southeast

direction, coupled with the intensity distribution, suggest a predominant southeastward rupture propagation. The integration of these datasets enhances our understanding of the rupture process and highlights the complexity of the seismic event.

Conclusions

Analysis of the 1990 Rudbar earthquake provides substantial evidence that the event exhibited a unilateral rupture, propagating predominantly from northwest to southeast. This conclusion is supported by the recorded acceleration and intensity distributions, which align with the observed directivity analysis. Slip inversion analysis further corroborates this finding, indicating a clear pattern of rupture propagation.

The slip along the southeastern segment of the rupture appears to have been relatively small or partial. This limited slip likely explains the absence of significant landslides in the vicinity of this segment, as the energy release was insufficient to trigger large-scale slope failures. However, the effects of directivity, combined with the presence of other subparallel ruptures, contributed to the widening and intensification of destruction on the southeastern side of the rupture zone. This phenomenon underscores the complex interplay between rupture dynamics and surface manifestations of seismic activity.

The findings of this study reinforce the results obtained from slip inversion analyses, suggesting that the Zard Geli segment experienced only a partial rupture during the 1990 earthquake. This partial rupture implies that a significant amount of strain energy remains accumulated along this segment, which was not fully released during the event. Consequently, the Zard Geli segment may be prone to rupture in a future major earthquake, posing significant hazards and risks to the region.

The implications of these findings are critical for seismic hazard assessment and risk mitigation strategies. Understanding the rupture characteristics and the potential for future

seismic activity along partially ruptured segments is essential for developing effective preparedness measures. This study highlights the importance of continuous monitoring and detailed geological and seismological investigations to better anticipate and mitigate the impacts of future earthquakes.

In conclusion, the 1990 Rudbar earthquake serves as a valuable case study for understanding the complexities of seismic rupture processes. The integration of various data sources, including strong motion records, intensity distributions, and slip inversion analyses, provides a better understanding of the event. The identification of partially ruptured segments with significant residual strain energy underscores the need for ongoing research and monitoring to enhance the resilience of communities in earthquake-prone regions. Future studies should focus on refining seismic hazard models and improving our ability to predict and respond to major seismic events.

Acknowledgements

We thank the Building and Housing Research Center (BHRC) of Iran for providing the accelerograms utilized in this study. The GMT software was employed for mapping (Wessel et al., 2019), while the SAC software was used for analysis (Goldstein and Snoke, 2005). We appreciate the contributions of the developers of both software programs.

References

- Ajorlou, N., Hollingsworth, J., Mousavi, Z., Ghods, A., & Masoumi, Z. (2021). Characterizing Near-Field Surface Deformation in the 1990 Rudbar Earthquake (Iran) Using Optical Image Correlation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(6). <https://doi.org/10.1029/2021GC009704>
- Ammon, C. J., Velasco, A. A., & Lay, T. (1993). Rapid estimation of rupture directivity: Application to the 1992 Landers (MS = 7.4) and Cape Mendocino (MS = 7.2), California earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 20(2). <https://doi.org/10.1029/92GL03032>
- Ammon, C. J., Velasco, A. A., & Lay, T. (2006). Rapid estimation of first-order rupture characteristics for large earthquakes using surface waves: 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Geophysical Research Letters*, 33(14). <https://doi.org/10.1029/2006GL026303>
- Archuleta, R. J., & Hartzell, S. H. (1981). Effects of fault finiteness on near-source ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(4). <https://doi.org/10.1785/bssa0710040939>
- Berberian, M., Qorashi, M., Jackson, J. A., Priestley, K., & Wallace, T. (1992). The Rudbar-Tarom earthquake of 20 June 1990 in NW Persia: preliminary field and seismological observations, and its tectonic significance. *Bulletin - Seismological Society of America*, 82(4).
- Berberian, Manuel, & Walker, R. (2010). The Rudbār M w 7.3 earthquake of 1990 June 20; seismotectonics, coseismic and geomorphic displacements, and historic earthquakes of the western 'High-Alborz', Iran. *Geophysical Journal International*, 182(3), 1577–1602.
- Campos, J., Madariaga, R., Nábělek, J., Bukchin, B. G., & Deschamps, A. (1994). Faulting process of the 1990 June 20 Iran earthquake from broadband records. *Geophysical Journal International*, 118(1). <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb04673.x>
- Choy, G. L., & Zedník, J. (1997). The rupture process of the Manjil, Iran earthquake of 20 June 1990 and implications for intraplate strike-slip earthquakes. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 41(1). <https://doi.org/10.1023/A:1023336723587>
- Dominguez, S., Avouac, J., & Michel, R. (2003). Horizontal coseismic deformation of the 1999 Chi-Chi earthquake measured from SPOT satellite images: Implications for the seismic cycle along the western foothills of central Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B2). <https://doi.org/10.1029/2001jb000951>
- Ghaedi Vanani, A. A., Shoaie, G., & Zare, M. (2021). Statistical analyses of landslide size and spatial distribution triggered by 1990 Rudbar-Manjil (Mw 7.3) earthquake, northern Iran: revised inventory, and controlling factors. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(4). <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02106-8>
- Goldstein, P., & Snoke, J. A. (2005). SAC Availability for the IRIS Community. *DMS Electronic Newsletter*, 7(1).

