

ژئودینامیک زاگرس و تأثیر آن در لرزه خیزی استان لرستان

دکتر سهیلا بوذری¹

چکیده

جایگاه ساختاری استان لرستان واقع در پهنه سنندج- سیرجان در شمال و نوار چین خورده- برخاسته زاگرس در جنوب سبب گردیده تا فعالیت لرزه ای استان تابع شرایط حاکم بر این گستره باشد. گسل زاگرس در همبری دو پهنه ساختاری فوق محل تمرکز بیشترین فعالیت لرزه ای استان لرستان می باشد. همگرایی مایل صفحه عربی با ایران مرکزی سبب عملکرد راستالغز راست بر گسل جوان زاگرس در محدوده شمال باختری پهنه زاگرس شده است. سازوکار کانونی زمین لرزه ها در بخش شمالی استان لرستان از نوع تراکشی است که بازتابی از فعالیت گسل جوان زاگرس در این گستره می باشد. همچنین سازوکار کانونی زمین لرزه ها در بخش جنوبی گسل از نوع فشاری است که نمایانگر حرکت به سمت شمال صفحه عربی می باشد. به علاوه توزیع زمین لرزه ها در بخش وسیعی از استان ناشی از فعالیت ساخت های گسله ای است که در زیر پوشش ضخیم رسوبی پنهان می باشند. تشکیل لایه ضخیم نمک هرمز در حفاصل پی سنگ زاگرس با ته نشست های رسوبی بخش های فوقانی مانع از تأثیر ساخت های گسله پی سنگی در فعالیت لرزه ای زاگرس شده است. از اینرو زمین لرزه ها در استان لرستان همچون زاگرس کم عمق و یا حداکثر با عمق متوسط می باشند. بر اساس مطالعه انجام گرفته در این مقاله بیشترین شتاب قائم گستره لرستان مربوط به محدوده شمالی آن و عمدتاً در راستای گسل جوان زاگرس می باشد. همچنین شهرستان الیگودرز با شتاب قائم 0.3 g درمقایسه با دیگر شهرستان های واقع در طول گسل جوان زاگرس در معرض تهدید بیشتری قرار دارد.

کلید واژه ها: زاگرس ، گسل جوان زاگرس، همگرایی مایل، استان لرستان، زمین لرزه

The Zagros Geodynamics and Lorestan Province Seismic Activity

Dr. Soheila Bouzari¹

Abstract

The Lorestan province structural position between the Sanandaj- Sirjan zone in north and the Zagros folded- uplifted belt in south are caused for controlling the province seismic activity. The Zagros fault are formed in the two zones contact, and there is the highest concentration of seismic activity. The oblique convergence Arabian plate and the Central Iran are caused for the Main Recent Zagros fault strike-slip movement with dextral component in the NW Zagros zone. The Main Recent Zagros fault activity is caused earthquake events with transtension focal mechanism in the north part of the Lorestan province. Also the north ward Arabian plate movement is caused compressive focal mechanism in the south part. The hidden faults activity under the thick sedimentary are caused to wide distribution earthquakes in the Lorestan. The Hormoz salt thick bedding between the Zagros basement and upper sedimentary deposits are barrier for influencing basement fault activity in the Zagros seismic activity. So such as the Zagros zone, the earthquakes depth character is low or maximum medium in the Lorestan area. According to this study in this paper, the maximum vertical acceleration is along the Main Recent Zagros fault in the Lorestan north part. Along this fault , vertical acceleration in the Aligudarz is 0.3 g , so compared to another Lorestan cities is more threatened.

Keywords: Zagros, Main Recent Zagros Fault, Oblique convergence, Lorestan province, Earthquake

جنوب باختر فلات ایران قرار دارد. این استان از جمله هشت استان کشور می باشد که حدود 80% آن در نوارزاگرس (بیش از 50% در پهنه زاگرس چین خورده ، حدود 30% در

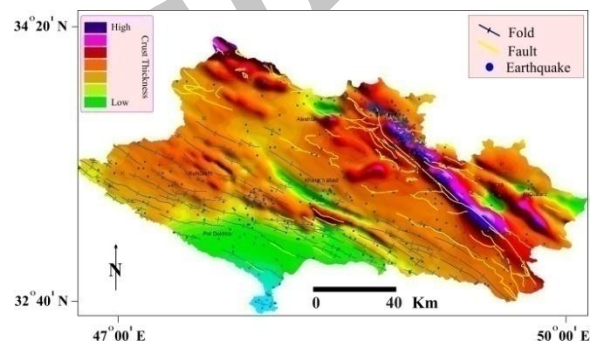
مقدمه

استان لرستان با مختصات جغرافیایی حدود 47 الی 50 درجه طول خاوری و حدود 32/50 الی 34/50 درجه عرض شمالی در

بخش عمده آن در گستره زاگرس سبب گردیده تا تحولات به وقوع پیوسته در آن عمدتاً متأثر از شرایط زمین شناسی حاکم بر پهنه زاگرس باشد. همانگونه که در شکل (2) مشاهده می شود زاگرس در شمال خاورحاشیه غیر فعال صفحه عربی قرار دارد. همین امر سبب گردیده تا تکوین و تکامل آن تابع شرایط زمین شناسی و زمین ساختی حاکم بر این گستره باشد. حوضه رسوبی زاگرس از توالی به هم پیوسته ای با بیش از 10 کیلومتر رسوب کامبرین تا میوسن تشکیل شده است (Stoneley 1976, Stocklin 1974)، که 1 الی 2 کیلومتر آنرا سازند نمک هرمز با سن کامبرین بالایی تشکیل می دهد.



پهنه زاگرس رورانده) و 20% باقیمانده در پهنه دگرگونی سنندج - سیرجان قرار دارد. در محل همبری گستره زاگرس در جنوب باختر و سنندج- سیرجان در شمال خاور، ساختار گسله زاگرس با راستای شمال باختری- جنوب خاوری قرار دارد، که محل رویداد غالب زمین لرزه های استان می باشد (شکل 1).



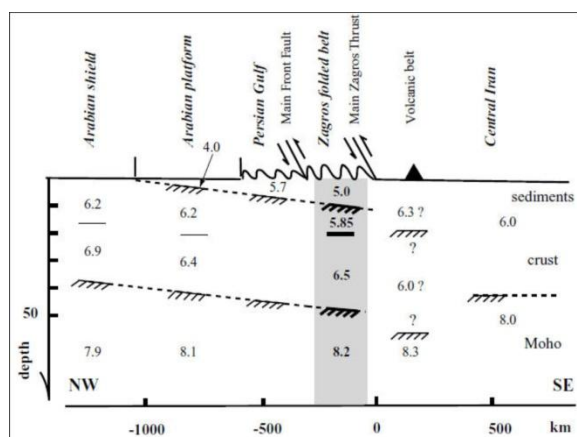
شکل 1. نمایی از جایگاه پهنه های ساختاری در استان لرستان. پهنه سنندج- سیرجان محدوده شمال خاوری ، زاگرس رورانده و چین خورده گستره وسیع مرکز وجنوب استان راتشکیل می دهد.

در این مقاله ضمن آشنایی با تکوین و تکامل گستره زاگرس به بررسی نقش آن در لرزه خیزی استان لرستان خواهیم پرداخت.

جایگاه زمین شناسی استان لرستان

موقعیت زمین شناسی استان لرستان واقع در جنوب باختر فلات ایران و قرار گیری

سپر عربی شده است (Hatzfeld et al. 2003، (شکل 3).



شکل 3. مقطع عرضی پهنه زاگرس در حدفاصل گسل راندگی اصلی زاگرس و سپر عربی (Hatzfeld et al. 2003)

نوار چین خورده نامتقارن زاگرس از جمله وقایع کوهزایی درون قاره ای است (Braun and Beaumont 1995, Beaumont and Fullsack 1994, Chery et al. 1991) که در قسمت مرکزی سری کوهستان آلپ- هیمالیا قرار دارد. این نوار کوهستانی خطی با طول بیش از 1500 کیلومتر و پهنای 200 الی 300 کیلومتر در راستای شمال باختری- جنوب خاوری از خاور ترکیه تا سیستم گسله میناب زندان در جنوب ایران گسترش یافته است (Stocklin 1974, Hynes and McQuillan 1974, Masson et al. 2004) و در محل پهنه فرورانش مکران از بین

شکل 2. نمایی کلی از موقعیت گستره زاگرس واقع در حاشیه شمال خاوری صفحه عربی، بر اساس اطلاعات ماهواره ای لندست (ETM).

