



نقش عوامل زمین‌شناسی بر میزان تخریب زمین‌لرزه‌ی اخیر شهر بم

محمّد غفوری^{۱*}، غلامرضا لشکری‌پور^۱، مسین صادقی^۱، ناصر مافطی مقدّس^۲، سیّد علی مسینی^۱

(۱) گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد ghafoori@ferdowsi.um.ac.ir
(۲) گروه زمین‌شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود
* عهده‌دار مکاتبات

مکیده

زمین‌لرزه‌ی قدرتمند بم روز جمعه پنج دی ماه سال ۱۳۸۲ هجری شمسی (۲۶ دسامبر ۲۰۰۳) در ساعت ۲۵:۵۶:۵ صبح به وقت محلی (GMT ۱:۵۵:۵۶) با بزرگی حدود $M_w=6.5$ در مقیاس ریشتر شهر تاریخی بم و روستاهای اطراف آن را در جنوب شرق ایران لرزاند. این زمین‌لرزه پرتلفات‌ترین زمین‌لرزه در سراسر جهان در سال ۲۰۰۳ میلادی گزارش شده است. در اثر وقوع این زمین‌لرزه حدود ۷۰ درصد ساختمان‌های شهر بم تخریب و بیش از ۲۶۰۰۰ نفر کشته شدند. اگرچه ساختمان‌های منطقه از مقاومت لازم در برابر حرکات زمین‌لرزه برخوردار نبوده‌اند، اما با توجه به بزرگی زمین‌لرزه میزان خسارت وارده به ساختمان‌ها و تأسیسات شهری بسیار بیشتر از حد انتظار بوده است. یکی از دلایل این تخریب بالا، قرارگیری شهر بر روی خاک‌های کم‌مقاومت ریزدانه‌ی سیلتی با خاصیت خمیری کم می‌باشد. در این مقاله دلایل تخریب بالا به سازه‌های شهر با توجه به نقش عوامل زمین‌شناسی، تکنیکی و جهت‌یافتگی امواج لرزه‌ای و همچنین خصوصیات ژئوتکنیکی رسوبات آبرفتی داخل شهر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: بم، سیلت، ضخامت رسوبات، زمین‌شناسی، زمین‌لرزه.

The role of geological factors on the destruction of Bam city due to the recent earthquake

M. Ghafoori¹, G. R. Lashkaripour¹, H. Sadeghi¹, N. Hafezi-Moghaddas², S. A. Hussaini¹

1) Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, I. R. Iran
2) Department of Geology, Technical University of Shahrood, Shahrood, I. R. Iran

Abstract

On Friday, December 26, 2003 at 1:55:56 GMT (5:25:56 local time), a powerful earthquake of moment magnitude (M_w) about 6.5 struck the ancient city of Bam and neighboring villages in the southeastern region of Iran. The highest death has been reported for this earthquake among all earthquakes in the world in the year 2003. About 70% of buildings in the city were damaged by the earth-

quake and more than 26000 people were killed. The main reason for such major damage may be weak adobe and brick structures. However, the damage was unexpectedly great for this magnitude. The city is located over low strength of fine grained soils such as silt with low cohesiveness and therefore, this is one of the main reasons for such large-scale destruction by the earthquake. This paper deals with the high damages in the city based on geology, tectonics and directivity of earthquake waves and also geotechnical parameters.

Key words: Bam, earthquake, geology, sediment thickness, silt

۱- مقدمه

در روز جمعه پنج دی ماه سال هجری شمسی ۱۳۸۲ زمین لرزه ای قدرتمند به بزرگی $M_w = 6.5$ ریشتر شهر بم و اطراف آن را لرزاند. مرکز سطحی این زمین لرزه توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ایران (Building and Housing Research Center, BHRC) در مکانی با مختصات جغرافیایی طول $35^{\circ} E$ و عرض $29^{\circ} 12' N$ در شهر بم تعیین شده است. عمق کانونی زمین لرزه با توجه به اختلاف یک ثانیه ای بین زمان دریافت امواج P و S حدود هفت کیلومتر تخمین زده شده است (Ahmadizadeh & Shakib 2004). در اثر این زمین لرزه ۲۶۲۷۱ نفر جان خود را از دست دادند و بیشتر از ۲۵۰۰۰ نفر مجروح شدند (مرکز آمار ایران ۱۳۸۲). همچنین به شهرهای بم، بروات و روستاهای اطراف آسیب های فراوانی رسید و حدود ۷۰ درصد از ساختمان های شهر بم تخریب شدند (Fu et al. 2004). در اثر این زمین لرزه به ارگ قدیمی و باستانی بم با قدمت حدود ۲۰۰۰ سال (بزرگترین بنای خشتی جهان) آسیب های جدی وارد آمد. این زمین لرزه بالاترین تلفات انسانی را در این سال در سرتاسر جهان به خود اختصاص داد (Sadeghi et al. 2006).