- Howard, J. K., Tracy, C. A., & Burns, R. G. (2005). Comparing observed and predicted directivity in near-source ground motion. *Earthquake Spectra*. <https://doi.org/10.1193/1.2044827>
- Irikura, K., Iwata, T., Sekiguchi, H., Pitarka, A., & Kamae, K. (1996). Lesson from the 1995 Hyogoken Nanbu earthquake: Why were such destructive motions generated to buildings. *J. Nat. Disaster Sci*, 17(2), 99–127.
- Ji, C., Wald, D. J., & Helmberger, D. V. (2002). Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4). <https://doi.org/10.1785/0120000916>
- Kanamori, H., Thio, H. -K, Dreger, D., Hauksson, E., & Heaton, T. (1992). Initial investigation of the Landers, California, Earthquake of 28 June 1992 using TERRAscope. *Geophysical Research Letters*, 19(22). <https://doi.org/10.1029/92GL02320>
- Kikuchi, M., & Kanamori, H. (1991). Inversion of complex body waves - III. *Bulletin - Seismological Society of America*, 81(6).
- Kikuchi, Masayuki, & Kanamori, H. (1982). Inversion of complex body waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(2), 491–506. <https://doi.org/10.1785/BSSA0720020491>
- Pavlenko, O. V., & Pavlenko, V. A. (2023). Rupture Directivity Effects of Large Seismic Sources, Case of February 6th 2023 Catastrophic Earthquakes in Turkey. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 59(6). <https://doi.org/10.1134/S1069351323060149>
- Van Puymbroeck, N., Michel, R., Binet, R., Avouac, J.-P., & Taboury, J. (2000). Measuring earthquakes from optical satellite images. *Applied Optics*, 39(20). <https://doi.org/10.1364/ao.39.003486>
- Raeesi, M. (2024). Revisiting the 20 June 1990 (Mw 7.4) Rudbar Earthquake. In 9th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE9). Tehran.
- Somerville, P. G. (2003). Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 137(1–4). [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(03\)00015-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(03)00015-3)
- Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., & Abrahamson, N. A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters*, 68(1). <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.199>
- Tatar, M., & Hatzfeld, D. (2009). Microseismic evidence of slip partitioning for the Rudbar-Tarom earthquake (Ms 7.7) of 1990 June 20 in NW Iran. *Geophysical Journal International*, 176(2). <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03976.x>
- Velasco, A. A., Ammon, C. J., & Lay, T. (1994). Empirical Green function deconvolution of broadband surface waves: rupture directivity of the 1992 Landers, California (Mw = 7.3), earthquake. *Bulletin - Seismological Society of America*, 84(3).
- Wald, D. J., & Heaton, T. H. (1994). A dislocation model of the 1994 Northridge, California, earthquake determined from strong ground motions. US Geological Survey,.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., & Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools Version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11). <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>
- Zaré, M., & Moinfar, A. A. (1994). Comment on “The Rudbar-Tarom earthquake of 20 June 1990 in NW Persia: A preliminary field and seismological observations and its tectonic significance” by M. Berberian, M. Qorashi, J. A. Jackson, K. Priestley, and T. Wallace. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(2). <https://doi.org/10.1785/bssa0840020484>



وضعیت گسل بخش جنوب شرقی زلزله رودبار به تاریخ ۲۰ ژوئن ۱۹۹۰ (بزرگی ۷٫۴)

