پژوهش‌های جغرافیایی – شماره ٦٠، تابستان ١٣٨٦
صص١٥– ٢٩

نقش سنجش از دور و بررسی‌های میدانی در تجزیه و تحلیل‌های مورفوتکتونیکی: مطالعه موردی زلزله بم

سید کاظم علوی پناه* – دانشیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
محمدصدیق قربانی – دانشجوی دکتری جغرافیای طبیعی(ژئومورفولوژی)، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۸۳/۱۲/۲۴ تایید نهایی: ۱۳۸۴/۱۱/۲۴

چکیده

کشور ایران به دلیل قرارگرفتن در منطقه همگرایی صفحه عربستان در جنوب و صفحه اوراسیا در شمال، از نظر تکتونیکی یک منطقه بدون ثبات محسوب می شود. وقوع زلزله های مکرر و مخرب در ایران این واقعیت را تایید کرده است. زلزله ای با بزرگی گشتاوری ۶/۶ در تاریخ ۵ دی ماه ۱۳۸۲ شهر تاریخی بم را بشدت تخریب کرد. وقوع این زلزله را در ابتدا ناشی از فعالیت گسلی می دانستند؛ که تقریبا با امتداد شمال– جنوب از میان شهرهای بم و بروات عبور کرده است اما بعداً مشخص شد عامل این زمین لرزه، فعالیت یک گسل پنهان در زیر شهر بم بوده است که یکی از انشعابات گسل بم محسوب می شود. در بررسی حاضر ضمن مروری بر کاربردهای سنجش از دور، به‌ویژه سنجش از دور حرارتی در مطالعات مربوط به زلزله، چگونگی واکنش سازندهای زمین‌شناسی منطقه بم در مقابل امواج زلزله، شواهد ژئومورفولوژیکی فعالیت‌های تکتونیکی منطقه در طول کواترنر، مشخصات هندسی گسل بم و آثار آن بر چشم انداز ژئومورفولوژیکی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که سازندهای منطقه در تشدید، تداوم امواج زلزله و رساندن دامنه امواج به مرحله تخریب کامل دخیل بوده‌اند. به وجود آمدن تدریجی یک پرتگاه ۱۵ – ۲۰ متری، انحراف جریان‌های سطحی، وجود آبکندهای (خندقها) عمیق و ناپایداریهای دامنه‌ای همگی بیانگر بی ثباتی منطقه بم از نظر تکتونیکی می باشد. با توجه به این شواهد، امکان فعالیت مجدد گسل‌های منطقه در آینده نیز وجود دارد.

کلید واژه ها: زلزله، سنجش از دور ،گسل فعال،گسل بم، تکتونیک، ژئومورفولوژی ساختمانی.

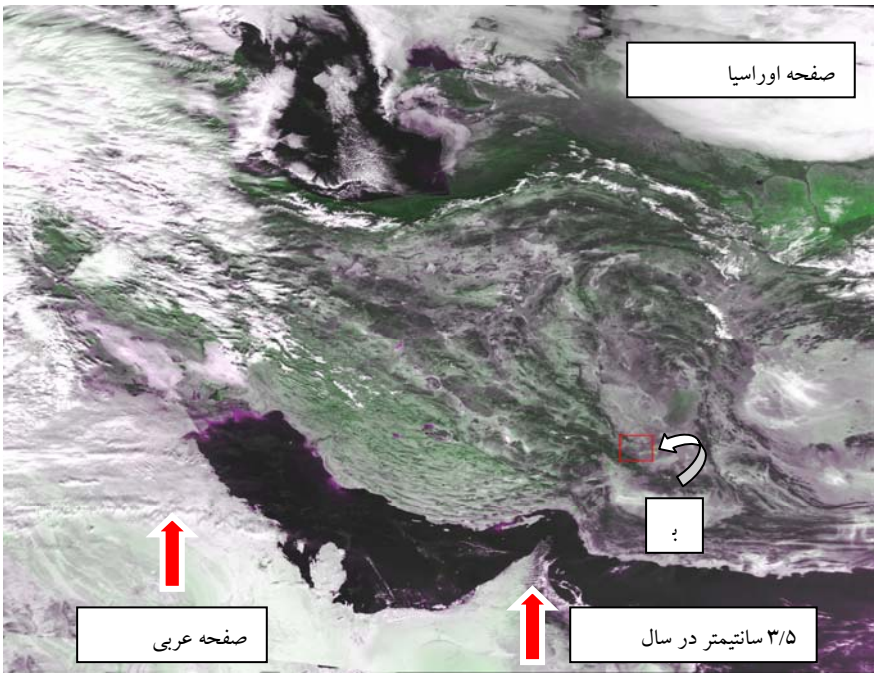
مقدمه

وقوع زمین لرزه های مکرر در ایران بیانگر فعال بودن جنبش‌های زمین ساختی در عهد حاضر است. به لحاظ مورفوتکتونیکی روند اصلی ناهمواری‌های ایران شمال غربی– جنوب شرقی است که نتیجه قرار گرفتن پوسته ایران در محل همگرایی دو صفحه عربستان در جنوب و صفحه توران در شمال است(طالقانی، ۱۳۸۱، ۴۵). در حال حاضر با ایجاد پوسته اقیانوسی در دریای سرخ، عربستان با سرعت ۳ – ۳/۵ سانتیمتر در سال و در جهت جنوب شرقی– شمال غربی، فلات ایران را تحت فشار قرار می‌دهد(درویش زاده، ۱۳۸۰، ۱۴۹) (شکل ۱).

در واقع زلزله خیز بودن کشور ایران از عوامل متعددی ناشی می شود که می‌توان آن را به این صورت تشریح نمود؛ علاوه بر تأثیر شرایط پالئوتکتونیکی ایران، بین نئوتکتونیک و زمین لرزه های آن نیز رابطه مستقیمی وجود دارد. لذا مهمترین

*نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۳۲۰۷۲۰۲
E-mail: salavipa@ut.ac.ir

علل و یا عوامل بالقوه در زلزله خیزی کشور را باید در خصیصه های سایزموتکتونیک (لرزه – زمین ساخت)آن و عوامل دیگری همچون موقعیت بین صفحه ای ایران، وجود گسلهای متعدد، حرکات و جنبشهای اخیر آلپی، زیررانگی قطعات لیتوسفری به زیر بعضی قسمتهای حاشیه ای(همچون راندگی کف دریای عمان به زیر مکران، راندگی سپر عربستان به زیر زاگرس وحرکت مورب کف دریای خزر به زیر البرز)، آنتروپوژنیسم(تاثیر عوامل انسانی) و... آن است (زمردیان، ۱۳۸۱، ۱۴۰).