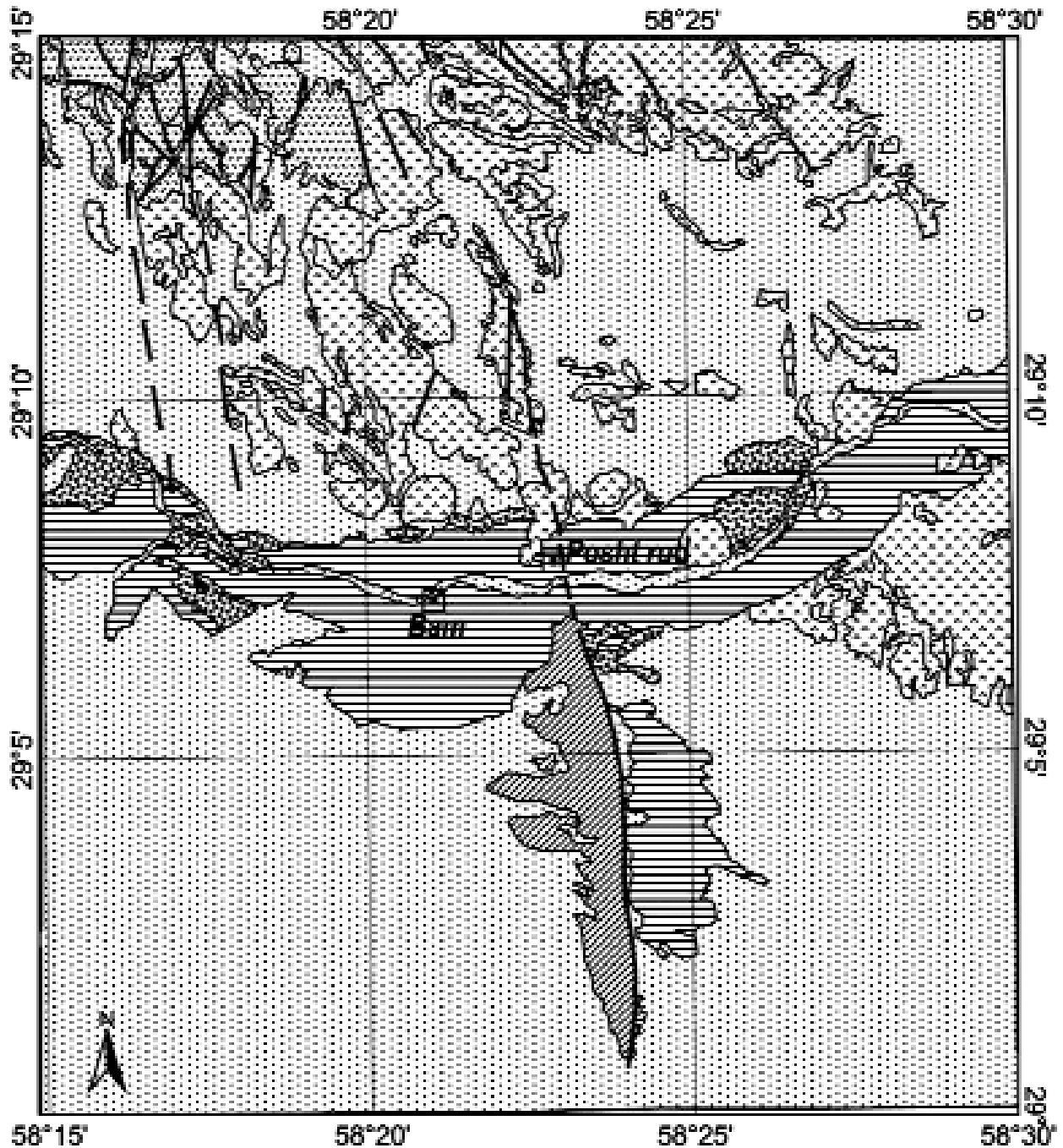
با توجه به خسارات وارده، این زمین لرزه یکی از مخرب ترین وقایع تاریخی ایران می باشد (Fu et al. 2004). بررسی های صحرایی نشان می دهد که اگرچه ساختمان های منطقه از مقاومت لازم در برابر حرکات زمین لرزه برخوردار نبوده اند، اما با توجه به بزرگی زمین لرزه میزان خسارت وارده به شهر بم بسیار بیشتر از حد انتظار است. یکی از دلایل آن عدم برخوردار بودن ساختمان ها از مقاومت لازم در برابر حرکات زمین لرزه بوده است. همچنین این بررسی ها نشان می دهد که شرایط زمین شناسی و تکتونیکی در این تخریب غیرمنتظره بی تأثیر نبوده است. در این مقاله تأثیر شرایط زمین شناسی و تکتونیکی و همچنین خصوصیات ژئوتکنیکی رسوبات آبرفتی شهر مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- زمین شناسی منطقه

با توجه به نقشه ی زمین شناسی (تصویر ۱) قدیمی ترین سنگ های منطقه که شامل ارتفاعات کپوتی (Kafut-Kuh) در شمال و جبال بارز در جنوب می باشند از سنگ های آتشفشانی ائوسن تشکیل شده اند. در اثر فرسایش این سنگ ها، مخروط افکنه های نسبتاً بزرگی در شمال و جنوب منطقه به وجود آمده است. شهر بم بر روی رسوبات آبرفتی و ریزدانه ی سیلتی حاصل از فرسایش این ارتفاعات قرار گرفته است. بر اساس بررسی های انجام شده و مقطع زمین شناسی که از شهر بم از شمال به جنوب تهیه شده است، ضخامت این رسوبات از جنوب به شمال افزایش می یابد (حسینی ۱۳۸۴).

۳- تکتونیک منطقه

بر اساس تقسیم بندی تکتونیکی ایران، منطقه ی بم در حاشیه ی جنوبی بلوک لوت قرار دارد (Alavi 1991). این بلوک از شمال به گسل درونه، از جنوب به فرورفتگی جازموریان، از شرق به گسل نهبندان و از غرب به گسل ناینند محدود می گردد. به طور کلی دو سامانه ی گسلی اصلی با روند شمالی- جنوبی با کمی تمایل به سمت غرب و شمال غربی- جنوب شرقی در منطقه وجود دارد. این دو سامانه ی گسلی در ناحیه ی غربی دشت لوت با هم تلاقی می نمایند، به طوری که گسل هایی با روند شمال غربی- جنوب شرقی (گسل های کوهبنان و راور) همراه با گسل های شمالی- جنوبی (گسل های گلباف، ناینند، چهارفرسخ، گوک، سروستان و بم) مرز غربی ناحیه ی لوت را مشخص می نمایند. منطقه ی بم در شرق سامانه ی گسلی امتداد لغز گوک که مرز بلوک لوت و ایران مرکزی را تشکیل می دهد قرار دارد (تصویر ۲). مهمترین ساختار تکتونیکی قابل مشاهده در این منطقه، گسل بم می باشد. این گسل یکی از گسل های امتداد لغز راست لغز اطراف حوضه ی دشت لوت می باشد (Okumura et al. 2004) که با راستای شمالی- جنوبی از فاصله ی



- | | |
|--|---|
| | Gai: Alluvium, alluvial fans and recent alluvial terraces |
| | Om2: Buff to light brown- tan silts and argillaceous sandstones |
| | Om1: Yellow- tan to orange brown siltstones and sandstones |
| | Ngm: Tan to red sandstones, siltstones and sandstone |
| | Ev3: Well bedded ash- flow tuffes with subordinate, mainly trachyandesitic and basaltic, lavas and volcanoclastic sediments |
| | Ev2: Massive dacite and subordinate rhyolite and andesite lavas alternating with massive homogeneous ash- flow tuffes |
| | Fault |
| | Probability Fault |
| | City and village |

تصویر ۱- نقشه‌ی زمین شناسی منطقه‌ی مطالعاتی

۱۰۰ متر خاک عبور می نمایند، اما لایه های خاک و زمین شناسی سطحی نقش بسیار مهمی در تعیین خصوصیات حرکت سطح زمین ایفا می کنند (Benjumea et al. 2001). دانسیته، سختی، ضخامت و سایر خصوصیات فیزیکی لایه های خاک همانند شدت حرکات لرزه های از فاکتورهای مهم و مؤثر بر امواج لرزه های می باشند (Semih et al. 2002). در اغلب ساختگاه ها، دانسیته و سرعت موج برشی لایه های نزدیک سطح زمین، کمتر از مقادیر آن ها در اعماق می باشد.

