پدیده‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی زلزله فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه (سیلاخور)

محمدرضا مهدویفر، عضو هیأت‌علمی و دانشجوی دکترای ژئوفیزیک/ وحید تاجیک، کارشناس پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک پژوهشگاه

۱ـ چکیده

در ساعت ۰۲ : ۴۷ : ۴ (به وقت محلی)، روز ۱۱ فروردین ماه ۱۳۸۵، زمین‌لرزه‌ای با بزرگای محلی $M_L = 6.1$، در محدوده جنوب شرقی بروجرد رخ داد. این زمین‌لرزه در ۳۳/۶۲ درجه عرض شمالی، ۴۸/۹۱ درجه طول خاوری و با عمقی در حدود ۱۴ کیلومتر به وقوع پیوست و شدت رو مرکز آن VIII درجه در مقیاس مرکالی تخمین زده‌شد. زمین‌لرزه با پدیده‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی فراوانی همراه بوده‌است. مهمترین پدیده ژئوتکنیکی مشاهده‌شده، تفاوت تخریب در دشت و مناطق قرارگرفته بر روی دامنه‌های سنگی می‌باشد که شاهدی آشکار از تأثیر ساختگاه است. علاوه‌برآن، پدیده روانگرایی در شش نقطه از دشت سیلاخور شامل اطراف روستاهای لبان، عربان، الک‌آباد، کارخانه سفیدکن، حیدرآباد و باباپشمان دیده شده‌است که روانگرایی ایجاد شده در لبان پایین همراه با گسترش جانبی بوده‌است. به‌رغم ایجاد ریزشهای فراوان در اطراف روستاهای آسیب دیده، آثاری از وقوع زمین‌لغزشهای پیوسته و عمیق مشاهده‌نشده و زلزله تنها موجب تجدید فعالیت برخی از زمین‌لغزشهای موجود در منطقه شده‌است. علاوه بر پدیده‌های مذکور، آثار فرونشست در نقاط محدودی از منطقه مشاهده گردیده‌است.

کلید واژه‌ها: زلزله درب آستانه (سیلاخور)، روانگرایی، زمین‌لغزش، فرونشست

۲ـ مقدمه

زلزله درب آستانه (سیلاخور) در تاریخ ۱۳۸۵/۱/۱۱ در ساعت ۰۲ : ۴۷ : ۴ به وقت تهران (۰۲ : ۱۷ : ۱ به وقت GMT) با بزرگای $M_L = 6.1$ در محدوده جنوب‌شرقی شهرستان بروجرد در جنوب‌غربی ایران رخ داد[۱]. مشخصات کانونی این زمین‌لرزه با موقعیت گزارش شده توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا (۳۳/۶۱ شمالی ۴۸/۷۹ خاوری) [۲] تقریباً همخوانی دارد. عمق زلزله در حدود چهارده کیلومتر [۱] و شدت آن در رو مرکز در مقیاس شدت مرکالی اصلاح‌شده VIII تخمین‌زده شده‌است[۳]. براساس شتابنگاشت تصحیح شده از ایستگاه چالانچولان مقدار PGA افقی و عمودی در دوازده کیلومتری رومرکز به ترتیب ۴۳۲ و ۵۲۴ سانتیمتر بر مجذور ثانیه بوده است [۴].

در این زمین‌لرزه همچون زمین‌لرزه‌های ۱۳۶۹ منجیل، ۱۳۸۱ چنگوره ـ آوج و ۱۳۸۲ بم، برخی پدیده‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی نظیر اثرهای ساختگاهی، روانگرایی،

زمین‌لغزش و در برخی مناطق فرونشست زمین دیده شده‌است.

۳ - وضعیت کلی زمین‌شناسی منطقه

دشت بزرگ سیلاخور در طول ۴۸/۳۰تا ۴۹ درجه شرقی و در عرض شمالی ۳۳/۳تا ۳۴ درجه، مابین پهنه دگرگونه در امتداد پهنه سنندج - سیرجان در شمال و زاگرس خرده‌شده در جنوب واقع گردیده است. این دشت از اشترینان (شمال‌غرب بروجرد) تا دورود گسترش دارد. بر اساس نقشه زمین‌شناسی، ۱:۱۰۰,۰۰۰ چهارگوش بروجرد[۵]، دشت سیلاخور عمدتاً از رسوبات آبرفتی شامل پادگانه‌های بلند و قدیمی، پادگانه‌های کوتاه و جوان و رسوبات رودخانه‌ای تشکیل‌شده و به دلیل وجود رودهایی از قبیل بزازنا و چالان‌چولان، آبرفتهای رودخانه‌ای در آن گسترش یافته‌اند[۶].

منطقه دگرگونه شامل سنگهای دگرگونی در حد رخساره شیست سبز (آمفیبول شیست، اسلیت و ...) می‌باشد. علاوه‌برآن، تزریق توده نسبتاً بزرگ گرانیت بروجرد در میان اسلیت‌های سیاه موجب شکل‌گیری سنگهای دگرگونی مجاورتی به صورت هورنفلس و آندالوزیت شیست و... شده‌است.

منطقه زاگرس خردشده نیز که در راستای منطقه دگرگونه می‌باشد، ارتفاعات ورکوه، بی‌کسه، شاه‌نشین و میش‌پرور را شامل می‌شود که عمدتاً از سنگهای کربناته تشکیل شده‌است[۵].

۴ - پدیده‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی مرتبط با زلزله

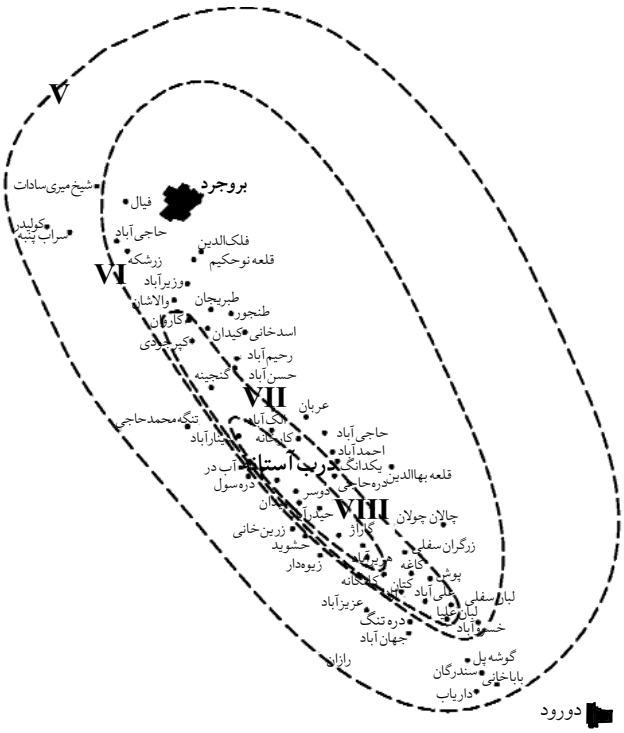
پدیده‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی مرتبط با زلزله درب آستانه را می‌توان در قالب چهار گروه اثرهای ساختگاهی، روانگرایی، زمین‌لغزش و فرونشست طبقه‌بندی نمود.