در محل این لایه ضخیم تبخیری علاوه بر قطع ارتباط رسوبات بالایی (پالئوزوئیک تا اواخر ترشیری) از پی سنگ دگرگونه پرکامبرین، همچنین تغییر شکل بخش های سطحی از ساخت های گسله پی سنگی روند جداگانه ای را طی می کند (Falcon 1974, Berberian and King 1981, Alavi 1994). ته نشست های رسوبی حوضه زاگرس تحت تأثیر همگرایی صفحه عربی و ایران مرکزی در مزوزوئیک دستخوش برخاستگی قرار گرفته و در طول گسل معکوس زاگرس بیشترین رخنمون را دارند (Stoneley 1976, Stocklin 1974). در همین رابطه وقوع فرورانش در کرتاسه بالایی سبب جایگزینی سنگ های افیولیتی در حاشیه شمال خاوری زاگرس شده است. دومین رویداد مؤثر بر حوضه رسوبی زاگرس مربوط به وقایع زمین ساخت فشاری نئوژن یا پلیو- کواترنر (Berberian 1995) است که موجب ظهور نوار چین خورده- رورانده زاگرس درحد فاصل گسل معکوس اصلی زاگرس و خلیج فارس (Stocklin 1968) و یا

می رود (Tatar et al. 2002)، (شکل 4).



شکل 4. نمایی از نوار کوهستانی زاگرس با راستای شمال باختری- جنوب خاوری و موقعیت تقریبی استان لرستان براساس تصویر ماهواره ای لندست. در این شکل همچنین محدوده زاگرس جنوب خاوری و زاگرس شمال باختری نسبت به گسل کازرون مشخص شده است.

زاگرس نتیجه بسته شدن اقیانوس نئوتیس در پی فرورانش با شیب به سمت شمال خاور پسته اقیانوسی به زیر خرد قاره ایران مرکزی است (Alavi 1994, Berberian et al. 1982, Berberian and King 1981). تشکیل نوار چین خورده کوهستانی زاگرس ناشی از کوتاه شدگی مایل داخل قاره ای است (Teyssier and Tikoff 1998, Krants 1998)، مقدار این کوتاه شدگی حدود 50 کیلومتر طی 5 میلیون سال با نرخ متوسط 10 الی 15 میلیمتر در سال برآورد شده است (Jackson 1988, and Mckenzie 1988)، همچنین

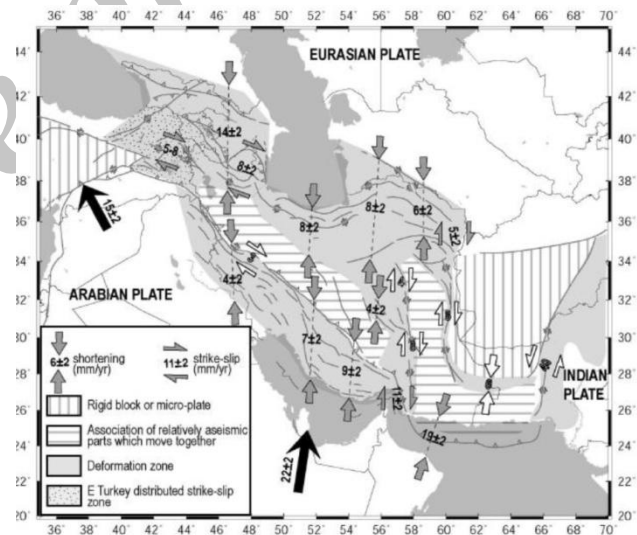
میزان برخاستگی زاگرس حدود 1 میلیمتر در سال اندازه گیری شده است (Falcon 1974). این بدان معناست که حدود 50 درصد از مجموع همگرایی مابین صفحه عربی و اوراسیا در کمربند کوهستانی زاگرس تجمع یافته است (Tatar et al. 2002) بر اساس اطلاعات حاصل از GPS راستای کوتاه شدگی در زاگرس شمالی- جنوبی است، اما مقدار آن در راستای زاگرس متفاوت می باشد، نرخ همگرایی در جنوب خاور زاگرس حدود 2 ± 9 میلیمتر در سال است که این مقدار در شمال باختر زاگرس به $2 \pm 4/5$ میلیمتر در سال تغییر می یابد (شکل 5)، (Vernant 2004, Masson et al. 2005). راستای همگرایی در بخش جنوب خاوری زاگرس تقریباً شمالی- جنوبی است که با نزدیک شدن به قسمت شمال باختری راستای آن مایل و تقریباً 45 درجه می گردد. همین امر سبب گردیده تا رفتار پهنه زاگرس در مواجهه با میدان تنش حاکم بر منطقه در راستای گسل کازرون به دو بخش شمال باختری و جنوب خاوری قابل تفکیک باشد (شکل 4) (Berberian 1995, Vernant and Chery 2006). چین خوردگی ها غالباً در

پهنه زاگرس قرار دارد و تحت تأثیر میدان تنش حاکم بر این قسمت، عملکرد راستا لغز راست بر ساخت های گسله موجب فعالیت بیشتر آن در مقایسه با دیگر نواحی شده است.

رخساره سنگی استان لرستان

همانگونه که در شکل (6) مشاهده می شود، قدیمی ترین واحد سنگی رخنمون یافته در گستره لرستان سازند شمشک متشکل از لایه های شیلی و ماسه ای تیره رنگ است که به دلیل زود فرسا بودن عموماً کم ارتفاع بوده و ریخت تپه ماهوری به بخش شمالی استان داده است (مطیعی 1372). واحدهای مذکور تحت تأثیر نفوذ توده های کوچک و بزرگ ماگمایی ضمن دگرگونی، به هم ریخته شده و امروزه ریخت خشن و ناهمواری دارد. واحدهای سنگی مزوزوئیک غالباً با رخساره آهکی ضمن چین خوردگی تحت تأثیر عملکرد پهنه گسله معکوس و اصلی زاگرس بر روی هم رانده شده وستیخ های بلند استان را می سازد. سازند سروک و آسماری تحت تأثیر آب های سطحی اسیدی فرورو انحلال یافته و ضمن توسعه رژیم

جنوب خاوری (Berberian 1981) و راندگی ها در بخش شمال باختری زاگرس از تمرکز بیشتری برخوردار است. این بدان معناست که در بخش شمال باختری تغییر شکل داخلی به روش قطعه بندی می باشد (Vernant and Chery 2006). بدین ترتیب تأثیر راستای تنش در زاگرس به صورت کوتاه شدگی و تشکیل گسل شیب لغز در جنوب خاور و حرکت برشی گسل های راستالغز در شمال باختر قابل تشخیص است (Fitch 1972).



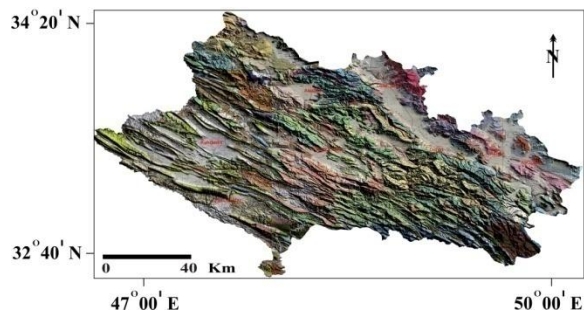
شکل 5. نمایی از راستای حرکت و میزان کوتاه شدگی در گستره فلات ایران، با توجه به تفاوت مقدار کوتاه شدگی پهنه زاگرس، در راستای گسل کازرون، به دو بخش شمال باختری و جنوب باختری تفکیک شده است (Vernant et al. 2006).

با توجه به تقسیم بندی زمین شناسی فوق استان لرستان در بخش شمال باختری

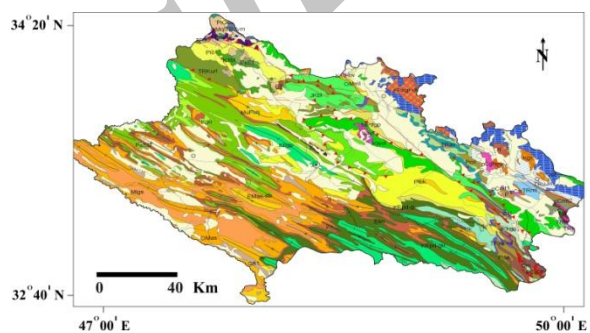
است (جعفری و همکاران 1378) . نهشته های کنگلومرایی سازند بختیاری به دلیل داشتن سیمان آهکی و جوان بودن آن در سطح متحمل فرسایش شده و با انحلال سیمان، قلوه های کنگلومرایی آن آزاد شده است. ویژگی سنگ شناسی سازند گچساران سبب گردیده تا بخش های گچی، انیدریتی، آهکی، نمکی و حتی مارنی آن در معرض جریان آبهای سطحی فرورو فرسایش یافته و ضمن گسترش محدود، مستعد روان گرایی، ریزش و لغزش نیز می باشد (جعفری و همکاران 1378).

