

Research Article

## Structural and fractal analysis of the southern termination of the Nahavand fault

Leili Izadikian<sup>1\*</sup>, Reza Alipoor<sup>1</sup>, Yazdan Shahriari<sup>1</sup>

1- Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

**Keywords:** *Nahavand fault, Negative flower structure, Fracture, Fractal, Main Zagros recent fault.*

### 1-Introduction

Strike-slip faults caused by the pure shear regime often cut the extension of the aligned orogenic belt; the length of the fault is less than 100 km, and the displacement along them reaches several 10 km. However, the strike-slip faults formed in the simple shear regime are generally parallel to the orogenic belt, and their length and displacement are hundreds of kilometers (Sylvester, 1988). Strike-slip faults can be bent or have en-echelon geometry. Depending on the type of movement of strike-slip faults and the direction of the bends or steps, they can be affected by pressure or tension. The Zagros mountain range is part of the Himalayan Alps orogenic belt and the result of the closure of the Neo-Tethys Ocean between the Arabian and Eurasian plates (Agard et al. 2011; Berberian and King 1981; Alavi 1994). The Zagros mountain range is generally divided from the southwest to the northeast into the Zagros fold-thrust belt, the Suture zone, and the Sanandaj-Sirjan belt (Mohajjel and Fergusson, 2014). The Main Recent Fault (MRF) of Zagros is one of the most important active and strike-slip faults in the folded and thrust belt of Zagros, which has a slope towards the northeast (Talebian and Jackson, 2002). The heights of the area are mainly made of sedimentary or metamorphic rocks. The sedimentary rocks of the region are limestone and conglomerate. Metamorphic rocks include crystallized limestone and low-grade metamorphic shales, which are the most widespread. Also, diorite, granodiorite, and andesite igneous masses are less exposed than metamorphic and sedimentary rocks. In general, it can be said that the formations in the northeast of Nahavand are mostly related to the pre-Jurassic period. These formations include crystallized limestones and metamorphosed limestone and shale layers, where traces of Cretaceous andesitic volcanic masses can also be seen. In the southwest of Nahavand, where the formations are mostly located in the Rorande region of Zagros, they are mainly limestone to crystallized limestone, and the south side contains secondary volcanic traces (Figure 1).

### 2-Material and methods

On the road from Malayer to Nahavand, many normal faults can be seen that are related to the movements of the main recent fault of Zagros. The first fault with the displacement measured in this fault is 50 cm and shows the normal separation in the plane with specifications N40E, 80-85NW. Normal displacement can be seen at the border of young conglomerate units with marl units (drainage terrace) and springs at the border of the two units. This fault's characteristics differ from those of the previous fault, which is S10E, 85NW. Faults 3 to 6 in the studied area have beautifully formed a negative flower structure with a maximum displacement of about 30 cm (Figure 2). Along the Nahavand fault, the right lateral movement of the fault has caused displacement and deviation in the drainage path in various areas. The amount of these deviations has been different in different places. Using Google Earth images of the southern part of the fault in the vicinity of Tudeh Zan village, a deviation was created in the course of the drainage. In this area, the fault is located between Miocene units. The main drainage flows towards the east with a west-east trend, and the fault with a high angle from northwest to southeast has led to a shift in the drainage's path (Figure 3). The

\* Corresponding author: l.izadi@basu.ac.ir

DOI: 10.22055/aag.2024.45042.2414

Received: 2023-10-21

Accepted: 2024-03-17

estimated amount of displacement in this area has been measured to be about one kilometer, which can be related to the recent tectonic activities of the fault.

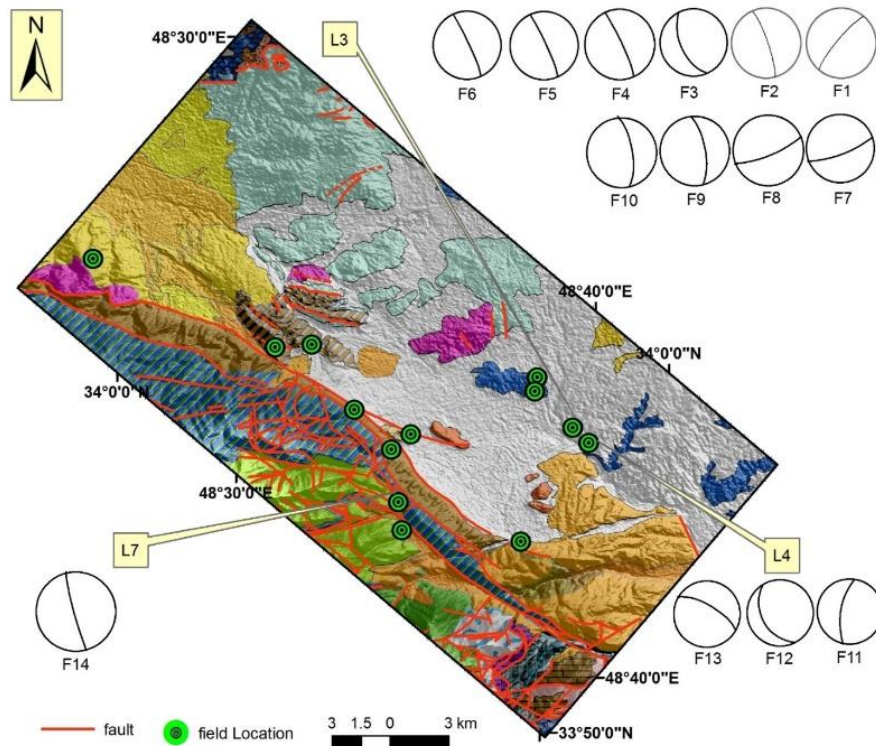


Fig. 1. Geological and structural map of the southern termination of the Nahavand fault and stereographic images of the faults in the area.

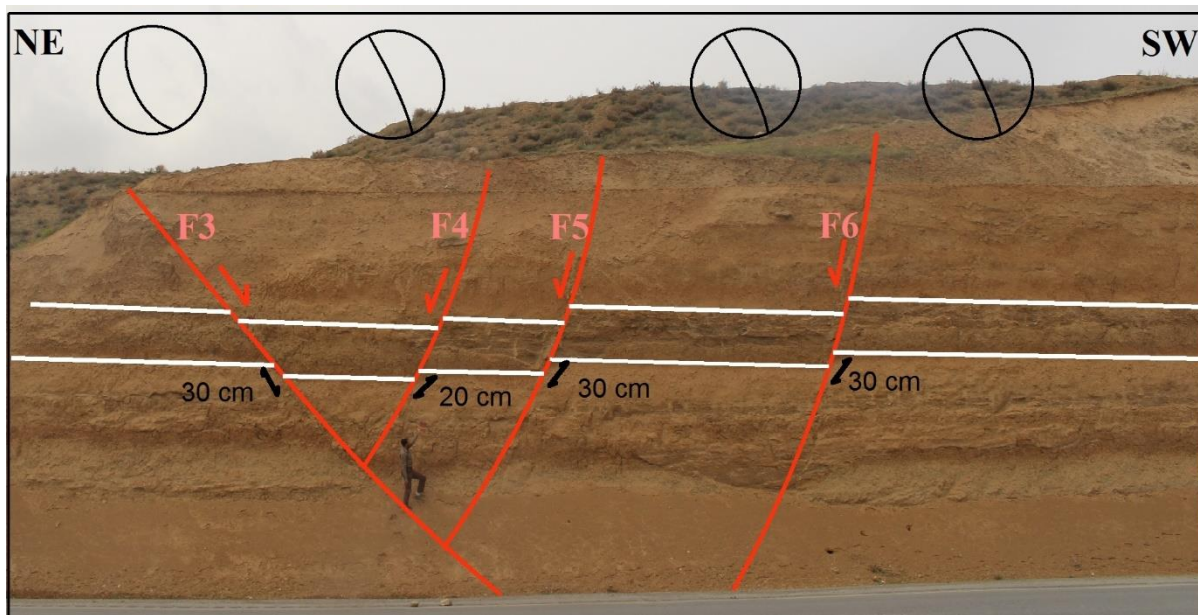


Fig. 2. Negative flower structure with normal separations due to the movement of oblique normal slip faults, view towards the southeast.

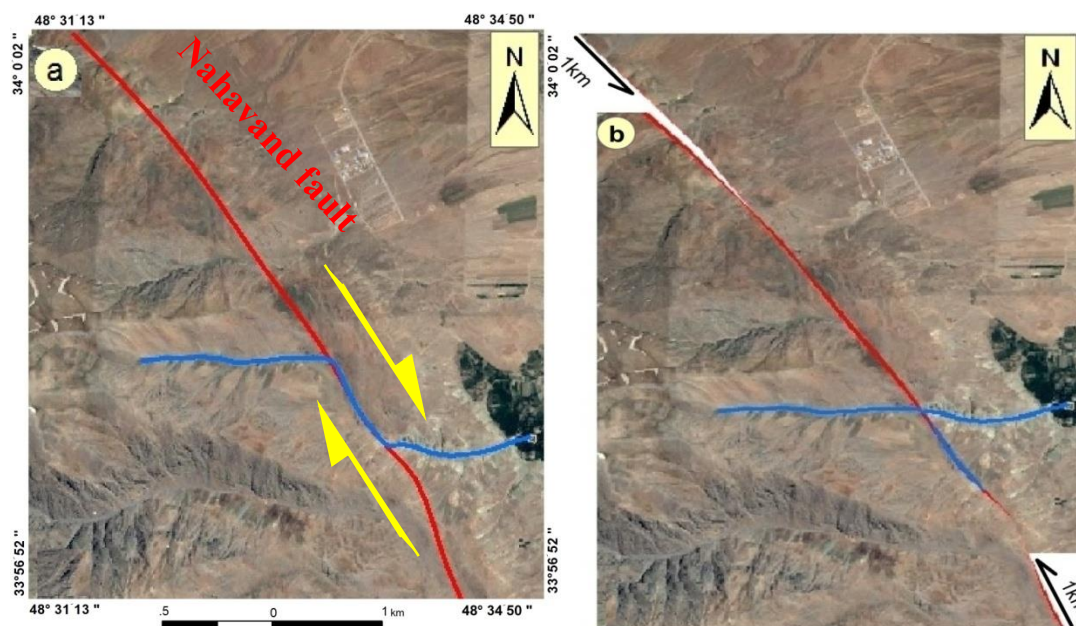


Fig. 3. Right lateral movement created in the drainage path due to the movement of the Nahavand fault. (a) Displaced drainage and (b) restoration of the displacement to the state before the deviation in the drainage. The restoration of the deviation created in the drainage path is estimated to be one kilometer.

### 3-Conclusion

The Nahavand fault, which is one of the parts of the Main Recent fault in Zagros and the extension of the right lateral strike-slip, is located in a stepped arrangement in the north-western part of the Qala Hatem and Dorud fault and is of non-overlapping type. The orientation of the stress field and the geometric arrangement of Nahavand and Dorud fault segments have caused the formation of the transmission basin in this section and have created normal faults and negative flower structures in this region. According to the general pattern obtained from the density of lineaments and rose diagrams in the study area, the fractures close to the fault have a northwest-southeast trend and the trend of the main fault zone, and the secondary fractures around the fault it is of Riddle (R) fractures in Zagros. The density obtained from the lineament shows its very high value in zones e and h, and this value decreases with distance from the main fault due to the fractures related to the MRF, which move away from this zone. The density of fractures decreases. In the fractal analysis of fractures and lineaments, the fractal dimension corresponding to the areas close to the fault shows the highest value. This trend is from the northwest-southeast side of the region, which defines the main fault trend in the region. The influential factor in increasing the fractal dimension of the studied area is the fractures related to the main Recent Zagros fault zone, which decreases in density as they move away from it.