۴-۱- اثرهای ساختگاهی

در منطقه زلزله‌زده برخی شواهد مبیّن تشدید و یا تضعیف جنبش زمین در نتیجه نوع ساختگاه بوده‌اند. در قسمتهای بعد این شواهد تشریح گردیده‌اند.

۴-۱-۱- افت سریع شدت به سمت کوههای جنوب‌غربی دشت

بر اساس نقشه هم شدت زلزله، منحنی‌های هم شدت به شکل بیضی‌های کشیده‌ای هستند که فشردگی آنها در جهت هر دو قطر نامتقارن است (شکل۱).

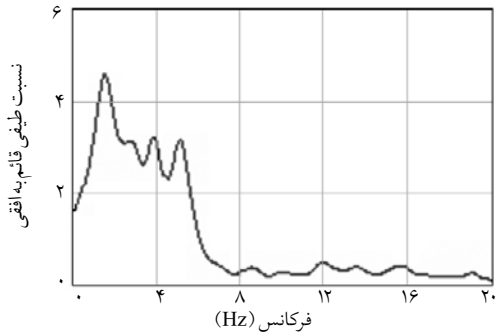


شکل (۱): منحنی‌های هم شدت زلزله درب آستانه (سیلاخور)

در جنوب‌شرقی قطر بزرگتر (با راستای شمال‌غرب ــ جنوب شرق) منحنی‌ها بیشتر از شمال‌غرب به یکدیگر فشرده‌شده و درنتیجه با سرعت سریعتر افت نموده‌است. عدم‌تقارن در فشردگی منحنی‌ها را در این جهت می‌توان به نحوه گسترش گسیختگی و پدیده جهت‌پذیری آن (Forward Directivity) مرتبط نمود و شواهد محکمی دال بر تأثیر ساختگاه در آن دیده‌نمی‌شود. در سوی جنوب‌غرب قطر کوچکتر (با راستای شمال‌شرق ـ جنوب‌غرب) منحنی‌ها بیشتر از شمال‌شرق به

یکدیگر فشرده شده و در نتیجه با شدت سریع تر افت نموده است. عدم تقارن در این جهت بیشتر از جهت قطر بزرگتر بیضی ها بوده، به طوری که شدت در فاصله ۲/۵ تا ۵ کیلومتر از VIII به VI کاهش می یابد. این کاهش می تواند با در نظر گرفتن شرایط ساختگاه بدین صورت توجیه گردد:

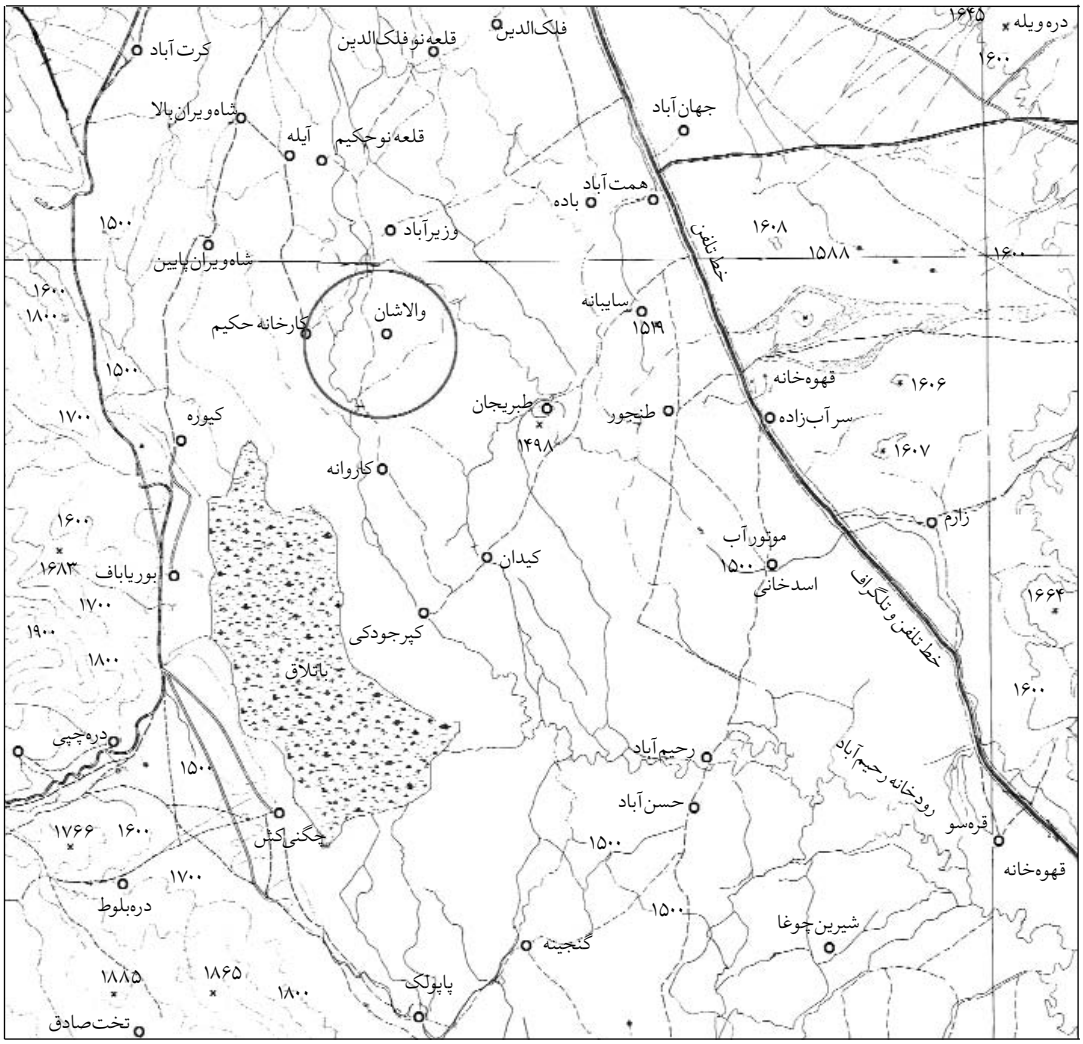
- بر اساس مطالعات جعفری و همکاران [۶] دشت سیلاخور از رسوباتی ریزدانه با ضخامت زیاد و تراکم کم تشکیل یافته است. بدیهی است ضخامت این رسوبات به سمت جنوب غرب و با نزدیک شدن به ارتفاعات کاهش می یابد. با توجه به موارد مذکور افت سریع میزان تخریب از محدوده بیشینه شدت که روی آبرفتی سست و ضخیم قرار گرفته است به سمت جنوب غرب که ضخامت آبرفت سریعاً کم شده و به سنگ بستر می رسد می تواند نشانه تشدید جنبش زمین در نواحی میانی دشت باشد.
- قابلیت تشدید در آبرفتهای منطقه، با تحلیل شتابنگاشتهای به دست آمده از زلزله درب آستانه در ایستگاه چالانچولان (قرارگرفته روی دشت و به فاصله حدود ۱۲ کیلومتر از رومرکز زلزله) نیز تأیید می گردد [۷]. طبق این تحلیل، میزان تشدید در محدوده فرکانسی ۱/۳ تا ۵ هرتز بین ۳ تا ۵ و نشانه سست بودن آبرفت و تشدید قوی حرکات زلزله در محدوده فرکانسی مزبور است (شکل ۲).