ریخت زمین ساخت استان لرستان

ریخت استان لرستان متأثر از عملکرد پهنه های ساختاری سنندج- سیرجان در شمال خاوربا مناطق رورانده و چین خورده زاگرس در جنوب جنوب باختر، با همبری گسله است (شکل 7).



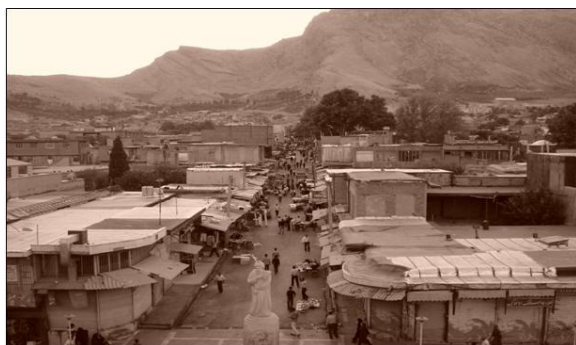
کارستی حاوی حفرات انحلالی فراوان بوده و بالقوه محل مناسبی جهت تشکیل ذخایر آبهای سطحی و زیرزمینی می باشد (مطیعی 1372). سنگ های کربناته سازند ایلام و تله زنگ با وجود لایه های مارنی تراوایی کمتری داشته و فرسایش کارستی در آنها چندان قابل توجه نمی باشد (جعفری و همکاران 1378).



شکل 6. نقشه زمین شناسی ساده شده استان لرستان. واحدهای دگرگونی ژوراسیک در شمال خاور گسل اصلی زاگرس رخنمون یافته و به سمت جنوب و جنوب باختر واحدهای با سن کرتاسه و جوانتر تشکیل شده است.

نهشته های شیلی - مارنی سازند گورپی به دلیل داشتن مقدار قابل توجهی رس و مارن، کمتر تحت تأثیر تجزیه آب های سطحی اسیدی قرار گرفته و آب موجود در بین لایه های رسی ضمن اینکه فرآیند ریزش و لغزش را در این سری از سنگ ها فعال نموده بلکه همچنین موجب ناپایداری آنها نیز شده

طورکلی در استان لرستان 22 دشت مورد شناسایی قرار گرفته است که بر اساس منشأ تشکیل به دو دسته زمین ساختی و غیر زمین ساختی تفکیک می شوند. اگرچه دشت های با منشأ زمین ساختی بالقوه استعداد لرزه خیزی دارند اما تعداد زیادی از شهرها (شکل 9)، روستاها (شکل 10) و بخش وسیعی از مناطق کشاورزی و معدنی (شکل 11) استان لرستان در این دشت ها و دره های ساختاری قرار دارند.



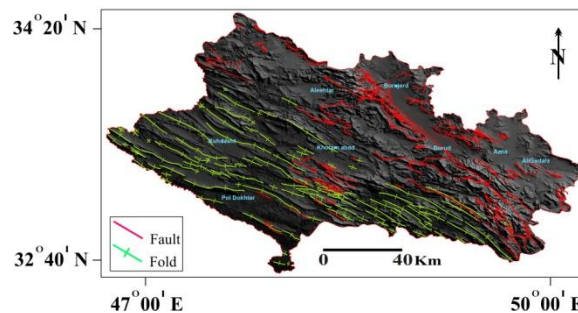
شکل 9. نمایی از شهر خرم آباد واقع در زاگرس چین خورده.



شکل 10. نمایی از روستای میر احمدی واقع در دشت میان برخاستگی های زاگرس چین خورده.

شکل 7. نمایی از ریخت استان لرستان بر اساس تصاویر ماهواره ای لندست (ETM) و SRTM، که متشکل از دو بخش تپه ماهوری در شمال خاور و برخاسته در جنوب جنوب باختر است.

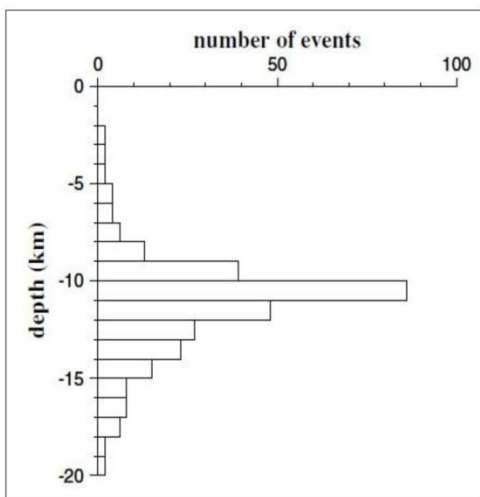
در زاگرس رورانده عملکرد گسل های معکوس موجب رانندگی واحدهای سنگی و تشکیل ستیغ های استان لرستان شده است. در زاگرس چین خورده، تاقدیس و ناودیس های موازی، منظم و به هم فشرده ای با روند غالب شمال باختری- جنوب خاوری تشکیل شده و در مجموع بخش وسیعی از استان لرستان ریخت چین خورده و برخاسته دارد (شکل 8).



شکل 8. نمایی از تأثیر ساخت های گسله و چین خورده در ریخت زمین ساخت استان لرستان بر اساس تصاویر SRTM.

آنچه از دیدگاه ریخت زمین ساختی درگستره لرستان منحصر به فرد می باشد تشکیل دشت های وسیعی است که در حدفاصل ساخت های چین خورده و در طول ساخت های گسله ایجاد شده است. به

در عمق 8 الی 15 کیلومتری و غالباً نیز در عمق 11 کیلومتری به وقوع پیوسته اند (Jackson and Fitch 1981, Tatar 2004) این عمق احتمالاً بازتابی از ناپیوستگی حدفاصل رسوبات بخش بالایی و پی سنگ بلورین زاگرس می باشد (Tatar 2001). سازوکار کانونی زمین لرزه ها در زاگرس از دو نوع معکوس و راستالغز راست بر است.



شکل 12. نمایی از رابطه بین تعداد و عمق وقایع لرزه ای در زاگرس. همانگونه که مشاهده می شود بیشتر زمین لرزه ها در عمق 11 کیلومتری به وقوع پیوسته اند (Tatar et al. 2004).

گسل های معکوس با روند شمال باختری- جنوب خاوری و شیب 50 الی 60 درجه به سمت شمال خاور موازی با روند محور ساختمان های چین خورده می باشند (Jackson and Mckenzie 1984, Jackson 1980)



شکل 11. نمایی از معدن نمک چغلوندي واقع در حدفاصل برخاستگی های زاگرس رورانده.

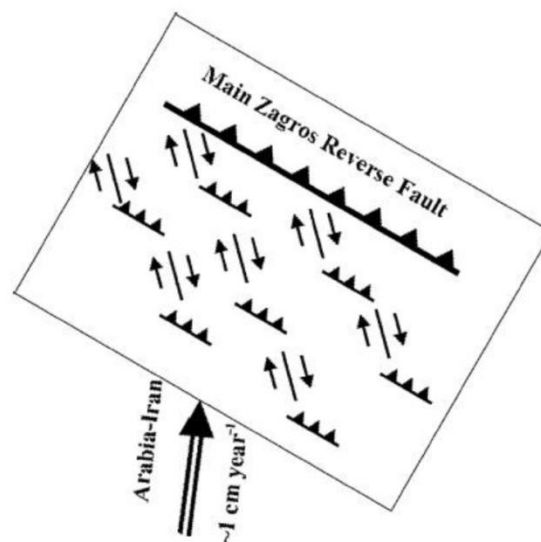
تکاپوی زاگرس و تأثیر آن در لرزه خیزی لرستان

کوه های زاگرس تحت تأثیر تصادم قاره ای بوده و به تازگی کوتاه شدگی با جمع شدگی و چین خوردگی رسوبات بر روی پی سنگ بلورین آن آغاز شده است (Hatzfeld et al. 2003). در همین رابطه از کل انرژی اعمال شده فقط 10% آن سبب تغییر شکل زاگرس شده است (Jackson and Mckenzie 1988)، و از کل تغییر شکل به وقوع پیوسته تنها 5% آن از نوع لرزه ای می باشد (Masson et al. 2005). زمین لرزه ها غالباً در زاگرس باختری تمرکز دارند (Tatar et al. 2002) و عمق کانونی آنها کم تا متوسط است. با توجه به نمودار فراوانی نسبت به عمق زمین لرزه های زاگرس (شکل 12) مشخص می شود که بیشتر آنها

معکوس و راستالغز راست بر است. (Tatar et al. 2004).

