



## نقش عوامل زمین شناسی بر میزان تخریب زمین لرزه‌ی اخیر شهر بم

محمّد غفوری<sup>۱\*</sup>، غلامرضا لشکری پور<sup>۱</sup>، مسین صادقی<sup>۱</sup>، ناصر مافظی مقدّس<sup>۲</sup>، سید علی مسینی<sup>۱</sup>

۱) گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد. ghafoori@ferdowsi.um.ac.ir

۲) گروه زمین شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود

\*عنده دار مکاتبات

### هکیده

زمین لرزه‌ی 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 زمین لرزه پرتلفات ترین زمین لرزه در سراسر جهان در سال ۲۰۰۳ میلادی گزارش شده است. در اثر وقوع این زمین لرزه حدود ۷۰ درصد ساختمان‌های شهر بم تخریب و بیش از ۲۶۰۰۰ نفر کشته شدند. اگرچه ساختمان‌های منطقه از مقاومت لازم در برابر حرکات زمین لرزه برخوردار نبوده‌اند، اما با توجه به بزرگی زمین لرزه 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 کم مقاومت ریزدانه‌ی سیلتی با خاصیت خمیری کم می‌باشد. در این مقاله دلایل تخریب بالا به سازه‌های شهر با توجه به نقش عوامل زمین شناسی، تکتونیک و جهت‌یافتگی امواج لرزه‌ای و همچنین خصوصیات ژئوتکتیکی رسوبات آبرفتی داخل شهر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: بم، سیلت، ضخامت رسوبات، زمین شناسی، زمین لرزه.

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

M. Ghafoori<sup>1</sup>, G. R. Lashkaripour<sup>1</sup>, H. Sadeghi<sup>1</sup>, N. Hafezi-Moghaddas<sup>2</sup>, S. A. Hussaini<sup>1</sup>

