شبيه‌سازي حركات ثبت شده در زلزله ديماه۱۳۸۲ بم، به روش تصادفي گسل با ابعاد محدود و بررسي كمّي نقش چشمه لرزه‌زا در شكل‌گيري توزيع خرابي مشاهده شده

حميد زعفراني[۱] ، اسدا... نورزاد[*۲] و خسرو برگي[۳]

[۱]دانش آموخته كارشناسي ارشد مهندسي زلزله ـ پرديس دانشكده‌هاي فني ـ دانشگاه تهران

[۲]استاديار دانشكده مهندسی عمران ـ پرديس دانشكده‌هاي فني ـ دانشگاه تهران

[۳]استاد دانشكده مهندسی عمران ـ پرديس دانشكده‌هاي فني ـ دانشگاه تهران

(تاريخ دريافت ۸۵/۷/۲۷ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۵/۱۲/۲۶ ، تاريخ تصويب ۸۶/۲/۲۶)

چكيده

در اين تحقيق شتاب‌نگاشتهاي ثبت شده در زلزله مخرب ديماه ۱۳۸۲ بم (Mw=6.5) با استفاده از روش تصادفي گسل محدود[۱] شبيه‌سازي شده‌اند. در اين روش حركات زمين به صورت مجموع پاسخ تصادفي چشمه‌هاي نقطه‌اي[۲]، شبيه‌سازي مي‌شود. براي بررسي اثر مدل لغزش فرض شده بر روي نتايج، توزيع لغزشي كه از مطالعات قبلي -حل معكوس- به دست آمده با نتايج يک "توزيع لغزش تصادفي" و "توزيع لغزش يكنواخت" روي سطح گسل مورد استفاده قرارگرفته ومقايسه بين دقت اين مدلهاي مختلف صورت گرفته است. نتايج اين تحقيق تاييدي بر صحت استفاده از مدل توزيع لغزش تصادفي يا يكنواخت در شبيه‌سازي حركات زمين لرزه‌هاي محتمل آينده (يا زمين لرزه‌هاي گذشته كه اطلاعي از نوع لغزش روي گسل مسبب آنها در دست نيست) در يك ساختگاه است. طول گسل ۱۶كيلومتر و عرض آن۱۲كيلومتر فرض شده وصفحه‌ي گسل به تعداد ۳*۵ المان تقسيم شده است. شبيه‌سازي حركات زمين بر مبناي پارامترهاي حاصل از تحقيقات قبلي و نيز كاليبره‌كردن اندازه زبرگسلها با ركوردهاي ثبت شده، صورت گرفته است. نتايج حاصل از اين تحقيق تطابق خوبي بين تاريخچه زماني‌ها و طيفهاي مشاهده شده و بازتوليد شده را نشان مي‌دهد. به منظور بررسي صحت مدل موج برشي به‌كار رفته، تحليل حساسيت با تغيير دادن اين متغير در محدوده قابل قبول اين پارامتر صورت گرفته است. تحليل خطاي حاصل، بيانگر درستي مدل موج برشي مفروض است. در گام بعدي مدل كاليبره شده‌ي حاصل از اين تحقيق براي توليد حركات زمين در نقاطي كه دستگاه ثبت وجود نداشته، به كار رفته است. نتايج اين بررسي آشكار مي‌كند كه اثرات چشمه‌ي لرزه‌زا به خوبي مي‌تواند الگوي مشاهده شده‌ي توزيع خسارت در زلزله بم را توضيح دهد. به طور خاص اين موضوع را كه شرق شهر بم ـ در مقايسه با روستاي بروات كه در فاصله‌اي يكسان با شرق بم، از رومركز زلزله قرار دارد ـ متحمل بيشترين خسارات شده است، با به دست آوردن نقشه‌ي هم شتاب در منطقه مي‌توان به عنوان اثر چشمه‌ي لرزه‌زا به صورت كمّي تبيين كرد.

واژه هاي كليدي: مدلسازي تصادفي - روش گسل محدود - شبيه‌سازي حركات زمين - زلزله بم - ايران

مقدمه

پنج دي ماه ۱۳۸۲، در ساعت يك و پنجاه و شش دقيقه به وقت گرينويچ زلزله مخربي با بزرگاي گشتاوري ۶/۵ در استان كرمان (جنوب شرقي ايران) روي داد. مطابق اعلام رسمي، زلزله سبب مرگ ۲۶۰۰۰ نفر از هموطنانمان شد و حدود ۷۵۰۰۰ بي خانمان بر جاي گذاشت. اين زلزله، شهر باستاني بم و ارگ تاريخي آن را كه بزرگترين بناي خشتي جهان با قدمتي بيش از ۲۵۰۰سال است، ويران كرد[۱۵]. اين رويداد مصيبت بار با توجه به ويژگيهاي منحصر به فرد و حجم بالاي خسارات آن به نقطه عطفي در مطالعات زلزله شناسي و مهندسي زلزله در ايران تبديل شد. گسيختگي حاصل از زلزله بم سبب شد تا گسلي جديد در غرب گسل شناخته شده بم، به فاصله پنج كيلومتر از آن ايجاد شود[۲۲].

توزيع پس لرزه‌هاي زلزله[۱۶] و اطلاعات حاصل از حل معكوس با استفاده از داده‌هاي دورلرزه‌اي[۲۵]، وجود حداقل يك ناحيه اصلي با لغزش بالا[۳] روي اين گسل را نشان مي‌دهد. به دليل آنكه انرژي شكست براي گسيخته شدن اين نواحي لغزش بالا روي گسل‌هاي نابالغ بيش از گسل‌هاي بالغ است، حداكثر شتابهاي زمين كه در طي اين رويداد ثبت شده، بسيار زياد بوده است[۱۲]. روشهاي سنجش از دور ماهواره‌اي[۲۴] و مطالعه توزيع مكاني پس لرزه‌ها[۱۶] بيانگر آن است كه زلزله با گسلش امتداد لغز

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۱۱۱ ۲۱۸۱ , فاكس : ۶۶۴۰۳۸۰۸ , Email: noorzad@ut.ac.ir

روي صفحه‌اي با امتداد تقريبا شمالي ـ جنوبي كه كمي به سمت شرق تمايل دارد همراه بوده است. تعدادي از دستگاه‌هاي شتابنگاشتِ متعلق به مركز تحقيقات ساختمان و مسكن (BHRC) كه عمدتاً در استان كرمان واقع شده، رويداد اصلي را ثبت كرده‌اند. وجود اين اطلاعات به همراه اطلاعات كافي از هندسه‌ي گسل مسبب زلزله ونيز ويرانگر بودن آن، مهمترين انگيزه‌ها براي شبيه‌سازي اين تاريخچه زماني‌ها بوده است.

