

## گسل‌ها و شکستگی‌های ناشی از زمین‌لرزه بم (۵ دی ۱۳۸۲)

دکتر حسین معاریان<sup>۱</sup>، دکتر مهدی زارع<sup>۲</sup> و مجید میبدیان<sup>۳</sup>

### چکیده

تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی، شکل کلی گسل مسبب زمین‌لرزه ۵ دی ماه ۱۳۸۲ بم، واقع در جنوب شرقی ایران را که حدود ۳۳۰۰۰ کشته و خرابی بسیاری برجای گذارد، مشخص نمود. تصاویر سه‌بعدی قبل و بعد از زلزله، که از انتشار حرارتی پیشرفته و انعکاس رادیومتری، با امواج مرئی و مادون قرمز به دست آمده، و همچنین تحقیقات دیگری که با استفاده از نقشه‌های ترکیبی انجام شده است، توسعه اثر سطحی گسلش جدیدی را در ارتباط با زلزله بم پیشنهاد می‌نماید. در این مقاله نتایج بررسی مستقیم و برداشت صحرائی گسل‌ها و شکستگی‌های ناشی از زمین‌لرزه بم ارائه شده است. شکستگی‌های کششی ایجاد شده در محدوده اثر سطحی گسلش جدید، جهت تنش‌های برجای فعال در منطقه بم را،  $N 32E$  به دست می‌دهد. همچنین تلفیق یافته‌های بررسی حاضر با آنچه توسط مطالعات دورسنجی ارائه شده، شیب زیاد اثر سطحی گسلش جدید را به سمت شرق، مشخص می‌نماید.

کلید واژه‌ها: گسیختگی سطحی، گسل بم، مدل ساختاری، تنش، زلزله بم.

## Faults and fractures caused by Bam Earthquake, 2003 Dec. 26

Dr Hossein Memarian, Dr Mehdi Zare and Majid Maybodan.

### Abstract

Satellite pictures and aerial photos showed the general figure of the causative fault of Bam earthquake, 2003 Dec. 26, in the southeast of Iran that left about 33000 victims and heavy damages. Three dimensional pictures collected before and after the earthquake by advanced thermal distribution and radiometric reflection, or visible waves and infrared, and other investigations accomplished by compound maps, suggest the development of a new fault due to Bam earthquake. In this paper, the results of field study and mapping of the faults and fractures developed by Bam earthquake are presented. The tensile fractures, created in the new fault zone, define the active in situ stress direction in Bam region as  $N32E$ . Combining the findings of present study with what presented by telemetric studies identifies the steep slope of the new fault toward east.

**Keywords:** Bam Fault, Bam Earthquake, Structural Model.

۱ استاد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، memarian@ut.ac.ir

۲ دانشیار پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، mzare@iiees.ac.ir

۳ دانش آموخته دانشکده فنی دانشگاه تهران و دانشجوی دوره دکترای پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،

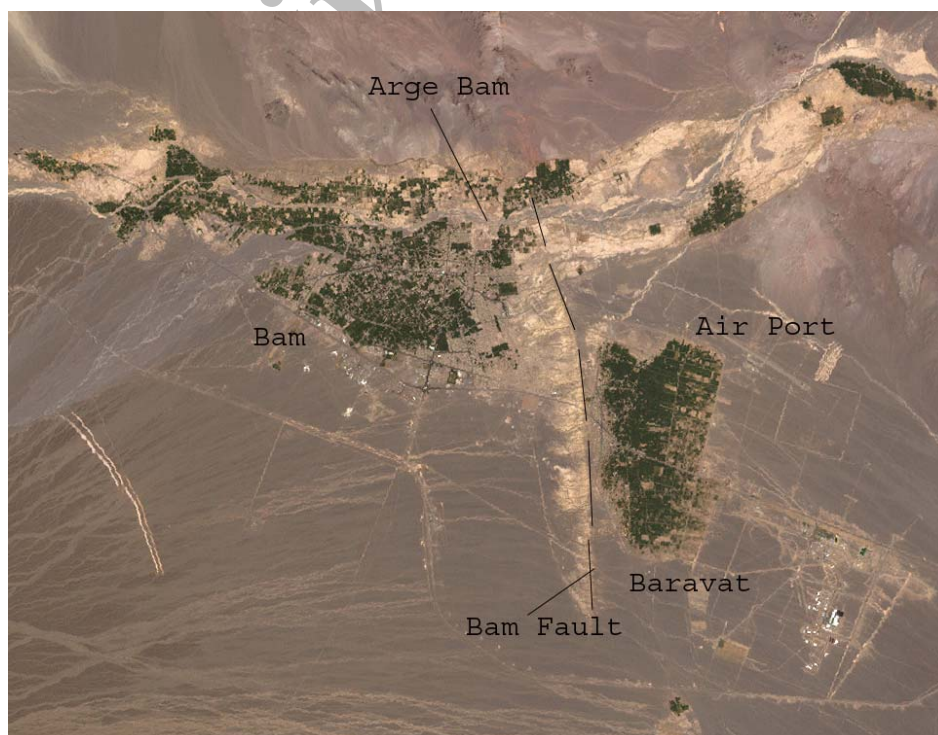
farafizh@yahoo.com

## مقدمه:

زمین‌لرزه‌ای، به بزرگی  $6/6$  Mw و به مرکز کانونی  $29/08^{\circ}$  N و  $58/38^{\circ}$  E، در تاریخ ۵ دی‌ماه ۱۳۸۲ در ساعت ۵:۲۶:۵۲ به وقت محلی، در نزدیکی شهر بم، به وقوع پیوست. شهرستان بم در جنوب شرقی استان کرمان و در بین راه‌های ارتباطی دو استان کرمان به سیستان و بلوچستان واقع شده است (شکل ۱ و ۲). مورخین پایه‌گذاری شهر بم را به ابتدای دوران ساسانی منسوب می‌کنند. موقعیت نظامی، راه‌های تجاری، رونق کشاورزی، و از همه مهم‌تر عدم وقوع زمین‌لرزه‌ای ویرانگر، دلایل اصلی پایداری طولانی مدت شهر بم در پهنه کویر می‌باشد. با این حال پس از یک نبود لرزه‌ای، زمین‌لرزه سال ۱۳۸۲، طبق آمار رسمی حدود ۳۳۰۰۰ کشته و حدود ۶۰۰۰۰ مجروح برجای گذارد و بیش از ۷۰ درصد ابنیه شهر بم و بروات، از جمله ارگ ۲۰۰۰ ساله آن، ویران شدند. گسل مسبب این زمین‌لرزه، گسل بم، با امتداد شمالی جنوبی در حد فاصل بم و بروات می‌باشد. ویژگی‌های عمومی زمین‌لرزه بم را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد: سازوکار ژرفی زلزله بم از نوع گسل

امتداد لغز با جابجایی امتدادی راستگرد، عمق زلزله در حدود ۸ کیلومتر، فاصله مرکز ثبت شده از ایستگاه بم ۱۲ کیلومتر و افت تنش ۴۸۰ بار تخمین زده می‌شود (عشقی و زارع، ۲۰۰۳). دشت بم از آبرفت‌های کواترنری پوشیده شده و عمق آبرفت بر اساس بررسی‌های انجام شده، از ۰ تا ۴۰ متر متغیر است (معمدی و همکاران، ۲۰۰۵). در قسمت شرق شهر، و در حد فاصل بین بم و بروات، رخنمون‌های آبرفت‌های کواترنری پسین بیرون‌زده در راستای گسل اصلی بم، پرتگاهی (افراز) به ارتفاع ۲۰ متر را به وجود آورده است.

