

## تعیین میدان جابه‌جایی ناشی از فعالیت هم‌لرزه گسل شیب‌لغز و امتدادلغز با استفاده از روش المان محدود

بیژن شورچه<sup>۱\*</sup>، مهدی معتق<sup>۲</sup> و محمدعلی شریفی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری ژئودزی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، قطب علمی مهندسی نقشه‌برداری و مقابله با سوانح طبیعی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، قطب علمی مهندسی نقشه‌برداری و مقابله با سوانح طبیعی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۰/۹/۲۳، پذیرش نهایی: ۹۲/۲/۲۴)

### چکیده

میدان جابه‌جایی حاصل از فعالیت هم‌لرزه گسل‌های شیب‌لغز (نرمال و معکوس) و امتدادلغز (چپ‌گرد) با استفاده از آنالیز عددی المان محدود در یک محیط همسانگرد همگن کشسان خطی برآورد شده است. با کمک روش عددی المان محدود می‌توان پیچیدگی‌های محیط واقعی را برای تولید تابع‌های گرین دقیق‌تر و به‌کارگیری در حل مسئله معکوس به‌منظور استخراج نرخ لغزش گسل‌ها، مدل‌سازی کرد. به همین منظور با به‌کارگیری المان‌های تماسی در سطح گسل میدان جابه‌جایی حاصل از گسل‌های عمقی و امتدادلغز با مقدار جابه‌جایی واحد محاسبه شد. گسل شیب‌لغز، سطحی در نظر گرفته شده و عرض آن ۲۰ کیلومتر است که برای مدل‌سازی محیط نیم‌فضا طول و عمق محیط به‌ترتیب ۱۰۰۰ و ۵۰۰ کیلومتر لحاظ شده است و در مقابل ابعاد گسل بزرگ است. طول و عرض گسل امتدادلغز به‌ترتیب ۳۰۰ و ۲۰ کیلومتر و ابعاد محیط نیم‌فضا ۱۰۰۰، ۳۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر است. گسل شیب‌لغز در محیط دوبعدی و گسل امتدادلغز در محیط سه‌بعدی مدل‌سازی شده است. میدان جابه‌جایی حاصل از مدل عددی با مدل تحلیلی اوکادا مقایسه شده است. مقایسه نشان می‌دهد که انطباق قابل‌قبولی بین میدان جابه‌جایی افقی و قائم حاصل از مدل عددی و تحلیلی وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: گسل شیب‌لغز، گسل امتدادلغز، میدان جابه‌جایی، روش المان محدود

## Finite element modeling of deformation field induced by dip and strike slip fault coseismic activity

Shoorcheh, B.<sup>1</sup>, Motagh, M.<sup>2</sup> and Sharifi, M. A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student of Geodesy, Department of Surveying and Geomatics engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Surveying and Geomatics engineering, Center of Excellence in Surveying Engineering and Disaster Management, University College of Engineering, University of Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Surveying and Geomatics engineering, Center of Excellence in Surveying Engineering and Disaster Management, University College of Engineering, University of Tehran, Iran

(Received: 14 Dec 2011, Accepted: 14 May 2013)

### Summary

Many earthquakes occur in Iran every year and some of these earthquakes cause loss of life and property. Consequently earthquake is one of challenging topics not only in Iran but also in other active tectonic regions in the world. Investigating the mechanism of earthquake as a natural disaster is the first and important step. To study earthquakes,

different information such as geometry and behavior of active faults, as well as the mechanical properties of the earth's upper most layers, are required. Geometric and rheology properties of earth's layers as well as details of the contemporary strain, temperature and stress have increased significantly over the past decade. Furthermore thanks to availability of Global Navigation Systems (GNSS), like GPS, modern space geodesy data processing and new tools like PS-InSAR that provide unforeseen spatial coverage of precise observations of the Earth's surface deformations. The only processing approach that composes all geometrical and physical complexities is Finite Element Modeling (FEM). The first step in using FEM is to examine its capabilities.