درحوزه‌ي نزديک گسل, ابعاد چشمه لرزه‌زا[۴] و خصوصيات مربوط به آن نظير تاريخچه لغزش و انتشار آن روي گسل، هندسه قرارگيري ساختگاه و گسل و پديده‌ي جهت‌پذيري[۵] نقش مهمي ايفا مي‌كنند و در مطالعات مربوط به شبيه‌سازي زلزله‌ها بايد مدِّ نظر قرارگيرند. در اين تحقيق، روش شبيه‌سازي تصادفي گسل با ابعاد محدود براي شبيه‌سازي تاريخچه‌هاي ثبت شده، به كار رفته‌است[۵،۴]. روش فوق، امكان داخل‌كردن دانسته‌هاي اساسي ما از طبيعتِ پديده‌ي زلزله و پديده‌هاي همراه آن مانند انتشار موج در محيط و اثرات موضعي ساختگاه را در يک چارچوب ساده و در عين حال دقيق فراهم مي‌كند. اين روش در نواحي مختلف لرزه‌خيز جهان كه تكتونيك متفاوت دارند با مؤفقيت براي شبيه‌سازي جنبش زمين در زلزله به كار رفته‌است[۷،۱۷،۱۸،۱۹]. پيش از اين زعفراني و همكاران [۲۶] از اين روش در تركيب با روابط پيشنهادي براي پالس پريود بلند, جهت تخمين حركات حوزه نزديک ناشي از زلزله‌هاي آينده در يک ساختگاه خاص استفاده كرده‌اند. در مدتي كه مقاله سير داوري خود را طي مي‌كرد، در يک تحقيق مستقل معتضديان و معين‌فر[۱۴] با كاربرد روش گسل‌هاي محدود با فركانس گوشه ديناميكي[۶][۱۳] به شبيه‌سازي زلزله بم اقدام كرده‌اند. اين تحقيق از جهات چندي با مطالعه حاضر متفاوت است كه به اختصار به آن اشاره مي‌شود. الف) در تحقيق حاضر از روش گسل‌محدود با فركانس گوشه استاتيكي[۴] كه كاربرد وسيع‌تري در سطح دنيا داشته است و به خوبي صحت آن به اثبات رسيده استفاده شده است. ب) در اين تحقيق براي اجتناب از وارد شدن اثرات مسير[۷] و تاكيد ويژه بر اثر چشمه لرزه‌زا تنها از ايستگاه‌هاي با فاصله كانوني كمتر از 150 km استفاده شده است. ج) در شبيه‌سازي معتضديان و معين فر، ابعاد گسل از روابط تجربي تعيين شده‌است در حالي كه ما از حل معكوس دقيق انجام شده توسط ونگ و همكاران[۲۴] بهره‌گرفته‌ايم. هـ) توزيع لغزش روي گسل در مقاله آنان تصادفي فرض شده‌است در حالي كه ما علاوه بر گزينه لغزش تصادفي و يكنواخت، از توزيع واقعي حاصل از حل معكوس هم بهره‌گرفته‌ايم. و) در مقاله معتضديان و معين‌فر از تعداد ۲۳ ايستگاه موجود بهره‌گرفته‌اند، در حالي كه ما تنها از هشت ايستگاه كه داراي ركوردهاي با كيفيت مناسب (نسبت سيگنال به نوفه بالا و شروع ركورد با موج P) بوده است استفاده كرده‌ايم. ز) در مقاله معتضديان و معين فر تنها به شبيه‌سازي زلزله اكتفا شده‌است و در مورد توزيع خرابي و نقش چشمه‌لرزه‌زا در آن بحثي صورت نگرفته است، در حالي كه مهمترين هدف ما در اين مقاله تبيين نقش چشمه لرزه‌زا در الگوي خرابي مشاهده شده بوده‌است. ح) در مقاله معتضديان و معين‌فر بحثي از تفكيك ايستگاه‌ها با شرايط ساختگاه متفاوت انجام نشده و همه ايستگاه‌ها داراي يك نوع خاك فرض شده‌است ولي ما در مقاله خود اقدام به تفكيك ساختگاه‌ها و در نظر گرفتن ضرايب بزرگنمايي متفاوت كرده‌ايم. ط) در مقاله حاضر براي بررسي موفقيت مدل، علاوه بر معيار صفر بودن سوگيري[۸] مدل، چنانكه در مطالعاتي از اين دست رايج است، براي هر ايستگاه نيز جداگانه مقايسه طيف شبيه‌سازي‌شده و تاريخچه زماني حاصل صورت گرفته است، در حالي كه در مقاله معتضديان و معين‌فر اين‌كار فقط براي ايستگاه بم صورت گرفته‌است. موارد متعدد ديگري نيز وجود دارد كه خواننده مي‌تواند با مراجعه به متن مقاله؛ متوجه نقاط قوت و ضعف آن تحقيق شود.

شبيه‌سازي حركات زمين با استفاده از پارامترهاي مدل كه از تحقيقات قبلي به دست آمده و با تعيين مناسبترين اندازه زيرگسلها جهت كاليبره كردن مدل با ركوردهاي ثبت شده صورت گرفته‌است. پاسخ محلي ساختگاه براي درنظرگرفتن اثرات بزرگنمايي در ساختگاه ايستگاههاي مورد مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. اثرات مسير طي موج نيز با استفاده از خصوصيات تجربي مناسب منطقه مورد مطالعه در مدل وارد شده است. براي تخمين اثرات توزيع لغزش انتخابي روي گسل, نتايج شبيه‌سازي‌ها با مدلهاي لغزش يكنواخت و تصادفي هم مقايسه شده‌است.

در گام بعدي مدل كاليبره شده‌ي فوق، براي توليد شتابنگاشتهاي نقاط مختلف منطقه بم و اطرافِ آن به كار رفته است. گرچه روستاي بروات و شرق شهر بم هر دو فاصله‌اي يكسان تا رومركزِ زلزله- حدود پنج كيلومتر- دارند؛ ولي شدّت ويراني در بروات كمتر از شرق بم بوده است. هدف اصلي اين بخش، تحقيق در مورد الگوي توزيع خرابي و رابطه آن با اثرات چشمه‌ي لرزه‌زا است.

روش شبيه سازي

روش مورد استفاده در اين تحقيق, روش شبيه‌سازي گسل با ابعاد محدود است كه توسط "برزنف" و "اتكينسون" پيشنهاد شده‌است [۴]. اين روش كه تعميمي از روش چشمه‌ي نقطه‌اي (Point source) است، امكان در نظر گرفتن يك رويداد (Event) را به صورت مجموعه اي از رويدادهاي كوچك كه هر يك داراي طيف چشمه (Source spectrum) از نوع ω^2 است، فراهم مي‌كند. در اين روش ممان لرزه‌اي مجموع اين حوادث، برابر ممان لرزه‌اي رويداد اصلي است. براي مدل سازي انتشار گسيختگي از يك مدل ساده سينماتيكي استفاده مي‌شود. در اين مدل گسيختگي از كانون شروع مي‌شود و به صورت شعاعي از اين نقطه در همه جهات روي سطح گسل گسترش مي‌يابد. حركت نهايي در ساختگاه، حاصل مشاركتِ همه‌ي زيرگسلها با تاخير زماني برابر زمان رسيدن جبهه‌ي گسيختگي به زيرگسل، بعلاوه‌ي زمان لازم براي رسيدن موج از زيرگسل به ساختگاه است. با تعريف پارامترهاي ورودي: هندسه گسل، ممان لرزه‌اي زلزله، ابعاد زير رويدادها، سرعتِ لغزش روي گسل و خصوصيات محلي كه مسير انتشار را توصيف مي‌كند؛ مي‌توان طيف چشمه‌ي هر زير رويداد را توليد كرد كه پس از ضرب شدن در طِيف مقياس شدهِ‌ي يك نوفه‌ي گوسي با دوام محدود، به طيف تصادفي چشمه تبديل مي‌شود. ممان لرزه‌اي هر زيرگسل و فركانس گوشه‌ي آن از روابط زير حاصل مي‌شود:

$$f_c = \frac{(\frac{yz}{\pi})\beta}{\Delta l}$$

(۱)

$$m_0 = \Delta\sigma \Delta l^3$$

(۲)

$\Delta\sigma$ در عبارت فوق پارامتر افت تنش متوسط است، β سرعت موج برشي در ناحيه گسلش و y نسبت سرعت انتشار گسيختگي به سرعت موج برشي است. پارامتر z كنترل كننده سطح حركت با محتوي فركانس بالا است و از طريق رابطه‌ي زير به سرعت حداكثر لغزش روي گسل مربوط است:

$$v_m = (\frac{2yz}{e})(\frac{\Delta\sigma}{\rho\beta})$$

(۳)