### 4-References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B., wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine* 148, 692-725. <https://doi.org/10.1017/S001675681100046X>
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211-238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2)
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evaluation of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210-265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Mohajjel, M., Rasouli, A., 2014. Structural evidence for superposition of transtension on transpression in the Zagros collision zone: Main Recent Fault, Piranshahr area, NW Iran. *Journal of Structural Geology*, 62, 65-79. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.01.006>



- Sylvester, G., 1988. Strike-slip Faults. Geological Society of America Bulletin 100, 1666-1703. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1666:SSF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1666:SSF>2.3.CO;2)
- Talebian, M., Jackson, J., 2002. Offset on the main recent fault of NW Iran and implications on the late Cenozoic tectonics of the Arabia–Eurasia collision zone. Geophysical Journal International 150, 422–439. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01711.x>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Izadi, L, Alipoor, R., Shahriari, Y., 2024. Structural and fractal analysis of the southern termination of the Nahavand fault. Adv. Appl. Geol. 14(3), 578-597.

DOI: 10.22055/aag.2024.45042.2414

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_19146.html](https://aag.scu.ac.ir/article_19146.html)

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

## بررسی ساختاری و فرکتالی پایانه جنوبی گسل نهاوند

لیلی ایزدی کیان

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

رضا علیپور

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

یزدان شهریاری

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

\* [l.izadi@basu.ac.ir](mailto:l.izadi@basu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۷

### چکیده

گسل نهاوند، با امتداد شمال غرب - جنوب شرق در بخش میانی گسل جوان زاگرس و در شمال غرب قطعه گسل درود قرار گرفته است. این گسل با امتداد و شیب N320/70NE و طول در حدود ۵۵ کیلومتر، باعث دگرریختی منطقه مورد مطالعه شده است. آرایش گسل نهاوند و گسل درود به عنوان قطعاتی از گسل جوان زاگرس به صورت امتداد لغز راست بر راست پله است و این آرایش ساختاری سبب ایجاد کشش در بخش پایانه جنوب غربی گسل نهاوند شده است. شواهد صحرایی اعم از جابجایی آبراهه، جدایش‌های نرمال، ساختار گل منفی و آبراهه‌های موازی نشان دهنده رژیم کششی جوان و فعالیت زمین‌ساختی منطقه است. بررسی خطواره‌های ساختاری و شکستگی‌های مرتبط با گسل با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی نشان می‌دهند که تراکم اصلی خطواره‌های استخراج شده با امتداد غالب N30W تا N70W است و خطواره‌ها با امتداد گسل سازگاری نشان می‌دهد. بررسی ابعاد فرکتالی خطواره‌ها و شکستگی‌های منطقه به صورت جداگانه نشان می‌کند که گسل نهاوند یک گسل پیوسته و مستقیم نیست بلکه به صورت سامانه گسلی نابالغ در منطقه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** گسل نهاوند، ساختار گل منفی، شکستگی، فرکتال، گسل جوان اصلی زاگرس.

### ۱-مقدمه

یکی از ساختارهای خطی باریک پوسته زمین وجود گسل‌های طولیل و کمابیش مستقیم امتداد لغز است که نتیجه جنبش‌های بزرگ مقیاس صفحه‌های زمین ساختی بر روی کره زمین هستند. این گسل‌ها در بردارنده شبکه پیچیده و شاخه شاخه از گسل‌های کوچک تر هستند که سبب ایجاد ناحیه‌های ریخت شناسی مثبت (مرتفع) و منفی (پست) می‌شوند (Sylvester, 1988). گسل‌های امتداد لغز در راستای خود می‌توانند دارای خمیدگی باشند یا می‌توانند هندسه پلکانی داشته باشند. بسته به نوع حرکت گسل‌های امتداد لغز و جهت آرایش خم‌ها یا پلکان‌ها، این بخش‌ها می‌توانند تحت تاثیر فشار یا کشش باشند. در پله‌های گسلی پاره‌های گسلی منفرد از یکدیگر جدا هستند و از راه میدان تنش یا کرنش یا گسل‌های داخلی با یکدیگر برهم کنش دارند. مولفه پله گسلی به دو نوع راست پله و چپ پله وجود دارد. جایی که مولفه پله گسلی و مولفه لغزش گسل

کلی یکسان باشد پله گسلی کششی یا رهایی توسعه می‌یابد. در مقابل جایی که پله گسلی مخالف مولفه لغزش کلی پاره‌های گسل امتداد لغز باشد پله تراکمی یا م‌هاری توسعه می‌یابد (Nabavi and Alavi, 2021). پله‌های گسلی می‌توانند به سه هندسه ناهم پوشان، خنثی و هم پوشان تقسیم شوند که زاویه قطع شدگی نقش مهمی در کنترل هندسه پهنه کششی یا تراکمی دارد (شکل ۱).

کوهزایی زاگرس در اثر برخورد مداوم لبه شمالی صفحه عربی با اوراسیا و بسته شدن اقیانوس تتیس جوان ایجاد شده است (Dercourt et al., 1986; Stampfli and Borel, 2002; Agard et al., 2011). همگرایی بین صفحات عربی و اوراسیا دارای زاویه  $60^\circ$  با مرز برخورد صفحات هستند (Alavi, 2007) بنا بر این همگرایی دارای دو مولفه است:

۱- مولفه ای راستالغز راست بر که به موازات روند شمال غربی و جنوب شرقی زاگرس (Vernant et al., 2004) و عامل

## ۲- زمین شناسی منطقه

ارتفاعات منطقه نهاوند عمدتاً از سنگ‌های رسوبی و یا دگرگونی هستند. سنگ‌های رسوبی منطقه از جنس سنگ آهک و کنگلومرا هستند و تشکیلات دگرگونی شامل آهک-های متبلور و شیل‌های دگرگونی درجه پایین است که بیشترین گسترش را از خود نشان می‌دهند. از دیگر سنگ‌های قابل مشاهده در منطقه توده‌های آذرین دیوریتی، گرانودیوریتی و آندزیتی هستند که در مقایسه با سنگ‌های دگرگونی و رسوبی رخنمون کمتری دارند. به طور کلی می‌توان گفت که سازندهای شمال شرق نهاوند بیشتر مربوط به قبل از دوره ژوراسیک می‌باشند. این سازندها شامل سنگ‌های آهکی بلوری و طبقات آهکی و شیلی دگرگون شده می‌باشند که آثاری از توده‌های آتشفشانی آندزیتی کرتاسه نیز در آنها به چشم می‌خورد. در جنوب غرب نهاوند، سازندها عمدتاً آهکی تا آهک متبلور بوده و حاوی آثار آتشفشانی می‌باشند (شکل ۳). گسل نهاوند در مرز میان واحدهای سنندج- سیرجان قرار دارد و شیب زیادی به سمت شمال شرق دارد (شکل ۴).

## ۳- مواد و روش‌ها

### ۳-۱- ساختارهای منطقه

در مسیر جاده ملایر به نهاوند ترانسه‌های جاده ای زیادی وجود دارد و گسل‌های نرمال که در ارتباط با حرکات گسل جوان اصلی زاگرس می‌باشد قابل مشاهده هستند. اولین گسل با جابجایی اندازه گیری شده ۵۰ سانتی متر بوده و جدایش نرمال را در صفحه با مشخصات N40E, 80NW نشان می‌دهد. جابجایی نرمال در مرز واحدهای کنگلومرای جوان با واحدهای مارن (پادگانه رودخانه ای) و وجود چشمه‌ها در مرز دو واحد دیده می‌شود (شکل ۵a). گسل شماره ۲ با جابجایی حدود یک و نیم متری بزرگترین جدایش اندازه گیری شده در محدوده مورد مطالعه است که از ترانسه جاده ای در واحدهای سنگی مارن و کنگلومرا برداشت شده است. مشخصات این گسل متفاوت با گسل قبلی و S10E, 85NW است (شکل ۵b). گسل‌های شماره ۳ الی ۶ در محدوده مورد مطالعه به زیبایی ساختار گل منفی یا لاله را تشکیل داده اند و عمده جابجایی در حدود ۳۰ سانتی متر می‌باشد (شکل ۶).

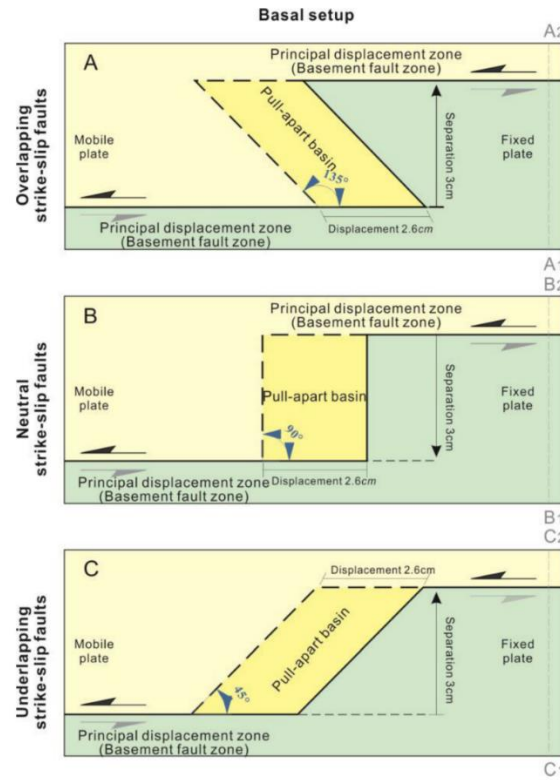
لغزش راستالغز راست بر روی سیستم گسل‌های امتداد لغزی همچون گسل جوان اصلی (MRF)، کازرون و منقارک است.

۲- مؤلفه فشارشی که عمود بر روند زاگرس (Vernant et al., 2004) بوده و باعث ایجاد چین‌ها و راندگی زاگرس شده است.