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

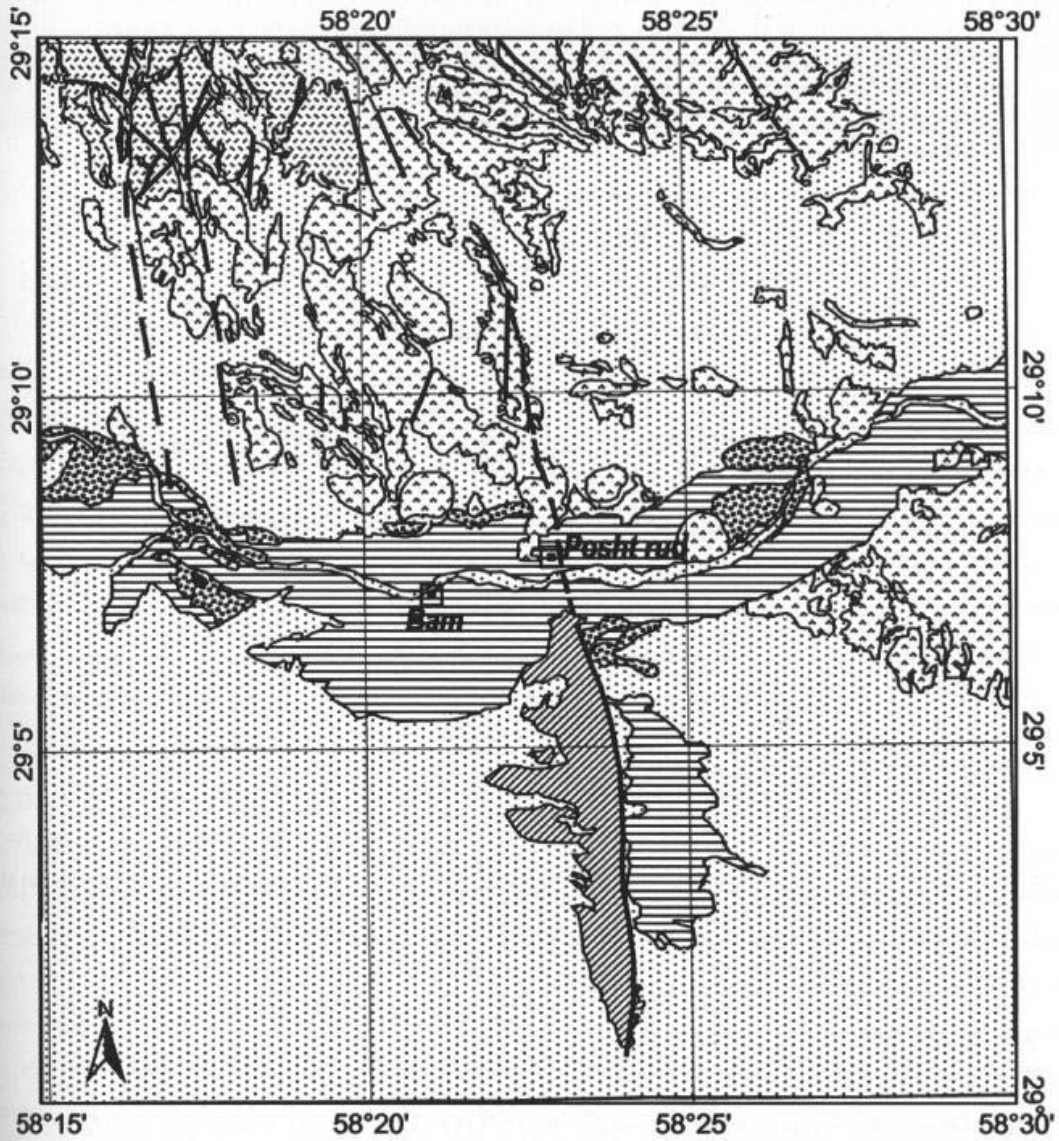
در روز جمعه پنج دی ماه سال هجری شمسی ۱۳۸۲ زمین لرزه ای قدرتمند به بزرگی  $M_w = 6.5$  ریشتر شهر بم و اطراف آن را لرزاند. مرکز سطحی این زمین لرزه توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ایران (Building and Housing Research Center, BHRC) در مکانی با مختصات جغرافیایی طول  $E 35^{\circ}$  و عرض  $N 29^{\circ} 12'$  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 (Shakib & Ahmadizadeh, 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 برخورداری 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 ژئوتکتیکی 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 انوسن 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



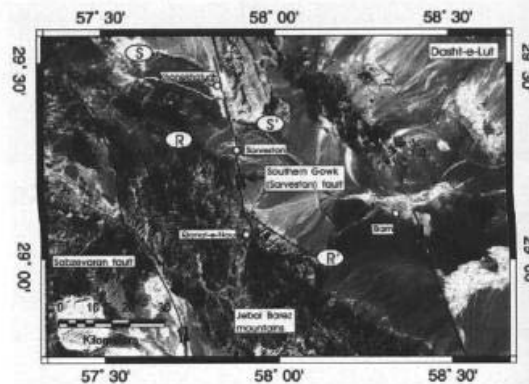
-  Qal: Alluvium, alluvial fans and recent alluvial terraces
-  Qm2: Buff to light brown- fan silts and argillaceous sandstones
-  Qm1: Yellow- tan to orange brown siltstones and sandstones
-  Ngm: Tan to red sandstones, siltstones and sandstone
-  Ev3: Well bedded ash- flow tuffs with subordinate, mainly trachyandesite and basaltic, lavas and volcaniclastic sediments
-  Ev2: Massive dacite and subordinate rhyolite and andesite lavas alternating with massive homogeneous ash- flow tuffs
-  Fault
-  Probability Fault
-  City and village

تصویر ۱- نقشه‌ی زمین شناسی منطقه‌ی مطالعاتی

سه کیلومتری شرق و شمال شهر بم و یک کیلومتری غرب شهر بروات می‌گذرد. طول این گسل بیش از ۵۰ کیلومتر است و حدود ۱۰ کیلومتر آن در رسوبات عهد حاضر به خوبی قابل ردیابی می‌باشد (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).