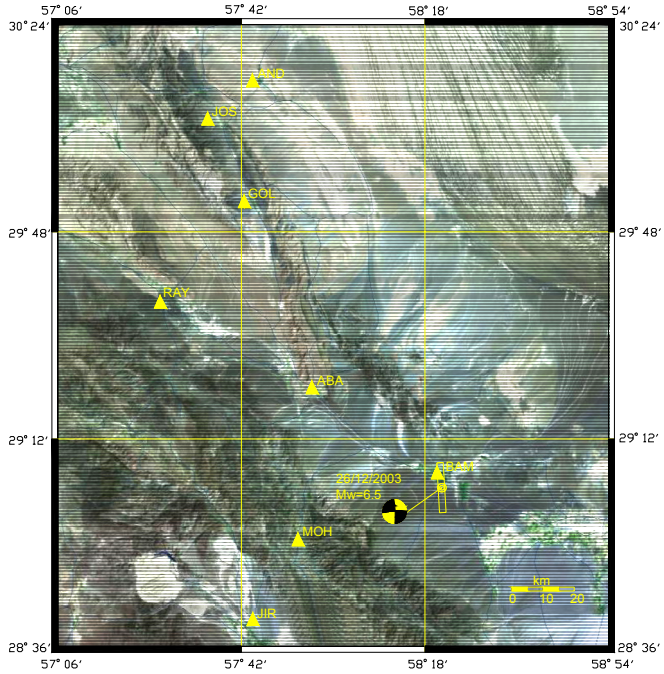
در اين رابطه، ρ چگالي محيط و e عدد نپر است. براي منظور كردن تفاوت طيفهاي مشاهده شده با طيفِ ω^2 استاندارد، مقدار z به صورت حاصل ضرب 1.68 (براي طيف استاندارد) در يك پارامتر ديگر كه در اينجا $sfact$ مي ناميم، نمايش داده مي‌شود. مقدار اين پارامتر بين 0.5 تا 2.0 تغيير مي‌كند و به همراه ابعاد زيرگسلها تنها پارامترهاي آزاد مدل است. روش شبيه‌سازي تصادفي فوق، ابزار مناسبي براي توليد حركات زمين در محدوده‌ي فركانسي كه بيش از همه مورد توجه مهندسين است (f>1 Hz)، بويژه در مناطقي كه ركورد زلزله هاي مورد انتظار در دسترس نيست و يا تعداد آنها اندك است -نظير مناطق مركزي و شرقي ايران- فراهم مي‌آورد.

داده‌هاي مورد استفاده

تعداد ۴۱ دستگاهِ شتابنگاشت در استان كرمان وجود داشته است كه از اين ميان ۲۴ دستگاه با وقوع تكان اصلي زلزله به كار افتاده و آن را ثبت كرده‌اند[۱۰،۲۷]. براي پيراستنِ اين ركوردها از اغتشاشات محيطي احتمالي، يک فيلتر ميان گذر بين فركانسهاي 0.1 Hz تا 30 Hz به اين داده‌ها اعمال شده است. ركوردهاي منتخبِ هشت ايستگاه كه داراي كيفيت قابل قبولي بوده است در اين تحقيق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همه‌ي اين ركوردها فاصله‌ي تا رومركز كمتر از ۱۵۰ كيلومتر دارند(شكل ۱). اطلاعات كامل در موردِ نام، محل قرارگيري و حداكثر شتاب ثبت شده در اين هشت ايستگاه در جدول (۱) ارائه شده‌است. براي طبقه‌بندي اين ايستگاهها از لحاظ اثرات ساختگاه از روش پيشنهادي زارع و همكاران براي سايتهاي ايران استفاده كرده‌ايم[۲۸]. ضرايب بزرگنمايي متوسط ارائه شده از سوي بور و جوينور براي بيان اثرات ساختگاه به كار رفته‌است[۶].

جدول ١: مشخصات ايستگاههاي به كار رفته در اين تحقيق.

Code	Station Name	Lat. (°N)	Long. (°E)	Epicentral Distance (km)	Foundation Category	PGA (cm/s/s) (L)	PGA (cm/s/s) (T)
BAM	Bam	29.09	58.35	4	Stiff soil	778.3	623.4
MOH	Mohamad-Abad	28.90	57.89	49	soil	115.9	66.8
ABA	Abaraq	29.34	57.94	52	rock	166.7	109.5
JIR	Jiroft	28.67	57.74	74	soil	40.2	27.6
RAY	Rayen	29.59	57.44	107	rock	14.6	13.9
GOL	Golbaf	29.88	57.72	111	soil	30.29	27.6
JOS	Joshan	30.12	57.60	132	rock	24.9	36.0
AND	Andoohjerd	30.23	57.75	147	soil	31.8	33.6



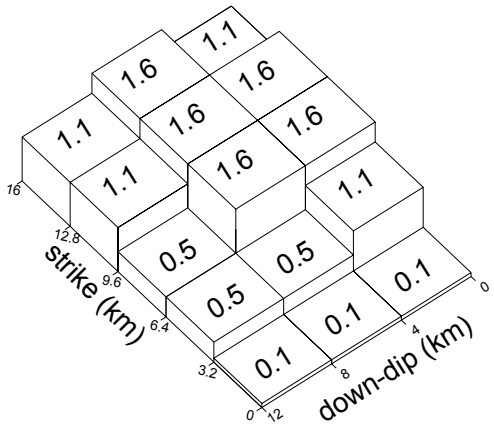
شكل ١: توزيع مكاني ايستگاههاي مورد استفاده در اين مطالعه(مثلثها) بر روي عكس ماهواره‌اي منطقه؛ صفحه‌ي گسل انتخابي در اين مطالعه و ساز و كار گسلش مطابق پيشنهاد ونگ و همكاران [٢٤] نيز ارائه شده است.

پارامترهاي مدل

صفحهِ‌ي گسل به كار رفته در اين شبيه‌سازي داراي طول ١۶ كيلومتر و عرض ١٢ كيلومتر است. اين صفحه به تعداد ١۵ زيرگسل (پنج زيرگسل در امتداد طول و سه زيرگسل در امتداد عرض) تقسيم شده است. ابعاد و جهت قرارگيري اين صفحه‌ي گسلي بر مبناي مدل پيشنهادي ونگ و همكاران [٢٤] قرار دارد. توزيع لغزش انتخابي روي اين گسل نيز بر مبناي كار محققان فوق انتخاب شده است. شكل (٢) توزيع لغزش انتخابي را روي صفحه‌ي گسل نشان مي‌دهد. صفحه‌ي انتخابي گسل با توزيع مكاني پس لرزه‌ها نيز تطابق خوبي دارد[١۴]. پارامتر تنش $\Delta\sigma$ را طبق توصيه مرجع [۴] برابر ۵٠ بار انتخاب مي‌كنيم، كه به مقدار ۶٠ بار كه براي اين زلزله به دست‌آمده، نيز نزديك است[٢۴]. مقدار چگالي محيط برابر $2.8\ g/cm^3$ و سرعت موج برشي در اطراف چشمه لرزه‌زا $3.5\ km/s$ انتخاب شده است[٢٠]. سرعت انتشار گسيختگي نيز برابر ٠/٨ سرعت موج برشي فرض شده‌است[۴].

مدل پخش هندسي را به صورت R^{-1} براي فواصل كمتر از ۶٠ كيلومتر و $R^{-1/2}$ براي فواصل بيش از آن به كار برده‌ايم[٢١]. ضريب كيفيت موج برشي را برابر $Q(f)=291f^{0.6}$ انتخاب كرده‌ايم. اين مقادير؛ پيش از اين توسط سيلوا و همكاران [٢١] در شبيه‌سازي زلزله طبس در شرق ايران با موفقيت به‌كار رفته‌است. نتايج تحليل‌هاي ما نيز بيانگر موفقيت اين مدل مسير (مجموعه مدل پخش هندسي و ضريب كيفيت) در شبيه‌سازي زلزله

بم است. شايان ذكر است كه به‌دليل اثرات متقابل مدل پخش هندسي و ضريب كيفيت موج برشي، بايد اين دو متغير را به صورت سازگار با هم انتخاب كرد. به عبارت ديگر نمي‌توان اين دو را از دو مطالعه مجزا از هم برگزيد.