تحت تأثیر تغییر شکل های داخلی در زاگرس خردلرزه هایی به ثبت رسیده است که احتمالاً وقوع آنها با فعالیت شکستگی های موجود از قبل در پوسته مرتبط می باشد و در این فرآیند جابه جایی ساخت های گسله از اهمیت کمتری برخوردار است (Tatar et al. 2004). زاگرس رورانده واقع در قسمت شمالی زاگرس چین خورده از سیستم راندگی با مؤلفه راستالغز راست بر، پهنه های برشی، گسل های قاشقی تشکیل شده است (Sarkarinejad and Azizi 2008). عملکرد ساختار این بخش از نوع ترافشاری راست بر بوده و تحت تأثیر عملکرد توأم دو مؤلفه راستالغز و شیب لغز می باشد (Jones et al. 2004). پدیده راندگی در طول صفحه های راندگی به وقوع پیوسته است و پهنه های برشی متشکل از دو بخش تغییر شکل یافته برش ساده و برش محض، منطبق بر راندگی ها یا سطوح گسیختگی قاعده ای می باشند (Sarkarinejad and Azizi 2008). تغییر شکل های رخنمون یافته و همچنین زمین لرزه های به ثبت رسیده در گستره

گسل های راستالغز راست بر روند N005 دارند (Tatar et al. 2004). وجود گسل های معکوس و راستالغز در مقیاس محلی بیانگر همگرایی میل صفحه عربی و ایران مرکزی است که با توزیع تغییر شکل به صورت کوتاه شدگی و حرکت راستالغز مشخص شده است (Talebian and Jackson 2003). عملکرد گسل های راستالغز راست بر با روند تقریباً شمالی- جنوبی موجب اتصال ساخت های گسله معکوس با یکدیگر شده است (Tatar et al. 2004). (شکل 13). همانگونه که در شکل 13 مشاهده می شود محل اتصال ساخت های گسله تشکیل گره های لرزه ای احتمالی را داده که بالقوه استعداد لرزه ای دارد.



شکل 13. نمایی از کوتاه شدگی پهنه زاگرس که توأم با عملکرد گسله های

لرستان نشان می دهد که لرزه خیزی استان متأثر از حرکت به سمت شمال صفحه عربی و عملکرد ساخت های گسله است.

ساخت های گسله مؤثر در لرزه خیزی استان لرستان

نوار زاگرس با پهنه سنندج-سیرجان در راستای ساختار گسله زاگرس همبندی دارد. این پهنه ساختاری از گسله معکوس اصلی زاگرس تشکیل شده که طی همگرایی صفحه عربی و ایران مرکزی محل بیشترین برخاستگی زاگرس و یا تشکیل زاگرس مرتفع می باشد، در ادامه با حرکت مماسی صفحه عربی نسبت به ایران مرکزی گسل جوان اصلی زاگرس (MRF) شکل گرفته است (vernant and Chery 2006). گسل مذکور فعال و از نوع راستالغز راست بر است که عمدتاً در زاگرس شمال باختری رخنمون دارد (Berberian 1995).

به طور کلی فعالیت گسل های راستالغز به مقدار زاویه ای بستگی دارد که راستای تنش با ساختار گسله می

سازد. چنانچه مقدار این زاویه 25 الی 45 درجه باشد گسله با مؤلفه راستالغز فعال خواهد بود. در بخش شمال باختری زاگرس مقدار زاویه حدوداً همین مقدار است اما در بخش جنوب خاوری مقدار این زاویه افزایش یافته از اینرو برخلاف بخش شمال باختری که گسل ها عملکرد راستالغز راست بر دارند در بخش جنوب خاوری گسل ها عمدتاً معکوس بوده و مؤلفه راستالغز آنها جزئی می باشد (Vernant and Chery 2006).

بر اساس یافته های ژئوفیزیکی اکثر ساختار گسله زاگرس شیب 30 تا 60 درجه به سمت شمال خاور داشته و عمدتاً زمین لرزه ها در محل گسل های راندگی با زاویه کم به وقوع پیوسته است (Talebian and Jackson 2004). علاوه بر گسل جوان اصلی، گسل معکوس اصلی زاگرس نیز از نظر زمین شناسی بسیار مهم می باشد، زیرا این ساختار گسله، مرز صفحه عربی و ایران مرکزی

است (Stocklin 1968, Berberian 1995, Tatar et al. 2002). این احتمال وجود دارد که گسله معکوس اصلی زاگرس، گسل عادی با شیب به سمت شمال خاور باشد که در پی کافت

شدگی ایران از صفحه عربی په در مزوزوئیک ایجاد شده و در زیر پوشش رسوبی قرار گرفته است که سپس طی سازوکار فشاری حاکم بر این گستره به شکل گسل معکوس دوباره فعال شده است (Jackson 1980). بدین ترتیب علاوه بر ساختار گسله با روند شمال باختری - جنوب خاوری، گسل های شمالی - جنوبی نیز بازتاب قسمتی از تغییر شکل به وقوع پیوسته در زاگرس می باشند. (Ricou 1974). در همین رابطه گسله های رخنمون یافته و گسله های پنهان (Berberian 1995) در فعالیت لرزه خیزی زاگرس مؤثر می باشند.

در گستره لرستان ناهنجاری ایزوستازی حدود 10- الی 20- میلی گال (Dehghani and Makris 1983) نمایانگر عدم تعادل پوسته است، که با ایجاد و یا فعالیت مجدد ساخت های گسله موجود از قبل همراه است. از مهمترین ساخت های گسله مؤثر در لرزه خیزی استان لرستان، پهنه گسله زاگرس است که در ادامه به طور اجمال به آن پرداخته می شود.

پهنه گسله زاگرس؛ با امتدادشمال باختری- جنوب خاوری از باختر ایران تا شمال بندرعباس گسترش یافته و در دشت سیلاخور توسط رسوبات آبرفتی جوان پوشیده شده است (بربریان 1362). این پهنه گسله شامل ساختار گسله جوان و گسله معکوس می باشد. علی رغم غیر فعال بودن پهنه گسله معکوس پهنه گسله جوان فعال بوده و عملکرد آن از نوع راستالغز راست بر می باشد (Berberian 1995)، همچنین از تعدادی گسله مجزا تشکیل شده است که به ترتیب از جنوب خاور به سمت شمال باختر عبارتند از:

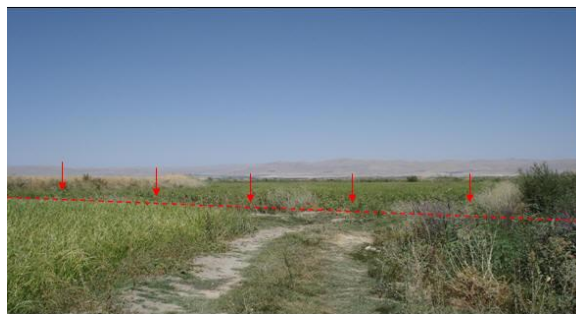
گسل دورود؛ به عنوان بخشی از پهنه گسله جوان زاگرس سبب رویداد زمین لرزه های ویرانگر استان لرستان بوده است. در سال 1287 هجری شمسی زمین لرزه سیلاخور با بزرگای $M_s=7.4$ و از آن پس زمین لرزه های متعددی مانند زمین لرزه سال 1385 (اشکال 14 و 15)، 1389 با بزرگای $M>5$ در طول این گسل به وقوع پیوسته است. گسل دورود از شهرهای متعددی مانند دورود و از نزدیکی شهربروجرد گذشته و فعالیت

فعالیت این گسل موجب رویداد زمین لرزه سیزدهم اردیبهشت سال 1384 طبریزان بوده است.