In this paper deformation field of a dip slip (normal and reverse) and a strike slip fault (left lateral) in linear homogenous isotropic elastic medium by means of 2D and 3D Finite Element Method (FEM) has been investigated. By means of FEM, the complexity of mechanism of a fault related disaster for determination of precise Green operator and solution of a reverse problem for extraction of fault slip rate can be modeled. As a sample, we apply contact elements and develop a frictionless fault surface and then deformation field of dip and strike slip faults for one meter of slip for each side of fault surface. Fault top lines for dip and strike slip faults are assumed to be on the ground. The dimensions of semi infinite medium for dip and strike slip faults are respectively 1000\*500 and 1000\*3000\*120 km and these dimensions relative to fault's dimensions are large. FEM deformation field are compared to Okada analytical model (an analytical model). The comparison shows that there is a good agreement between FEM and the analytical model. Our procedure can be summarized as follows:

- 1- 2D geometrical modeling of 90, 70 and 25 degree dip slip faults and 3D vertical strike slip fault.
- 2- Meshing of medium and assign material properties (linear homogenous isotropic elastic).
- 3- Apply boundary conditions by horizontal and vertical displacement vectors.
- 4- Determination of horizontal and vertical displacement vectors on the ground by means of FEM.
- 5- Comparison of analytical (Okada model) and FEM results and computation of Root Mean Square (RMS) as an efficiency test of results.

**Keywords:** Dip slip fault, Strike slip fault, Deformation field, Finite element method

## ۱ مقدمه

تانسور تنش تنظیم شده‌اند قابل تبدیل به معادله اسکالر تنش است که به این معادله منفرد «بیو هارمونیک» گفته می‌شود. یک روش حل عمومی این معادله، استفاده از سری‌های توانی به شکل  $\phi(x,y) = \sum C_{mn} X^m Y^n$  بوده به طوری که براساس شرایط مرزی مسئله ضرایب به دست می‌آید (نیو، ۱۹۵۷). در روش فوریه معادلات دیفرانسیل حاکم بر اساس اصل جداسازی متغیرها، اصل برهم‌نهی، سری‌های فوریه و انتگرال‌های فوریه قابل حل خواهد بود (پیکت، ۱۹۴۴؛ لیتل، ۱۹۷۳). در تبدیل انتگرالی معادلات

روش‌های ریاضی متفاوتی برای حل معادلات کشسان وجود دارد. بسیاری از این روش‌ها براساس حل تحلیلی و تعیین دقیق جواب مسئله استوار است در حالیکه مبنای بعضی از روش‌های دیگر بر اساس حل تقریبی جواب مسئله است. در دسته سوم حل و تعیین جواب مسئله شامل روش‌های حل عددی است. از روش‌های تحلیلی می‌توان روش سری‌های توانی، فوریه، معادلات انتگرالی معادل و متغیرهای مختلط نام برد. در روش سری‌های زمانی معادلات کشسان حاکم بر محیط‌های پیوسته که بر اساس