شكل ۲: مدل توزيع لغزش انتخابي در اين مطالعه بر مبناي پيشنهاد ونگ و همكاران[۲۴]؛ مقادير روي هر مكعب، بيانگر لغزش نهايي هر زيرگسل است.

دو پارامتر آزاد يعني اندازه‌ي زيرگسلها و پارامتر *sfact* را با يافتن مقاديري كه بهترين تطابق طيفِ شبيه‌سازي شده و مشاهده شده را در محدوده‌ي 0.4-15 Hz نتيجه مي‌دهد به دست آورده‌ايم. مقدار *sfact*=1.3 بهترين نتيجه را ارائه مي‌كند. ما قابليت مدل در تعيينِ شتاب حداكثر حركت را نيز با توجه به مقادير مختلفِ *sfact* بررسي كرديم كه نتايج آن براي تعدادي از ايستگاههاي منتخب در جدول (۴) بيان شده است. همانطور كه ملاحظه مي‌شود مقدار *sfact*=1.3 از اين لحاظ نيز كارآيي مناسبي دارد.

تحليل حساسيت

الف) توزيع لغزش

يكي از موانع كاربرد روشهاي شبيه‌سازي در پيش‌بيني و شبيه‌سازي زلزله‌هاي آينده، كمبود اطلاعات از چگونگي توزيع لغزش روي گسل مسبب زلزله است. كاربرد برخي روشهاي شبيه‌سازي براي زلزله‌هاي گذشته نيز در صورتي كه حل معكوس آن زلزله در دسترس نباشد (نظير اغلب زلزله‌هاي فلات ايران) غير ممكن است. در روش شبيه‌سازي مورد استفاده در اين مقاله امكان استفاده از مدل "توزيع لغزش تصادفي" (با توزيع نرمال) و "توزيع لغزش يكنواخت" هم وجود دارد. با كاربرد توزيع لغزش تصادفي در واقع يك‌سري اعداد تصادفي با توزيع نرمالي (گوسي) كه انحراف معيار و ميانگين آن (كه يك عدد دلخواه است) برابر است، توليد مي‌شوند. سپس اين اعداد به گونه‌اي مقياس مي‌شوند كه ممان لرزه‌اي مجموع زيرگسلها با ممان لرزه اي حادثه اصلي برابر شود. در مدل توزيع لغزش يكنواخت مقدار لغزش روي همه زيرگسلها برابر هم و به ميزاني است كه باز هم ممان لرزه‌اي مجموع زيرگسلها با ممان لرزه‌اي حادثه اصلي برابر شود.

استفاده از توزيع لغزش تصادفي و يكنواخت در شبيه‌سازي زمين‌لرزه‌هاي واقعي [۷،۹،۱۷،۱۹] و نيز تخمين حركات زلزله‌هاي آينده در يک ساختگاه نتايج مناسبي داشته است[۲،۲۶]. براي بررسي ميزان تاثير مدل لغزش انتخابي روي گسل بر روي نتايج شبيه‌سازي، علاوه بر مدل پيشنهادي ونگ و همكاران [۲۴] از دو مدل توزيع لغزش تصادفي و يكنواخت هم استفاده مي‌كنيم. براي مقايسه خطاي مدلسازي در هر مورد معيار خطايي به صورت لگاريتم نسبت طيف مشاهده شده به طيف شبيه‌سازي شده كه روي همه ايستگاهها ميانگين‌گيري شده است، تعريف كرديم [۴].

$$E(f)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\log(\frac{PSA(f)_{obs}}{PSA(f)_{sim}})_i,$$

(۴)

در اين رابطه n تعداد ايستگاه‌ها (در اين مطالعه هشت ايستگاه) و $PSA(f)_{obs}$ طيف شتاب مشاهده شده در هر ايستگاه است. مقدار طيف شبيه‌سازي شده ($PSA(f)_{sim}$) به كمک روش تصادفي گسل‌هاي محدود به دست آمده‌است. براي يافتن بهترين ورودي‌ها، خطاي متوسطي به شكل زير روي محدوده فركانسي مورد استفاده تعريف شده است.

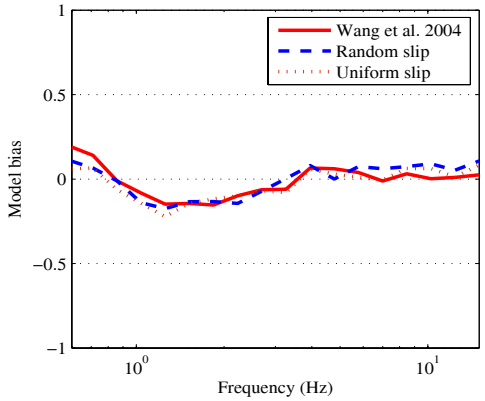
$$\varepsilon=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}E(f)_j$$

(۵)

در اين‌جا m تعداد فركانس‌هاي به‌كار رفته در محاسبه ميانگين است.

اين نسبت براي همه فركانسهاي محدوده 0.4-15 Hz (براي بيست فركانس) به صورت مجزا محاسبه شد. نتايج حاصل از محاسبه خطاي هر يك از سه مدل در شكل (۳) نمايش داده شده است. ملاحظه مي‌شود كه مدل لغزش يكنواخت كمترين خطا و مدل توزيع تصادفي بالاترين خطا را دارد؛ هر چند كه از نقطه نظر مهندسي هر سه مدل كارآيي خوبي داشته‌اند. مدل لغزش ونگ و همكاران خطايي كمتر از مدل تصادفي و بيش از مدل يكنواخت

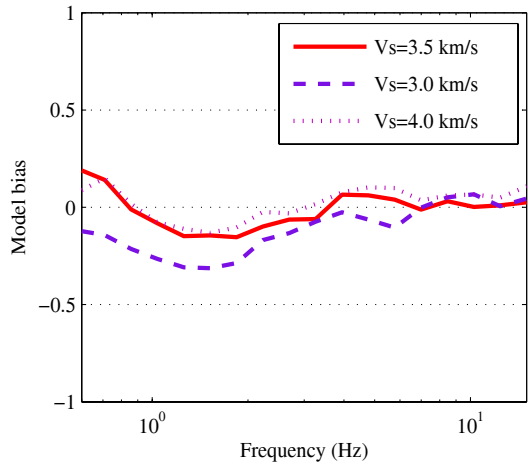
دارد. نتايج اين تحقيق تاييدي بر استفاده از مدل توزيع لغزش تصادفي يا يكنواخت در شبيه‌سازي حركات زمين لرزه هاي محتمل آينده (يا زمين لرزه‌هاي گذشته كه اطلاعي از نوع لغزش روي گسل مسبب آنها در دست نيست) در يك ساختگاه است. علاوه بر اين براي بررسي اثر توزيع لغزش روي پارامترهاي حوزه زمان نيز مقدار شتاب حداكثر در هر ايستگاه حاصل از هر يك از سه حالت را در جدول (۵) ارائه كرده‌ايم. در جداول (۴) و (۵)، اعداد بولد شده نزديكترين مقدار را به مقادير مشاهده شده دارند. ملاحظه مي‌شود كه از نقطه نظر كارآيي در توليد شتاب حداكثرحركت نيز تفاوت بارزي بين سه فرض فوق وجود ندارد. پيش از اين هارتزل و همكاران[۹] در يك مطالعه فشرده، سيزده روش متفاوت شبيه‌سازي را در زلزله نورث ريج به كار برده و نتيجه گرفته‌اند كه روش گسلهاي محدود برزنف و اتكينسون كه تنها از يك مدل توزيع لغزش تصادفي بهره‌گرفته، به خوبي دقيق‌ترين روشهاي تركيبي كه از اطلاعات اضافي توزيع لغزش روي گسل نيز بهره مي‌گيرد قادر به شبيه‌سازي حركات اين رويداد است. هارتزل و همكاران در روش گسلهاي محدود دو گزينه توزيع لغزش تصادفي و يكنواخت را بررسي كرده‌اند كه گزينه اول بهترين نتيجه در پيش‌بيني حركات ثبت شده در زلزله "نورث‌ريج" را در ميان سيزده روش مورد استفاده داشته است.