۱۰۰ متر خاک عبور می‌نمایند، اما لایه‌های خاک و زمین‌شناسی سطحی نقش بسیار مهمی در تعیین خصوصیات حرکت سطح زمین ایفا می‌کنند (Benjumea et al. 2001). دانسیته، سختی، ضخامت و سایر خصوصیات فیزیکی لایه‌های خاک همانند شدت حرکات لرزه‌ای از فاکتورهای مهم و موثر بر امواج لرزه‌ای می‌باشند (Semih et al. 2002). در اغلب ساختگاه‌ها، دانسیته و سرعت موج برشی لایه‌های نزدیک سطح زمین، کمتر از مقادیر آن‌ها در اعماق می‌باشد.

بررسی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی در منطقه نشان داده است که خصوصیات زمین‌شناسی (جنس و ضخامت خاک) و ژئوتکنیکی منطقه نقش مهمی در تخریب داشته‌اند و این عامل تحت عنوان اثرات زمین‌شناسی ساختگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد.



تصویر ۲- ساختارهای تکتونیک منطقه بر روی تصویر ماهواره‌ای (Walker & Jackson 2002)

#### ۴-۱-۱-۴- جنس خاک

به‌طورکلی سازه‌هایی که بر روی رسوبات ریزدانه قرار دارند نسبت به سازه‌هایی که بر روی رسوبات درشت دانه قرار دارند، در اثر زمین‌لرزه بیشتر تخریب می‌شوند. زیرا امواج لرزه‌ای در زمین‌های سخت و با مواد متراکم‌تر سریع‌تر حرکت می‌کنند، بنابراین به علت سرعت بیشتر امواج انرژی کمتری در این نوع خاک‌ها آزاد می‌شود. این مطلب از نظر ژئوتکنیکی به این معنی است که تخریب کمتری در چنین مناطقی به وجود می‌آید. برعکس در زمین‌های ضعیف و سست از سرعت امواج لرزه‌ای کاسته شده و مدت عبور موج از داخل آن‌ها افزایش می‌یابد، بنابراین انرژی زیادی در این مناطق آزاد شده، در نتیجه خسارت بیشتری نیز به سازه‌های منطقه وارد می‌شود. به همین دلیل مکرراً مشاهده می‌گردد که تخریب در مناطق پوشیده از رسوبات سست بیشتر از مناطق پوشیده توسط رسوبات سخت یا بسترهای سنگی می‌باشد (Coburn & Spence 2002). مثلاً در زمین‌لرزه‌ی سال ۱۹۵۷ دره‌ی مکزیکوسیتی شتاب ایجاد شده در خاک‌های دریاچه‌ای بستر دره تقریباً دو برابر ماسه‌ها و گراول‌های متراکم واقع در اطراف دره بوده است.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که خاک منطقه عمدتاً از نوع سیلتی است که در طبقه‌بندی متحد (Unified Soil Classification System) در کلاس ML قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج آزمایشات ژئوتکنیکی تعدادی از نمونه‌ها و بر اساس جدول

#### ۴- دلایل تخریب غیرمنتظره‌ی شهر بم

بررسی‌ها نشان می‌دهد که علت تخریب بیش از حد شهر بم را می‌توان به دو گروه تقسیم نمود (حسینی ۱۳۸۴). گروه اول دلایل زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، گروه دوم دلایل تکتونیک می‌باشد که در ذیل به شرح آن پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱- دلایل زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی

از جمله پارامترهای موثر در خرابی‌های ناشی از زمین‌لرزه اثرات زمین‌شناسی محلی می‌باشد (حافظی مقدّس و کمک‌پناه ۱۳۸۲). وقوع زمین‌لرزه‌های مخرب مکزیکوسیتی (۱۹۸۵)، لوما پریتا (۱۹۸۹)، نورت ریچ (۱۹۹۲)، کوبه (۱۹۹۵)، ازمیت (۱۹۹۵)، چی چی (۱۹۹۹)، منجیل (۱۹۹۰) و قائن (۱۹۹۷) اهمیت عامل زمین‌شناسی محلی در گستردگی و شدت خرابی زمین‌لرزه‌ها را بیش از پیش نمایان ساخت. به دلیل عبور امواج زمین‌لرزه از لایه‌های متعدد سنگ و خاک، شرایط فیزیکی این لایه‌ها بر امواج لرزه‌ای اثر می‌گذارند. 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