در این مقاله، به دنبال معرفی گسل بم و مرور مجموعه بررسی‌هایی که پس از زمین‌لرزه بم توسط گروه‌های تحقیقاتی مختلف، عمدتاً با استفاده از روش‌های دورسنجی صورت گرفته، نتایج مشاهدات مستقیم و برداشتهای صحرائی گسل بم و شکستگی‌های همراه آن ارائه شده است. همچنین با تلفیق اطلاعات به دست آمده، مدلی سه بعدی برای گسل بم و جهت‌یابی تنش‌های فعال در منطقه، پیشنهاد شده است.



شکل (۱): شهر بم و گسیختگی‌های آن بر روی عکس هوایی

## گسل بم

حرکت همگرای صفحه عربستان به سمت شمال، باعث ایجاد برخوردهای مایل از نوع گسل معکوس و چین‌خوردگی و نیز برخورد موازی از نوع گسل امتداد لغز در اقصا نقاط کشورمان شده است (بربریان، ۱۹۹۹). جهت‌یابی نیروهای وارده به فلات ایران از سوی صفحه عربستان، حرکت امتدادلغز راستگرد را برای دسته‌ای از گسل‌ها با راستای شمال‌غربی- جنوب شرقی تا حتی شمالی جنوبی، رقم زده است.

گسل بم، با راستای شمال، شمال غرب و طول حدود بیش از ۱۵۰ کیلومتر، پیش از زمین‌لرزه اخیر به نقشه در آمده و با پرتگاه (افراز) مشخصی که دارد به خوبی بر روی زمین قابل تشخیص است. بررسی‌های قبلی و مطالعاتی که پس از زمین‌لرزه صورت گرفته، حرکت امتداد لغز راستگرد را برای این گسل پیشنهاد می‌کند (بیهونگ فو و همکاران، ۲۰۰۳). این گسل بر اساس شکل‌گیری افراز گسلی و همچنین با توجه به سازوکار ژرفی زلزله بم، دارای یک مولفه فشاری نیز است.

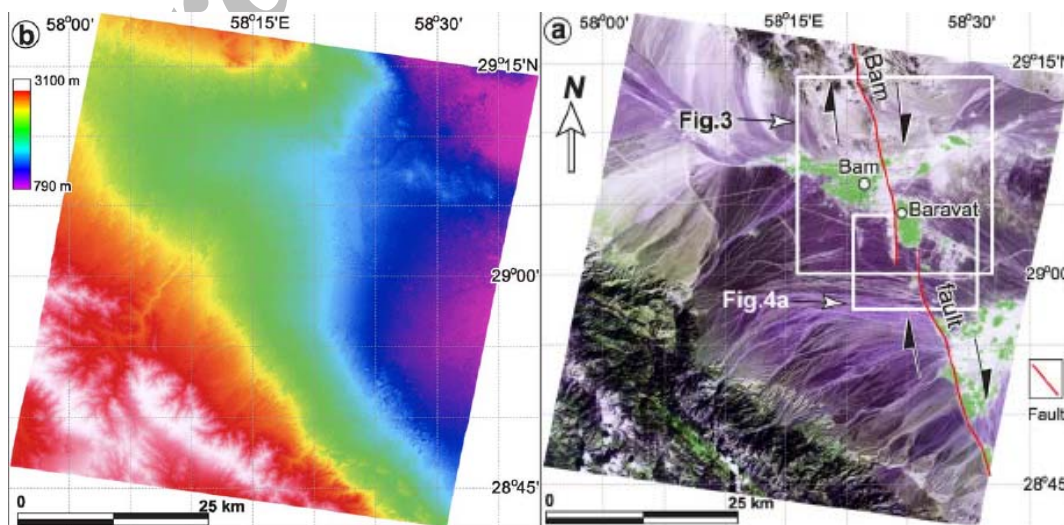
به دنبال وقوع زمین‌لرزه سال ۱۳۸۲، گسل بم بار دیگر مورد توجه محققین قرار گرفت. اطلاعات اولیه در مورد این گسل به وسیله عکس‌های هوایی و همچنین تصاویر ماهواره‌ای دوبعدی و سه‌بعدی، گردآوری شده است.

گروه دیگر از تحقیقات بر تصویر ترکیبی متمرکز شدند که از ترکیب تصاویر ماهواره‌ای اخذ شده قبل و بعد از زلزله به دست می‌آید، که در این تصاویر نیز گسل بم به طور کامل مشخص است ولی گسیختگی‌های جدیدی در این تصاویر مشخص نمی‌باشد. نقشه‌های ترکیبی به دست آمده از ماهواره‌های مخصوص، وجود یک اثر سطحی گسلش دیگر در این منطقه را نشان می‌دهند.

## تصاویر دو بعدی از گسل بم

تصاویر دوبعدی ماهواره‌ای قبل و بعد از زلزله و همچنین مدل ارتفاعی محل، که از انتشار حرارتی پیشرفته و انعکاس رادیومتری آستر (ASTER)، با امواج قابل مشاهده و مادون قرمز به دست آمده‌اند، یک گسل فعال همراه با ایجاد گسیختگی در هنگام زلزله را مشخص می‌کنند (شکل ۲).

در تصاویر مستقیم دوبعدی ماهواره‌ای آستر، یک خط گسل به طول ۶۵ کیلومتر با امتداد شمال- شمال غرب در حدفاصل شهرهای بم و براوات به چشم می‌خورد (شکل ۲). این گسل از دو بخش شمالی و جنوبی تشکیل شده است. دو انتهای قطعات شمالی و جنوبی به فاصله حدود ۴ کیلومتر از هم قرار گرفته و حدود ۳ کیلومتر هم پوشی دارند (شکل ۲).

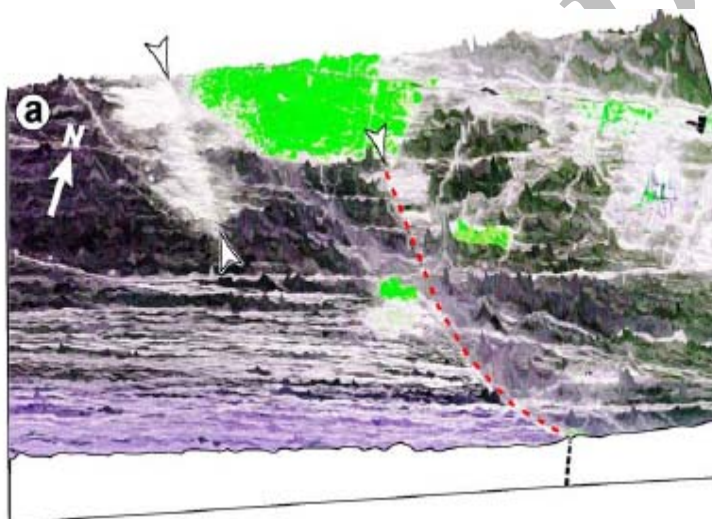


شکل ۲: گسل بم (الف) و مدل ارتفاعی آن (ب) (بیهونگ فو و همکاران، ۲۰۰۳).

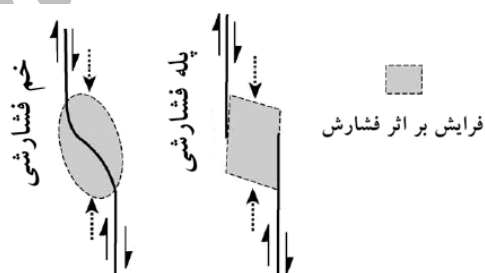
## تصاویر سه بعدی از گسل بم

تصاویر سه بعدی گسل بم، از ترکیب تصاویر دو بعدی و مدل ارتفاعی به دست آمده اند (بیهونگ فو و همکاران، ۲۰۰۳). قسمت شمال گسل بم از یک افراز با شیب نسبتاً زیاد تشکیل شده است. این سیستم سنگ‌های پیش از کواترنر شمال شهر بم را قطع کرده و رسوبات کواترنری پسین، بین شهرهای بم و براوات، را جابجا می‌کند. این عارضه زمین‌ریختی، نتیجه‌ای از تغییرات انباشتی طولانی مدت در کواترنر پسین می‌باشد (بیهونگ فو و همکاران، ۲۰۰۳).