علی میثاقی^۱ ✉، محمد رئیسی^۲۱. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی. رایانامه: ali.misaghi@khu.ac.ir۲. زلزله شناس، ساینز آنالیز، برگن، نروژ. رایانامه: mr@seisanalysis.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در این مطالعه، توزیع مکانی لغزش‌ها، داده‌های حرکت قوی، و الگوهای شدت زلزله مربوط به زلزله ۲۰ ژوئن ۱۹۹۰ با بزرگای گشتاوری ۷.۴ (Mw) مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی ما روشن کردن وضعیت گسل بخش جنوب شرقی، زردگلی، از گسل‌های همزمان زلزله با ادغام داده‌های زمین‌شناسی و زلزله‌شناسی است. نتایج ما نشان می‌دهد که بخش جنوب شرقی تنها به صورت جزئی در طول زلزله ۱۹۹۰ دچار لغزش شده است. این لغزش جزئی با توزیع نامتناسب و تراکم لغزش‌ها در طول گسل سطحی نشان داده شده است. ناقص بودن لغزش این بخش نشان می‌دهد که این بخش مقدار قابل توجهی انرژی انباشته شده‌ای را که در طول زلزله ۱۹۹۰ به طور کامل آزاد نشده است، حفظ می‌کند. بنابراین، این بخش یک منبع بالقوه برای فعالیت‌های زلزله‌ای زمین لغزش، حرکت قوی، لغزش،
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۳	آینده باقی می‌ماند. این یافته‌ها تأثیراتی بر ارزیابی خطر زلزله و کاهش ریسک در منطقه دارد. این مطالعه نیاز به پایش مداوم و تحقیقات زمین‌شناسی و زلزله‌شناسی دقیق‌تر را برای پیش‌بینی و کاهش اثرات زلزله‌های آینده مورد تأکید قرار می‌دهد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷	
کلیدواژه‌ها:	
رودبار	

مقدمه

ویژگی معمایی این زلزله را مشخص می‌کرد. به‌ویژه، تقریباً تمام پس‌لرزه‌ها در شمال گسل سطحی نقشه‌برداری شده رخ دادند، که یک ناحیه غیر معمولی وسیع حدود ۱۰۰ کیلومتر را پوشش می‌داد. این توزیع نشان می‌دهد که بلوک شمالی به عنوان دیواره آویزان عمل کرده است، با وجود اینکه مشاهدات میدانی نشان می‌دهد که بلوک جنوبی بالا آمده است. علاوه بر این، گسل از ارتفاعات عبور کرد، که با الگوهای گسل در نواحی پست که معمولاً در فلات ایران مشاهده می‌شود، متفاوت است. یکی دیگر از ناهنجاری‌ها محور فشردگی اصلی است که از داده‌های زلزله‌شناسی استنتاج شده است، که به‌طور قابل توجهی از بردارهای حرکت ژئودتیکی منطقه انحراف داشت. علاوه بر این، مکان‌های مختلف گزارش‌شده کانونی زلزله با گسل تقریباً عمودی

زلزله ۲۰ ژوئن ۱۹۹۰ در شمال ایران با بزرگای گشتاوری ۷.۴ (Mw) یکی از ویرانگرترین وقایع زلزله‌ای در تاریخ اخیر منطقه است. این زلزله فاجعه‌بار باعث ویرانی گسترده شد و تعداد تلفات گزارش‌شده بین ۱۳،۰۰۰ تا ۴۰،۰۰۰ نفر را شامل می‌شود. همچنین باعث جراحات تخمینی بین ۶۰،۰۰۰ تا ۱۰۵،۰۰۰ نفر و بی‌خانمانی تقریباً نیم میلیون نفر شد. گسل سطحی مرتبط با این زلزله بیش از ۸۰ کیلومتر طول داشت و در آزمون تقریباً ۳۰۰ درجه جهت‌گیری شده بود. این گسل شامل سه بخش مجزا بود: بکلر، کباته، و زردگلی به ترتیب ۱۰ کیلومتر، ۳۳ کیلومتر، و ۳۴ کیلومتر از شمال غربی تا جنوب شرقی (شکل ۱) (Berberian et al., 1992; Berberian and Walker, 2010) چندین