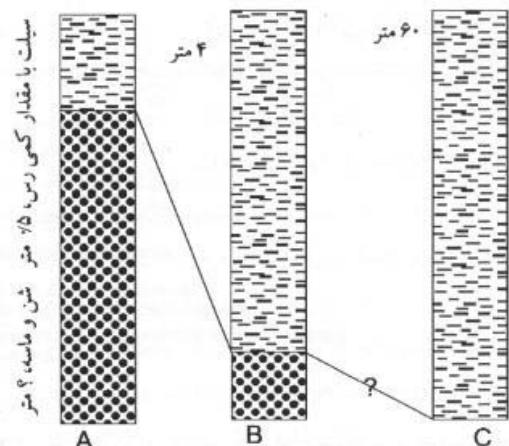
ردیف	موقعیت	$\rho(\text{g/cm}^3)$	LL (%)	PI	$\alpha(\text{kg/cm}^2)$
۱	پرنگاه گل بم	۱/۸	۱۷	۲۱	۰/۵
۲	پرنگاه گل بم	۱/۸	۱۱	۱۹	۰/۳
۳	حاشیه ی رودخانه پیدران	۱/۸	۱۱	۲۰	۰/۲
۴	حاشیه ی رودخانه پیدران	۱/۸	۱۱	۲۱	۰/۳
۵	کال خیابان ابن سینا	۱/۸	۱۰	۲۰	۰/۲
۶	ارگر	۱/۸	۱۱	۲۰	۰/۲
۷	دیوار	۱/۷	۱۰	۲۳	۰/۷

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 ۵/۵ متر) و به طرف شمال شهر بر ضخامت این رسوبات افزوده می گردد (پیش 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.

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 مورودو (MacMurdo 1824) خاطر نشان ساخت که در زمین لرزه ی ۱۸۱۹ کچ (Catch) در هندوستان، ساختمان هایی که بی 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 بی 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



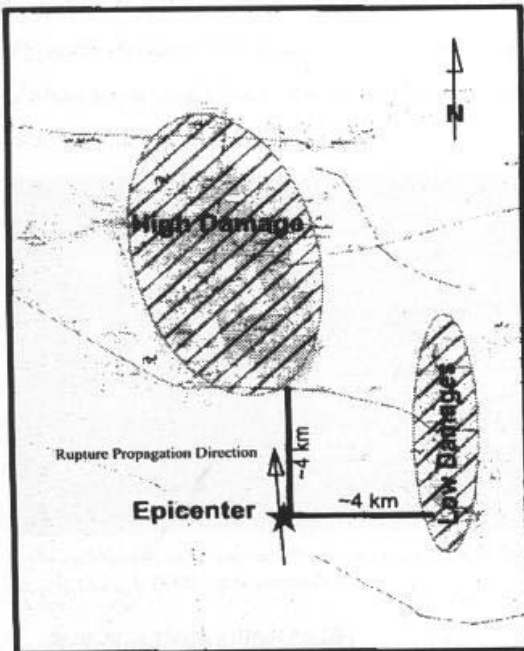
تصویر ۳- مقطع تپه لایه های رسوبی در شهر بم، (A) خیابان شهید رجایی، (B) خیابان امام خمینی، (C) خیابان ابن سینا



تصویر ۴- تقسیم بندی میزان خسارات وارده به ارگ قدیم بم. A: بی سنگی با میزان خسارت کم، B: بی بروی آبرفت با ضخامت کم با میزان خسارت زیاد، C: بی 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 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)

#### ۴-۲- 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.

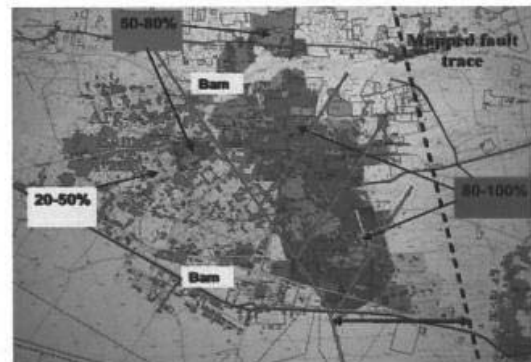
#### ۴-۲-۱- جهت یافتگی امواج (Directivity)

