

چکیده

نتایج حرکت‌های زمین به‌دست آمده از روش‌های شبیه‌سازی به‌شدت بستگی به میزان دقت پارامترهای ورودی دارد، به‌طوری‌که می‌تواند مقادیر بیشینه، محتوای فرکانسی و مدت تداوم حرکت را تحت تأثیر قرار دهد. در این مطالعه به‌منظور ارزیابی میزان اثرات عدم قطعیت در پارامترهای چشمه، مسیر و ساختگاه، مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی ۱۹ سناریوی آزمایشی با پارامترهای متفاوت نسبت به سناریوی مرجع، انجام گرفته است. برای دستیابی به این هدف گسل نیاوران در شمال تهران به‌عنوان گسل هدف انتخاب شد که با بزرگی گشتاوری ۷ به‌ترتیب باعث ایجاد میانگین شتاب و سرعت حداکثر ۶۰۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه و ۶۰ سانتی‌متر بر ثانیه در محدوده‌ی مورد مطالعه می‌شود. بر اساس نتایج، پارامترهای بزرگی گشتاوری، افت تنش^۲، بخش مربوط به فرکانس فاکتور کیفیت^۳، توزیع هندسی^۴ و کاپا بیشترین اثر و پارامترهای شیب گسل، نقطه‌ی شروع گسیختگی^۵، سرعت گسیختگی، سطح تپنده^۶ دارای کمترین اثر بر نتایج هستند. همچنین محدوده‌ی پایین فرکانسی (کمتر از ۱ هرتز) توسط پارامترهای نقطه‌ی شروع گسیختگی و بزرگی گشتاوری و حرکت‌های با فرکانس‌های بالاتر توسط پارامترهای افت تنش، فاکتور کیفیت، کاپا و بزرگی گشتاوری کنترل می‌شوند.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی حرکت زمین، سناریوی زلزله، عدم قطعیت پارامترها، EXSIM، گسل نیاوران.

حساسیت نتایج شبیه‌سازی حرکت زمین به پارامترهای ورودی در روش گسل محدود تصادفی؛ مطالعه موردی: گسل نیاوران تهران

جعفر کارشی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، ایران

مقداد سمائی (نویسنده مسئول)

دانش‌آموخته دکتری، دانشگاه کانازاوا، ژاپن،
meghdad.samaei@gmail.com

عبدالحسین فلاحی

استادیار، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، ایران

۱- مقدمه

مطالعه با بررسی اختلاف در نتایج حاصل از ۱۹ سناریوی مختلف با پارامترهای چشمه، مسیر و ساختگاه متفاوت نسبت به یک سناریوی مرجع، سعی بر بیان اهمیت این موضوع شده است. تاکنون مطالعات زیادی به کمک روش‌های مختلف شبیه‌سازی جهت تعیین اثر عدم قطعیت پارامترهای چشمه و مسیر انتشار انجام گرفته است [۱-۹] که در اکثر این مراجع تأثیر تعداد کمتری از پارامترهای مورد نیاز در شبیه‌سازی حرکت زمین بر نتایج، در مقایسه با مطالعه حاضر و مطالعات سورنسن و همکاران [۴] و بیروم و همکاران [۱۰] بررسی شده‌اند. در بیشتر این تحقیقات، محل شروع گسیختگی به‌عنوان یک پارامتر مهم معرفی شده است که وجود هرگونه عدم قطعیت، باعث تأثیر شدید بر توزیع مقادیر حداکثر حرکت زمین به دلیل اثر جهت‌داری

استفاده از روش‌های گوناگون شبیه‌سازی حرکت زمین در سال‌های اخیر به‌عنوان ابزار مهمی در فهم پیچیدگی‌های موجود در گسیختگی گسل و مسیر انتشار امواج و در نتیجه چگونگی تأثیر آنها بر حرکت‌های تولید شده، گسترش یافته است؛ به‌طوری‌که می‌توان اطلاعات حساسی از قبیل محتوای فرکانسی، پارامترهای حداکثر، مدت زمان مؤثر سیگنال و... را از حرکت‌های تولید شده، استخراج کرد. دسترسی به این اطلاعات نیازمند تعیین دقیق پارامترهای در نظر گرفته شده به‌عنوان ورودی در روش‌های شبیه‌سازی هستند که بایستی بازتابنده‌ی ویژگی‌های لرزه‌خیزی ناحیه مورد مطالعه باشند، بنابراین استفاده از هرگونه پارامتر دارای عدم قطعیت می‌تواند منجر به نتایج و تفسیر اشتباه از شتاب‌نگاشت‌های تولید شده گردد. به همین جهت در این

امتداد می‌یابد می‌تواند مهم‌ترین سناریو برای شهر تهران باشد، زیرا تمام طول آن در یک راستا قرار گرفته است [۱۲]؛ بنابراین در ادامه این مطالعه نیز گسل نیاوران به‌عنوان گسل هدف انتخاب و نتایج بر اساس آن ارائه شده است که ویژگی‌های آن در بخش‌های بعد معرفی می‌گردد.

در مطالعه حاضر، به بررسی تأثیر عدم قطعیت هر پارامتر به‌صورت جداگانه بر نتایج شبیه‌سازی پرداخته می‌شود و برخلاف کالترا و همکاران [۸] از اثر ترکیب پارامترها چشم‌پوشی شده است. شیب صفحه‌ی گسیختگی، بزرگی گشتاوری، سرعت گسیختگی، نقطه‌ی شروع گسیختگی و افت تنش به‌عنوان پارامترهای چشمه؛ و فاکتور کیفیت، توزیع هندسی به‌عنوان پارامترهای مسیر و کاپا برای پارامترهای ساختگاه انتخاب شده‌اند و با اختصاص مقادیر متفاوت به هر پارامتر نسبت به سناریوی مرجع و محاسبه‌ی اختلاف آنها، تأثیر هر کدام بر حرکت زمین تولید شده، سنجیده می‌شود. همچنین روش گسل محدود تصادفی [۱۳-۱۴] که روشی ساده و درعین حال کارآمد می‌باشد، برای تولید شتاب‌نگاشت‌ها در باند فرکانسی ۰/۱ تا ۱۵ هرترز به کار رفته است.

۲- شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین

در این بخش، ابتدا به‌صورت مختصر روش شبیه‌سازی گسل محدود تصادفی و سپس ویژگی‌های سناریوی مرجع و پارامترهای آن شرح داده می‌شود:

۲-۱- روش گسل محدود تصادفی

روش‌های تصادفی معمولاً شامل روش‌های چشمه‌ی نقطه‌ای [۱۵-۱۶]، گسل محدود [۱۳]، مدل حائل‌های ویژه [۱۷-۱۹]، مدل تصادفی تابع تجربی گرین (دو مرحله‌ای) [۲۰] و... می‌باشند که در این مطالعه بر روی مدل گسل محدود تمرکز شده است. در روش چشمه‌ی نقطه‌ای، چشمه‌ی زلزله به‌صورت یک نقطه فرض می‌گردد که این ساده‌سازی برای زلزله‌های کوچک به نتایج قابل‌اعتمادی منجر خواهد شد، اما برای زلزله‌های بزرگ

می‌گردد. همچنین، بزرگی زلزله و توزیع لغزش بر روی صفحه‌ی گسیختگی از دیگر عواملی هستند که باعث تغییر در پارامترهای حداکثر از قبیل شتاب، سرعت و... می‌شوند. آتکینسون و برزنف [۱]، کاوس و همکاران [۵] و آمری و همکاران [۹] تأثیر عدم قطعیت در مقدار سرعت گسیختگی بر نتایج شبیه‌سازی را زیاد ارزیابی کرده‌اند؛ درحالی‌که آگارد و همکاران [۶-۷] برخلاف آنها اثر این پارامتر را ناچیز دانسته‌اند. دلیل این اختلاف را می‌توان به استفاده از روش‌های مختلف شبیه‌سازی ارتباط داد، به‌طوری‌که آمری و همکاران [۹] از سه روش متفاوت برای بررسی اثر عدم قطعیت پارامترها بر نتایج بهره برده‌اند، علاوه بر اینکه آنها دریافتند که مقادیر به‌دست آمده از هر روش برای بعضی از نتایج از قبیل شتاب طیفی و بیشینه سرعت، (در مقایسه با نتایج سناریوی مرجع) دارای ناسازگاری کلی هستند، بلکه نمی‌توان از تأثیر روش‌های شبیه‌سازی به کار گرفته شده بر میزان تفاوت نتایج نیز چشم‌پوشی نمود. همچنین، کالترا و همکاران [۸] با استفاده از روش شبیه‌سازی اجزای محدود و بررسی ۴۲۰ سناریوی مختلف، به این نتیجه دست یافتند که نه تنها وجود عدم قطعیت تنها در یک پارامتر می‌تواند باعث ایجاد اختلاف نتایج نسبت به سناریوی مرجع گردد، بلکه ترکیب چند پارامتر دارای عدم قطعیت نیز باعث افزایش بیشتر این تفاوت می‌شود.

تهران به‌عنوان مرکز و پرجمعیت‌ترین شهر ایران از شمال توسط گسل‌های فعال نیاوران، شمال تهران، مشاء و محمودیه و از جنوب به‌وسیله‌ی گسل‌های پارچین و ری محصور شده است که تهدیدی بالقوه برای این شهر محسوب می‌شوند. زمین‌لرزه سال ۱۱۷۷ میلادی با بزرگی گشتاوری حدود ۷/۲ آخرین زلزله قدرتمندی به شمار می‌رود که باعث خرابی‌های گسترده در منطقه گردیده است [۱۱]؛ بنابراین فعالیت لرزه‌ای پایین این گسل‌ها در طول سالیان اخیر می‌تواند باعث انباشته شدن تنش در طول گسل گردد و این احتمال رخ دادن زلزله‌ای با بزرگی بالا را در آینده تقویت می‌کند. گسل نیاوران با بیشترین طول در بین گسل‌های معرفی شده که بخشی از آن در محدوده‌ی شهری

می‌شود، این رفتار از طریق پارامتر سطح تپنده (به‌عنوان یکی دیگر از پارامترهای چشمه) که بیانگر حداکثر زیر گسل‌های فعال در هر لحظه در طول گسیختگی است، کنترل می‌گردد. برای مثال در صورتی که مقدار این پارامتر ۵۰ درصد در نظر گرفته شود، نشان‌دهنده‌ی این است که تنها نصف زیر گسل‌ها فعال و در محاسبه‌ی فرکانس گوشه‌ی دینامیکی مشارکت دارند و مابقی غیر فعال هستند. در نهایت بخش فعال با پیشرفت گسیختگی در امتداد صفحه جابه‌جا می‌شود [۲۷]. لازم به ذکر است که در این مطالعه برای شبیه‌سازی گسل محدود از نسخه‌ی فرتن ارائه شده توسط دیوید بور (EXSIM_dmb) استفاده شده است.

هسته‌ی روش‌های تصادفی از طیف فوریه هدف که شامل اثرات چشمه، مسیر و ساختگاه می‌باشد، تشکیل شده است. با توجه به اینکه در این مطالعه، علاوه بر پارامترهای توصیف‌کننده‌ی هندسه گسل، دیگر سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده بر اساس تغییر در پارامترهای تشکیل‌دهنده‌ی طیف فوریه هدف شکل گرفته‌اند، لازم است مشخصات این طیف که در مدل‌های لرزه‌شناسی به‌صورت زیر می‌باشد [۱۶]، معرفی شود:

$$Y(M_0, R, f) = E(M_0, f) \cdot P(R, f) \cdot G(f) \quad (1)$$

که در آن، Y طیف فوریه شتاب، E پارامتر چشمه، P پارامتر مسیر، G پارامتر ساختگاه، M_0 گشتاور لرزه‌ای، R فاصله ساختگاه از چشمه و f فرکانس می‌باشد. پارامتر چشمه برابر است با:

$$E(M_0, f) = CM_0(2\pi f)^2 / [1 + (f_0/f)^2] \quad (2)$$

که در آن، C ضریب ثابت و f_0 فرکانس گوشه است. پارامتر مسیر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

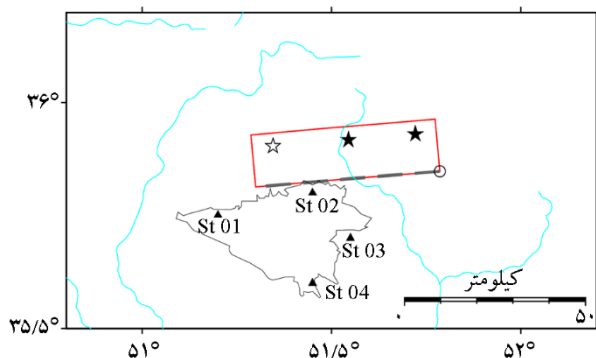
$$P(R, f) = Z(R) \exp(-\pi f R / Q(f) \beta) \quad (3)$$

در اینجا، $Z(R)$ توزیع هندسی، $Q(f)$ فاکتور کیفیت انتشار امواج و β سرعت موج برشی در پوسته زمین است. در نهایت پارامتر ساختگاه به شکل زیر می‌باشد:

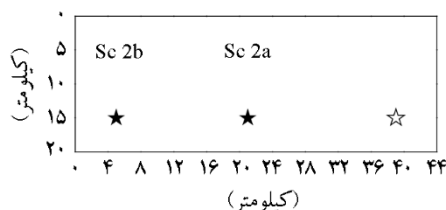
$$G(f) = A(f) \exp(-\pi \kappa_0 f) \quad (4)$$

که در آن چشمه به‌صورت یک صفحه با ابعاد چندین کیلومتر در نظر گرفته می‌شود، این مدل توانایی تولید حرکت‌های نزدیک گسل را ندارد. در حوزه نزدیک، انتشار ناهمگن گسیختگی، جهت‌پذیری و موقعیت قرارگیری ساختگاه نسبت به چشمه بر روی پارامترهای مهمی از جمله دامنه، محتوای فرکانسی و مدت تداوم حرکت تأثیر چشمگیری خواهند داشت [۲۱]. البته استفاده از تعریف‌های جدید برای فاصله از قبیل فاصله مؤثر [۲۲] و فاصله چشمه‌ی نقطه‌ای [۲۳] تا حدودی این نقص کاهش یافته است. برخلاف روش چشمه‌ی نقطه‌ای، در روش گسل محدود [۱۳] از هندسه گسل استفاده می‌شود، در این مدل نیز همانند سایر مدل‌ها [۲۴-۲۶]، صفحه گسیختگی به تعدادی زیر گسل تقسیم می‌گردد که هر کدام از آنها به‌صورت یک چشمه‌ی نقطه‌ای رفتار می‌کند، سپس رکوردهای به‌دست‌آمده از هر زیر گسل با توجه به تأخیر زمانی که هر کدام در رسیدن به ساختگاه دارند، جمع می‌شوند تا رکورد اصلی حاصل گردد. یکی از مشکلات موجود در مدل اولیه [۱۳] وابستگی دامنه‌ی حرکت‌های شبیه‌سازی شده به اندازه‌ی زیر گسل‌های انتخابی است که برای رفع این مشکل، معضدیان و آتکینسون [۱۴] استفاده از فرکانس گوشه‌ی دینامیکی را مطرح کردند. فرکانس گوشه در مدل بور [۱۵] برابر با معکوس مدت‌زمان گسیختگی در نظر گرفته شده است، بنابراین با افزایش سطح گسیختگی (تابعی از مدت‌زمان گسیختگی) فرکانس گوشه کاهش می‌یابد، در نتیجه مفهوم فرکانس گوشه‌ی دینامیکی بیانگر کاهش سطح طیف در فرکانس‌های بالا می‌باشد، از این رو با انتشار گسیختگی و کاهش فرکانس گوشه‌ی زیر گسل‌ها، انرژی آزاد شده‌ی آنها در فرکانس‌های بالا کاهش پیدا می‌کند؛ این در حالی است که بایستی برای زیر گسل‌های با ابعاد برابر، سطح طیف در باند فرکانسی بالا یکسان باشد؛ بنابراین برای حفظ انرژی در محدوده‌ی فرکانسی بالای زیر گسل‌ها، ضریب مقیاس پیشنهاد شد.

همان‌طور که اشاره شد در ابتدای گسیختگی، فرکانس گوشه‌ی دینامیکی با گذشت زمان کاهش می‌یابد و سپس ثابت



(الف) خطوط قرمز: تصویر صفحه‌ی گسیختگی بر روی زمین، خط چین خاکستری رنگ: امتداد صفحه‌ی گسل، خط مشکی رنگ: محدوده‌ی شهری تهران، ستاره‌ی سفید رنگ: محل شروع گسیختگی در سناریوی مرجع، ستاره‌های سیاه رنگ: محل شروع گسیختگی برای سناریوهای 2a و 2b، دایره‌ی سیاه رنگ: نقطه‌ی مرجع.



(ب) ابعاد صفحه‌ی گسیختگی و موقعیت نقاط شروع گسیختگی بر روی آن.

شکل (۱): موقعیت صفحه‌ی گسیختگی گسل نیاوران نسبت به شهر تهران و مشخصات آن.

و داده‌های شبیه‌سازی شده دریافتند که برای زلزله‌های بزرگ با مکانیسم شیب‌لغز، نقطه‌ی شروع گسیختگی در عمق ۶۰ تا ۸۵ درصد عرض و همچنین در فاصله ۲۰ تا ۸۰ درصد طول صفحه نسبت به نقطه‌ی مرجع^۷ (دایره سیاه رنگ در شکل ۱) قرار خواهد گرفت؛ بنابراین محل این نقطه برای سناریوی مرجع در مطالعه حاضر در عمق ۷۰ درصدی عرض (عمق ۱۸ کیلومتری از سطح زمین) و در فاصله‌ی ۲۰ درصدی طول صفحه نسبت به نقطه‌ی مرجع انتخاب شده است (ستاره‌ی سفید رنگ در شکل ۱) که صرفاً به معنی بحرانی‌ترین حالت نبوده بلکه ممکن است نقاط دیگر مقادیر بزرگ‌تری را نتیجه دهند. همچنین سرعت گسیختگی برابر با ۸۰ درصد سرعت موج برشی در پوسته زمین (ب) در نظر گرفته شده است. افت تنش پارامتر مهمی بوده و کنترل کننده انرژی در فرکانس‌های بالا می‌باشد. برای این پارامتر مقدار متوسط ارائه شده توسط معتضدیان [۳۴] برای ناحیه‌ی البرز و برابر با ۱۳۰

که $A(f)$ بزرگنمایی ساختگاه و K_0 پارامتر تضعیف در باند فرکانسی بالا است.