آنها از هم متمایز می‌شوند. محیط‌های همگن و کشسان (اوکادا، ۱۹۹۲)، چسبنده‌کشسان (دراگونی و همکاران، ۱۹۸۶؛ پولیتز، ۱۹۹۷) و چندلایه (مورلی و همکاران، ۱۹۸۷؛ بونافاده و همکاران، ۲۰۰۲) به روش تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به‌منظور کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی روش‌های نیمه تحلیلی مورد توجه قرار گرفت. از روش‌های نیمه تحلیلی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. وقوع گسلش کامل در یک لایه و در محیط نیم‌فضا (ما و کازمیر، ۱۹۹۵؛ سویج، ۱۹۹۸) و یا وقوع گسلش در مرز بین لایه و محیط نیم‌فضا (بونافاده و همکاران، ۲۰۰۲) مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی تابع‌های گرین عددی، حل‌گسل‌هایی را که چندین لایه را قطع می‌کنند، امکان‌پذیر کرده است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۳). لایه‌بندی در همه موارد فوق به‌صورت افقی در نظر گرفته شده است. به‌منظور مدل‌سازی محیط‌های پیچیده برای مثال غیرهمگنی عرضی محیط روش المان محدود ابزار بهتری است (مسترلارک و وانگ، ۲۰۰۲؛ بیلک و همکاران ۲۰۰۳؛ بوستین و همکاران، ۲۰۰۴). با توجه به گستردگی فعالیت‌های زمین‌ساختی در ایران، ساختار هندسی پیچیده گسل‌ها و جنس لایه‌های زمین‌شناسی به‌منظور عرضه مدلی صحیح از فعالیت لرزه‌ای، داده‌های متفاوت مانند زمین‌شناسی، لرزه‌نگاری، ژئودتیک و سایر دانش‌های مرتبط، جمع‌آوری شده و بر اساس این داده‌ها، مدل‌سازی و تفسیر صورت گرفته است (حیدری و میرزایی، ۱۳۸۸؛ فتاحی و همکاران، ۱۳۹۰؛ بحرانی و خاجی، ۱۳۸۹؛ واجدیان و همکاران، ۱۳۹۰). مدل‌سازی المان محدود قابلیت ترکیب داده‌ها از منابع ورودی متفاوت و عرضه یک مدل جامع را دارد. گداهای متفاوتی به‌منظور پیاده‌سازی روش المان محدود توسعه داده شده است. تعدادی از آنها را گروه‌های ژئودینامیکی برای اهداف مشخص طراحی کرده‌اند و تعدادی از آنها نیز به‌صورت تجاری موجودند که در این خصوص می‌توان

دیفرانسیل با استفاده از تبدیلات فوریه، لاپلاس و هانکل به صورت ساده‌تری تبدیل و مجهولات تبدیل شده بعد از حل با استفاده از تبدیل معکوس به مجهولات اصلی تبدیل می‌شوند (نودون، ۱۹۷۸). با توجه به سختی‌های روش‌های حل تحلیلی دقیق تلاش‌های زیادی برای تعیین جواب‌های تقریبی صورت گرفته است. بسیاری از روش‌های تقریبی بر اساس روش تغییرات (variational method) که در ارتباط با نظریه انرژی‌اند استوار است. ایده اصلی این روش برقراری ارتباط بین معادلات حاکم و یک مسئله تغییرات و پیدا کردن کمینه یک تابع انتگرالی است. یکی از روش‌های تغییرات متد ریتز (Ritz) است که با جزئیات توضیح داده شده است (مورا و کویا، ۱۹۹۲). در دهه‌های اخیر روش‌های عددی نقش اساسی در حل مسائل کشسان با هندسه‌های پیچیده داشته است. روش‌های گوناگون عددی توسعه داده شده است که از میان آنها می‌توان روش‌های تفاضل محدود، المان محدود و المان مرزی را نام برد. در روش تفاضلی محدود مشتقات موجود در معادلات با معادل‌های تفاضلی جایگزین می‌شود و به‌دنبال جواب در مجموعه‌ای از نقاط مش‌بندی شده می‌گردیم (تیموشنکو و گودیر، ۱۹۷۰). مشکل اساسی این روش دقیق نبودن جواب در مناطق با شکل پیچیده است. در روش المان محدود، جسم تحت بررسی به تعدادی المان کوچک افزاز می‌شود. سپس فرض می‌شود که تغییرات تابع موردنظر در داخل المان به‌صورت تابعی از گره‌های المان است. سپس بر اساس گسسته‌سازی صورت گرفته دستگاه معادلات جبری برحسب مجهولات گره‌ها به‌دست می‌آید. از آنجا که اندازه المان و تابع دلخواه است این روش قابلیت حل مسائل با شکل‌های پیچیده را دارد. در این راستا جابه‌جایی، تغییر شکل و میدان فشار حاصل از زلزله را می‌تواند به روش‌های تحلیلی و عددی مدل‌سازی کرد. روش‌های تحلیلی با توجه به خصوصیات مدل مجازی ساخته شده از مدل واقعی و روش‌های محاسباتی