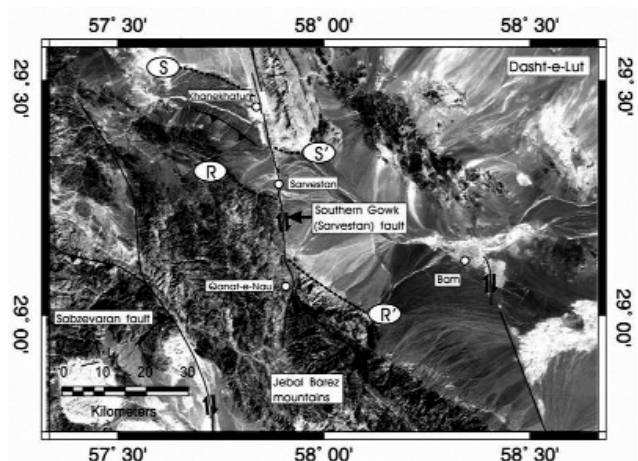
بررسی های زمین شناسی و ژئوتکنیکی در منطقه نشان داده است که خصوصیات زمین شناسی (جنس و ضخامت خاک) و ژئوتکنیکی منطقه نقش مهمی در تخریب داشته اند و این عامل تحت عنوان اثرات زمین شناسی ساختگاه مورد بررسی قرار می گیرد.

۱-۱-۴- جنس خاک

به طور کلی سازه هایی که بر روی رسوبات ریزدانه قرار دارند نسبت به سازه هایی که بر روی رسوبات درشت دانه قرار دارند، در اثر زمین لرزه بیشتر تخریب می شوند. زیرا امواج لرزه های در زمین های سخت و با مواد متراکم تر سریع تر حرکت می کنند، بنابراین به علت سرعت بیشتر امواج انرژی کمتری در این نوع خاک ها آزاد می شود. این مطلب از نظر ژئوتکنیکی به این معنی است که تخریب کمتری در چنین مناطقی به وجود می آید. برعکس در زمین های ضعیف و سست از سرعت امواج لرزه ای کاسته شده و مدت عبور موج از داخل آن ها افزایش می یابد، بنابراین انرژی زیادی در این مناطق آزاد شده، در نتیجه خسارت بیشتری نیز به سازه های منطقه وارد می شود. به همین دلیل مکرراً مشاهده می گردد که تخریب در مناطق پوشیده از رسوبات سست بیشتر از مناطق پوشیده توسط رسوبات سخت یا بسترهای سنگی می باشد (Coburn & Spence 2002). مثلاً در زمین لرزه ی سال ۱۹۵۷ دره ی مکزیکوسیتی شتاب ایجاد شده در خاک های دریاچه ای بستر دره تقریباً دو برابر ماسه ها و گراول های متراکم واقع در اطراف دره بوده است.

بررسی های انجام شده نشان می دهد که خاک منطقه عمدتاً از نوع سیلنتی است که در طبقه بندی متحد (Unified Soil Classification System) در کلاس ML قرار می گیرد. بر اساس نتایج آزمایشات ژئوتکنیکی تعدادی از نمونه ها و بر اساس جدول

سه کیلومتری شرق و شمال شهر بم و یک کیلومتری غرب شهر بروات می گذرد. طول این گسل بیش از ۵۰ کیلومتر است و حدود ۱۰ کیلومتر آن در رسوبات عهد حاضر به خوبی قابل ردیابی می باشد (Ahmadizadeh & Shakib 2004). پرتگاه گسلی آن با ارتفاع ۲۰- ۱۵ متر و طول ۱۲ کیلومتر بین شهرهای بم و بروات به خوبی قابل مشاهده است (Fu et al. 2004).



تصویر ۲- ساختارهای تکتونیکی منطقه بر روی تصویر ماهواره ای (Walker & Jackson 2002)

۴- دلایل تخریب غیرمنتظره ی شهر بم

بررسی ها نشان می دهد که علت تخریب بیش از حد شهر بم را می توان به دو گروه تقسیم نمود (حسینی ۱۳۸۴). گروه اول دلایل زمین شناسی و ژئوتکنیکی، گروه دوم دلایل تکتونیکی می باشد که در ذیل به شرح آن پرداخته می شود.

۱-۴- دلایل زمین شناسی و ژئوتکنیکی

از جمله پارامترهای مؤثر در خرابی های ناشی از زمین لرزه اثرات زمین شناسی محلی می باشد (حافظی مقدّس و کمک پناه ۱۳۸۳). وقوع زمین لرزه های مخرب مکزیکوسیتی (۱۹۸۵)، لوما پریتا (۱۹۸۹)، نورث ریج (۱۹۹۴)، کوبه (۱۹۹۵)، از میت (۱۹۹۵)، چی چی (۱۹۹۹)، منجیل (۱۹۹۰) و قائن (۱۹۹۷) اهمیت عامل زمین شناسی محلی در گستردگی و شدت خرابی زمین لرزه ها را بیش از پیش نمایان ساخت. به دلیل عبور امواج زمین لرزه از لایه های متعدد سنگ و خاک، شرایط فیزیکی این لایه ها بر امواج لرزه ای اثر می گذارند. با وجود این که امواج زلزله از میان چندین کیلومتر سنگ و غالباً کمتر از

طبقه بندی خاک های ایران در آیین نامه ۲۸۰۰، خاک های منطقه ی بم در کلاس III قرار می گیرند (جدول ۱).

جدول ۱- نتایج آزمایشات بر روی خاک های منطقه

ردیف	موقعیت	(g/cm ³)	(%)	LL	PI	c(kg/cm ²)
۱	پرنگاه گل بم	۱٫۸	۱۱٫۱	۲۱	-	۰٫۰۵
۲	پرنگاه گل بم	۱٫۸	۱۰	۱۹	-	۰٫۰۳
۳	حاشیه ی رودخانه بیدران	۱٫۹	۱۱	۲۰	-	۰٫۰۴
۴	حاشیه ی رودخانه بیدران	۱٫۸	۱۱	۲۱	-	۰٫۰۳
۵	کال خیابان ابن سینا	۱٫۸	۱۰	۲۰	-	۰٫۰۲
۶	آوار	۱٫۹	۱۱٫۱	۲۰	۲	۰٫۱
۷	دیوار	۱٫۷	۱۰	۲۳	۷	۰٫۷