بحث و نتایج

تنوع آزمون‌های حرکت زمین نزدیک به منبع در زلزله‌ها نشان می‌دهد که طول گسل یک عامل کلیدی در شکل‌دهی به فرم‌ها و دامنه‌ها است (Archuleta and Hartzell, 1981). هنگامی که شکستگی گسل به سمت یک سایت با سرعتی نزدیک به سرعت موج برشی حرکت می‌کند، بیشتر انرژی زلزله به سرعت یک پالس بزرگ واحد در آغاز رکورد حرکت می‌رسد (Somerville et al., 1997). این پالس به‌طور قابل توجهی کوتاه‌تر از زمان لازم برای عبور شکستگی از کل طول گسل است (Archuleta and Hartzell, 1981). این پدیده به عنوان جهت‌داری پیش سوی شناخته می‌شود، در مقابل جهت‌داری پس سو، که هنگامی رخ می‌دهد که شکستگی از سایت دور شود (Somerville, 2003). جهت‌داری پیش سوی تحت دو شرط رخ می‌دهد: جبهه گسل باید به سمت سایت حرکت کند و جهت لغزش در گسل باید با سایت هم‌سو باشد (Somerville, 2003; Somerville et al., 1997). این می‌تواند با استفاده از پارامتر جهت‌داری که به صورت $\Gamma = \cos(\theta)/c$ تعریف می‌شود، کمی‌سازی شود، که در آن θ آزمون سایت نسبت به آزمون گسل و c نشان‌دهنده سرعت موج است (Ammon et al., 2006; Velasco et al., 1994). تأثیرات جهت‌داری زمانی مهم هستند که سرعت جبهه گسل با سرعت موج فاز مورد تجزیه و تحلیل قابل مقایسه باشد (Wald and Heaton, 1994). دوره پالس نزدیک به منبع تحت تأثیر پارامترهای منبع مانند زمان افزایش و ابعاد گسل قرار دارد که معمولاً با بزرگای زلزله افزایش می‌یابد (Somerville, 2003). تأثیرات جهت‌داری در دوره‌های بیشتر از حدود ۰.۶ ثانیه بارز می‌شوند و به‌طور کلی به صورت عمودی به صفحه گسل مشاهده می‌شوند (Somerville et al., 1997). تأثیرات جهت‌داری پیش سوی در چندین زلزله مهم مستند شده است، از جمله زلزله ۲۸ ژوئن ۱۹۹۲ (Mw 7.3) لندرز

همخوانی ندارند. مطالعات قبلی سعی در توضیح این ناسازگاری‌ها داشته‌اند. به عنوان مثال، رئیسی (Raeesi, 2024) توضیحاتی برای این ناهنجاری‌ها ارائه داده و توزیع لغزش کینماتیکی برای زلزله رودبار ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده لغزش جزئی در طول بخش جنوب‌شرقی زردگلی است. با این حال، یک مطالعه دیگر مقادیر لغزش تا ۶.۵ متر در طول همان بخش گزارش کرده است (Ajourlou et al., 2021). این نتایج متناقض تأثیرات قابل توجهی بر ارزیابی خطر زلزله و کاهش ریسک در منطقه دارد. برای حل این عدم قطعیت‌ها، ما داده‌های اضافی از جمله رکوردهای حرکت قوی، توزیع شدت، و الگوهای لغزش را تجزیه و تحلیل می‌کنیم تا ویژگی‌های گسل را بیشتر بررسی کنیم. با ادغام این داده‌های متنوع، هدف ما بررسی بیشتر وضعیت گسل زلزله ۱۹۹۰ است.

مواد و روش‌ها

برای پرداختن به این مسئله، از ترکیب داده‌های توزیع لغزش، هم تاریخی و هم جدید، همراه با رکوردهای شدت و حرکت قوی موجود استفاده کردیم. علاوه بر این، عدم تطابق‌ها را با نقشه‌های جابجایی تولید شده از طریق تحلیل هم‌بستگی تصاویر نوری (OIC) از تصاویر هوایی و ماهواره‌ای از سال‌های ۱۹۵۵ تا ۲۰۱۸ (Ajourlou et al., 2021) بررسی می‌کنیم. منطق استفاده از این مجموعه داده‌های متنوع این است که پشتیبانی بیشتری برای یافته‌های ما فراهم کنیم که بر اساس روش‌های وارون‌سازی لغزش است. با ادغام این منابع داده، هدف ما تقویت تفسیر ویژگی‌های گسل است که توسط رئیسی (Raeesi, 2024) ترسیم شده است. با توجه به نقش قابل توجه جهت‌داری پیش سوی در درک الگوهای مشاهده‌ای، جزئیات بیشتری در مورد نظریه جهت‌داری پیش سوی در بخش بعدی ارائه می‌دهیم.