بخش جنوبی گسل، در جنوب شرقی شهر بم قرار گرفته است. در این قسمت، یک افراز با شیبی به سمت شرق باعث جابجایی انباشته‌های آبرفتی کواترنر شده است (شکل ۳). فضای خالی بین محدوده پوشش یافته مابین قطعه شمالی و جنوبی گسل بم، یک بخش تحت فشار و منقبض شده را به وجود آورده است (شکل ۴) (بیهونگ فو و همکاران، ۲۰۰۳).



شکل (۳): نمودار سه بعدی بخش جنوبی گسل بم (بیهونگ فو و همکاران، ۲۰۰۳).



شکل (۴): ایجاد فضای انقباضی بین دو بخش گسل راست‌الغز راستگرد بم (بیهونگ فو و همکاران، ۲۰۰۳)

## پردازش نقشه ترکیبی

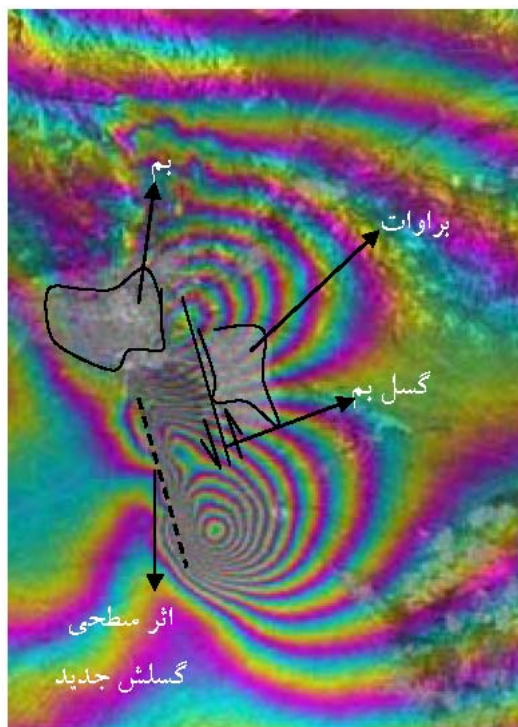
با استفاده از ماهواره‌های مخصوص، امواج الکترومغناطیسی به محدوده مورد نظر فرستاده شده، و دامنه و فاز موج‌های برگشتی ثبت گردیده است. با کسب اطلاعات مربوط به قبل و بعد از زلزله، و به دست آمدن

تغییر فازهای ناشی از وقوع زلزله، یک نقشه ترکیبی از منطقه تهیه گردیده (طالبیان و همکاران، ۲۰۰۳) که تغییر فازهای به وجود آمده را مشخص می‌کند (شکل ۵). خط چین نازک سیاه در جنوب شهر بم نشان‌دهنده اثر سطحی گسلش جدیدی است که در تحقیقات ابتدایی مخفی مانده



صورتی که در قسمت جنوب شهر بم، تغییر فازها در کنار اثر سطحی گسلش جدید متمرکز شده‌اند.

و به این ترتیب، تعیین محل می‌گردد. با دقت در نقشه ترکیبی مشخص می‌شود که در قسمت شمال شهر بم، تغییر فازها بیشتر در کنار گسل اصلی بم متمرکز است، در



شکل (۵): نقشه ترکیبی از منطقه بم

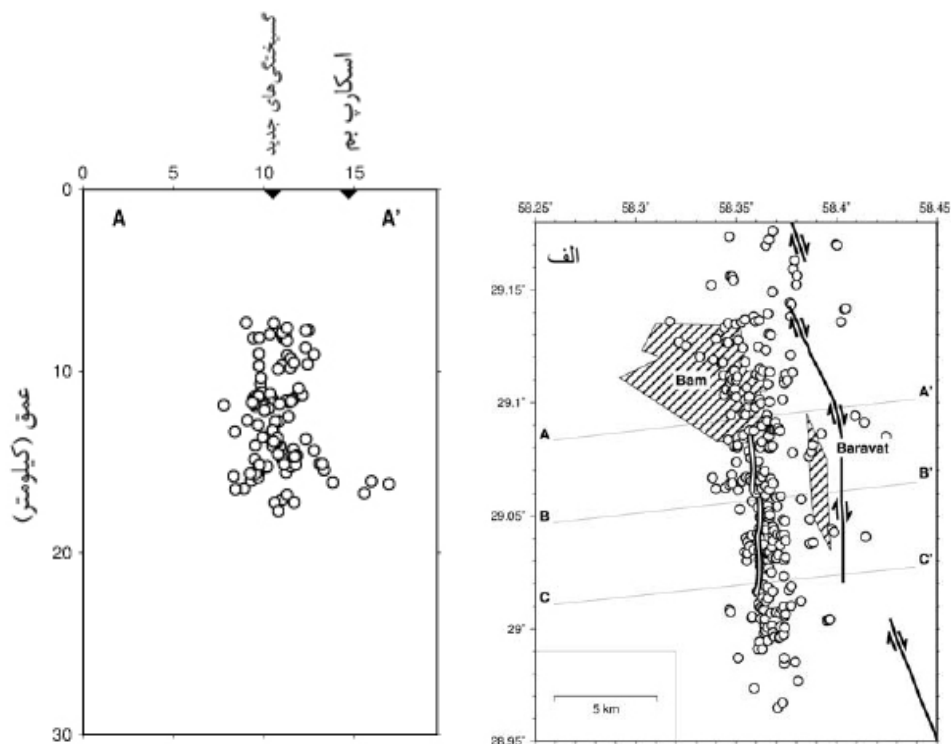
لرزه‌نگاری با ۲۳ ایستگاه در ناحیه رومرکزی زلزله بم برای مطالعه لرزه‌خیزی پس‌لرزه‌ها نصب شد (تاتار و همکاران، ۲۰۰۵). در نهایت، با توجه به نگاشت‌های به دست آمده از این شبکه در عمق، به این فرضیه رسیدند که گسل فعال در عمق افزای (اسکارپ) بم قرار گرفته است و این گسل در سطح بریده نشده است، همچنین به این نتیجه رسیدند که گسیختگی در عمق گسل بم شروع شده و سپس به بخش‌های قائم بیشتری با عمق کم، حدود ۵/۳ کیلومتر منشعب شده تا به سطح و گسیختگی‌های سطحی می‌رسد (شکل ۶).

در نقشه ترکیبی منطقه بم (شکل ۵)، چهار ناحیه در اطراف اثر سطحی گسلش جدید قابل تشخیص است. در قسمت شمال غرب، حرکت زمین ۱۵ سانتی متر در خلاف جهت حرکت ماهواره بوده است. در قسمت جنوب شرق نیز حرکت زمین معادل ۳۰ سانتی متر در سمت حرکت ماهواره بوده است. این نوع جابه جایی نشان‌دهنده نوع سیستم امتداد لغز گسل بم است. پس از انتشار این یافته، گروه‌های تحقیقاتی دیگری نیز اثر سطحی گسلش جدید را ثبت و صحت نتایج به دست آمده به وسیله نقشه ترکیبی، را تایید کردند.