شکل (۲): میانگین نسبت طیفی قائم به افقی (در دو جهت) شتابنگاشتهای به دست آمده از ایستگاه چالانچولان در ۱۲ کیلومتری رومرکز زلزله [۷]

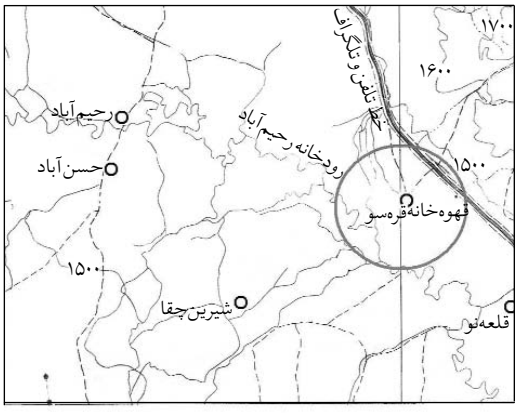
علاوه بر این شواهد، موارد دیگری نیز در منطقه وجود دارند که می توانند به عنوان دلایلی بر تأثیر ساختگاه محسوب گردند. از جمله این موارد می توان به تخریب شدیدتر روستای والاشان (در شمال غرب رومرکز) نسبت به روستاهای اطراف اشاره نمود. این روستا در چهار کیلومتری جنوب شرق بروجرد و ۲۸ کیلومتری شمال غرب رو مرکز زلزله قرار دارد (شکل ۳). با وجود اینکه فاصله روستا از رومرکز زلزله بیشتر از فاصله روستاهای مجاور مانند کاروانه، کپرجودکی، کیدان و طبریجان است، ولی میزان تخریب (شدت زلزله) در آن بیشتر از چهار روستای مذکور است. این موضوع می تواند با نوع خاک منطقه تا حدی توجیه گردد. روستای والاشان در نزدیکی باتلاقی قرار دارد که احتمالاً در زمانهای گذشته تا زیر روستای والاشان گسترش داشته است (شکل ۳). همین امر می تواند موجب سست تر بودن خاک روستای والاشان نسبت به روستاهای اطراف باشد. بدیهی است این فرضیه به بررسی بیشتر محلی و مقایسه خاک زیرین روستای والاشان با روستاهای همجوار نیاز دارد.

نمونه دیگری از تأثیر ساختگاه تخریب کمتر روستاهای قره سو و یک دانگ نسبت به روستاهای اطراف می باشد. روستای قره سو در کیلومتر ۹ جاده بروجرد به خرم آباد قرار دارد (شکل ۴). طبق نقشه هم شدت زلزله (شکل ۱) روستاهای اطراف قره سو همچون اسدخانی و شیرین چوغا شدت VI را تحمل کرده اند؛ ولی شدت زلزله در این روستا V بوده است. تفاوت مشاهده شده در شدت تحمل شده در این روستا نسبت به روستاهای مجاور را می توان همانند روستاهای قرار گرفته بر حاشیه جنوب شرقی دشت سیلاخور به نزدیک بودن این روستا به ارتفاعات شمال شرقی منطقه و در نتیجه کاهش ضخامت آبرفت نسبت داد.

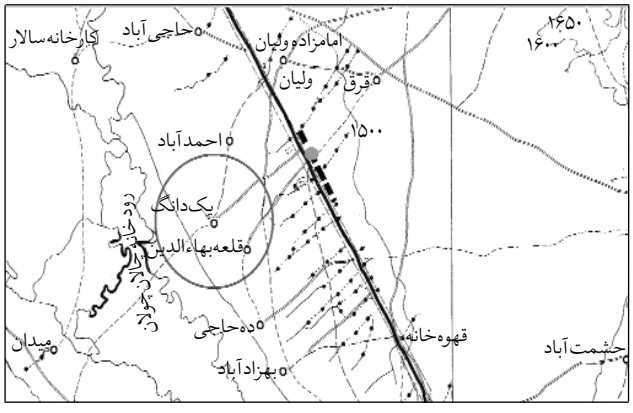


شکل (۳): موقعیت روستای والاشان نسبت به روستاهای اطراف

شرایط روستای یک دانگ با روستای قره سو متفاوت است (شکل ۵). گرچه میزان شدت زلزله در این روستا همانند روستای قره‌سو کمتر از روستاهای همجوار مانند قلعه بهاءالدین و احمدآباد است، ولی با توجه به فاصله تقریباً برابر آن و روستاهای اطراف با ارتفاعات، نمی‌توان کاهش ضخامت آبرفت را دلیلی بر کاهش شدت زلزله در آن در نظرگرفت.



شکل (۴): موقعیت روستای قره سو



شکل (۵): موقعیت روستای یک دانگ

درنتیجه، نمی‌توان با اطلاعات موجود نسبت به علت کاهش خسارات در این روستا اظهار نظر نمود.