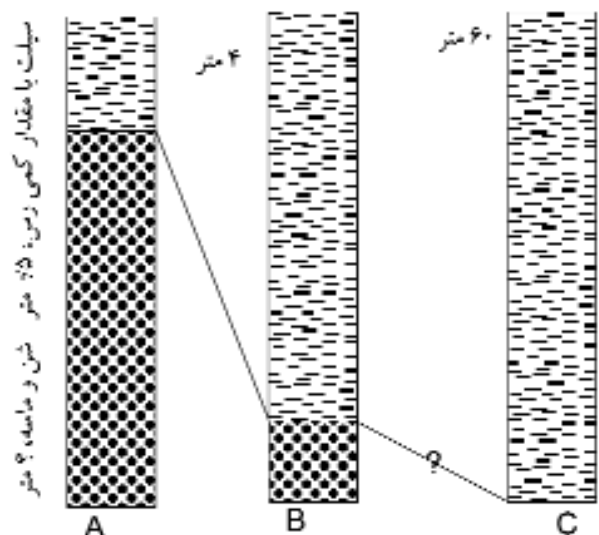
به طور کلی با افزایش ضخامت خاک میزان خسارت زمین لرزه نیز نسبت به مناطق سنگی افزایش می یابد (Aki 1993). به عنوان مثال در زمین لرزه ی کاراکاس (۱۹۶۷) الگوی خسارت ساختمان ها رابطه ی مستقیمی با ضخامت آبرفت های سست روی سنگ بستر داشته است (Semih et al. 2002). به طوری که در بخش شرقی شهر، که ضخامت خاک زیاد بوده است (۹۰ تا ۲۱۰ متر)، خسارت بیشتری نسبت به بخش غربی با عمق خاک کمتر (۱۸ تا ۶۰ متر) مشاهده گردیده است. بنابراین ضخامت خاک می تواند به عنوان یک عامل موثر در تقویت زمین لرزه محسوب گردد.

مطالعات اکی و ایریکورا (Aki & Irikura 1991) در ایالات متحده و ژاپن نشان داد که مناطق پوشیده شده توسط رسوبات باعث تقویت بیشتر دامنه ی امواج لرزه ای نسبت به مناطق با پوشش سنگی می شوند. مک موردو (MacMurdo 1824) خاطر نشان ساخت که در زمین لرزه ی ۱۸۱۹ کچ (Catch) در هندوستان، ساختمان هایی که پی آن ها بر سنگ مستقر بوده نسبت به ساختمان هایی که شالوده ی آن ها روی لایه ی خاکی بنا شده کمتر تحت تأثیر قرار گرفته اند.

با توجه به مشخص نبودن ضخامت آبرفت در منطقه، تأثیر آن به صورت موردی در منطقه ی ارگ بم مورد مطالعه قرار گرفت. این محل تنها جایی در شهر بم است که رخنمون سنگی از جنس دیوریت در آن مشاهده می شود. با توجه به شرایط زمین شناسی و زمین ریخت شناسی از جمله شیب سنگی تپه و مقطع رودخانه ی پشت رود در شمال ارگ، با فاصله گرفتن از پای تپه های سنگی ضخامت رسوبات نیز افزایش می یابد (تصویر ۴). بررسی های محلی در این منطقه نشان می دهد، دیوارهایی که پی آن ها بر روی سنگ قرار گرفته است آسیب چندانی ندیده اند، اما با فاصله گرفتن از این تپه ی سنگی، میزان خسارات نیز افزایش می یابد.

در تصویر ۴، منطقه ی ارگ بم با توجه به میزان خسارات وارد شده به آن به سه قسمت A، B و C تقسیم شد. منطقه ی A با توجه به این که دیوارها بر روی پی سنگی بنا شده اند، خسارت شدیدی وارد نشده است. حال آن که با فاصله گرفتن از این منطقه و قرارگیری پی سازه ها بر روی رسوبات نرم (قسمت های B و C)، میزان خسارات نیز افزایش می یابد. ضخامت رسوبات از منطقه ی B به منطقه ی C افزوده می گردد، بنابراین میزان خسارت منطقه ی B کمتر از منطقه ی C می باشد، به طوری که در منطقه ی B تعداد زیادی از دیوارها هنوز

جهت تعیین تغییرات جنس خاک منطقه، یک مقطع در راستای شمال- جنوب از خاک های شهر بم تهیه شد (تصویر ۳) (حسینی ۱۳۸۴). در این تصویر مقطع (a) در خیابان شهید رجایی جنب استادیوم فوتبال در جنوب شهر بم، مقطع (b) در خیابان امام خمینی مرکز شهر و مقطع (c) در تقاطع خیابان ابن سینا با کال رودخانه در شمال بم برداشت شده است. همان طور که ملاحظه می گردد، در قسمت جنوبی شهر ضخامت رسوبات ریزدانه کم (در حدود ۰/۵ متر) و به طرف شمال شهر بر ضخامت این رسوبات افزوده می گردد (بیش از شش متر). این افزایش ضخامت تا حاشیه ی رودخانه ی پشت رود ادامه می یابد. بنابراین قسمت اعظم شهر بر روی این رسوبات ریزدانه قرار گرفته است. با توجه به مطالب فوق وجود این رسوبات ریزدانه در زیر شهر بم می تواند یکی از دلایل تخریب زیاد باشد.



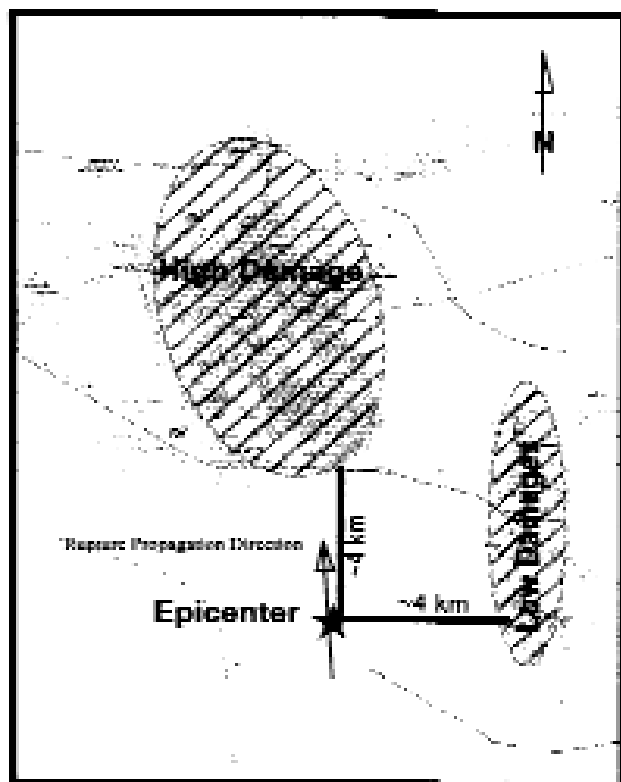
تصویر ۳- مقطع تپه لایه های رسوبی در شهر بم، (A) خیابان شهید رجایی، (B) خیابان امام خمینی، (C) خیابان ابن سینا



تصویر ۴- تقسیم بندی میزان خسارات وارده به ارگ قدیم بم. A: پی سنگی با میزان خسارت کم، B: پی بر روی آبرفت با ضخامت کم با میزان خسارت زیاد، C: پی بر روی آبرفت با ضخامت خیلی زیاد با میزان خسارت بسیار زیاد

یکسانی نسبت به کانون زمین لرزه واقع شده اند. با این وجود شهر بم به دلیل قرارگیری در جهت گسیختگی و انتشار امواج بسیار بیشتر از شهر بروات که در مسیر گسیختگی و انتشار امواج قرار نداشته، تخریب شده است.