(Ghaedi Vanani et al., 2021) موجودی لغزش‌ها را با استفاده از عکس‌های هوایی استریوسکوپ و داده‌های میدانی بازنگری کردند و ۲۲۳ لغزش با مساحت کل ۱۱,۳ کیلومتر مربع و حجمی به میزان $۳,۸ \times ۱۰^8$ متر مکعب را شناسایی کردند. آن‌ها از یک مدل ارتفاع دیجیتال (DEM) و نرم‌افزار GIS برای تجزیه و تحلیل توزیع مکانی و اندازه این لغزش‌ها استفاده کردند. مطالعات نشان می‌دهد که فاصله از گسل سطحی به عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر اندازه لغزش‌ها شناخته شده است. لغزش‌های نزدیک‌تر به گسل به‌طور کلی بزرگ‌تر بودند، که نشان‌دهنده تأثیر قوی فعالیت زلزله‌ای بر بزرگی لغزش‌ها است. مطالعه نشان داد که مساحت لغزش‌ها به‌طور عمده به عوامل زلزله‌ای مانند شتاب پیک زمین (PGA) و فاصله از مرکز زلزله وابسته است. در مقابل، حجم لغزش‌ها بیشتر تحت تأثیر عوامل زمین‌شناسی از جمله لیتولوژی و ویژگی‌های توپولوژیکی مانند شیب و ارتفاع قرار دارد. آن‌ها از روش تحلیل اجزای اصلی (PCA) استفاده کرده و انتخاب عوامل کنترل خاصی برای پیش‌بینی وقوع لغزش‌ها را تأیید کردند. تحلیل‌های آن‌ها نشان داد که بیشتر لغزش‌ها در مناطق با ویژگی‌های زمین‌شناسی و توپولوژیکی خاصی رخ داده‌اند، که اهمیت این عوامل را در مدل‌های پیش‌بینی لغزش تأیید می‌کند. تحلیل توزیع مکانی آن‌ها نشان داد که لغزش‌ها در نواحی زمین‌شناسی خاصی بیشتر و بزرگ‌تر بودند، به‌ویژه در مناطقی با شیب‌های تند و نوع سنگ‌های خاص. این یافته اهمیت زمینه زمین‌شناسی را در درک الگوهای لغزش نشان می‌دهد. مطالعه بر نیاز به ادغام هر دو عامل زلزله‌ای و زمین‌شناسی در ارزیابی خطر لغزش‌ها تأکید می‌کند. این روش جامع می‌تواند دقت پیش‌بینی‌های لغزش را افزایش دهد و برنامه‌ریزی بهتر استفاده از زمین و استراتژی‌های مدیریت بلایای طبیعی را اطلاع‌رسانی کند. همانطور که شکل ۱ نشان می‌دهد، تعدادی از لغزش‌ها در اثر زلزله به وجود آمدند. این لغزش‌ها بخش‌های مرکزی و

(Kanamori et al., Ammon et al., 1993) زلزله ۱۷ ژانویه ۱۹۹۴ (Mw 6.7) نورتریچ (Howard et al., 2005)، زلزله ۱۶ ژانویه ۱۹۹۵ (Mw 6.9) کوبه (Irikura et al., 1996)، و زلزله ۶ فوریه ۲۰۲۳ (Mw 7.8) ترکیه (Pavlenko and Pavlenko., 2023).

نتایج

جهت‌داری پیش‌سوی گسل

تمامی تحلیل‌های گسل برای زلزله رودبار ۱۹۹۰ نشان می‌دهد که گسل به‌طور غالب یا کاملاً در جهت جنوب شرقی گسترش یافته است (Campos et al., 1994; Choy and Zedník, 1997; Raeesi, 2024). ایستگاه ABBAR که در ۷/۵ کیلومتری جنوب انتهای غربی گسل واقع شده است، یک مورد بهینه برای ارزیابی اعتبار گسل یک‌طرفه فراهم می‌کند