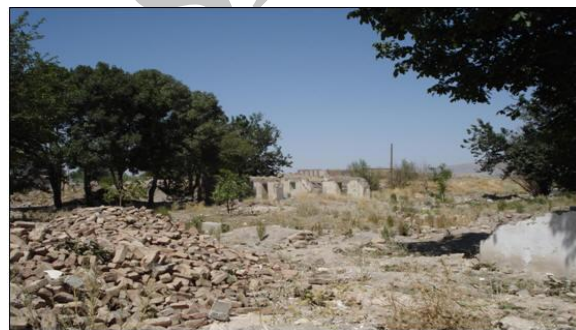
گسل نهاوند؛ بخش فعال دیگری از پهنه گسله جوان زاگرس است که با راستای شمال باختری- جنوب خاوری از حدود 2/5 کیلومتری جنوب باختر شهر نهاوند می گذرد. این گسل با 55 کیلومتر طول از باختر بروجرد آغاز و به سمت شمال باختر نهاوند امتداد می یابد (بربریان 1362). رودخانه گاماسیاب در بخشی از مسیر آن جریان دارد. جابه جایی در طول گسل نهاوند با افتادگی قطعه شمال خاوری همراه بوده که سبب تشکیل دشت نهاوند - بروجرد شده است. احتمالاً زمین لرزه 14 اکتبر سال 1961 میلادی علی آباد دماغ مربوط به فعالیت این گسل می باشد (بربریان 1362).

گسل ونایی؛ بخشی از گسل نهاوند است که از روستای ونایی با امتداد N40W به طرف شمال باختر نهاوند ادامه دارد. عملکرد کششی گسل ونایی سبب پائین افتادگی قطعه شمالی نسبت

آن همواره تهدید جدی برای مناطق مربوطه می باشد.



شکل 14. نمایی از گسل دورود در دشت سیلاخورکه در عین حال کانون سطحی زمین لرزه یازدهم فروردین 1385 نیز می باشد.



شکل 15. نمایی از روستای آسیب دیده درب آستانه طی زمین لرزه سال 1385، که در دشت سیلاخور و بروی گسل دورود بنا شده است.

گسل قلعه حاتم؛ نزدیکی بروجرد گسل لرزه ای دورود به گسل تقریباً شمالی- جنوبی قلعه حاتم ختم می شود. عملکرد آن باعث افتادگی قطعه نهاوند به میزان 10 متر شده است (بربریان 1362). سازوکار زمین لرزه های منسوب به فعالیت گسل قلعه حاتم از نوع کششی می باشد و احتمالاً

به قطعه جنوبی شده است (بربریان 1362).

گسل گارون؛ شاخه ای از گسل جوان زاگرس است که با راستای شمال باختری - جنوب خاوری در فاصله حدود 30 کیلومتری بروجرد قرار دارد. گسل گارون با حرکت راستالغز راست بر و مؤلفه معکوس از جمله گسل های بین کوه (کوه گارون) و دشت (دشت جنوب فیروزآباد) بوده و دارای توان لرزه ای است به گونه ای که زمین لرزه های 23 و 25 مرداد ماه سال 1373 را به آن نسبت می دهند (Berberian and Yeats 1999).

علاوه بر گسل های فوق الذکر در پهنه گسله جوان زاگرس گسل های دیگری نیز فعالیت دارند که به مراتب از اهمیت لرزه خیزی کمتری برخوردار می باشند.

پیشینه لرزه خیزی استان

از مهمترین زمین لرزه های به ثبت رسیده در استان لرستان که توسط بربریان (1362) گزارش شده است می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- زمین لرزه هزاره یازدهم قبل از میلاد سیمره با بزرگی $M_s=7.0$ (رده 1370)

- زمین لرزه 22 ژوئن سال 872 میلادی، موجب لرزش شدید سیمره گردید و در همین رابطه حدود 20000 تن کشته شدند.

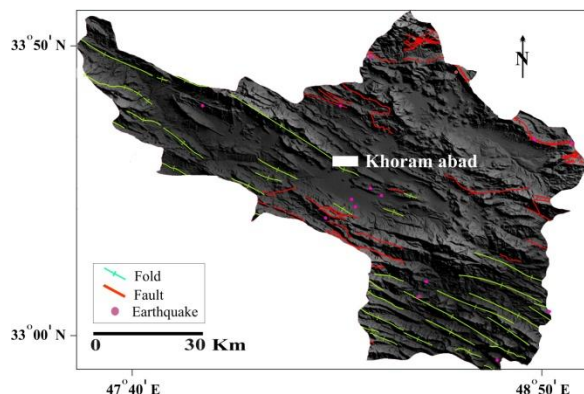
- زمین لرزه 23 ژانویه سال 1899 میلادی که با بزرگی $M_s=7.4$ در دره سیلاخور به وقوع پیوست. زمین لرزه مرتبط با عملکرد گسل دورود به عنوان بخشی از گسل جوان زاگرس است.

- زمین لرزه 23 ژانویه سال 1909 میلادی با بزرگی $M_s=7.4$ در دره سیلاخور که موجب ویرانی 64 روستا و تلفات انسانی حدود 8000 تن گردید.

- زمین لرزه 28 اکتبر سال 1961 میلادی با بزرگی $M_s=4.6$ در ناحیه حیدرآباد واقع بر روی گسل دورود.

- زمین لرزه 30 ژوئن سال 1963 میلادی با بزرگی $M_s=4.6$ که بر روی گسل دورود به وقوع پیوسته است.

- زمین لرزه 3 می سال 2005 میلادی با بزرگی $M_s=4.9$ ، کانون زمین لرزه حوالی



شکل 16. نمایی از لرزه زمین ساخت شهرستان خرم آباد. براساس تصویر SRTM و داده های لرزه ای مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

شهرستان بروجرد، موقعیت شهرستان بروجرد در حدفاصل پهنه دگرگونی سنندج - سیرجان در شمال و زاگرس مرتفع در جنوب سبب گردیده تا این شهرستان بر روی ساخت های گسله جوان زاگرس با روند شمال باختری - جنوب خاوری استقرار یافته و از توان لرزه ای بالایی برخوردار باشد (شکل 17). در همین رابطه بر اساس سازوکار کانونی زمین لرزه های به وقوع پیوسته، عملکرد ساخت های گسله عمدتاً از نوع تراکشی است.

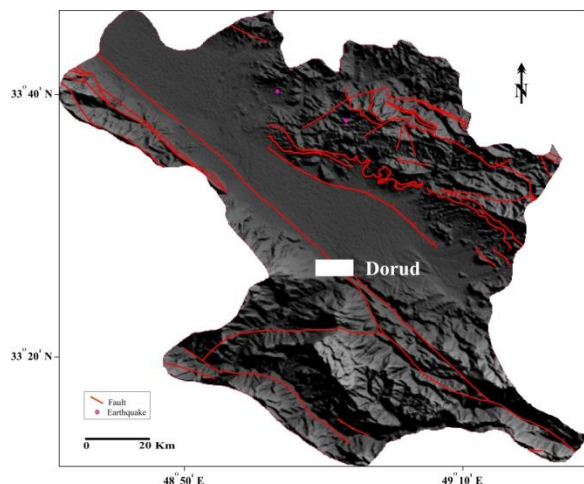
شهرستان بروجرد بر روی پهنه گسله دورود از گستره گسله جوان زاگرس قرار دارد.

- زمین لرزه 31 مارس سال 2005 میلادی سیلاخور با بزرگی $M_s = 6.1$. طی این زمین لرزه به 330 روستا آسیب رسید.

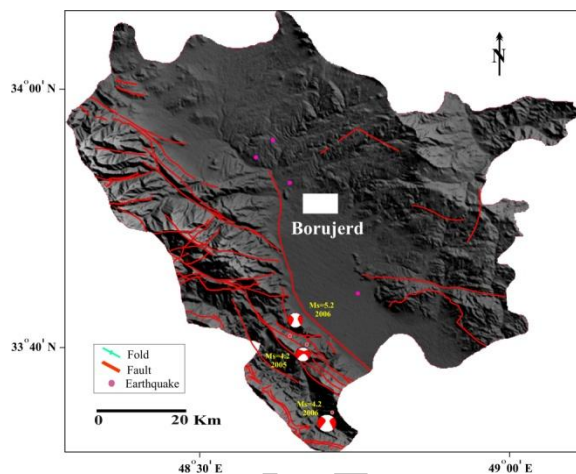
ویژگی لرزه زمین ساخت استان لرستان

در ادامه با توجه به ویژگی ساخت های گسله و چین خورده در هریک از شهرستان های استان لرستان و همچنین وقایع لرزه ای به ثبت رسیده، ویژگی لرزه زمین ساخت استان مورد بررسی اجمالی قرار می گیرد.

شهرستان خرم آباد، تمرکز ساختمان های چین خورده با راستای محوری شمال باختری- جنوب خاوری در شهرستان خرم آباد بازتابی از موقعیت این شهرستان در زاگرس چین خورده است (شکل 16). نحوه توزیع خرد لرزه ها در شهرستان خرم آباد احتمالاً مربوط به عملکرد ساخت های گسله پنهان است که طی شرایط فشاری حاکم بر گستره زاگرس فعال شده اند.