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

#### ۴-۲-۲- اثر شافه‌های فرعی گسل مسبب زمین‌لرزه

تحقیقات انجام شده توسط ناکامورا و همکاران (Nakamura et al. 2005) و ونگ (Wang et al. 2004) نشان داد که گسل مسبب زمین‌لرزه یک گسل پنهان در حدود سه و نیم کیلومتری غرب گسل بم بوده است. این گسل دارای شاخه‌های فرعی است که توسط ناکامورا و همکاران (Nakamura et al. 2005) سه شاخه‌ی فرعی آن شناسایی شد. به عقیده‌ی این محققین شاخه‌های فرعی این گسل در اعماق مختلف قرار دارند. به همین دلیل اثر سطحی آن‌ها مشاهده نشده است. این افراد، نام گسل مسبب زمین‌لرزه 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 می‌باشد. 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 می‌شوند. با روی هم اندازی نقشه‌ی تخریب منطقه و گسل ارگ بم به همراه شاخه‌های فرعی آن (تصویر ۶) مشخص می‌گردد که این شکستگی‌ها به طرف شرق بم جایی که بیشترین خسارات در آن دیده می‌شود، گسترش یافته‌اند. وجود این شاخه‌های فرعی و جهت گسترش آن‌ها یکی از دلایل وقوع تخریب زیاد در قسمت شرقی شهر بم نسبت به قسمت غربی آن می‌باشد.

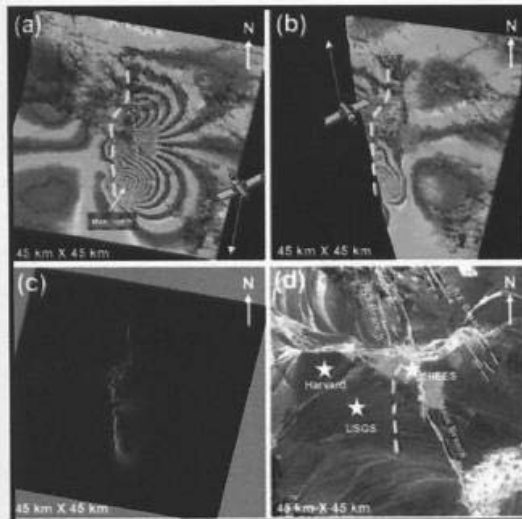


تصویر ۶- گسترش میزان خسارات در اثر زمین‌لرزه‌ی بم در اطراف گسل مسبب آن (انتقال از Nakamura et al. 2005)

#### ۴-۲-۳- مکانیزم و الگوی گسلش

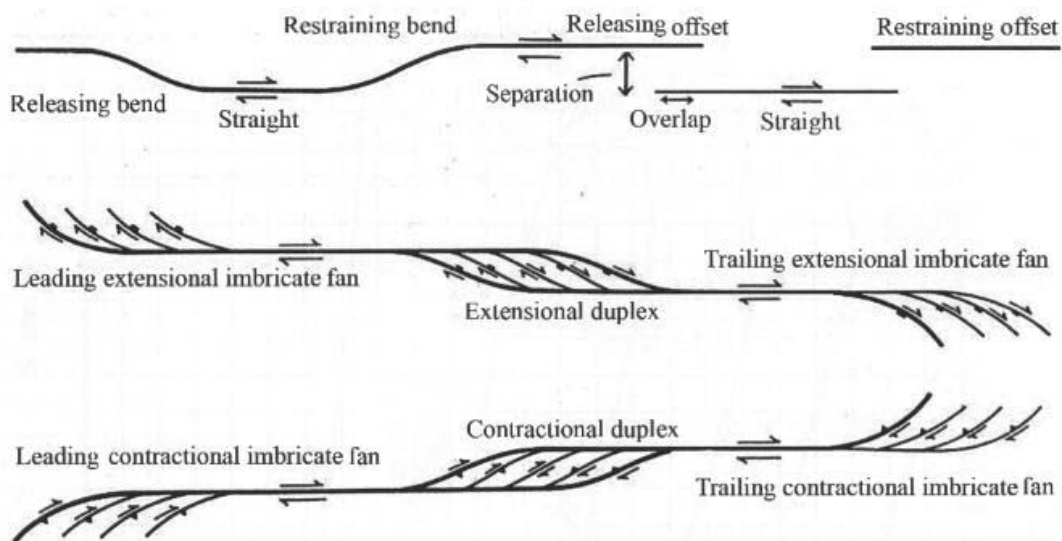
ونگ (Wang et al. 2004) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای،