الگوی شدت

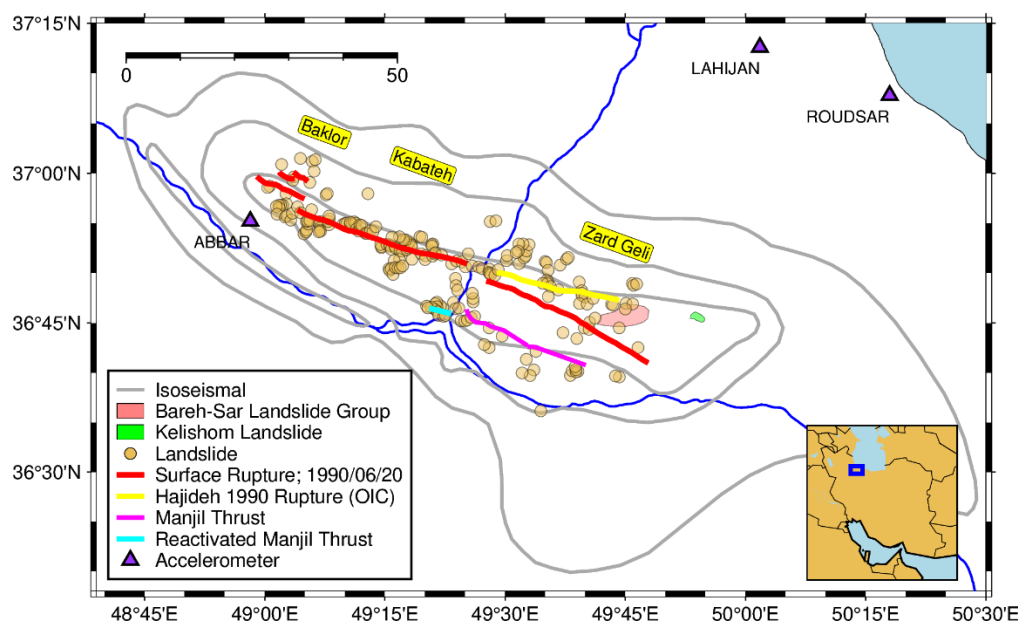
توزیع شدت مشخص شده در شکل ۱ (Berberian et al., 1992) نشان داده شده است. خطوط هم‌شدت در سمت جنوب شرقی گسترده‌تر از سمت شمال غربی مشاهده می‌شوند. این تفاوت ممکن است به‌طور جزئی ناشی از مراکز جمعیتی بزرگ‌تر در بخش‌های مرکزی و شرقی باشد. علاوه بر این، حضور دیگر بخش‌های گسل از جمله مانجیل تراست به سمت جنوب و گسل حاجیده به سمت شمال که به صورت موازی با بخش زرد گلی قرار دارند، نیز به این الگو کمک می‌کند (شکل ۱).

لغزش‌های ناشی از زلزله

چندین لغزش توسط زلزله رودبار-مانجیل (Mw ۱۹۹۰) (7.3) در شمال ایران به وجود آمد. غائدی وانی و دیگران

متراکم عبور می‌کند، که با تسهیل تخلیه آب و تثبیت خاک از طریق شبکه ریشه گسترده به کاهش لغزش‌ها کمک می‌کند. لغزش‌هایی که به صورت موازی و جنوبی بخش زرد گلی رخ می‌دهند تقریباً با مانجیل تراست مطابقت دارند که مورد بحث و مناظره در مورد اینکه آیا تغییر شکل مشاهده شده ناشی از لغزش (Berberian et al., 1992) یا گسل زرد گلی جالب توجه است. این بخش از میان جنگل‌های

غربی گسل را مشخص می‌کنند اما به‌طور قابل توجهی از خط گسل در طول بخش شرقی انحراف دارند. بزرگ‌ترین لغزش‌ها در شیب‌های مجاور رودخانه سفیدرود جهت‌دار به سمت شمال شرق قرار دارند. علاوه بر این، سنگ‌لغزش‌ها و لغزش‌های مهمی در طول بخش مرکزی کبته رخ داد. قابل توجه است که کمبود لغزش‌ها در طول بخش جنوب شرقی زرد گلی جالب توجه است. این بخش از میان جنگل‌های