به طور کامل فرو نریخته اند، اما در منطقه ی C تقریباً نمی توان دیوار سالمی را یافت. به طور کلی در این ناحیه افزایش میزان خسارت با افزایش ضخامت رسوبات رابطه ی مستقیم دارد. افزایش ضخامت رسوبات آبرفتی احتمالاً باعث تقویت محلی امواج لرزه ای با دور شدن از پای تپه شده و در نتیجه افزایش شدت تخریب را نیز دربر داشته است.



تصویر ۵- اثر جهت یافتگی امواج در میزان تخریب شهرهای بم و بروات (Jafargandomi et al. 2005)

۲-۱۴- اثرات تکتونیکی

به طور کلی اثرات تکتونیک بر میزان تخریب منطقه را می توان از جنبه های جهت یافتگی امواج زلزله، شاخه های فرعی گسل مسبب زمین لرزه، مکانیزم و الگوی گسلش مورد بحث قرار داد.

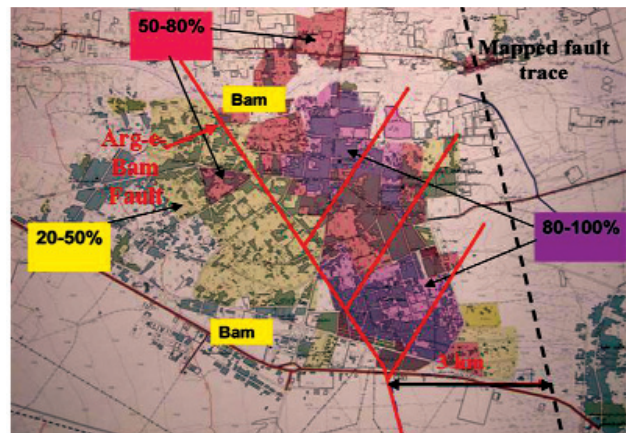
۲-۱۴-۱- جهت یافتگی امواج (Directivity)

اثر جهت یافتگی امواج لرزه ای زمانی ظاهر می شود که جهت لغزش گسل و گسترش موج نسبت به منطقه ی مورد مطالعه در یک جهت باشند. جهت یافتگی امواج توسط عواملی از جمله فاصله کانونی، زاویه ی بین منشاء و منطقه ی مورد بررسی و بزرگی زلزله تحت تأثیر قرار می گیرد (Somerville et al. 1997, Somerville et al. 2003, Miyake et al. 2001). در نقشه ی تخریب شهر بم و بروات که توسط سازمان نقشه برداری کشور تهیه شده است به خوبی مشاهده نمود (تصویر ۵). همان طور که در این تصویر مشاهده می شود، شهر بم و بروات تقریباً در فاصله

۱۴-۲-۲- اثر شاخه های فرعی گسل مسبب زمین لرزه

تحقیقات انجام شده توسط ناکامورا و همکاران (Nakamura et al. 2005) و ونگ (Wang et al. 2004) نشان داد که گسل مسبب زمین لرزه یک گسل پنهان در حدود سه و نیم کیلومتری غرب گسل بم بوده است. این گسل دارای شاخه های فرعی است که توسط ناکامورا و همکاران (Nakamura et al. 2005) سه شاخه ی فرعی آن شناسایی شد. به عقیده ی این محققین شاخه های فرعی این گسل در اعماق مختلف قرار دارند، به همین دلیل اثر سطحی آن ها مشاهده نشده است. این افراد، نام گسل مسبب زمین لرزه را گسل ارگ بم اطلاق نمودند.

با توجه به تصویر ۶ خسارات وارده به شهر بم به صورت یکنواخت گسترش نیافته است، به طوری که تخریب در قسمت شرقی بم به مراتب بیشتر از قسمت غربی آن می باشد. یکی از دلایل بروز این وضعیت در منطقه، مورفولوژی و تصویر گسل ارگ بم باشد. شهر بم بر روی این گسل و در جهت گسترش شکستگی اصلی آن قرار گرفته است. اما سه شکستگی فرعی نیز در اطراف این گسل شناسایی شده که از این گسل منشعب می شوند. با روی هم اندازی نقشه ی تخریب منطقه و گسل ارگ بم به همراه شاخه های فرعی آن (تصویر ۶) مشخص می گردد که این شکستگی ها به طرف شرق بم جایی که بیشترین خسارات در آن دیده می شود، گسترش یافته اند. وجود این شاخه های فرعی و جهت گسترش آن ها یکی از دلایل وقوع تخریب زیاد در قسمت شرقی شهر بم نسبت به قسمت غربی آن می باشد.

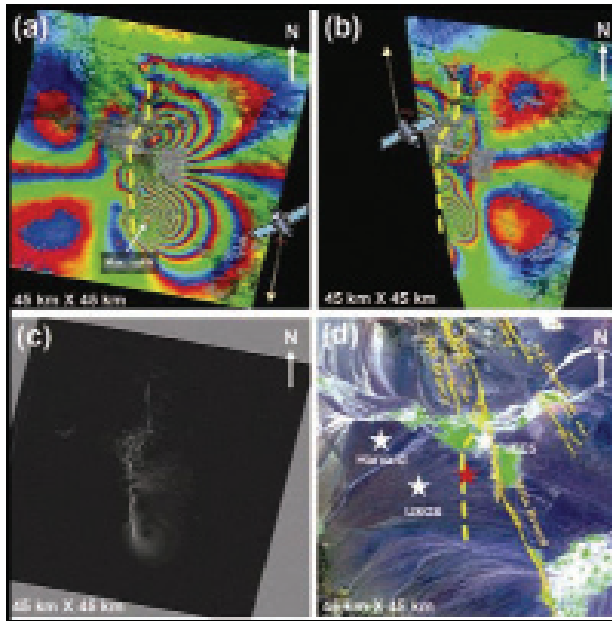


تصویر ۶- گسترش میزان خسارات در اثر زمین لرزه ی بم در اطراف گسل مسبب آن (اقتباس از Nakamura et al. 2005)