## شناسایی گسل فعال بم به وسیله ثبت

### پس لرزه‌ها

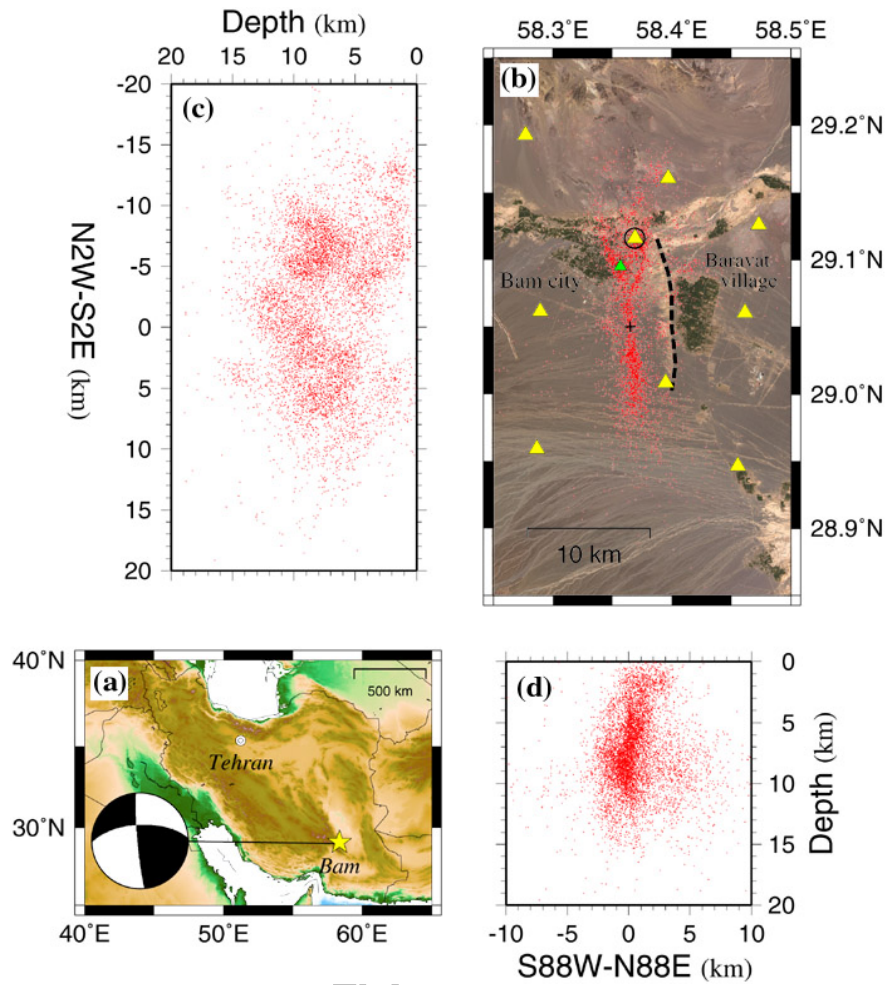
از تاریخ ۸ دی تا ۱۰ بهمن سال ۱۳۸۲، یک شبکه



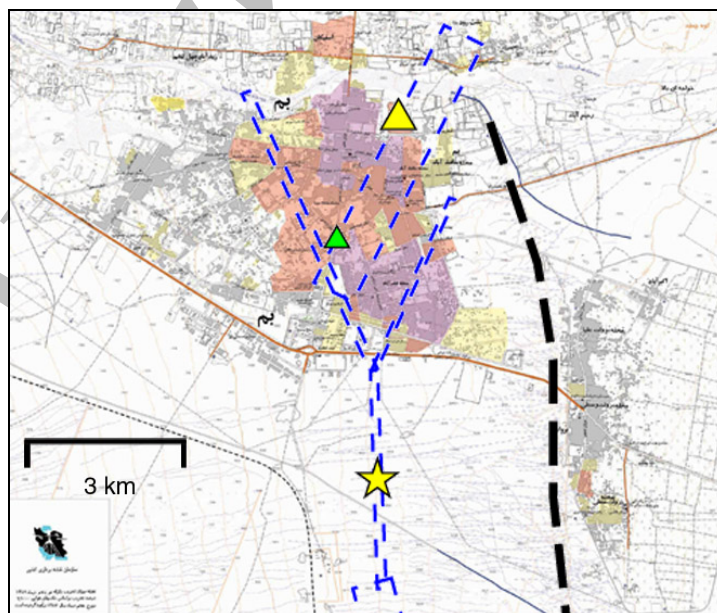
شکل (۶): نقشه پس‌لرزه‌های ثبت شده به وسیله ایستگاه‌های لرزه‌نگاری (الف)، نگاشت‌های ثبت شده در عمق (ب)

بررسی دقیق اطلاعات کسب شده از این شبکه تا ۱۷ اسفند ۱۳۸۳، نتایج جالبی را درباره گسل فعال بم به دست داده است. یکی از این یافته‌ها، که با استفاده از نرم افزاری خاص به دست آمد، موقعیت اثر سطحی گسلش جدید در کنار گسل بم بود. در شکل ۸ موقعیت اثر سطحی گسلش جدید که با توجه به پس‌لرزه‌ها به دست آمده، نشان داده شده است.

گروهی دیگر از محققان نیز برای نشان دادن گسل فعال بم از روش ثبت پس‌لرزه‌ها استفاده کردند (ناکامورا و همکاران، ۲۰۰۴). برای این منظور، شش هفته پس از لرزش اصلی، ۹ ایستگاه موقت در اطراف و داخل شهر بم نصب شد. هر ایستگاه با یک دستگاه لرزه‌نگار بسیار حساس از نوع سرعت سنج، تجهیز شد. همچنین یک دستگاه شتاب سنج سه مولفه، در ایستگاه ارگ بم نصب شد و از این مرکز، پس‌لرزه‌ها ثبت گردیدند (شکل ۷).



شکل (۷): محل نصب ایستگاه‌های ثبت پس‌لرزه و کانون پس‌لرزه‌ها در نقشه و نیم‌رخ (ناکامورا و همکاران، ۲۰۰۴).



شکل (۸): نقشه به دست آمده از ثبت پس‌لرزه‌ها (ناکامورا و همکاران، ۲۰۰۴).

سطحی جدید، به دلیل ناشناخته بودن آن، ایستگاه‌های بیشتری برداشت شد. در جدول ۱، ایستگاه‌های برداشت، از شماره ۳۲ به بعد، مربوط به گسیختگی‌های محدوده اثر سطحی گسلش جدید است.

در راستای اثر سطحی گسلش جدید هیچ‌گونه شکستگی ممتد یا جابه‌جایی قابل توجهی دیده نشد. ولی تعداد قابل توجهی شکستگی تازه و نسبتاً کوتاه در آبرفت‌ها برداشت شد (جدول ۱). این شکستگی‌ها از شمال تا حدود یک کیلومتری میدان ارک شهر بم ادامه دارند (شکل ۸). طول شکستگی‌ها از ۱۰ تا ۱۲۰ متر متغیر است. متوسط طول شکستگی‌های برداشت شده ۶۸ متر است. میزان بازشدگی این شکستگی‌ها از ۰/۵ تا ۱۷ سانتی متر است (شکل ۹). جابه‌جایی امتدادلغز مشخصی در این شکستگی‌ها مشاهده نشده است. طول شکستگی‌ها و میزان بازشدگی و جابه‌جایی در آنها به سمت جنوب افزایش، و در محدوده شهر بم کاهش می‌یابد (شکل ۹). در یک مورد (ایستگاه ۳۸)، متر نواری تا عمق ۲۷۰ سانتی متری، در داخل شکاف باز شده پایین رفت. شکستگی‌های برداشت شده در این محدوده، تماماً دارای راستای شمال‌شرقی، از ۱۵ تا ۴۰ درجه، می‌باشند. متوسط امتداد این شکستگی‌ها  $N 32 E$  می‌باشد. زمین در بخش شرقی اغلب شکستگی‌ها، بالا آمده است. در چند مورد نیز بخش غربی شکستگی بالازدگی نشان می‌دهد (جدول ۱). میزان بالازدگی حداکثر ۲۵ سانتیمتر است. در شکل ۱۱ شکستگی‌های برداشت شده در جنوب شهر بم، نمایش داده شده است. به منظور ثبت دقیق‌تر مختصات شکستگی‌های منسوب به گسیختگی‌های سطحی جدید، این عوارض نیز رسم شده اند (شکل ۱۰).

