

آنالیز حساسیت سنجی مدل‌های چسبنده‌کشسان تغییرشکل پوسته زمین به پارامترهای ورودی براساس میدان جابه‌جایی سطحی حاصل

اصغر راست‌بود^۱ و بهزاد وثوقی^{۲*}

^۱ استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲ دانشیار، گروه مهندسی ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
(دریافت: ۸۸/۷/۲۱، پذیرش نهایی: ۹۰/۱۱/۱۱)

چکیده

در این تحقیق نقش پارامترهای گوناگون گسلش روی داده‌های ژئودتیک مورد بررسی قرار گرفته و هدف از آن بررسی اثر پارامترهای ورودی هندسی و فیزیکی در مدل‌های چسبنده‌کشسان (ویسکوالاستیک) تغییرشکل پوسته است. برای عملی شدن این آنالیز از مدل چسبنده‌کشسان وانگ و همکاران (۲۰۰۶) استفاده شده است. از اطلاعات با کیفیت بالا در مورد تغییرشکل وابسته به زمان سطح زمین، می‌توان برای استخراج جزئیات بیشتری از تغییرات زمانی و مکانی تغییرشکل پوسته‌ای ناشی از زمین‌لرزه استفاده کرد. این فرایندها در بردارنده متغیرهای متعددی هستند که برخی از آنها با دقت بیشتری نسبت به بقیه تعیین می‌شوند. در این تحقیق، تغییرشکل سطحی در دو گسلش شیب‌لغز و امتدادلغز در محیطی که از یک لایه کشسان روی یک نیم‌فضای چسبنده‌کشسان تشکیل شده است مدل‌سازی می‌شود و آنالیز حساسیت روی همه پارامترهای هندسی و فیزیکی آنها صورت می‌گیرد. با بررسی‌های صورت گرفته در مورد روش‌های گوناگون تعیین پارامترهای هندسی گسلش و پارامترهای فیزیکی منطقه گسلش، از بین این پارامترها، آنالیز روی پارامترهایی که با دقت کمتری از اطلاعات مربوط به عملیات صحرایی تعیین می‌شوند یعنی چسبندگی (ویسکوزیته) نیم‌فضا، ضخامت لایه کشسان و زاویه شیب صفحه گسل، توصیه می‌شود. مطابق نتایج حاصل از این تحقیق، میزان حساسیت مدل چسبنده‌کشسان به پارامترهای ورودی، ارتباطی به نوع گسلش ندارد. با استفاده از آنالیز حساسیت می‌توان مکان مناسب‌ترین اطلاعات جابه‌جایی حاصل از مدل را به منظور به‌دست آوردن مقادیر پارامترهای مورد بررسی، تعیین کرد. برای نمونه مطابق نتایج به‌دست آمده، بهترین اطلاعات برای به‌دست آوردن مقدار چسبندگی، تغییرشکل پسالرزه‌ای روی منطقه‌ای است که در آن گسیختگی رخ داده است. با این حال هر منطقه با جابه‌جایی‌های پسالرزه‌ای بزرگ مقدار می‌تواند اطلاعات مفیدی را در این زمینه فراهم کند. برای ضخامت لایه کشسان نیز استفاده از اطلاعات پسالرزه‌ای از منطقه بالای صفحه گسل توصیه می‌شود، شیب گسل نیز از اطلاعات همالرزه‌ای بهتر تعیین می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، مدل‌سازی، گسل مرجع، تغییرشکل همالرزه‌ای، تغییرشکل پسالرزه‌ای، لایه کشسان، نیم‌فضای چسبنده‌کشسان

Sensitivity analysis of viscoelastic models of the earth crustal deformation to input parameters based on outcome surface deformation field

Rastboud, A.¹ and Voosoghi, B.²

¹Assistant Professor, Surveying Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

²Associate Professor, Geodesy Engineering Department, Faculty of Surveying Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 13 Oct 2009, Accepted: 31 Jan 2012)

Abstract

The scope of this research is to investigate the effect of geometrical and physical input

E-mail: vosoghi@kntu.ac.ir

دورنگار: ۰۲۱-۸۸۷۸۶۲۱۳

تلفن: ۰۲۱-۸۸۷۷۰۲۱۸

*نگارنده رابط:

parameters in crustal viscoelastic deformation models. To do this analysis viscoelastic model of Wang et al., 2006 is used. The increasing quality of data on time-dependent deformation of the Earth's surface can be used to extract more details on the spatial and temporal development of earthquake-related crustal deformation. Different variables are involved in these processes; some of them perform more accurately than others. In this research, surface deformation is modeled in two dip-slip and strike slip faults, in a medium composed of an elastic layer over an inelastic half-space, sensitivity analysis is performed on all geometrical and physical parameters. Among physical and geometrical parameters, performing of this analysis on less accurately determined parameters from displacement field data is recommended. These parameters are viscosity of the half-space, thickness of the elastic layer and dip angle of the fault plane. According to obtained results of this research, sensitivity of the viscoelastic model to input parameters is independent of type of faulting. From the variability analysis, the location of most appropriate displacement data to obtain values for the studied parameters is determined. For example according to obtained results, coseismic and postseismic displacement analysis show high dependency on fault slip above rupture surface of the fault, however it shows less sensitivity to fault length.

When analyzing the co-seismic displacement, a strong dependency on the dip angle of the fault plane is found. Points with large displacements also show a large variability when the dip angle varies. The area over the rupture plane is the one where the largest displacements take place. Therefore, surface measurements in this area are the most suitable for ascertaining the most likely value for the dip angle.

By contrast, varying the thickness of the elastic layer leads to small differences in general, especially small in the area immediately beyond the surface projection of the lower end of the rupture plane. This indicates that co-seismic displacement measurements, especially around the mentioned area, are not recommendable for trying to ascertain an accurate value for this parameter.

In the analysis of the post-seismic deformation it is found that, on average, deviations from a reference model are large above the rupture plane when varying the viscosity and the thickness of the elastic layer. In this area, the dip angle does not influence the results as much as the other two parameters. Further away from the rupture surface along dip direction, in the area immediately beyond the surface projection of the lower end of the rupture plane, the dip angle becomes the most influential parameter. Further away, where the magnitude of the horizontal displacement reaches another maximum, the viscosity and the thickness of the elastic layer have again a greater effect than the dip angle of the rupture surface.

Accordingly, measurements in areas of large post-seismic displacements are more suitable for deriving a value for the viscosity. In particular, above the rupture area, values depend heavily on this parameter. The same region can also provide data that is useful for ascertaining the thickness of the elastic layer, although for this parameter the area where the minimum displacement occurs is not as appropriate as for the viscosity.

The dip angle, in general, cannot be accurately derived using post-seismic deformation data. The magnitude of the variability associated with this parameter is very small. The best place to find a value for this parameter is the area where the post-seismic displacement changes direction.

So the best data to derive the value of the viscosity is the post-seismic deformation over the area where the rupture takes place, although any area with large magnitude post-seismic displacements can provide more useful data. For the thickness of the elastic layer it is also advisable to use postseismic data from the area above the fault plane, whereas the dip is better determined by means of coseismic data.

Both of coseismic and postseismic displacement analysis show high dependency to locking depth of the fault especially above the rupture surface of the fault. The amount of sensitivity is especially high for coseismic displacements.

Coseismic and postseismic displacement analysis show small sensitivity to Lamé coefficients of elastic layer above rupture surface of the fault and it is reduced for Lamé coefficients of visco-elastic layer.

Coseismic displacement analysis does not show sensitivity to elastic or visco-elastic layer density, however postseismic displacement analysis shows small sensitivity, so modeling is not an appropriate tool for elastic layer or visco-elastic half space density determination.

Key words: Sensitivity analysis, Modeling, Reference fault, Coseismic deformation, Postseismic deformation, Elastic, Viscoelastic

۱ مقدمه

با قطعیت تعیین کنند. برای این منظور اخیراً استفاده از داده‌های ژئودتیک مورد توجه قرار گرفته است. امروزه داده‌های ژئودتیک روزبه‌روز زیادتر و دردسترس شده‌اند. کشور ما هم در این زمینه پیشرفت‌های زیادی کرده و این نوع داده هم‌اکنون قابل دسترسی است.

روش‌هایی که بر پایه اندازه‌گیری‌های ژئودتیک نظیر GPS، Precise Leveling و InSAR است می‌تواند کمک شایانی در پیدا کردن دقیق‌تر پارامترهای گسلش کند. علاوه بر این با استفاده از مشاهدات ژئودتیک که تا چند سال بعد از یک زمین‌لرزه بزرگ اندازه‌گیری می‌شود یعنی تابع تغییرشکل زمانی سطح زمین است و با بهره‌گیری از مدل‌سازی مستقیم (Forward Modeling) می‌توان چگونگی تغییرشکل چسبنده‌کشسان زیر لایه کشسان را مورد بررسی قرار داد و برآورد خوبی از ضخامت لایه کشسان و چسبندگی لایه چسبنده‌کشسان پایین آن (پارامترهای رئولوژیکی پوسته و گوشته بالا) به‌دست آورد.

با ایجاد سامانه GPS و به‌ویژه اندازه‌گیری‌های پیوسته GPS که اخیراً در کشورمان شروع شده و نتایج اولیه آن هم‌اکنون در دسترس است و در عین حال با توجه به اینکه در حال حاضر اطلاعات InSAR بیشتری تولید می‌شود، سرعت نمونه‌برداری در رفتارسنجی حرکت‌های اخیر

اندازه‌گیری تغییرشکل پوسته به روش‌های نوین امروزی تأثیرات مهمی در تحقیقات زمین‌ساخت زمان حاضر دارند. با وجود اینکه این اندازه‌گیری‌ها اطلاعات با ارزشی در مورد چگونگی تغییرشکل کنونی زمین در اختیار محققان قرار می‌دهند، ولی جوابی برای علت این تغییرشکل‌ها ندارند. علاوه بر این، این اندازه‌گیری‌ها نمی‌توانند رفتار زمین‌ساختی آینده زمین و یا رفتار گذشته آن را تعیین و توجیه کنند. به همین دلیل شاخه‌های متفاوت علوم زمین از مدل‌هایی برپایه ریاضیات و فیزیک استفاده می‌کنند. در تحقیقات تغییرشکل پوسته، مدل‌های گسلی که براساس اطلاعات زمین‌شناسی، ژئودتیک و لرزه‌ای تنظیم شده‌اند، دید با ارزشی از ویژگی‌های یک گسل و رفتار آن در طول زمان فراهم می‌کنند. مدل‌ها براساس مشاهدات گذشته برآوردهایی از تغییرشکل‌های آینده و مخاطرات لرزه‌ای در اختیار محققان قرار می‌دهند که برای کلان‌شهرهای مجاور مناطق لرزه‌ای فعال بسیار باارزش هستند.