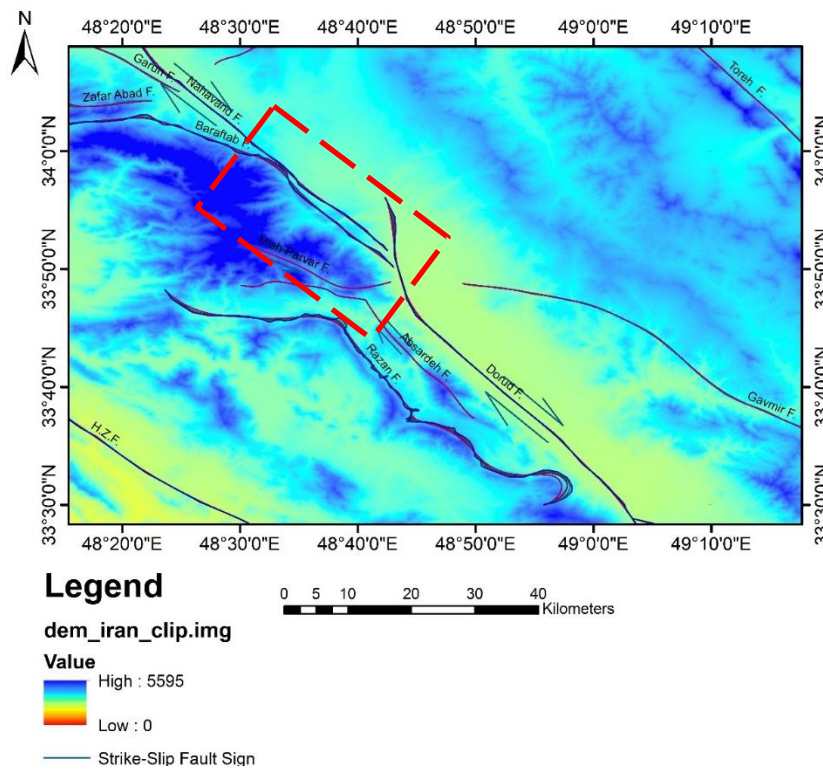
گسل جوان اصلی زاگرس یا به اختصار MRF یکی از مهمترین گسل‌های فعال و امتدادلغز در پس بوم کمربند چین خورده و رانده زاگرس است که به سمت شمال شرق شیب دارد (Talebian and Jackson, 2002). امتداد کلی این گسل به صورت شمال غربی - جنوب شرقی است و عموماً از امتداد گسل اصلی معکوس زاگرس (MZRF) پیروی می‌کند (Berberian, 1995). MRF در راستای خود به قطعات مختلفی تقسیم بندی شده است (Berberian, 1995) و زمین‌لرزه‌های رخ داده در اطراف این گسل نشان‌دهنده ارتباط نزدیک قطعات گسلی با یکدیگر هستند. گسل نهاوند با امتداد شمال غرب - جنوب شرق قطعه جنوبی گسل جوان اصلی زاگرس را شامل می‌شود که در مرز بین دو زون ساختاری زاگرس مرتفع و زون سنندج - سیرجان قرار دارد و از نظر لرزه خیزی بسیار فعال است.

این مرز زمین شناسی امروزه یک ویژگی لرزه زمینساختی مهمی دارد و نشان دهنده یک قطع شدگی ناگهانی بین زمین لرزه‌های فراوان زاگرس و زمین لرزه‌های شدید فلات ایران مرکزی است. از زمان میوسن به بعد و با تغییر جهت حرکت صفحه عربی نسبت به صفحه ایران، تغییر شکل از MZRF به روی گسل MRF انتقال پیدا کرده است (Bachmano et al., 2004). گسل نهاوند در شمال غرب قطعه گسل درود و قلعه حاتم قرار گرفته است.

این گسل با امتداد و شیب N320/70NE، حدود ۵۵ کیلومتر دارد و باعث دگرریختی در منطقه مورد بررسی شده است (شکل ۲). آرایش گسل نهاوند و گسل درود از نوع راست پله ناهمپوشان است (شکل ۱c). در این مقاله با استفاده از برداشت‌های میدانی، مطالعات تصاویر ماهواره ای و آنالیز فرکتال خطواره‌ها و شکستگی‌های منطقه به ساختارهای پایانه گسل نهاوند پرداخته می‌شود.

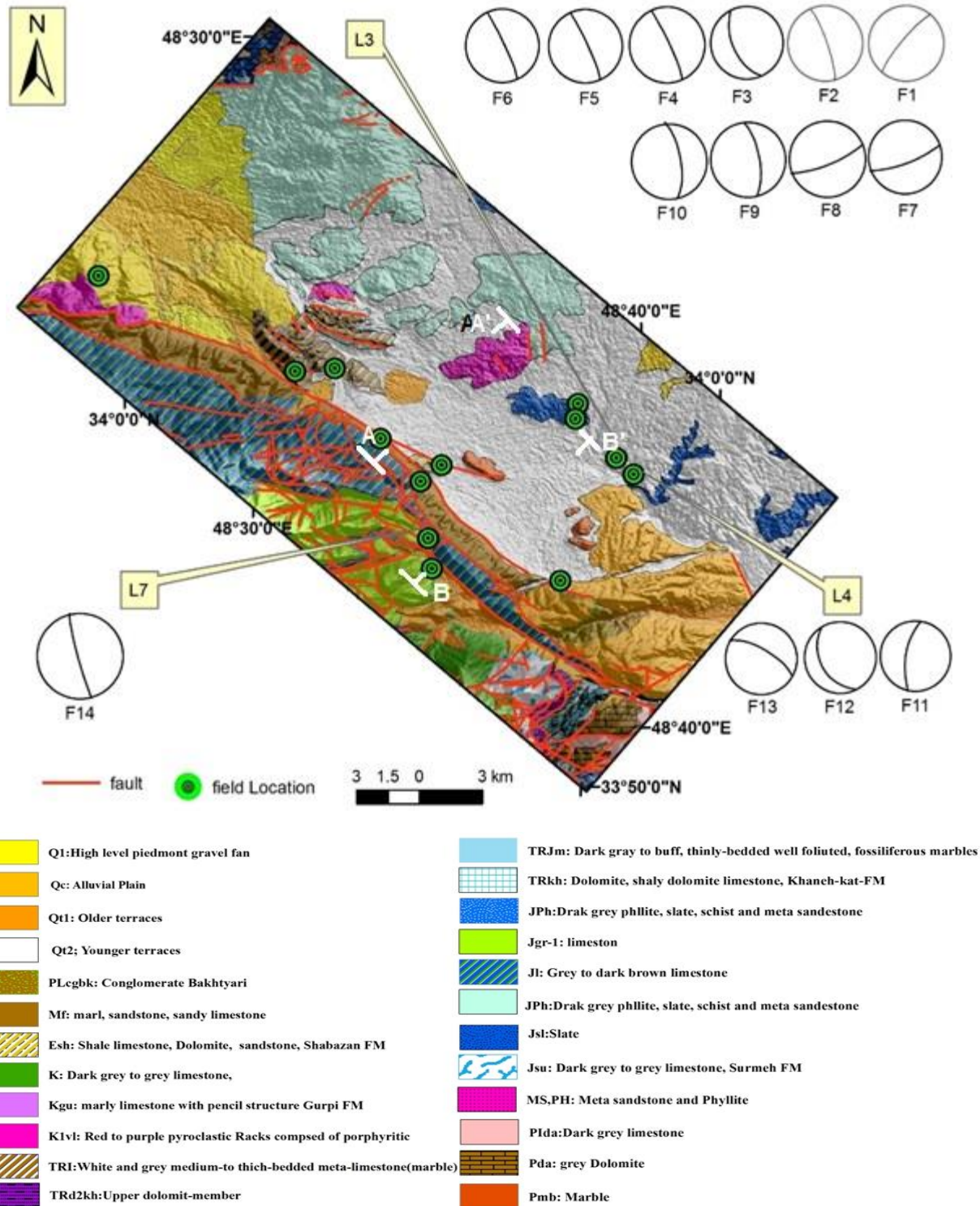


شکل ۱- هندسه پله های گسلی. (a) پله هم پوشان (b) پله خنثی (c) پله نا هم پوشان (Xu et al, 2023)  
 Fig. 1. Geometry of fault steps. a) Overlapping step b) Neutral step c) Underlapping step (Xu et al, 2023).



شکل ۲- آرایش پله ای ناهمپوشان گسل نهوند و گسل درود و موقعیت منطقه مورد مطالعه

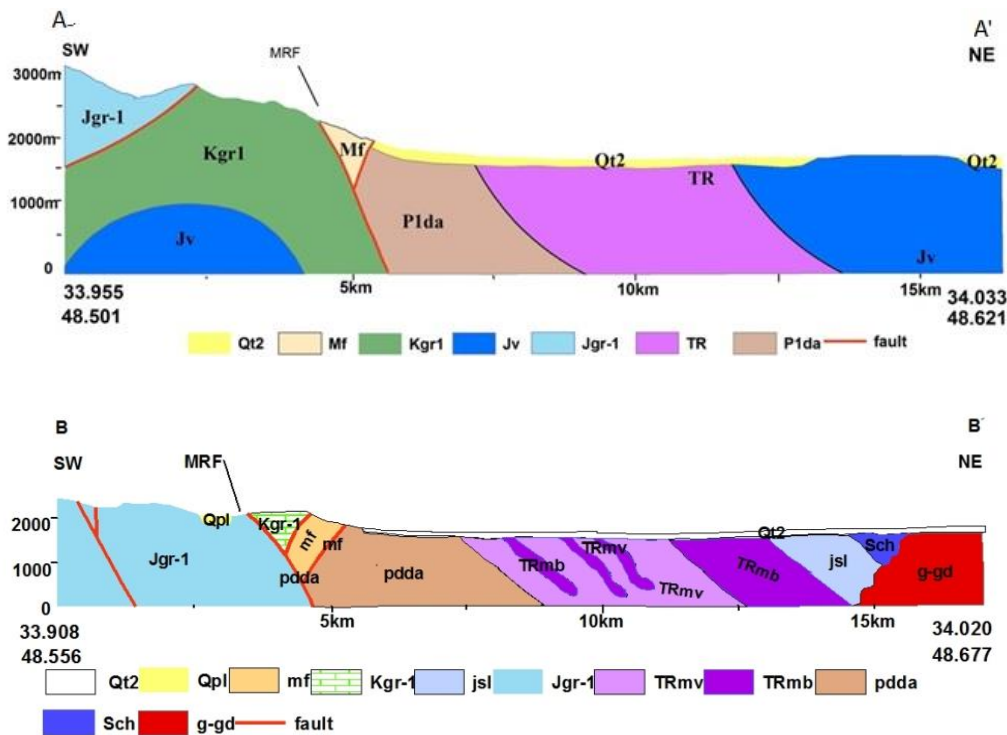
Fig. 2. The underlapping step arrangement of the Nahavand and Dorud fault and the location of the studied area



شکل ۳- نقشه زمین شناسی و ساختاری پایانه جنوبی گسل نهاوند و تصاویر استریوگرافیک گسل‌های منطقه، بخشی از نقشه یکصد هزار بروجرد (Haj mola Ali et al, 1991) و نقشه یکصد هزار ملایر (Jafarian et al., 1999)

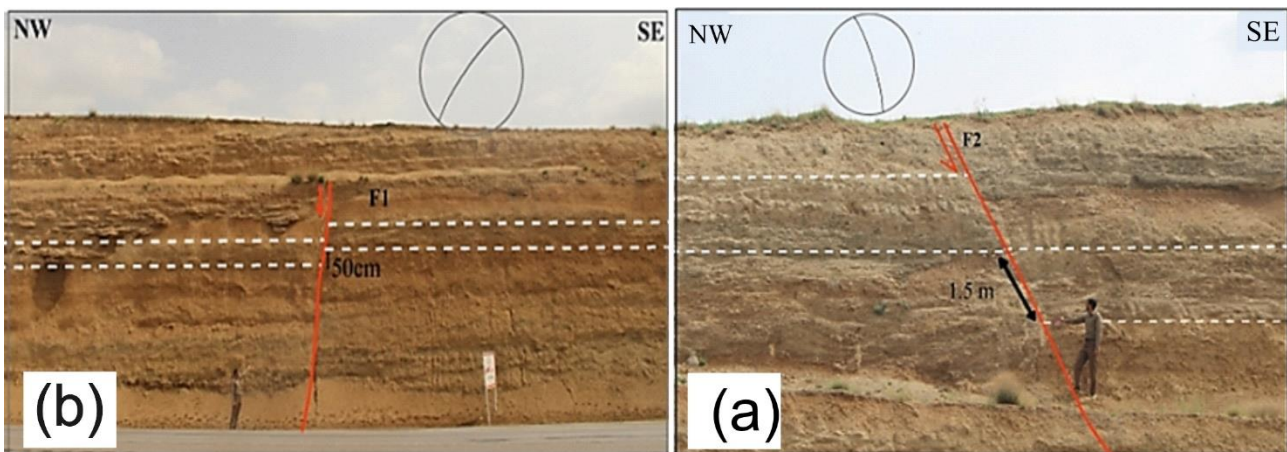
Fig. 3. Geological and structural map of the southern termination of the Nahavand fault and stereographic images of the faults in the area, part of the Borujerd map (Haj mola Ali et al, 1991) and the map of Malayer (Jafarian et al., 1999)