۲-۲- مشخصات سناریوی مرجع و نتایج شبیه‌سازی آن

به منظور ارزیابی میزان تغییرات در نتایج شبیه‌سازی حرکت زمین ناشی از وجود عدم قطعیت در پارامترهای ورودی، ابتدا یک سناریوی مرجع و سپس ۱۹ سناریوی دیگر با پارامترهای متفاوت نسبت به پارامترهای در نظر گرفته شده در سناریوی مرجع تعریف شده‌اند که در ادامه این مطالعه آنها را «سناریوهای آزمایشی» نامیده ایم. در نهایت با محاسبه اختلاف بیشینه شتاب و سرعت سناریوهای آزمایشی و مرجع و ارائه آنها در شکل‌ها، به تفسیر نتایج پرداخته شده است.

صفحه‌ی گسیختگی فرض شده برای سناریوی مرجع به همراه نقطه‌ی شروع گسیختگی آن (ستاره سفید رنگ) در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. زاویه‌ی امتداد بر اساس مطالعه‌ی عباسی و فرید [۲۸] برابر با ۲۶۵ درجه و زاویه‌ی شیب صفحه‌ی گسیختگی مطابق با آریان و همکاران [۲۹] ۵۰ تا ۷۰ درجه می‌باشند که در این مطالعه زاویه‌ی شیب ۵۰ درجه در نظر گرفته شده است در حالی که در تحقیقات دیگر [۱۲، ۲۸] این زاویه برابر با ۷۰ درجه می‌باشد. طول صفحه گسیختگی با طول گسل که ۴۴ کیلومتر می‌باشد [۱۱] یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به لرزه‌های ثبت شده در منطقه، عمق لرزه‌زا از ۳ تا ۱۸ کیلومتر تخمین زده می‌شود [۳۰]، بنابراین با توجه به زاویه‌ی شیب صفحه، عرض آن ۲۰ کیلومتر با عمق مدفون شدگی ۳ کیلومتر انتخاب شده است. بر اساس روابط تجربی ولز و کاپراسمیت [۳۱] و با توجه به مساحت گسیختگی و نوع گسلش، گسل نیاوران توانایی تولید زلزله‌ای با بزرگای گشتاوری ۷ را دارد. یکی دیگر از پارامترهای خیلی مهم برای توصیف چشمه زلزله، نقطه شروع گسیختگی می‌باشد، محل این پارامتر بر روی صفحه‌ی گسیختگی بر اساس مطالعه‌ی مای و همکاران [۳۲] و نتایج به‌روزرتر چپو و یانگس [۳۳] تعیین شده است. به این صورت که آنها با بررسی نقاط شروع گسیختگی مربوط به زلزله‌های گذشته

سناریوی مرجع، b برابر ۱- می‌باشد.

آخرین جزء تشکیل دهنده‌ی طیف فوریه، یعنی اثر ساختگاه، شامل پارامترهای بزرگ‌نمایی و تضعیف می‌باشد. موجی که از سنگ بستر به طرف سطح (خاک‌های نرم) حرکت می‌کند، با کاهش سختی دینامیکی روبه‌رو می‌گردد و مقاومت در برابر حرکت آن کاهش می‌یابد، در نتیجه برای حفظ انرژی بایستی دامنه‌ی موج افزایش یابد که باعث بزرگ‌نمایی و تقویت حرکت زمین می‌شود [۲۱]. در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی در سطح سنگ بستر با سرعت موج برشی ۶۲۰ متر بر ثانیه (سنگ بستر مهندسی) صورت می‌پذیرد و از اثرات لایه‌های نرم ساختگاه چشم‌پوشی می‌شود. به این منظور از منحنی‌های بزرگ‌نمایی ارائه شده توسط بور و جوینر [۳۵] استفاده گردیده است. همچنین لایه‌های سطحی حرکت‌های با فرکانس‌های بالا را به شدت تضعیف می‌کنند که این اثر در قالب κ_0 (Kappa) نشان داده می‌شود. از ترکیب منحنی‌های بزرگ‌نمایی و پارامتر تضعیف می‌توان اثر ساختگاه را به دست آورد که پارامتر تضعیف برای ناحیه‌ی البرز و آذربایجان حدود ۰/۰۵ معرفی شده است [۳۴، ۳۶-۳۷]. بر اساس پارامترهای ذکر شده، شبیه‌سازی برای ۴۳۵ نقطه با فاصله‌ی ۰/۰۵ درجه از هم که منطقه‌ای با طول جغرافیایی ۵۰/۸ تا ۵۲/۲ درجه و عرض جغرافیایی ۳۵/۵ تا ۳۶/۲ درجه را پوشش می‌دهند، انجام گرفته است. در جدول (۱) مقادیر تمامی پارامترهای در نظر گرفته شده برای سناریوی مرجع و سناریوهای آزمایشی ملاحظه می‌گردد.

نتایج شبیه‌سازی برای سناریوی مرجع شامل بیشینه شتاب (PGA) و بیشینه سرعت (PGV) به صورت نقشه‌های هم‌شدت به ترتیب در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که در این مطالعه برای رسم نقشه‌های هم‌شدت از نرم‌افزار Generic Mapping Tools (GMT) [۳۸] استفاده شده است. برای این سناریو، در نزدیک‌ترین نقطه با فاصله‌ی ۳ کیلومتر از صفحه‌ی گسیختگی، PGA به حدود ۶۰۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه و PGV به حدود ۶۰ سانتی‌متر بر ثانیه می‌رسند. بیشترین حرکت‌های تولید شده در نقاط حوزه‌ی نزدیک گسل

بار (۱۳ مگاپاسکال) انتخاب می‌گردد. در روش شبیه‌سازی گسل محدود تصادفی، برای توزیع لغزش بر روی صفحه‌ی گسیختگی سه انتخاب وجود دارد: توزیع لغزش تصادفی، یکنواخت و مقادیر لغزشی که توسط کاربر به‌ازای هر زیر گسل وارد می‌شود، در این مطالعه نوع اول، یعنی توزیع لغزش تصادفی به کار رفته است که در تمامی سناریوها این پارامتر ثابت می‌باشد. در نهایت به‌عنوان آخرین پارامتر چشمه، سطح تپنده ۵۰ درصد فرض می‌شود.

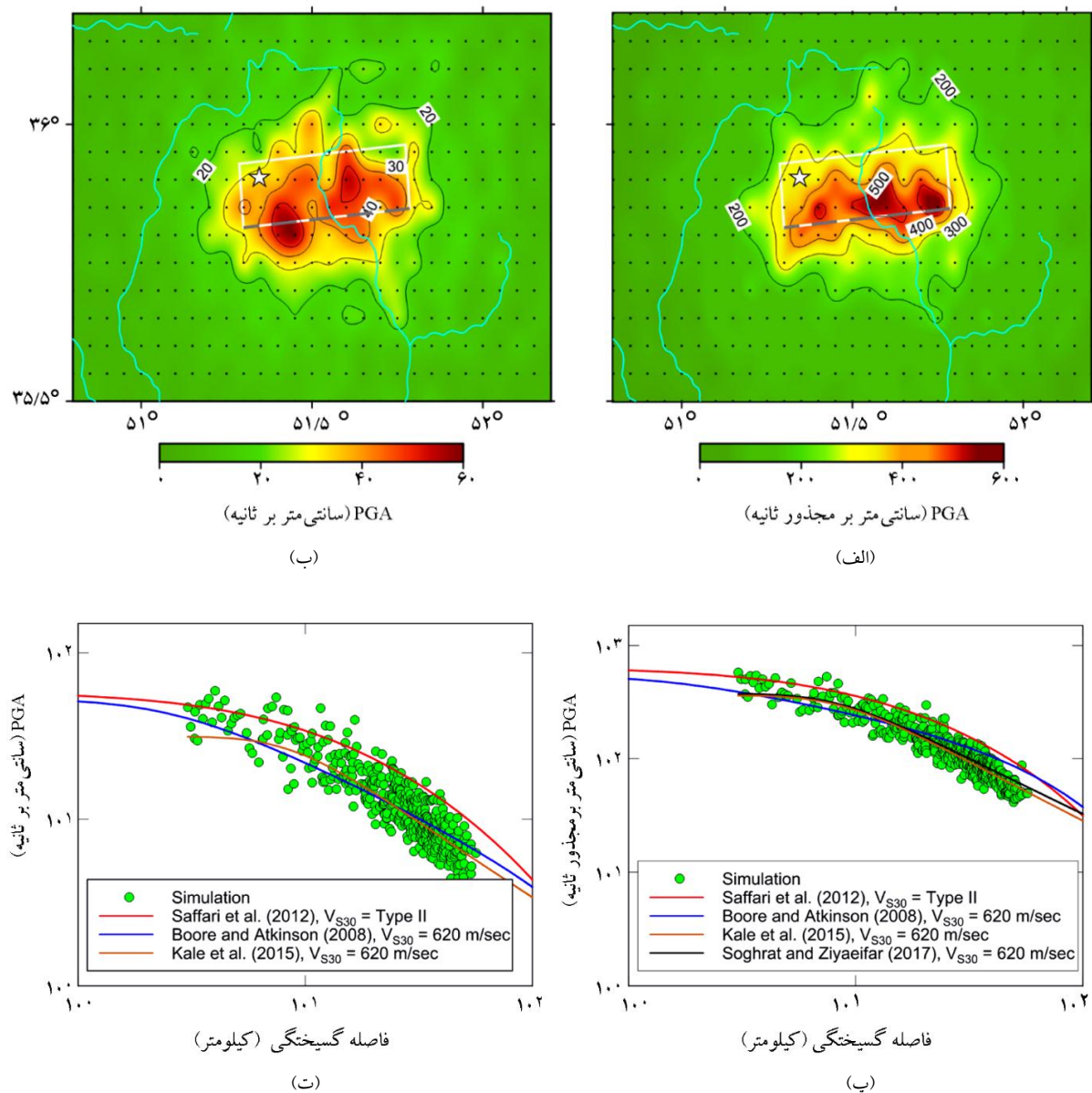
مطابق رابطه‌ی (۳)، فاکتور کیفیت و توزیع هندسی پارامترهای متغیر در تعریف اثرات ساختگاه هستند که مقادیر آنها از معتضدیان [۳۴] اقتباس شده است. در مسیر انتشار از چشمه به ساختگاه، امواج دچار کاهش می‌شوند که می‌تواند به دلیل میرایی‌های پراکنشی و جذبی (مربوط به مصالح زمین) و هندسی باشد. برای کاهش‌دهی جذبی امواج، دو دلیل وجود دارد: پراکندگی امواج به سبب ناهمگنی درون زمین و میرایی ذاتی ناشی از سازوکار برشی مصالح؛ که به ترتیب باعث تغییر در جهت انتشار امواج و تبدیل انرژی موج به گرما می‌گردند. متداول‌ترین راه برای اعمال این نوع کاهش‌دهی، استفاده از فاکتور کیفیت است که با کاهش‌دهی نسبت عکس دارد [۲۱]. این پارامتر معمولاً به شکل رابطه‌ی $Q(f) = Q_0 \cdot f^a$ تعریف می‌شود. در سناریوی مرجع Q_0 و a برای فرکانس‌های بالاتر از ۱ هرترتز به ترتیب برابر ۱/۴۶ و ۸۷ و برای فرکانس‌های پایین‌تر از ۱ هرترتز، $Q(f)$ برابر Q_0 در نظر گرفته شده‌اند. با دور شدن از مرکز زلزله و افزایش فاصله (R) دامنه‌ی امواج کاهش می‌یابد، زیرا موج‌های منتشر شده با انرژی کل الاستیک ثابت، ناحیه‌ی گسترده‌تری را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این نوع میرایی که منشأ هندسی دارد، توزیع هندسی نامیده می‌شود [۱۶]. در معتضدیان [۳۴] یک رابطه‌ی سه‌قطعه‌ای برای ناحیه‌ی البرز به کار رفته است و با توجه به اینکه در این مطالعه شتاب‌نگاشت‌ها برای نقاطی با فاصله‌ی کمتر از ۶۰ کیلومتر تولید شده‌اند، تنها از قطعه‌ی اول آن که برای فواصل کمتر از ۷۰ کیلومتر مناسب است، استفاده می‌شود. رابطه‌ی به کار گرفته شده به شکل $Z(R) = R^b$ است که در

جدول (۱): پارامترهای در نظر گرفته شده به عنوان ورودی شبیه سازی برای سناریوهای مرجع و آزمایشی.

پارامترهای هندسه گسل		
سناریوی مرجع	۵۰ درجه	شیب
سناریوی ۱a	۳۵ درجه	
سناریوی ۱b	۶۵ درجه	
سناریوی مرجع	۵۱/۳۴، ۳۵/۹۰	نقطه‌ی شروع گسیختگی (عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی)
سناریوی ۲a	۵۱/۵۴، ۳۵/۹۲	
سناریوی ۲b	۵۱/۷۲، ۳۵/۹۳	
پارامترهای گسیختگی گسل		
سناریوی مرجع	۷/۰	بزرگی گشتاوری (Mw)
سناریوی ۳a	۶/۷	
سناریوی ۳b	۷/۲	
سناریوی مرجع	$(\beta) 2/88$	سرعت گسیختگی (کیلومتر بر ثانیه)
سناریوی ۴a	$(\beta) 2/38$	
سناریوی ۴b	$(\beta) 3/38$	
سناریوی مرجع	۱۳۰	افت تنش (بار)
سناریوی ۵a	۸۰	
سناریوی ۵b	۲۱۰	
سناریوی مرجع	۵۰ درصد	سطح تپنده
سناریوی ۶a	۳۰ درصد	
سناریوی ۶b	۷۰ درصد	
پارامترهای مسیبر		
سناریوی مرجع	$Q_0 = 87, a = 1/46$	$(Q(f) = Q_0 \cdot f^a)$ فاکتور کیفیت
سناریوی ۷a	$Q_0 = 87, a = 0/46$	
سناریوی ۷b	$Q_0 = 237, a = 1/46$	
سناریوی ۷c	$Q_0 = 237, a = 0/46$	
سناریوی مرجع	$b = -1/0$	$(Z(R) = R^b)$ توزیع هندسی
سناریوی ۸a	$b = -1/1$	
سناریوی ۸b	$b = -0/9$	
پارامتر ساختگاه		
سناریوی مرجع	۰/۰۵	کاپا (ثانیه)
سناریوی ۹a	۰/۰۴	
سناریوی ۹b	۰/۰۶	

شبیه‌سازی با روابط کاهندگی جهت بررسی قابلیت اعتماد پارامترهای ورودی فرضی، نشان داده شده است. برای این منظور، روابط صفاری و همکاران [۳۹]، بور و آتکینسون [۴۰]، کاله و همکاران [۴۱] و سقراط و ضیائی فر [۴۲] انتخاب شده‌اند که به ترتیب برای ایران، منطقه غرب

مخصوصاً نقاط بالای صفحه‌ی گسیختگی در محدوده‌ای با مساحت ۱۳۰۰ کیلومتر مربع مشاهده شده‌اند به طوری که دارای میانگینی برابر با ۳۳۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه می‌باشند. همچنین در شکل‌های (۲-پ) و (۲-ت)، نتیجه‌ی مقایسه‌ی خروجی‌های



شکل (۲): (الف) نقشه‌ی هم‌شدت PGA و (ب) نقشه‌ی هم‌شدت PGV به‌دست آمده از شبیه‌سازی سناریوی مرجع، نقاط سیاه رنگ: نقاطی که شبیه‌سازی برای آنها انجام شده است. (پ) مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی و روابط کاهندگی PGA و (ت) مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی و روابط کاهندگی PGV؛ دایره‌های سبز رنگ: نتایج شبیه‌سازی، خطوط یکپارچه: مقادیر میانگین روابط کاهندگی.