گسل مسبب زمین‌لرزه 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) شاخه‌های فرعی را در این گسل شناسایی نموده‌اند که به طرف شرق و شمال شرق امتداد دارند (تصویر ۶).



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

فیلدینگ و همکاران (Fielding et al. 2005) در قسمت جنوبی شهر بم یک مدل با چهار قطعه‌ی چپ پل‌های را بر روی گسل بم شناسایی و معرفی نمودند. این مدل پلکانی نشان‌دهنده‌ی یک لغزش تپییک امتداد لغز در منطقه می‌باشد. تلفیق داده‌های ونگ و همکاران، ناکامورا و همکاران و فیلدینگ و همکاران (Nakamura et al. 2005, Fielding, Wang et al. 2005) معرف تصویر تپییک یک گسل امتداد لغز راستگرد می‌باشد (تصویر ۸). همان‌طور که در این تصویر مشخص است، گسل امتداد لغز راستگرد دارای تصویر تپییک Z و تعدادی شاخه‌ی فرعی می‌باشد. شاخه‌های فرعی در مرکز، ابتدا و انتهای گسل قرار دارند. با مقایسه‌ی تصویر ۸ و اشکال معرفی شده برای گسل ارگ بم مشخص می‌گردد که شاخه‌های 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 شاخه‌ها در اعماق مختلف زمین، اثر



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

تقریباً تمام انرژی امواج تا شعاع ۱۰ کیلومتری تخلیه شده است. بررسی‌ها نشان داده است که شرایط زمین‌شناسی و زمین‌ساختی منطقه در ایجاد میرایی موثر بوده است. به‌طور کلی هرچه سنگ پی یا مسیر عبور امواج متراکم‌تر باشد سرعت عبور موج در آن بیشتر است و در نتیجه امواج انرژی کمتری را از دست می‌دهند، 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 می‌دهند که سبب میرا شدن موج می‌گردد. هنگامی که امواج P یا S از میان گسله‌ها یا ترک‌های موجود در سنگ نیز عبور می‌کنند انرژی خود را از دست داده و میرایی می‌شوند (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 خردشده‌ی گسل) است.