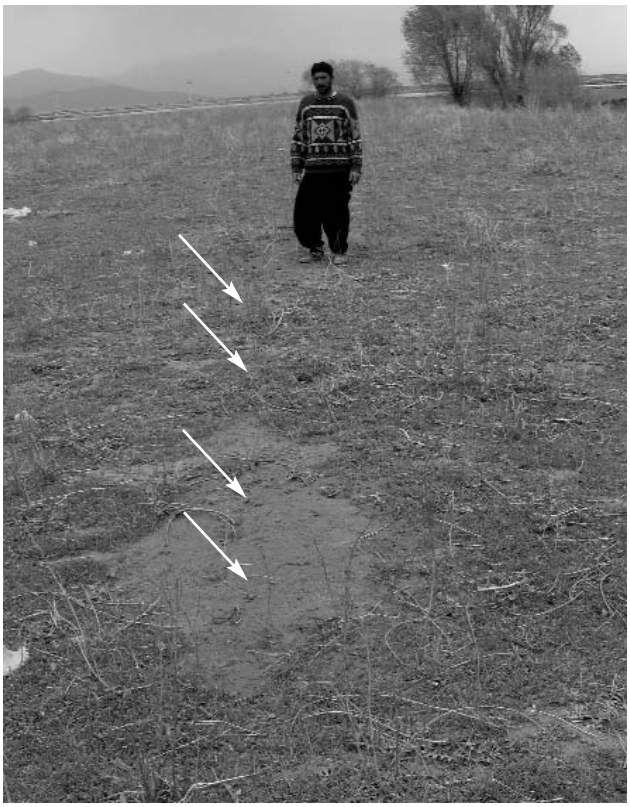
۴-۲- روانگرایی

شرایط زمین ریخت‌شناسی و نوع نهشته‌های دشت سیلاخور و اطراف، استعداد قابل ملاحظه این دشت را برای وقوع روانگرایی به هنگام زمین‌لرزه نشان می‌دهد. طبق مطالعات جعفری و همکاران [۶]، نهشته‌های سطحی دشت سیلاخور از رسوبات رسی تشکیل شده‌است؛ امّا وقوع روانگرایی در این دشت نشان می‌دهد در عمق پایین‌تر، لایه‌های ماسه‌ای قرار دارند که با توجه به نبود اطلاعات عمقی در مطالعات جعفری و همکاران منعکس نگردیده است. ضخامت زیاد و تراکم کم نهشته‌ها دلایل دیگر افزایش پتانسیل روانگرایی در صورت بالا بودن سطح آب زیر زمینی، می‌باشند.

در هنگام زلزله سیلاخور به دلیل بارندگی شدید ۱۳۸۵/۱/۹، سطح آب زیرزمینی در نزدیکی سطح زمین قرار داشته و در بسیاری از نقاط، زمینها باتلاقی و شرایط برای وقوع روانگرایی آماده‌تر بوده‌است. در ادامه به نمونه‌هایی از بخشهای روانگرا شده در زلزله درب آستانه اشاره شده‌است.

۴-۲-۱- شرق و جنوب‌شرق روستای لبان

روستای لبان در ۱۵کیلومتری شمال‌غرب شهر دورود قرار دارد. در شرق و جنوب‌شرق این روستا روانگرایی به‌صورت خروج حجم زیادی ماسه از شکافهایی با راستای ۱۰۰ درجه رخ داده‌است (تصویر ۱). همراه با خروج ماسه بخشهای وسیعی از کناره رودخانه سیلاخور بر اثر کاهش ضخامت لایه ماسه نشست کرده و به صورت نوعی از حرکات توده‌ای (گسترش جانبی) به‌سمت رودخانه هجوم برده‌اند (تصویر ۲).



تصویر (۱): خروج ماسه از شکافهایی به راستای ۱۰۰ درجه در شرق روستای لبان

تصویر (۲): نمایی از برگشتی سطح زمین بر اثر گسترش جانبی در شرق روستای لبان پایین (پیکان جهت حرکت توده را نشان می‌دهد)

۴-۲-۲- غرب و جنوب روستای عربان

این روستا در ۱۴/۵ کیلومتری جنوب شرق شهر بروجرد قرار دارد. جهت شکافها در بخش غربی روستا متفاوت و بین ۵ تا ۳۰ درجه متغیر است. در بخش جنوبی روستا این مقدار به ۱۲۰ درجه تغییر می‌کند (تصویر ۳). هیچ یک از روانگرایی‌ها با گسترش جانبی همراه نبوده است.

تصویر (۳): مخروطهای فوران ماسه در روانگرایی غرب روستای عربان

۴-۲-۳- شمال روستای الک آباد

قرینه روانگرایی رخ داده در غرب روستای عربان، بیرون‌زدگی ماسه از شکافهایی با راستای ۹۰ درجه در طرف دیگر رودخانه چالانچولان است که در شمال روستای الک آباد رخ داده‌است.

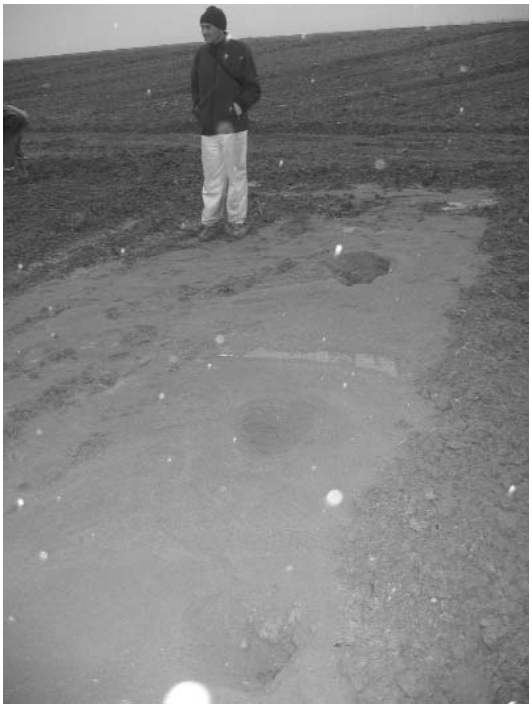
۴-۲-۴- شمال‌شرق روستای کارخانه سفیدکن

در بخش وسیعی از زمینهای زراعی روستای کارخانه سفیدکن، روانگرایی رخ داده‌است. رطوبت همراه ماسه‌های بیرون‌زده از سایر مناطق بیشتر بوده و در نتیجه به ماسه‌ها حالتی کاملاً روان داده‌است؛ به‌طوری که ماسه‌ها در شیارهای حاصل از شخم زمینها جریان پیدا کرده و مقداری از رطوبت آنها تا چهار روز پس از زلزله باقی مانده‌است (تصویر ۴).

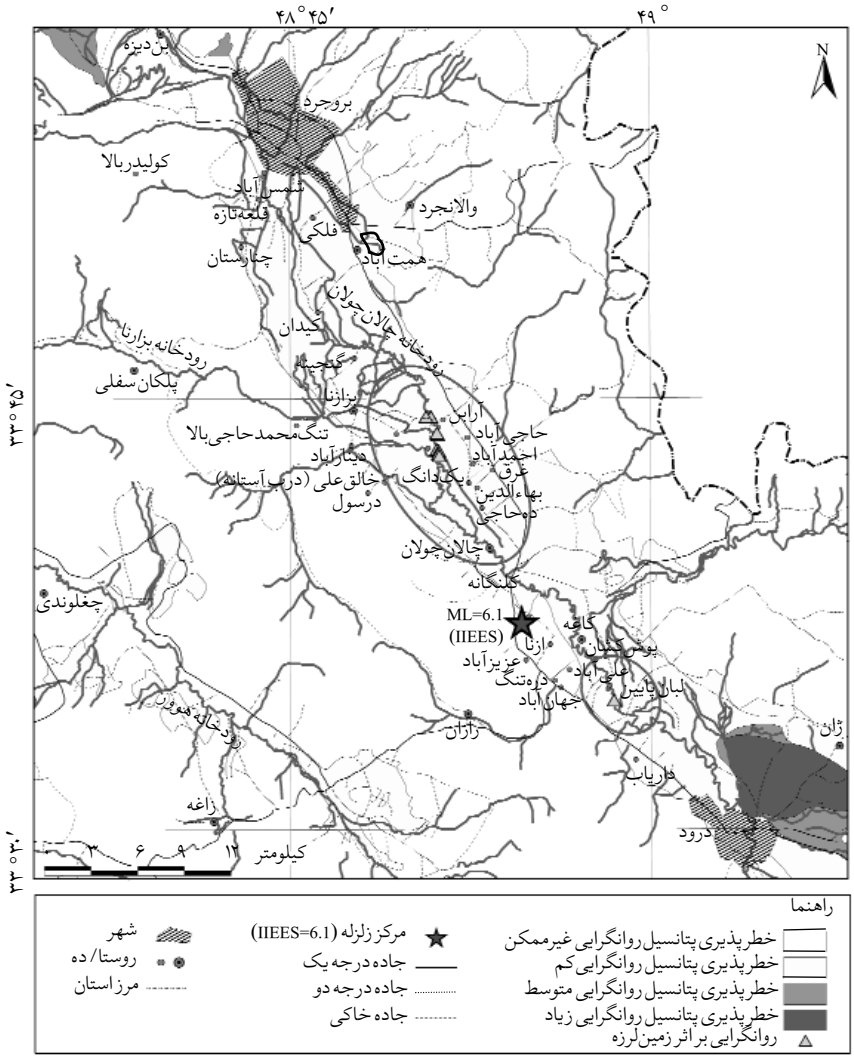
تصویر (۴): روانگرایی در شمال‌شرق روستای کارخانه سفیدکن