شکل ۱ موقعیت بین صفحه ای ایران در تصویر ماهواره ای NOAA (سازمان فضایی ایران)

بنابراین زمین لرزه اخیر بم را باید نتیجه شرایط فوق دانست. این زمین لرزه در ۵ دی ماه ۱۳۸۲ در ساعت ۵/۲۶/۲۶ به وقت محلی با بزرگای گشتاوری[۱] (M_W) ۶/۶ در شهر تاریخی بم در جنوب شرقی ایران و در محدوده استان کرمان به وقوع پیوست که خسارت‌های جانی و مالی زیادی را به دنبال داشت. بر اساس گزارش‌های ارائه شده، از زمان ساخت ارگ بم – که به حدود ۲۰۰۰ سال پیش می رسد. زمین لرزه مخرب دیگری مانند زمین لرزه ۵ دی ماه ۱۳۸۲روی نداده است. با وجود این معظمی گودرزی در بحث زلزله های هفتاد سال اخیر ایران به حدود ۳۵ زلزله از سال ۱۹۲۳ – ۱۹۷۰ در منطقه بم اشاره کرده است که بیشترین شدت مطلق[۲] آنها ۵,۷ می باشد (معظمی گودرزی، ۱۳۵۱، ۲۱۴). در ابتدا محققان زمین لرزه بم را به طور مستقیم نتیجه فعال شدن گسلی می دانستند که با امتداد شمال، شمال غرب – جنوب از بین شهرهای بم و بروات می گذرد. اما بر اساس پس لرزه های ثبت شده به وسیله سازمانهای مختلف، استفاده از داده های ماهواره‌ای و رادارهای هوایی روشن شده است که زمین لرزه بم بر اثر فعالیت یک گسل پنهان در زیر شهر بوده است و گسل بم هیچ گونه فعالیتی نداشته استَ، اما ساخت و سازهای نزدیک گسل در بخش شرقی و شمال شرقی شهر بم و شمال شهر بروات دچار تخریب بیشتری شده اند(میرزایی علویجه و همکار،۱۳۸۳، ۲۵).

۱. بزرگای گشتاوری(M_W) مقیاسی است برای بیان اندازه زمین لرزه های بسیار بزرگ که اولین بار به وسیله کاناموری در سال ۱۹۷۷ ابداع شد.

۲. شدت مطلق یک زلزله عبارت است از لگاریتم اعشاری حداکثر دامنه نوسان آن زلزله ، بر حسب میکرون که به وسیله لرزه سنج معینی(لرزه نگار استاندارد) که در فاصله صد کیلومتری مرکز زلزله قرار گرفته است .

مطالعات ژئومورفولوژیکی امروزه به عنوان یکی از بهترین روش‌های بررسی رفتار دراز مدت گسلها مورد توجه قرار گرفته است. بررسی تغییر شکل‌های فعال سطح زمین نه تنها به تخمین بلایای ناشی از زلزله در ارتباط با جوامع انسانی کمک می‌کند بلکه به فهم ما از چگونگی واکنش مناطق قاره‌ای در مقابل فشارهای تکتونیکی و چگونگی توزیع گسله‌ها نیز کمک می‌کند. بعضی از زمین لرزه ها در فلات ایران و در محل گسل‌های پنهان، بدون آثار لرزه ای و گسیختگی مشخص سطحی رخ می دهد؛ قابلیت تفسیر ژئومورفولوژیکی چنین مناطقی که گسل‌های رورانده پنهان دارند، برای تخمین بلایای ناشی از زمین لرزه در ایران بسیار مهم است؛ چرا که این گسل‌ها ممکن است قابلیت ایجاد زلزله های مخربی را در آینده داشته باشند([1] gsi ،۱۳۸۳). با این حال باید خاطر نشان کرد با وجود اینکه مطالعات ژئومورفولوژی نقش منحصر به فردی در تعیین جای حداکثر تنشها و در نتیجه تعیین مکان احتمالی حدوث زلزله دارند، اما تعیین زمان دقیق وقوع زلزله بر عهده علم زلزله شناسی است(کوک و همکار، ۱۳۷۸، ۲۷۰).

امروزه در ژئومورفولوژی نیز مانند سایر علوم، استفاده از سنجش از دور در مطالعه عوارض سطح زمین جایگاه خاصی یافته است. در مطالعات مربوط به زلزله، استفاده از تصاویر دو بعدی و سه بعدی ماهواره ای و تصاویر حرارتی می تواند کمک زیادی به تفسیر ژئومورفولوژیکی مناطقی که تحت تنشهای زمین ساختی قرار دارند، کند. اولین کاربرد تصاویر حرارتی در زلزله شناسی در سال ۱۹۸۵ در روسیه مطرح و نتایج آن در سال ۱۹۸۸ منتشر شد (Gorny و همکاران، ۱۹۸۸ به نقل از علوی پناه ،۱۳۸۲،ص ۲۹۰). دامنه استفاده از داده های حرارتی برای مطالعه زلزله روز به روز گسترده تر می شود. داده های ماهواره‌ای نشان می‌دهند که قبل از زمین لرزه های بزرگ، به طور گذرا و موقتی تغییرات نا متعارف دمایی به وقوع می پیوندد. این تغییرات معمولاً ۷ – ۱۴ روز قبل از زمین لرزه های بزرگ رخ می دهد و چند هزار یا دهها هزار کیلو متر مربع را تحت تأثیر قرار می دهد؛ همچنین ۲ – ۴ درجه سانتیگراد یا بیشتر دما را افزایش داده و چند روز پس از وقوع زلزله ناپدید می شوند.

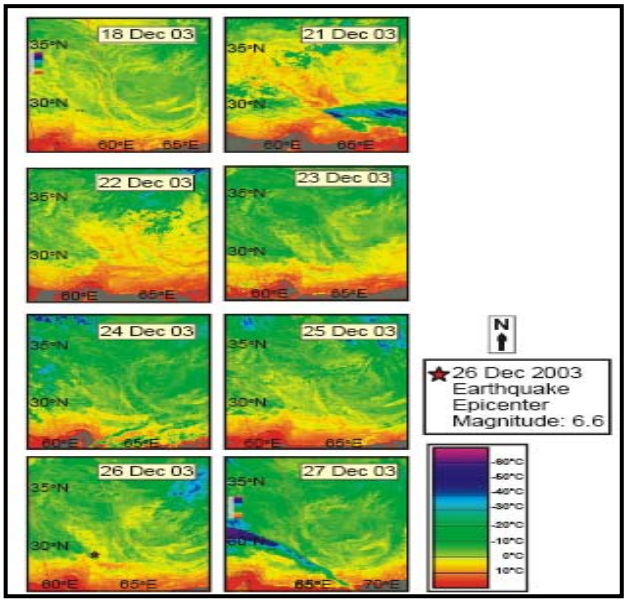
بررسی بازتاب‌های مادون قرمز نشان می دهد این تغییرات نا متعارف همزمان در سطح زمین، دریا و جو رخ می دهد؛ برای مثال زمانی که سنگ‌ها تحت فشار زیادی قرار گیرند، تغییراتی در بارهای الکتریکی مربوط به سنگ‌ها ایجاد می شود که باعث افزایش بازتاب‌های مادون قرمز در محدوده ۸ تا ۱۲ میکرومتر در سنگهای سطحی می گردد (Ouzounov و همکار، ۲۰۰۳). پس از زلزله فاجعه بار کوبه، مطالعه پدیده های الکترومغناطیسی در لیتوسفر ،اتمسفر و یونسفر نیز به وسیله مراکز مطالعاتی ژاپن، با هدف پیش بینی کوتاه مدت زمین لرزه در دستور کار قرار گرفته است. این تلاش‌ها زمینه تحقیقاتی جدیدی را تحت عنوان مکانیسم های مجموعه لیتوسفر، اتمسفر و یونسفر در ارتباط با پیش بینی کوتاه مدت زلزله به وجود آورده است (Hayakawaو همکاران، ۲۰۰۴). با توجه به اهمیت همه جانبه این این‌گونه تحقیقات ،نیاز تحقیقات بیشتر برای بکارگیری داده های حرارتی برای زلزله شناسی احساس می شود(علوی پناه ،۱۳۸۲، ۲۹۰).