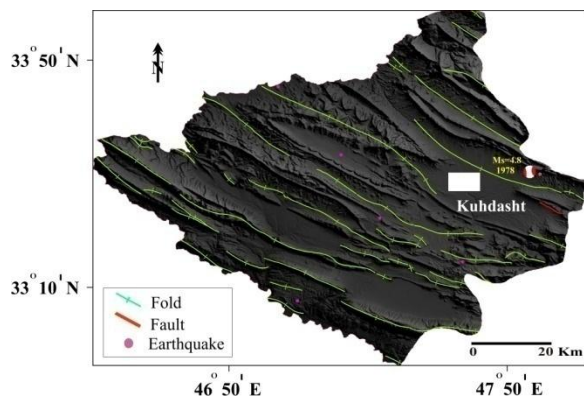
شکل 18. نمایی از لرزه زمین ساخت شهرستان دورود.



شکل 17. نمایی از لرزه زمین ساخت شهرستان بروجرد.

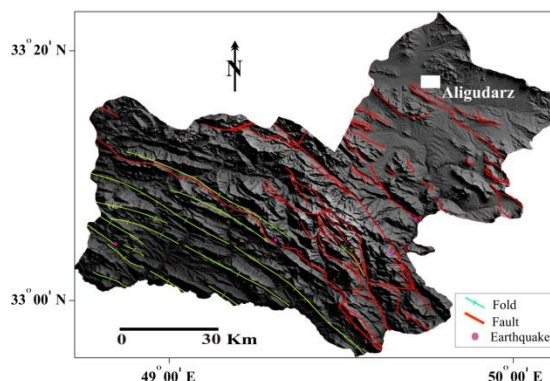
شهرستان الیگودرز، شامل دو بخش گسله در شمال و چین خورده در جنوب است (شکل 19). روند غالب ساخت ها شمال باختری- جنوب خاوری است. اگرچه تعداد بسیار محدودی رومرکز زمین لرزه در این بخش قرار دارد اما در تقسیمات مربوط به توان لرزه خیزی از خطر لرزه ای بسیار بالایی برخوردار است، شاید بتوان علت آن را به موقعیت ساختاری شهرستان الیگودرز واقع در بخش انتهایی گسل دورود در استان لرستان نسبت داد.

شهرستان دورود، گسل دورود به عنوان بخشی از پهنه گسله جوان زاگرس روند شمال باختری - جنوب خاوری داشته و امروزه جزء فعال ترین ساخت های گسله استان لرستان می باشد. در همین رابطه وقوع زمین لرزه های متعددی را به فعالیت آن نسبت می دهند. موقعیت ساختاری شهرستان دورود سبب گردیده تا ساخت غالب این گستره عمدتاً گسله باشد (شکل 18).



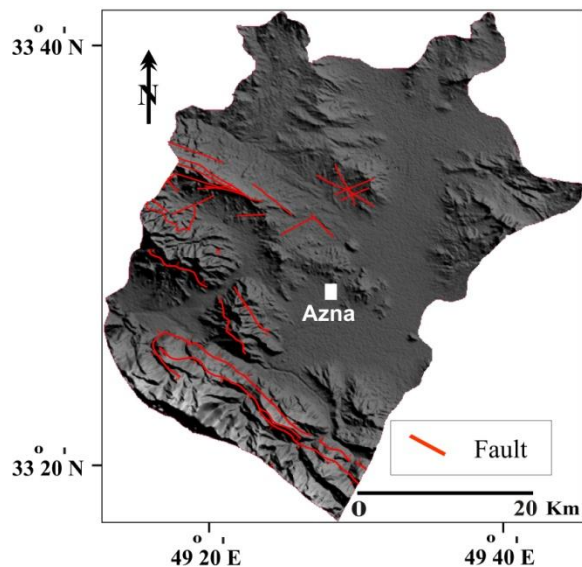
شکل 20. نمایی از لرزه زمین ساخت شهرستان کوهدشت.

شهرستان پلدختر، سرتاسر
 شهرستان پلدختر و به ویژه بخش شمالی آن محل تمرکز ساختمان های چین خورده و گسله با روند شمال باختری - جنوب خاوری می باشد. سازوکار زمین لرزه های به وقوع پیوسته در پلدختر غالباً از نوع معکوس با مؤلفه راستالغز می باشد، به گونه ای که بازتابی از شرایط زمین ساخت فشاری حاکم بر منطقه با راستای شمال شمال خاوری - جنوب جنوب باختری است (شکل 21).



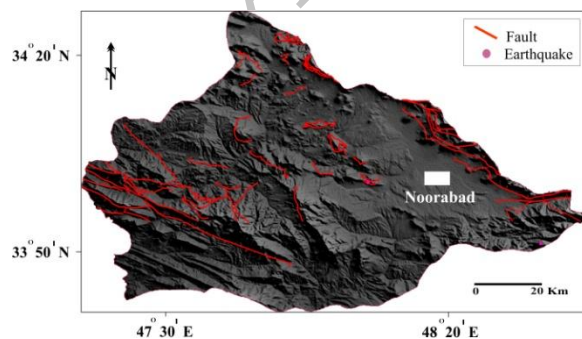
شکل 19. نمایی از لرزه زمین ساخت شهرستان الیگودرز.

شهرستان کوهدشت ریخت
 ساختاری شهرستان کوهدشت تقریباً چین خورده است. روند ساخت های چین خورده شمال باختری - جنوب خاوری است و از روند حاکم بر پهنه زاگرس تبعیت می کند (شکل 20). اگرچه سازوکار زمین ساختی فشاری سبب تشکیل ساخت های چین خورده می شود اما سازوکار کانونی زمین لرزه واقع در خاور کوهدشت از نوع کششی است. احتمالاً عملکرد کششی گسل های پنهان در راستای عمود بر تنش حداکثر در وقوع زمین لرزه منطقه مؤثر بوده است.

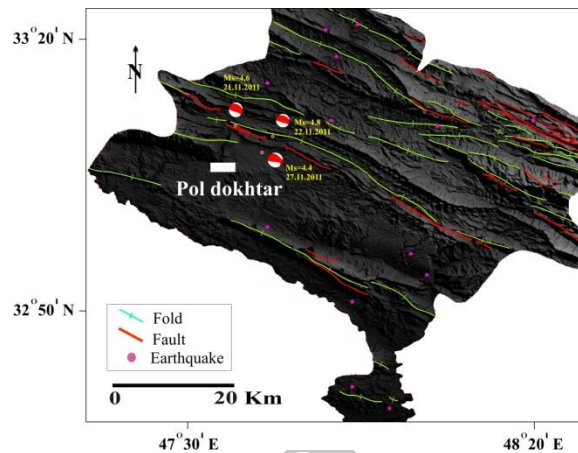


شکل 22. نمایی ساختاری شهرستان ازنا.

شهرستان دلفان، واقع در منتهی الیه پهنه سنندج - سیرجان سبب گردیده تا ساخت غالب رخنمون یافته در این شهرستان از نوع گسله با روند شمال باختری- جنوب خاوری باشد (شکل 23). همانگونه که در شکل مشاهده می شود تقریباً تاکنون این شهرستان در معرض تهدید زمین لرزه های مخرب و ویرانگر نبوده است.



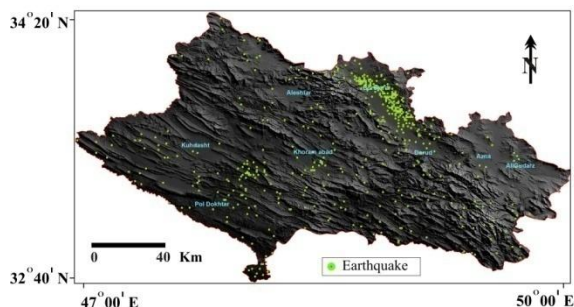
شکل 23. نمایی از لرزه زمین ساخت شهرستان دلفان.



شکل 21. نمایی از لرزه زمین ساخت شهرستان پلدختر.

شهرستان ازنا، ویژگی ساختاری شهرستان ازنا تابع پهنه گسله زاگرس می باشد. بدین معنا که غالب ساخت های تشکیل شده در آن گسله می باشد. روند ساخت ها عموماً شمال باختری- جنوب خاوری با طول بین 2 تا بیش از 10 کیلومتر است. این شهرستان تقریباً فاقد زمین لرزه ویرانگر است، اما این بدان معنا نیست که منطقه کاملاً امن باشد زیرا ممکن است مکانی مناسب جهت تجمع انرژی و فعالیت لرزه ای در آینده باشد (شکل 22).