۱۴-۲-۳- مکانیزم و الگوی گسلش

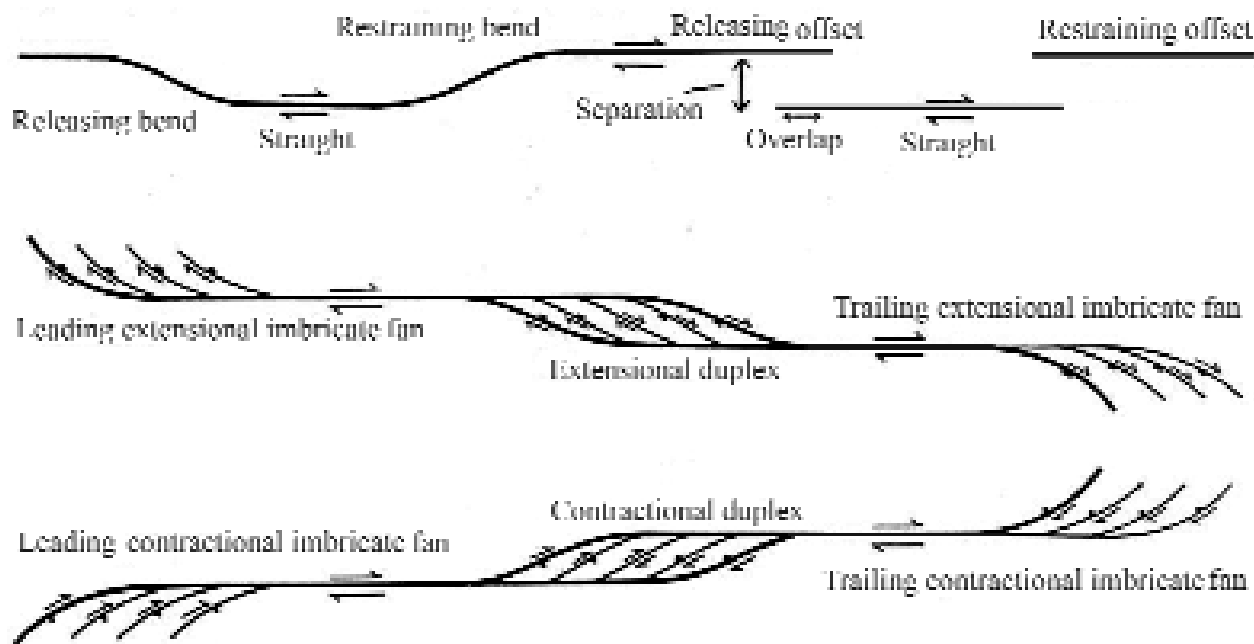
ونگ (Wang et al. 2004) با استفاده از داده های ماهواره ای،

گسل مسبب زمین لرزه را با جهت شمال- جنوب معرفی کرده است (تصویر ۷). مورفولوژی گسل به صورتی است که شهر بم بر روی قوس میانی گسل قرار دارد. از طرفی ناکامورا و همکاران (Nakamura et al. 2005) شاخه های فرعی را در این گسل شناسایی نموده اند که به طرف شرق و شمال شرق امتداد دارند (تصویر ۶).



تصویر ۷- مدل گسل مسبب زمین لرزه، ارائه شده توسط ونگ (Wang et al. 2004)

فیلدینگ و همکاران (Fielding et al. 2005) در قسمت جنوبی شهر بم یک مدل با چهار قطعه ی چپ پل های رابر روی گسل بم شناسایی و معرفی نمودند. این مدل پلکانی نشان دهنده ی یک لغزش تیبیک امتداد لغز در منطقه می باشد. تلفیق داده های ونگ و همکاران، ناکامورا و همکاران و فیلدینگ و همکاران (Wanget et al. 2005, Nakamura et al. 2005, Fielding et al. 2004). معرف تصویر تیبیک یک گسل امتداد لغز راستگرد می باشد (تصویر ۸). همان طور که در این تصویر مشخص است، گسل امتداد لغز راستگرد دارای تصویر تیبیک Z و تعدادی شاخه ی فرعی می باشد. شاخه های فرعی در مرکز، ابتدا و انتهای گسل قرار دارند. با مقایسه ی تصویر ۸ و اشکال معرفی شده برای گسل ارگ بم مشخص می گردد که شاخه های فرعی گسل که توسط ناکامورا و همکاران (Nakamura et al. 2005) معرفی گردیده است در قسمت میانی گسل اصلی قرار دارند. به دلیل قرارگیری این شاخه ها در اعماق مختلف زمین، اثر



تصویر ۸- نقشه‌ی گسل ایده‌ال امتداد لغز راستگرد (Woodcock Fischer 1986)