Shou با استفاده از تئوری ابرهای زلزله و با تکیه بر تصاویر ماهواره ای Indoex[2] زلزله ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ بم را در ساعت ۱۷/۵۸ به زمان UTC روز ۲۵ دسامبر پیش بینی کرد(شکل ۲و۳). او اعلام کرد که زلزله ای با بزرگی بیشتر یا مساوی ۵/۵ ریشتر در ۶۰ روز آینده در طول گسل بم اتفاق خواهد افتاد. در حالی که پیش بینی با بازه زیاد شامل زلزله ای با شدت ۵ یا بیشتر در طول ۹۸ روز آینده بود، زلزله دقیقاً در روی گسل پیش بینی شده(گسل بم) در روز بعد از پیش‌بینی اتفاق افتاد و بزرگی آن نیز در پنجره بزرگی پیش بینی شده بود. از کنار هم قرار دادن دو پیش نشانگر ابر زلزله و پیش نشانگر آنومالی های حرارتی،

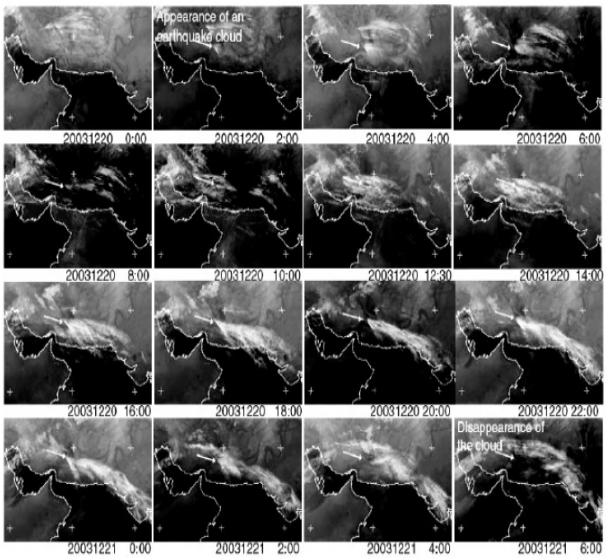
[1]. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور،گروه لرزه – زمین ساخت (www.gsi.ac.ir).

2- Indian Ocean Experiment

مشخص می شود که ارتباط تنگاتنگی بین زمان رخداد ابر زلزله و آنومالی حرارتی وجود دارد. به این ترتیب اختلاف زمانی رخداد این دو پیش نشانگر کمتر از یک روز می باشد(عسکری، ۱۳۸۵).



شکل ۲ تصاویر آنومالی حرارتی تهیه شده در شبهای قبل و بعد از زلزله بم. بیشترین آنومالی حرارتی در ۲۱ دسامبر ثبت شده است (عسکری، ۱۳۸۵).



شکل ۳: سری های زمانی ابر زلزله بم. این سریها از تصاویر ماهواره IndoEx، نشان می دهد که چطور ابر زلزله بم به طور ناگهانی در ساعت ۲:۰۰ روز ۲۰ دسامبر ۲۰۰۳ ظاهر شد. آن گاه به سمت شرق از نقطه ظهورش گسترش پیدا کرد و در ساعت ۶:۰۰ روز ۲۱ دسامبر ناپدید شد. (عسکری، ۱۳۸۵)

مواد و روش

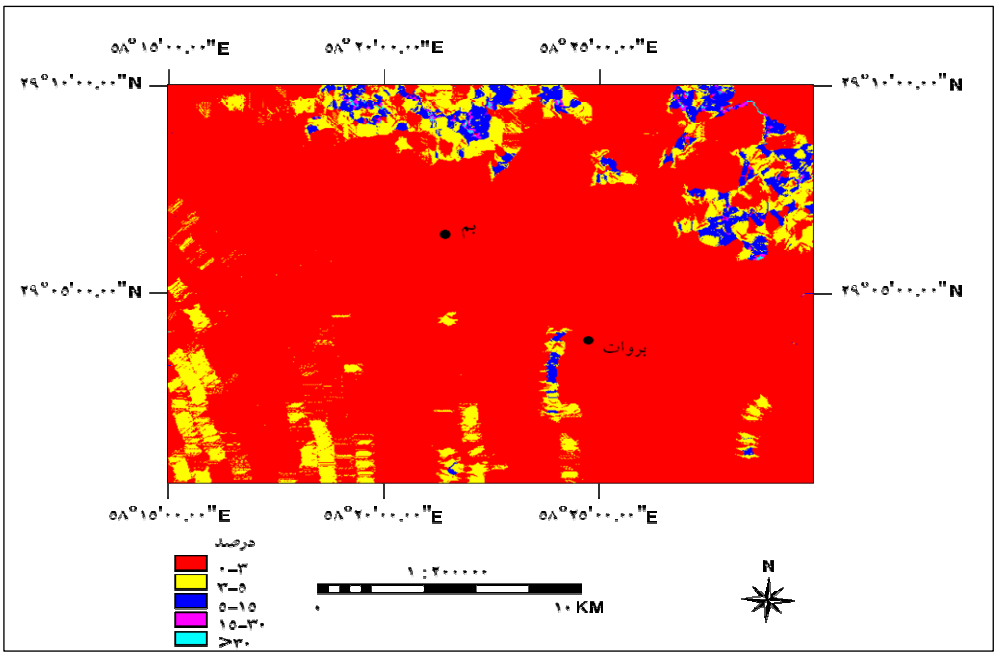
در این بررسی برای رسیدن به نتایج بهتر در مورد وضعیت ژئومورفولوژیکی منطقه بم و چگونگی دخالت زمین ساخت در تکوین عوارض ژئومورفولوژیکی منطقه از تصاویر ماهواره ASTER، NOAA و IRS حتی الامکان برای شناسایی و مقایسه زمین

شکلها استفاده شده است. همچنین از عکسهای هوایی ۱:۵۵۰۰۰ منطقه، نقشه های زمین شناسی(۱:۱۰۰۰۰۰) و توپوگرافی(۱:۵۰۰۰۰) منطقه وسایر اطلاعات تکمیلی دیگر نیز بهره گرفته شده. نقشه های زمین شناسی و توپوگرافی منطقه برای نمایش بهتر نحوه تاثیر گسل بم بر انحراف جریانهای سطحی در محیط نرم افزار ILWIS رقومی شدند و از عکسهای هوایی ۱:۵۵۰۰۰ نیز برای مشاهده دقیقتر زمین شکلها استفاده شده.