۴-۲-۵- غرب روستای حیدرآباد

روانگرایی در این بخش همراه با خروج ماسه از حفره‌هایی صورت گرفته که نسبت به حفره‌های مشاهده‌شده در سایر مناطق بزرگتر بوده‌اند (تصویر ۵). مقدار ماسه بیرون‌زده نیز قابل توجه بوده‌است؛ ولی نشست یا گسترش جانبی حاصل از نشست در این منطقه مشاهده نشده‌است. موقعیت مناطق روانگرا شده در زلزله درب آستانه در شکل (۶) نشان داده شده‌است.



تصویر (۵): روانگرایی در شمال‌شرق روستای حیدرآباد (با تشکر از دکتر حسامی‌آذر)



شکل (۶): مناطق روانگرا شده در زلزله درب‌آستانه [نقشه پایه مستخرج از مرجع ۶]

۴ - ۳ - زمین‌لغزش

باتوجه به زمین‌شناسی منطقه از میان لیتولوژی‌های موجود، کنگلومرای پلئیستوسن (Qpl)، پهنه خردشده پلیوسن (tz)، مارن، ماسه‌سنگ و آهک ماسه‌ای الیگومیوسن (Mf)، کاملاً مستعد وقوع زمین‌لغزش هستند. از طرفی شیب تند توپوگرافی منطقه، شرایط را برای وقوع زمین‌لغزش فراهم کرده‌است. پتانسیل زیاد زمین‌لغزش در این منطقه در نتایج مطالعات جعفری و همکاران منعکس شده‌است [۶]؛ اما برخلاف انتظار بر اساس طبقه‌بندی کیفر [۸] هیچ زمین‌لغزشی از نوع پیوسته (Coherent) که بر اثر زلزله مذکور ایجاد شده‌باشد، در منطقه دیده نشده‌است. برعکس، تعداد بسیاری از زمین‌لغزشهایی که بر اثر بارندگیهای قبلی (بویژه در غرب بروجرد) ایجاد شده و فعال بوده‌اند بر اثر زلزله تحریک‌شده و حرکتهای قابل توجهی از خود نشان داده‌اند. برخی از این حرکتها موجب مسدود شدن جاده‌های ارتباطی گردیده‌است. در بخشهای بعد به لغزشها و ریزشهای تحریک شده بر اثر زلزله پرداخته‌شده و در انتها به علل موارد مذکور اشاره شده‌است.

۴ - ۳ - ۱ - لغزشهای تحریک‌شده بر اثر زلزله درب‌آستانه

بخش وسیعی از مناطق غربی و جنوب‌غربی بروجرد از مارن‌های نئوژن تشکیل شده‌است. طی بارندگیهای سه ماهه قبل از زلزله در بسیاری از مناطق که استعداد ایجاد زمین‌لغزش زیاد بوده‌است لغزشهای نسبتا بزرگ و عمیقی ایجاد شده‌است.

این لغزشها به‌طور عمده در کوهپایه‌ها و ارتفاعات میش‌پرور در جنوب‌غربی بروجرد، ارتفاعات مشرف بر جاده بروجرد- چغلوندی (نرسیده به منطقه آب‌سرده) و ارتفاعات جنوبی جاده بروجرد به اشترینان رخ داده‌اند. لغزشهای مذکور اغلب از نوع چرخشی بوده و سرعت حرکت کمی دارند. لغزشهای مذکور قبل از زلزله فعال بوده و در زمان زلزله سرعت حرکت آنها زیاد شده و جابه‌جاییهای قابل‌توجهی را از خود نشان داده‌اند. جابه‌جایی برخی از لغزشها بویژه لغزشهایی که در مسیر جاده بروجرد به کولیدر قرار دارند، موجب انسداد جاده گردیده‌است (تصویرهای ۶ و ۷).

تصویر (۶): زمین‌لغزش تحریک شده بر اثر زلزله (جاده بروجرد به کولیدر، روستای سراب پنبه)

تصویر (۷): زمین‌لغزشهای تحریک شده بر اثر زلزله (جاده بروجرد به کولیدر)

۴-۳-۲- ریزشهای حاصل از زلزله درب آستانه

بیشترین تراکم ریزشهای ایجاد شده در منطقه بر اثر زلزله در ارتفاعات جنوبی در مناطق نزدیک به رومرکز زلزله مشاهده‌شد. در برخی موارد ریزشهای سنگی به جاده‌های اصلی نیز وارد شده‌اند؛ ولی مشکل حادی به‌وجود نیاورده و بلافاصله توسط راهداری پاکسازی شده‌اند. ریزشهای رخ داده در مسیر جاده بروجرد به خرم‌آباد بعد از سه‌راهی دورود از جمله این ریزشها محسوب می‌گردند (تصویرهای ۸ و ۹).