تعیین پارامترهای یک زمین‌لرزه بزرگ همواره با مجموعه‌ای از عدم قطعیت‌ها روبه‌رو است. در بسیاری از موارد روش‌های زلزله‌شناسی به‌تنهایی نمی‌توانند پارامترهای گسلش مربوط به یک زمین‌لرزه، نظیر طول، عرض و شیب گسلش و مقدار حرکت متوسط گسلش را

کشسان و لایه چسبنده کشسان). سؤال مهمی که در اینجا مطرح می‌شود این است که انجام آنالیز حساسیت روی کدام یک از پارامترهای ورودی هندسی یا فیزیکی مدل توصیه می‌شود؟

با استفاده از دانش زلزله‌شناسی می‌توان مقادیر دقیقی را برای بزرگی زلزله و ممان لرزه‌ای آن تعیین کرد. همچنین موقعیت و جهت صفحه گسیختگی را می‌توان از توزیع پس‌لرزه‌ها و حل صفحه گسلش به دست آورد (اشتاین و وسشن، ۲۰۰۳). طول و عرض گسلش و متوسط جابه‌جایی روی صفحه گسل را نیز می‌توان با در نظر گرفتن بزرگی زمین‌لرزه با استفاده از روابط تجربی بین پارامترهای گسلش برآورد کرد (ولز و کوپراسمیت، ۱۹۹۴؛ نوروزی، ۱۹۸۵). با این حال، عمق لایه کشسان و اندازه و هندسه صفحه گسلش را نمی‌توان با همان دقت بزرگی، ممان لرزه‌ای یا جابه‌جایی متوسط روی صفحه گسل برآورد کرد.

اطلاعات در مورد سطح گسیختگی و تغییرشکل در نقاط خاص، روی سطح زمین را می‌توان از مشاهدات زمین‌شناسی و ژئودتیکی به دست آورد که اطلاعات بیشتری را راجع به زمین‌لرزه‌ای که باعث تغییر شکل شده و سطحی که زمین‌لرزه در آن اتفاق افتاده فراهم می‌کند. علاوه بر این، اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی پسالرزه‌ای از تغییر شکل وابسته به زمان سطح زمین اطلاعاتی در مورد چسبندگی پوسته پایین و گوشته بالا، همچنین قانون رئولوژیکی که فرایند آسودگی (relaxation) را کنترل می‌کند، به دست می‌دهد. با این حال این فرایند به‌کندی رخ می‌دهد و بازه زمانی خیلی بلندتری از زمان پوششی اندازه‌گیری‌های دقیق ژئودتیکی زمان فعلی را دربرمی‌گیرد. به همین دلیل، در آنالیز رئولوژیکی این تحقیق، رئولوژی ماکسول با مقادیر متفاوت چسبندگی در نظر گرفته شده است.

پوسته به نحو چشم‌گیری افزایش یافته است. از اطلاعات با کیفیت زیاد می‌توان برای استخراج جزئیات بیشتری از تغییرات زمانی- مکانی زمین‌ساخت، به‌ویژه تغییرشکل‌های پوسته‌ای مربوط به زمین‌لرزه و پارامترهای رئولوژیکی بهره جست. پارامترها یا متغیرهایی که این فرایندها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند زیادند و نحوه تأثیر آنها روی فرایند تغییرشکل بسیار متفاوت است، بنابراین، بررسی اثر تغییر تک‌تک پارامترهای ورودی، قبل از مدل‌سازی تغییرشکل پوسته با بهره‌گیری از اطلاعات واقعی، بسیار مهم است و از آن با عنوان آنالیز حساسیت یاد می‌شود.

هدف از اجرای آنالیز حساسیت، عملی ساختن یک بررسی کلی روی تک‌تک پارامترهای مؤثر در مدل است تا مشخص شود که حساسیت خروجی مدل نسبت به کدام پارامتر ورودی بیشتر از بقیه است و یا به عبارت بهتر، تغییرات کدام پارامتر در مدل، خروجی مدل یعنی جابه‌جایی‌ها را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر مدل نسبت به یک پارامتر حساس‌تر باشد یعنی با تغییرات آن، جابه‌جایی‌ها بیشتر دچار تغییر شوند، در منطقه‌ای که مشاهدات GPS در دسترس باشد، اگر مقدار آن پارامتر معلوم نباشد می‌توان از طریق تغییر در مقدار آن پارامتر و معرفی مقادیر متفاوت آن به مدل و مقایسه خروجی با نتایج حاصل از مشاهدات GPS، به مقدار بهینه آن پارامتر پی‌برد و آن را برای گسل یا منطقه در نظر گرفت (نوری و همکاران، ۱۳۸۸).

در این تحقیق برای اجرای آنالیز حساسیت، از مدل چسبنده کشسان وانگ و همکاران (۲۰۰۶) استفاده شده است. پارامترهای ورودی هندسی و فیزیکی این مدل عبارت‌اند از: پارامترهای هندسی (میزان لغزش گسل، زاویه شیب گسل، طول گسل، عرض گسل، عمق قفل‌شدگی گسل، عمق لایه کشسان) و پارامترهای فیزیکی (ضراب لایه کشسان و لایه چسبنده کشسان، ضریب چسبندگی لایه چسبنده کشسان، چگالی لایه

برای مثال می‌توان از پارامترهایی چون ممان لرزه‌ای، جابه‌جایی متوسط روی صفحه گسل و ویژه‌گی‌های فیزیکی نیم‌فضای لایه‌ای کشسان نام برد. در محاسبات این تحقیق جابه‌جایی روی صفحه گسل در کل سطح گسیختگی ثابت در نظر گرفته می‌شود و نیازی به پیچیده کردن بیشتر مدل نیست. تغییر شکل‌ها در محیطی با یک لایه کشسان روی یک نیم‌فضای چسبنده کشسان مدل‌سازی می‌شوند که ساده‌سازی معقولی از ویژگی‌های پوسته و گوشته بالای زمین است. از چنین محیطی در کارهای انتشار یافته قبلی به کرات استفاده شده است (کوهن، ۱۹۸۰a, b؛ راندل، ۱۹۸۲؛ فرناندز و همکاران، ۱۹۹۶؛ یو و همکاران، ۱۹۹۶).

از جمله مقادیری که عموماً با دقت تعیین نمی‌شوند می‌توان به ضخامت لایه کشسان، چسبندگی نیم‌فضای پایین و زاویه شیب صفحه گسل اشاره کرد که اجرای آنالیز حساسیت برای تعیین آنها از روش‌های ژئودتیکی ضروری است. باین‌حال در این تحقیق همه پارامترها به صورت متغیر در نظر گرفته شده و اثر تغییرات کوچک آنها روی تغییر شکل منتج از مدل‌سازی مورد آنالیز قرار گرفته است. برای این منظور یک مدل مرجع با مقادیر متوسط ایجاد شده و با تغییر تک‌تک پارامترها اثر آنها در تغییر شکل‌ها با هم مقایسه شده است. تغییر شکل ایجاد شده از مدل مرجع، نقش اطلاعات ژئودتیکی ساختگی را بازی می‌کند که با مجموعه گوناگونی از پارامترها مدل‌سازی می‌شود. پارامترهای انتخابی برای مدل مرجع، شبیه‌سازی مقادیر مربوط به دو گسلش شیب‌لغز و امتداد لغز است.

۱-۲ مدل‌سازی گرانروی کشسان

مدل‌های گرانروی کشسان زمین‌لرزه‌ها به قوانین رفتاری ساده‌ای که ترکیب المان‌های کشسان (فنر) و گرانرو (میراگر) است محدود می‌شود. ترکیب سری فنر و میراگر تحت عنوان جسم ماکسول شناخته می‌شود. جهت آنالیز

در زمینه فعالیت‌های قبلی می‌توان به کار انجام شده توسط یومینگ و همکاران (۲۰۰۸) اشاره نمود که آنالیز حساسیت مدل تغییرات تنش کولمب را نسبت به دو پارامتر ضریب اصطکاک مؤثر و دامنه و جهت تنش منطقه‌ای انجام می‌دهد. همچنین می‌توان به کار انجام شده توسط چونگون و همکاران (۲۰۱۱) اشاره نمود که آنالیز حساسیت مدل تغییرات تنش کولمب را نسبت به کلیه پارامترهای هندسی گسل مرجع و گسل‌های گیرنده انجام می‌دهد. از دیگر کارهای انجام شده می‌توان به مقاله نوری و همکاران (۱۳۸۸) اشاره نمود که آنالیز حساسیت مدل جابه‌جایی‌های هم‌لرزه را نسبت به کلیه پارامترهای ورودی هندسی و فیزیکی آن انجام می‌دهد. روش به کار گرفته شده در این تحقیق برای انجام آنالیز حساسیت با هر سه مقاله فوق سازگار است و فقط مدل به کار گرفته شده که مربوط به جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای (وانگ و همکاران، ۲۰۰۶) است با آنها تفاوت دارد.

۲ مدل‌سازی و آنالیز حساسیت

در مدل‌سازی بایستی دو نکته مهم مدنظر قرار گیرد. اول اینکه نتایج حاصل از مدل‌سازی یعنی جابه‌جایی‌ها بایستی در محدوده‌ای باشند که قابل اندازه‌گیری باشد. اگر نتایج حاصل از مدل‌سازی به قدری کوچک باشند که از دقت اندازه‌گیری‌ها کمتر شوند تفسیر نتایج حاصل از مدل، قابل استفاده نخواهد بود. دوم اینکه بایستی پایداری و منحصربه‌فرد بودن جواب به دست آمده برای هر پارامتر از اطلاعات اندازه‌گیری مورد آزمون قرار گیرد. بایستی نشان داد که می‌توان مدلی را به منزله بهترین برآورد به دست آورد و بنابراین به محتمل‌ترین مقادیر برای مجموعه پارامترها رسید. همچنین بایستی دانست که کدام پارامتر و به چه میزان در مدل‌سازی تأثیرگذار است.