در برداشت قسمت شمالی شهر بم (روستاهای پشت رود و اسفیکان و همچنین شمال ارگ بم)، شکستگی ناشی از زلزله به دست نیامد. در این مناطق تغییرشکل‌ها به صورت‌هایی غیر از شکستگی بوده است.

### ۳- برداشت صحرائی شکستگی‌های ناشی از زمین لرزه بم

اطلاعاتی که در مورد گسل بم و اثر سطحی گسلش جدید موزی آن، پس از زمین‌لرزه سال ۱۳۸۲ انتشار یافت، عمدتاً متکی به داده‌های کسب شده توسط روش‌های مختلف دورسنجی بوده است. از اینرو برداشت‌های صحرائی جهت ثبت محل دقیق و مشخصات گسل‌ها و گسیختگی‌های ناشی از زمین لرزه بم، در تابستان ۱۳۸۳ صورت گرفته است. به این منظور منطقه مورد مطالعه، به وسعت ۱۰۰ کیلومتر مربع، به سه بخش: گسل بم، محدوده شمال شهر بم و محدوده جنوب شهر بم و اثر سطحی گسلش جدید تقسیم شد. در طی عملیات صحرائی، تمام بخش‌های هر یک از این سه منطقه به دقت مورد بازبینی قرارگرفت و کلیه تغییر شکل‌های ناشی از زمین‌لرزه، از جمله گسل‌ها، شکستگی‌ها، فرونشست‌ها، بالازدگی‌ها، ریزش‌ها و لغزش‌ها برداشت گردید. برای ثبت دقیق موقعیت محلی این عارضه‌ها، از یک GPS نوع Geko 101 Garmin با دقت حدود ۳ متر، استفاده شده است. برداشت‌ها در صحرا به رایانه قابل حمل منتقل، و توسط نرم افزارهای Surfer و AutoCAD به نقشه تبدیل شدند. در مقاله حاضر تنها اطلاعات گردآوری شده در مورد شکستگی‌ها و گسل‌ها گزارش می‌شود. در این بررسی‌ها جمعاً ۶۷ شکستگی برداشت شد که قسمت عمده آن‌ها، یعنی ۳۵ عدد، در محدوده اثر سطحی گسلش جدید بوده است.

در مورد هر گسیختگی مشخصات مختلفی چون طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، طول و امتداد شکستگی، میزان بازشدگی، جابه‌جایی و بالاخره توضیحات تکمیلی در مورد مشخصات نقطه مورد برداشت، ثبت شده و مجموعه این اطلاعات در جدول ۱ فراهم آمده است. در ایستگاه‌های مختلف، عکس‌هایی نیز از گسیختگی‌ها گرفته شد. برای محدوده گسیختگی‌های