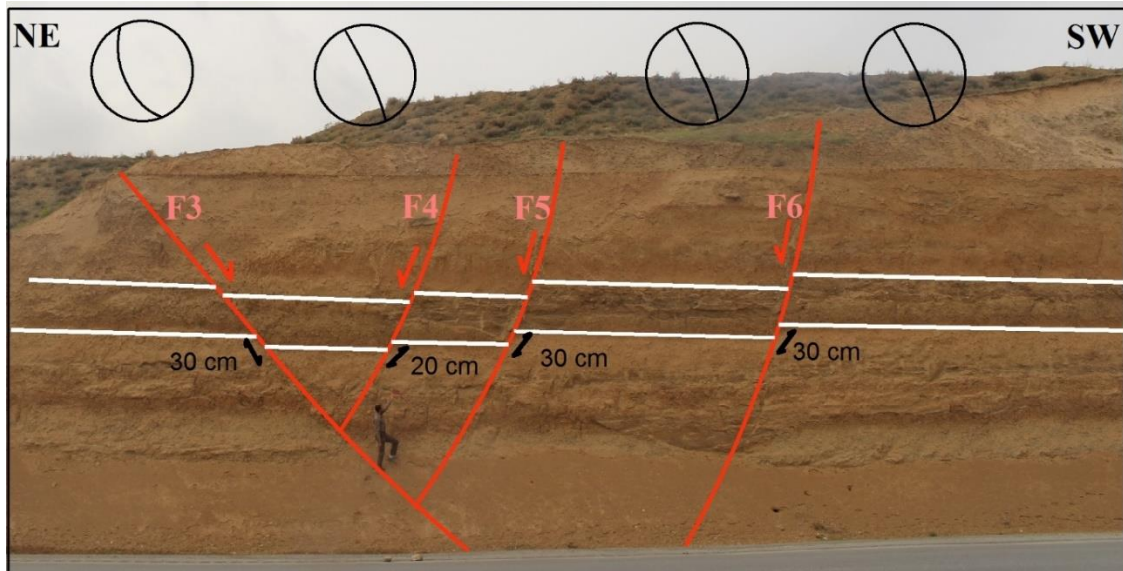
شکل ۴- در نیمرخ ساختاری AA' قطعه گسلی نهانند در مرز بین واحدهای کرتاسه و میوسن عبور کرده است و در نیمرخ ساختاری BB' قطعه گسلی نهانند از بین واحدهای ژوراسیک عبور کرده است.

Fig. 4. In the AA' structural profile, the Nahavand fault segment has crossed the boundary between the Cretaceous and Miocene units, and in the BB' structural profile the Nahavand fault segment has crossed the boundary between the Jurassic units.



شکل ۵- (a) گسل نرمال با جدایش نیم متری در جاده بروجردها نهانند با دید به سمت جنوب شرق، چشمه در مرز واحد سنگی کنگلو مرا و مارن در سمت چپ گسل قابل مشاهده می‌باشد و (b) گسل نرمال با جدایش یک و نیم متری در مسیر جاده بروجردها.

Fig. 5. (a) The normal fault with a half-meter separation is visible on the Borujerd-Nahavand road with a view towards the southeast, the spring on the border of the conglomerate and Marn units on the left side of the fault, (b) Normal fault with a separation of one and a half meters in the road way of Borujerd.

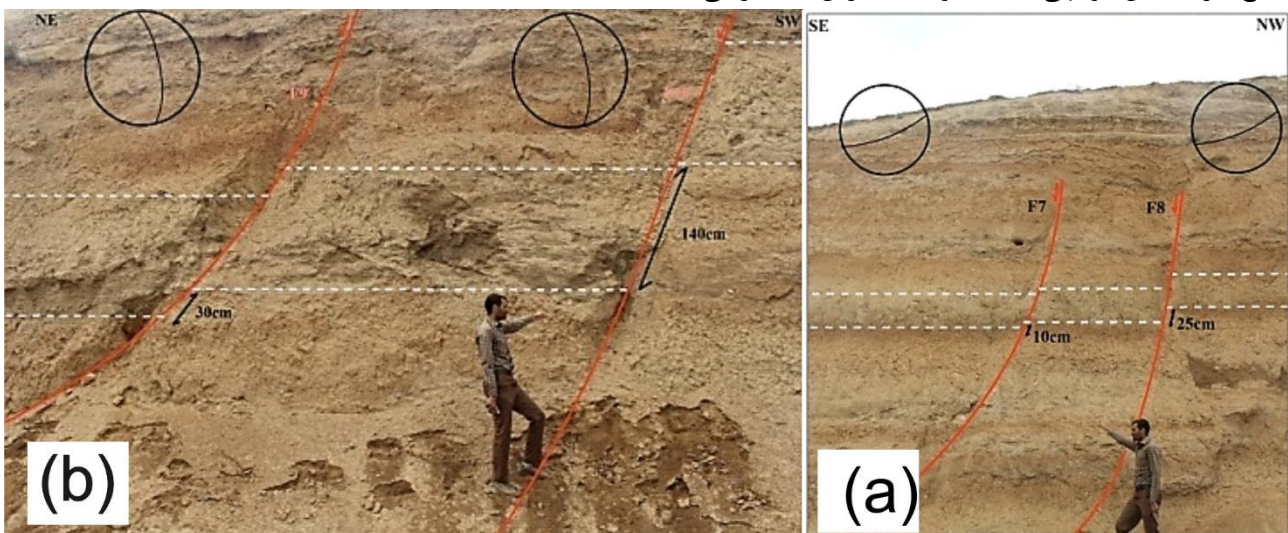


شکل ۶ - ساختار گل منفی با جدایش‌های نرمال در اثر حرکت گسل‌های مورب لغز نرمال، دید به سمت جنوب شرق.

Fig. 6. Negative flower structure with normal separations due to the movement of oblique normal slip faults, view towards the southeast.

ترانشه‌ها و مغزه‌های حفاری و داده‌های لرزه ای سبب شناسایی آن‌ها می شوند (شکل ۷b). در ادامه گسل‌های ۱۱ تا ۱۳ رو مشاهده می کنیم که هر سه در یک محدوده نزدیک به هم در رسوبات آبرفتی و مارنی مشاهده شده اند که عملکرد آن‌ها نرمال می‌باشد و جابجایی آن‌ها بین ۵۰ تا ۷۰ سانتی متر است (شکل ۸ a و b).

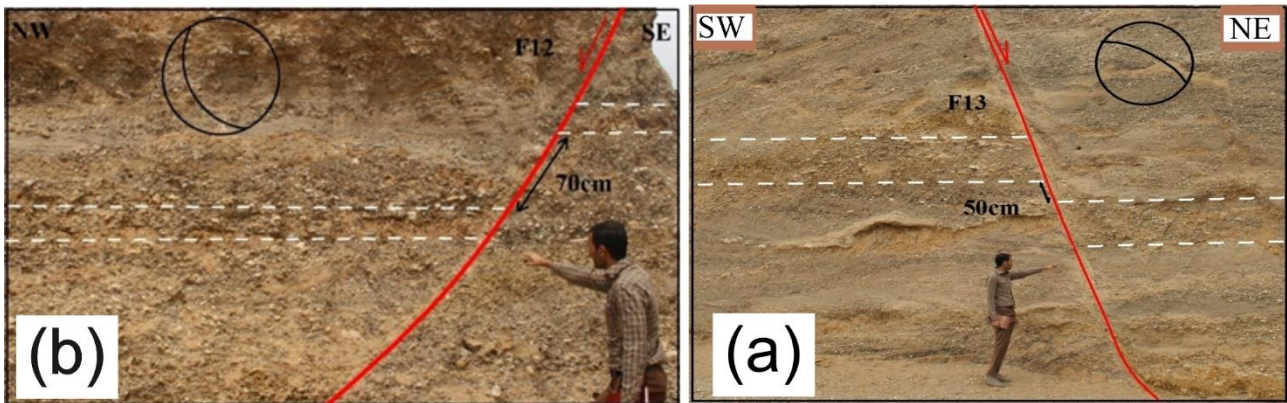
گسل‌های شماره ۷ و ۸ به نوعی گسل‌های نرمال هم آغوش را نشان می‌دهند، هر چند که تعداد آن‌ها محدود بوده و جابجایی ثبت شده کمتر از انواع قبلی و ۲۵ سانتی متر است و جنس سنگ‌های اطراف از نوع مارن می‌باشد (شکل ۸a). گسل - های شماره ۹ و ۱۰ نیز دارای جابجایی ۱۴۰ سانتی متری بوده و جنس سنگ آن‌ها نیز مارن می‌باشد این نوع ساختارها در سطح اثرات قابل توجهی نداشته و ایجاد برش‌های عرضی،



شکل ۷ - (a) جدایش‌های نرمال با جابجایی ۱۰ و ۲۵ سانتی متری، دید به سمت جنوب غرب و (b) جدایش نرمال با جابجایی ۱۴۰ و ۳۰ سانتی متری در مسیر جاده بروجرد به نهاوند، دید به سمت جنوب شرق.

Fig. 7. (a) Normal separations with displacement of 10 and 25 cm, view to the southwest, and (b) Normal separation with displacement of 140 and 30 cm on the road from Borujerd to Nahavand, view to the southeast.





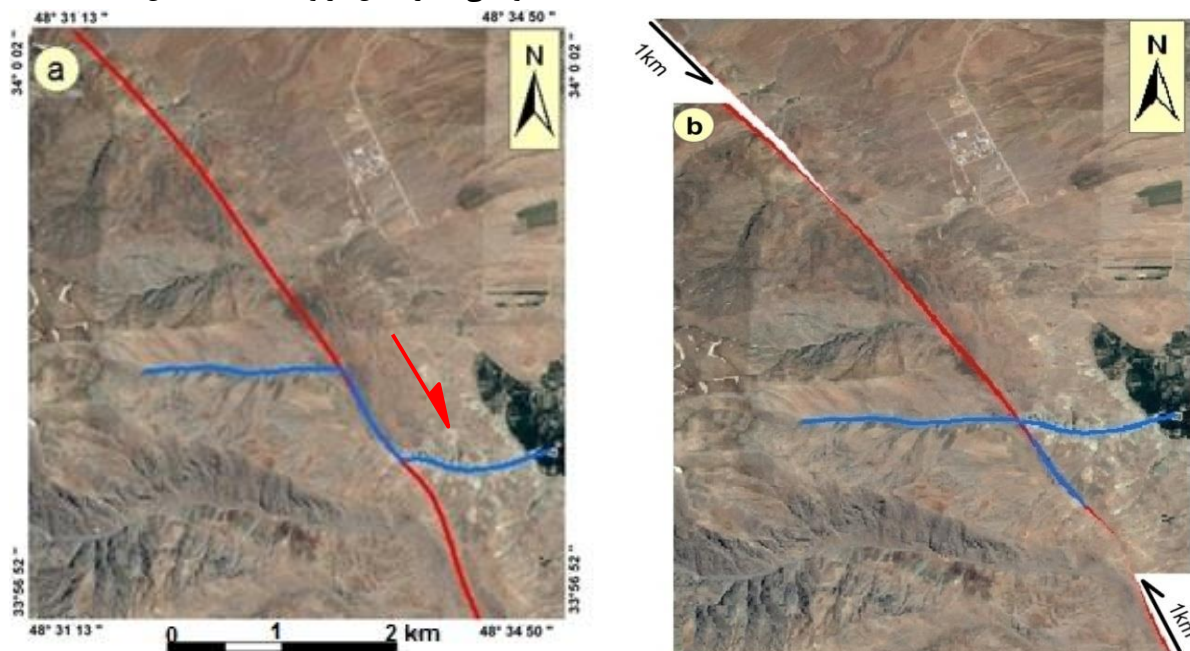
شکل ۸ - (a) جدایش نرمال با جابجایی ۷۰ سانتی متری، دید به سمت شمال شرق و (b) جدایش نرمال با جابجایی ۵۰ سانتی متری، دید به سمت شمال غرب.