بهتر است پارامترهایی که معمولاً با دقت تعیین می‌شوند در آنالیز حساسیت ثابت در نظر گرفته شوند.

نمی‌شود، بنابراین تبدیل لاپلاس یک مسئله گرانروی کشسان معادل یک مسئله کشسان است که تحت عنوان اصل تناظر شناخته می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۰۶). بنابراین اگر جواب مسئله کشسان معلوم باشد با انجام تبدیل لاپلاس معکوس می‌توان به جواب مسئله گرانروی کشسان متناظر رسید. اصل تناظر به فرم تسوری عمومی معادلات رفتاری گرانروی کشسان اعمال می‌شود.

۳ مدل مرجع

منظور از مدل مرجع، لایه کشسان روی نیم‌فضای چسبنده کشسان و گسل با مقادیر متوسط پارامترهای ورودی هندسی و فیزیکی به همراه خروجی‌های حاصل از مدل وانگ و همکاران (۲۰۰۶) یعنی جابه‌جایی‌های سطحی پسالرزه‌ای در زمان‌های مختلف می‌باشد.

مطابق شکل ۱ برای ضخامت لایه کشسان، مقدار مرجع ۴۱ کیلومتر مورد استفاده قرار گرفت. زاویه شیب صفحه گسل ۲۰ درجه و عمق قفل‌شدگی بالای صفحه گسیختگی ۶ کیلومتر انتخاب شد. همچنین مطابق جدول ۱ صفحه گسیختگی به صورت شیب‌لغز و امتداد لغز با میزان لغزش ۵ متر و مساحت ۸۰×۴۰ کیلومتر مربع در نظر گرفته شد. مقادیر هندسی مشابهی در تحقیقات صورت گرفته قبلی در نظر گرفته شده (تاچر و همکاران، ۱۹۸۰؛ راندل، ۱۹۸۲؛ تاچر و راندل، ۱۹۸۴؛ فرناندز و همکاران، ۱۹۹۶) که به نتایج یکسانی برای آنالیز حساسیت منجر شده است.

در انتخاب مقادیر هندسی گسلش با توجه به اینکه انتخاب این مقادیر تأثیری در نتایج آنالیز حساسیت ندارد سعی شد انتخاب به گونه‌ای صورت گیرد که نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها به بهترین نحو به صورت گرافیکی قابل نمایش باشد، لذا در انتخاب مقدار، به‌ویژه برای زاویه شیب گسلش واقعیات طبیعی و نظری در نظر گرفته نشده و مقادیر انتخابی به منظور ایجاد تصویر سطحی خوب از

رفتار مواد مختلف از جمله جسم ماکسول بایستی نخست معادلات رفتاری آنها را فرموله کرد. برای جسم ماکسول نرخ کرنش کل جمع نرخ کرنش مربوط به فنر و میراگر است. تعادل نیروها ایجاب می‌کند که تنش در المان‌ها یکسان باشد؛ بنابراین خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{total} &= \dot{\varepsilon}_{spring} + \dot{\varepsilon}_{dashpot} \\ &= \frac{\dot{\sigma}}{2\mu} + \frac{\sigma}{2\eta} \end{aligned} \quad (1)$$

که نقطه بالا نشان‌دهنده مشتق زمانی است. مقایسه مسئله گرانروی کشسان با مسئله کشسان نشان می‌دهد که معادلات تعادل یکی بوده ولی معادلات رفتاری متفاوت است. معادله رفتاری جسم ماکسول را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon = \frac{1}{2} \left(\mu^{-1} \frac{\partial}{\partial t} + \eta^{-1} \right) \sigma \quad (2)$$

رابطه بالا تحت عملگر دیفرانسیل خطی باز یک رابطه خطی مابین تنش و کرنش است. در واقع، هر معادله رفتاری گرانروی کشسان خطی را می‌توان به شکل فوق نوشت. تبدیل لاپلاس به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L\{f(t)\} \equiv \bar{f}(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (3)$$

اگر تابع تحت تبدیل لاپلاس در $t=0$ صفر شود، تبدیل لاپلاس مشتق تابع به صورت زیر درمی‌آید:

$$L\{\partial f(t)/\partial t\} \equiv s\bar{f}(s) \quad (4)$$

با فرض این که تنش و کرنش در $t=0$ صفر شود، رابطه (۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\bar{\sigma} = 2\mu\bar{\varepsilon} \quad (5)$$

که در آن

$$\bar{\mu}(s) = \frac{s}{\mu^{-1}s + \eta^{-1}} \quad (6)$$

همان‌طور که دیده می‌شود معادله رفتاری یک محیط گرانروی کشسان در حوزه تبدیل لاپلاس مطابق قانون هوک است. چون زمان وارد معادلات تعادل یا سازگاری

مدل‌های بعدی با تغییر پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل‌سازی شد و سپس تغییر شکل در این مدل‌ها با تغییر شکل مدل مرجع مورد مقایسه قرار گرفت. شکل‌های ۲ و ۴ به ترتیب میدان جابه‌جایی هم‌لرزه گسل مرجع شیب‌لغز و امتداد لغز را نشان می‌دهد. شکل‌های ۳ و ۵ نیز به ترتیب میدان جابه‌جایی پسالرزه‌ای گسل مرجع شیب‌لغز و امتداد لغز را در سال سوم با بزرگ‌نمایی ۵ نشان می‌دهد. در شکل‌های ۲ تا ۵ تصویر عمق قفل‌شدگی پایین گسل با رنگ سبز، تصویر عمق قفل‌شدگی بالای گسل با رنگ سرخ و تصویر محل تقاطع امتداد صفحه گسیختگی گسل با سطح زمین با رنگ آبی مشخص شده است. با توجه به شکل‌های ۲ تا ۵ می‌توان دید که دامنه حرکات هم‌لرزه بزرگ‌تر از حرکات پسالرزه‌ای است و علاوه بر این روی تصویر سطحی گسل این دو حرکت در خلاف جهت هم هستند. علاوه بر این دامنه حرکات پسالرزه‌ای به مرور زمان کاهش می‌یابد.

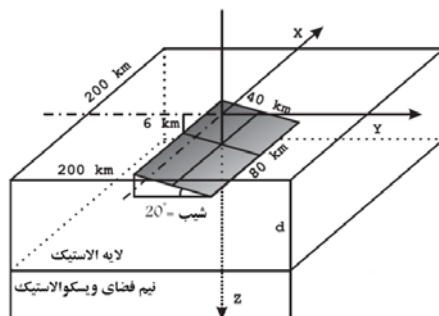
مناطق گوناگون گسلش روی سطح زمین و در نتیجه نمایش گرافیکی خوب از نتایج آنالیز حساسیت است (شکل‌های ۲ تا ۵ و ۶ تا ۱۶).

علاوه بر هندسه و موقعیت گسلش مرجع، محیط فیزیکی لایه کشسان بالایی بایستی با مقادیر دیگری توصیف شود. برای این پارامترها مقادیر متوسط مطابق جدول ۲ انتخاب شد. نیم‌فضای همگن زیر این لایه دارای ویژگی‌های رئولوژیکی ماکسول است. برای پارامترهای فیزیکی این نیم‌فضا نیز مقادیر متوسط مطابق جدول ۳ انتخاب شد. دلیل به‌کارگیری مقادیر متوسط برای پارامترهای فیزیکی، اطلاعات ضعیف موجود در مورد رئولوژی زمین واقعی است. درخصوص تغییرات پارامترهای هندسی و فیزیکی محدوده خطایی فرضی در برآورد آنها مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شد.

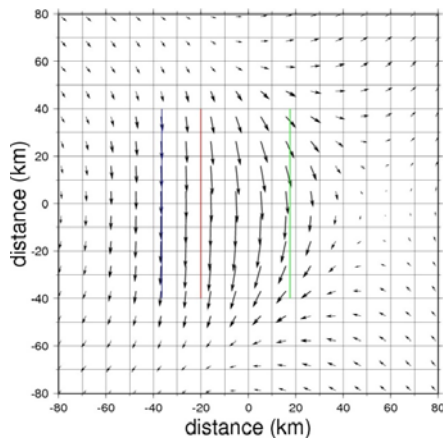
بدین ترتیب مقادیر فهرست شده در جدول‌های ۲ و ۳ به‌منظور ایجاد مدل مرجع مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱. مشخصات هندسی گسل‌های مرجع.

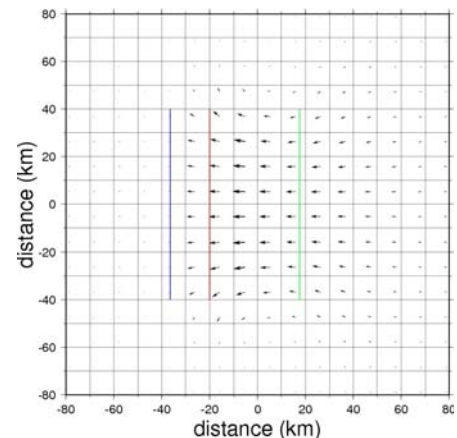
گسل	طول (km)	عرض (km)	عمق قفل‌شدگی (km)	شیب (deg.)	زاویه ریک (deg.)	لغزش (m)	
						شیب	امتداد
گسل مرجع	۸۰	۴۰	۶/۰	۲۰/۰	۰/۰	۵/۰	۵/۰
گسل مرجع	۸۰	۴۰	۶/۰	۲۰/۰	۹۰/۰	۵/۰	۵/۰



شکل ۱. نمایش هندسه گسل و محیط مرجع مورد استفاده در مدل‌سازی آنالیز حساسیت. نیم‌فضای مورد استفاده از یک لایه کشسان با ضخامت ۴۱ km و یک نیم‌فضای چسبنده کشسان تشکیل شده است. مبدأ دستگاه مختصات بالای مرکز صفحه گسل و محور X آن موازی با امتداد صفحه گسل است. حد بالایی صفحه گسل مرجع در عمق ۶ کیلومتر از سطح زمین قرار دارد. صفحه گسل ۸۰ کیلومتر طول و ۴۰ کیلومتر عرض دارد و دارای زاویه شیب ۲۰ درجه نسبت به سطح افق است.