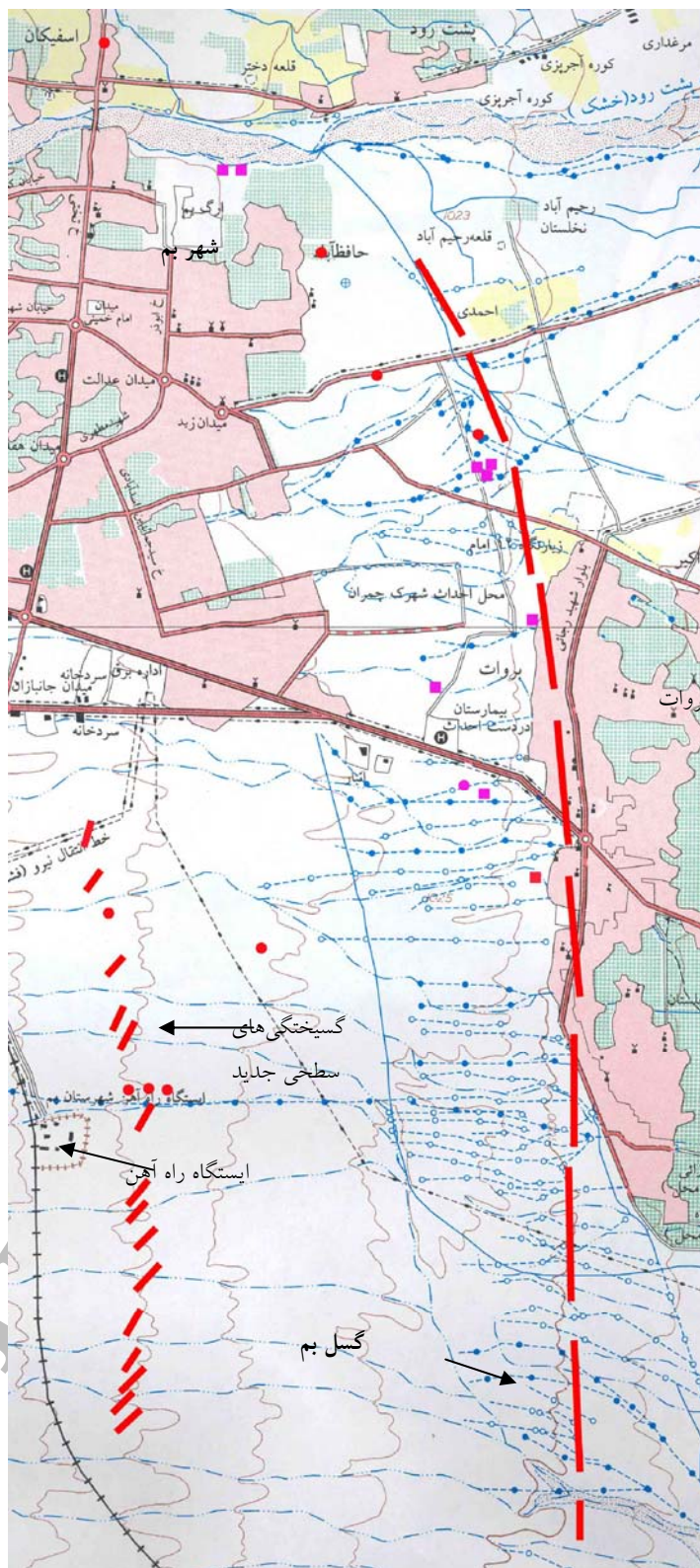


جدول (۱): مشخصات گسیختگیهای برداشت شده ناشی از زلزله بم

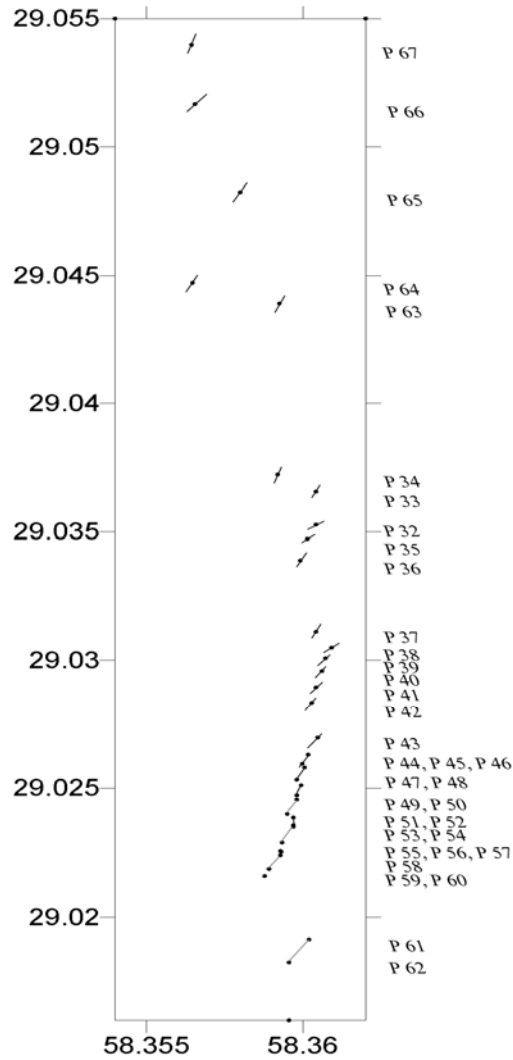
نام نقطه	مختصات جغرافیایی			بازشدگی (mm)	جابجایی (mm)	طول (m)	امتداد	بالا آمدگی و توضیحات (cm)
	طول	عرض	ارتفاع					
P1	29° 04' 09.8"	58° 23' 56.2"	1017	5			N40E	
P2	29° 04' 11.8"	58° 23' 56.1"	1021					
P3	29° 04' 13.8"	58° 23' 52"	1025	20	10		N35E	
P5	29° 04' 13.96"	58° 23' 50"	1029					
P6	29° 04' 30"	58° 22' 50.4"	1049	10	No		N15E	
P7	29° 04' 29.3"	58° 22' 54.1"	1046	60	No		NE	
P8	29° 04' 23.7"	58° 23' 12.7"	1044	::mm	::mm		N20E	
P9	29° 04' 17.6"	58° 23' 23.8"	1042				N40E	
P10	29° 04' 14.4"	58° 23' 22.2"	1040				S60E	
P11	29° 04' 6.3"	58° 23' 29.9"	1041	10			WE	
P12	29° 03' 59.1"	58° 23' 41.6"	1035	30			S60W	
P13	29° 03' 50.9"	58° 23' 44.2"	1039	50-100			S60W	
P14	29° 03' 43.9"	58° 23' 46.1"	1036					
P15	29° 03' 43.9"	58° 23' 46.1"	1036					
P16	29° 04' 38.1"	58° 23' 22.8"	1042	10			N27E	
P17	29° 04' 40.3"	58° 23' 47.4"	1033	25			S65E	
P18	29° 05' 16"	58° 23' 39.9"	1036	5	5		N48E	5
P19	29° 05' 44"	58° 23' 32.1"	1047	10			NS	
P21	29° 05' 55"	58° 23' 16.6"	1041				N10W	5
P23	29° 04' 12.9"	58° 22' 43"	1044	5			N25E	4
P24	29° 04' 11.8"	58° 22' 42.4"	1046	20			N80E	
P25	29° 04' 04.4"	58° 22' 38.2"	1051				S70E	کانون زلزله
P26	29° 04' 02.1"	58° 22' 38.7"	1048	15			N30E	::2
P27	29° 03' 53.1"	58° 22' 33.4"	1051	10-20			N80E	::10
P28	29° 03' 50.9"	58° 22' 32.7"	1048	20			N80E	::2
P29	29° 02' 47.7"	58° 21' 54.4"	1064				S30W	::30
P30	29° 02' 28.7"	58° 21' 47"	1067				NS	
P31	29° 02' 19.9"	58° 21' 44.5"	1072	10			N40E	::4
P32	29° 02' 07"	58° 21' 37.5"	1069	20			N40E	
P33	29° 02' 11.6"	58° 21' 37.5"	1075	30				
P34	29° 02' 14"	58° 21' 33.1"	1077	20				
P35	29° 02' 05"	58° 21' 36.5"	1078	10			N30E	
P36	29° 02' 02"	58° 21' 35.7"	1077	20			N30E	
P37	29° 01' 52"	58° 21' 37.5"	1080				N80E	
P38	29° 01' 49.8"	58° 21' 39.3"	1076	170			S35W	<270 عمق
P39	29° 01' 48.3"	58° 21' 38.6"	1076	50			S30W	۲۵
P40	29° 01' 46.5"	58° 21' 38.2"	1075	15				
P41	29° 01' 44.2"	58° 21' 37.5"	1076	::70			N35E	
P42	29° 01' 42"	58° 21' 37"	1076	::40				
P43	29° 01' 37.1"	58° 21' 37.7"	1075	::70			S20W	شرق شکستگی، ۸
P44	29° 01' 34.7"	58° 21' 36.6"	1074		::30	41		شرق شکستگی
P45	29° 01' 33.4"	58° 21' 35.9"	1073	::100	110	33	N37E	شرق شکستگی
P46	29° 01' 32.9"	58° 21' 36.2"	1078	15		58		غرب شکستگی
P47	29° 01' 31.2"	58° 21' 35.3"	1073	70-100				غرب شکستگی
P48	29° 01' 30.4"	58° 21' 35.8"	1074					شرق شکستگی
P49	29° 01' 29"	58° 21' 35.3"	1073	30-50		33	N33E	شرق شکستگی
P50	29° 01' 28.4"	58° 21' 35.5"	1072			50		شرق شکستگی
P51	29° 01' 26.4"	58° 21' 34.2"	1073	70-100		80	N30E	شرق شکستگی
P52	29° 01' 25.9"	58° 21' 34.9"	1072					

امتداد	بالا آمدگی و توضیحات (cm)	نام نقطه	مختصات جغرافیایی	بازشدگی (mm)	جابجایی (mm)	طول (m)	امتداد	بالا آمدگی و توضیحات (cm)
P53	29° 01' 24.6"	58° 21' 34.9"	1074	::100		40		
P54	29° 01' 24.8"	58° 21' 34.9"	1071					غرب شکستگی
P55	29° 01' 22.4"	58° 21' 33.6"	1071	10		92		غرب شکستگی
P56	29° 01' 21.2"	58° 21' 33.4"	1072					
P57	29° 01' 20.6"	58° 21' 33.4"	1073			60	N35E	
P58	29° 01' 21.1"	58° 21' 33.5"	1074					
P59	29° 01' 18.7"	58° 21' 32.1"	1073					
P60	29° 01' 17.7"	58° 21' 31.6"	1074			59	N30E	شرق شکستگی
P61	29° 01' 08.9"	58° 21' 36.7"	1072				N25E	
P62	29° 01' 05.7"	58° 21' 34.4"	1073					
P63	29° 02' 38.1"	58° 21' 33.3"	1077					
P64	29° 02' 41"	58° 21' 23.3"	1077	50-100		70	S15W	
P65	29° 02' 53.7"	58° 21' 28.8"	1075	50-100		90	N24E	
P66	29° 03' 6"	58° 21' 23.6"	1070			112	N33E	
P67	29° 03' 14.3"	58° 21' 23.2"	1077	30-70		84	S24W	

Archive of SID



شکل (۹): نقشه گسیختگی های سطحی به دست آمده از برداشت های صحرائی



شکل (۱۰): نقشه رخنمون شکستگی‌ها و جابه‌جایی‌های اثر سطحی گسلش جدید. (مشخصات نقاط در جدول ۱ آمده است).