شكل ۳: خطاي مدل براي توزيع لغزشهاي متفاوت؛ خطا با محاسبه ميانگين لگاريتم نسبت طيف حركت مشاهده شده به طيف شبيه‌سازي شده روي همه ايستگاهها [۴] به دست آمده است.

ب) سرعت موج برشي

پس از وقوع زلزله بم، مطالعات صورت گرفته در منطقه منجر به تعيين دقيق مدل پوسته در اين ناحيه شد كه در مقاله حاضر نيز از نتايج آن [۲۰] استفاده كرده‌ايم. با توجه به آنكه تخمين ما از متغيري مانند سرعت موج برشي محيط مي‌تواند، در بسياري از نقاط كمتر يا بيشتر از مقدار حقيقي باشد، شايسته است كه اثر اين پارامتر بر روي نتايج شبيه‌سازي بررسي شود. به اين منظور آناليزها را با دو مدل ديگر سرعت موج، با تغيير ۱۵ درصد نسبت به مدل مبنا صورت داده‌ايم. اين محدوده كل مقادير فيزيكي متعارف و قابل قبول براي سرعت موج برشي از 3.0 km/s تا 4.0 km/s را شامل مي‌شود. نتايج خطاي اين دو مدل نسبت به مدل اصلي در شكل (۴) منعكس شده است. همانگونه كه در شكل مشخص است، مدل انتخابي كمترين ميزان خطاي طيفي را دارد. مقايسه شتاب شبيه‌سازي شده و ثبت شده در ايستگاه بم نيز به عنوان مهمترين داده موجود، تاييدي بر صحت ميزان انتخابي سرعت موج برشي است (جدول ۲).



شكل ۴: خطاي مدل براي سرعت‌هاي متفاوت موج برشي؛ خطا با محاسبه ميانگين لگاريتم نسبت طيف حركت مشاهده شده به طيف شبيه‌سازي شده روي همه ايستگاهها به دست آمده است.

جدول ۲: شتاب‌شبيه‌سازي شده در ايستگاه بم و درصد خطاي آن به متوسط (دو مولفه) مشاهده شده (700 cm/s/s)، به ازاي مقادير مختلف سرعت موج برشي محيط.

Vs (km/s)	PGA_{sim} (cm/s/s)	Error%
3.0	593	16
3.5	652	7
4.0	492	30

با توجه به خطاي مدل و اهميت بيشتر محتوي طيفي نسبت به شتاب در مطالعات شبيه‌سازي؛ مي‌توان گفت كه

مدل‌اي كه سرعت موج برشي را بيشتر از واقع، تخمين زده است ($Vs = 4.0\,\mathrm{km/s}$) كارآيي مناسب‌تري نسبت به مدلي كه سرعت موج را كمتر تخمين زده ($Vs = 3.0\,\mathrm{km/s}$)، داشته است. نكته قابل ذكر ديگر اينكه محدوده تغييرات فرض شده‌ي فوق (3-4 km/s)، بيش از محدوده رايج در مطالعات زلزله‌هاي كم عمق است. طي مرور ادبيات صورت گرفته در مطالعات شبيه‌سازي زلزله‌هاي كم عمق، مشاهده شد كه حداكثر سرعت موج برشي به‌كار رفته در اين نوع تحقيقات، $Vs = 3.8\,\mathrm{km/s}$ است [۴].

نتايج

شبيه‌سازيهاي تصادفي يک تاريخچه زماني از حركت در هر يک از هشت ايستگاه ايجاد مي‌كند. دامنه‌ي فركانسي مورد استفاده در اين تحقيق 0.4-15 Hz است. تاريخچه زماني‌هاي شبيه‌سازي شده و طيفهاي مربوط به آن را در شكل (۵) نشان داده و با حركات اصلي ثبت شده مقايسه كرده‌ايم. در اين اشكال گام زماني تاريخچه زماني‌ها برابر گام زماني ركوردهاي اصلي انتخاب شده است. طيف شبه شتاب با ميرايي پنج درصدِ مولفه‌ي تصادفي حركت توليد شده را با خط-نقطه و طيفِ ميانگينِ دو مولفه حركت را با خط پيوسته نشان داده‌ايم. بررسي نتايج بيانگر تطابق كلي مناسب بينِ داده‌هاي ثبت شده و باز توليد شده است. مقادير شتاب حركاتِ توليد شده, تطابق مناسبي با مقادير ثبت شده دارد. تنها در ايستگاه ابارق مقدار شتاب كمي بيش از دو برابر اختلاف دارد. شكل طيف اين ايستگاه بيانگر وجود محتوي فركانسي بالا در اين ركورد است كه مي‌تواند منجر به افزايش سطح شتاب و طيف در اين ايستگاه شود. مواردي مشابه‌اي پيش از اين در ادبيات فني گزارش شده است [۷]. در شبيه‌سازي تصادفي ركورد ايستگاه بم عدم تطابق واضحي در فركانسهاي پايين (f>1 Hz) ديده مي‌شود كه مي‌توان اثرات جهت پذيري و چشمه را عامل آن دانست. با در نظر گرفتن همه محدوديتهاي روش مورد استفاده, نتايج كاملاً قابل توجه است.

جدول ۳: مقادير پارامترهاي انتخابي در شبيه‌سازي حركت زلزله بم.