پیوستگی قوی تری نسبت به متغیرهای محیط است. در حل بسیاری از مسائل عملی حل صورت قوی معادلات و به دست آوردن جواب دقیق امکان پذیر نیست. برای حل صورت ضعیف معادلات از دو روش استفاده می شود: (۱) اصل انرژی (ردی، ۱۹۸۴)، (۲) روش باقی مانده وزن دار (کراندل، ۱۹۵۶؛ فینلیسون و سریون، ۱۹۶۶؛ زیکیویکس و تیلور، ۲۰۰۰). روش انرژی در واقع صورت خاصی از اصل تغییرات است که مشخصاً برای حل مسائل مکانیک جامدات تنظیم شده است. در بسیاری از علوم فیزیکی، اصل تغییرات وجود ندارد و فقط معادلات دیفرانسیل و شرایط مرزی مسئله قابل تعریف است. همچنین وقتی درجه معادلات دیفرانسیل فرد باشد، فرمول بندی تغییرات برای حل مسئله وجود نخواهد داشت. روش عمومی ریاضی برای حل مسائل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی، روش باقی مانده وزن دار است. فرمول بندی روش باقی مانده وزن دار برای مدل سازی معادلات رفتاری حاکم بر محیط های پیوسته به روش المان محدود با جزئیات در منابع آورده شده است (زیکیویکس و تیلور، ۲۰۰۰).

#### ۴ طراحی مدل المان محدود

به منظور مقایسه با روش های تحلیلی، مدل دو بُعدی از یک گسل شیب لغز با زاویه Dip ۹۰، ۷۰ و ۲۵ درجه در حالت نرمال و معکوس و یک مدل سه بُعدی از یک گسل امتداد لغز با زاویه Dip ۹۰ درجه در یک محیط کشسان، همگن و همسانگرد به روش المان محدود با کمک نرم افزار ABAQUS ساخته شد. شکل ۲ و جدول ۲ مشخصات هندسی چهار مدل را برای گسلش های نرمال، معکوس و امتداد لغز نشان می دهد.

ارتفاع گسل ها از سطح زمین صفر کیلومتر و مقدار گسلش طرفین گسل ۱ متر در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی گسل، طول، عرض و ارتفاع محیطی که گسل در آن واقع است نسبت به ابعاد گسل باید بیشتر

ANSYS و ABAQUS را نام برد. در این مقاله با استفاده از ABAQUS به مدل سازی گسل شیب لغز و امتداد لغز می پردازیم. این مدل ها در حکم نمونه، مبنای مدل های پیچیده آتی خواهد بود.

#### ۲ فرمول بندی معادلات کشسان

صورت عمومی معادلات کشسان برای مواد ایزوتروپ به صورت معادله (۱) است:

$$\mathfrak{S}\{u_i, e_{ij}, \sigma_{ij}, \lambda, \mu, F_i\} = 0 \quad (1)$$

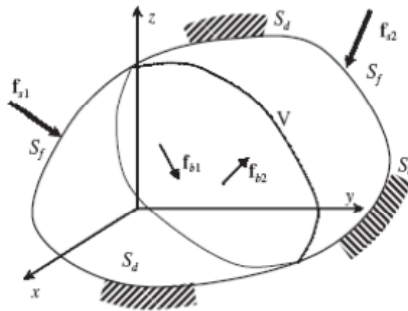
این دستگاه معادلات دارای ۱۵ مجهول شامل ۳ مجهول جابه جایی  $u_i$ ، ۶ مجهول کرنش  $e_{ij}$  و ۶ مجهول تنش  $\sigma_{ij}$  است. مشابه سایر علوم مانند مکانیک شاره ها، الکترومغناطیس برای حل معادلات حاکم شرایط مرزی لازم است. در معادلات کشسان این شرایط مرزی به صورت بردار جابه جایی و بردار تنش سطحی در نظر گرفته می شود. براساس شرایط مرزی می توان معادلات کشسان را به سه دسته طبقه بندی کرد. در دسته اول هدف تعیین مجهولات براساس شرایط مرزی بردار تنش سطحی است. در دسته دوم شرایط مرزی بردار جابه جایی است و در دسته سوم شرایط مرزی براساس ترکیبی از بردار تنش سطحی و بردار جابه جایی است. در جدول ۱ صورت کلی معادلات تعادل و صورت های تبدیل یافته برحسب بردار جابه جایی و تانسور تنش آورده شده است.

#### ۳ حل معادلات رفتاری به روش عددی المان محدود

مدل سازی معادلات رفتاری حاکم بر محیط های پیوسته به روش المان محدود شامل چهار مرحله است: (۱) مدل سازی هندسی (۲) مش بندی (گسسته سازی) (۳) مشخص کردن ویژگی های رفتاری محیط (۴) مشخص کردن شرایط مرزی، اولیه و شرایط بارگذاری. روابط جدول ۱ صورت قوی (strong form) معادلات رفتاری است که در مقابل صورت ضعیف (weak form) نیازمند

رفته است. از آنجا که جفت نیروهای طرفین گسل باعث به‌وجود آمدن نیروهای نرمال بر صفحه گسل می‌شود و این نیروها باعث خروج صفحه گسل از موقعیت قبلی خود می‌شوند، به همین جهت، نیروهای نرمال بر صفحه گسل اعمال می‌شود تا باعث جلوگیری از دوران صفحه گسل شوند. مولفه افقی و قائم میدان تغییر شکل برای ۳۰ کیلومتر غرب و شرق نسبت به مختصات مرکز صفحه گسل بر اساس مدل‌سازی المان محدود، استخراج شده و همراه با میدان تحلیلی در شکل ۳ نشان داده شده است.

باشد. در مرزهای جنوب، شرق و غرب گسل قید نبود جابه‌جایی اعمال شده است. سطح گسل آزاد است و اصطکاکی برای آن در نظر گرفته نشده است. ضریب پواسون ۰/۲۵ و مدول یانگ ۱۰۰ گیگاپاسکال است. المان خطی با چهار گره با طول ۵۰۰ متر در اطراف گسل برای مش‌بندی مدل‌های دو‌بعدی استفاده شده است، به‌طوری‌که با افزایش فاصله از گسل، اندازه المان‌ها بزرگ‌تر می‌شود. برای مش‌بندی مدل سه‌بعدی از المان خطی با هشت گره استفاده شده است. برای مدل‌سازی حرکت صفحات طرفین گسل، المان‌های تماسی به کار



شکل ۱. محیط پیوسته تحت تاثیر نیروی حجمی و شرایط مرزی بردار تنش سطحی و بردار جابه‌جایی.

جدول ۱. معادلات رفتاری حاکم بر محیط کشسان.

صورت کلی دستگاه معادلات تعادل

(تعداد معادلات و تعداد مجهولات ۱۵):

$$\mathfrak{S} \{ u_i, e_{ij}, \sigma_{ij}, \lambda, \mu, F_i \} = 0$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i})$$