شکل ۱. لغزش‌های ناشی از زلزله رودبار ۱۹۹۰ به صورت دایره‌های هم‌اندازه نشان داده شده‌اند، اگرچه برخی به‌طور قابل توجهی بزرگ‌تر از اکثر آن‌ها هستند (Ghaedi Vanani et al., 2021). قابل توجه‌ترین لغزش‌ها در طول سواحل رودخانه سفیدرود و در طول بخش مرکزی قرار دارند. خطوط هم شدت سه دسته شدت را نشان می‌دهند: VII-، VIII، و VIII+ تا X (Berberian and Walker, 2010). خطوط آبی رودخانه‌ها را نشان می‌دهند، رودخانه در جهت شمال شرق سفیدرود است. بخش‌های گسل میدانی با خطوط قرمز ضخیم نشان داده شده‌اند (بربریان و واکر، ۲۰۱۰). خط زرد گسل حاجیده تازه شناسایی شده را نشان می‌دهد، همانطور که در مطالعه OIC مشخص شده است (Ajlroul et al., 2021). مانجیل تراست در رنگ سرخابی نشان داده شده است، بخش فیروزه‌ای نشان‌دهنده بخشی است که در طول زلزله ۱۹۹۰ حدود ۵۰ سانتی‌متر بالا آمد (Zaré and Moïnfar, 1994). توده‌هایی که لغزش‌های تاریخی بره‌سر و کلیشم را نشان می‌دهند بر اساس تصاویر ماهواره‌ای تخمین زده شده‌اند. توده بره‌سر شامل چندین لغزش مهم است.

همبستگی تصویر نوری

زرد گلی یافتند. آن‌ها بخش‌های گسل را مشخص کرده و یک بخش گسل جدید به نام حاجیده را که با نوار لغزش‌های واقع در شمال بخش زرد گلی مطابقت دارد، شناسایی کردند (شکل ۱). با این حال، جابجایی‌های محاسبه شده در طول بخش زرد گلی غیرمحمتمل به نظر می‌رسند. به‌طور قابل

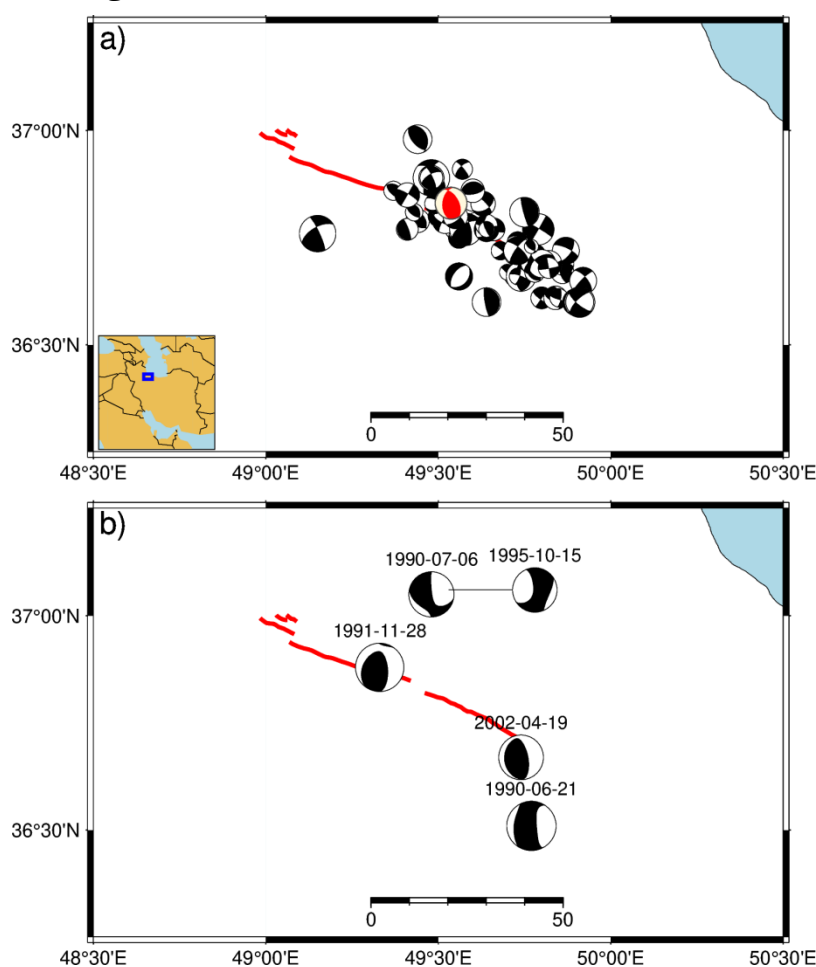
تکنیک‌های همبستگی تصویر نوری ردپای گسل رودبار را در یک مطالعه جداگانه نشان داد (Ajlroul et al., 2021). با تجزیه و تحلیل تصاویر هوایی از دوره‌های زمانی مختلف، پژوهشگران جابجایی‌هایی به میزان ۶٫۵ متر در طول بخش