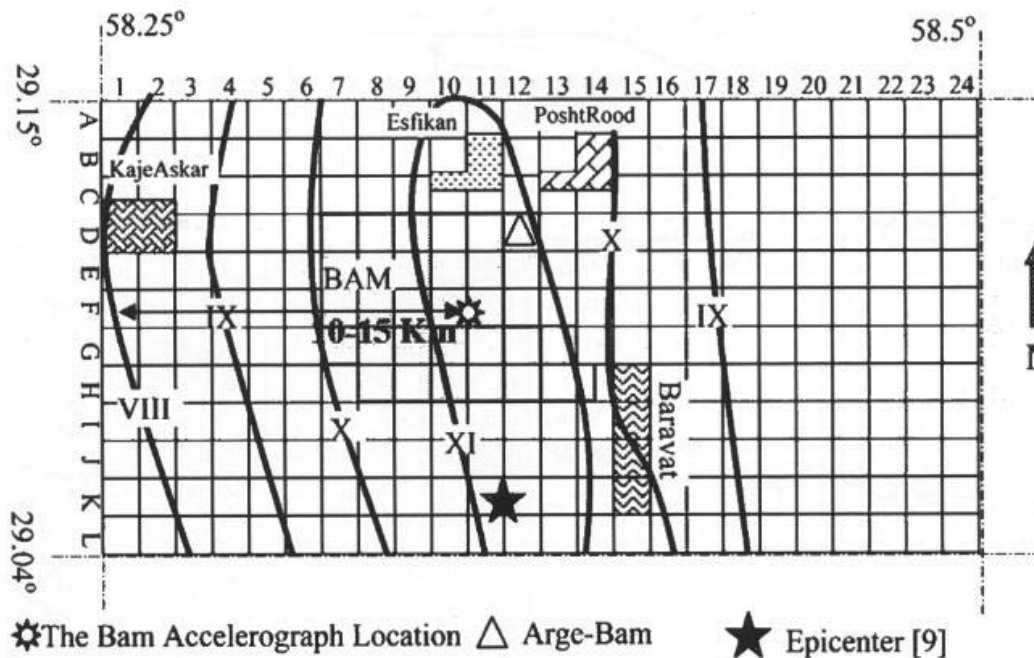
قرار گرفتن منطقه‌ی مطالعاتی در حاشیه‌ی یک بلوک تکنونیک‌ی فعال (بلوک لوت) و عبور گسل‌های فعالی همچون گسل گوک و سبزواران از نزدیکی آن و گسل بم از داخل منطقه، می‌تواند سنگ پی را تحت تأثیر قرار دهد. به این ترتیب که حرکات گسل‌های مذکور باعث ایجاد زون‌های برشی در اطراف آن‌ها شده است. زون‌های برشی، زون‌های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

سطحی این شاخه‌ها در منطقه مشاهده نمی‌شود. به‌طور کلی قسمت میانی این نوع گسل‌ها مرکز تجمع تنش بوده و در صورت وقوع حرکت در آن، بیشترین انرژی از این قسمت آزاد می‌شود و در نتیجه بیشترین تخریب نیز در این قسمت روی می‌دهد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، شهر بم بر روی این قسمت از گسل قرار داشته و این می‌تواند یکی از دلایل تخریب بیش از حد این شهر نسبت به سایر قسمت‌ها باشد.

#### ۴-۲-۴- فرد شدگی سنگ پی

با توجه به بررسی‌های صحرایی و تصویر ۹ مشخص گردید که وسعت خرابی‌های زمین‌لرزه‌ی بم محدود به شعاع ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر اطراف منطقه (شدت VIII) می‌باشد و در نقاط دورتر از آن آثار خرابی قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. اگر وسعت خرابی‌های این زمین‌لرزه را با زمین‌لرزه‌های دیگری همانند رودبار- منجیل ایران (۱۳۶۹) و گجرات هند (۲۰۰۱) که منحنی هم‌شدت VIII آن‌ها تا شعاع ۱۰۰ کیلومتر گسترش یافته است مقایسه گردد در می‌یابیم که گسترش خرابی‌های زمین‌لرزه‌ی بم نسبت به زمین‌لرزه‌های ذکر شده بسیار محدود و کم می‌باشد. این امر نشان‌دهنده‌ی وجود میرایی (Damping) بسیار شدید در زمین‌لرزه‌ی بم می‌باشد، به‌طوری‌که





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 سیلته 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 موثر 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

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., Gresser, H., Wetzell, 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.

## مراجع

حسینی، س.ع.، ۱۳۸۴، بررسی اثر ساختگاه و پدیده‌های ژئوتکنیک لرزه‌ای منطقه‌ی بم پس از زمین‌لرزه‌ی ۵ دی‌ماه ۱۳۸۲، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۵۴ ص.

حافظی مقدس، ن. کمک پناه، ع.، ۱۳۸۳، طبقه‌بندی اثرات ساختگاهی زمین‌لرزه‌ها (مطالعه‌ی موردی ایستگاه‌های شتاب نگاری شرق ایران)، مجله‌ی علوم و فنون، دانشگاه صنعتی شاهرود، شماره‌ی ۲۶-۲: ۳۲.

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، قابل دسترسی در سایت

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.