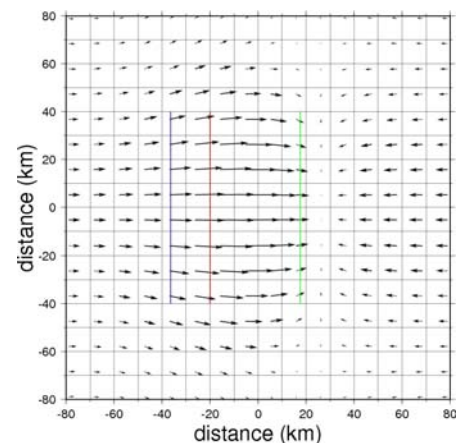
شکل ۵. میدان جابه‌جایی پسالرزه‌ای گسل مرجع امتدادلغز در سال سوم، بردارها نشان‌دهنده جابه‌جایی برحسب سانتی‌متر هستند که پنج برابر بزرگ‌نمایی شده‌اند.



شکل ۶. میدان جابه‌جایی همالرزهای گسل مرجع شیب‌لغز، بردارها نشان‌دهنده جابه‌جایی برحسب متر هستند.

۳-۱ پارامترهای ورودی

برای اجرای آنالیز حساسیت همه پارامترها غیر از پارامتر مورد آنالیز، ثابت در نظر گرفته شد و مقادیر پارامتر مورد آنالیز با توجه به مشخصات گسل مرجع تغییر داده شد و نیم‌رخ جابه‌جایی‌های حاصل از مدل‌سازی روی محور y رسم شد. جدول شماره ۴ مقادیر پارامترهای مرجع و متغیر را نشان می‌دهد.

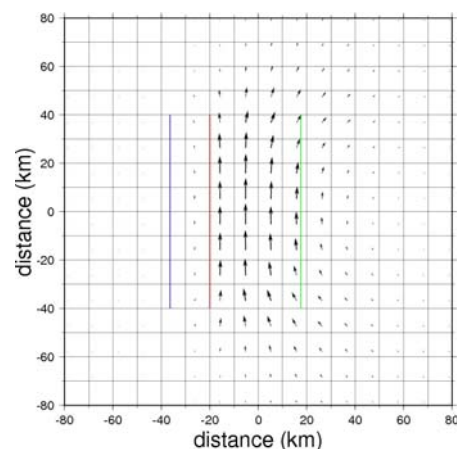


شکل ۷. میدان جابه‌جایی پسالرزه‌ای گسل مرجع شیب‌لغز در سال سوم، بردارها نشان‌دهنده جابه‌جایی برحسب سانتی‌متر هستند که پنج برابر بزرگ‌نمایی شده‌اند.

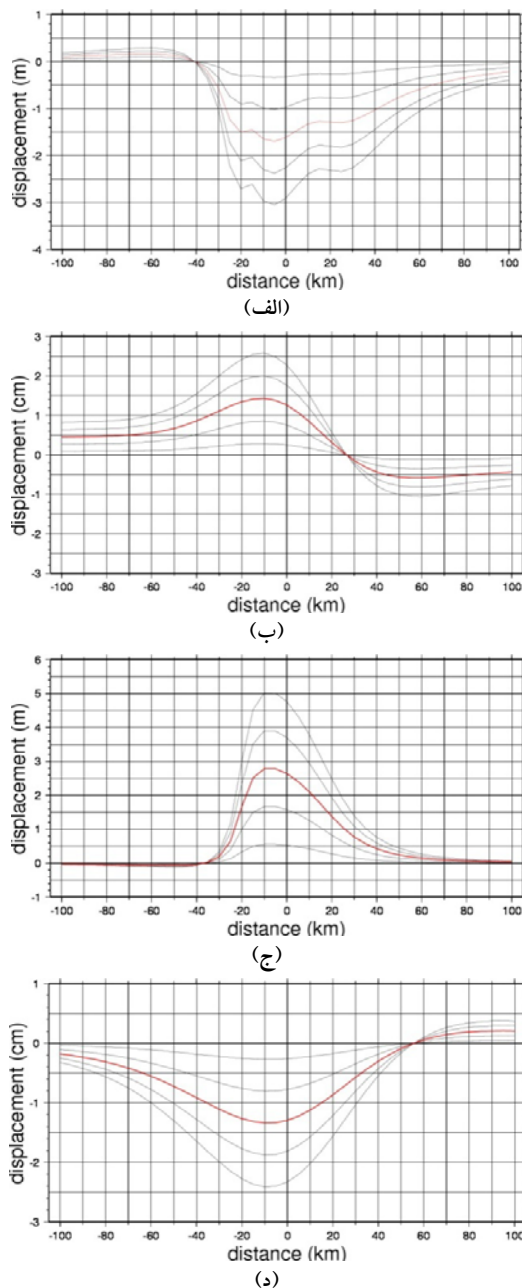
۳-۲ اثر تک‌تک پارامترهای ورودی در تغییر شکل‌های

همالرزهای و پسالرزه‌ای

برای اجرای آنالیز حساسیت در هر مرحله آنالیز، همه پارامترها به غیر از یکی ثابت در نظر گرفته شد و نتایج مدل‌سازی روی نیم‌رخ عمود بر محور گسل و گذرنده از مرکز آن (محور y ها در شکل ۱) رسم شد. در ادامه به بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها پرداخته می‌شود. شکل‌های ۶ تا ۱۵ نشان‌دهنده جابه‌جایی‌های افقی همالرزهای و پسالرزه‌ای U_y مربوط به دو گسل مرجع شیب‌لغز و امتدادلغز برای نقاط واقع روی نیم‌رخ عمود بر امتداد گسل است. در همه شکل‌ها، جابه‌جایی‌های افقی مربوط به گسل مرجع با رنگ سرخ و جابه‌جایی‌های افقی



شکل ۸. میدان جابه‌جایی همالرزهای گسل مرجع امتدادلغز، بردارها نشان‌دهنده جابه‌جایی برحسب متر هستند.



شکل ۶. آنالیز حساسیت میدان جابه‌جایی مسطحاتی مدل به تغییرات پارامتر لغزش گسل. هم در آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه و هم پس‌لرزه در هر دو حالت گسلش امتدادلغز و شیب‌لغز وابستگی زیادی به میزان لغزش گسل به‌ویژه در بالای صفحه گسیختگی گسل مشاهده می‌شود، (الف) پروفیل جابه‌جایی‌های هم‌لرزه در حالت شیب لغز، (ب) پروفیل جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای در حالت شیب‌لغز در سال سوم، (ج) پروفیل جابه‌جایی‌های هم‌لرزه در حالت امتدادلغز و (د) پروفیل جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای در حالت امتدادلغز در سال سوم.

مربوط به بقیه گسل‌ها با رنگ مشکی مشخص شده است. دو نیم‌رخ الف و ب مربوط به گسل شیب‌لغز و دو نیم‌رخ ج و د مربوط به گسل امتدادلغز هستند. همچنین نیم‌رخ‌های (الف) و (ج) نشان‌دهنده جابه‌جایی‌های مسطحاتی هم‌لرزه‌ای U_y برای نقاط واقع روی نیم‌رخ عمود بر امتداد گسل و نیم‌رخ‌های ب و د نشان‌دهنده جابه‌جایی‌های مسطحاتی پس‌لرزه‌ای U_y در پایان سال سوم پس از وقوع زمین‌لرزه برای نقاط واقع بر امتداد گسل هستند. محور افقی (فاصله) در همه نیم‌رخ‌ها برحسب کیلومتر، محور قائم (جابه‌جایی) در جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای برحسب متر و در جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای برحسب سانتی‌متر است.

میزان حساسیت مدل به یک پارامتر خاص در ناحیه‌ای از نیم‌رخ را می‌توان از تغییرات فاصله بین نیم‌رخ‌های جابه‌جایی در آن ناحیه تشخیص داد. در همه نیم‌رخ‌های به‌دست آمده دامنه جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای حاصل از مدل از جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای بزرگ‌تر است.

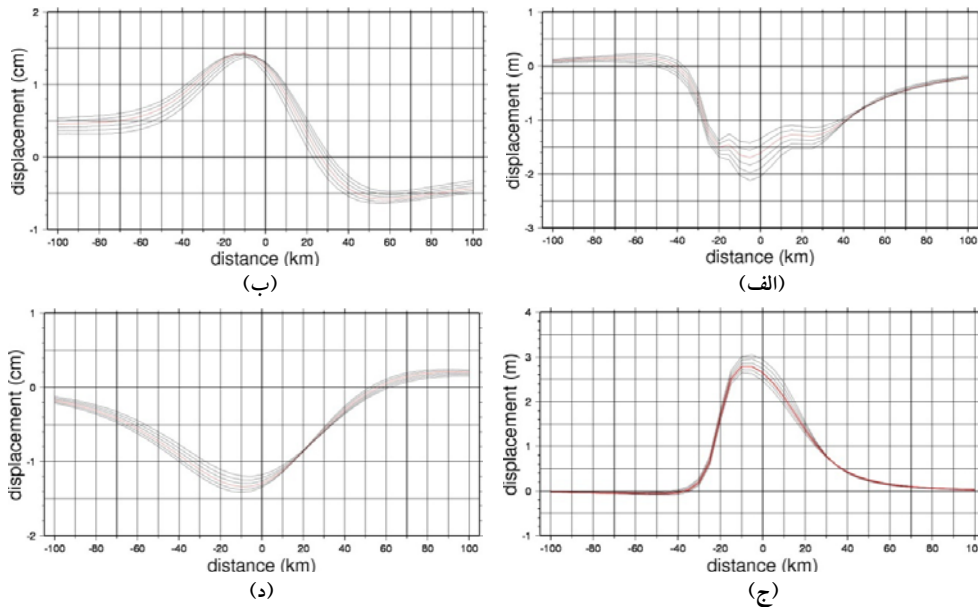
مطابق شکل‌های ۶-الف تا ۶-د هم در آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای و هم پس‌لرزه‌ای وابستگی زیادی به میزان لغزش گسل به‌ویژه در بالای صفحه گسیختگی گسل مشاهده می‌شود.