غرب آمریکا، ترکیه و ایران توسعه یافته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود انطباق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و مدل‌های کاهندگی مخصوصاً برای دو رابطه‌ی آخر وجود دارد. در بین این روابط، بیشترین اختلاف با نتایج شبیه‌سازی مربوط به مطالعه‌ی صفاری و همکاران [۳۹] می‌باشد که می‌تواند ناشی از تعداد پایین داده‌های استفاده شده در آن مطالعه باشد. همچنین در رابطه‌ی بور و آتکینسون [۴۰] با توجه به اینکه یک رابطه‌ی جهانی است و تحت تأثیر داده‌ها از دیگر نقاط جهان به‌ویژه

غرب آمریکا، ترکیه و ایران توسعه یافته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود انطباق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و مدل‌های کاهندگی مخصوصاً برای دو رابطه‌ی آخر وجود دارد. در بین این روابط، بیشترین اختلاف با نتایج شبیه‌سازی مربوط به مطالعه‌ی صفاری و همکاران [۳۹] می‌باشد که می‌تواند ناشی از تعداد پایین داده‌های استفاده شده در آن مطالعه باشد. همچنین در رابطه‌ی بور و آتکینسون [۴۰] با توجه به اینکه یک رابطه‌ی جهانی است و تحت تأثیر داده‌ها از دیگر نقاط جهان به‌ویژه

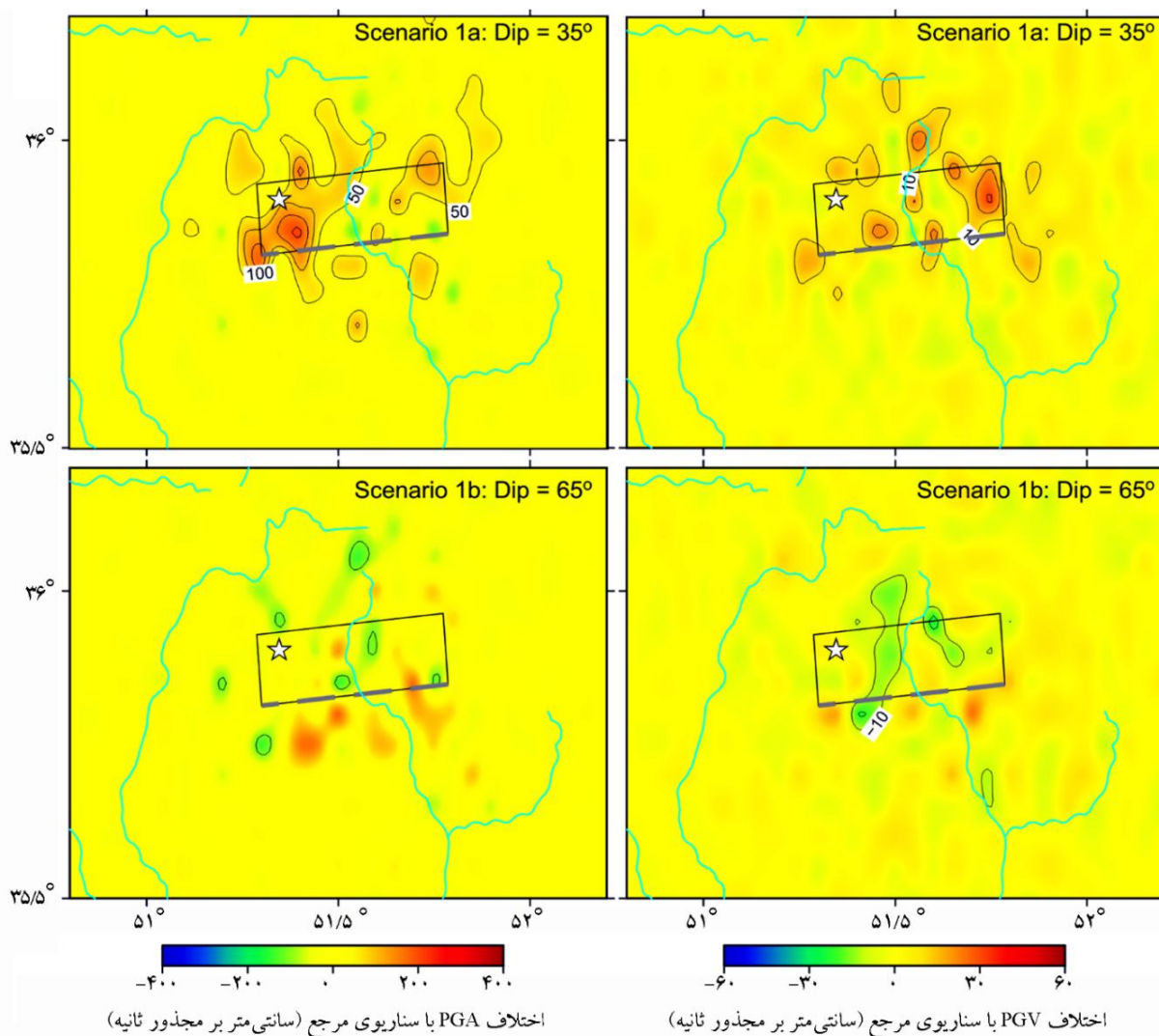
۳- سناریوهای آزمایشی و تحلیل نتایج

در این بخش به بررسی اثر عدم قطعیت پارامترهای ورودی در شبیه‌سازی پرداخته شده است، به این صورت که بر اساس هر سناریوی آزمایشی شبیه‌سازی انجام گرفته و سپس نتایج بیشینه شتاب و سرعت سناریوی مرجع برای هر ایستگاه از نتایج ایستگاه متناظر سناریوهای آزمایشی کم شده است و نتایج آن به صورت نقشه‌های هم‌شدت نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است که در مطالعه‌ی حاضر از وابستگی پارامترها چشم‌پوشی شده است، برای مثال با تغییر در بزرگی گشتاوری بایستی ابعاد صفحه‌ی گسیختگی و نیز به دنبال آن افت تنش بر اساس آن مقیاس شوند،

اما چون در اینجا هدف تنها بررسی اثر یک پارامتر بر نتایج می‌باشد، این تغییرات اعمال نشده‌اند.

۳-۱- تغییر در پارامترهای هندسه گسل

در سناریوهای آزمایشی 1a و 1b به بررسی حساسیت نتایج به تغییرات در زاویه‌ی شیب صفحه‌ی گسیختگی پرداخته شده است. مطابق جدول (۱) زاویه‌ی شیب در سناریوی مرجع برابر با ۵۰ درجه می‌باشد که با کاهش و افزایش ۱۵ درجه‌ای آن، این پارامتر به ترتیب برابر با ۳۵ درجه (سناریوی 1a) و ۶۵ درجه (سناریوی 1b) در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۳)

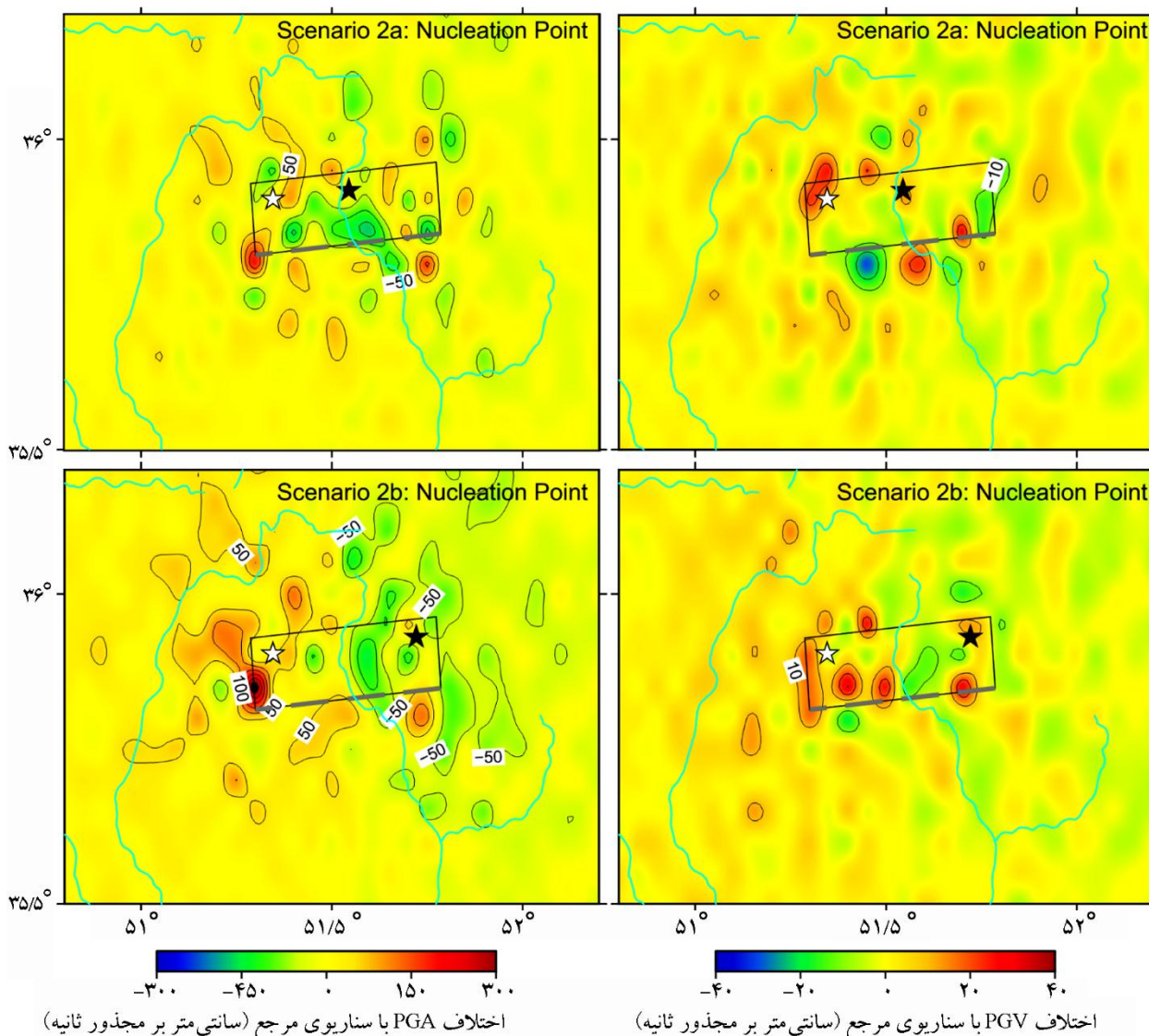


شکل (۳): مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای 1a و 1b و سناریوی مرجع به منظور ارزیابی اثرات تغییر در زاویه‌ی شیب گسل. خط سیاه و ستاره سفید رنگ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تصویر صفحه‌ی گسیختگی و محل شروع گسیختگی می‌باشند.

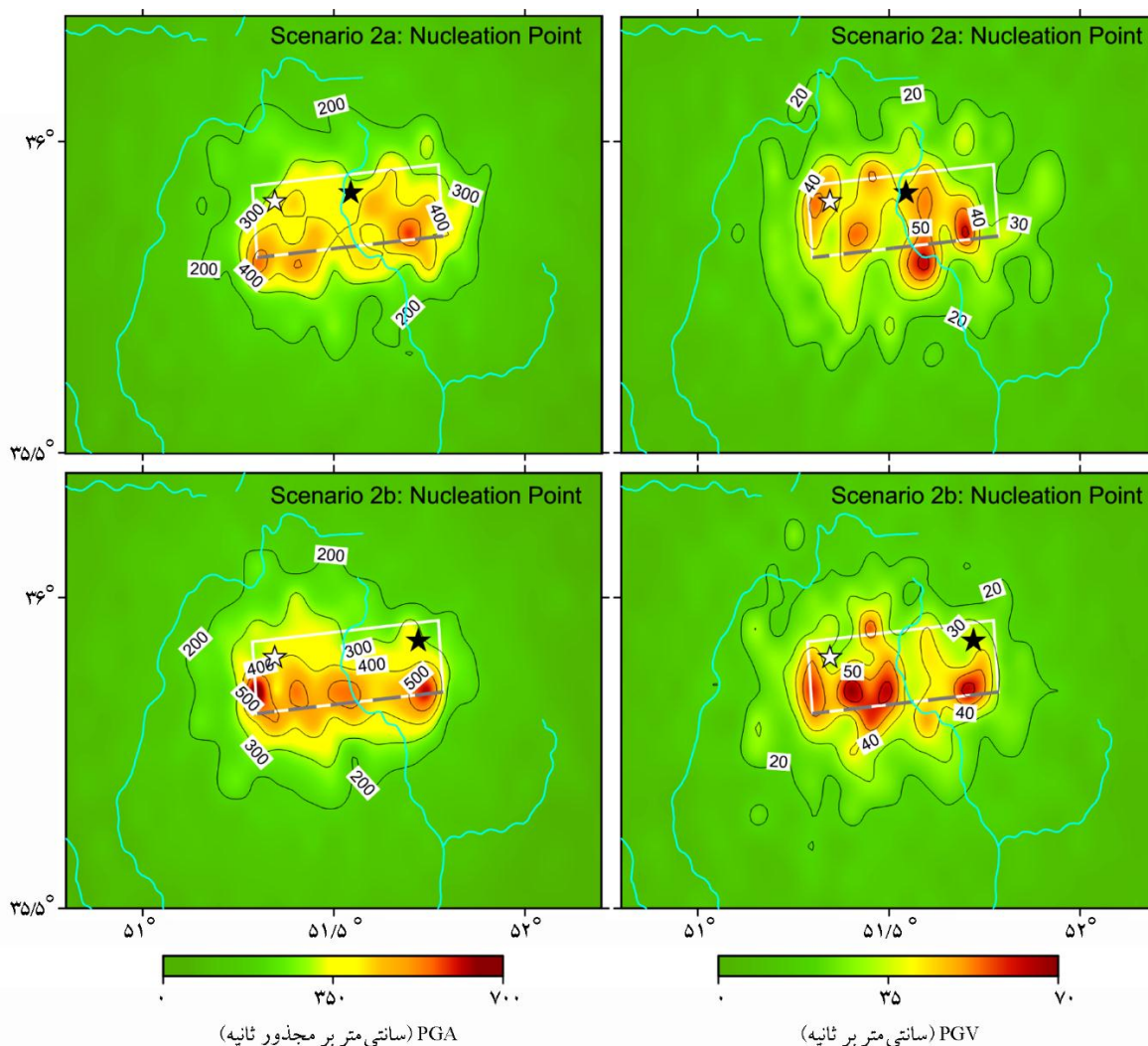
می‌باشد که میزان تغییرات PGV محدودی گسترده‌تری را نسبت به PGA در بر می‌گیرد.

اثر تغییر در محل شروع گسیختگی در سناریوهای 2a و 2b بررسی و نتایج آن در شکل (۴) نشان داده شده است، همچنین می‌توان نقشه‌های هم‌شدت بیشینه شتاب و سرعت مربوط به آنها را در شکل (۵) مشاهده کرد. در این بخش با ثابت نگه داشتن عمق نقطه‌ی گسیختگی، موقعیت آن در امتداد صفحه جابه‌جا شده به گونه‌ای در سناریوی 2a به مرکز و در سناریوی 2b به سمت چپ صفحه (نسبت به نقطه‌ی مرجع)، یعنی قرینه‌ی آن

کاهش زاویه‌ی شیب باعث افزایش PGA و PGV در بالای صفحه‌ی گسیختگی و به سمت شمال (بخش پاشنه گسل^۸) شده است که این میزان افزایش به‌طور میانگین حدود ۲۰ درصد برای PGA و ۳۰ درصد برای PGV می‌باشد. دلیل این امر می‌تواند به کاهش فاصله‌ی نقاط روی سطح زمین نسبت به صفحه گسل ربط داده شود [۴۳-۴۴]. در سناریوی 1b با افزایش زاویه‌ی شیب، یک تغییر ناچیز در پارامترهای بیشینه شتاب و سرعت مشاهده می‌شود، به طوری که می‌توان از این اثر چشم‌پوشی کرد. نکته‌ی دیگر قابل توجه در شکل (۳) این



شکل (۴): مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای 2a و 2b و سناریوی مرجع به منظور ارزیابی اثرات تغییر در محل نقطه‌ی شروع گسیختگی. خط سیاه و ستاره سفید رنگ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تصویر صفحه‌ی گسیختگی و محل شروع گسیختگی می‌باشند.



شکل (۵): نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای ۲a و ۲b به منظور نمایش جهت انتشار گسیختگی در هر سناریو. ستاره‌های سفید رنگ و سیاه‌رنگ به ترتیب بیانگر محل شروع گسیختگی سناریوی مرجع و سناریوهای آزمایشی ۲a و ۲b می‌باشند.

مرجع، با انتشار گسیختگی از غرب به شرق، زیر گسل‌های بیشتری مسلح می‌شوند به گونه‌ای که بیشترین شتاب ثبت شده در نقاط شرقی گسل مشاهده شده است و این دقیقاً برعکس نتایج سناریوی ۲b می‌باشد.

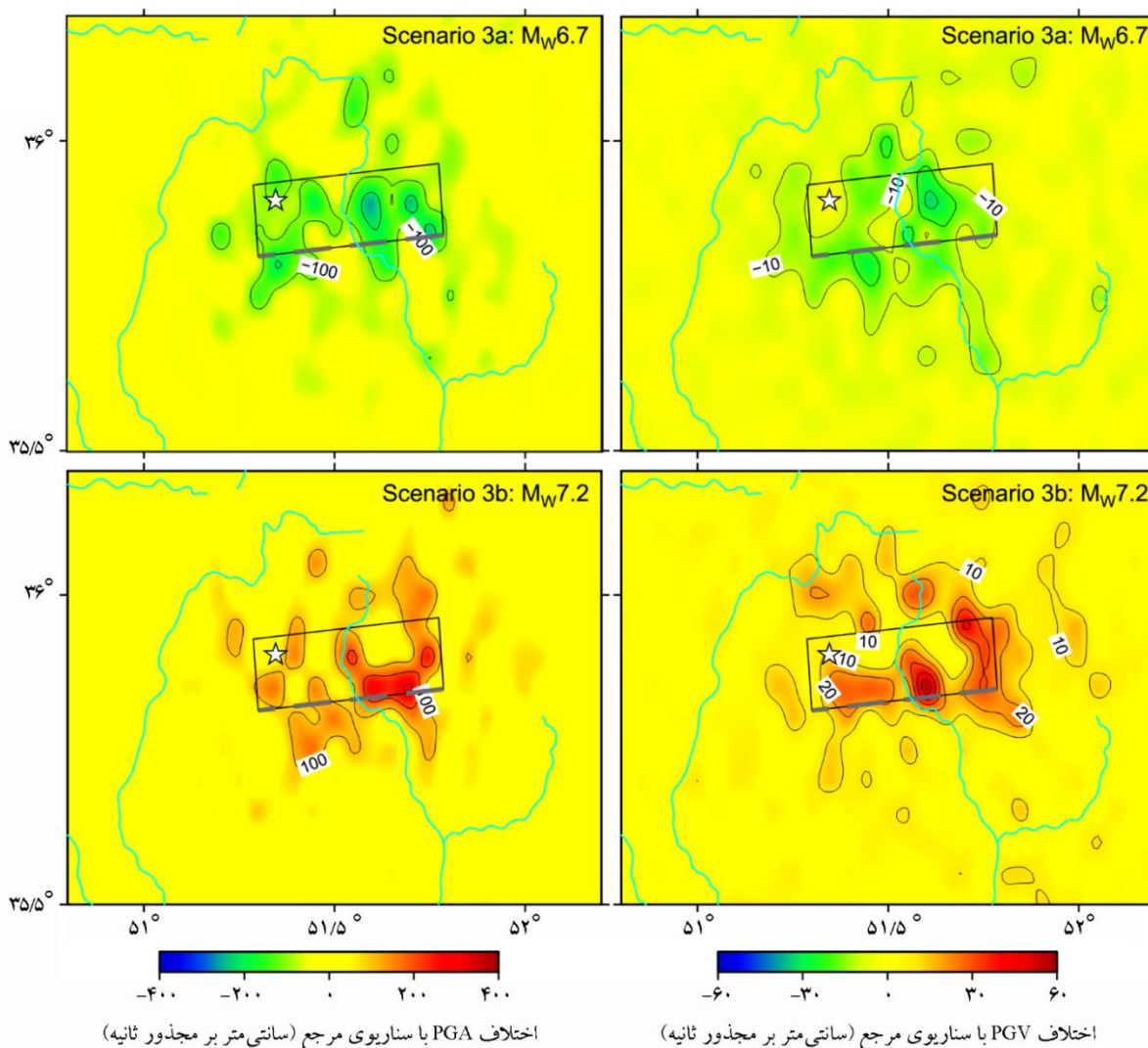
۳-۲- تغییر در پارامترهای گسیختگی گسل

در سناریوهای ۳a و ۳b اثر عدم قطعیت در بزرگی گشتاوری بر نتایج شبیه‌سازی مورد بحث قرار گرفته است. اگرچه شاید در ابتدا بررسی این پارامتر، کم‌اهمیت جلوه کند اما با توجه به اینکه در بیشتر مطالعات پیش‌بینی زلزله‌های آینده، این پارامتر بر اساس