شکل (۱۱): نمونه‌هایی از شکستگی‌های برداشت شده مربوط به گسیختگی سطحی جدید در جنوب بم، ایستگاه ۳۹ (الف) و ایستگاه ۵۶ (ب). بالای تصویر (ب) به سمت جنوب است. در این تصویر یک فروافتادگی، حدود ۵ سانتیمتر، در سمت چپ (شرق گسل) به خوبی قابل مشاهده است.

## بحث

مرور اطلاعات حاصل از برداشت‌های صحرایی صورت گرفته در بررسی حاضر و مقایسه آن با یافته‌های بررسی‌های اخیر، که عمدتاً متکی بر روش‌های دور سنجی است، اطلاعات با ارزشی در مورد وضعیت فضایی گسل جدید و رابطه آن با گسل بم و هم‌چنین جهت‌یابی تنش‌های برجا در منطقه بم به دست می‌دهد.

## شیب اثر سطحی گسلش جدید

بررسی‌های مختلفی که به دنبال زمین‌لرزه بم صورت گرفت، اثر سطحی گسلش جدیدی را در قسمت غرب گسل بم مورد شناسایی قرار داد. این بررسی‌ها چون عمدتاً متکی به مطالعات دور سنجی بوده است، وضعیت این گسل را در دو بعد فضایی، یعنی در نقشه، مشخص نمود. ولی با وجود مدد گرفتن از توپوگرافی و رسم نمودارهای سه بعدی (شکل‌های ۴ و ۵)، اطلاعاتی در مورد جهت‌یابی این گسل در عمق، به دست نیامد. و لذا رابطه گسیختگی‌های سطحی جدید با گسل اصلی بم به خوبی مشخص نگردید.

اثر سطحی گسلش جدید که به موازات گسل بم و در فاصله ۳/۵ کیلومتری آن قرار گرفته، در واقع یک سیستم

شکستگی‌های کوتاه است. طول متوسط این شکستگی‌ها ۶۸ متر و امتداد متوسط آنها  $N 32 E$  می‌باشد. در صورتی که شکستگی‌های استنتاج شده از پس‌لرزه‌های ثبت شده در شکل‌های ۷ و ۸ را بر روی نقشه شکستگی‌های برداشت شده توسط مطالعه حاضر منتقل کنیم (شکل ۱۲)، نکات با ارزشی آشکار می‌شود. هم‌چنانکه در شکل ۱۲ دیده می‌شود، محل وقوع تمامی پس‌لرزه‌های ثبت شده در سمت شرق شکستگی‌های حاصل از برداشت سطحی بوده است. این مسئله نشان می‌دهد که اثر سطحی گسلش جدید دارای شیبی به سمت شرق می‌باشد. با در نظر گرفتن کانون پس‌لرزه‌ها، که عمدتاً در اعماق ۵ تا ۱۰ کیلومتری قرار گرفته‌اند، و فاصله بین شکستگی‌های حاصل از برداشت سطحی و شکستگی‌های استنتاج شده از پس‌لرزه‌ها (شکل ۱۲)، مشخص می‌شود که اثر سطحی گسلش جدید دارای شیب زیاد و حدود ۷۵ تا ۸۵ درجه به سمت شرق می‌باشد. فاصله گرفتن دو گروه شکستگی‌های شکل ۱۲ از هم، در سمت شمال، نشانگر این است که از شیب گسل جدید در قسمت‌های شمالی تاحدی کاسته می‌شود ولی همواره به صورت گسلی پرشیب با جهتی به سمت شرق، باقی می‌ماند.



شکل (۱۲): مقایسه نقشه برداشت صحرایی (خطوط ان‌اشلان پر رنگ ضخیم) و نقشه به دست آمده از ثبت پس‌لرزه‌ها (کم رنگ نازک).



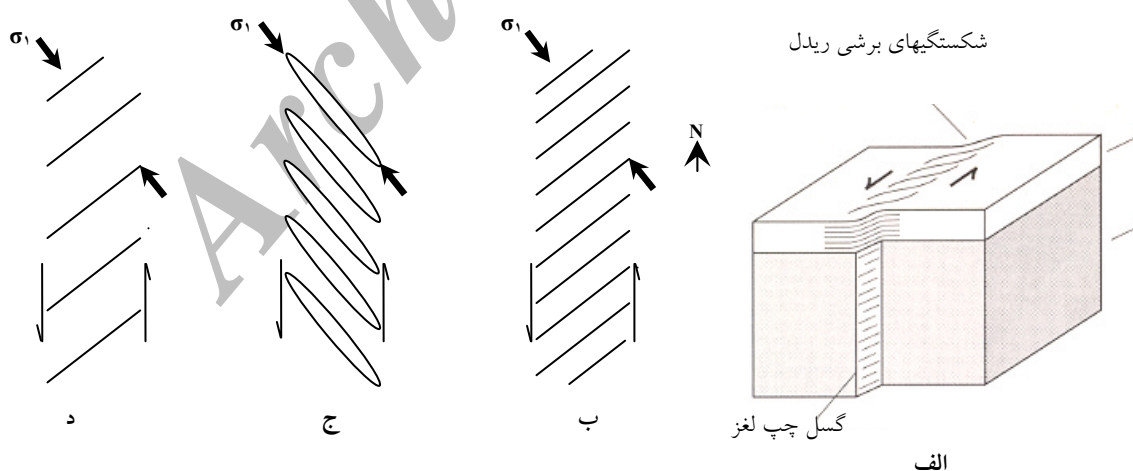
نمی‌توانند از نوع شکستگی‌های برشی ریدل باشند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در آزمایش‌ارایه شده در فوق، شکستگی‌های کششی و چین‌های ان‌اشلان نیز به وجود می‌آید (ویلکوکس و هاردینگ، ۱۹۷۳). ترک‌های کششی معمولاً در جهتی عمود بر کشش، یعنی تنش اصلی حداقل  $(\sigma_3)$ ، ایجاد می‌شوند (شکل ۱۳ ج). این در حالی است که محور چین‌ها به موازات جهت کشش قرار می‌گیرند. نظریه اینکه میانگین شکستگی‌های کششی برداشت شده در محدود گسل جدید بم، دارای امتداد  $N32^{\circ}E$  می‌باشد، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که جهت تنش اصلی  $(\sigma_1)$  فعال در منطقه بم نیز کم و بیش از همین راستا تبعیت نماید. چنین تنشی می‌تواند حرکت امتدادلغز راستگرد را در گسل بم و گسل جدید به وجود آورد. بالازدگی‌های برداشت شده، که عمدتاً در یک سمت این شکستگی‌ها قرار دارند (جدول ۱)، نیز نشانه‌هایی از چین‌های ان‌اشلانی است که در چنین شرایطی تشکیل می‌شوند (شکل ۱۳ د).

مدل سه بعدی پیشنهادی، نمایش دهنده رابطه گسل جدید، گسل بم و تنش‌های برجای فعال در منطقه، در شکل ۱۴ آمده است.