Fig. 8. (a) Normal separation with a displacement of 70 cm, view to the northeast, and (b) Normal separation with a displacement of 50 cm, view to the northwest.

این منطقه گسل در بین واحدهای مارنی به سن میوسن قرار گرفته است. آبراهه اصلی با امتداد غربی-شرقی به سمت شرق جریان دارد که گسل با زاویه زیاد از شمال غرب- جنوب شرق منجر به ایجاد جابجایی در مسیر رودخانه شده است. میزان جابه جایی برآورد شده در این منطقه حدود یک کیلومتر اندازه گیری شده است که این جابه جایی راست بر را می توان به فعالیت های تکتونیکی اخیر گسل مربوط دانست. (شکل ۹).

### ۳-۲- جابجایی آبراهه ها در طول گسل نهاوند

در طول گسل نهاوند حرکت راستبر گسل در مناطق مختلفی باعث جابه جایی و انحراف در مسیر رودخانه شده است. میزان این انحرافات در نقاط مختلف متفاوت بوده است. با استفاده از بررسی تصاویر گوگل ارث در بخش جنوبی گسل در مجاورت روستای توده زن، در مسیر رودخانه انحراف ایجاد شده است.



شکل ۹ - جابجایی راستبر ایجاد شده در مسیر رودخانه ناشی از حرکت گسل نهاوند، (a) رودخانه جابه جا شده و (b) بازگردانی جابه جایی به حالت قبل از انحراف در مسیر رودخانه. بازگردانی انحراف ایجاد شده در مسیر رودخانه یک کیلومتر برآورد شده است.

Fig. 9. Rightlateral movement created in the river path due to the movement of the Nahavand fault, (a) Displaced river and (b) restoration of the displacement to the state before the deviation in the river. The restoration of the deviation created in the river path is estimated to be one kilometer.

در بخش میانی منطقه و در ارتفاعات نزدیک روستای ونایی و در محلی که گسل نهاوند از آنجا عبور می‌کنند یک جابه جایی نسبتاً بزرگ تحت تاثیر حرکات این گسل، ایجاد شده است. در واقع یک انحنای بزرگی در مسیر رودخانه ایجاد شده است. این تغییر مسیر از سمت شمال غرب تا جنوب شرقی می‌باشد. برای بررسی ارتباط بین جابه جایی گسل و انحراف ایجاد شده در سیستم رودخانه از تصاویر ارتفاع رقومی با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شد. تاثیر قطعه گسلی نهاوند در این قسمت از منطقه مورد مطالعه بر شبکه رودخانه با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی باعث انحراف در مسیر رودخانه شده است (شکل ۱۰a). بازگردانی این جابه جایی به حالت اولیه و قبل از تاثیر سیستم گسل نشان می‌کند که قطعه گسل اصلی به میزان ۳ کیلومتر جابه جایی داشته است (شکل ۱۰b). گسل نهاوند در مسیر رودخانه واحدهای کرتاسه را تحت تاثیر قرار داده است. این جابه جایی بزرگترین جابه جایی اندازه گیری شده در لغزش از ۵-۱۰ میلیون سال پیش حدود ۱/۶-۳/۲ میلی متر در سال خواهد بود.

### ۳-۳- بررسی خطواره‌های منطقه

برای استخراج خطواره‌های مرتبط با پایانه گسل نهاوند از تصاویر ماهواره لندست ۷ (سنجنده ETM+ که شامل ۶ باند طیفی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۷) با قدرت تفکیک ۳۰ متر و باند ۸ با قدرت تفکیک ۱۵ متر که panchromatic است و همچون مدل سایه رقومی استفاده گردیده است. در مدل سایه رقومی، نور مصنوعی از یک منبع نقطه‌ای با زاویه‌ای نسبت به سطح افق و زاویه‌ای با جهت شمال بر منطقه مورد مطالعه تابیده شده است. این مدل می‌تواند توپوگرافی عوارض سطح زمین را به صورت سه بعدی نشان دهد. اضافه کردن پدیده‌هایی چون رودخانه، گسل و آبراهه به این نمایش سه بعدی، ابزار قدرتمندی برای تحلیل و بررسی فرآیندهای زمین ساختی فراهم می‌کند. برای استخراج خطواره‌های محدوده جنوبی گسل نهاوند هشت مدل سایه رقومی با زاویه تابش ۳۰ درجه از سطح افق و آزیموت‌های ۰، ۴۵، ۹۰، ۱۳۵، ۱۸۰، ۲۳۰، ۲۷۰ و ۳۱۵ درجه استفاده شده است. برای تهیه نقشه کلی خطواره‌های منطقه مورد مطالعه، هفت باند از تصاویر لندست و هشت مدل تصاویر سایه رقومی استفاده شده است. سپس با ترکیب این لایه‌ها و

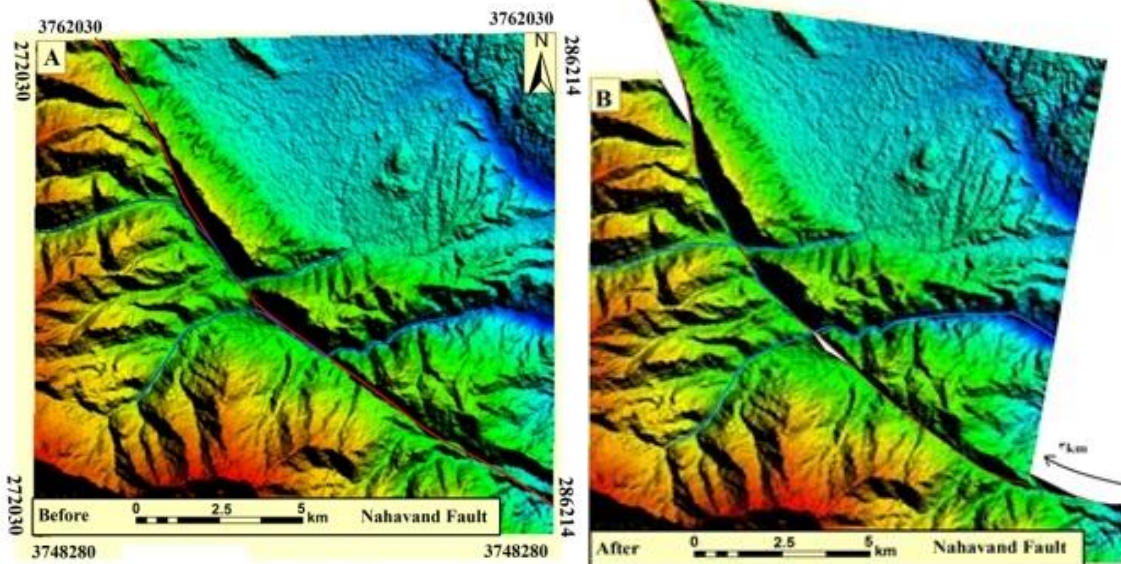
حذف خطواره‌های تکراری نقشه خطواره‌های مرتبط با گسل جوان اصلی زاگرس تهیه گردیده است. با توجه به استخراج خطواره‌ها مناطق با تراکم خطواره‌های بالا بوسیله نقشه تراکم نسبی مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی دقیق تر و همچنین استفاده از روش مربع شمار فرکتالی، منطقه به پهنه‌های  $a, b, c, d, e, f, g, h, i$  تقسیم شده است. با مقایسه‌های صورت گرفته از امتدادهای اصلی خطواره‌های استخراج شده به طور تقریبی در پهنه‌های  $a, b, d, e, g, h$  امتدادها یکسان می‌باشد که به صورت شمال غرب - جنوب شرق می‌باشد و در تمامی آن‌ها یکسان است و امتداد پهنه گسل اصلی در محدوده مورد بررسی را مشخص می‌کند و همچنین امتداد خطواره‌های استخراج شده در پهنه‌های  $a, b, c, d, e, f, g, h, i$  همان امتداد شمال غربی- جنوب شرقی است. در قسمت J نمودار رز کلی از محدوده نشان داده شده است در این نمودار هم امتداد- های اصلی  $N30W$  تا  $N70W$  در جهت شمال غربی- جنوب شرقی و همچنین امتدادهای فرعی نیز تقریباً در همین راستا می‌باشد. از این تحلیل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در نزدیک گسل تراکم خطواره بالا بوده و هرچه از گسل اصلی فاصله گرفته می‌شود خطواره‌ها کمتر می‌شود. تراکم بدست آمده از خطواره- ها نشان می‌دهد که بیشترین مقدار در پهنه  $h$  و کمترین مقدار آن در منطقه  $f$  است که به دلیل ارتباط شکستگی با MRF است که بستگی به فاصله کم یا زیاد می‌شود (شکل ۱۱).

### ۳-۴- بررسی تراکم شکستگی‌های منطقه

علاوه بر خطواره‌های محدوده جنوبی گسل نهاوند، شکستگی‌ها نیز در راستای این گسل امتدادهای متفاوتی نشان می‌دهند و در بعضی قسمت‌ها تراکم زیادی دارند. بنابراین پس از تهیه نقشه شکستگی‌های منطقه امتدادهای کلی شکستگی‌ها و تراکم نسبی آن‌ها در زیر پهنه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. امتداد غالب شکستگی‌ها در پهنه‌های مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است و همانطور که مشاهده می‌شود امتداد غالب شمال غربی- جنوب شرقی و شمال شرقی- جنوب غربی است. مقایسه‌های انجام شده از امتدادهای اصلی نشان می‌کند که امتدادهای پهنه‌های  $b$  و  $f$  به صورت شمال شرقی- جنوب غربی، امتداد پهنه  $a$  به صورت شمالی- جنوبی، امتداد پهنه  $h$  به صورت شرقی- غربی و امتداد پهنه‌های  $c, d, e, g, i$  به صورت شمال غربی- جنوب شرقی است. در نقشه شکستگی‌ها محدوده جنوبی گسل نهاوند (شکل ۱۲) نیز، قسمتی از گسل نهاوند به شاخه

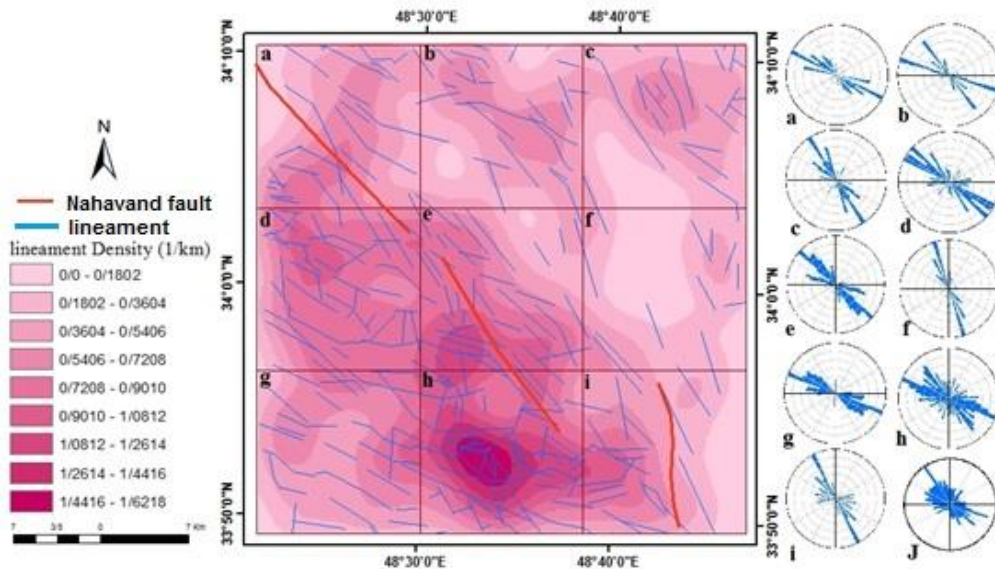


میانی از گسل جوان اصلی زاگرس می پیوندد (پهنه‌های e, h, i)، به علت نزدیکی دو شاخه گسلی با هم، شکستگی‌ها در هم تداخل پیدا کرده و تراکم نسبی بالایی از آن دیده می‌شود.