نسبت به سناریوی مرجع، انتقال یافته است. برای حالت اول (مطابق شکل ۵) گسیختگی به دو طرف صفحه منتشر می‌شود که باعث تغییرات کم در PGA و PGV مخصوصاً در نقاط بالای صفحه گسیختگی نسبت به سناریوی مرجع (مطابق شکل ۴) شده است. در سناریوی ۲b جهت گسیختگی یک‌طرفه و از سمت شرق به غرب و برعکس سناریوی مرجع می‌باشد، با توجه به شکل (۴) مشخص است که پارامترهای پیشینه در نزدیکی نقطه‌ی شروع گسیختگی برای سناریوی آزمایشی کاهش و در بخش غربی گسل در مجاورت نقطه‌ی شروع گسیختگی سناریوی مرجع، افزایش می‌یابد. دلیل تغییرات این است که در سناریوی

کاهش این پارامتر، PGA و PGV به ترتیب به میزان ۳۰ و ۴۰ درصد نسبت به سناریوی مرجع در نقاط نزدیک صفحه‌ی گسیختگی کاهش یافته‌اند. برای سناریوی ۳b نیز به همان میزان افزایش در این پارامترها مشاهده می‌شود. همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، با تغییر در مقادیر بزرگی گشتاوری، پارامترهای دیگر گسل مقیاس نشده‌اند بلکه نتایج برای این دو سناریو تنها از تغییر در توزیع لغزش بر روی همان صفحه‌ی گسل تأثیر پذیرفته‌اند؛ درحالی‌که اگر بر اساس بزرگای گشتاوری سناریوهای آزمایشی، ابعاد صفحه‌ی گسیختگی تغییر می‌کرد، علاوه بر تأثیرات آن بر مقادیر حداکثر

روابط تجربی تعیین می‌گردد که اکثراً دارای مقداری خطا می‌باشند، ضروری است اثر این عدم قطعیت بر نتایج شبیه‌سازی مشخص شود تا اهمیت دقت بزرگی زلزله بیان گردد. در مطالعه حاضر نیز بزرگی گشتاوری بر اساس روابط تجربی ولز و کاپراسمیت [۳۱] و مساحت صفحه‌ی گسیختگی برای سناریوی مرجع به دست آمد و برای سناریوهای آزمایشی از مقادیر پایین و بالای رابطه‌ی مذکور که شامل خطاهای استاندارد می‌باشد، استفاده شده است که برای سناریوهای ۳a و ۳b به ترتیب بزرگای گشتاوری برابر با ۶/۷ و ۷/۲ در نظر گرفته شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت مطابق شکل (۶) با

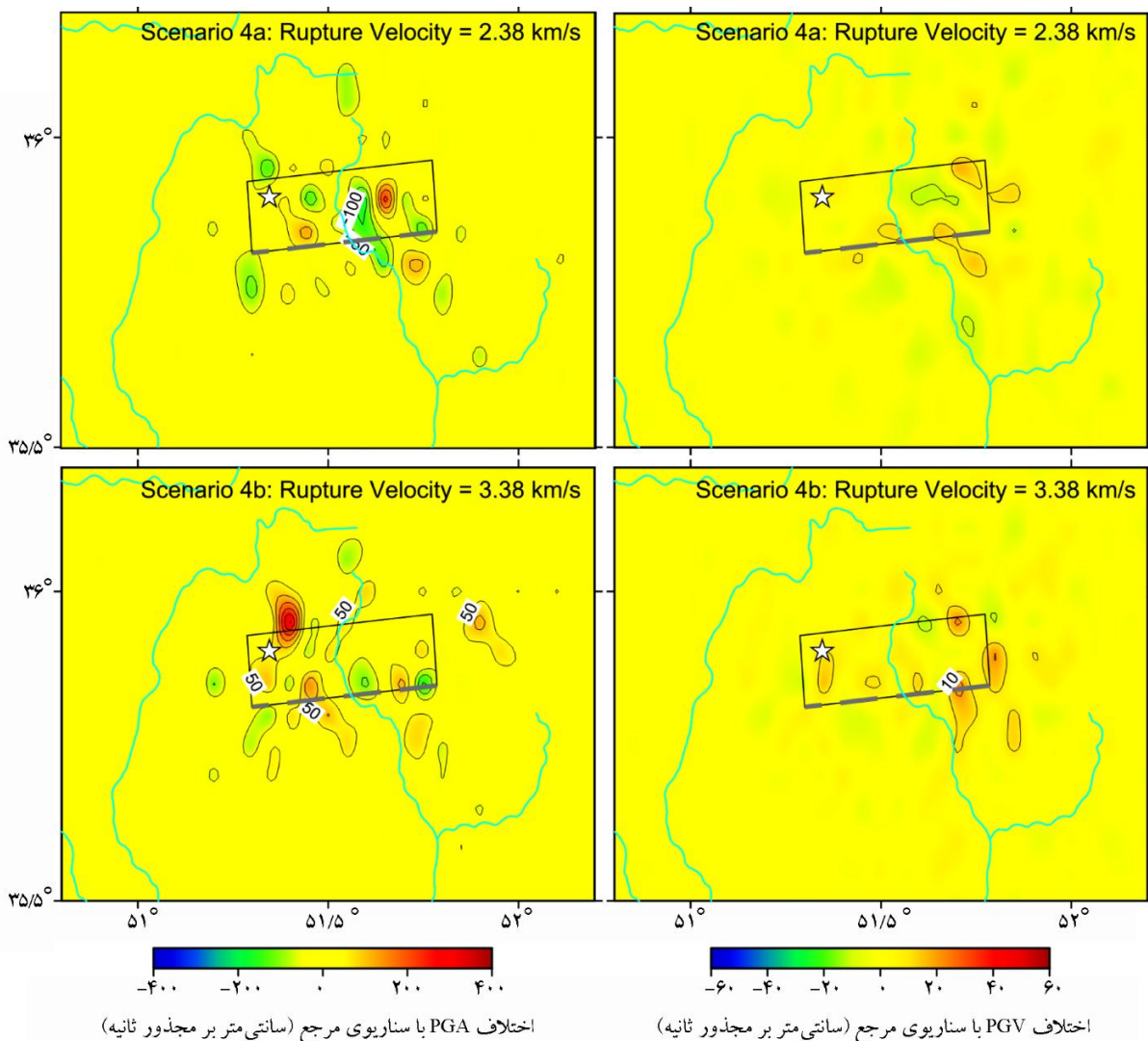


شکل (۶): مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای ۳a و ۳b و سناریوی مرجع به منظور ارزیابی اثرات تغییر در بزرگی زلزله. خط سیاه و ستاره سفید رنگ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تصویر صفحه‌ی گسیختگی و محل شروع گسیختگی می‌باشند.

دست می آید. از لحاظ فیزیکی با کاهش سرعت گسیختگی، مدت زمان گسیختگی افزایش پیدا می کند که در نهایت باعث کاهش دامنه‌ی حرکت می گردد، زیرا انرژی آزاد شده در طول مدت زمان بیشتری توزیع می گردد (عکس این مورد نیز صادق است) بنابراین انتظار می رود که PGA و PGV در سناریوهای ۴a و ۴b به ترتیب کاهش و افزایش یابند؛ اما آنچه در شکل (۷) نشان داده شده است تا حدودی توضیحات فوق را تأیید نمی کند، زیرا میزان کاهش و افزایش برای این سناریوها ناچیز است و حتی در نقاطی محدود، عکس آن مشاهده می گردد، این در حالی است که در روش‌های ترکیبی (برای مثال [۲]) تغییر در این پارامتر اثر

حرکت زمین، نحوه‌ی توزیع آنها نیز دستخوش تغییرات می گردید، همچنین بایستی برای چندین پارامتر دیگر از جمله افت تنش و محل نقطه‌ی شروع گسیختگی مقادیر متفاوتی در نظر گرفت.

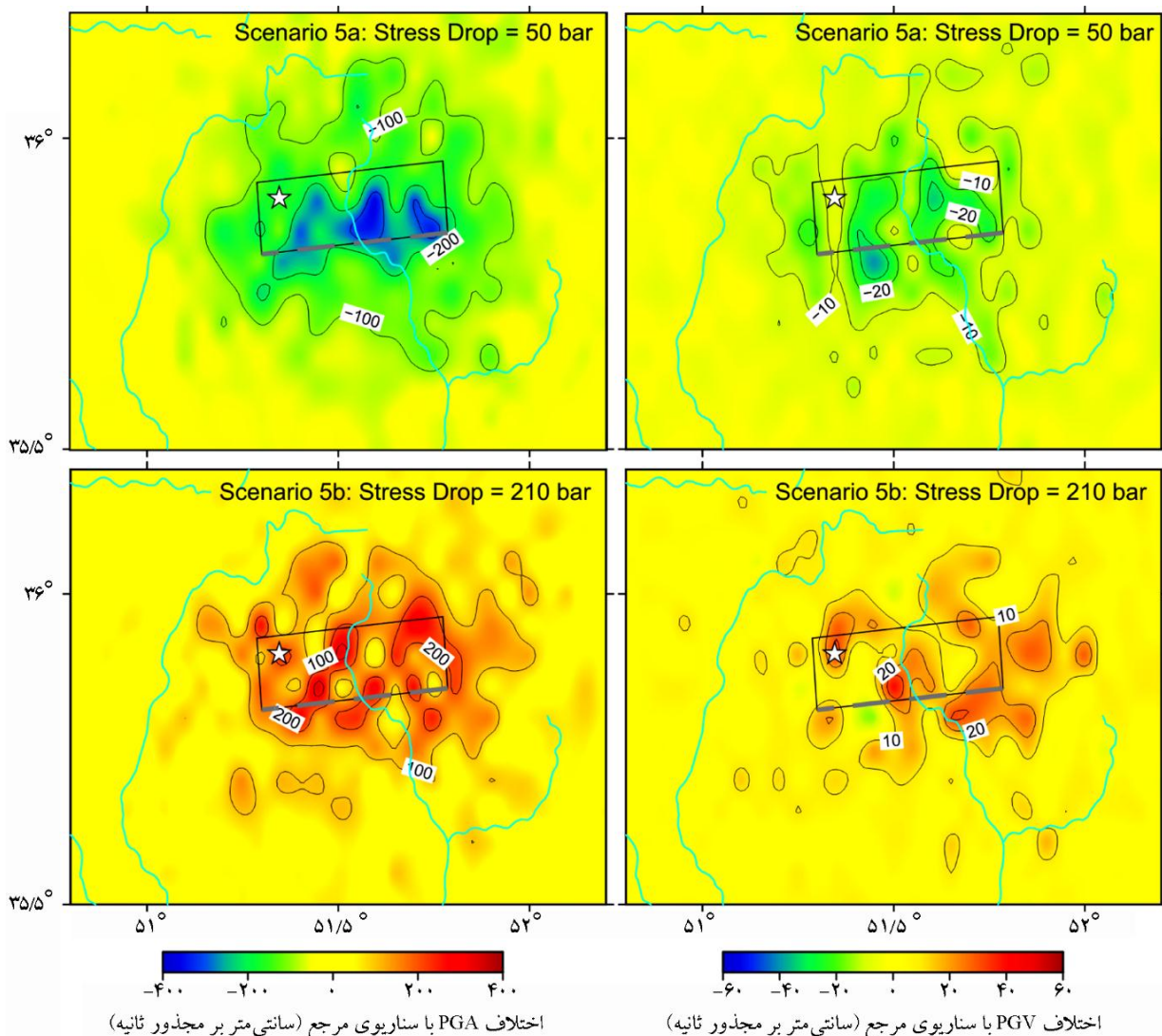
مقایسه‌ی نتایج ناشی از در نظر گرفتن مقادیر متفاوت سرعت گسیختگی نسبت به سناریوی مرجع در سناریوهای ۴a و ۴b آمده است. در شبیه‌سازی تصادفی، سرعت گسیختگی به عنوان ضریبی از سرعت موج برشی در پوسته (در اینجا ۰/۸ برای سناریوی مرجع) در نظر گرفته می شود که با تغییر این ضریب به ۰/۶۶ و ۰/۹۴ سرعت گسیختگی برای سناریوهای آزمایشی به ترتیب ۲/۳۸ (سناریوی ۴a) و ۳/۳۸ (سناریوی ۴b) کیلومتر بر ثانیه به



شکل (۷): مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای ۴a و ۴b و سناریوی مرجع به منظور ارزیابی اثرات تغییر در بزرگی زلزله. خط سیاه و ستاره سفید رنگ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تصویر صفحه‌ی گسیختگی و محل شروع گسیختگی می باشند.

برابر با ۱۳۰ بار که با کاهش و افزایش ۴۰ درصدی مقدار آن به ترتیب برابر با ۸۰ بار (سناریوی ۵a) و ۲۱۰ بار (سناریوی ۵b) در نظر گرفته شده است. با کاهش افت تنش، PGA و PGV به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابند، درحالی‌که برای سناریوی ۵b به میزان ۴۰ درصد افزایش پیدا می‌کنند که این نتایج در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. با توجه به اینکه افت تنش کنترل‌کننده‌ی انرژی طیف در فرکانس‌های بالا می‌باشد، انتظار می‌رود که تأثیر این پارامتر بر روی PGV ناچیز باشد، زیرا سرعت حرکت زمین ناشی از بخش پایین فرکانسی می‌باشد؛ اما نتایج خلاف این موضوع را نشان می‌دهند. مطالعات مختلف [۴۵-۴۶] بیان

شدیدی را بر نتایج مخصوصاً در جهت گسیختگی اعمال می‌کند. دلیل آن را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در روش‌های تصادفی سرعت گسیختگی به‌طور مستقیم در فرمول‌بندی مشارکت ندارد بنابراین اثر آن بر روی مدت‌زمان گسیختگی مشاهده نمی‌گردد. در این روش، مدت‌زمان گسیختگی که بر روی بیشینه شتاب و سرعت تأثیرگذار است به‌صورت معکوس فرکانس گوشه که با بزرگی گشتاوری مرتبط است، در نظر گرفته می‌شود و مستقل از سرعت گسیختگی می‌باشد. در سناریوهای آزمایشی ۵a و ۵b اثر پارامتر افت تنش بر نتایج شبیه‌سازی بررسی می‌شود. برای سناریوی مرجع این پارامتر



شکل (۸): مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای ۵a و ۵b و سناریوی مرجع به‌منظور ارزیابی اثرات تغییر در پارامتر افت تنش. خط سیاه و ستاره سفید رنگ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تصویر صفحه‌ی گسیختگی و محل شروع گسیختگی می‌باشند.

می‌باشد، در نقاط بالای صفحه‌ی گسیختگی مشاهده می‌شوند.