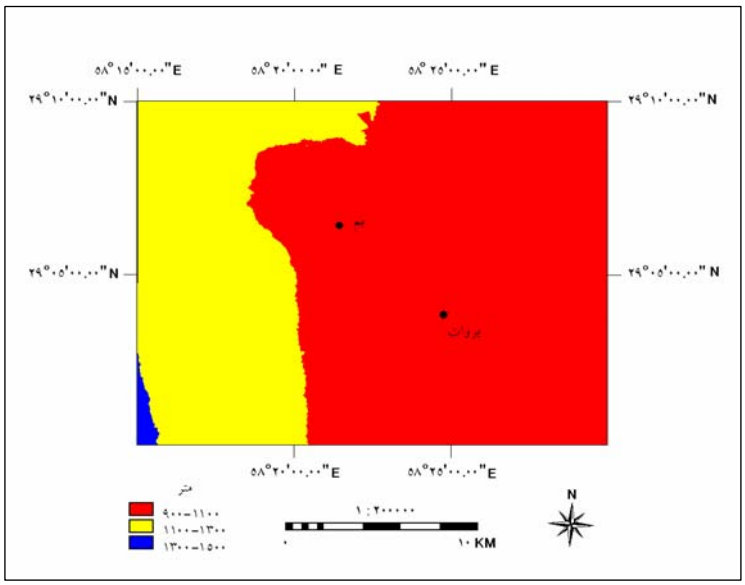
موقعیت منطقه و ویژگی های جغرافیایی آن

منطقه بم در جنوب شرقی کشور و در جنوب شرقی استان کرمان واقع شده است. این منطقه از نظر اقلیمی جزء مناطق خشک ایران محسوب می شود. واقعیت خشک بودن منطقه را می توان به سادگی از وجود رشته قنات‌های متعدد منطقه استنباط کرد. با توجه به این وضعیت جریان‌های فصلی نقش زیادی در تحول چشم انداز ژئومورفولولوژیکی این منطقه ایفا می کنند. وجود آبراهه ها وآبکندهای متعدد روی مخروط‌افکنه‌ای که شهر بم روی قاعده آن بنا شده است مؤید این واقعیت است. ارتفاعات این منطقه در بخش شمالی، جنوب و جنوبی غربی واقع شده اند. جریان‌هایی که از ارتفاعات جبال بارز در جنوب غربی سر چشمه می گیرند، مخروط‌افکنه مذکور را ایجاد نموده‌اند. بخش اعظم منطقه دارای شیبی کمتراز ۳ درصد است (شکل۴). همچنین بخش وسیعی از منطقه دارای ارتفاعی بین ۹۰۰-۱۱۰۰ متر می باشد.(شکل۵) بخشی از شبکه آب‌های منطقه که از کوه های اطراف سرچشمه می گیرند پس از ورود به دشت وارد رودخانه پشت رود که از مجاورت بم می گذرد شده و در جهت شرقی زهکشی می شوند. بخش دیگری از شبکه آبهای منطقه در قسمت جنوب منطقه عمود بر پرتگاه گسلی بم با جهت شرقی و جنوب شرقی زهکشی می شوند. این بخش از جریانات تحت تاثیر گسل بم قرار گرفته اند که به آن اشاره خواهد شد.

رشته قنات‌های منطقه به عنوان یک پدیده انسانی در جهت‌های مختلف کشیده شده اند تعداد این قنات‌ها حدود ۱۲۶ رشته شمارش شده است. آب به دست آمده از این قنات‌ها حدود ۵۰ درصد آب مصرفی شهری وکشاورزی شهرستان بم و اطراف آن را تامین می کند(امینی حسینی و همکاران،۱۳۸۲). تعدادی از این قنات‌ها در جهت عمود بر گسل بم احداث شده‌اند. در جریان زمین لرزه اخیر، تعداد زیادی از آن‌ها تخریب شده و در بعضی جاها قنات‌های قدیمی و پوشیده سبب فرونشینی زمین شده اند.



شکل ۴ نقشه شیب منطقه بم



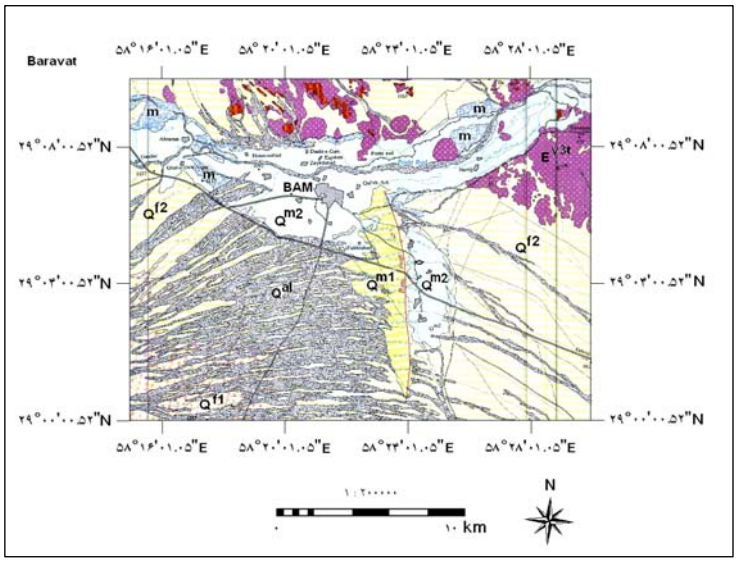
شکل ۵ نقشه سطوح ارتفاعی منطقه بم

وضعیت زمین‌شناسی

با استناد به نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه (سازمان زمین شناسی کشور) ملاحظه می شود که بخش اعظم سازندهای منطقه را نهشته های آبرفتی کواترنر تشکیل می دهد. تنها بخش شمالی وشمال شرقی منطقه به وسیله سازندهای قدیمی‌تر مربوط به ائوسن پوشیده شده است .

این رسوبات شامل توف و خاکستر با لایه بندی خوب همراه با ادخالهایی از گدازه های بازالتی، تراشی آندزیتی و رسوبات تخریبی آتشفشانی است که با علامت E^{v3t} مربوط به دوره ائوسن نشان داده شده است. در واقع این سنگها در نتیجه فعالیت‌های آتشفشانی گسترده ائوسن به وجود آمده اند. شیب لایه های این سازند بین ۳۰–۵۰ درجه است. این سازند شرایط برای وقوع

حرکات دامنه ای بویژه لغزش مستعد می باشد. در شمال شهر بم لغزش بزرگی بیش از یک کیلومتر مربع در این سازند اتفاق افتاده است که به‌خوبی روی عکس‌های هوایی منطقه قابل مشاهده است. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد غیر از این سازند که مربوط به ائوسن می باشد سایر سازندها متعلق به کواترنر هستند. قدیمی‌ترین آنها ماسه سنگ‌ها و سنگ‌های سیلتی قهوه ای روشن تا زرد است که در نقشه زمین شناسی با علامت Q^{m1} مشخص شده است. پرتگاه گسل بم بر این واحد منطبق است. این سنگ‌ها تنها در بخش غربی خط گسل قابل مشاهده هستند زیرا بالا آمدن بلوک غربی خط گسل مانع از پوشیده شدن آنها به وسیله رسوبات جدیدتر شده است. شیب این رسوبات به سمت غرب بوده و مقدار آن بین ۱۰تا۳۰ درجه است. جریانهای آبی که بخش غربی گسل را زهکشی می کنند پس از رسیدن به این دامنه شیبدار گسلی مسیرشان به سمت جنوب منحرف می شود. این رسوبات تنها در بخش یاد شده قابل مشاهده هستند و به نظر می رسد در سایر جاها به وسیله رسوبات آبرفتی جدیدتر پوشیده شده اند. واحد بعدی مخروط‌های سیلتی به رنگ زرد روشن تا قهوه ای و ماسه سنگ‌های آژریلتی است که با علامت Q^{m2} مشخص شده ودر بعضی نقاط یکدستی آنها به وسیله مواد کم ضخامت جدیدتر (m)به هم خورده است. شهرهای بم و بروات روی این سازند بنا شده اند. واحد بعدی رسوبات مخروط افکنه ای قدیمی است که به وسیله جریان مخروط افکنه ای جدیدتر بریده شده اند. این رسوبات با علامت Q^{f1} مشخص شده اند و در بخش جنوب غربی منطقه قابل مشاهده هستند.واحد Q^{f2} نیز نهشته های مخروط‌افکنه‌ای بلافاصل در زیر مخروط‌های جدیدترمی باشند که به وسیله جریانهای سطحی کنونی بریده شده اند. آبرفتها، مخروطهای آبرفتی و تراسهای آبرفتی جدید، آخرین و جدیدترین رسوبات منطقه می باشند که با علامت Q^{al} مشخص شده اند. در واقع تمام رسوبات دوره کواترنر به صورت مخروط افکنه های مطبق روی هم قرار گرفته اند که بیانگر تغییرات اقلیمی دوره کواترنر وآثار آن در این منطقه است (شکل۶).