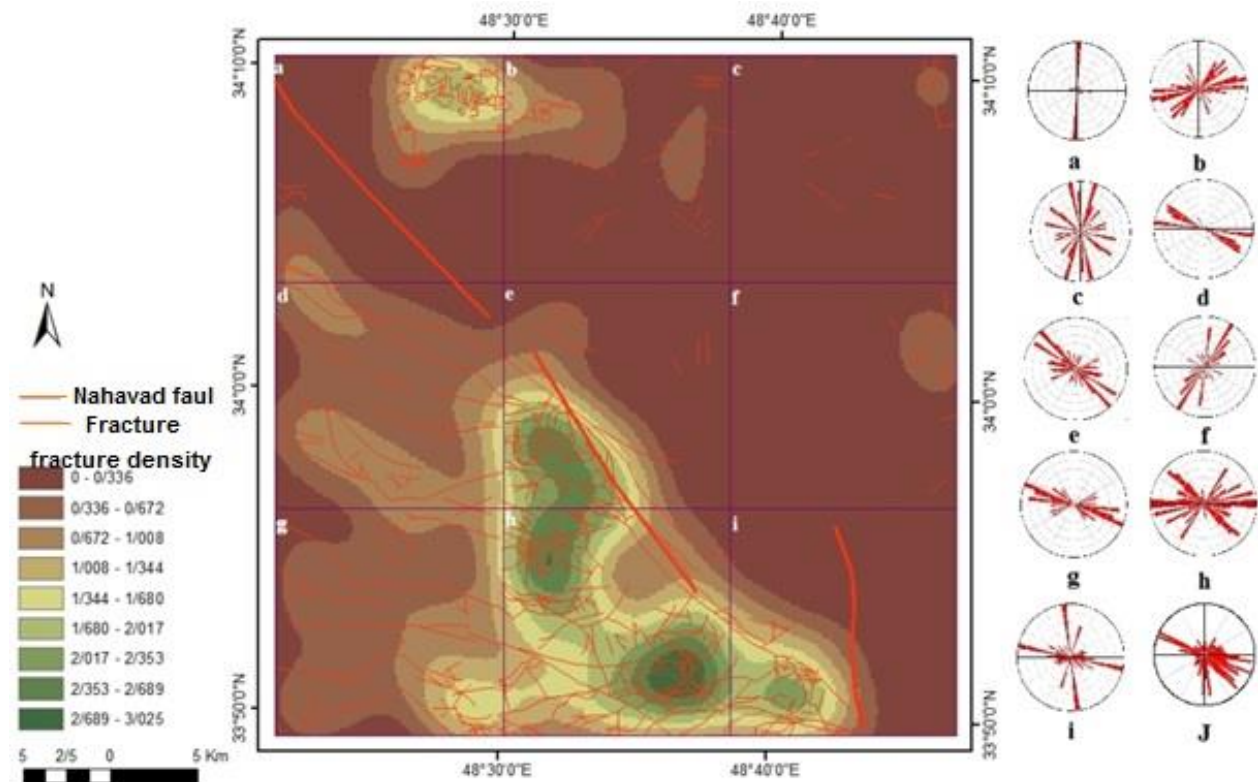
شکل ۱۰- جابجایی راستبر در امتداد گسل نهوند، (a) جابجایی قبل از بازگردانی و (b) جابه جایی برگردان شده. میزان جابه جایی ۳ کیلومتر و از سمت شمال غرب-جنوب شرق می‌باشد.

Fig. 10. Righlateral movement along Nahavand fault, (a) Displacement before restore, and (b) Restore displacement. The amount of displacement is 3 km from the NW-SE direction.



شکل ۱۱ - نقشه تراکم خطواره‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره ای لندست و نمودار رز مربوط به این امتداد خطواره‌ها. منطقه به پهنه‌های g, h, f, e, d, c, b, a, i تقسیم شده است.

Fig. 11. Density map of lineament extracted from Landsat satellite images and rose diagrams related to these lineament. The region is divided into these zones g, h, f, e, d, c, b, a, i.



شکل ۱۲- نقشه تراکم شکستگی‌ها و نمودار رز مربوط به این شکستگی‌ها، منطقه به پهنه‌های a, b, c, d, e, f, g, h, i و j تقسیم شده است. با توجه به تقسیم بندی در منطقه، نمودارهای رز هر پهنه و نمودار رز کلی (J) امتداد بیشترین شکستگی‌ها در جهت شمال غرب-جنوب شرق می‌باشد.  
 Fig. 12. Fractures density map and rose diagram related to these fractures, the area is divided into areas g, h, f, e, d, c, b, a, and i. According to the division in the region, the rose diagrams of each zone and the total rose diagram (J) show the trend of most fractures in the direction of NW-SE.

۳-۵- محاسبه و تحلیل بعد فرکتال  
 براساس مفاهیم هندسی اقلیدسی، ابعاد عناصر هندسی اعداد صحیح ۰، ۱، ۲، ۳ برای نقطه، خط، صفحه و حجم هستند، که هر کدام از این‌ها بیانگر عناصر هندسی نامحدود می‌باشند. در طبیعت مادی همه عناصر محدود بوده و عملاً پاره خط، پاره صفحه و پاره حجم هستند. بنابراین ابعاد هندسی اقلیدسی به خوبی نمی‌توانند بیانگر ویژگی پدیده‌ها با هم و یا مقایسه آن‌ها با یکدیگر باشند، ولی ابعاد فرکتالی چون اعداد اعشاری است، بدین ترتیب محدودیتی در اندازه گیری هیچکدام از پدیده‌های طبیعی با این روش وجود ندارد (Charchi et al., 2011).  
 رابطه کلی برای محاسبه ابعاد فرکتالی عبارت است از :

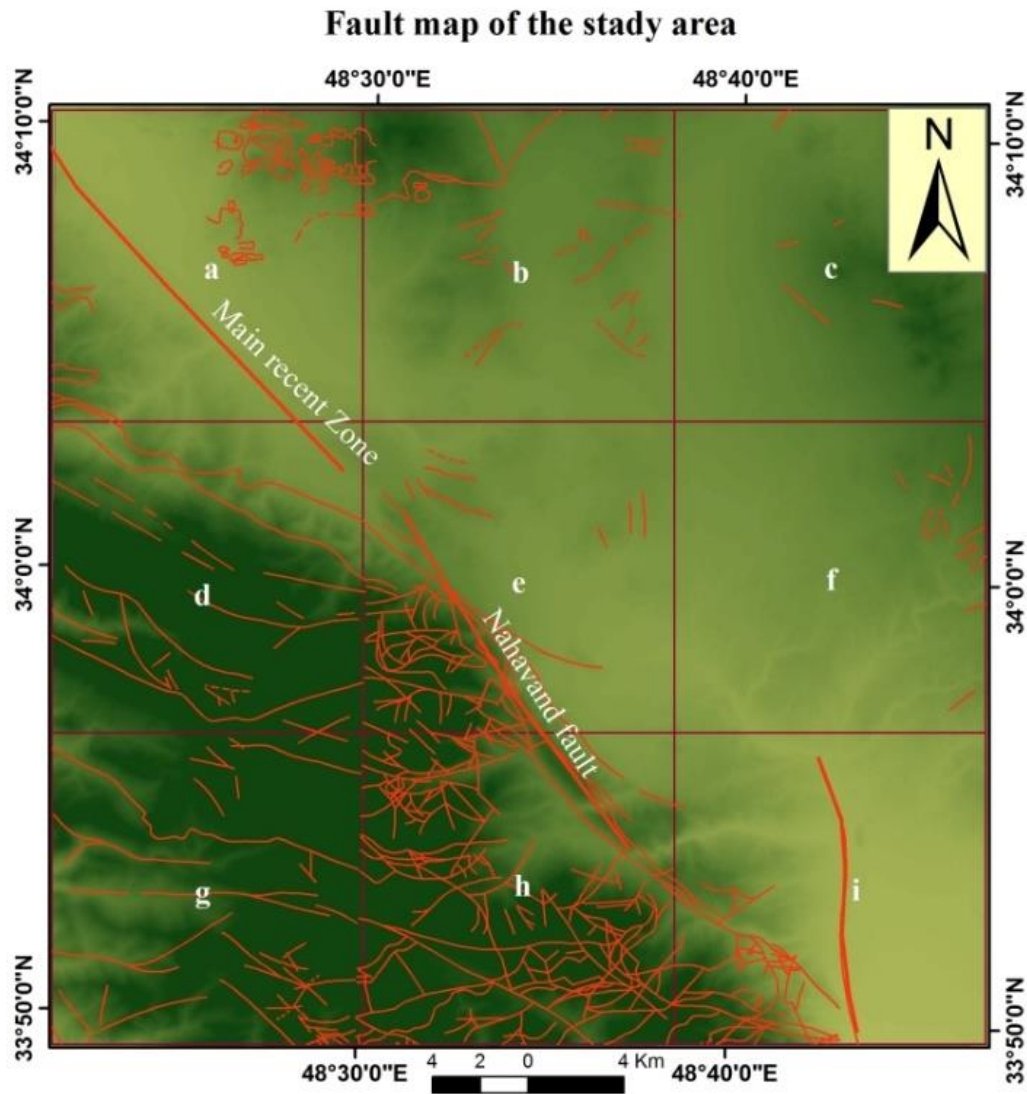
استفاده از این روش ایجاد شبکه بندی مناسب در محدوده مورد مطالعه مورد نیاز است. تحلیل‌ها بر اساس نمودار log-log تعداد مربع‌های ساختار (Ns) بر حسب اندازه شبکه به کار گرفته شده (S) و یا عکس آن 1/S صورت گرفته است. نمودارهای ترسیم شده، تغییرات فرکتالی منطقه را نشان می‌کند. برای بدست آوردن بعد فرکتالی رابطه زیر تعریف شده است:  

$$\text{Log}(NS) = a + K \text{Log}\left(\frac{1}{S}\right) \quad (\text{رابطه ۲})$$
  
 برای تحلیل ابعاد فرکتالی شکستگی‌ها و خطواره‌ها در منطقه با استفاده از نرم افزار Arc GIS و نقشه‌های زمین شناسی، توزیع شکستگی‌ها و خطواره‌ها از روی تصویر ماهواره ای استخراج شده است. نقشه تهیه شده از شبکه گسلی فعال در منطقه، به ۹ مربع با ابعاد کیلومتر تقسیم گردید. شبکه رسم شده همانند شکل (۱۳) کل نقشه را پوشش می‌دهد. با رسم نمودارهای مربوطه برای هر مربع یک بعد فرکتال به دست

$$N_n = C / n_n^D \quad (\text{رابطه ۱})$$

$N_n$  تعداد متغیرهای معلوم برای یک پدیده،  $n_n$  بعد خطی ویژه،  $C$  ثابت و  $D$  بعد فرکتالی است. روش به کار گرفته شده مربع شمار می‌باشد (Turcotte, 1997) و به منظور

می آید. نمودارهای رسم شده بعدهای فرکتالی زیر را برای هر ناحیه نشان می دهد (جدول ۱) (شکل ۱۴).