۳-۳- تغییر در پارامترهای مسیر

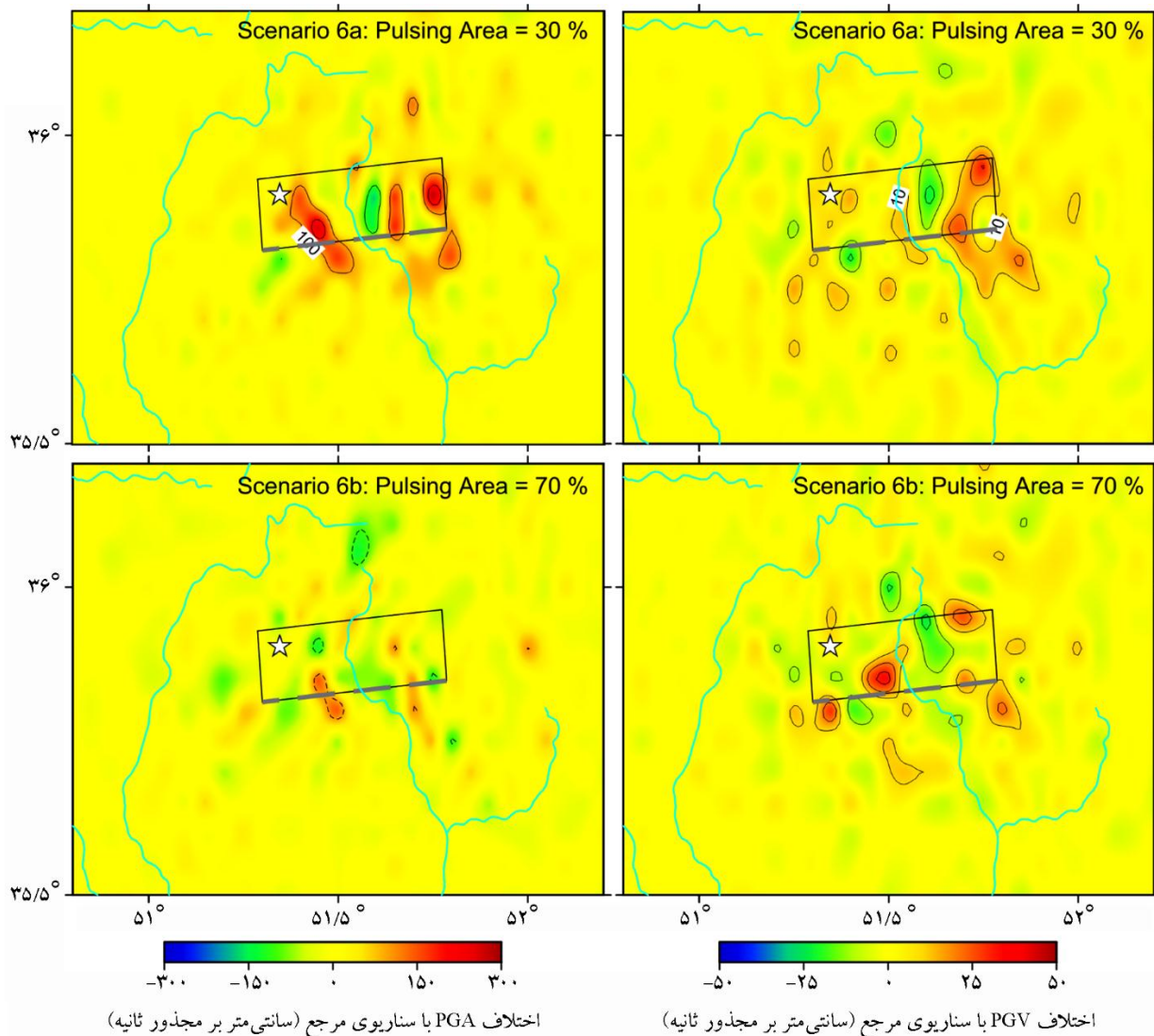
سناریوهای آزمایشی Va ، Vb و Vc به بررسی اثر فاکتور کیفیت بر نتایج شبیه‌سازی اختصاص داده شده است که تفاوت نتایج برای PGA و PGV نسبت به سناریوی مرجع در شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد. در شبیه‌سازی تصادفی این پارامتر به صورت $Q(f) = Q_0 \cdot f^a$ تعریف می‌شود که برای بخش پایین فرکانسی (کم‌تر از ۱ هرتز) تنها Q_0 و برای فرکانس‌های بالاتر از ۱ هرتز $Q_0 \cdot f^a$ در فرآیند تولید شتاب‌نگاشت‌ها مشارکت دارند. در گام اول، سناریوی Va بر اساس تغییر ضریب a شکل گرفته است. کاهش این ضریب از $1/46$ به $0/46$ باعث کاهش فاکتور کیفیت در باند بالای فرکانسی و در نتیجه افزایش کاهندگی امواج لرزه‌ای می‌شود.

این امر باعث کاهش ۳۰ درصدی PGA در ناحیه‌ی گسترده‌ای از منطقه‌ی مورد مطالعه شده و تأثیر آن بر روی PGV که در ارتباط با فرکانس‌های پایین حرکت می‌باشد، ناچیز است. در سناریوی Vb تنها Q_0 که برای هر دو بازه‌ی فرکانسی پایین و بالا مشترک می‌باشد، نسبت به سناریوی مرجع افزایش می‌یابد که باعث بالا رفتن مقدار فاکتور کیفیت و به دنبال آن کاهش کاهندگی می‌شود؛ تغییر در این پارامتر باعث افزایش ۱۰ درصد در PGA و PGV می‌گردد. سناریوی Vc از ترکیب دو سناریوی قبلی تشکیل شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، PGA حدود ۸ درصد کاهش پیدا کرده است که بیانگر تأثیر بیشتر تغییر در ضریب a نسبت به Q_0 بر نتایج است. با توجه به اینکه بخش بالای فرکانسی (یعنی ضریب a) در تعیین نتایج PGV نقشی ندارد، تنها تغییر در Q_0 بر نتایج اعمال شده است که باعث افزایش ۵ درصدی بیشینه سرعت می‌گردد.

در سناریوهای Aa و Ab اثر عدم قطعیت در پارامتر توزیع هندسی بررسی می‌شود. این پارامتر به شکل R^b در شبیه‌سازی

کرده‌اند که روش‌های تصادفی، توانایی تولید حرکت‌های با فرکانس پایین (کم‌تر از ۱ هرتز) را به‌خوبی ندارند. برای مثال، مقایسه نمودارهای طیف شبه شتاب (PSA) نشان می‌دهد که در فرکانس‌های پایین تر از ۱ هرتز، مقدار شبیه‌سازی شده این پارامتر بیشتر از مقدار آن برای رکوردهای ثبت شده از یک زلزله است، دلیل این مورد، بیشتر در نظر گرفتن افت تنش برای منطبق کردن حرکت‌های با فرکانس بالاست. برای رفع این مشکل غفرانی و همکاران [۴۵] از یک مدل تصادفی با ترکیب شبیه‌سازی ناشی از صفحه‌ی کامل گسیختگی و اسپریتی‌ها^۹ (نواحی با نسبت لغزش دو برابر متوسط صفحه‌ی گسیختگی) برای شبیه‌سازی زلزله‌ی سال ۲۰۱۱ در توهوکوی ژاپن استفاده کرده‌اند؛ به‌گونه‌ای که صفحه‌ی کامل با افت تنش پایین و اسپریتی‌ها با افت تنش بالاتر به ترتیب تولید کننده‌ی حرکت‌های با فرکانس‌های پایین و بالا هستند. در نتیجه می‌توان گفت که تغییرات قابل توجه در مطالعه‌ی حاضر برای PGV (شکل ۸) ناشی از افت تنش زیاد در نظر گرفته برای شبیه‌سازی بهتر فرکانس‌های بالا می‌باشد که باعث ایجاد اختلاف قابل توجه در نتایج شده است.

در سناریوهای $6a$ و $6b$ به بررسی اثر تغییرات در پارامتر سطح تپنده پرداخته می‌شود. با تغییر ۲۰ درصدی مقدار این پارامتر برای سناریوی $6a$ برابر با ۳۰ درصد و برای سناریوی $6b$ برابر با ۷۰ درصد در نظر گرفته شده است که نتایج آنها در شکل (۹) مشاهده می‌شود. در حالت اول با توجه به اینکه سطح فعال (تعداد زیر گسل‌های فعال) کاهش یافته است، انرژی آزاد شده در سطح کمتری توزیع می‌گردد که باعث افزایش دامنه‌ی حرکت می‌شود. مطابق شکل (۹)، در این سناریوی یک روند افزایشی خالص مشاهده نمی‌گردد بلکه شامل کاهش نتایج در چندین ناحیه می‌شود؛ اگرچه میزان افزایش پارامترهای بیشینه نسبت به کاهش آن غالب است. عکس این حالت نیز برای سناریوی $6b$ صادق است. همچنین بیشترین تغییرات در نتایج هر سناریو، اگرچه میزان آنها ناچیز



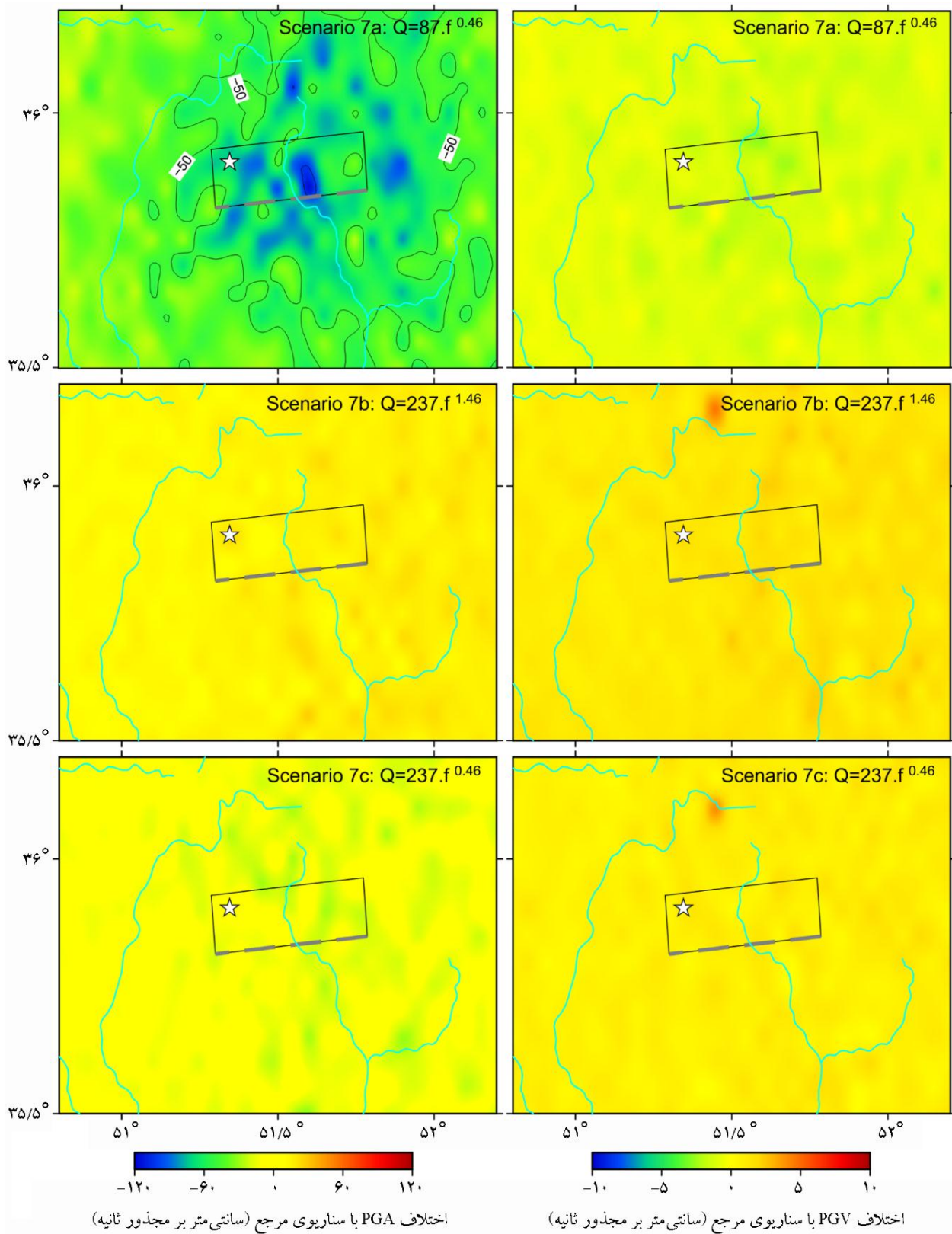
شکل (۹): مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای ۶a و ۶b و سناریوی مرجع به منظور ارزیابی اثرات تغییر در پارامتر سطح تپنده. خط سیاه و ستاره سفید رنگ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تصویر صفحه‌ی گسیختگی و محل شروع گسیختگی می‌باشند.

گسترده‌تری را در بر می‌گیرد. برای این سناریوها، PGA و PGV هر کدام به میزان ۲۷ درصد تغییر پیدا کرده‌اند.

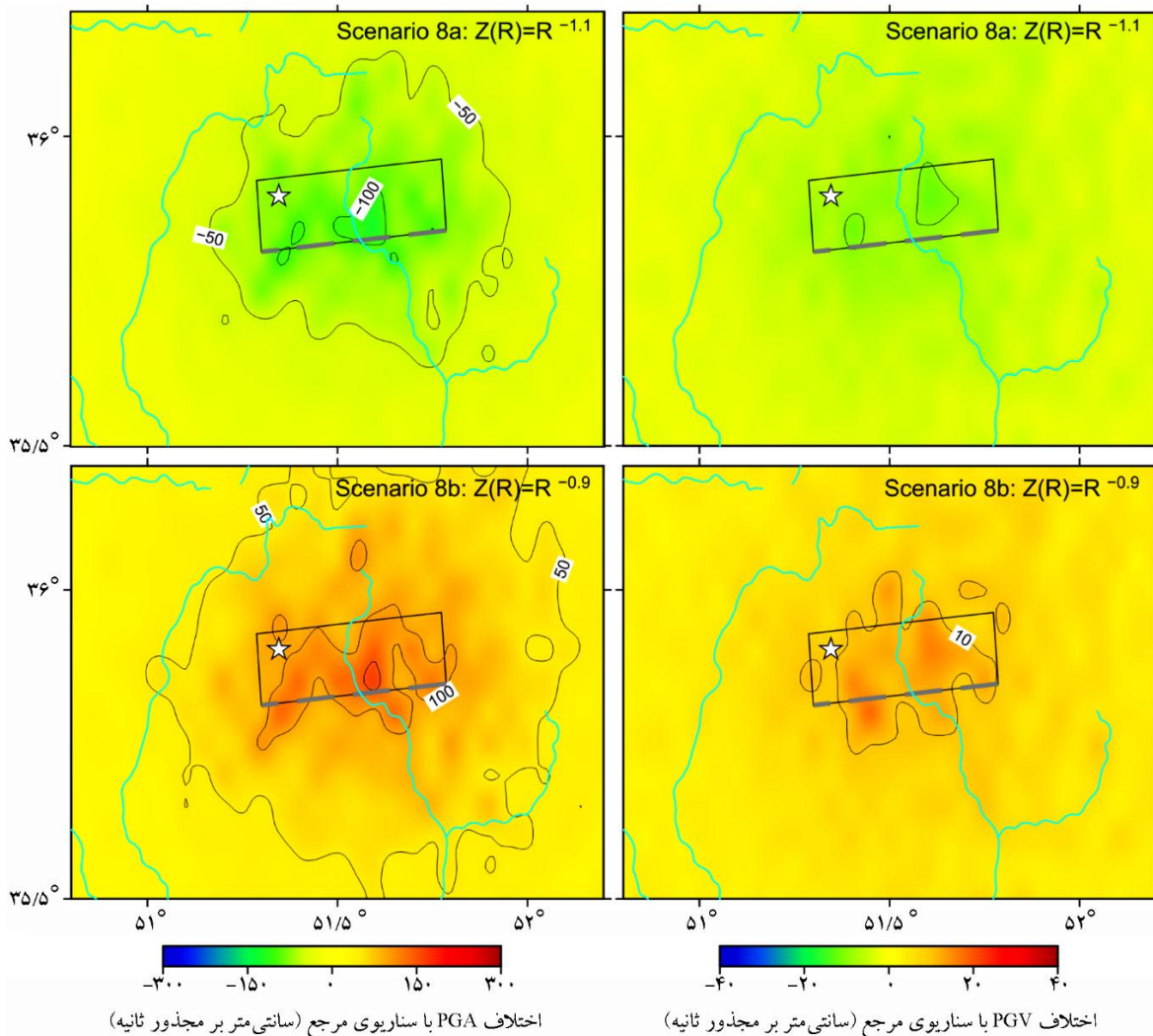
۳-۴- تغییر در پارامتر ساختگاه

سناریوهای ۹a و ۹b بر اساس اثر پارامتر K_0 بر نتایج شبیه‌سازی که برای احتساب افت سریع سطح طیف شتاب در فرکانس‌های بالا می‌باشد، شکل گرفته‌اند. در این سناریوها با کاهش و افزایش ۰/۰۱ این پارامتر نسبت به سناریوی مرجع، مقدار آن به ترتیب برابر با ۰/۰۴ و ۰/۰۶

تعریف می‌گردد که ضریب b برای سناریوی مرجع برابر با ۱- در نظر گرفته شده است. این پارامتر مستقل از فرکانس بوده و تنها به فاصله از چشمه بستگی دارد. با کاهش ضریب b به ۱/۱-، توزیع هندسی در سناریوی ۸a نسبت به سناریوی مرجع کاهش می‌یابد که در نتیجه باعث افزایش کاهیدگی و نتیجه کاهش پارامترهای حداکثر حرکت زمین مخصوصاً در نواحی نزدیک گسل می‌گردد (شکل ۱۱). برای سناریوی ۸b با افزایش ضریب b به ۰/۹-، نتایج عکس سناریوی آزمایشی قبل مشاهده می‌شود با این تفاوت که میزان تغییرات در این سناریو بیشتر و ناحیه‌ی



شکل (۱۰): مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای Ya، Yb و Yc و سناریوی مرجع به منظور ارزیابی اثرات تغییر در پارامتر فاکتور کیفیت. خط سیاه و ستاره سفید رنگ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تصویر صفحه‌ی گسیختگی و محل شروع گسیختگی می‌باشند.