شکل ۶ نقشه زمین شناسی منطقه بم

مأخذ: سازمان زمین شناسی کشور، : نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بم

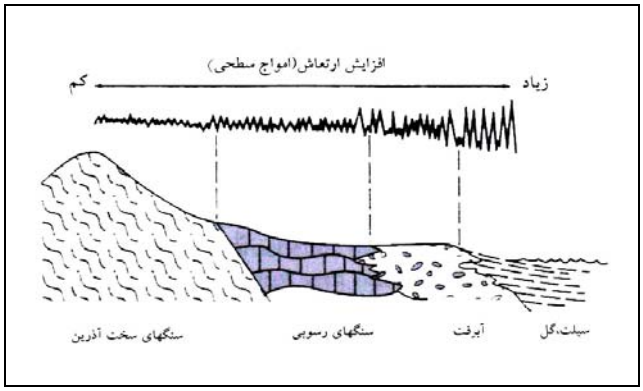
نقش سازندها در تشدید وتداوم یا کاهش امواج زلزله

امروزه نقش سازندها در تشدید و تداوم یا کاهش امواج زمین لرزه به اثبات رسیده است. به‌طور کلی برای تخمین آثار ناشی از تغییر سازندهای مختلف زمین شناسی برشدت زلزله می توان از زمین شناسی سطحی استفاده کرد(بنیاد مسکن انقلاب اسلامی،

۱۳۷۵، ۲۸) این عامل در پهنه بندی خطرات زلزله به عنوان یک فاکتور مهم مد نظر است. پس از زمین لرزه ۱۹۸۵مکزیک نقش سازندهای زمین شناسی بیشتر توجه شده است.

رسوبات نرم عموماً بیشتر از سنگ‌های سخت دامنه ارتعاشات را زیاد می کند (تاربوک ولوتگن، ۱۹۸۹، ۲۴۹). موادتشکیل دهنده زمین همچون سنگ بستر، ماسه، ریگ، سیلت و گل ولای در مقابل امواج زلزله واکنشهای متفاوتی دارند؛ برای مثال میزان لرزش در رسوبات جدا ممکن است بسیار شدیدتر از سنگ بستر باشد(کلر[1] وهمکار،۱۹۹۶، ۲۱). شکل (۷) نشان می دهد که چگونه امواج لرزه ای به ویژه در نهشته های سیلتی ورسی افزایش می کند.

با استناد به نقشه زمین شناسی منطقه بم ملاحظه می شودکه شهرهای بم و بروات هر دو روی مخروطه‌افکنه های سیلتی و ماسه سنگهای آرژیلی بنا شده‌اند یعنی رسوباتی(سیلت)که نقش زیادی در تشدید امواج دارند و این موضوعی است که کمتربه آن اشاره می شود. دامنه وسیع تخریب ساختمانها در برابر زمین لرزه ای با بزرگای گشتاوری۶/۶، تعجب همگان را بر انگیخت واین موضوع را بیشتر به ضعف ساخت و سازها نسبت دادند؛ در حالیکه با توجه به پی سنگ شهرهای بم و بروات، می توان وسعت خرابیها و خسارات به وجود آمده را ناشی ازتشدید امواج در رسوبات منفصل منطقه دانست که شدت امواج را به مرحله تخریب کامل رسانده است. این موضوع قبل از هر چیز نیازمند بررسی های دقیقتر بوده در تجدید بنای بم باید آن را مدنظر قرار داد.



(اقتباس از کلروهمکار)

شکل۷ نحوه ارتباط امواج زلزله و جنس زمین

گسل بم

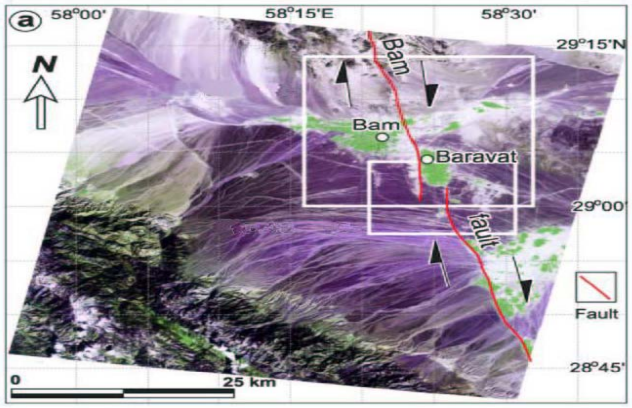
اطلاعات گسل شناسی برای ارزیابی پتانسیل لرزه خیزی،خصوصا در مناطقی که اطلاعات مربوط به زلزله های تاریخی محدود است، مهم هستند. اطلاعات گسل شناسی عبارتند از میزان جابه جایی گسل در طول زمان، ابعاد هندسی گسل، تغییر مکان ایجاد شده در اثر زلزله، دوره بازگشت زلزله ها ومدت زمان سپری شده از تاریخ آخرین زلزله، این اطلاعات برای ارزیابی لرزه خیزی منطقه و پیش بینی محتمل ترین زلزله آینده به کار می رود (بنیاد مسکن انقلاب اسلامی،۱۳۷۵، ۲۸).

اغلب زمین شناسان، گسلی را فعال می دانند که طی ۱۰۰۰۰ سال گذشته دچار جابه جایی شده باشد (دوره هولوسن). دوره کواترنری (۱/۶۵میلیون سال گذشته) جدیدترین دوره زمین شناسی است و اغلب چشم اندازهای ژئومورفولوژیکی در طول این

1 - Keller and et al, 1996

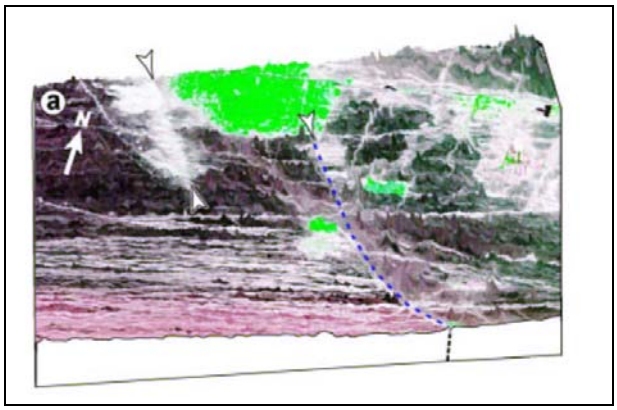
دوره شکل گرفته اند. هر گسلی که در طول این دوره حرکت کرده باشد یک گسل بالقوه فعال محسوب می‌شود(کلروهمکار، ۱۹۹۶، ۲۲).