مطابق شکل‌های ۷-الف تا ۷-د در آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای وابستگی زیادی به زاویه شیب گسل به‌ویژه در بالای صفحه گسیختگی گسل مشاهده می‌شود ولی آنالیز جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای حساسیت چندانی به زاویه شیب گسل نشان نمی‌دهد لذا تعیین زاویه شیب گسل از طریق مدل و با استفاده از جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای توصیه می‌شود.

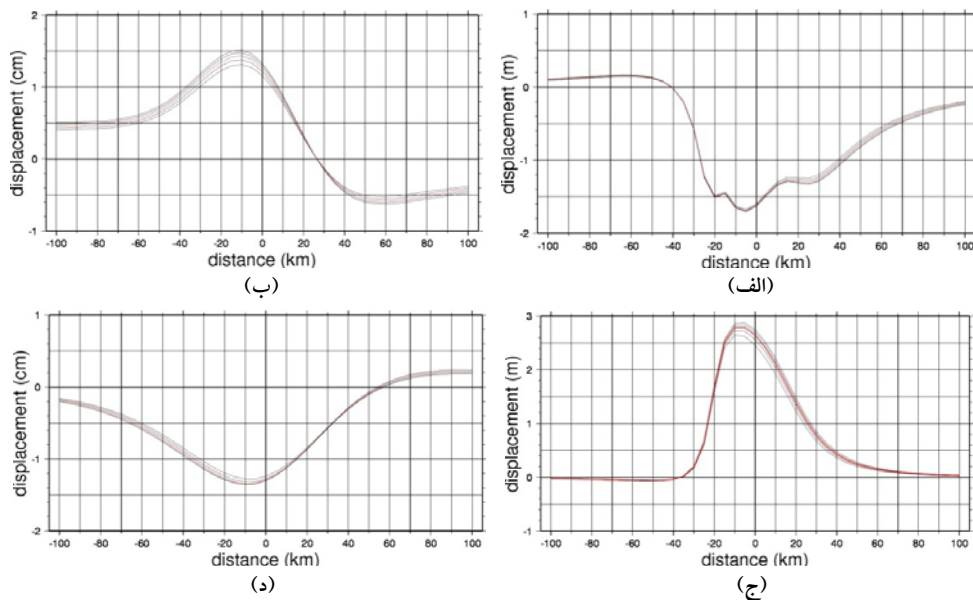
مطابق شکل‌های ۸-الف تا ۸-د آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای مدل حساسیت چندانی نسبت به تغییر در طول گسل نشان نمی‌دهد و لذا تعیین طول گسل با استفاده از عملیات زمین‌شناسی بهتر است.

گسیختگی گسل مشاهده می‌شود و می‌توان از طریق مدل‌سازی، داده‌های هم‌لرزه یا پس‌لرزه‌ای آن را تعیین کرد.

مطابق شکل‌های ۹-الف تا ۹-د هم در آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای و هم پس‌لرزه‌ای، وابستگی زیادی به پارامتر عرض گسل به‌ویژه در بالای صفحه

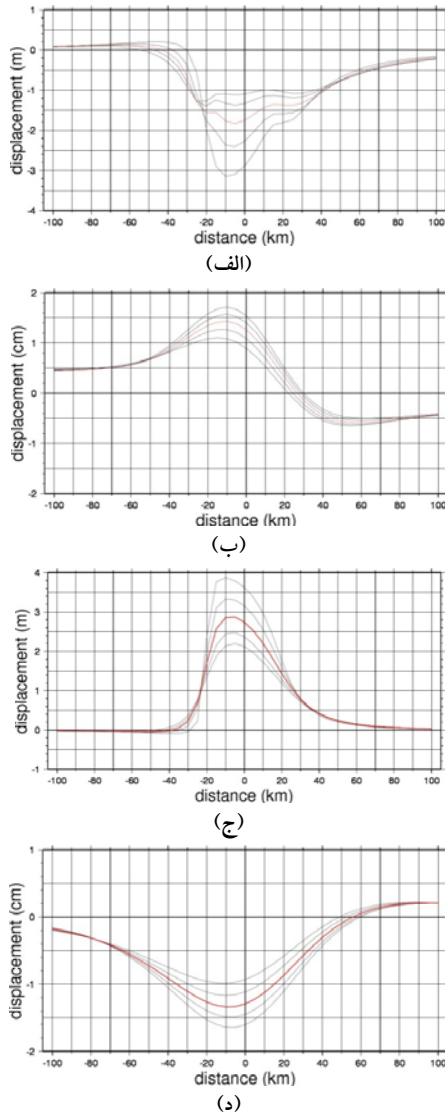


شکل ۷. آنالیز حساسیت میدان جابه‌جایی مسطحاتی مدل به تغییرات پارامتر زاویه شیب گسل، (الف) و (ج) در آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه در هر دو حالت شیب‌لغز (الف) و امتدادلغز (ج) وابستگی زیادی به زاویه شیب گسلش در بالای صفحه گسیختگی گسل مشاهده می‌شود، آنالیز جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای در حالت شیب‌لغز (ب) یا امتدادلغز و (د) حساسیت چندانی به زاویه شیب گسلش نشان نمی‌دهد.

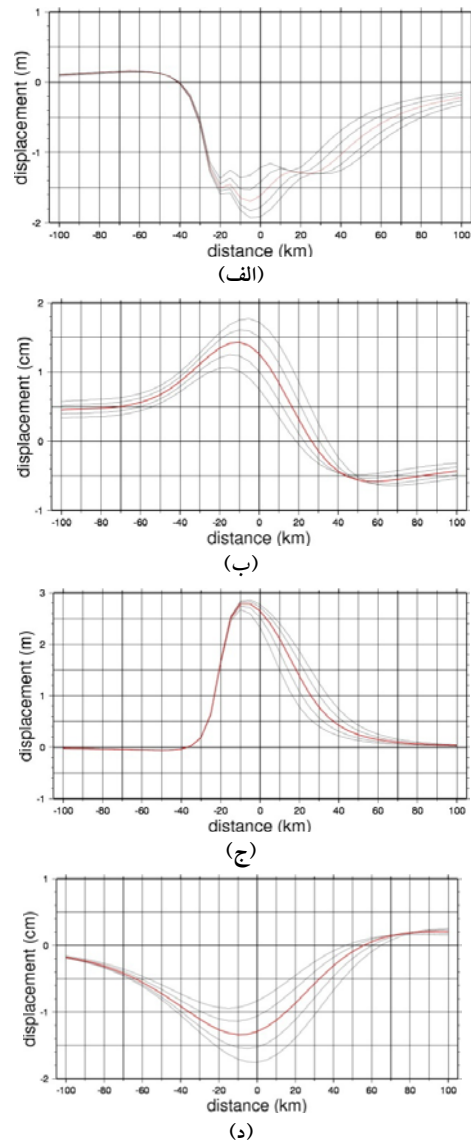


شکل ۸. آنالیز حساسیت میدان جابه‌جایی مسطحاتی مدل به تغییرات پارامتر طول گسل. آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه و پس‌لرزه مدل حساسیت چندانی نسبت به تغییر در طول گسل نشان نمی‌دهد، (الف) پروفیل جابه‌جایی‌های هم‌لرزه در حالت شیب‌لغز، (ب) پروفیل جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای در حالت شیب‌لغز در سال سوم، (ج) پروفیل جابه‌جایی‌های هم‌لرزه در حالت امتدادلغز و (د) پروفیل جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای در حالت امتدادلغز در سال سوم.

صفحه گسیختگی گسل مشاهده می‌شود که میزان این وابستگی، به‌ویژه در مورد جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای بسیار زیاد است.



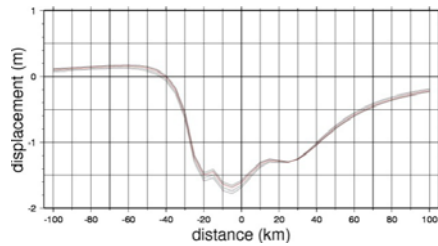
شکل ۱۰. آنالیز حساسیت میدان جابه‌جایی مسطحانی مدل به تغییرات پارامتر عمق قفل‌شدگی گسل. در آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه و پس‌لرزه وابستگی زیادی به پارامتر عمق قفل‌شدگی به‌ویژه در بالای صفحه گسیختگی گسل مشاهده می‌شود که میزان این وابستگی در مورد جابه‌جایی‌های هم‌لرزه بیشتر نیز می‌باشد، (الف) پروفیل جابه‌جایی‌های هم‌لرزه در حالت شیب‌لغز، (ب) پروفیل جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای در حالت شیب‌لغز در سال سوم، (ج) پروفیل جابه‌جایی‌های هم‌لرزه در حالت امتدادلغز و (د) پروفیل جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای در حالت امتدادلغز در سال سوم.



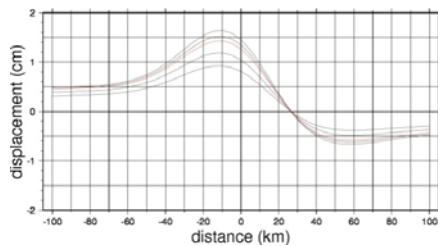
شکل ۹. آنالیز حساسیت میدان جابه‌جایی مسطحانی مدل به تغییرات پارامتر عرض گسل. هم در آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه و هم پس‌لرزه در هر دو حالت گسلش شیب‌لغز و امتدادلغز وابستگی زیادی به پارامتر عرض گسل به‌ویژه در بالای صفحه گسیختگی مشاهده می‌شود، (الف) پروفیل جابه‌جایی‌های هم‌لرزه در حالت شیب‌لغز، (ب) پروفیل جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای در حالت شیب‌لغز در سال سوم، (ج) پروفیل جابه‌جایی‌های هم‌لرزه در حالت امتدادلغز و (د) پروفیل جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای در حالت امتدادلغز در سال سوم.