تصویر (۸): ریزش ایجاد شده بر اثر زلزله (روستای تنگ محمد حاجی‌بالا)

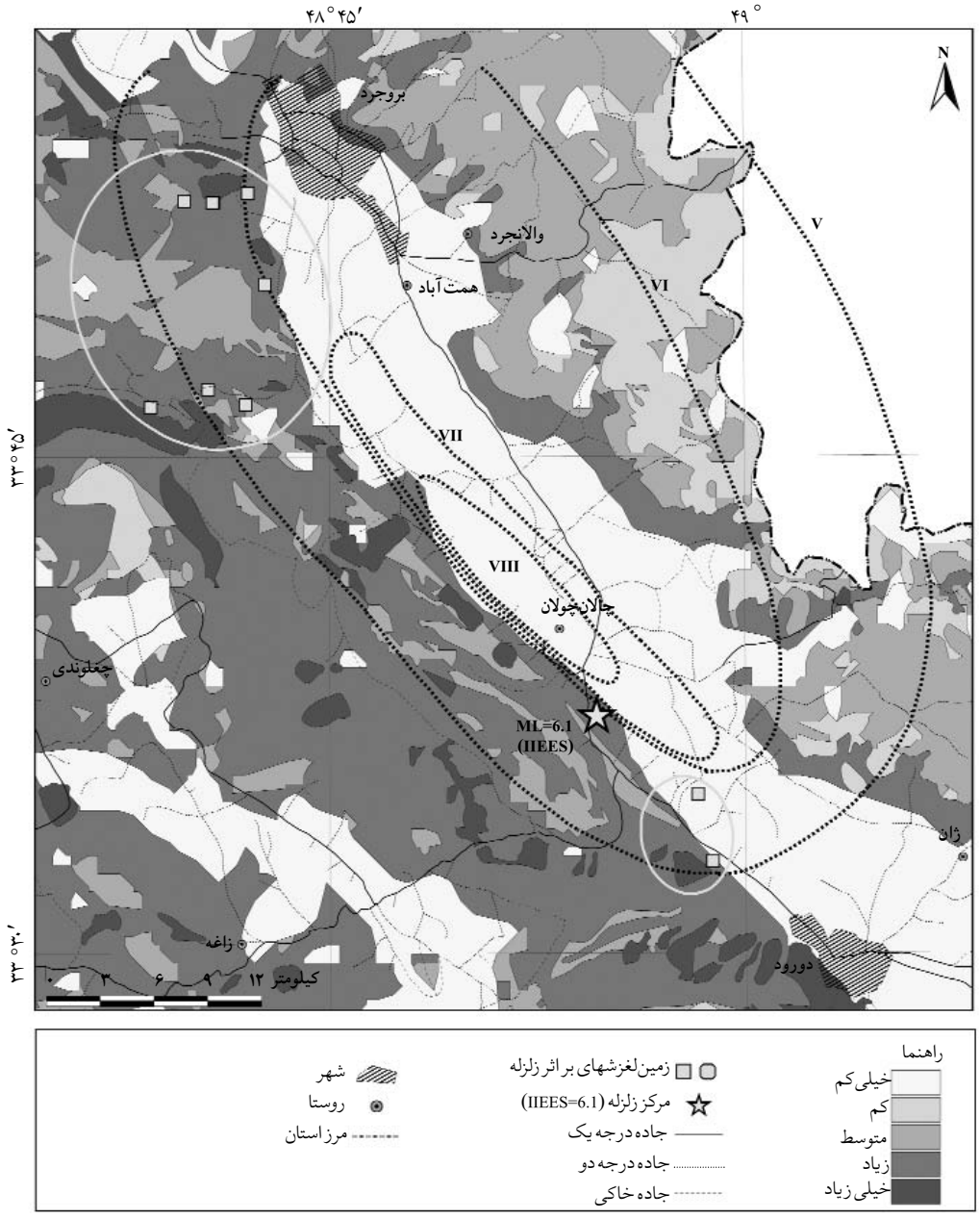
تصویر (۹): ریزش ایجاد شده بر اثر زلزله در مسیر جاده بروجرد به خرّم‌آباد

۴-۳-۳- تحلیل اولیه ریزشها و لغزشهای حاصل از زلزله

در این زلزله لغزش پیوسته‌ای مشاهده نشده‌است. علت

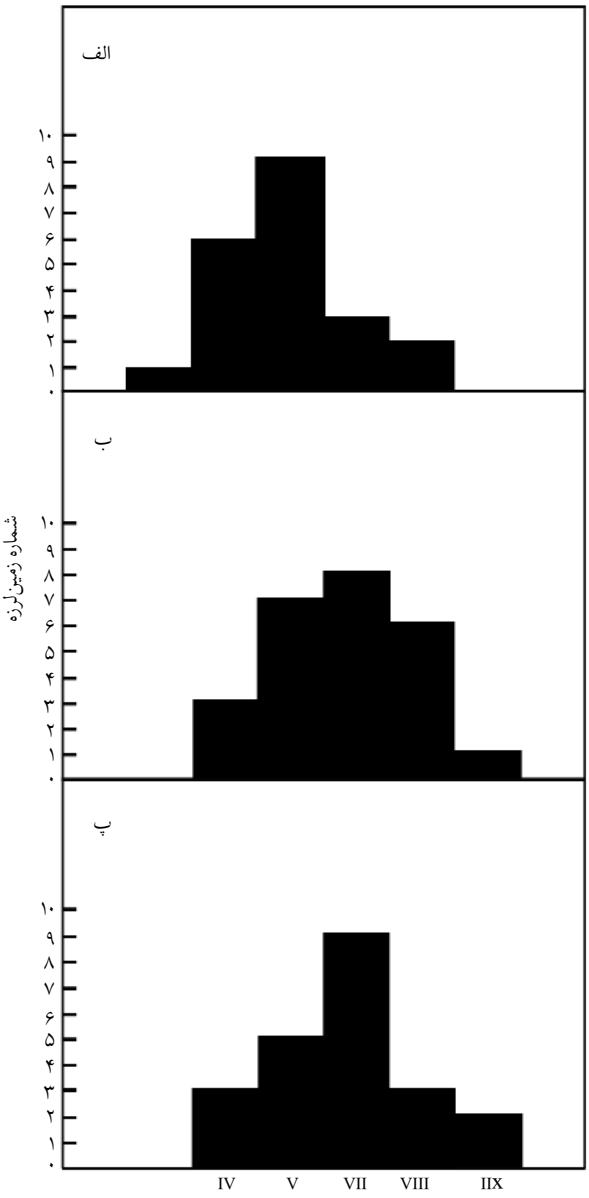
این امر با توجه به حساسیت منطقه در ابتدا کمی غیرعادی به‌نظر می‌رسد؛ اما با مقایسه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش [۶] با نقشه هم‌شدت (شکل ۷)، می‌توان عدم ایجاد زمین‌لغزش را به‌صورت زیر توجیه نمود:

- منحنی‌های هم‌شدت علاوه‌بر اینکه در جهت شمال‌غرب بیش از شمال شرق کشیده شده‌اند در راستای شمال‌شرق و جنوب‌غرب عدم‌تقارن شدیدی دارند. بدین ترتیب که در جنوب‌غرب، منحنی‌ها کاملاً فشرده‌تر از جهت شمال شرق هستند. این عدم‌تقارن به شکلی است که در فاصله‌ای کمتر از سه کیلومتر، شدت از VIII به VI تنزل می‌نماید (علت احتمالی این مورد در بخش ۴-۱ تشریح گردیده‌است)؛ به همین دلیل محدوده‌های جنوب‌غربی منطقه مهلرزه‌ای و اکثر قریب به اتفاق مناطق دیگری که مستعد زمین‌لغزش می‌باشند، شدت VI را دریافت