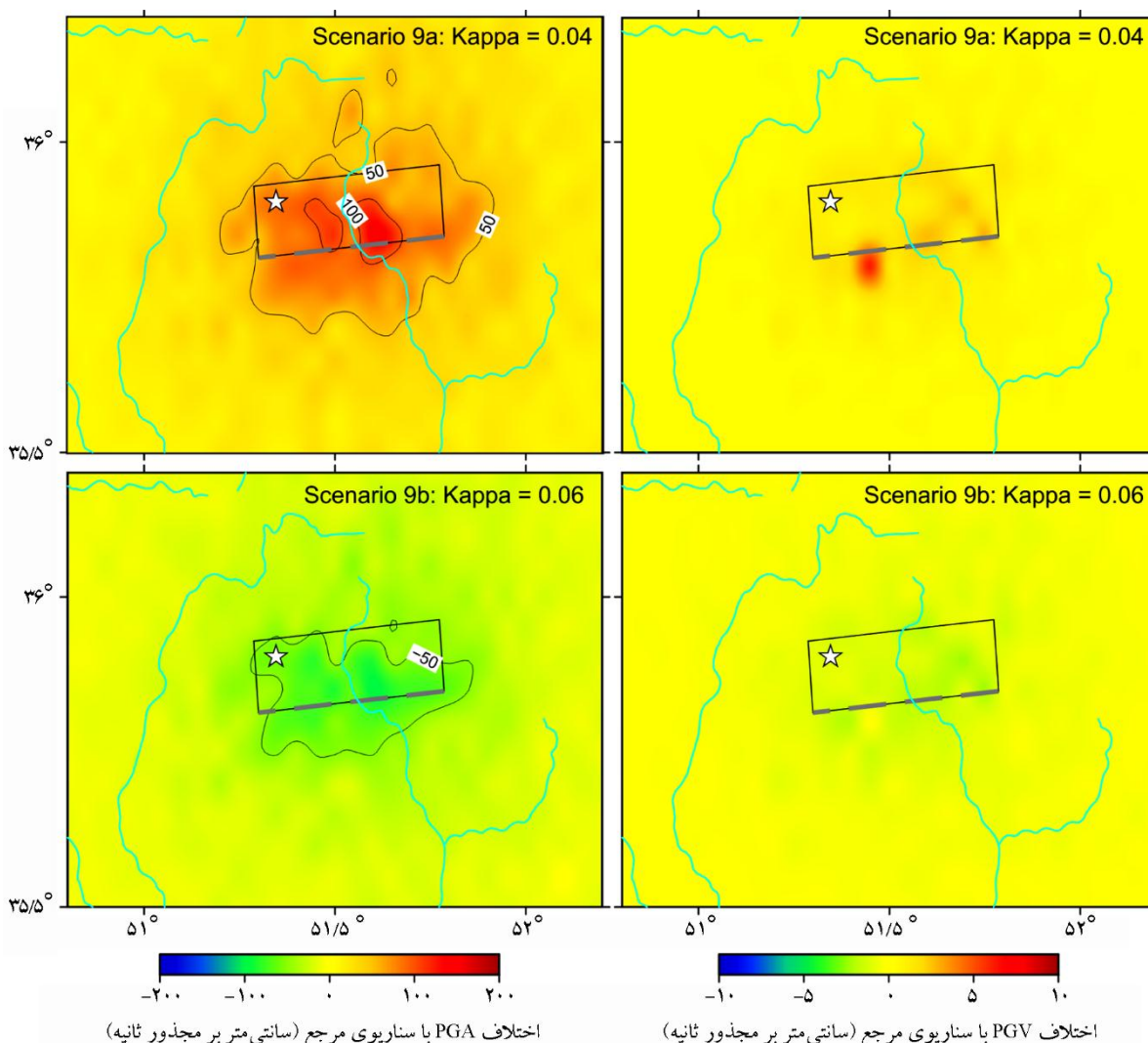
شکل (۱۱): مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای ۸a و ۸b و سناریوی مرجع به منظور ارزیابی اثرات تغییر در پارامتر توزیع هندسی. خط سیاه و ستاره سفید رنگ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تصویر صفحه‌ی گسیختگی و محل شروع گسیختگی می‌باشند.

بنابراین دلیل آن را این طور می‌توان بیان کرد که با افزایش فاصله، کاهندگی نیز افزایش می‌یابد که باعث کاهش بیشتر پارامترهای بیشینه حرکت هم در سناریوی آزمایشی و هم در سناریوی مرجع می‌گردد و در نتیجه سبب کاهش اختلاف می‌شود.

۴- تأثیر عدم قطعیت پارامترها در حوزه‌ی فرکانس از دیدگاه مهندسی

علاوه بر پارامترهای PGA و PGV، توزیع فرکانس حرکت‌های زمین در زمینه‌ی تحلیل خطر برای اهداف مهندسی

در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۱۲)، برای سناریوهای ۹a و ۹b به ترتیب به میزان ۱۵ درصد افزایش و کاهش می‌یابد، این در حالی است که تأثیر آن بر روی PGV به دلیل اینکه جزو پارامترهای مؤثر بر باند بالای فرکانسی می‌باشد، ناچیز است و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله، اختلاف نتایج سناریوهای آزمایشی با سناریوی مرجع کاهش می‌یابد به طوری که بیشترین میزان تغییرات در حوزه‌ی نزدیک گسل رخ داده است. این رفتار، مستقل از پارامتر K_0 می‌باشد زیرا این پارامتر وابسته به فاصله نیست [۴۷-۴۹]



شکل (۱۲): مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای ۹a و ۹b و سناریوی مرجع به منظور ارزیابی اثرات تغییر در پارامتر کاپا. خط سیاه و ستاره سفید رنگ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تصویر صفحه‌ی گسیختگی و محل شروع گسیختگی می‌باشند.

صفحه‌ی گسل قرار گرفته است؛ ایستگاه سوم (St 03) در بخش شرقی شهر و در جهت انتشار گسیختگی برای سناریوی مرجع و در فاصله‌ی گسیختگی ۱۵ کیلومتری قرار گرفته است؛ ایستگاه چهارم (St 04) که در جنوبی‌ترین بخش شهر و در امتداد جنوبی ایستگاه دوم واقع می‌باشد دارای فاصله‌ی ۲۵ کیلومتری از صفحه‌ی گسیختگی است. در بررسی اثر انتشار گسیختگی می‌توان از نتایج به دست آمده در ایستگاه‌های St 01, St 02, St 03 و برای اثر فاصله از ایستگاه‌های St 04 استفاده کرد.

برای هر ایستگاه، میانگین طیف سرعت برای باندهای

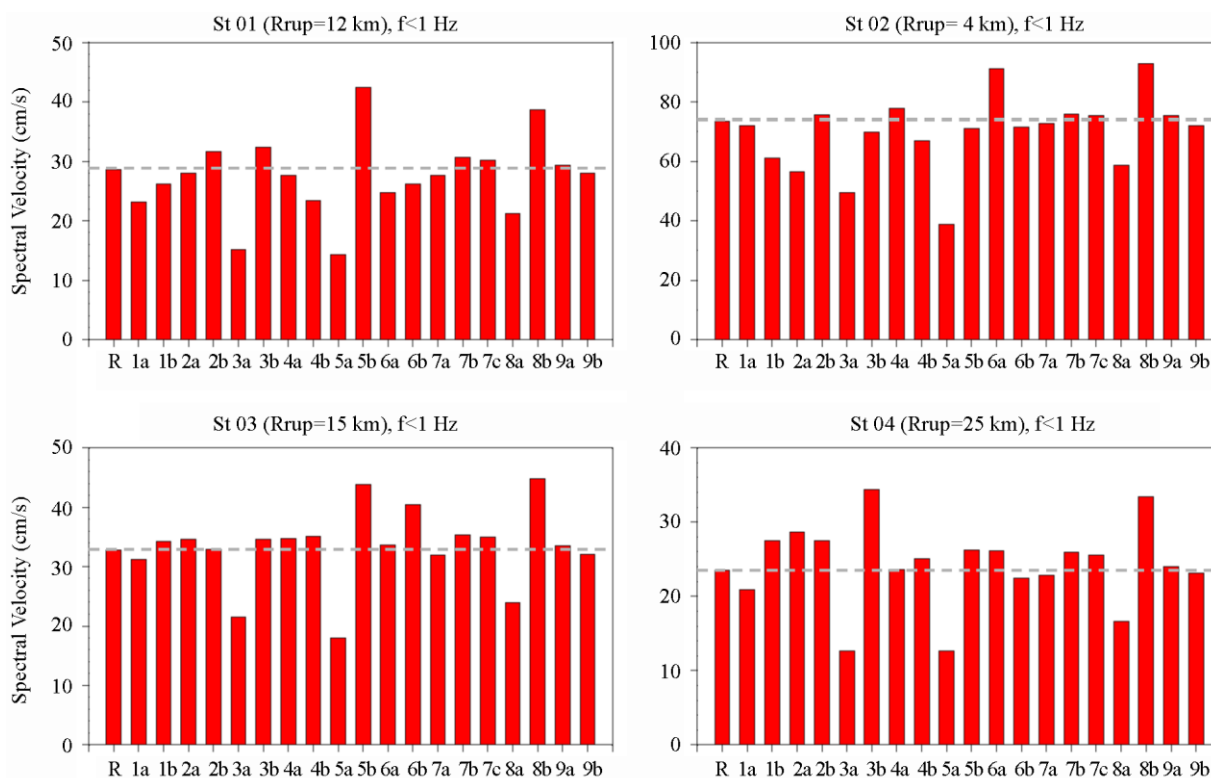
بسیار ضروری است؛ بنابراین در این مطالعه نیز، با بررسی توزیع فرکانسی با استفاده از پارامتر طیف سرعت^{۱۱} به اهمیت این موضوع به کمک چهار نقطه (ایستگاه) در سطح شهر تهران پرداخته شده است که موقعیت آنها در شکل (۱) مشاهده می‌شود. در انتخاب موقعیت این نقاط سعی بر آن شده است که اثر جهت انتشار گسیختگی و فاصله‌ی نقاط از چشمه در نظر گرفته شود. ایستگاه اول (St 01) با فاصله‌ی گسیختگی ۱۲ کیلومتر، در شرق تهران و خارج از محدودی جهت انتشار گسیختگی برای سناریوی مرجع می‌باشد؛ ایستگاه دوم (St 02) با فاصله‌ی گسیختگی ۴ کیلومتر، در شمال شهر و در کم‌ترین فاصله از

نسبت به دیگر باندهای فرکانسی است. در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) مقایسه‌ی بین طیف سرعت محاسبه شده برای سناریوهای آزمایشی (۱۹ سناریو) با سناریوی مرجع مشاهده می‌شود.

در هر سه باند فرکانسی اثر بعضی از پارامترها از جمله شیب صفحه‌ی گسیختگی (سناریوهای ۱a و ۱b)، بزرگی گشتاوری (سناریوهای ۳a و ۳b)، سطح تپنده (سناریوهای ۶a و ۶b) و توزیع هندسی (سناریوهای ۸a و ۸b) بر نتایج طیف سرعت مشاهده می‌شود که میزان آن بسته به فاصله و موقعیت قرارگیری ایستگاه‌ها متفاوت می‌باشد.

در فرکانس‌های پایین‌تر از ۱ هرتز (شکل ۱۳) پارامترهای تأثیرگذار بر طیف سرعت شامل محل نقطه‌ی شروع گسیختگی (سناریوهای ۲a و ۲b)، بزرگی گشتاوری (سناریوهای ۳a و ۳b) و افت تنش (سناریوهای ۵a و ۵b) می‌باشند. همان‌طور که در بخش (۳-۱) گفته شد پارامتر افت تنش کنترل‌کننده‌ی انرژی در فرکانس‌های بالاست، بنابراین اثر آن بر فرکانس‌های پایین تنها

فرکانسی کمتر از ۱ هرتز، ۱ تا ۵ هرتز و بالاتر از ۵ هرتز محاسبه شده است. این بازه‌ها بر اساس تعداد طبقات ساختمان‌های موجود در شهر تهران انتخاب شده‌اند که بر اساس روابط ذکر شده برای تعیین فرکانس سازه‌ها در آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله [۵۰]، بازه‌های فرکانسی فوق‌به‌ترتیب بر پاسخ سازه‌های با ارتفاع متوسط تا بلند و پل‌های با طول دهنه زیاد (اگرچه ممکن است فرکانس‌های بیشتر از ۱ هرتز نیز بر پاسخ این نوع سازه‌ها در مودهای بالاتر تأثیرگذار باشد)، سازه‌های ۲ تا ۱۰ طبقه و سازه‌های یک طبقه مؤثر هستند. مطابق آمار منتشر شده توسط مرکز آمار ایران در سال ۱۳۹۰ [۵۱]، تعداد سازه‌های نوع اول در سطح شهر تهران کم و تنها در بعضی از نقاط مشاهده می‌شود؛ اما سازه‌های نوع دوم (۲ تا ۱۰ طبقه) بیشترین فراوانی را دارند با توجه به اینکه ساختمان‌های یک طبقه تنها ۰/۱ درصد از مجموع سازه‌های شهر را تشکیل می‌دهند، طیف سرعت در فرکانس‌های ۱ تا ۵ هرتز دارای اهمیت بیشتری



شکل (۱۳): میانگین طیف سرعت به دست آمده از شبیه‌سازی در بازه‌ی فرکانسی کمتر از ۱ هرتز برای ایستگاه‌های نشان داده شده در شکل (۱). خط چین خاکستری رنگ سطح طیف سرعت را برای سناریوی مرجع نشان می‌دهد.

می‌گردد، اما مقدار آن در مقایسه با بازه‌ی پایین فرکانسی پایین‌تر می‌باشد.

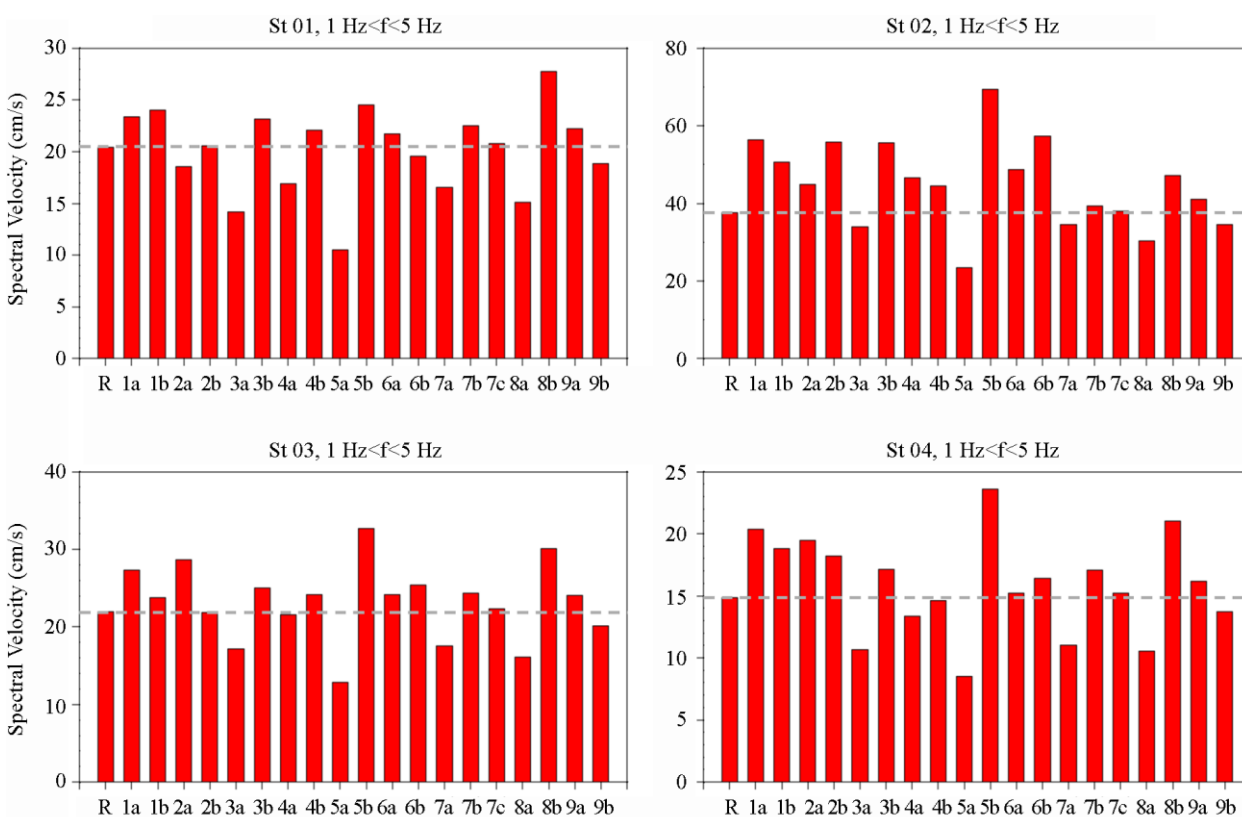
برای فرکانس‌های بالاتر از ۵ هرتز (شکل ۱۵)، طیف سرعت تحت تأثیر پارامتر افت تنش (سناریوهای ۵a و ۵b)، سناریوهای وابسته به فرکانس در تعریف فاکتور کیفیت (تغییر در ضریب a در سناریوهای ۷b و ۷c) و کاپا (سناریوهای ۹a و ۹b) قرار می‌گیرند این در حالی است که میزان تغییرات ناشی از افت تنش بیشترین اثر را در مقایسه با باند فرکانسی قبل دارد. همچنین همانند دو بازه‌ی فرکانسی قبل اثر محل شروع گسیختگی مشاهده می‌شود اما دارای کمترین تغییر نسبت به آنها می‌باشد.