مطابق شکل‌های ۱۰-الف تا ۱۰-د هم در آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای و هم پس‌لرزه‌ای وابستگی زیادی به پارامتر عمق قفل‌شدگی گسل به‌ویژه در بالای

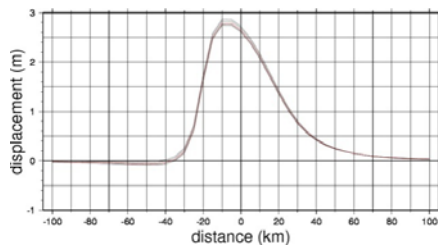
عمق لایه کشسان از طریق مدل و با استفاده از جابه‌جایی‌های پسالرزه‌ای توصیه می‌شود. مطابق شکل‌های ۱۲-الف تا ۱۲-د آنالیز جابه‌جایی‌های همالرزهای و پسالرزه‌ای حساسیت اندکی به ضرایب لامه لایه کشسان در بالای صفحه گسیختگی گسل نشان می‌دهند.



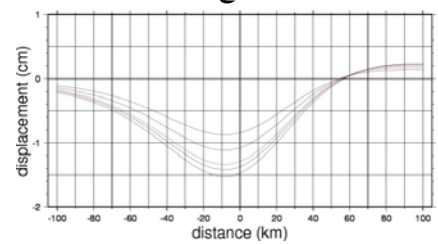
(الف)



(ب)

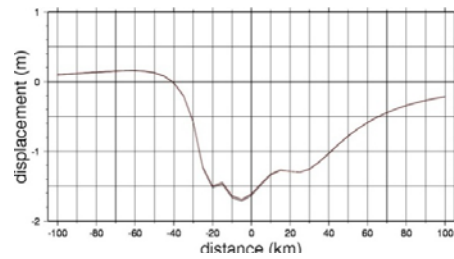


(ج)

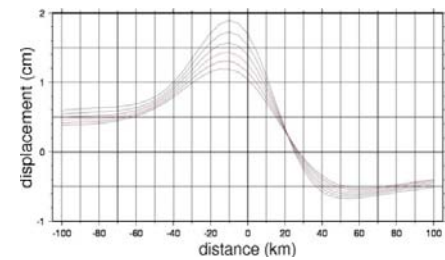


(د)

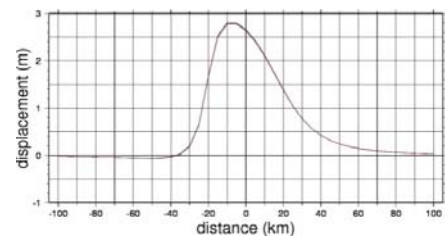
شکل ۱۲. آنالیز حساسیت میدان جابه‌جایی مسطحاتی مدل به تغییرات پارامتر ضرایب لامه لایه کشسان، آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه در حالت شیب‌لغز (الف) و امتدادلغز (ج) حساسیت خیلی کمی به ضرایب لامه لایه کشسان در بالای صفحه گسیختگی گسل نشان می‌دهد. میزان حساسیت در آنالیز جابه‌جایی‌های پسالرزه‌ای هم در حالت شیب‌لغز (ب) و هم در حالت امتدادلغز (د) در بالای صفحه گسیختگی گسل افزایش می‌یابد.



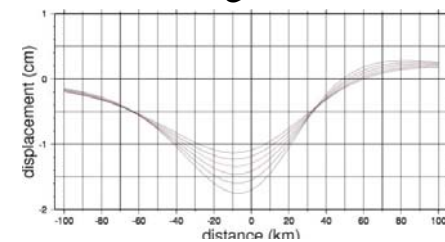
(الف)



(ب)



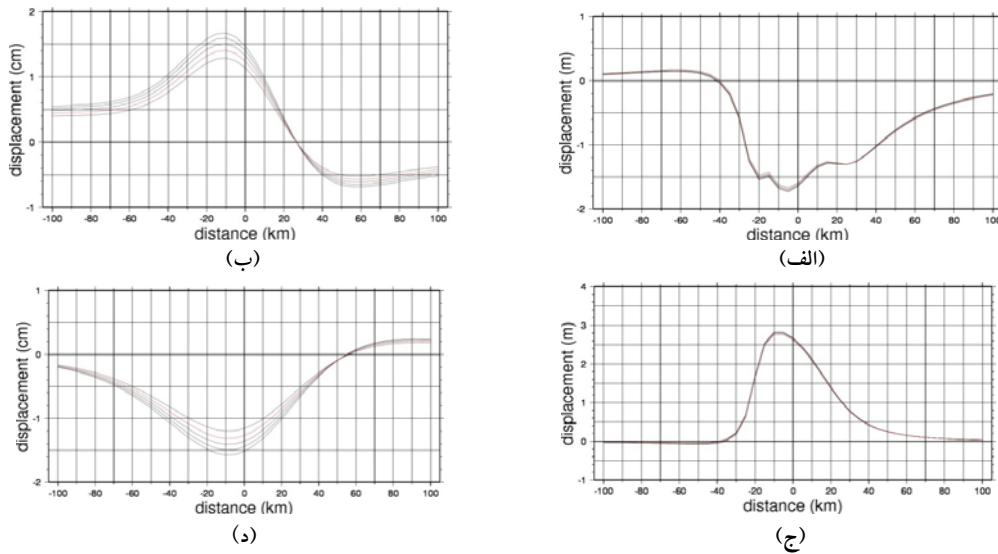
(ج)



(د)

شکل ۱۱. آنالیز حساسیت میدان جابه‌جایی مسطحاتی مدل به تغییرات پارامتر عمق لایه کشسان، آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه در حالت شیب‌لغز (الف) یا امتدادلغز (ج) حساسیت قابل توجهی به پارامتر عمق لایه کشسان نشان نمی‌دهد، در آنالیز جابه‌جایی‌های پسالرزه‌ای در هر دو حالت شیب‌لغز (ب) و امتدادلغز (د) وابستگی زیادی به پارامتر عمق لایه کشسان به‌ویژه در بالای صفحه گسیختگی گسل مشاهده می‌شود.

مطابق شکل‌های ۱۱-الف تا ۱۱-د آنالیز جابه‌جایی‌های همالرزهای حساسیت چندانی به پارامتر عمق لایه کشسان نشان نمی‌دهد ولی در آنالیز جابه‌جایی‌های پسالرزه‌ای وابستگی زیادی به پارامتر عمق لایه کشسان، به‌ویژه در بالای صفحه گسیختگی گسل مشاهده می‌شود. لذا تعیین

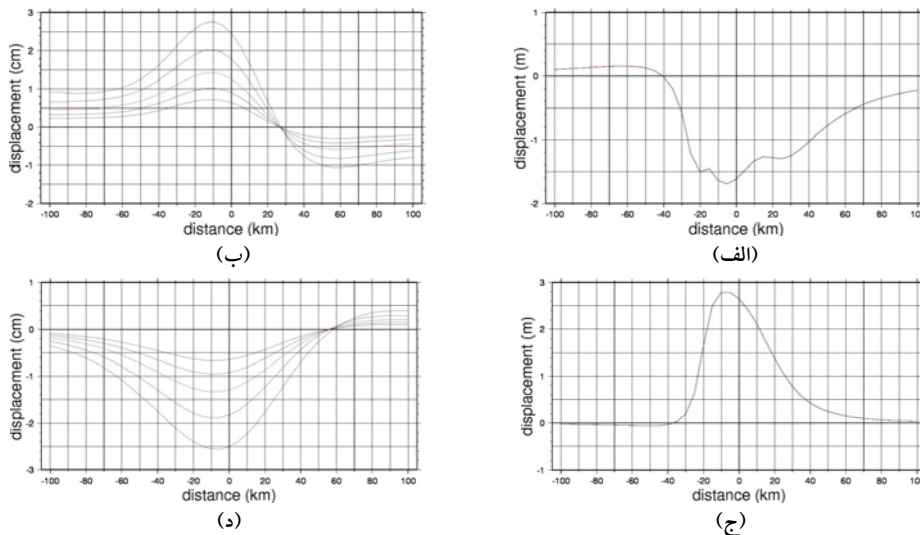


شکل ۱۳. آنالیز حساسیت میدان جابه‌جایی مسطحاتی مدل به تغییرات پارامتر ضرایب لامه نیم‌فضای چسبنده کشسان. (الف) و (ج) آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه حساسیت خیلی کمی به ضرایب لامه نیم‌فضای چسبنده کشسان در بالای صفحه گسیختگی گسل نشان می‌دهد. (ب) و (د) میزان حساسیت در آنالیز جابه‌جایی‌های پسالرزه‌ای در بالای صفحه گسیختگی افزایش می‌یابد.

چسبنده کشسان نشان نمی‌دهد ولی آنالیز جابه‌جایی‌های پسالرزه‌ای حساسیت زیادی به ضریب چسبندگی لایه چسبنده کشسان به‌ویژه در بالای صفحه گسیختگی گسل نشان می‌دهد. پس تعیین ضریب چسبندگی لایه چسبنده کشسان با استفاده از نتایج مدل‌سازی در بالای صفحه گسل امکان‌پذیر است.

مطابق شکل‌های ۱۳-الف تا ۱۳-د میزان این حساسیت برای ضرایب لامه لایه چسبنده کشسان کاهش نیز می‌یابد، لذا تعیین ضرایب لامه با استفاده از مدل توصیه نمی‌شود.

مطابق شکل‌های ۱۴-الف تا ۱۴-د آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای هیچ حساسیتی به ضریب چسبندگی لایه



شکل ۱۴. آنالیز حساسیت میدان جابه‌جایی مسطحاتی مدل به تغییرات پارامتر ضریب چسبندگی نیم‌فضای چسبنده کشسان. آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه چه در حالت شیب‌لغز (الف) و چه در حالت امتدادلغز (ج) هیچ حساسیتی به ضریب چسبندگی نیم‌فضای چسبنده کشسان نشان نمی‌دهد، آنالیز جابه‌جایی‌های پسالرزه هم در حالت شیب‌لغز (ب) و هم در حالت امتدادلغز (د) حساسیت زیادی به ضریب چسبندگی نیم‌فضای چسبنده کشسان به‌ویژه در بالای صفحه گسیختگی گسل نشان می‌دهد.