شکل (۷): نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش منطقه [۶] به همراه نقشه هم شدت زلزله

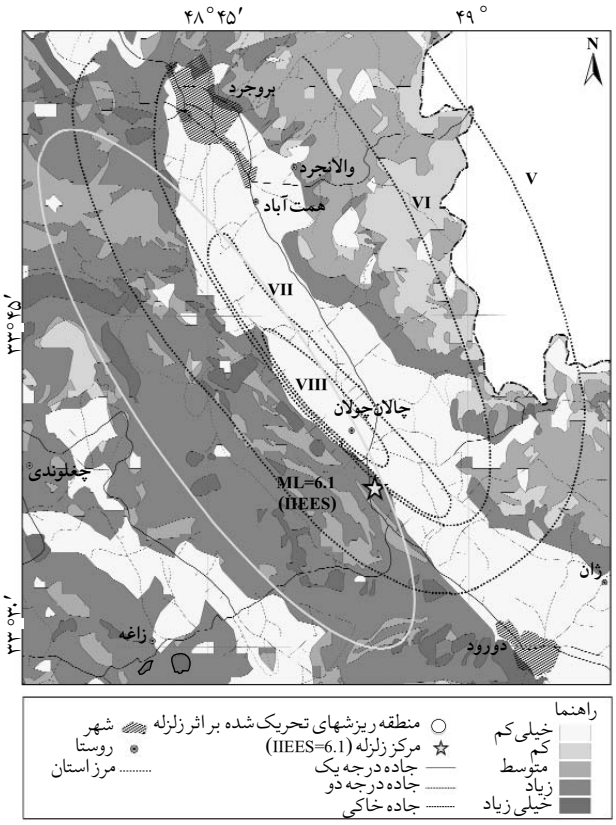
کرده‌اند. گرچه طبق مطالعاتی که کیفر در سال ۱۹۸۴ انجام داده‌است برخی از زلزله‌های با شدت VI نیز موجب لغزش گردیده‌اند (شکل ۸)، ولی زلزله درب آستانه مطابق با اکثر زلزله‌های دنیا لغزشی را در شدت VI ایجاد نکرده است (شکل ۷).



شکل (۸): حداقل شدت مرکالی اصلاح شدهٔ زلزله‌های مطالعه شده توسط کیفر(۴۰ زلزله از کل دنیا) که بر اثر آنها زمین‌لغزش رخ داده‌است. ارتفاع ستونها، نشانه تعداد زلزله‌هایی است که وقوع زمین‌لغزش از شدتهای مربوطه شروع شده‌است. حداقل شدتها با مقایسه نقشه‌های پراکنش زمین‌لغزشها با نقشه‌های هم شدت تعیین شده‌است. الف: شدت حداقل برای لغزشهای گسسته و ریزشها، ب: شدت حداقل برای لغزشهای پیوسته، پ: شدت حداقل برای گسترشهای جانبی و جریانها[۸]

ـ در منطقه تحت تأثیر زلزله درب آستانه، برعکس اغلب زلزله‌های دنیا[۸] از جمله ایران[۹]، تنها زمین لغزشهایی فعالیت کرده‌اند که قبلاً موجود و فعال بوده‌اند. به عبارت دیگر، در زمان زلزله به مرحله پایداری نرسیده‌اند؛ لذا زلزله تنها موجب تشدید و سرعت حرکت آنها شده‌است.

ـ برعکس لغزشها، به علت اینکه شدت VI شدت مناسبی برای ایجاد ریزشها محسوب می‌گردد، طی زلزله، محدوده وسیعی از دامنه‌های اطراف درگیر ریزش شده‌است (شکل ۹).

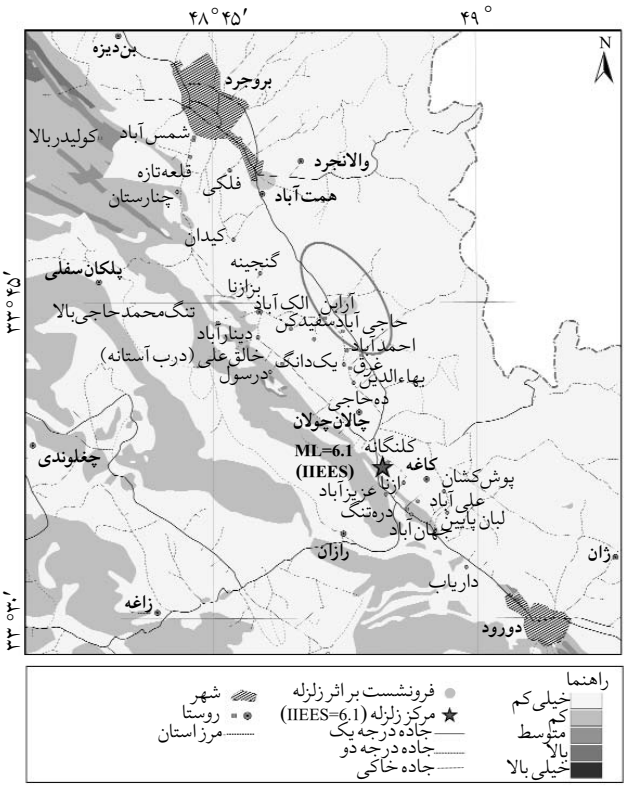


شکل (۹): محدوده ریزشهای تحریک شده در زلزله

۴-۴ـ فرونشست

طبق مطالعات جعفری و همکاران[۶]، به‌دلیل عدم‌وجود شرایط لازم، پتانسیل ایجاد فرونشست‌های کارستی در منطقه کم می‌باشد؛ به‌همین دلیل شواهدی دال بر ایجاد فروچاله‌های کارستی در منطقه دیده نشده‌است؛ اما آثار فرونشست زمین بر

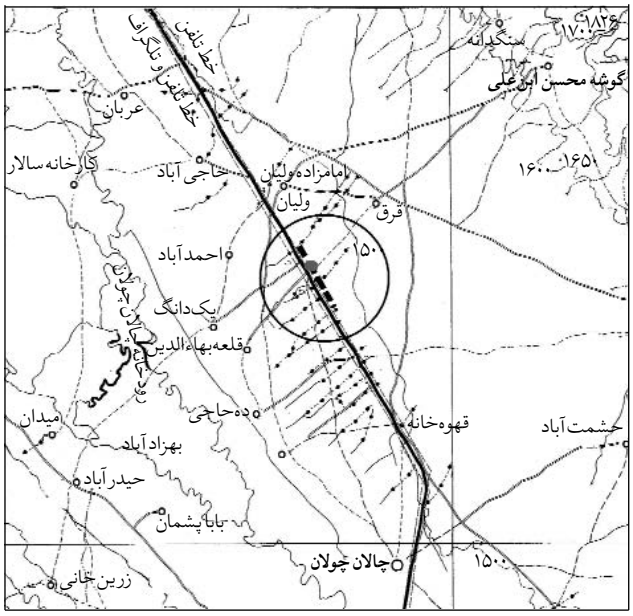
اثر ریزش سقف قناتهای منطقه در جنوب روستای قرق و میدان آیت‌الله بروجردی شهر بروجرد مشاهده گردیده است (شکل ۱۰).