مکانیسم کانونی را عمدتاً در نیمه شرقی گسل سطحی زلزله ۱۹۹۰، شامل پوشش کامل بخش زرد گلی یافت (Tatar and Hatzfeld, 2009). این رویدادهای زلزله عمدتاً با مکانیسم‌های گسلش مایل و معکوس مشخص می‌شوند، با نسبت کوچک‌تری که گسلش نرمال را نشان می‌دهد. در حالی که بیشتر مکانیسم‌های کانونی یک صفحه ندال تقریباً موازی با گسل سطحی ۱۹۹۰ را نشان می‌دهند، برخی از رویدادهای زلزله بزرگ‌تر یک صفحه ندال شمال-جنوبی را نشان می‌دهند. این رویدادهای شمال-جنوبی عمدتاً با گسلش معکوس مشخص می‌شوند (شکل ۲).

توجهی، همبستگی بین جابجایی‌های بزرگ و حضور جنگل‌ها و شیب‌ها قوی است. علاوه بر این، این جابجایی‌ها به‌طور عمده با مناطقی که لغزش ندارند، هم‌خوانی دارند. در برخی تصاویر، قطبیت ناهنجاری‌ها معکوس به نظر می‌رسد و جفت تصاویر مختلف سطوح جابجایی بسیار متفاوتی را نشان می‌دهند، به‌ویژه در طول بخش زرد گلی.

مکانیسم کانونی

منطقه مطالعه نسبتاً تعداد کمی زلزله متوسط با مکانیسم کانونی در دسترس دارد. با این حال، یک تحقیق دو ماهه ۶۵



شکل ۲. الف) مکانیسم‌های کانونی سیاه راه‌حلی است که توسط تاتار و هاتزفلد (Tatar and Hatzfeld, 2009) بر اساس داده‌های یک شبکه لرزه‌نگاری محلی موقت که در ژوئن و ژوئیه ۱۹۹۸ فعالیت می‌کرد، تعیین شده است. این شبکه منطقه تجمعی را پوشش داد. خطوط قرمز بخش‌های گسل سطحی زلزله ۱۹۹۰ رودبار را نشان می‌دهند. مکانیسم کانونی قرمز مربوط به زلزله ۱ نوامبر ۲۰۲۴ با بزرگی ۳٫۷ است. ب) مکانیسم‌های کانونی گزارش شده توسط کاتالوگ گلوبال CMT برای دوره پس از زلزله ۱۹۹۰ رودبار تا ژانویه ۲۰۲۵.

تنش باقی مانده ای دارد که آزاد نشده و ممکن است در زلزله های آینده خطر ایجاد کند.

این مطالعه اهمیت نظارت مداوم و تحقیقات زمین شناسی دقیق برای پیش بینی و کاهش اثرات زلزله های آینده را تأکید می کند. شناسایی بخش های لغزش نشده با انرژی تنش باقی مانده نشان دهنده نیاز به تحقیقات بیشتر و نظارت مداوم برای افزایش مقاومت جوامع در مناطق زلزله خیز است.

قدردانی

از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ایران برای ارائه شتاب نگارها سپاسگزاری می شود. از GMT برای رسم نقشه ها و نرم افزار SAC برای تحلیل استفاده شد که از متولیان آن ها سپاسگزاری می گردد.

راه حل های گلوبال CMT برای منطقه مطالعه کم تعداد است و تنها پنج مکانیسم کانونی موجود است. این کمبود در حالی که تحلیل دقیق را محدود می کند، فرآیندهای تکتونیکی غالب در منطقه را نشان می دهد. از بین این پنج راه حل گلوبال CMT، سه مورد مکانیسم های گسلش معکوس شمال-جنوبی را نشان می دهند (شکل ۲ب).

نتیجه گیری

تحلیل زلزله رودبار ۱۹۹۰ نشان می دهد که گسل یک طرفه بود که عمدتاً از شمال غرب به جنوب شرق گسترش یافت. لغزش در بخش جنوب شرقی گسل نسبتاً کم بوده، که احتمالاً نبود لغزش های بزرگ در این ناحیه را توضیح می دهد. اثرات جهت داری و گسل های فرعی به تخریب بیشتر در سمت جنوب شرقی کمک کرده است. این بخش انرژی