هندسی گسل و پارامترهای فیزیکی لایه کشسان و نیم‌فضای چسبنده کشسان به ترتیب در حالت هم‌لرزه و پس‌لرزه نشان می‌دهند، در این جداول میزان حساسیت از بالا به پایین کاهش می‌یابد. مطابق جدول ۵ در آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه مدل حساسیتی به عمق لایه کشسان، چگالی لایه کشسان، دانسیته نیم‌فضای چسبنده کشسان و ضریب چسبندگی نیم‌فضای چسبنده کشسان نشان نمی‌دهد.

مطابق شکل‌های ۱۵-الف تا ۱۵-د و ۱۶-الف تا ۱۶-د آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای حساسیتی به چگالی لایه کشسان یا چسبنده کشسان نشان نمی‌دهد و در مقابل آنالیز جابه‌جایی‌های پس‌لرزه‌ای حساسیت اندکی به چگالی لایه کشسان یا چسبنده کشسان نشان می‌دهد. در نتیجه، تعیین چگالی لایه کشسان یا چسبنده کشسان با استفاده از مدل‌سازی توصیه نمی‌شود.

جداول ۵ و ۶ حساسیت مدل را به تغییر در پارامترهای

جدول ۲. مشخصات فیزیکی لایه کشسان.

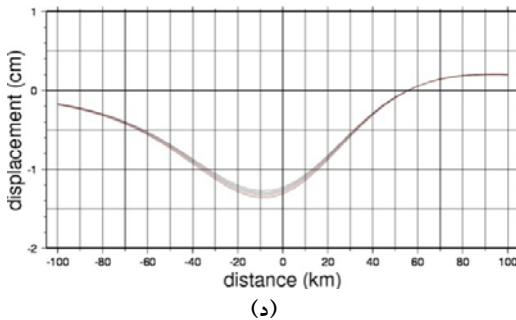
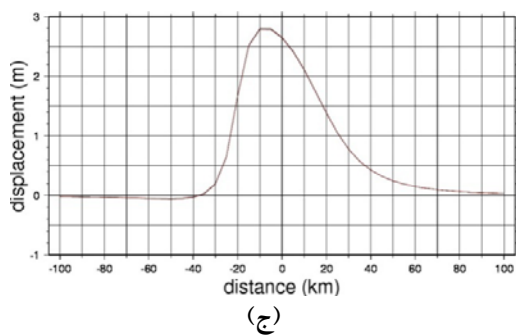
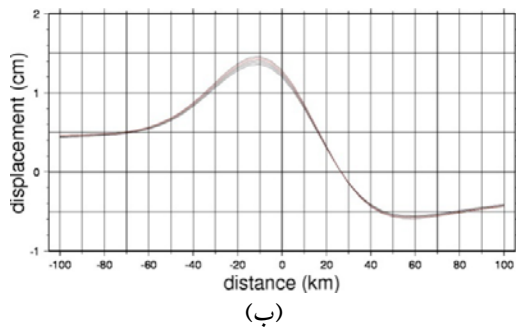
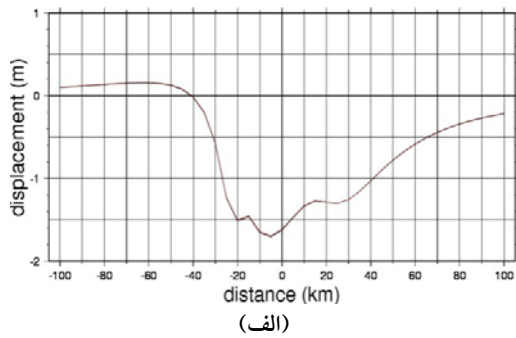
عمق (m)	سرعت موج P (km/s)	سرعت موج S (km/s)	چگالی (kg/m ³)	چسبندگی (Pa.s)
۴۱	۶/۷	۳/۸۷	۲۹۰۰	۰/۰

جدول ۳. مشخصات فیزیکی نیم‌فضای چسبنده کشسان.

عمق (m)	سرعت موج P (km/s)	سرعت موج S (km/s)	چگالی (kg/m ³)	چسبندگی (Pa.s)
بی‌نهایت	۸/۰	۴/۶۲	۳۴۰۰	۱/۰×۱۰ ^{۱۹}

جدول ۴. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در آنالیز حساسیت.

لغزش (m)	شیب (deg.)	طول (km)	عرض (km)	عمق قفل شدگی (km)	عمق لایه کشسان (km)	ضرایب لامه لایه کشسان (GPa)	ضرایب لامه لایه چسبنده کشسان (GPa)	چسبندگی لایه چسبنده کشسان (Pa.s)	چگالی لایه کشسان (kg/m ³)	چگالی لایه چسبنده کشسان (kg/m ³)
۱	۱۴	۷۰	۳۰	۲	۳۵	۲۰	۶۰	۰/۵×۱۰ ^{۲۰}	۲۶۰۰	۳۱۰۰
۳	۱۶	۷۵	۳۵	۴	۳۷	۳۰	۷۰	۰/۷×۱۰ ^{۲۰}	۲۷۰۰	۳۲۰۰
۵	۱۸	۸۰	۴۰	۶	۳۹	۴۰	۸۰	۱/۰×۱۰ ^{۲۰}	۲۸۰۰	۳۳۰۰
۷	۲۰	۸۵	۴۵	۸	۴۱	۵۰	۹۰	۱/۴×۱۰ ^{۲۰}	۲۹۰۰	۳۴۰۰
۹	۲۲	۹۰	۵۰	۱۰	۴۳	۶۰	۱۰۰	۲/۰×۱۰ ^{۲۰}	۳۰۰۰	۳۵۰۰
-	۲۴	-	-	-	۴۵	-	-	-	-	-



شکل ۱۵. آنالیز حساسیت میدان جابه‌جایی مسطحانی مدل به تغییرات

پارامتر چگالی لایه کشتان. آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه چه در حالت شیب‌لغز (الف) و چه در حالت امتدادلغز (ج)، حساسیتی به چگالی لایه کشتان نشان نمی‌دهد. آنالیز جابه‌جایی‌های پس‌لرزه در حالت شیب‌لغز (ب) و امتدادلغز و (د) حساسیت اندکی به چگالی لایه کشتان نشان می‌دهد.

جدول ۵. حساسیت مدل وانگ و همکاران (۲۰۰۶) به تغییر در پارامترهای هندسی گسلش و پارامترهای فیزیکی لایه کشتان و نیم‌فضای گرانروی کشتان در حالت هم‌لرزه، میزان حساسیت از بالا به پایین کاهش می‌یابد. در آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه مدل حساسیتی به عمق لایه کشتان، دانسیته لایه کشتان، دانسیته نیم‌فضای گرانروی کشتان و ضریب گرانروی نیم‌فضای گرانروی کشتان نشان نمی‌دهد.

ردیف	پارامتر
۱	لغزش یا نابرجایی گسل
۲	شیب گسل
۳	عمق قفل‌شدگی بالای گسل
۴	عرض گسل
۵	طول گسل
۶	ضرایب لامه لایه کشتان
۷	ضرایب لامه نیم‌فضای گرانروی کشتان

جدول ۶. حساسیت مدل وانگ و همکاران (۲۰۰۶) به تغییر در پارامترهای هندسی گسلش و پارامترهای فیزیکی لایه کشتان و نیم‌فضای گرانروی کشتان در حالت بعدلرزه، میزان حساسیت از بالا به پایین کاهش می‌یابد.

ردیف	پارامتر
۱	لغزش یا نابرجایی گسل
۲	ضریب گرانروی نیم‌فضای گرانروی کشتان
۳	عرض گسل
۴	عمق قفل‌شدگی بالای گسل
۵	عمق لایه کشتان
۶	ضرایب لامه لایه کشتان
۷	ضرایب لامه نیم‌فضای گرانروی کشتان
۸	طول گسل
۹	شیب گسل
۱۰	دانسیته لایه کشتان
۱۱	دانسیته نیم‌فضای گرانروی کشتان

۴ نتیجه گیری

با توجه به حالات متنوعی که در انتخاب مشخصات هندسی گسل مرجع و مشخصات فیزیکی محیط مرجع وجود دارد، پیشنهاد می‌شود که انتخاب مقدار برای آنها با توجه به مشخصات هندسی و فیزیکی محل مورد بررسی و با در نظر گرفتن مقادیر تقریبی و کم دقت حاصل از روش‌های غیرژئودتیکی برای پارامترهای ورودی و تغییر آنها در محدوده خطای برآورد روش‌های کم دقت صورت گیرد.

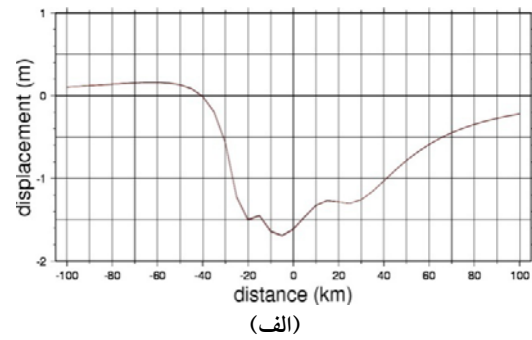
تغییرات مکانی و زمانی فرایند تغییر شکل پوسته‌ای مرتبط با زلزله تابع چندین پارامتر است، آنالیز حساسیت در مورد تک‌تک این پارامترها قابل اجرا است. برخی از این پارامترها با دقتی کمتر از بقیه با روش‌های دیگر غیر از GPS تعیین می‌شوند و لذا اجرای آنالیز حساسیت روی این پارامترها اهمیت بیشتری دارد. از جمله این پارامترها می‌توان به سه متغیر متفاوت (ضخامت سنگ‌کره، چسبندگی سست‌کره و زاویه شیب گسل) اشاره کرد.