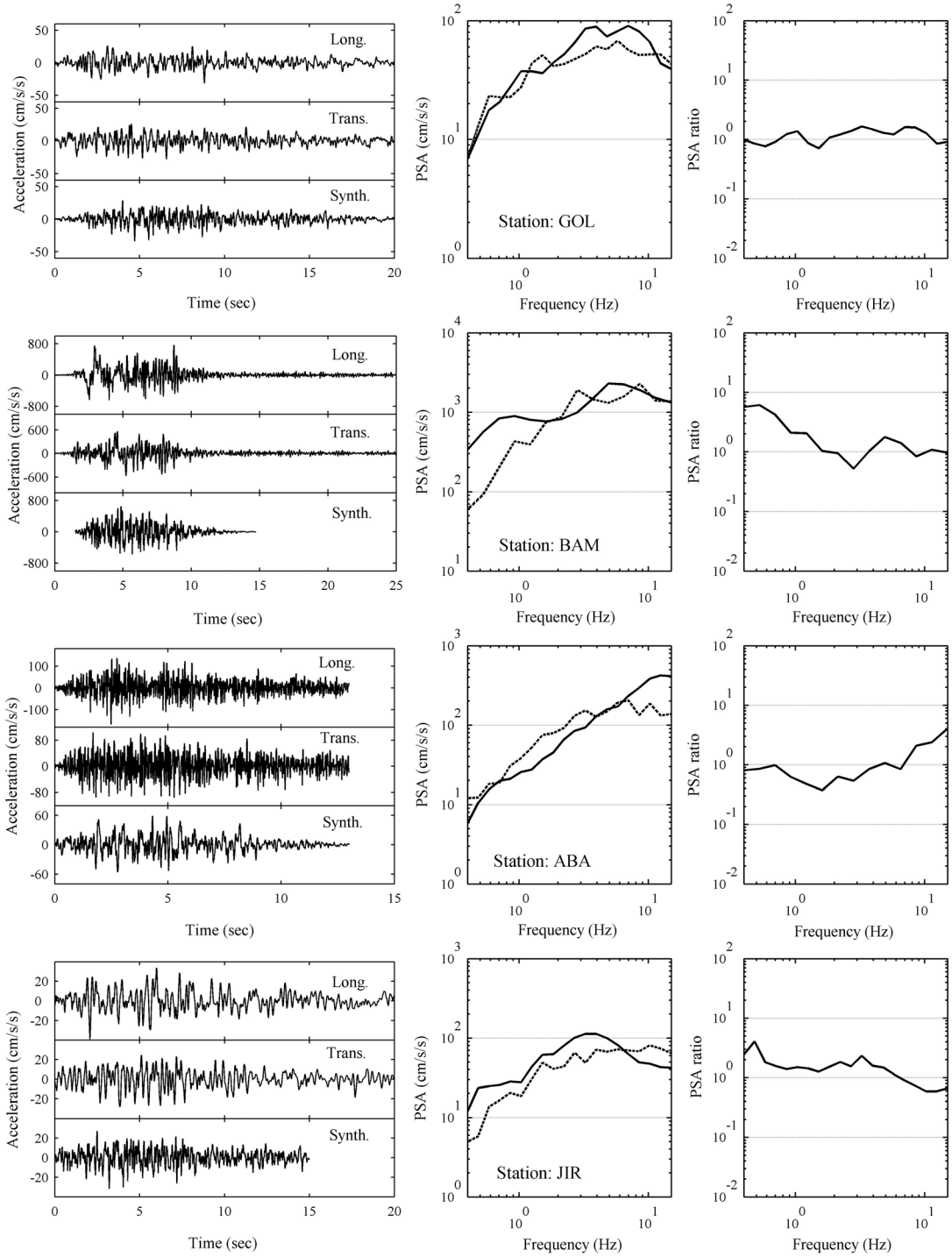
Parameter	Parameter value
Fault orientation (strike/dip) (Degree)	357 / 80
Fault dimensions along strike and dip (km)	16, 12
Depth to the top of the Fault (km)	1.0
Mainshock moment magnitude (M_w)	6.5
Stress parameter (bars)	50
Subfault dimensions (km)	3.2×4
Subfault corner frequency (Hz)	0.42
Crustal shear-wave velocity (km/s)	3.5
Rupture velocity (km/s)	$0.8 \times$ shear-wave velocity
Crustal density (g/cm^3)	2.8
Windowing function	Saragoni-Hart
Geometric spreading	$R^{-1}(R \le 60$ km), $R^{-1/2}(R > 60$ km)
Crustal amplification	Boore and Joyner, 1997

جدول ۴: مقادير حداكثر شتاب در ساختگاههاي منتخب به ازاي مقادير متفاوت *sfact*.

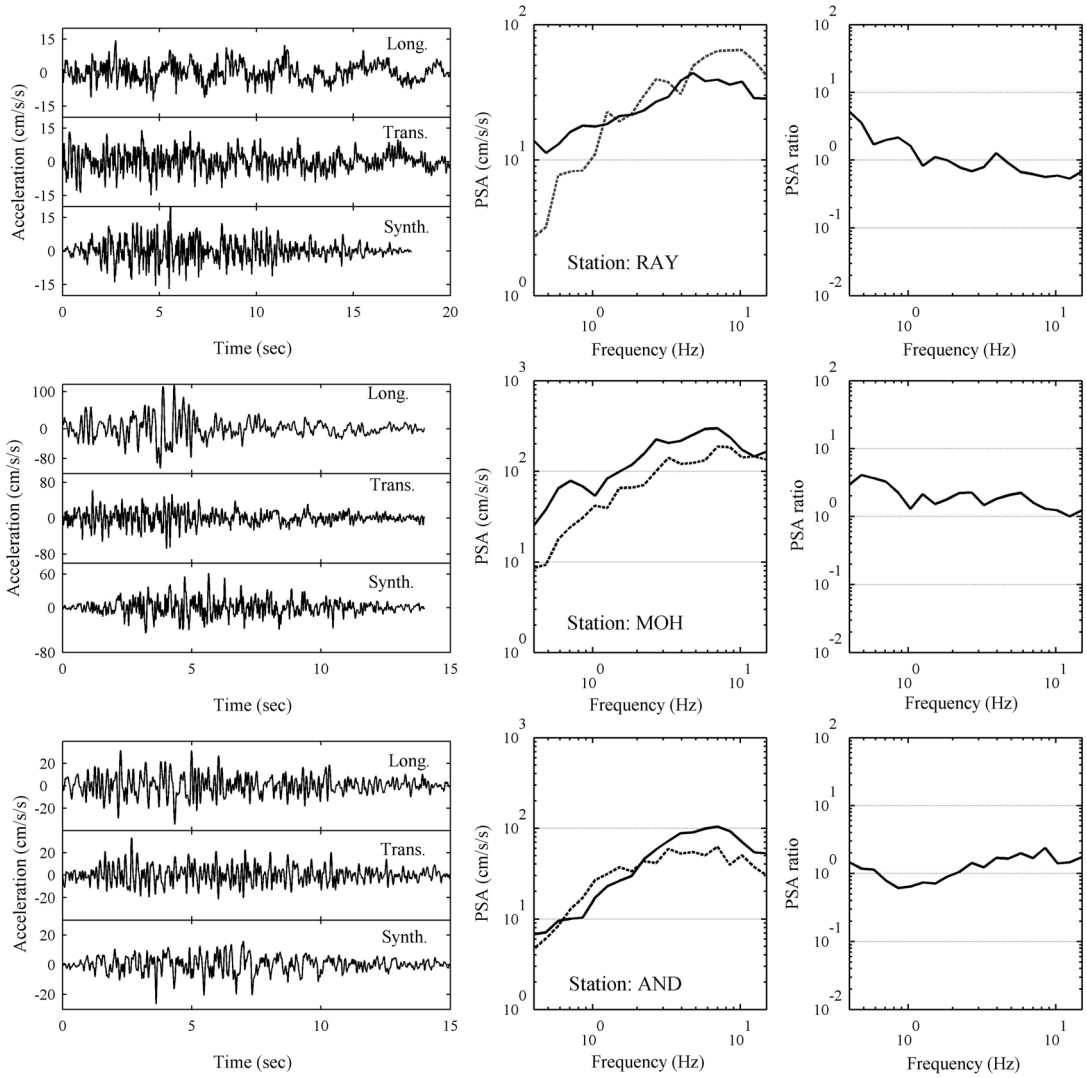
sfact	Peak ground acceleration (cm/s/s)				
	BAM	MOH	JIR	AND	RAY
1.0	345.9	32.5	16.9	14.0	11.1
1.1	437.7	41.1	21.3	17.7	**14.0**
1.2	540.0	50.7	26.3	21.8	17.2
1.3	**652.6**	61.3	**31.6**	26.3	20.8
1.4	775.1	72.9	37.4	**31.2**	24.6
1.5	907.4	**85.5**	43.7	36.5	28.8
1.6	1049.4	99.0	50.4	42.1	32.2
1.7	1200.7	113.5	57.6	48.1	37.9
1.8	1361.2	128.8	65.2	54.4	42.9
1.9	1530.7	145.2	73.1	61.1	48.2
2.0	1708.9	162.3	81.5	68.1	53.7

جدول ٥: مقادير حداكثر شتاب در ساختگاههاي مختلف به ازاي توزيع لغزشهاي متفاوت روي گسل مسبب.