براساس نقشه زمین‌شناسی منطقه، گسل بم رسوبات اوایل کواترنر را قطع کرده است. بنابراین سن آن به اوایل کواترنر بر می گردد و از این نظر یک گسل بالقوه فعال محسوب می شود. تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره ای نشان می دهد که یک گسل راست گرد به طول ۶۵کیلومتر از بین منطقه بم و بروات کشیده شده است. این گسل از شمال – شمال غرب آغاز می شود و در بخشی از مرز بین دو شهر کمی به سمت چپ منحرف می شود. در ابتدا تنش فشاری زیاد در این انحنا را ماشه چکان زمین لرزه ۱۳۸۲ می دانستند (فووهمکاران، ۲۰۰۴). اما در بررسی های دقیقتر مشخص شد که این زمین لرزه بر اثر فعالیت یک گسل پنهان در زیر شهر بم رخ داده است. بر اساس تصویری که به وسیله رادار مرکز پسدام تهیه شده است، این گسل پنهان به عنوان شاخه‌ای فرعی از گسل بم در نظر گرفته شده است که به موازات گسل اصلی به سمت شمال کشیده شده و در گوشه شمال شرقی شهر بم دوباره به گسل اصلی متصل می شود (میرزایی علویجه و همکار، ۱۳۸۳، ۲۶). در روی نقشه زمین شناسی منطقه تنها ۱۱/۶کیلومتر از گسل بم نمایش داده شده است. اما در اصل طول این گسل امتداد لغز راستگرد ۶۵ کیلومتر است که از دو قطعه شمالی وجنوبی با الگوی پلکانی متمایل به چپ تشکیل شده است (شکل ۸). بین این دو قطعه یک انقطاع وجود دارد و در مرز آنها یک روراندگی دیده می شود. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که تداوم رانش در حوالی این راندگی ضعیف شده و یا خاتمه پیدا کرده است. با وجود این، روراندگی مذکور ممکن است یک مکان بالقوه برای وقوع زلزله بزرگ بعدی در آینده باشد(فو[1] و همکاران، ۲۰۰۴)(شکل ۹).



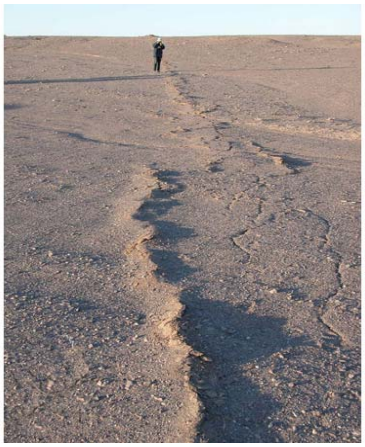
شکل ۸ تصویر رنگی مجازی ASTER، ترکیب باند۲ (قرمز)، باند۳ (سبز) و باند۱(آبی) که شکل هندسی گسل بم والگوی پلکانی متمایل به چپ آن را نشان می دهد(فو و همکاران، ۲۰۰۴).

1 - FU



شکل ۹ تصویرسه بعدی ASTER، شکل ژئومورفولوژیکی رورانداگی بین قطعه شمالی و جنوبی گسل بم را نشان می دهد(فو و همکاران، ۲۰۰۴).

پس از زمین لرزه، آثار گسلش سطحی در بخش شمالی شهر بم مشاهده شده است. گسلش سطحی مشاهده شده که به طول تقریبی ۲ کیلومتر قابل ردیابی است، دارای سازوکار امتداد لغز راستگرد و جابه جایی در حد یک سانتیمتر است (میرزایی علویجه و همکار ،۱۳۸۳، ۲۵) (شکل ۱۰) .



شکل ۱۰ آثار گسلش سطحی ناشی از زلزله بم

ژئومورفولوژی عمومی منطقه

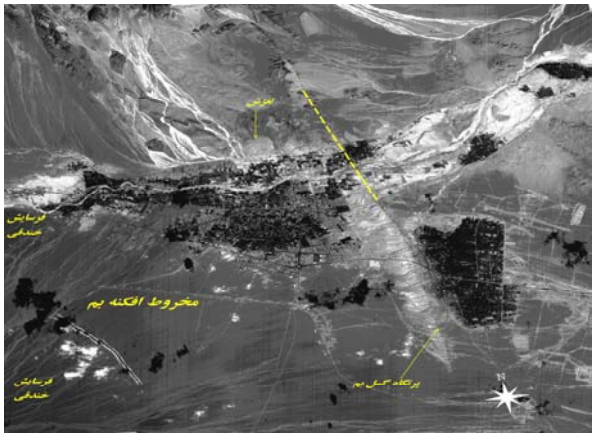
ناهمواری‌های منطقه بم، به طور کلی از نظر تقسیم بندی واحدهای بزرگ ژئومورفیک ایران جزء واحد ایران مرکزی و واحدهای کوچکتر زیر مجموعه آن، یعنی واحد کرمان و بخش شمال غربی واحد سهند-بزمان محسوب می شوند. ناهمواری‌های کرمان فضای وسیع بین شهرهای بم، اردکان و طبس را اشغال کرده اند. مجموعه این ناهمواری‌ها در محدوده مثلثی شکلی قرار می گیرند که رأس آن متوجه شهر بم و قاعده منقطع آن جنوب دشت کویر را محدود می سازد(طالقانی، ۱۳۸۱، ۲۴۹). بنابراین بر اساس این تقسیم بندی ارتفاعات شمالی شهر بم جزء واحد پیکر شناسی کرمان و رشته کوه های جنوب و جنوب غربی، شامل کوه های گود سرخ، بارز و هزار جزء بخش شمال غربی کمربند سهند - بزمان به شمار می آیند. واحد کرمان در واقع از شمال غربی شهر بم آغاز شده و با روند شمالی- جنوبی یا جنوب شرقی- شمال غربی تا جنوب دشت کویر گسترش یافته است.

ناحیه بم در جنوب غربی دشت لوت واقع شده است و حوضه آبریز آن بخشی از حوضه آبریز لوت جنوبی محسوب می شود. تمام جریان‌های سطحی غالباً با جهت غربی- شرقی دشت بم را به سمت نقاط پست لوت جنوبی (لوت زنگی احمد) زهکشی می‌کنند. جهت جریان‌های زیر زمینی نیز از غرب به شرق است که در بعضی قسمتها به علت عوارض زیرزمینی و تکتونیکی تغییر جهت می دهند (محلاتی، ۱۳۶۵، ۳۴).

در بعضی تقسیمات، چاله لوت را به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم می کنند و بخش جنوبی آنرا دشت بم – نرماشیر می نامند. عوارض این قسمت را بیشتر مخروط‌افکنه‌های آبرفتی، چاله های آبی – بادی و پهنه های کویری تشکیل می‌دهد (طالقانی، ۱۳۸۱، ۳۰۷). بنا براین با توجه به مطالبی که تاکنون عنوان شد، می توان گفت روند تحولات ژئومورفولوژیکی دشت بم از دشت لوت جدا نیست.

در تکوین عوارض ژئوورفولوژیکی منطقه بم عواملی همچون زمین ساخت، جریان‌های سطحی و باد آثار چشمگیرتری داشته اند که به آن‌ها می پرداخته می‌شود.

پرتگاه گسل فعال بم یکی از شواهد مشخص و عینی فعالیت زمین ساخت در طول کواترنر در منطقه می باشد که در بخش آثار ژئومورفولوژیکی گسل بم بیشتر به آن پرداخته خواهد شد. نکته ای که در اینجا قابل طرح است، نحوه شکل گیری پرتگاه گسل بم می باشد. آیا این پرتگاه بر اثر یک حادثه ناگهانی، همچون یک زمین لرزه مخرب شکل گرفته است یا بر اثر فشارهای مداوم زمین ساختی، به صورت تدریجی به وجود آمده است. همچنانکه پیشتر ذکر شد طول گسل بم بیشتر از آن است که روی نقشه زمین‌شناسی منطقه نمایش داده شده و کیلومترها به سمت شمال کشیده شده است. بنابراین به طور فرضی می توان گفت در صورت نبود عامل فرسایشی رودخانه پشت رود، پرتگاه گسل به ناهمواریهای شمالی شهر بم متصل می شد (شکل ۱۱).