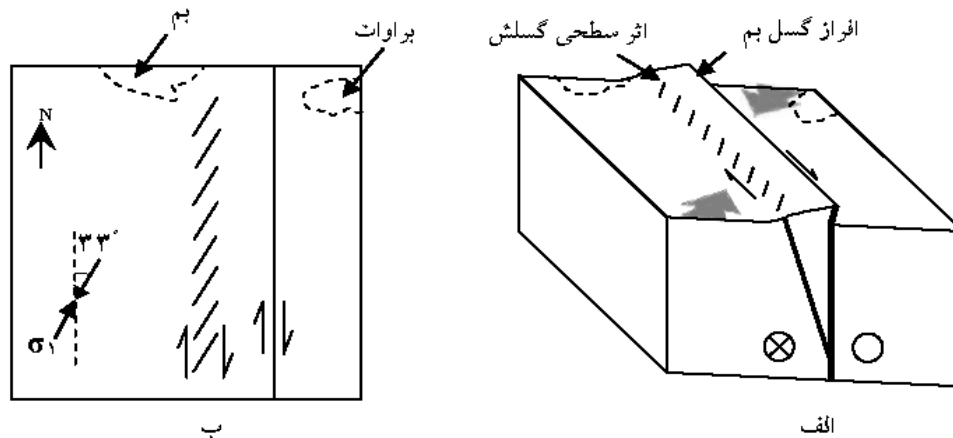
### جهت‌یابی تنش‌های اصلی فعال در منطقه بم

شکستگی‌های ان‌اشلان، در محدوده گسل‌های امتدادلغز، قبل از هر چیز شکستگی‌های برشی ریدل که معمولاً در بالای گسل‌های امتدادلغز موجود در اعماق تشکیل می‌شود، را تداعی می‌کنند. با یک آزمایش ساده می‌توان نحوه تشکیل شکستگی‌های ریدل را بازسازی کرد (ویلکوکس و هاردینگ، ۱۹۷۳). مدل مورد نظر، با قراردادن لایه‌ای از گل رس به روی دو قطعه چوب، که در کنار هم قرار گرفته‌اند، ساخته می‌شود. در این جا قطعات چوب، معرف سنگ بستر گسلیده، و لایه رس فوقانی معرف پوشش سطحی آبرفتی است. با لغزش چوب‌ها در کنار هم، ابتدا تغییر شکل‌های خمیرسان در لایه رس به وجود می‌آید. با ادامه لغزش، یک سری شکستگی‌های ان‌اشلان در رس ایجاد می‌شود. در صورتی که مدل فوق را در مورد شکستگی‌های ایجاد شده در محدوده گسل جدید بم پیاده کنیم، حرکتی چپگرد را برای آن پیشنهاد می‌کند (شکل ۱۳ الف و ب) که شواهد موجود استدلال فوق را تایید نمی‌کند.

تقریباً تمام شکستگی‌های ایجاد شده در محدوده گسل جدید بم، دارای بازشدگی می‌باشند (جدول ۱)، لذا



شکل (۱۳): شکستگی‌های برشی ریدل (الف و ب)، شکستگی‌های کششی (ج) و چین‌های ان‌اشلان (د) ایجاد شده در لایه رسی، ایجاد شده در اثر حرکت چپ‌لغز در دو قطعه چوب زیرین



شکل (۱۴): مدل سه بعدی (الف) و نقشه (ب) پیشنهادی، نمایش دهنده وضعیت فضایی گسل بم و رابطه آن با جهت یابی تنش اصلی فعال در منطقه

## نتایج

به دنبال وقوع زمین لرزه بم، مطالعات گسترده‌ای توسط گروه‌های تحقیقاتی مختلف انجام شده است. این بررسی‌ها عمدتاً، متکی به اطلاعات دور سنجی بوده‌اند. به کار بردن تصاویر ماهواره‌ای دو بعدی و سه بعدی اطلاعات با ارزشی در مورد گسل بم و میزان فعالیت آن را فراهم آورده، ولی در این تصاویر گسیختگی‌های جدید چندان قابل تشخیص نمی‌باشد. تصاویر ماهواره‌ای ترکیبی نیز گسیختگی‌های جدیدی را نشان ندادند. با بررسی نقشه ترکیبی منطقه بم، که از موقعیت کانون پس‌لرزه‌ها استخراج شده بود، یک گسیختگی سطحی جدید موازی با گسل بم تشخیص داده شد. بررسی حاضر، که با انجام عملیات صحرائی و برداشت شکستگی‌ها و تغییر شکل‌های زمین همراه بوده، نتایج زیر را به دست داد:

- ۱- ساختار ان‌اشلان و جهت‌یابی شکستگی‌های کششی ایجاد شده، پیشنهاد می‌نماید که جهت تنش اصلی فعال در منطقه بم حدود  $32^{\circ}E$  N است.
- ۲- چنین تنشی می‌تواند حرکت امتدادلغز راستگرد را در گسل بم و اثر سطحی گسلش جدید به وجود آورد.
- ۳- با تلفیق یافته‌های برداشت‌های صحرائی و نقشه کانون پس‌لرزه‌ها، مشخص گردید که اثر سطحی گسلش دارای شیب زیاد، حدود ۷۵ تا ۸۵ درجه، به سمت شرق می‌باشد.

۴- مدل سه بعدی پیشنهاد شده، ارتباط گسل بم و اثر سطحی گسلش جدید و تنش‌های برجای منطقه را به دست داد.

## تشکر

از همکاری آقایان مهندس محمد رضا جلالی، مهندس بهراد ملا حسینی مجد آبادی و مهندس عباس ناصری، که در گردآوری صحرائی داده‌ها مشارکت داشته‌اند، صمیمانه سپاسگزاری می‌گردد.

## منابع

- Berberian, M., & Yeats, R. S. 1999. Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89, 120-139.
- Bihong Fua, Yoshiki Ninomiyab, Xinglin Leib, Shinji Todaa, Yasuo Awataa. 2003. Mapping active fault associated with the 2003 Mw 6.6 Bam (SE Iran) earthquake with ASTER 3D images, Elsevier, [www.elsevier.com/locate/rse](http://www.elsevier.com/locate/rse).
- Eshghi, S., & Zare, M. 2003. Bam (SE Iran) earthquake of 26 December 2003, Mw 6.5: A preliminary reconnaissance report. [http://www.iiees.ac.ir/English/bam\\_report\\_english\\_recc.html](http://www.iiees.ac.ir/English/bam_report_english_recc.html).
- Fu, B., & Lin, A. 2003. Spatial distribution of the surface rupture zone associated with the 2001 Ms 8.1 Central Kunlun earthquake, northern Tibet, revealed by satellite remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 2191-2198.

- heavily damaged area: Existence of the Arg-e-Bam fault proposed.
- USGS Earthquake Disaster Program (USGS). 2003. Magnitude 6.6- southeastern Iran 2003 December 26 01:56:52 UTC. <http://earthquake.usgs.gov/recentdsww/Quakes/uscvad.htm>.
  - Walker, R., & Jackson, J. A. 2002. Offset and Evolution of the Gowk Fault, S.E. Iran: A Major Intra-Continental Strike-Slip System. *Journal of Structural Geology*, v. 24, 1677-1698.
  - Wilcox R. E., Harding T. P., Cooper M. A. 1973. Basic wrench tectonics, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v 57, 74-9.
  - Geological Survey of Iran (GSI). 1993. Geological map of Iran, 1:100,000 series, sheet 7648-Bam.
  - Talebian M., E.J. Fielding, G. Funning, M. Ghorashi, J.A. Jackson, H. Nazari, B.E. Parsons, K. Priestley, P.A. Rosen, R. Walker, T.J. Wright, and T.J. Wright The 2003. Bam (Iran) earthquake: Rupture of a blind strike-slip fault, *Geophysics. Research. Letter.*, 31(11), L11611, doi:10.1029/2004GL020058, 2004
  - Tatar M., Hatzfeld D., Moradi A.S., Paul A. 2005, The 2003 December 26 Bam Earthquake (Iran), Mw 6.6, aftershock sequence
  - Nakamura T., Suzuki S., Matsushima T, Ito Y., Hosseini S. K., Jafar Gandomi A., Sadeghi H., Maleki M., and Fatemi Aghda S. M., 2004, Source fault structure of the 2003 Bam earthquake, southeastern Iran, inferred from the aftershock distribution and it's relation to the

Archive of SID