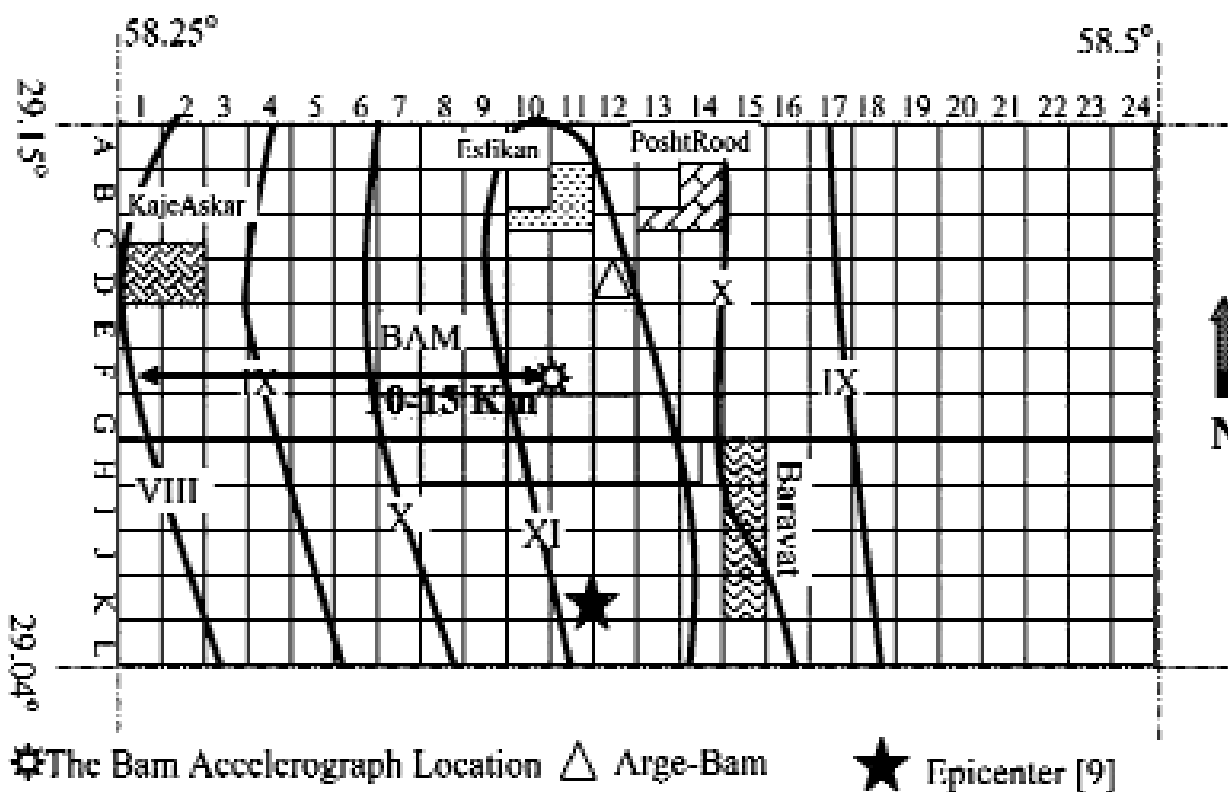
تقریباً تمام انرژی امواج تا شعاع ۱۰ کیلومتری تخلیه شده است. بررسی‌ها نشان داده است که شرایط زمین شناسی و زمین ساختی منطقه در ایجاد میرایی مؤثر بوده است. به طور کلی هرچه سنگ پی یا مسیر عبور امواج متراکم تر باشد سرعت عبور موج در آن بیشتر است و در نتیجه امواج انرژی کمتری را از دست می دهند، بالعکس اگر محیط دارای چگالی و تراکم کم باشد سرعت امواج در آن کاهش یافته و در نتیجه انرژی بیشتری را در آن محیط از دست می دهند که سبب میرا شدن موج می گردد. هنگامی که امواج P یا S از میان گسله‌ها یا ترک‌های موجود در سنگ نیز عبور می کنند انرژی خود را از دست داده و میرا می شوند (Worthington et al. 2001). این امر نیز به دلیل وارد شدن موج از یک محیط با چگالی بیشتر (سنگ) به محیطی با چگالی کمتر (درز و شکاف‌ها و زون خرد شده‌ی گسل) است.

قرار گرفتن منطقه‌ی مطالعاتی در حاشیه‌ی یک بلوک تکتونیکی فعال (بلوک لوت) و عبور گسل‌های فعالی همچون گسل گوک و سبزواران از نزدیکی آن و گسل بم از داخل منطقه، می تواند سنگ پی را تحت تأثیر قرار دهد. به این ترتیب که حرکات گسل‌های مذکور باعث ایجاد زون‌های برشی در اطراف آن‌ها شده است. زون‌های برشی، زون‌های سست و خرد شده‌ای هستند که با فعالیت گسل‌ها در اثر خرد شدن سنگ‌های اطراف آن‌ها به وجود می آیند. بنابراین

سطحی این شاخه‌ها در منطقه مشاهده نمی شود. به طور کلی قسمت میانی این نوع گسل‌ها مرکز تجمع تنش بوده و در صورت وقوع حرکت در آن، بیشترین انرژی از این قسمت آزاد می شود و در نتیجه بیشترین تخریب نیز در این قسمت روی می دهد. همان طور که قبلاً گفته شد، شهر بم بر روی این قسمت از گسل قرار داشته و این می تواند یکی از دلایل تخریب بیش از حد این شهر نسبت به سایر قسمت‌ها باشد.

۱۴-۲-۱۴- فرد شدگی سنگ پی

با توجه به بررسی‌های صحرائی و تصویر ۹ مشخص گردید که وسعت خرابی‌های زمین لرزه‌ی بم محدود به شعاع ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر اطراف منطقه (شدت VIII) می باشد و در نقاط دورتر از آن آثار خرابی قابل توجهی مشاهده نمی شود. اگر وسعت خرابی‌های این زمین لرزه را با زمین لرزه‌های دیگری همانند رودبار- منجیل ایران (۱۳۶۹) و گجرات هند (۲۰۰۱) که منحنی هم شدت VIII آن‌ها تا شعاع ۱۰۰ کیلومتر گسترش یافته است مقایسه گردد در می یابیم که گسترش خرابی‌های زمین لرزه‌ی بم نسبت به زمین لرزه‌های ذکر شده بسیار محدود و کم می باشد. این امر نشان دهنده‌ی وجود میرایی (Damping) بسیار شدید در زمین لرزه‌ی بم می باشد، به طوری که



تصویر ۹- نقشه‌ی هم شدت زلزله‌ی بم (Mostafaei & Kabeyasawa 2005)

و بر روی رسوبات ریزدانه ML (سیلت با خاصیت خمیری کم) قرار گرفته است. جنس اکثر ساختمان‌های خشت و گلی منطقه نیز از این خاک‌های سیلتی تشکیل شده است. ضخامت این رسوبات از جنوب به شمال منطقه افزایش می‌یابد. سازه‌هایی که بر روی این رسوبات بنا شده‌اند نسبت به سازه‌هایی که بر روی رسوبات درشت دانه یا سنگ‌ها بنا شده‌اند بیشتر آسیب دیده‌اند. علاوه بر این افزایش ضخامت این رسوبات نیز با میزان تخریب ساختمان‌ها در منطقه ارتباط مستقیم دارد.

از نظر تکتونیکی، منطقه‌ی بم در یک منطقه‌ی فعال قرار دارد به همین دلیل سنگ پی منطقه متأثر از این فعالیت است که این مسئله می‌تواند در گسترش کم تخریب به مناطق اطراف مؤثر باشد. همچنین میزان تخریب منطقه تحت تأثیر جهت یافتگی امواج لرزه‌ای، مکانیزم و الگوی گسلش و شاخه‌های فرعی موجود در گسل مسبب زمین لرزه قرار دارد. به همین دلیل خرابی شهر بم به دلیل قرارگیری در جهت گسیختگی و انتشار امواج بسیار بیشتر از شهر بروات بوده که در مسیر گسیختگی و انتشار امواج قرار نداشته است.

زون‌های برشی نسبت به توده‌ی سنگ دارای تراکم و چگالی کمتری هستند. با توجه به مطالب بالا، هنگامی که موجی وارد این محیط شود انرژی خود را از دست داده و میرا می‌شود. با توجه به میرایی بسیار زیاد امواج زمین لرزه‌ی بم به احتمال بسیار زیاد سنگ پی منطقه در اثر حرکات تکتونیکی خرد شده و درهم ریخته شده است. از آنجا که گسل مسبب زمین لرزه‌ی بم، گسل پنهانی بوده است که هیچ‌گونه اثر سطحی از آن به دست نیامده است، احتمال وجود گسله‌های دیگری همانند آن در منطقه که باعث خردشدگی بیشتر سنگ پی شده باشند، وجود دارد.