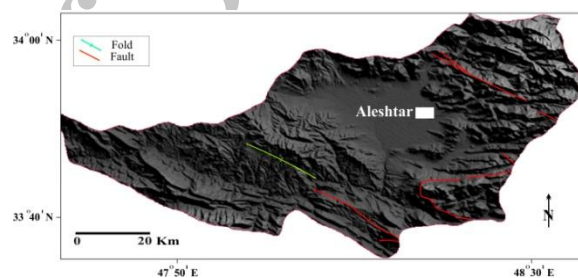
استان توزیع نسبتاً یکنواخت تری دارد. قرارگیری رومرکز زمین لرزه ها در محدوده ساخت های چین خورده احتمالاً بازتابی از عملکرد ساخت های گسله پنهان می باشد.



شکل 25. نمای توزیع رومرکز زمین لرزه ها طی سال های 1932 لغایت 2010، بر اساس داده های مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

*سازوکار کانونی زمین لرزه ها در گستره استان لرستان بازتابی از شرایط زمین ساختی حاکم بر زاگرس است، بدین معنا که علاوه بر گسل های راستالغز راست بر با سازوکار کانونی تراکشی در بخش های شمالی استان و به ویژه در طول پهنه گسله جوان زاگرس مشخص می شود، در بخش های جنوبی استان عملکرد گسل های معکوس آشکار و پنهان سبب وقوع زمین لرزه هایی با سازوکار کانونی فشاری شده است (شکل 26).

شهرستان سلسله، موقعیت ساختاری شهرستان سلسله واقع در زاگرس چین خورده سبب گردیده تا تحت تأثیر سازوکار فشاری حاکم بر منطقه چین خورده و برخاسته باشد (شکل 24). سراب کهمان واقع در شهرستان الشتر یکی از پدیده های زمین شناسی منحصر به فرد استان لرستان است که در طول ساخت های گسله و چین خورده آهکی زاگرس تشکیل شده است.



شکل 24. نمای ساختاری شهرستان سلسله.

خصوصیت لرزه خیزی استان لرستان

*نقشه پراکندگی رومرکز زمین لرزه ها در استان لرستان (شکل 25) نشان از توزیع ناهمگن زمین لرزه های دستگاهی در این گستره دارد. یعنی علی رغم تمرکز زمین لرزه ها در محدوده گسل جوان زاگرس، رومرکز زمین لرزه ها در دیگر بخش های

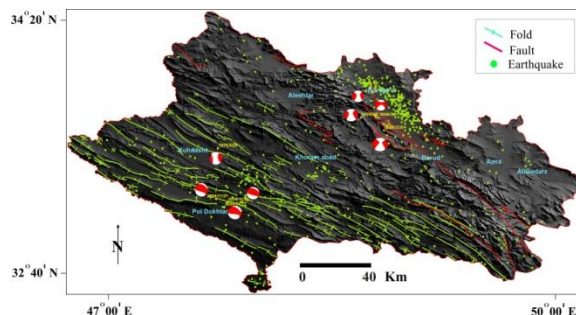
وقوع زمین لرزه های با بزرگی 5 وجود دارد.

* حداکثر شتاب محتمل بر حسب دوری از گسل در استان لرستان به گسل دورود با 0.95 مقدار g مربوط می گردد. مطالعات نشان می دهد که بیشینه شتاب ثقل برای منطقه سیلاخور حدود 53% ، ازنا 31% ، الشتر 30% ، خرم آباد 27% ، الیگودرز 19% و کوهدشت 2% است.

* با استناد به رابطه گوتنبرگ - ریشتر گسل دورود بیشترین توان لرزه زایی جهت ایجاد زمین لرزه با بزرگی 7 را در استان لرستان دارا می باشد. این در صورتی است که بزرگی زمین لرزه های ایجاد شده در طول گسل نهاوند معادل 6.9 ، گسل قارون 6.5 و گسل قلعه حاتم 6.4 می باشد. بدین ترتیب پهنه با خطر بالا پیرامون بخش های تشکیل دهنده گسل بنیادی و جوان زاگرس مانند گسل های دورود و نهاوند قرار دارد.

تحلیل خطر زمین لرزه در استان لرستان

گسل ها همواره عامل تهدیدی برای مناطق دربرگیرنده و



شکل 26. نمایی از لرزه زمین ساخت استان لرستان بر اساس داده های مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و دانشگاه هاروارد.

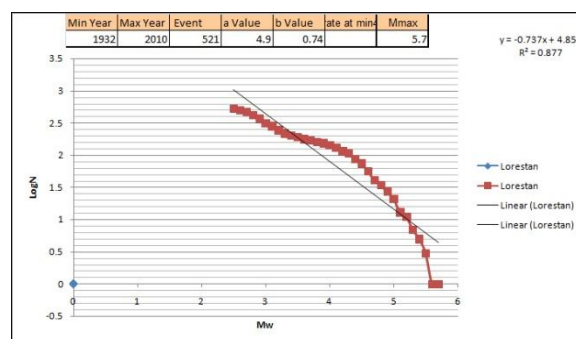
* به طور کلی براساس زمین لرزه های به ثبت رسیده طی صد سال اخیر، غالب زمین لرزه های به وقوع پیوسته در گستره لرستان بزرگی 4.5 الی 5.0 دارد، گرچه این استان تجربه زمین لرزه های بزرگتر را نیز داشته است. از سوی دیگر زمین لرزه ها عمدتاً عمق کم تا متوسط دارند.

* تمرکز زمین لرزه های تاریخی و دستگای بیشتر در راستای گسل های دورود، نهاوند و قارون در شمال استان است، که با استناد بر فرمول گوتنبرگ - ریشتر دوره بازگشت زمین لرزه های با بزرگی 7 معادل صد سال می باشد که این مقدار برای زمین لرزه های با بزرگی 6 معادل دوازده سال و با گذشت هر دو سال احتمال

استان لرستان طی سال های 1932 لغایت 2010 ، براساس داده های مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

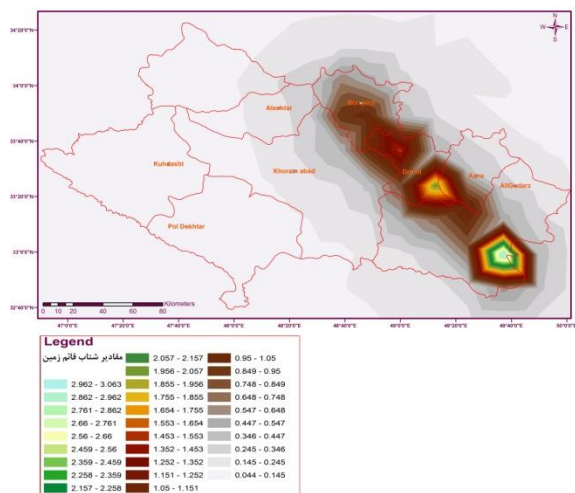
با توجه به 11 گسل با طول بیش از 25 کیلومتر که در استان لرستان از توان و همچنین سابقه لرزه خیزی می باشند، شتاب قائم زمین برای نقاط مختلف استان مورد محاسبه قرار گرفت. با استفاده از نتایج حاصله نقشه پهنه بندی خطر زلزله و نقاط کنتموری هم شتاب تهیه گردید (شکل 28) بر این اساس مناطق مرزی واقع در حدفاصل پهنه زاگرس و سنندج - سیرجان واقع در طول پهنه گسله جوان زاگرس از بیشترین شتاب قائم حدود $0/29g$ تا $0/30g$ برخوردار است اما در طول این پهنه با نزدیک شدن به سمت جنوب خاوری یا با نزدیک شدن به محدوده مرزی بین زاگرس شمال باختری و جنوب خاوری این شتاب به حداکثر مقدار می رسد. این در صورتی است که از این مقدار به سمت جنوب و جنوب باختری استان کاسته می شود.

همجوار می باشند و در تحلیل لرزه خیزی مناطق ویژگی گسل ها اعم از خصوصیات هندسی و همچنین سابقه لرزه خیزی آنها مبنای محاسبه و برآورد تحلیل خطر زمین لرزه می باشد. با استفاده از رابطه گوتنبرگ - ریشتر ، برای 521 زمین لرزه که طی سال های 1932 لغایت 2010 به ثبت رسیده است ، مقدار a معادل 4.9 و مقدار b معادل 0.74 محاسبه شده است (شکل 27) که با توجه به مقدار b ، تعداد زیاد زمین لرزه اما با بزرگی کم از خصوصیت لرزه خیزی استان لرستان می باشد. این ویژگی در تأیید خصوصیت زمین لرزه های به وقوع پیوسته در زاگرس می باشد که عمدتاً منشأ آن واقع در بخش های بالایی سری هرمز است.