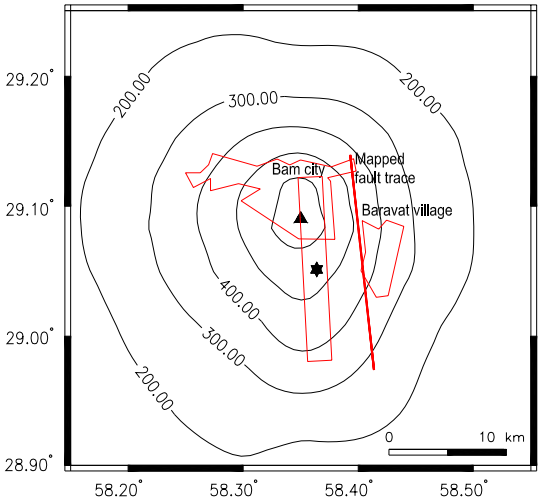
Slip Distribution	Peak ground acceleration (cm/s/s)							
	BAM	ABA	MOH	GOL	JIR	JOS	AND	RAY
Wang et al.,2004	653	**59**	61	20	**31**	14	**26**	21
Uniform	**666**	57	**63**	**23**	30	**15**	22	20
Random	631	51	55	20	28	14	19	**17**



شكل ٥: تاريخچه زماني مشاهده شده (دو تصوير بالا، سمت چپ) و توليد شده (تصوير پايين، سمت چپ)؛ همچنين مقايسه بين طيف پاسخ شبه شتاب با ميرايي ٥% حركت ثبت شده (تصوير وسط، خط پر) و طيفِ حركت تصادفي توليد شده (تصوير وسط، خط نقطه). تصوير سمتِ راست، نسبت طيف حركت مشاهده شده به طيف حركت توليد شده را نشان مي‌دهد.



ادامه شكل ۵: تاريخچه زماني مشاهده شده (دو تصوير بالا، سمت چپ) و توليد شده (تصوير پايين، سمت چپ)؛ همچنين مقايسه بين طيف پاسخ شبه شتاب با ميرايي ۵% حركت ثبت شده (تصوير وسط، خط پر) و طيفِ حركت تصادفي توليد شده (تصوير وسط، خط نقطه). تصوير سمتِ راست، نسبت طيف حركت مشاهده شده به طيف حركت توليد شده را نشان مي‌دهد.



شكل ۶: نقشه خطوط هم شتاب در سنگ بستر(cm/s/s)، به دست آمده در اين تحقيق. محل ايستگاه بم (مثلث) و خط شناسايي شده گسل قديمِ بم، صفحه‌ي گسل مورد استفاده در اين مطالعه و كانون زلزله (با يك ستاره) نيز نمايش داده شده‌اند.

در آخرين گام اين تحقيق مدل كاليبره شده فوق را كه از قيود لرزه‌اي مناسب برخوردار است براي توليد و بازسازي حركات زلزله در تعداد زيادي از نقاط منطقه بم به كار مي‌بريم. در اين مرحله منطقه بم را به شبكه‌اي متشكل از ۹۰۰ نقطه (۳۰*۳۰) تقسيم كرده و با به دست آوردن شتاب حركت در هر يک از اين نقاط خطوط هم شتاب را رسم كرده‌ايم. براي تاكيد بر اثرات چشمه لرزه‌زا و با توجه به گزارش نديم و همكاران مبني بر شواهد اندک از اهميت اثر ساختگاه در خرابيهاي زلزله[۱۵]، نوع ساختگاه در همه نقاط سنگ فرض شده است. نقشه خطوط هم شتاب در شكل (۶) ارائه شده است. از اين شكل به روشني مي‌توان دريافت كه قسمت شرقي بم بيشترين شتاب زلزله را تجربه كرده است. مقدار شتاب در سنگ بستر اين ناحيه به قدري بالاست (PGA > 0.6g) كه به تنهايي-بدون نياز به تركيب با عواملي نظير اثر ساختگاه- مي‌توان خسارات ديده شده را به اثر چشمه لرزه‌زا منسوب كرد. از اين شكل مي‌توان دريافت كه روستاي بروات كه فاصله‌اي يكسان با شرق بم از رومركز زلزله دارد شتابهاي نسبتاً كمتري را تحمل كرده است كه مِي تواند توجيه كنندهِ‌ي خسارات كمتر در اين ناحيه باشد[۱۵،۱۶].

جمع بندي و نتيجه گيري

روش تصادفي گسل با ابعاد محدود براي شبيه‌سازي زلزله مخرب بم به كار رفته است. نتايج جالب توجه زير از اين تحقيق قابل بيان است:

از ميان توزيع لغزشهاي استفاده شده دو توزيع ونگ وهمكاران[۲۴] كه بر مبناي حل معكوس به دست آمده است و توزيع لغزش تصادفي روي گسل به ترتيب بهترين دقت را دارا مي‌باشند. نتايج مقايسه خطاي مدل كارآيي خوب روش گسلهاي محدود برزنف و اتكينسون با وجود استفاده از مدل لغزش ساده تصادفي يا يكنواخت را نشان مي‌دهد. نتيجه مشابهي توسط هارتزل و همكاران در شبيه سازي زمين‌لرزه "نورث‌ريج" گزارش شده است. دقت خوب نتايج حاصل از كاربرد توزيع لغزش تصادفي و يكنواخت مي تواند استفاده از آن را در تخمين حركات زلزله‌هاي آينده توجيه كند. در مقايسه نتايج شبيه‌سازي شده و حركات واقعي بايد گفت: هر چند پارهِ‌اي عدم هم خواني در بعضي ايستگاه‌ها وجود دارد، اما با توجه به استفاده از روابط كلي بور و جوينور براي بيان ضرايب بزرگنمايي ساختگاه نتايج كلي بسيار مناسبي به دست آمده است. تطابق بين طيف و تاريخچه زماني شبيه‌سازي شده و مشاهده شده از نظر شكل و مقدار رضايت بخش است و در اكثر ايستگاهها نسبت طيف شبيه‌سازي شده به ثبت شده نزديكِ يك است. در دو ايستگاه با ساختگاه خاك ـ Vs <= 300 m/s ـ (گلبافت و اندوهجرد)، نتايج بسيار قابل توجهي حاصل شده است. اين نتايج نشان مي‌دهد كه روش مورد استفاده در تركيب با يك مدل بسيار ساده از اثر ساختگاه مي‌تواند نتايج مناسبي در توليد شتابنگاشتهاي زلزله بم ارائه كند. عدم تطابقهاي موجود در پاره‌اي از ايستگاه‌ها را مي‌توان به اثرات موضعي خاك نسبت داد كه در توابع بزرگنمايي كلي مورد استفاده ديده نشده است. در اين ايستگاه‌ها مطالعات دقيق‌تر اثرات ساختگاه براي بهبود تطابق نتايج شبيه‌سازي با داده ها نياز است. مدل كاليبره شده حاصل از اين مطالعه براي توليد تاريخچه زماني‌هاي حركت در نقاط زيادتري كه دستگاه ثبت موجود نبوده است به كار رفته، تا روشن شود كه چگونه خصوصيات حركت الگوي توزيع خرابي در بم را متاثر ساخته است. به ويژه پاسخي براي اين سؤال كه چرا بخش شرقي بم سنگين‌ترين خسارات را متحمل شده، بيابيم. نتايج اين بررسي كه درقالب نقشه هم شتاب در منطقه ارائه شد, بيانگر آن است كه اثرات چشمه لرزه‌زا به تنهايي قادر است الگوي خرابي مشاهده شده را توضيح دهد و شتابهاي بالاي به دست آمده (بيش از 0.6g) در بخش شرقي بم بيانگر دليل خرابي وسيع در اين بخش است. شتابهاي كمتر در روستاي بروات حجم كمتر خسارات در اين بخش را توجيه مي كند. روش ارائه شده در اين مقاله ابزاري بسيار مناسب جهت برآورد حركات زلزله در نقاطي مانند ايران مركزي و شرق ايران -كه ركوردهاي زلزله در مقايسه با ناحيه‌ي زاگرس كمتر است- فراهم مي‌كند.