۵- بررسی نتایج

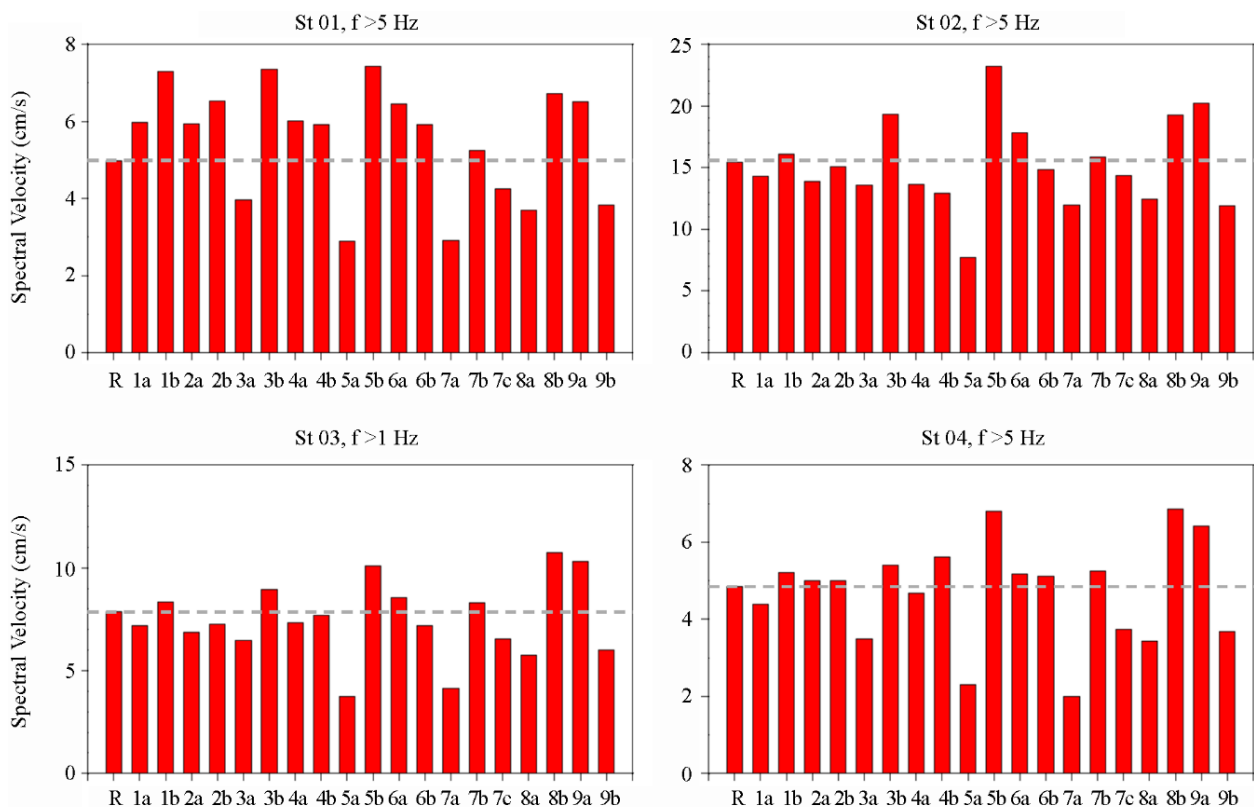
در بخش‌های قبل نتایج شبیه‌سازی برای سناریوی مرجع و

ناشی از بیشتر در نظر گرفتن مقدار این پارامتر برای مقیاس کردن حرکت‌های با فرکانس بالا می‌باشد، بنابراین بهتر است از پذیرش تأثیرگذاری این پارامتر بر فرکانس‌های پایین به‌عنوان یک اصل در روش تصادفی خودداری شود زیرا این روش بیشتر برای بازه‌ی فرکانسی مورد علاقه‌ی مهندسان یعنی فرکانس‌های بالاتر از ۱ هرتز نتایج دقیقی را ارائه می‌دهد [۴۰]. در این باند فرکانسی، محل شروع گسیختگی بیشتر بر روی نقاط نزدیک صفحه‌ی گسل تأثیرگذار است و با افزایش فاصله اثر آن کاهش می‌یابد.

در باند فرکانسی ۱ تا ۵ هرتز (شکل ۱۴)، پارامترهای افت تنش (سناریوهای ۵a و ۵b) و به میزان کمی بخش فرکانسی فاکتور کیفیت یعنی تغییر در ضریب a (سناریوی ۷a) تغییراتی را در طیف سرعت اعمال می‌کنند. همچنین تأثیر محل شروع گسیختگی (سناریوهای ۲a و ۲b) نیز بر نتایج مشاهده



شکل (۱۴): میانگین طیف سرعت به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در بازه‌ی فرکانسی ۱ تا ۵ هرتز برای ایستگاه‌های نشان داده شده در شکل (۱). خط چین خاکستری رنگ سطح طیف سرعت را برای سناریوی مرجع نشان می‌دهد.



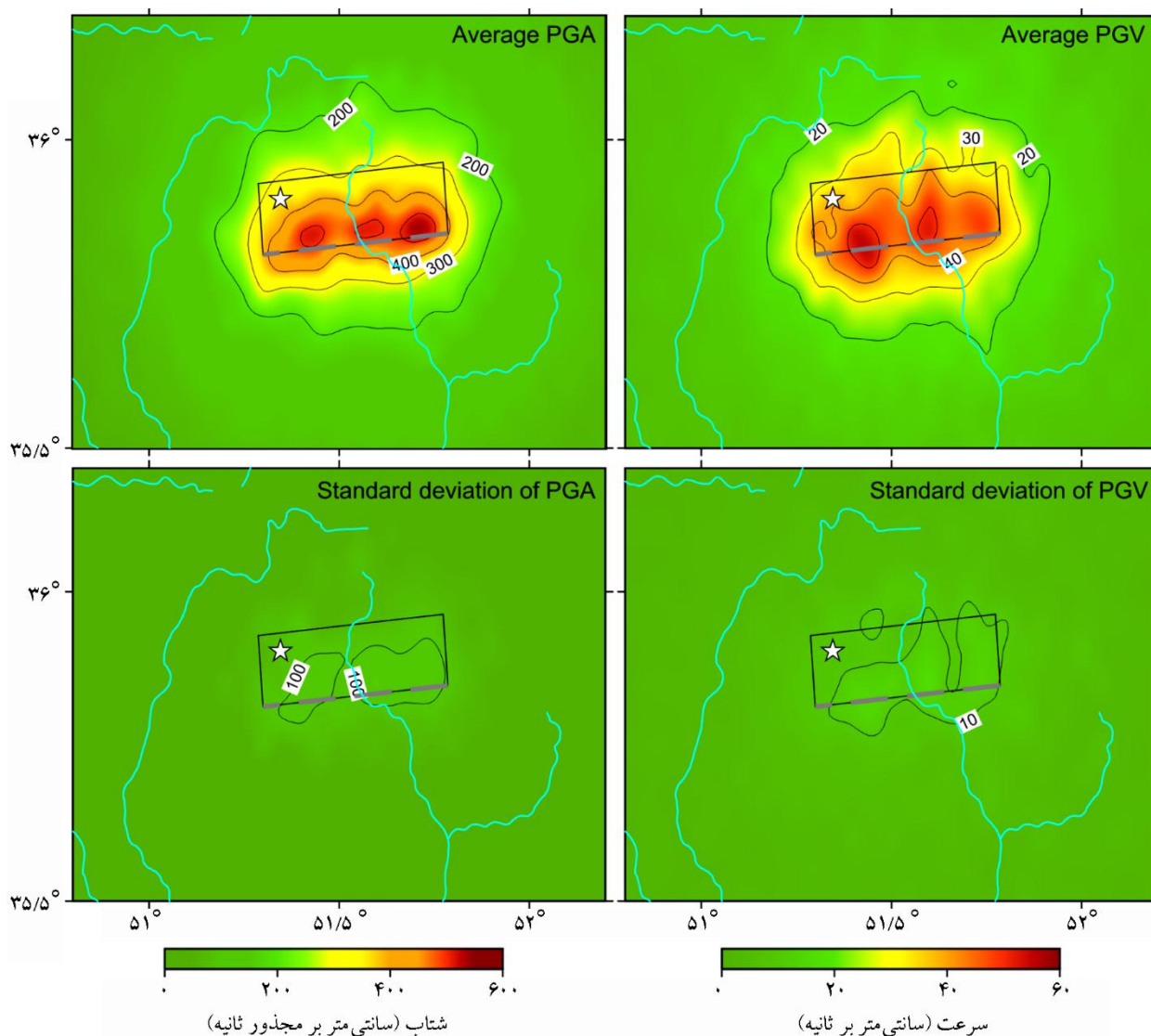
شکل (۱۵): میانگین طیف سرعت به دست آمده از شبیه‌سازی در بازه‌ی فرکانسی بالاتر از ۵ هرتز برای ایستگاه‌های نشان داده شده در شکل (۱). خط چین خاکستری رنگ سطح طیف سرعت را برای سناریوی مرجع نشان می‌دهد.

که در مقایسه با مقادیر حاصل شده از سناریوی مرجع دارای اختلاف ناچیزی می‌باشد، همچنین خطوط کنتور نرم‌تر می‌باشند. بیشترین انحراف معیار استاندارد برای PGA و PGV در بالای صفحه‌ی گسیختگی و به ترتیب به مقدار ۱۶۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه و ۱۷ سانتی‌متر بر ثانیه مشاهده شد که با دور شدن از صفحه گسل انحراف معیار نیز به سرعت کاهش می‌یابد، بنابراین می‌توان گفت که بیشترین تغییرات ناشی از عدم قطعیت پارامترهای ورودی در شبیه‌سازی نسبت به سناریوی مرجع در نقاط نزدیک صفحه‌ی گسیختگی رخ می‌دهد.

مدل‌های باقی‌مانده‌ی بیشینه شتاب (سناریوی آزمایشی منهای سناریوی مرجع) و نسبت این باقیمانده به مقادیر PGA سناریوی مرجع به صورت تابعی از فاصله‌ی گسیختگی به ترتیب در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده‌اند. مدل اول برای درک میزان اختلاف بین سناریوهای آزمایشی و سناریوی مرجع و مدل

۱۹ سناریوی آزمایشی به منظور ارزیابی اثرات پارامترهای ورودی در نتایج شبیه‌سازی و همچنین پیش‌بینی خطر بالقوه ناشی از زلزله احتمالی در اثر گسل نیاوران در سطح شهر تهران مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج آن به صورت نقشه‌های هم‌شدت PGA و PGV ارائه شد.

با استفاده میانگین‌گیری از بیشینه شتاب و سرعت به دست آمده از تمامی سناریوها و همچنین محاسبه انحراف معیار استاندارد آنها، اثرات تغییر در پارامترهای ورودی بر نتایج در شکل (۱۶) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود همانند خروجی‌های سناریوی مرجع (شکل ۲) مقادیر حداکثر PGA و PGV در نقاط بالای صفحه‌ی گسیختگی مشاهده می‌شود و در هر دو حالت در محدوده‌ی گسترده‌تری توزیع شده است. همچنین حداکثر مقدار PGA و PGV به ترتیب به ۵۳۶ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه و ۵۳ سانتی‌متر بر ثانیه می‌رسد

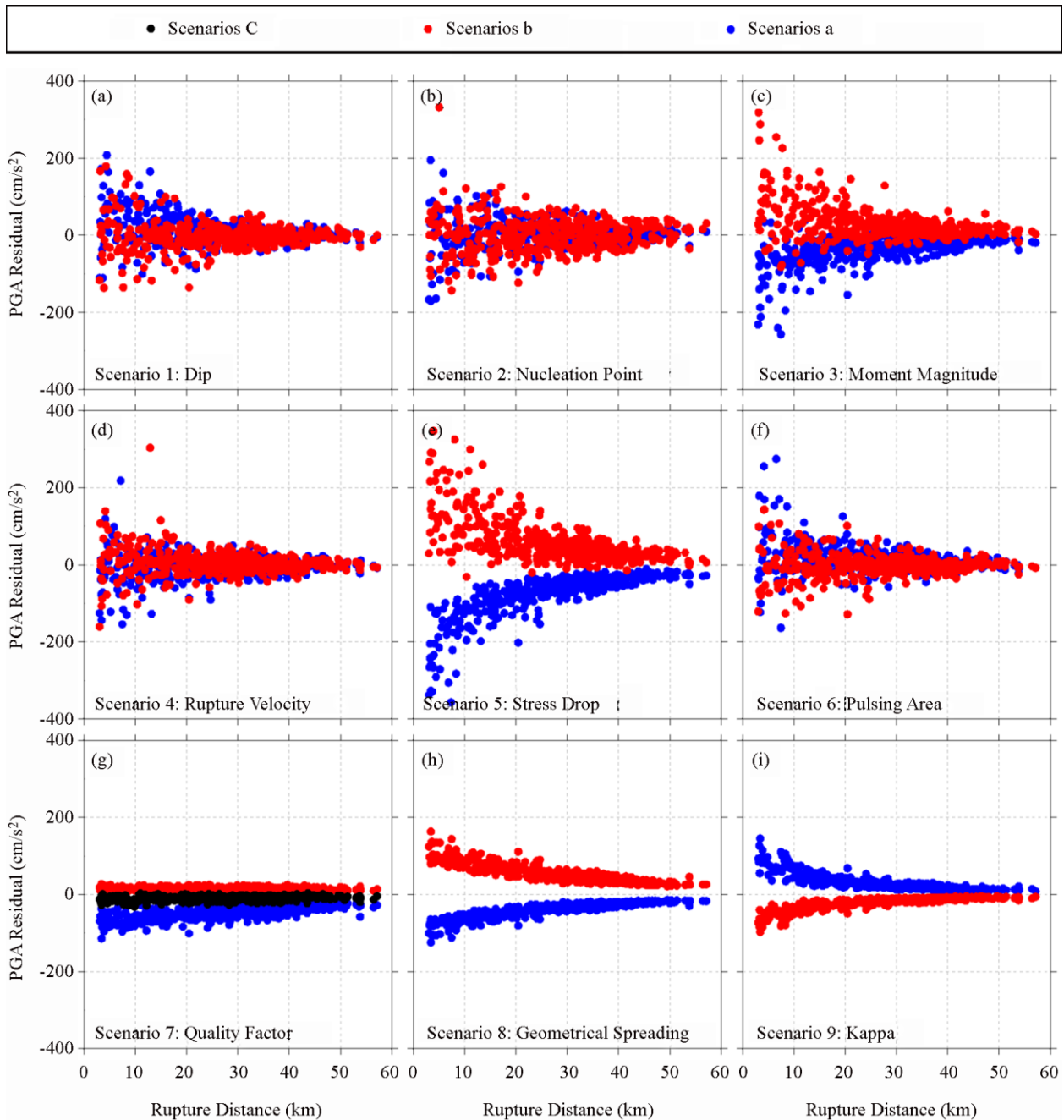


شکل (۱۶): نقشه‌ی هم‌شدت به‌دست‌آمده از میانگین‌گیری نتایج شبیه‌سازی سناریوی مرجع و سناریوهای آزمایشی برای PGA (پانل چپ) و PGV (پانل راست). ستاره سفید رنگ نشان‌دهنده‌ی نقطه‌ی شروع گسیختگی برای سناریوی مرجع می‌باشد.

ضروری است در مطالعات حوزه‌ی نزدیک تعیین پارامترها با دقت بیشتری صورت پذیرد. همچنین در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود که نسبت باقیمانده به مقادیر سناریوی مرجع برای پارامترهای مقیاس چشمه از جمله بزرگی گشتاوری و افت تنش مستقل از فاصله می‌باشد.

در سناریوهای آزمایشی که پارامترهای هندسه گسل (سناریوهای ۱ و ۲) و بعضی از پارامترهای گسیختگی آن یعنی سرعت گسیختگی و سطح تپنده (سناریوهای ۴ و ۶) بررسی شده‌اند، مدل باقی‌مانده و نسبت آن به مقدار سناریوی مرجع (شکل‌های ۱۷ و ۱۸)

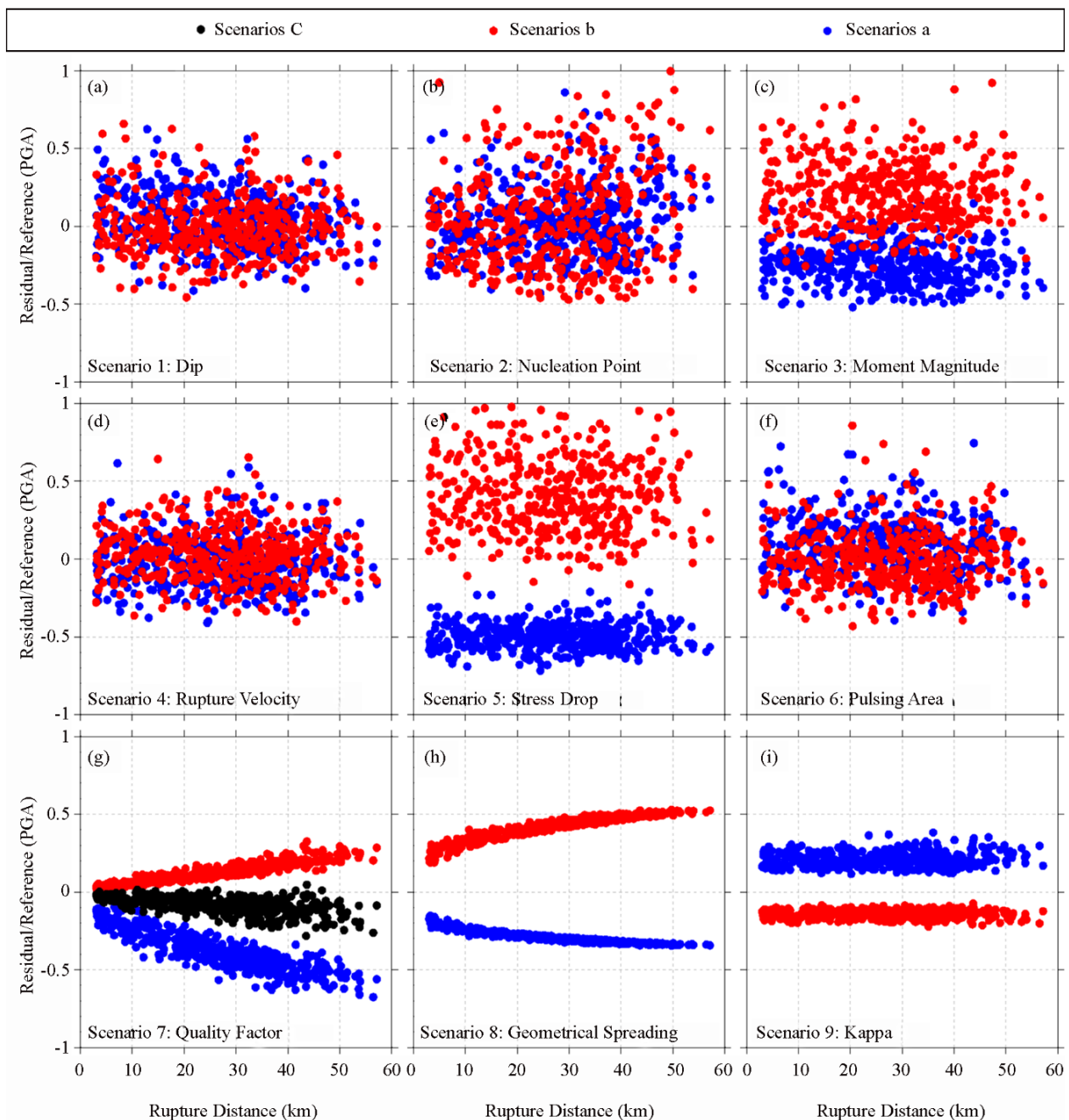
دوم برای بیان نحوه‌ی تأثیر هر پارامتر بر نتایج با افزایش فاصله کاربرد دارند. از شکل (۱۷) می‌توان دریافت که بیشترین تغییرات در نقاط نزدیک گسل اتفاق می‌افتد که تا حدود فاصله‌ی ۳۰ کیلومتری ادامه دارد و بعد از آن تغییرات کاهش و ثابت می‌شود. از این رفتار می‌توان در فهم بهتر و نتیجه‌گیری دقیق‌تر در مطالعات تحلیل خطر استفاده کرد، زیرا مشخص است که حرکت‌های ثبت شده در حوزه‌ی نزدیک گسل به میزان زیادی تابع پارامترهای در نظر گرفته شده هستند درحالی‌که در حوزه‌ی دور با افزایش فاصله، این وابستگی از بین می‌رود، بنابراین



شکل (۱۷): مدل‌های باقیمانده PGA برای سناریوهای آزمایشی (سناریوی آزمایشی - سناریوی مرجع). دایره‌های قرمز، آبی و سیاه رنگ به ترتیب نشان‌دهنده سناریوهای a، b و c می‌باشند.