شکل ۱۳- نقشه شکستگی‌های و پهنه بندی منطقه مورد مطالعه.

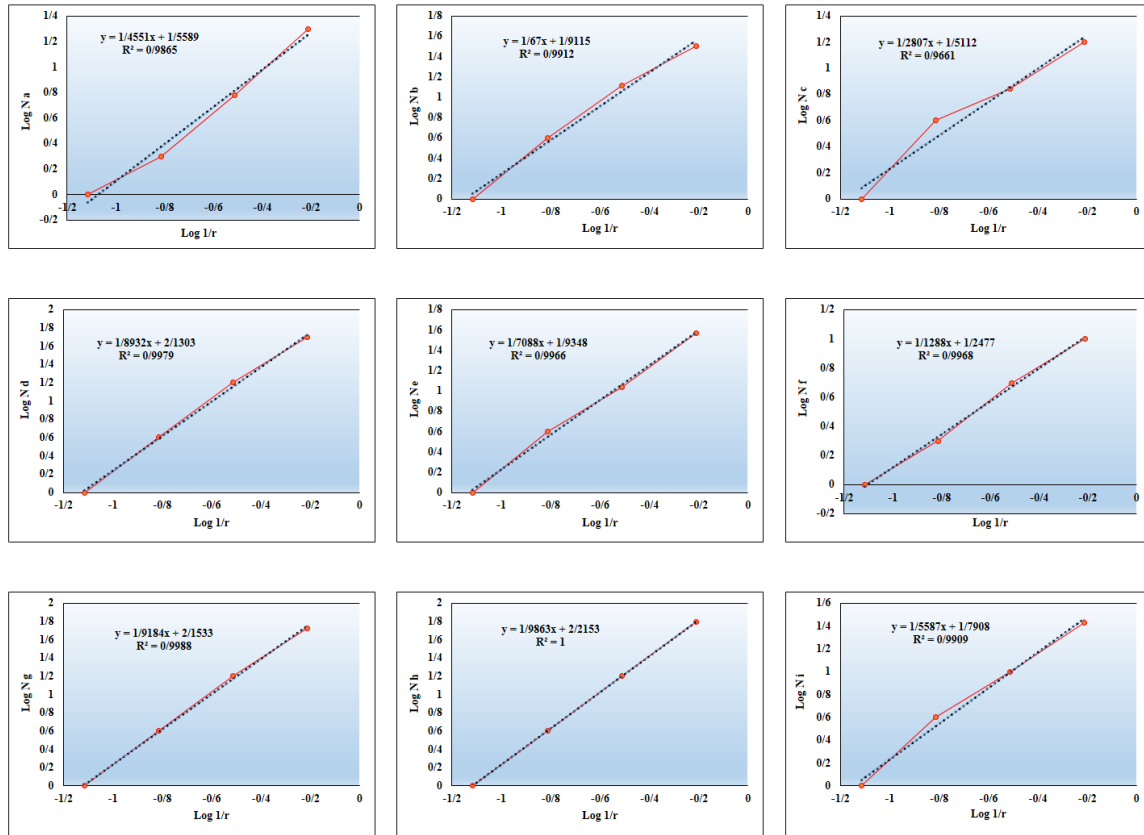
Fig. 13. Map of fractures and zoning of the studied area.

جدول ۱- تعداد مربع‌ها و شمارش شکستگی در هر مربع

Table 1- Number of squares and number of fractures in each square

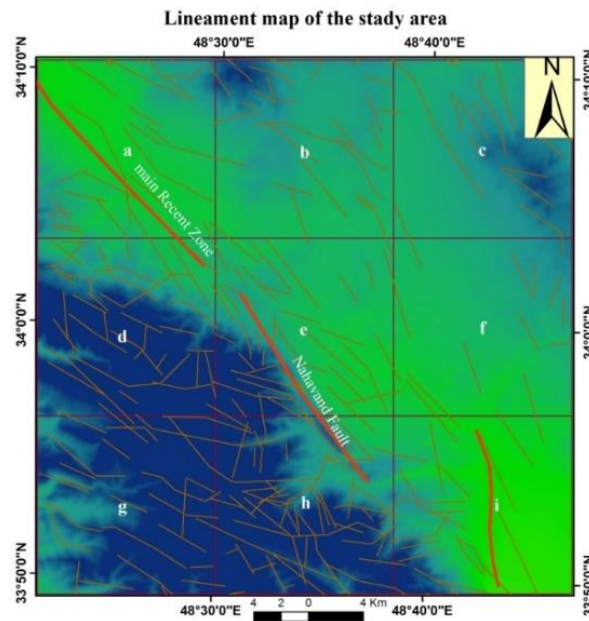
R(km)	1/r	Na	Nb	Nc	Nd	Ne	Nf	Ng	Nh	Ni
13	0.076923	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6.5	0.153846	2	1	1	1	1	1	1	1	1
3.25	0.307692	6	13	7	16	11	5	16	16	10
1.625	0.615385	20	32	16	50	37	10	53	62	27





شکل ۱۴- نمودار لگاریتمی عکس طول ضلع مربعها به تعداد مربعهایی که حاوی شکستگی در منطقه مورد مطالعه هستند.

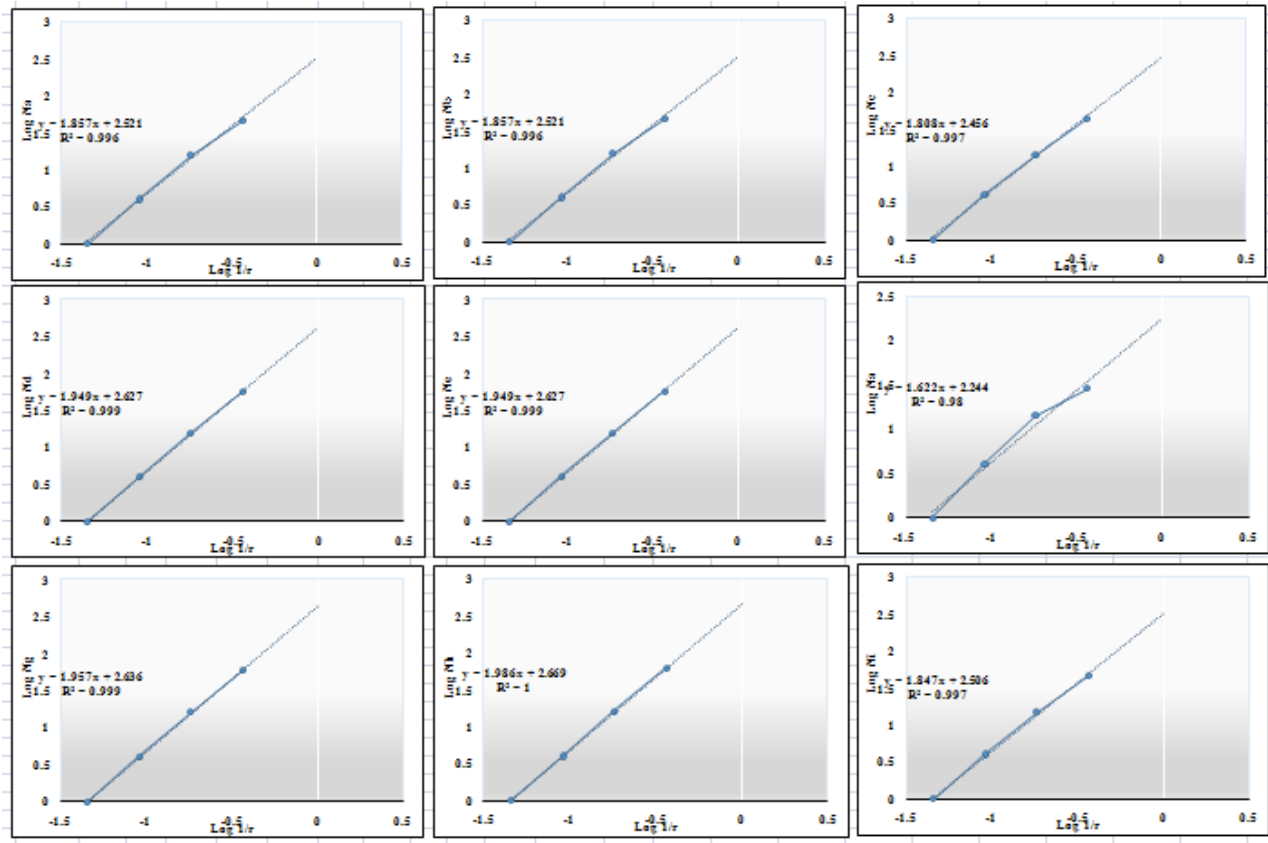
Fig. 14. The logarithmic diagram of the inverse of the squares according to the number of squares that contain fractures in the study area.



شکل ۱۵- نقشه خطوارهها و پهنه بندی تصویر ماهواره ای لندست از منطقه مورد مطالعه.

Fig. 15. Map of the lineament and zoning of the Landsat satellite image of the study area.





شکل ۱۶ - نمودار لگاریتمی عکس طول ضلع مربع‌ها به تعداد مربع‌هایی که حاوی خطواره هستند در پهنه منطقه مورد مطالعه

Fig. 16. The logarithmic diagram of the inverse of the squares according to the number of squares that contain lines in the study area.

زایی گسل‌های جدید یا فعالیت دوباره گسل‌های پیشین شود که پیرو آن پاره‌های گسلی را به یکدیگر می‌پیوندد (Nabavi and Alavi, 2021). پژوهش‌های عددی نشان می‌دهد در پله‌های گسلی ناهمپوشان میدان‌های تنش در نزدیکی راس‌ها کششی هستند و اندازه تمرکز کرنش در میان راس‌های گسلی بیشتر از پله‌های گسلی خنثی و هم پوشان است. شواهد صحرایی حاکی از گسترش رژیم کششی در پله گسلی نهبوند و درود است و ساختار گل منفی در پایانه جنوبی گسل نهبوند کاملاً گویای این تنش در منطقه است. همچنین زمینلرزه ۱۹۰۹ سیلاخور با بزرگی ۷/۳ ریشتر سازوکار امتداد لغز با مولفه نرمال نشان داد که این بخش از گسل MRF رژیم کششی حضور دارد (شکل ۱۷). در بررسی فرکتالی منطقه مقدار بعد فرکتال خطواره در پهنه  $h$  حداکثر مقدار  $1/986$  و در پهنه  $f$  مقدار حداقل  $1/622$  را نشان می‌دهد و از این مقادیر بدست آمده می‌توان استنباط کرد که مقدار شکستگی‌ها از سمت شمال غرب به جنوب شرق افزایش یافته است که مرتبط با شکستگی‌های پهنه

برای به دست آوردن ابعاد فرکتالی خطواره‌های منطقه، نقشه خطواره‌های منطقه تهیه شده و بر روی این نقشه، شبکه‌هایی ایجاد شده است (شکل ۱۵). این تقسیم بندی مانند تقسیم بندی فرکتال شکستگی‌ها (شکستگی‌های ساختاری یا شبکه گسلی غیر فعال در منطقه) می‌باشد. در بررسی فرکتال خطواره‌ها هر کدام از این پهنه‌ها، جداگانه مورد بررسی قرار گرفت و برای هر یک، بعد فرکتالی محاسبه گردید.  $(N)$  تعداد مربع‌هایی که حاوی خطواره هستند و  $(l)$  ابعاد مربع‌ها را نشان می‌دهد (جدول ۲). با رسم نمودارهای مربوطه برای هر مربع (پهنه) یک بعد فرکتال به دست می‌آید. نمودارهای رسم شده (شکل ۱۶) بعدهای زیر را برای هر محدوده نشان می‌دهد.