تشكر و سپاسگزاري

از راهنماييهاي ارزنده‌ي پروفسور ايگور برزنف از دانشگاه ايالتي آيوا در ايالات متحده قدرداني مي‌شود. همچنين نويسندگان مقاله از مركز تحقيقات ساختمان و مسكن براي فراهم كردن داده هاي لرزه‌اي زلزله و از آقاي مهندس انوشيروان انصاري به دليل پيشنهادات سازنده در ارائه مناسب متن قدرداني مي‌كنند.

مراجع

1 - Aki, K. and Richards, P. G. (1980). :Quantitative seismology." *Theory and Methods*, Vol. 1. Freeman, San Francisco, CA.

2 - Atkinson, G. M. and Beresnev, I. A. (1997). "Ground Motions at Memphis and St. Louis from M 7.5–8.0 Earthquakes in the New Madrid Seismic Zone." *Bulletin of the Seismological Society of America 92*, PP.1015-1024.

3 - Berberian, M. (1979). Earthquake faulting and bedding thrust associated with the Tabas-E-Golshan (Iran) earthquake of September 16, 1978." *Bulletin of the Seismological Society of America 69*, PP.1861-1887.

4 - Beresnev, I. A. and Atkinson, G. M. (1997). "Modeling finite-fault radiation from the ω-spectrum." *Bulletin of the Seismological Society of America 87,* PP.67-84.

5 - Beresnev, I. A. and Atkinson, G. M. (1998). "FINSIM: a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults." *Seismological Research Letters 69,* PP.27-32.

6 - Boore, D. and Joyner, W. (1997). "Site amplifications for generic rock sites." *Bulletin of the Seismological Society of America 87,* PP. 327-341.

7 - Gorini, A., Marcucci, S., Marsan, P. and Milana, G. (2004). "Strong motion records of the 2002 Molise, Italy, earthquake sequence and stochastic simulation of the main shock." *Earthquake Spectra 20,* PP.S65-S79.

8 - Halldorsson, B. and Papageorgiou, A. S. (2005). "Calibration of the specific barrier model to earthquakes of different tectonic regions." *Bulletin of the Seismological Society of America 95,* PP.1276-1301.

9 - Hartzel, S., Harmsen, A., Frankel, A. and Larsen, S. (1999). "Calculation of broadband time histories of ground motion: comparison of methods and validation using strong-ground motion from the 1994 Northridge earthquake." *Bulletin of the Seismological Society of America 89,* PP.1484-1504.

10 - Jafar Gandomi, A., Fatemi Aghda, S. M., Suzuki, S. and Nakamura, T. (2004). "Strong ground motion of the 2003 Bam earthquake, southeast of Iran (Mw=6.5)." *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, University of Tokyo 79, PP.47-57.

11 - Kanamori, H. and Anderson, D. L. (1975). "Theoretical basis of some empirical relations in seismology." *Bulletin of the Seismological Society of America 65*, PP.1073-1095.

12 - Miyake, H., Koketsu, K. and Mostafaei, H. (2004). *Rupture process of the 2003 Bam, Iran, earthquake: did shallow asperities on a fresh fault cause extreme ground motions,* Eos Trans. AGU 85.

13 - Motazedian, D. and Atkinson, G. M. (2006). "Stochastic Finite-Fault Modeling Based on a Dynamic Corner Frequency." *Bulletin of the Seismological Society of America 95,* PP. 995-1010.

14 - Motazedian, D. and Moinfar, A. (2006). "Hybrid Stochastic Finite Fault Modeling of 2003, M6.5, Bam Earthquake (Iran)." *Journal of Seismology 10,* PP.91–103.

15 - Nadim, F., Moghtaderi-Zadeh, M., Lindholm, C., Andresen, A., Remseth, S., Bolourchi, M., Mokhtari, M. and Tvedt, E. (2004). "The Bam earthquake of 26 December 2003." *Bulletin of Earthquake Engineering 2*, PP.119-153.

16 - Nakamura, T., Suzuki, S., Sadeghi, H., Fatemi Aghda, S.M, Matsushima, T., Ito, Y., Hosseini, S.K., Jafar Gandomi, A. and Maleki, M. (2005). "Source fault structure of the 2003 Bam earthquake, southeastern Iran, inferred from the aftershock distribution and its relation to the heavily damaged area: Existence of the Arg-e-Bam fault proposed." *Geophysical Research Letters 32,* L09308, doi: 10.1029/2005GL022631.

17 - Roumelioti, Z. and Beresnev, I. A. (2003). "Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: application to rock and soil sites with implications for nonlinear site response." *Bulletin of the Seismological Society of America 93,* PP.1691-1702.

18 - Roumelioti, Z. and Kiratzi, A. (2004). "Stochastic strong ground-motion simulation of the 7 September 1999 Athens (Greece) earthquake." *Bulletin of the Seismological Society of America 94,* PP.1036-1052.

19 - Roumelioti, Z. and Kiratzi, A. (2002). "Stochastic simulation of strong-motion records from the 15 April 1979 (M 7.1) Montenegro earthquake." *Bulletin of the Seismological Society of America 92,* PP.1095-1101.

20 - Sadeghi, H., Fatemi Aghda, S. M., Suzuki, S. and Nakamura, T. (2005). *3D velocity structure of the 2003 Bam earthquake area (SE Iran): existence of a shallow brittle layer and its relation to the heavy damages.* Submitted to Tectonophysics.

21 - Silva, W. J., Abrahamson, N., Toro, G. and Costantino. C. (1997). *Description and validation of the stochastic ground motion model final report*, Brookhaven National Laboratory, Associated Universities, Inc. Upton, New York.

22 - Talebian, M., Fielding, E. J., Funning, G. J., Ghorashi, M., Jackson, J., Nazari, H., Parsons, B., Priestley, K., Rosen, P. A., Walker, R. and Wright, T. J. (2004). "The 2003 Bam (Iran) earthquake: rupture of a blind strike-slip fault*." Geophysical Research Letters 31,* doi: 10.1029/2004GL020058.

23 - Walker, R. and Jackson, J. (2002). "Offset and evolution of Gowk fault, S.E. Iran: a major intra-continental strike-slip system." *Journal of Structural Geology 24*, PP.1677-1698.

24 - Wang, R., Xia, Y., Grosser, H., Wetzel, H.U., Kaufmann, H. and Zschau, J. (2004). "The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: precise source parameters from satellite radar interferometry." *Geophysical Journal International 159,* PP.917-922.

25 - Yagi, Y. (2003). "Preliminary results of rupture process for 2003 December 26 Southeastern Iran, earthquake." *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering,* http://iisee.kenken.go.jp/staff/yagi/eq/Iran20031226/IRAN20031226.htm

26 - Zafarani, H., Noorzad, A. and Ansari, A. (2005). "Generation of near-fault response spectrum for a large dam in Iran." *Hydropower and Dams 12,* Issue 4, PP.51-55.

27 - Zare, M. (2004). B"am, Iran earthquake of 26 December 2003, MW 6.5: a study on the strong ground motions." *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering,* Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 2002.

28 - Zare, M., Bard, P.Y. and Ghafory-Ashtiany, M. (1999). "Site characterizations for the Iranian strong motion network." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering 18,* PP.101-121.

واژه هاي انگليسی به ترتيب استفاده در متن

1 - Stochastic finite-fault method
2 - Point source
3 - Asperity
4 - Source
5 - Directivity effect
6 - Dynamic corner frequency
7 - Path effect
8 - Bias