شکل (۱۰): نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین [۶] به همراه محل فروچاله‌های حاصل از تخریب سقف قناتهای منطقه

علاوه بر فروچاله‌های مذکور، در جنوب روستای قرق و به فاصله ۱۰۰ متری از جاده اصلی بروجرد ـ خرم آباد، گسیختگی بزرگی به طول حدود ۵۰۰ متر در راستای شمال غرب ـ جنوب‌شرق و در امتداد جاده مشاهده می‌گردد (شکل ۱۱). طبق گفته اهالی، این گسیختگی طی لرزشهای اردیبهشت ۱۳۸۴ ایجاد و نشست بخش جنوبی آن بتدریج تا اوایل پاییز همان سال ادامه داشته‌است. این نشست موجب ایجاد اختلاف سطح در جاده دسترسی به روستای قرق شده و آسفالت مجدد آن را درپی داشته‌است (تصویر ۱۰). تدریجی بودن نشست و عدم همخوانی آن با مکانیزم گسل و زلزله‌های بروجرد نشان می‌دهد به احتمال قوی گسیختگی منشأ زمین‌ساختی نداشته و بر اثر نشست زمین حاصل شده است.

از طرفی عدم ایجاد ترک در جاده بعد از زلزله درب آستانه نشان می‌دهد نشست مذکور در این زلزله تحریک نشده‌است؛ اما ضعفی که به‌واسطه وجود گسیختگی در زمین به‌وجود آمده، به خرابی سقف یکی از قناتها و ایجاد فروچاله در سطح زمین منجر شده‌است (تصویر ۱۱).



شکل (۱۱): مسیر گسیختگی سال ۱۳۸۴ و فرونشست ایجاد شده در تقاطع گسیختگی و رشته قنات در زلزله درب آستانه

تصویر (۱۰): گسیختگی ایجاد شده بر اثر مجموعه زلزله‌های اردیبهشت ۱۳۸۴ به طول حدود ۵۰۰ متر و آسفالت مجدد جاده دسترسی به روستای قرق در پاییز ۱۳۸۴

تصویر(۱۱): فرونشست ایجاد شده بر اثر تخریب سقف قنات و در مسیر گسیختگی سال ۱۳۸۴

۵- نتیجه‌گیری

زلزله درب آستانه با پدیده‌های ژئوتکنیکی متعددی همراه بوده‌است. تفاوت تخریب در مناطق قرار گرفته بر روی آبرفتها با مناطق واقع در دامنه‌های سنگی، از جمله آثار ساختگاهی است که در این زلزله بوضوح و در پهنه‌ای وسیع مشاهده می‌گردد. این زلزله همراه با نمونه‌های متعددی از ایجاد روانگرایی نیز بوده‌است که در نوع خود در میان زلزله‌های ایران کم‌نظیر است. در برخی نقاط روانگرایی، موجب گسترشهای جانبی وسیعی شده‌است. به علت افت سریع شدت در مناطق کوهستانی، انرژی لازم برای ایجاد زمین‌لغزشهای پیوسته (مانند زمین‌لغزشهای سنگی و یا خاکی چرخشی) فراهم نگردیده است؛ ولی لغزشهایی که از قبل موجود و فعال بوده‌اند طی زلزله حرکتهای سریعی داشته و برخی از آنها موجب بسته شدن جاده‌های ارتباطی شده‌اند. برعکس لغزشها، تعداد زیادی ریزش در منطقه رخ داده‌است که بیشتر در ارتفاعات جنوبی منطقه زلزله‌زده متراکم هستند. در این زلزله، نمونه‌های اندکی از فرونشست نیز بر اثر تخریب میل جاههای قناتها مشاهده شده‌است.

۶- سپاسگزاری

انجام این مطالعات بدون راهنمایی و پشتیبانی آقایان: دکتر محسن غفوری آشتیانی، دکتر محمدکاظم جعفری و دکتر محسن کمالیان امکانپذیر نبوده‌است. در این تحقیق از مشورت اعضای محترم هیأت علمی پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک بویژه آقایان: دکتر محمدرضا قائم‌مقامیان، دکتر ابراهیم حق‌شناس، دکتر فرج‌الله عسکری و دکتر علی شفیعی بهره برده شده‌است. خانم معصومه رخشنده در تهیه شکلها و آقای سیدامید روانفر نیز در تهیه مدارک لازم برای انجام عملیات صحرایی، نگارندگان را یاری نموده‌اند که بدینوسیله از ایشان سپاسگزاری می‌گردد.

۷- مراجع

۱. پژوهشکده زلزله شناسی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله. (۱۳۸۵). گزارش فوری زمین لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه (سیلاخور) با M_L=6.1. سایت اینترنتی:

http://www.iiees.ac.ir/bank/Broujerd/Silakhor.html

2. US Geological Survey. (2006). Earthquake Hazards Program. Earthquake Center, Magnitude 6.1-Western Iran. Available at: http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2006/uskyae/

۳. سروقدمقدم، عبدالرضا؛ حسامی آذر، خالد؛ مهدویفر، محمدرضا؛ جوان‌دولویی، غلام؛ حمزه‌لو، حسین [۱۳۸۵]. گزارش شناسایی زلزله ۱۳۸۵/۱/۱۱ درب‌آستانه (سیلاخور). تهران: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

۴. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن. (۱۳۸۵). زلزله ۳۱

مارس ۲۰۰۶ سیلاخور. سایت اینترنتی:
http://www.bhrc.ac.ir/phome.htm
۵. سازمان زمین‌شناسی کشور. (۱۳۷۰). چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ بروجرد.
۶. جعفری، محمدکاظم؛ مهدویفر، محمدرضا؛ کشاورز بخشایش، محمد. (۱۳۷۸). مطالعات ژئوتکنیک لرزه‌ای استان لرستان [گزارش نهایی، دو جلد]. تهران: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
۷. قائم‌مقامیان، محمدرضا. (منتشر نشده). تحلیل اولیه شتابنگاشتهای زلزله درب آستانه (سیلاخور).
8. Keefer, D. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin 95,* 406-421.
9. Mahdavifar, M.R. Soleymani, S., Jafari, M.K. (2006). Landslides triggered by the Avaj, Iran earthquake of June 22, 2002. *Engineering Geology, Special Issue on landslides induced by Earthquake and volcanic activity. keefer et al. (eds.), 86, 2-3, 166 -182.*