در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) (نمودارهای c و d) مدل‌های باقی‌مانده برای سناریوهای دیگر گسیختگی گسل یعنی بزرگی گشتاوری (سناریوی ۳) و افت تنش (سناریوی ۵) نشان داده شده‌اند، برخلاف حالت قبل یک روند کاهشی و افزایشی ناشی اثر عدم قطعیت پارامترها نسبت به سناریوی مرجع مشاهده می‌شود.

تمایز مشخصی را بین سناریوهای مربوط به هر پارامتر (سناریوهای a و b) نشان نمی‌دهند، بنابراین می‌توان گفت که پارامترهای در نظر گرفته شده در این سناریوها به جای اینکه PGA و PGV را به صورت قریبه نسبت به مقادیر سناریوی مرجع کاهش و یا افزایش دهند، باعث یک توزیع ناهمگون و بی‌قاعده می‌گردند.



شکل (۱۸): مدل‌های نسبت باقیمانده PGA به مقادیر سناریوی مرجع. دایره‌های قرمز، آبی و سیاه رنگ به ترتیب نشان‌دهنده سناریوهای a، b و c می‌باشند.

۱۷ و ۱۸). برای سناریوهای آزمایشی مربوط به پارامتر فاکتور کیفیت، با افزایش فاصله، کاهش فاصله، کاهندگی افزایش می‌یابد (شکل ۱۸)، به گونه‌ای که تغییر در ضریب a (سناریوی a) بیشترین و تغییرات هم‌زمان در ضرایب a و Q_0 (سناریوی c) کمترین اثر را بر نتایج اعمال می‌کنند. نتایج مدل‌های باقی‌مانده برای پارامتر توزیع هندسی نشان‌دهنده یک توزیع نسبتاً قرینه برای سناریوهای a و b می‌باشد،

همچنین کاهش گشتاور لرزه‌ای و افت تنش تغییرات بیشتری را نسبت به افزایش آنها به همراه دارد. در سناریوهایی که اثرات پارامترهای مسیر از قبیل فاکتور کیفیت (سناریوی ۷) و توزیع هندسی (سناریوی ۸) بررسی شده‌اند، تغییری مشخص در مدل‌های باقی‌مانده و نسبت مدل باقی‌مانده به مقادیر سناریوی مرجع مشاهده می‌گردد (نمودارهای g و h از شکل‌های

باید توجه داشت که اگر اثرات خاک نرم ساختگاه (خاک نوع C بر اساس آیین‌نامه NEHRP) که در بیشترین مناطق تهران موجود است [۵۲] در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شود، شتاب به مراتب بالاتری را نتیجه می‌دهد.

پارامترهایی که بیشترین اثر را بر روی حرکت‌های زمین شبیه‌سازی شده دارند مربوط به سناریوهای ۳b (بزرگی گشتاور بزرگ‌تر)، ۵b (افت تنش بزرگ‌تر)، ۸b (ضریب b بزرگ‌تر در تعریف توزیع هندسی) و ۹a (کاهش کاپا) می‌باشند؛ بنابراین این پارامترها را می‌توان «بدترین سناریوی ممکن» نامید، زیرا علاوه بر افزایش سطح PGA و PGV، تغییرات ناشی از آنها محدوده‌ی گسترده‌تری را نیز در بر می‌گیرد. درحالی‌که سناریوهای ۳a، ۵a، ۷a، ۸a و ۹b با توجه به کاهش بیشینه پارامترهای حرکت زمین، «بهترین سناریوی ممکن» برای شهر تهران و نواحی مجاور نامیده شده‌اند.

حرکت‌های با فرکانس پایین بیشتر توسط پارامترهای محل شروع گسیختگی (سناریوهای ۲a و ۲b) و بزرگی گشتاوری کنترل می‌شوند. با توجه به فراوانی کم سازه‌های بلند، این باند فرکانسی از اهمیت کمتری برخوردار است.

بازه‌های فرکانسی بالاتر که برای پاسخ سازه‌های با ارتفاع متوسط و پایین از اهمیت فراوانی برخوردار هستند، متأثر از پارامترهای افت تنش (سناریوهای ۵a و ۵b) و فاکتور کیفیت (سناریوهای ۷a، ۷b و ۷c) می‌باشند.

بیشترین تأثیر عدم قطعیت پارامترهای معرفی شده در سناریوهای آزمایشی نسبت به سناریوی مرجع در فواصل کمتر از ۳۰ کیلومتر مشاهده می‌شود، بنابراین لازم است برای مطالعات تحلیل خطر در حوزه‌ی نزدیک، بالا بودن دقت پارامترهای انتخابی مد نظر قرار گیرد.

مراجع

1. Atkinson, G.M., Beresnev, I.A. (2002) Ground motions at Memphis and St. Louis from M7.5-8.0 earthquakes in the New Madrid seismic zone.

اگرچه میزان تغییرات نتایج برای کاهش ضریب b تا حدودی بیشتر از افزایش آن است. برای این سناریو، مدل باقی مانده (نمودار h از شکل ۱۷) در فواصل نزدیک گسل اختلاف بیشتری را نشان می‌دهد که به معنی این نیست که کاهش کاپا ناشی از پارامتر توزیع هندسی در فواصل نزدیک حداکثر است بلکه برای مشاهده این موضوع بایستی به مدل نسبت باقی مانده به مقادیر سناریوی مرجع (نمودار h از شکل ۱۸) رجوع کرد که رفتار قابل انتظار یعنی بالا رفتن کاهش کاپا با افزایش فاصله را مشخص می‌کند.

برای تنها پارامتر ساختگاه یعنی کاپا (سناریوی ۹) که در این مطالعه بررسی شده است، بیشترین تغییرات نسبت به سناریوی مرجع (نمودار i از شکل ۱۷) در نقاط نزدیک گسل مشاهده است که البته به معنی وابستگی این پارامتر به فاصله نیست. نمودار i از شکل (۱۸) مستقل بودن این پارامتر از فاصله را بیان می‌کند به طوری که نسبت باقی مانده به مقادیر سناریوی مرجع در تمامی فواصل تقریباً ثابت است.

۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر به منظور بررسی عدم قطعیت پارامترهای ورودی بر نتایج شبیه‌سازی حرکت زمین، ۱۹ سناریوی آزمایشی تعریف و مقادیر PGA، PGV و محتوای فرکانسی به دست آمده با نتایج یک سناریوی مرجع مقایسه شدند. پارامترهای تغییر یافته در سناریوهای آزمایشی، مطابق فرمول بندی طیف شتاب هدف در روش‌های شبیه‌سازی تصادفی انتخاب گردیدند که شامل پارامترهای چشمه، مسیر و ساختگاه می‌باشند. بر اساس نتایج به دست آمده، می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

- در سناریوی مرجع، شبیه‌سازی برای زلزله‌ای با بزرگی گشتاوری ۷ و بر روی ساختگاه‌هایی با سرعت موج برشی ۶۲۰ متر بر ثانیه (سنگ بستر مهندسی) انجام گرفت که باعث ایجاد بیشینه شتاب حدود ۶۰۰ متر بر مجذور ثانیه و بیشینه سرعت ۶۰ متر بر ثانیه گردید. با توجه به اینکه گسل هدف (گسل نیاوران) در محدوده‌ی شهری تهران قرار دارد، این سناریو می‌تواند تهدیدی جدی برای شهر محسوب شود. البته

- events. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **101**(3), 1136–1151.
10. Bjerrum, W.L., Sørensen, M.B., Ottemoller, L., Atakan, K. (2013) Ground motion simulations for Izmir, Turkey: parameter uncertainty. *J. Seismol.*, DOI 10.1007/s10950-013-9389-9.
 11. Ritz, J.F., Nazari, H., Balescu. S., Lamothe, M., Salamati, R., Ghassemi, A., Shafei, A., Ghorashi, M., and Saidi, A. (2012) Paleoearthquakes of the past 30,000 years along the North Tehran Fault (Iran). *Journal of Geophysical Research*, **117**(B6).
 12. Samaei, M., Barzegari, A., Ghavimipannah, M.R., Ja'afari, F., and Shami, A. (2017) Simulation of probable scenarios of earthquakes occurrences in Tehran. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, **26**(103), 139-154 (in Persian).
 13. Beresnev, I., and G.M. Atkinson (1998) FINSIM: A FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. *Seismol. Res. Lett.*, **69**, 27–32.
 14. Motazedian, D., and Atkinson, G.M. (2005) Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, 995–1010.
 15. Boore, D.M. (1983) Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **73**, 1865–1894.
 16. Boore, D.M. (2003) Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure Appl. Geophys.*, **160**, 635–675.
 17. Halldorsson, B., and A.S. Papageorgiou (2005) Calibration of the specific barrier model to earthquakes of different tectonic regions. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **95**, 1276–1300.
 18. Soghrat, M.R., Khaji, N., & Zafarani, H. (2012) Simulation of strong ground motion in northern Iran using the specific barrier model. *Geophysical Journal International*, **188**(2), 645–679.
 19. Zafarani, H., & Soghrat, M. (2012) Simulation of ground motion in the Zagros region of Iran using the specific barrier model and the stochastic method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**(3), 1015–1024.
 2. Pulido, N., Ojeda, A., Atakan, K., and Kubo, T. (2004) Strong ground motion estimation in the Sea of Marmara region (Turkey) based on a scenario earthquake. *Tectonophysics*, **391**, 357–374.
 3. Aochi, H., and Douglas, J. (2006) Testing the validity of simulated strong ground motion from the dynamic rupture of a finite fault, by using empirical equations. *Bull. Earthq. Eng.*, **4**, 211–229.
 4. Sørensen, M.B., Pulido, N., and Atakan, K. (2007) Sensitivity of ground motion simulations to earthquake source parameters: a case study for Istanbul, Turkey. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**(3), 881– 900.
 5. Causse, M., Cotton, F., Cornou, C., Bard, P.Y. (2008) Calibrating median and uncertainty estimates for a practical use of empirical Green's functions technique. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**(1), 344–353.
 6. Aagaard, B.T., Graves, R.W., Schwartz, D.P., Ponce, D.A., and Graymer, R.W. (2010a) Ground motion modeling of Hayward fault scenario earthquakes, Part I: Construction of the suite of scenarios. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(6), 2927–2944.
 7. Aagaard, B.T., Graves, R.W., Rodgers, A., Brocher, T.M., Simpson, R.W., Dreger, D., Petersson, N.A., Larsen, S.C., Ma, S., Jachens, R.C. (2010b) Ground-motion modeling of Hayward fault scenario earthquakes, Part II: Simulation of long-period and broadband ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(6), 2945–2977.
 8. Cultrera, G., Cirella, A., Spagnuolo, E., Herrero, A., Tinti, E., Pacor, F. (2010) Variability of kinematic source parameters and its implication on the choice of the design scenario. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(3), 941–953.
 9. Ameri, G., Emolo, A., Pacor, F., Gallovič, F. (2011) Ground-motion simulations for the 1980 M6.9 Irpinia earthquake (southern Italy) and scenario

30. Samaei, M. (2013) *Strong Ground Motion Prediction for Tehran Region, Iran*. Doctoral Thesis, Kanazawa University, Japan.
31. Wells, D.L., and Coppersmith, K.J. (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 974–1002.
32. Mai, M., Spudich, P., and Boatwright, J. (2005) Hypocenter location in finite source rupture models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**(3), 965–980.
33. Chiou, B. S.-J., and Youngs, R.R. (2008) *NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra*. PEER Report No. 2008/09, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
34. Motazedian, D. (2006) Region-specific key seismic parameters for earthquakes in Northern Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**, 1383–1395.
35. Boore, D.M. and Joyner, W.B. (1997) Site Amplification for Generic Rock Sites. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**, 327–341.
36. Zafarani, H., Hassani, B. and Ansari, A. (2012) Estimation of earthquake parameters in the Alborz seismic zone, Iran using generalized inversion method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **42**, 197–218.
37. Zafarani, H., Rahimi, M., Noorzad, A., Hassani, B., and Khazaei, B. (2015) Stochastic simulation of strong-motion records from the 2012 Ahar–Varzaghan dual earthquakes, northwest of Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105**(3).
38. Wassel, P., Smith, W.H.F. (1998) New improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **79**, 579.
39. Saffari, H., Kuwata, Y., Takada, S., Mahdavian, A. (2012) Updated PGA, PGV, and spectral acceleration attenuation relations for Iran. *Earthquake Spectra*, **28**, 1–20.
- Bulletin of the Seismological Society of America*, **102**(5), 2031–2045.
20. Kohrs-Sansorny, C., Courboux, F., Bour, M. and Deschamps, A. (2005) A two-stage method for ground motion simulation using stochastic summation of small earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **95**, 1378–1400.
21. Zafarani, H., and Noorzad, A. (2014) *Engineering Seismology and Earthquake Simulation Methods*. University of Tehran Press, first edition, Tehran-Iran (in Persian).
22. Boore, D.M. (2009) Comparing stochastic point-source and finite-source ground-motion simulations: SMSIM and EXSIM. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**, 3202–3216.
23. Boore, D.M., and Thompson, M.E. (2015) Revisions to some parameters used in stochastic-method simulations of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105**, 1029–1041.
24. Hartzell, S. (1978) Earthquake aftershocks as Green's functions. *Geophys. Res. Lett.* **5**: 1–4.
25. Irikura, K. (1983) Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes. *Bull. Disast. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ.* **33**, 63–104.
26. Joyner, W.B., and Boore, D.M. (1986) On simulating large earthquakes by Green's function addition of smaller earthquakes, in *Earthquake Source Mechanics*, S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz (Editors), *American Geophysical Monograph*, **37**, 269–274.
27. Motazedian, D., and Moinfar, A. (2006) Hybrid stochastic finite fault modeling of 2003, M6.5, Bam earthquake (Iran). *Journal of Seismology*, **10**, 91–103.
28. Abbassi, M. R., and Farbod, Y. (2009) Faulting and folding in quaternary deposits of Tehran's piedmont (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, **34**, 522–531.
29. Arian, M., Bagha, N., Khavari, R., Noroozpoor, H. (2012) Seismic sources and neo-tectonics of Tehran area (North Iran). *Indian Journal of Science and Technology*, **5**(3), 2379–2383.

49. Samaei, M., Miyajima, M., Yazdani, A., and Jaafari, A. (2016) High frequency decay parameter (κ) for Ahar-Varzaghan double earthquakes, Iran (Mw 6.5 & 6.3). *Journal of Earthquake and Tsunami*, **10**(2), 1640006_1-1640006_14.

50. BHRC (2015) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of buildings, Standard No.2800*. 4th Edition Road, Housing and Urban Development Research Center (in Persian).

51. Statistical Center of Iran (2011) *General Counting of People and Housing, General Results of Tehran*. PP 25 (in Persian).

52. Gholipour, Y., Bozorgnia, Y., Rahnama, M., Berberian, M., Ghorashi, M., Talebian, Nazari, H., Shoja-Taheri, J., and Shafiei, A. (2008) *Probabilistic Seismic Hazard Analysis - Phase I, Greater Tehran Regions*, 180.

واژه‌نامه

Scenario	۱- سناریو
Stress Drop	۲- افت تنش
Quality Factor	۳- فاکتور کیفیت
Geometrical Spreading	۴- توزیع هندسی
Nucleation Point	۵- شروع گسیختگی
Pulsing Area	۶- سطح تپنده
Reference Point	۷- نقطه مرجع
Hanging Wall	۸- پاشنه گسل
Asperity	۹- اسپریتی
Spectral Velocity	۱۰- طیف سرعت

40. Boore, D.M., and Atkinson, G.M. (2008) Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, **24**, 99–138.

41. Kale, Ö., Akkar, S., Ansari, A., & Hamzehloo, H. (2015) A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV, and 5% damped response spectrum: Investigation of possible regional effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105**(2A), 963–980.

42. Soghrat, M.R., & Ziyaeifar, M. (2017) Ground motion prediction equations for horizontal and vertical components of acceleration in northern Iran. *Journal of Seismology*, **21**(1), 99–125.

43. Abrahamson, N.A., and Somerville, P.G. (1996) Effects of the hanging wall and footwall on ground motions recorded during the Northridge earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86**(1), 93–99.

44. Shabestari, K.T., and Yamazaki, F. (2003) Near-fault spatial variation in strong ground motion due to rupture directivity and hanging wall effects from the Chi-Chi, Taiwan earthquake. *Earthq. Eng. Struct. Dynam.*, **32**(14), 2197–2219.

45. Ghofrani, H., Atkinson, M.G., Goda, K., and Assatourians, K., (2013) Stochastic finite-fault simulation of the 2011 Tohoku, Japan, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**, 1307–1320.

46. Crain, S. and Motazadian, D., (2014) Low-frequency scaling applied to stochastic finite-fault modeling. *J. Seismol.*, **18**, 109–122.

47. Anderson, J.G., and Hough, S.E. (1984) A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **74**, 1969–1993.

48. Ktenidou, J.O., Gelis, C., and Bonilla, F.L. (2013) A study on the variability of Kappa (κ) in a Borehole: Implications of the computation process. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**(2A), 1048–1068.