به منظور تعیین میزان تأثیر نتایج مدل‌سازی به هریک از پارامترها با اجرای آنالیز حساسیت در تغییر شکل همالرزهای و پسالرزهای ناشی از گسلش شیب‌لغز و امتدادلغز نتایج زیر به دست آمد:

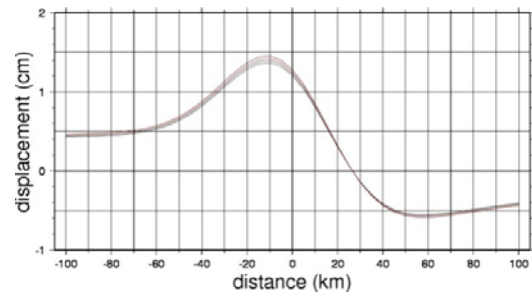
- مطابق نتایج حاصل از این تحقیق، میزان حساسیت مدل چسبنده کشسان به پارامترهای ورودی ارتباطی به نوع گسلش ندارد.

- آنالیز جابه‌جایی‌های همالرزهای و پسالرزهای وابستگی زیادی به میزان لغزش گسل به‌ویژه در بالای صفحه گسیختگی نشان می‌دهد.

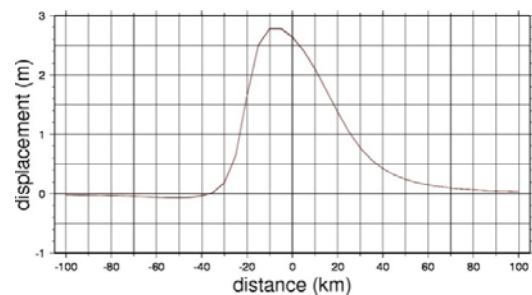
- در آنالیز جابه‌جایی‌های همالرزهای، وابستگی زیادی به زاویه شیب صفحه گسل مشاهده می‌شود. نقاط با جابه‌جایی‌های بزرگ نیز تغییر زیادی را با تغییر زاویه شیب، نشان می‌دهند. بزرگ‌ترین جابه‌جایی‌ها در منطقه روی صفحه گسیختگی رخ می‌دهد. بنابراین،



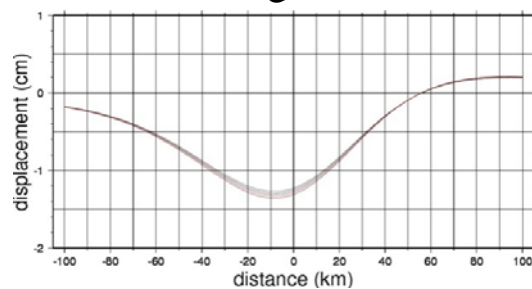
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۶. آنالیز حساسیت میدان جابه‌جایی مسطحانی مدل به تغییرات پارامتر چگالی نیم‌فضای چسبنده کشسان. آنالیز جابه‌جایی‌های هم‌لرزه چه در حالت شیب‌لغز (الف) و چه در حالت امتدادلغز (ج)، حساسیتی به چگالی نیم‌فضای چسبنده کشسان نشان نمی‌دهد. آنالیز جابه‌جایی‌های پسالرزه در حالت شیب‌لغز (ب) و امتدادلغز (د) حساسیت اندکی به چگالی نیم‌فضای چسبنده کشسان نشان می‌دهد.

دورتر از سطح گسیختگی در راستای شیب، در منطقه‌ای که جابه‌جایی پسالرزه‌ای تغییر علامت می‌دهد، دو مرتبه زاویه شیب حساس‌ترین پارامتر است. کمی دورتر، جایی که مقدار جابه‌جایی افقی به بیشینه دیگری می‌رسد، چسبندگی و ضخامت لایه کشسان دوباره اثر بیشتری از زاویه شیب سطح گسیختگی دارند. بنابراین اندازه‌گیری در مناطقی که دارای جابه‌جایی‌های پسالرزه‌ای بزرگ هستند، برای به‌دست آوردن مقدار چسبندگی توصیه می‌شود، به‌ویژه در بالای سطح گسیختگی، مقادیر جابه‌جایی، وابستگی زیادی به پارامتر چسبندگی نشان می‌دهد. همچنین همین منطقه می‌تواند اطلاعاتی را فراهم کند که برای تعیین ضخامت لایه کشسان نیز مفید باشد.

- در حالت کلی، نمی‌توان زاویه شیب گسل را با استفاده از اطلاعات تغییر شکل پسالرزه‌ای به‌دست آورد. مقدار تغییرات مرتبط با این پارامتر خیلی کوچک است. بهترین مکان برای پیدا کردن مقداری برای این پارامتر منطقه‌ای است که جابه‌جایی پسالرزه‌ای تغییر جهت می‌دهد.

- آنالیز جابه‌جایی‌های همالرزهای حساسیتی به چگالی لایه کشسان یا چسبنده کشسان نشان نمی‌دهد؛ در مقابل آنالیز جابه‌جایی‌های پسالرزه‌ای حساسیت اندکی به چگالی لایه کشسان یا چسبنده کشسان نشان می‌دهد، لذا تعیین چگالی لایه کشسان یا چسبنده کشسان با استفاده از مدل توصیه نمی‌شود.

منابع

نوری، س.، وثوقی، ب. و ابوالقاسم، ا. م.، ۱۳۸۸، مدل‌سازی میدان جابه‌جایی هم‌لرزه یک گسل و تعیین حساسیت پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل به میدان جابه‌جایی آن، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۵(۱)، ۵۹-۷۳.

Cohen, S. C., 1980a, Postseismic viscoelastic

اندازه‌گیری‌های سطحی در این منطقه مناسب‌ترین اطلاعات برای تعیین محتمل‌ترین مقدار زاویه شیب گسل هستند.

- آنالیز جابه‌جایی‌های همالرزهای و پسالرزه‌ای مدل، حساسیت چندانی نسبت به تغییر در طول گسل نشان نمی‌دهد.

- در آنالیز جابه‌جایی‌های همالرزهای و پسالرزه‌ای وابستگی زیادی به پارامتر عرض گسل به‌ویژه در بالای صفحه گسیختگی مشاهده می‌شود.

- در آنالیز جابه‌جایی‌های همالرزهای و پسالرزه‌ای وابستگی زیادی به پارامتر عمق قفل‌شدگی گسل به‌ویژه در بالای صفحه گسیختگی گسل مشاهده می‌شود که میزان این وابستگی در مورد جابه‌جایی‌های همالرزهای بسیار بیشتر است.

- تغییر ضخامت لایه کشسان، عموماً به تغییرات کوچکی به‌ویژه در منطقه خارج از تصویر سطحی انتهای پایینی صفحه گسیختگی منجر می‌شود. بدین ترتیب اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های همالرزهای، به‌ویژه در منطقه خارج از تصویر سطحی انتهای پایینی صفحه گسیختگی، برای تعیین مقدار دقیق ضخامت لایه کشسان توصیه نمی‌شود.

- آنالیز جابه‌جایی‌های همالرزهای و پسالرزه‌ای حساسیت اندکی به ضرایب لایه کشسان در بالای صفحه گسیختگی گسل نشان می‌دهد و میزان این حساسیت برای ضرایب لایه چسبنده کشسان کاهش نیز می‌یابد.

- آنالیز جابه‌جایی‌های همالرزهای هیچ حساسیتی به ضریب چسبندگی لایه چسبنده کشسان نشان نمی‌دهد ولی در آنالیز تغییر شکل بعد از زلزله، با تغییر چسبندگی و ضخامت لایه کشسان، انحراف از مدل مرجع در بالای صفحه گسیختگی زیاد است. در این زمینه، زاویه شیب به اندازه دو پارامتر دیگر، نتایج را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

- deformation due to periodically repeated earthquakes at subduction zones, *J. Geophys. Res.*, **89**, 7631-7640.
- Wang, R., Martin, L. F. and Roth, F., 2006, PSGRN/PSCMP - a new code for calculating co-postseismic deformations and geopotential changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, *Computers & Geosciences*, **32**, 527-541.
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**(4), 974-1002.
- Yu, T. T., Rundle, J. B. and Fernandez, J., 1996, Surface deformation due to a strike-slip fault in an elastic gravitational layer overlying a viscoelastic gravitational half-space, *J. Geophys. Res.*, **101**, 3199-3214.
- Yuming, Z., Bin S. and Xiong Xiong, 2008, Parameters sensitivity analysis of coulomb stress change in static stress triggering, *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **28**(5), 22-28.
- Zhongwen, Z., Bikai, J., Shengji, W. and Robert W. G., 2011, Coulomb stress change sensitivity due to variability in mainshock source models and receiving fault parameters: a case study of the 2010–2011. Christchurch, New Zealand, *Earthquakes, Seismological Research Letters*, **82**(6), 800-814.
- deformation and stress-2. stress theory and computation; dependence of displacement, strain, and stress on fault parameters, *J. Geophys. Res.*, **85**, 3151-3158.
- Cohen, S. C., 1980b, Postseismic viscoelastic surface deformation and stress-1. theoretical considerations, displacement and strain calculations, *J. Geophys. Res.*, **85**, 3131-3150.
- Fernandez, J., Yu, T. T. and Rundle, J. B., 1996, Horizontal viscoelastic-gravitational displacement due to a rectangular dipping thrust fault in a layered Earth model, *J. Geophys. Res.*, **101**, 13,581-13,594.
- Nowroozi, A. A., 1985, Empirical relations between magnitudes and fault parameters for earthquakes in Iran, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 1327-1338.
- Rundle, J. B., 1982, Viscoelastic-gravitational deformation by a rectangular thrust fault in a layered Earth, *J. Geophys. Res.*, **87**, 7787-7796.
- Stein, S. and Wysession, M., 2003, An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure, Blackwell Publishing, pp.498.
- Thatcher, W., Matsuda, T., Kato, T. and Rundle, J. B., 1980, Lithosphere loading by the 1896 Riku-u earthquake, northern Japan: Implications for plate flexure and asthenospheric rheology, *J. Geophys. Res.*, **85**, 6429-6435.
- Thatcher, W. and Rundle, J. R., 1984, A viscoelastic coupling model for the cyclic