#### ۴- بحث

بی‌نظمی‌های هندسی گسل‌های امتداد لغز نقش مهمی در زمین ساخت درون قاره ای و فعالیت‌های لرزه ای ایفا می‌کند (Sylvester 1988; Nabavi et al, 2019) کرنش متمرکز شده در پله‌های گسلی تراکمی و کششی می‌تواند سبب هسته

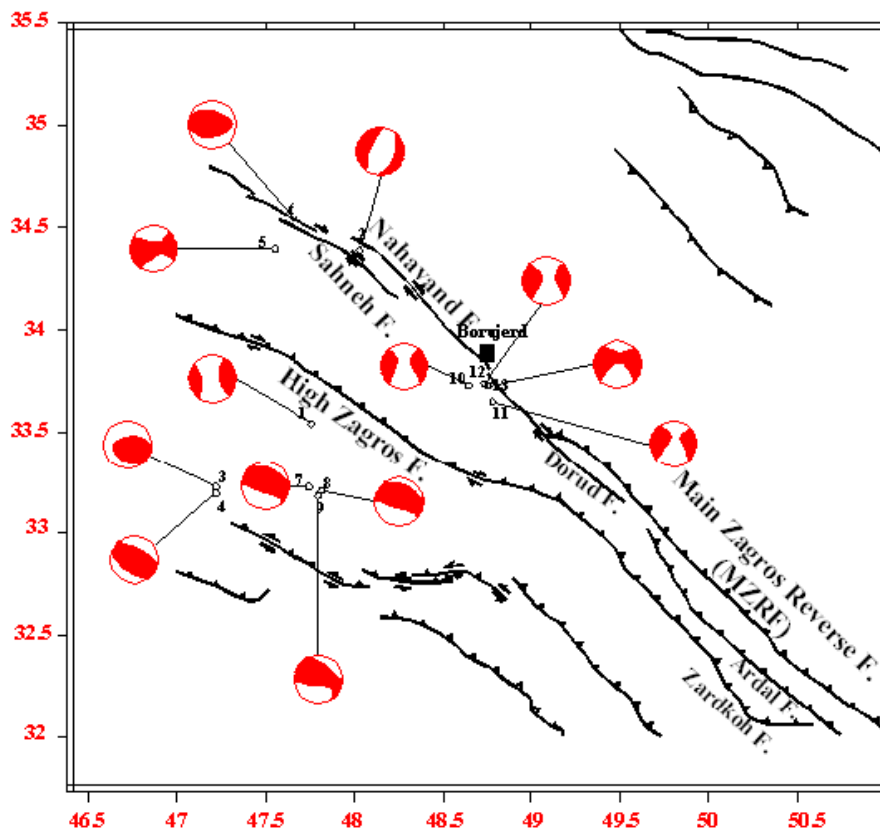
که سامانه گسلی نهانند هنوز بلوغ ندارد و گستره سطحی زیادی دارد.

گسلی MRF است. مقادیر فرکتال خطواره‌ها و شکستگی‌ها مقادیر بالایی نشان می‌دهند و این خود نشان دهنده این است

جدول ۲- تعداد مربع‌ها و شمارش خطواره‌ها در هر مربع

Table 2- Number of squares and number of linement in each square

r(km)	1/r	Na	Nb	Nc	Nc	Nd	Ne	Ng	Nh	Ni
22	0.045455	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	0.090909	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5.5	0.181818	16	16	16	15	16	16	16	16	15
2.75	0.363636	16	46	46	43	57	28	58	62	46



شکل ۱۷- نقشه موقعیت گسل نهانوند و گسل درود و زلزله‌های منطقه (Shahrabi and Doloui, 2008)

Fig. 17. Map of the location of the Nahavand fault and Dorud fault and earthquakes in the region (Shahrabi and Doloui, 2008)

است. جهت گیری میدان تنش و آرایش هندسی قطعات گسل نهانوند و درود باعث شکل گیری حوضه تراکشن در این بخش شده است و گسلش‌های نرمال و ساختار گل منفی را در منطقه ایجاد کرده است. با توجه به الگوی کلی بدست آمده از تراکم

##### ۵- نتیجه گیری

گسل نهانوند یکی از قطعات گسل جوان اصلی زاگرس و با حرکت امتدادلغز راست بر است و با یک آرایش پله ای در قسمت شمال غرب گسل قلعه حاتم و درود واقع شده و از نوع ناهمپوشان

مورد مطالعه، شکستگی‌های مرتبط با پهنه گسلی جوان اصلی زاگرس می‌باشد که با دور شدن از این پهنه گسلی تراکم آن‌ها کاهش می‌یابد. حرکت‌های جوان گسل نهاوند باعث جابجایی آبراهه‌های منطقه شده است بیشترین مقدار جابجایی راست بر در این منطقه سه کیلومتر بدست آمده است.

### سپاسگزاری

بدینوسیله مراتب امتنان خود را از داوران و سردبیر محترم مجله اعلام می‌داریم. همچنین به خاطر حمایت‌های دانشگاه بوعلی سینا از نویسندگان جهت به نتیجه رسیدن این پژوهش سپاسگزار هستیم.

خطواره‌ها و نمودار رز در منطقه مورد مطالعه، شکستگی‌ها در پهنه‌های نزدیک به گسل، دارای امتداد شمال غربی-جنوب شرقی و هم امتداد پهنه گسلی اصلی بوده است. تراکم به دست آمده از خطواره‌ها نشان دهنده مقدار خیلی بالای آن در پهنه  $e$  و  $h$  می‌باشد و با فاصله گرفتن از گسل اصلی این مقدار کاهش می‌یابد و این به دلیل شکستگی‌های مرتبط با MRF می‌باشد که با دور شدن از این پهنه گسلی تراکم شکستگی‌ها کاهش می‌یابد. در تحلیل فرکتال شکستگی‌ها و خطواره‌ها، بعد فرکتال مربوط به پهنه‌های نزدیک به گسل بیشترین مقدار را نشان می‌کند. این امتداد از سمت شمال غرب- جنوب شرق منطقه می‌باشد که این محدوده، امتداد گسل اصلی در منطقه را مشخص می‌کند. عامل تاثیر گذار در افزایش بعد فرکتالی منطقه

### مراجع

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B. Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine* 148, 692-725. <https://doi.org/10.1017/S001675681100046X>
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211-238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2)
- Bachmano, D., Trifonova, V., Hessami, Kh., Kozhurina, A., Ivanova, T., Rogozhind, E., Hademi, M., Jamali, F., 2004. Active faults in the Zagros and central Iran. *Tectonophysics* 380, 221-241. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.021>
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evaluation of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210-265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Berberian, M., 1995. Master "Blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: Active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics* 241, 193-224. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)00185-C](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00185-C)
- Charchi, A., Khatib, M.M., Mozafarkhah, M., Barjasteh, A., 2011. Fractal analysis for determination of Tectonic activity in the north of Lali, NE Khuzestan, *Advanced Applied Geology* 1, 37-47. [https://aag.scu.ac.ir/article\\_11542](https://aag.scu.ac.ir/article_11542).
- Haj Molla Ali, A., Hosseini, M., Farhadian, M., Sadaqat, A., 1991, Geological Map 1:100000 of Borujerd, Geological Survey of Iran.
- Jafarian, M.B., Zamani Pedram, M., 1999. Geological map 1/100000 Malayer, Organization of Geology and Mineral Explorations of the country.
- Khatib, M. M., Shahriari, S., 2016. Fractal analysis of Nehbandan fault system, *Scientific Quarterly of Earth Sciences* 6(24-23), 39-32. [10.48308/esrj.2023.101386](https://doi.org/10.48308/esrj.2023.101386)
- Khalife Soltani, A., Alavi, S.A., Ghasemi, M., R., 2015. Investigating the role of geological structures in the fractal dimensions of fractures and waterways in the south-west of Lanjan-Isfahan, *Scientific Quarterly of Earth Sciences* 26, 45-56. <https://doi.org/10.22071/gsj.2016.41007>
- Nabavi, S.T., Alavi, S.A., Mohammadi, S., Ghassemi, M.R., 2018a. Mechanical evolution of transpression zones affected by fault interactions: insights from 3D elasto-plastic finite element models. *Journal of Structural Geology* 106, 19-40. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.11.003>
- Nabavi, S.T., Alavi, S.A., Maerten, F., 2018b. 2D finite-element elastic models of transtensional pull-apart basins. *Comptes Rendus Geoscience*, 350, 222-230. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.06.001>
- Nabavi, S. T., Alavi, S.A., 2021. Structural geology (Brittle to ductile fracture systems), Shahid Beheshti University Publications, 856 P.

- Mohajjel, M., Rasouli, A., 2014. Structural evidence for superposition of transtension on transpression in the Zagros collision zone: Main Recent Fault, Piranshahr area, NW Iran, *Jurnal of Structural Geology* 62, 65-79. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.01.006>
- Shahrabi, T., Doloui, G., 2008. Seismicity characteristics of Silakhor plain of Borujard based on the data of earthquakes recorded in a temporary seismographic network. *Journal of Engineering Geology* 3 (2), 716-697. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22286837.1388.3.2.4.7>
- Shahriari, Y., 2017. Structural analysis of the main recent fault zone of Zagros, south of Nahavand (western Iran), MSc thesis, BU-Ali Sina University, Hamedan.
- Stocklin, J., 1974. Possible ancient continental margins in Iran. In: Burke, C.A., Drake, C.L. (Eds.), *The Geology of Continental Margins*. Springer, New York, 873-877 PP. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-01141-6\\_64](https://doi.org/10.1007/978-3-662-01141-6_64)
- Sylvester, G., 1988. Strike slip Faults. *Geological Society of America Bulletin* 100, 1666-1703. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1666:SSF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1666:SSF>2.3.CO;2)
- Talebian, M., Jackson, J., 2002. Offset on the main recent fault of NW Iran and implications on the late Cenozoic tectonics of the Arabia–Eurasia collision zone. *Geophysical Journal International* 150, 422–439. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01711.x>
- Turcotte, D.L., 1992. *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge University Press 398 P. <https://doi.org/10.1017/S002211209325162X>
- Xu, H., Lao, H., Peng, C., Xu, H., Liu, C., Sun, W., Ju, Y., Dong, G., 2023. Reacquainting the Structural Characteristics of Pull-Apart Basins Based on Simulations with Wet Clay. *Sustainability* 15(19), 14143, 2-18. <https://doi.org/10.3390/su151914143>