شکل 27. نمایی از نسبت فراوانی به بزرگی زمین لرزه های به ثبت رسیده در

های دلفان، کوهدشت و پلدختر از کمترین خطر لرزه ای برخوردار هستند. البته مناطق با خطر کمتر به معنای مصون بودن این مناطق در برابر زلزله نیست بلکه تحت تأثیر سازوکار فشاری حاکم بر گستره زاگرس و استان لرستان علاوه بر گسل های شناخته شده و رخنمون یافته احتمال فعالیت ساخت های گسله پنهان نیز وجود دارد. در بخش های جنوبی، جنوب باختری و باختری استان، ضخامت واحدهای سنگی و عملکرد واحد تبخیری هرمز در زاگرس چین خورده و زاگرس رورانده مانع از تأثیر عملکرد ساخت های گسله پی سنگی در بخش های سطحی تر شده است. شناسایی این گسل ها در پیش بینی های آتی وقوع زمین لرزه استان لرستان مهم می باشد. اگرچه شناسایی دقیق آنها مستلزم انجام بررسی های ژئوفیزیکی و تهیه مقاطع لرزه ای می باشد.



شکل 28. نقشه پهنه بندی خطر زلزله و نقاط کنتموری شتاب قائم در شهرستان های استان لرستان، که بیشترین مقدار آن در جنوب خاور و مربوط به شهرستان الیگودرز می باشد.

نتیجه گیری

در استان لرستان، شهرستان های دورود، بروجرد، الیگودرز و ازنا همراه با روستاهای تابعه حائز بیشترین خطر و شهرستان های خرم آباد، الشتر و سلسله دارای خطر متوسط و شهرستان

منابع

compressional Orogens caused by subduction of the underlying lithosphere, *Tectonophysics*, 232, 119-132.

Berberian, M., 1981, Active faulting and tectonics of Iran, in *Zagros-Hindukush-Himalaya, Geodynamic evolution*, Geodynamics Series 33-69.

Berberian, M., King, G.C.P., 1981, Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran, *Can. J. Earth Sci.*, 18, 210-265.

Berberian, M., Muir, I.D., Pankhurst, R.J., 1982, Late Cretaceous and early Miocene Andean-type plutonic activity in northern Makran and central Iran, *J. of*

Berberian, M., 1995, Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics, *Tectonophysics*, 241, 193-224.

Berberian, M., Yeats, R.S., 1999, Patters of historical earthquake

بربریان، م.، 1362، پژوهش و بررسی لرزه زمین ساخت ایران، سازمان زمین شناسی کشور، گزارش 56.

جعفری، م. ک.، مهدویفر، م. ر.، کشاورزبخشایش، م.، 1378، مطالعات ژئوتکنیک لرزه ای استان لرستان، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

رده، ا.، 1370، تاریخ زمین لرزه های ایران، تألیف امبرسیز و ملویل، انتشارات آگاه.

مطیعی، ه.، 1372، چینّه شناسی زاگرس، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Alavi, M., 1994, Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211-238.

Ambraseys, N.N., Melville, C.P., 1982, A History of Persian Earthquakes, Cambridge University Press, New York.

Beaumont, C.P., Fullsack, H.J., 1994, Styles of crustal deformation in

Asia and the western Pacific. *J. Geophys. Res.*, 77, 4432-4460.

Hatzfeld, D., Tatar, M., Priestley, K., Ghafory-Ashtiany, M., 2003, Seismological constraints on the crustal structure beneath the Zagros Mountain belt (Iran), *Geophys. J. Int.*, 155, 403-410.

Hynes, S.J., McQuillan, H., 1974, Evolution of the Zagros suture zone, southern Iran. *Bulletin of Geological Society of America* 85, 739-744.

Jackson, J.A., 1980, Reactivation of basement faults and crustal shortening in orogenic belts, *Nature*, 238, 343-364.

Jackson, J.A., Fitch, T., 1981, Basement faulting and the focal depths of the larger earthquakes in the Zagros Mountains (Iran), *Geophys. J. R. astr. Soc. London*, 64, 561-586.

Jackson, J.A., Mckenzie, D.P., 1984, Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 77, 185-264.

Jackson, J.A., Mckenzie, D.P., 1988, The relationship between plate motions and seismic tensors, and the rates of active deformation in the

rupture in the Iranian plateau, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 120-139.

Braun, J., Beaumont, C., 1995, Three-dimensional numerical experiments of strain partitioning at oblique plate boundaries: Implications for contrasting tectonic styles in the southern Coast Ranges, California and Central South Island, New Zealand. *J. Geophys. Res.* 100, 18059-18074.

Chery, J., Vilotte, J.P., Daignieres, M., 1991, Thermomechanical model of a thinned continental lithosphere under compression: implications for the Pyrenees. *J. Geophys. Res.*, 96, 4385-4412.

Dehghani, G.A., Makris, J., 1983, The gravity field and crustal structure of Iran. In *Geodynamic project (Geotravers) in Iran*, G.S.I. report, No.51, 51-68.

Falcon, N., 1974, Southern Iran: Zagros Mountains, in, *Mesozoic-Cenozoic Orogenic Belts*, Special Publication 4 ed, Spencer, A., 199-211. Geological Society, London. Asia and the western Pacific, *J. Geophys. Res.*, 77, 4432-4460.

Fitch, T.J., 1972, Plate convergence, transcurrent faults and internal deformation adjacent to southeast

Sarkarinejad, K., Azizi, A., 2008, Slip Partitioning and inclined dextral transpression along the Zagros Thrust System, Iran, *J. of Struc. Geol.*, 30, 116-136.

Stocklin, J., 1968, Structural history and tectonics of Iran, a review, *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 52, 1229-1258.

Stocklin, J., 1974, Possible ancient continental margins in Iran, In: Burk, C.A., Drake, C.L. (Eds), *The Geology of Continental Margins*, Springer, New York, 873-888.

Stoneley, R., 1976, The geology of the Kuh-e Dalneshin area of southern Iran and its bearing on the evolution of southern Tethys, *J. Geol. Soc. London*, 138, 509-526.

Talebian, M., Jackson, J., 2003, A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran, *Geophys. J. Int.*,

Talebian, M., Jackson, J., 2004, A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran, *Geophys. J. Int.* 156, 506-526.

Tatar, M., 2001, Etude sismotectonique de deux zones de

Mediterranean and Middle East, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 93, 45-73.

Jones, R., Holdsworth, R.E., Clegg, P., McCaffrey, K., Tavarnelli, E., 2004, Inclined Transpression. *Journal of Structural Geology* 26, 1531-1548.

Krants, R.W., 1995, The transpressional strain model applied to strike-slip oblique-convergent and oblique-divergent deformation, *J. struct. Geol.*, 17, 1125-1137.

Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Tavakoli, F., Chery, J., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman, *International Journal of Geophysics*, 157, 381-398.

Masson, F., Chery, J., Hatzfeld, D., Martinod, J., Vernant, P., Tavakoli, F., Ghafory-Ashtiani, M., 2005, Seismic versus aseismic deformation in Iran inferred from earthquakes and geodetic data, *Geophys. J. Int.*, 160, 217-226.

Ricou, L.E., 1974, L' evolution geologique de la region de Neyriz (Zagros iranien) et l' evolution structural des zagrides, These, Universite d'Orsay, France.

San Andreas fault system: a lithospheric-scale approach, Continental transpressional and transtensional tectonics, Geological Society, 135, 143-158.

Vernant, P., 2004, Contemporary crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and Northern Oman, Geophys. J. Int., 157, 381-398.

Vernant, P., Chery, J., 2006, Mechanical modelling of oblique convergence in the Zagros, Iran, Geophys. J. Int., 165, 991-1002.

collision continentale: le Zagros Central et l'Alborz (Iran), PhD thesis, Grenoble.

Tatar, M., Hatzfeld, D., Martinod, J., Walpersdorf, A., Ghafory-Ashtiany, M., Chery, J., 2002, The present day deformation of the central Zagros from GPS measurements, Geophys. Res. Lett., 29(19), 1927, doi:10.1029/2002GL015427.

Tatar, M., Hatzfeld, D., Ghafory-Ashtiany, M., 2004, Tectonics of the Central Zagros (Iran) deduced from microearthquakes seismicity, Geophys. J. Int., 156, 255-266.

Teyssier, C., Tikoff, B., 1998, Strike-slip partitioned transpression of the

Archive of SID