شکل۱۱ تصویر سنجنده pan ماهواره IRS از منطقه بم که در آن بعضی از عوارض ژئومورفیک منطقه نمایش داده شده است. خطوط منقطع، اتصال فرضی پرتگاه گسل بم را به ارتفاعات شمالی شهر نشان می دهد(مأخذ تصویر: سازمان فضایی ایران).

فرض تدریجی بودن شکل گیری پرتگاه از همین جا به واقعیت نزیکتر می شود که چنانچه پرتگاه به صورت ناگهانی به وجود می آمد؛ مسیر رودخانه پشت رود که عمود بر امتداد پرتگاه می باشد نیز باید همانند جریانهای سطحی و ضعیفتر بخش میانی و جنوبی پرتگاه به سمت جنوب منحرف می شد. اما با مشاهده تصاویر ماهواره ای و عکسهای هوایی منطقه، هیچ انحرافی در مسیر جریان رود پشت رود دیده نمی شود و این موضوع بیانگر آن است که جریان رودخانه در طول کواترنر برای غلبه بر

عامل زمین ساخت به اندازه کافی نیرومند بوده است. این جریانها به طور کلی در سطح دشت مخروط افکنه ای بم و به ویژه در جنوب و جنوب غربی آن، لایه های مختلف آبرفتها را بریده و پایین رفته اند. نتیجه این عمل فرسایشی به وجود آمدن آبکندهای متعدد و عمیقی است که یکی از شاخصه های ژئومورفولوژیکی منطقه محسوب می شوند (شکل۱۲).

شکل ۱۲ نمونه‌هایی از فرسایش عمیق خندقی

در به وجود آمدن این آبکندهای (خندق‌ها) عمیق نیز می توان عامل زمین ساخت را دخیل دانست؛ به این صورت که با بالا آمدن تدریجی بلوک غربی گسل بم، جریانهای سطحی برای برقراری مجدد تعادل در ارتباط با سطح اساسشان، آبرفت‌ها را هر چه بیشتر برش داده اند؛ به طوری که رسوبات مخروط افکنه ای قدیمی در زیر (Q^{f1} و Q^{f2}) نیز دستخوش فرسایش شده‌اند.
بنابر دلایل مذکور می توان گفت، برای اثبات فعال بودن عامل زمین ساخت درمنطقه بم در طول کواترنر شواهد ژئومورفیک به اندازه کافی وجود دارد. این شواهد گویای این موضوع می باشد که این منطقه همواره تحت فشارهای زمین ساختی قرار داشته است.

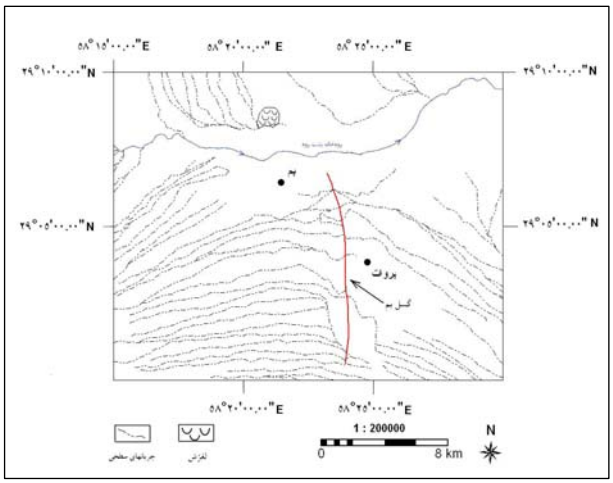
با توجه به موقعیت منطقه و واقع شدن آن در مجاورت دشت لوت باید به آثار ژئومورفولوژیکی ناشی از فرسایش باد نیز اشاره کرد. به عقیده محلاتی حالت ریگزاری دشت بم مربوط به فرسایش تدریجی و مداوم عامل باد در طول کواترنر می‌باشد(۱۳۶۵، ۳۳).

آثار ژئومورفولوژیکی گسل بم

مشخص ترین اثری که گسل بم بر جای گذاشته است، ایجاد یک پرتگاه ۱۵-۲۰متری با نگاه شرقی بین شهرهای بم و بروات است. این پرتگاه در قطعه جنوبی گسل بم نیز به طور مشابه وجود دارد. رسوباتی که پرتگاه بر آن منطبق است از نظر ژئومورفولوژی به صورت شکلهای تپه ماهوری درآمده اند. این عارضه ژئومورفیک در واقع نتیجه تغییرات مداوم و طولانی مدت در طول دوره جدید کواترنر بوده است. جریانهای سطحی روی خود پرتگاه و همچنین جریانهایی که عمود بر امتداد پرتگاه باعث بریده شدن آن شده اند، سبب شده است تا این عارضه شکل تپه ای پیدا کند(شکل۱۳).

شکل ۱۳ نمایی از پرتگاه گسل بم

اثر دیگر این گسل انحرافاتی است که در شبکه هیدروگرافی منطقه به وجود آورده است. انشعاباتی که در بخش جنوبی شهر بم وجنوب غربی بروات به سمت شرق جریان دارند ،تقریبا همگی دچار انحرافاتی چند صد متری یا چند کیلومتری به سمت جنوب شده اند و پس از یافتن مسیر مطلوب با قطع پرتگاه دوباره جهت شرقی پیدا کرده اند، این انحرافات همگی در بلوک غربی گسل که دچار برآمدگی شده است، دیده می شوند. در واقع در هر منطقه ای که گسل جابه جایی عمودی داشته باشد، یکی از عواقب آن انحرافاتی است که در شبکه هیدروگرافی به وجود می آید و این وضعیت در مورد گسل بم نیز صادق است(شکل۱۴).



شکل۱۴ انحرافات به وجود آمده در شبکه هیدروگرافی منطقه بر اثر فعالیت گسل در بخش غربی گسل به خوبی قابل مشاهده است.
مأخذ: سازمان جغرافیائی نیروهای مسلح، نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه بم

پرتگاه گسل بم تا شرق شهر بم امتداد دارد، اما پس از رسیدن به رسوبات Q^{m2} که سن آنها جدیدتر از سن رسوبات منطبق بر پرتگاه است، دیگر اثری از آن دیده نمی شود که علت آن همچنان که پیشتر ذکر شد حضور عامل فرسایشی رود پشت رود می‌باشد.

معمولاً در مطالعه حرکات دامنه ای به‌ویژه لغزش‌ها، یکی از فاکتورهایی که مورد ارزیابی قرار می گیرد، میزان دوری و نزدیکی به خط گسل است. همان طور که قبلاً اشاره شد در روی نقشه زمین شناسی منطقه تنها۱۱/۶کیلومتر از خط گسل نمایش

داده شده است، اما در واقع طول این گسل بسیار بیشتر از این بوده وکیلومترها به سمت شمال منطقه بم کشیده شده است. یکی دیگر از آثار این گسل لغزش‌های کوچک و بزرگی است که در ارتفاعات شمالی شهر بم به وقوع پیوسته است. از جمله این لغزش‌ها،لغزش بزرگی است که ابعاد سطح لغزیده شده بیش از یک کیلومتر مربع بوده وبخوبی روی عکسهای هوایی ۱:۵۵۰۰۰ منطقه قابل مشاهده است. این لغزش در شمال شهر بم و در دامنه جنوبی ارتفاعات شمالی شهر، به وقوع پیوسته است(شکلهای ۱۱ و ۱۴). همان گونه که قبلا ذکر شد، سازندی که در این قسمت واقع شده است شرایط مناسبی برای وقوع لغزش دارد. همچنین ریزش‌ها و لغزش‌های منطقه پس از وقوع زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. این پدیده ها بیشتر در حاشیه گالی‌ها که در رسوبات جدید کواترنر ایجاد شده اند، به وقوع پیوسته است(امینی حسینی و همکاران، ۱۳۸۲).