۵- نتیجه‌گیری

بررسی‌ها نشان داده است که اگرچه ساختمان‌های شهر بم از مقاومت لازم در برابر حرکات زمین لرزه برخوردار نبوده‌اند، اما با توجه به بزرگی زمین لرزه میزان خسارت وارده به شهر بم بسیار بیشتر از حد انتظار بوده است. به طور کلی دلایل این تخریب بیش از حد را می‌توان به دو گروه زمین شناسی و تکتونیکی تقسیم نمود. از نظر زمین شناسی منطقه‌ی بم دارای زمین شناسی جوانی است

مراجع

- Miyake, H., Iwata, T. & Irikura, K., 2001, "Estimation of rupture propagation direction and strong motion generation area from azimuth and distance dependence of source amplitude spectra", *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 28 (14): 2727- 2730.
- Mostafaei, H. & Kabeyasawa, T., 2005, "Investigation and analysis of damage to buildings during the 2003 Bam earthquake", *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol. 79 (3/4): 107-132.
- Nakamura, T., Suzuki, S., Sadeghi, H., Fatemi Aghda, S. M., Matsushima, T., Ito, Y., Hosseini, S. K., Gandomi, A. J. & Maleki, M. 2005, "Source fault structure of the 2003 Bam earthquake, southern Iran, inferred from the aftershock distribution and its relation to the heavily damaged area: Existence of the Arg-e-Bam fault proposed", *Geophys. Res. Lett.* 32 p:109308.
- Okumura, K., Kondo, H., Azuma, T., Echigo, T. & Hessami, K., 2004, "Surface effects of the December 26, 2003 Bam fault in southeastern Iran", *Reconnaissance Report on the 2003 Bam Earthquake in Southeast Iran*, 39-52.
- Sadeghi, H., Fatemi Aghda, S. M., Suzuki, S. & Nakamura, T. 2006, "3-D velocity structure of the 2003 Bam earthquake area (SE Iran): Existence of a low-Poisson's ratio layer and its relation to heavy damage", *Tectonophysics*, Vol. 417 (3-4): 269-283.
- Semih, S. T., Kaya, E., Engin, I. B. & Ozdemir, Z., 2002, "Seismic amplification at Avcilar, Istanbul", *Eng. Struc.*, Vol. 24 (5): 661-667.
- Somerville, P. G., 2003, "Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse", *Phys. Earth Planet Inter.* Vol. 137 (1-4): 201- 212.
- Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W. & Abrahamson, N. A., 1997, "Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity", *Seismological Res. Lett.*, Vol. 68 (1): 199- 222.
- Walker, R. & Jackson, J., 2002, "Offset and evaluation of the Gowk fault, S.E. Iran: a major intra-continental strike-slip system", *J. Struc. Geol.*, Vol. 24: 1677-1698.
- Wang, R., Xia, Y., Grosser, H., Wetzel, H. U., Zschau, J. & Kaufmann, H., 2004, "The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: precise source parameters from satellite radar Interferometry", *Geophys. J. Int.*, Vol. 159: 917-922.
- Woodcock, N. H. & Fischer, M., 1986, "Strike- slip duplexes", *J. Struc. Geol.*, Vol. 8: 123-131.
- Worthington, M. H., King, M. S. & Marsden, J. R., 2001, "Determining the damping factor of sedimentary rocks required for seismically designed structures", *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 38: 801-806.
- حسینی، س.ع.، ۱۳۸۴، بررسی اثر ساختگاه و پدیده های ژئوتکنیک لرزه ای منطقه ی بم پس از زمین لرزه ی ۵ دی ماه ۱۳۸۲، پایان نامه ی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۵۴ ص.
- حافظی مقدّس، ن. کمک پناه، ع.، ۱۳۸۳، "طبقه بندی اثرات ساختگاهی زمین لرزه ها (مطالعه ی موردی ایستگاه های شتاب نگاری شرق ایران)، مجله ی علوم و فنون، دانشگاه صنعتی شاهرود، شماره ی ۳۲: ۲-۲۶.
- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، قابل دسترسی در سایت [http:// www. bhrc. ac.ir](http://www.bhrc.ac.ir) (11 November 2008)
- مرکز آمار ایران، ۱۳۸۲، قابل دسترسی در سایت <http://www.sci.or.ir/persia/index.htm> (11 November 2008)
- Ahmadizadeh, M. & Shakib, H., 2004, "On the December 26, 2003, southeastern Iran earthquake in Bam region", *Eng. Struc.*, Vol. 26 (8): 1055-1070.
- Aki, K., 1993, "Local site effects on weak and strong ground motion", *Tectonophysics*, Vol. 218: 1251-1279.
- Aki, K. & Irikura, K., 1991, "Characterization and mapping of earthquake shaking for seismic zonation", *Proceedings of the Fourth International Conference on Seismic Zonation, EERI (Earthquake Engineering Research Institute)*, Vol. 1: 61-96.
- Alavi, M., 1991, "Tectonic map of the Middle East, Scale 1:5,000,000, 1 Sheet", *Geol. Surv. Iran*.
- Benjumea, B., Pullan, S. E., Hunter, J. A., Burns, R. A., Douma, M. & Eaton, D., 2001, "Near-surface seismic methods applied to site-response characterization at an earthquake monitoring station near London, Ontario", *Geol. Surv. Can.*, E7, 15p.
- Coburn, A. & Spence, R., 2002, "Earthquake Protection", *John Wiley & Sons, Ltd, England*, 420p.
- Fielding, E. J., Talebian, M., Rosen, P. A., Nazari, H., Jackson, J. A., Ghorashi, M. & Walker, R., 2005, "Surface ruptures and building damage of the 2003 Bam, Iran, earthquake mapped by satellite synthetic aperture radar interferometric correlation", *J. Geophys. Res.*, Vol. 110: B03332, doi: 10.1029/2004JB003299.
- Fu, B., Ninomiya, Y., Lei, X., Toda, Sh. & Awata, Y., 2004, "Mapping active fault associated with the 2003 Mw 6.6 Bam (SE Iran) earthquake with ASTER 3D images", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 92 (2): 153-157.
- Jafargandomi, A., Fatemi Aghda, S. M., Suzuki, S. & Nakamura, T. 2005, "Strong ground motions of the 2003 Bam earthquake, southeast of Iran (Mw= 6.5)", *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol. 79 (3/4): 47-57.
- MacMurdo, J., 1824, "Papers relating to the earthquake which occurred in India in 1819", *Philosophical Magazine*, Vol. 63: 105-177.