در ایران گسل‌های فعال زیادی شبیه گسل بم وجود دارد، لذا توجه به ویژگی های ژئومورفولوژیکی و هندسی این گسل‌ها در کنار سایر مطالعات می تواند به روند پیش بینی زمین لرزه در آینده کمک شایان توجهی کند.

نتیجه گیری

امروزه استفاده از شواهد ژئومورفولوژیکی برای تعیین مکان احتمالی زلزله در کنار سایر مطالعات امری ضروری به نظر می رسد. از طرفی گسترش استفاده از سنجش از دور در علوم مختلف زمین و بالطبع ژئومورفولوژی برکسی پوشیده نیست. لذا در بررسی حاضر ،وضعیت عمومی منطقه به طور اعم و شواهد ژئومورفولوژیکی موجود به طور اخص با استفاده از نقشه، عکسهای زمینی، عکسهای هوایی و تصاویر ماهواره ای برای بررسی زلزله ۵ دی ماه ۱۳۸۲ و اثبات فعال بودن منطقه بم از نظر زمین ساختی در طول کواترنر بررسی شده است. در اینجا نتایج آن بررسی می شود.

زلزله بم پیامد فعال شدن یک گسل پوشیده - که یکی از انشعابات فرعی گسل بم محسوب می شود- بود. کانون سطحی این زلزله در ۴ کیلومتری جنوب شرقی شهر بم تشخیص داده شد. نزدیکی کانون سطحی به یک انحنای مشخص که در امتداد گسل به وجود آمده، این باور را تقویت کرد که وقوع زلزله، ناشی از تنش فشاری زیاد در این ناحیه خمیده بوده باشد اما بررسی های کاملتر نشان داد که عامل اصلی زمین لرزه فعالیت یک گسل پنهان در زیر شهر بم بوده است. با استناد به نقشه زمین شناسی منطقه پی سنگ شهر های بم و بروات روی رسوباتی قرار دارد که نقش زیادی در تشدید و تداوم امواج زلزله دارند. بنابراین می توان گفت که دامنه وسیع خرابیها علاوه بر ضعف ساخت و سازها بیشتر ناشی از تشدید و تداوم امواج در رسوبات زیربنای این شهرها بوده است.

وجود آبکندهای عمیق در بلوک غربی گسل بم و بریده شدن رسوبات مخروط‌افکنه‌ای قدیمی در زیر، بیانگر بالا آمدگی تدریجی این بخش از گسل در طول کواترنر می باشد. انحراف جهت جریانهای سطحی در بلوک غربی گسل در نتیجه بالا آمدگی تدریجی نیز دلیل دیگری برای اثبات فعالیت نیروهای زمین ساخت در تمام طول کواترنر محسوب می شود. به طور کلی می توان گفت گسل بم تأثیر کاملا مشخصی بر چشم انداز ژئومورفولوژیکی منطقه داشته است که وجود یک پرتگاه ۱۵-۲۰ متری، اختلال در شبکه هیدروگرافی منطقه، وجود آبکندهای عمیق و ناپایداریهای دامنه ای ازجمله این آثار می باشد.

مجموع عوامل بررسی شده بر فعال بودن این منطقه از نظر زمین ساختی در طی کواترنر دلالت دارند. بنابراین با توجه به این بررسی می توان گفت که احتمال فعالیت مجدد گسلهای منطقه درآینده نیز وجود دارد. در پایان باید اشاره نمود که شواهد فوق برای دیگر گسلهای فعال ایران که وضعیت آنها شبیه گسلهای منطقه بم است، قابل تعمیم می باشد.

منابع:

۱- امینی حسینی، کامبد؛ محمدرضا مهدمیفر، محمد کشاورزبخشایش، و معصومه درخشنده، ۱۳۸۲، گزارش فوری و مقدماتی پدیده های زمین شناسی و ژئوتکتونیک، مرتبط با زلزله ۱۳۸۲/۱۰/۵ بم. پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

۲ - بنیاد مسکن انقلاب اسلامی؛ ۱۳۷۵؛ ریزپهنه بندی لرزه ای مناطق شهری.

۳- تاربوک؛ ادوارد جی و لوتگن فردریک؛ ۱۳۷۸؛ مبانی زمین شناسی؛ ترجمه رسول اخروی، تهران: انتشارات مدرسه، چاپ چهارم.

۴- درویش زاده، علی؛ ۱۳۸۰؛ زمین شناسی ایران،تهران: انتشارات مدرسه،چاپ دوم.

۵- زمردیان، محمد جعفر؛ ۱۳۸۱؛ ژئومورفولوژی ایران؛ فرایندهای ساختمانی و دینامیکهای درونی، جلد اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

۶- عسکری، قاسم؛ ۱۳۸۵؛ پیش بینی زلزله با استفاده از پیش نشانگرهای هواشناسی و سنجش از دور در ایران؛ پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی زیست محیطی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۷- علایی طالقانی، محمود؛ ۱۳۸۰ ژئومورفولوژی ایران؛ انتشارات قومس.

۸- علوی پناه، سید کاظم؛ ۱۳۸۲؛ کاربرد سنجش از دور در علوم زمین(خاک)؛ انتشارات دانشگاه تهران.

۹- محلاتی، محمد مهدی؛ ۱۳۶۵؛ جغرافیای شهر بم؛ انتشارات اسلامی.

۱۰- معظمی گودرزی، خسرو؛ ۱۳۵۱؛ لرزه شناسی؛ انتشارات وزارت علوم و آموزش عالی، صص ۴۱۲،۳۴۸،۱۴۷ و ۴۱۳.

۱۱- میرزایی، علویجه؛ حسین و اسماعیل فرزانگان؛ ۱۳۸۳؛ بم و زمین لرزه اش می آموزد(آشنایی با مهندسی زلزله و عملکرد لرزه های ساختمانها)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

۱۲- کوک،آر.یو و دورکمپ،جی سی؛ ۱۳۷۸؛ ژئومورفولوژی و مدیریت محیط، ترجمه: شاپور گودرزی نژاد؛ انتشارات سمت.

13. Fu, B., et. al.; 2003, mapping active fault associated with the MW 6.6 Bam (SE Iran) earthquake with Aster 3D images, remote sensing of environment, vol. 92, PP: 153-157.

14. Hayakawa M. and et. al., 2004, Summary report of NASDA, s earthquake Remote Sensing frontier. project, Physics and chemistry of the Earth, Vol. 29 PP: 617-625.

15. Keller, E., Pinter; 1996, Active Tectonic, Earthquake, Uplift and landscape; prentice hall, new jerky.

16. Ouzounov, D., Freund F; 2004, Mid – Infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. Advances in Space Research, Vol. 33 PP: 268 – 273.