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0$$

$$\sigma_{ij} = \lambda e_{kk} \delta_{ij} + 2\mu e_{ij}$$

$$e_{ij,kl} + e_{kl,ij} - e_{ik,jl} - e_{jl,ik} = 0$$

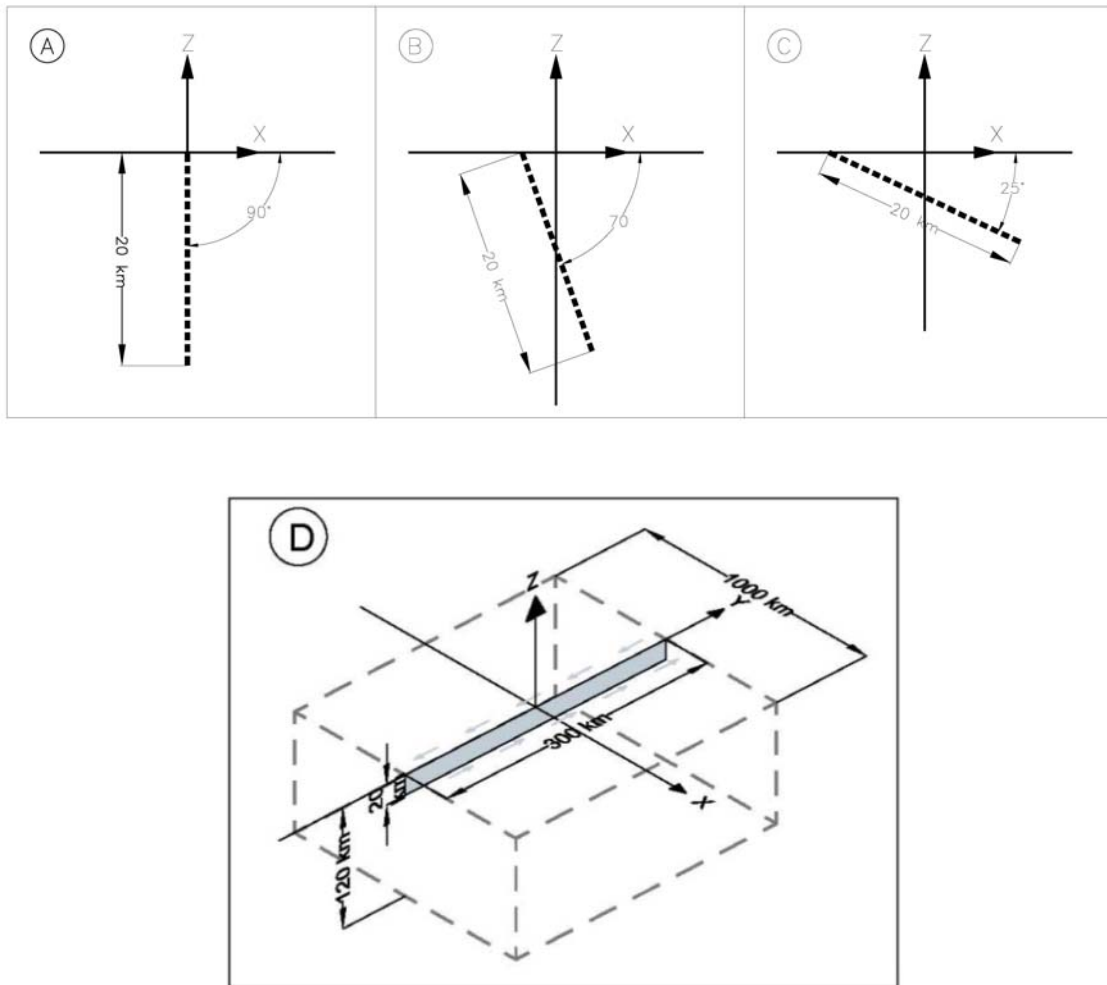
فرمول‌بندی برحسب بردار جابه‌جایی

(تعداد معادلات و تعداد مجهولات ۳):

$$\mathfrak{S} \{ u_i, \lambda, \mu, F_i \} = 0$$

$$u_{i,kk} + (\lambda + \mu) u_{k,ki} + F_i = 0$$

فرمول‌بندی برحسب تانسور تنش



شکل ۲. مشخصات هندسی گسل‌های شیب‌لغز و امتدادلغز. مدل‌های A، B و C برای مدل‌سازی گسل‌های نرمال و معکوس در یک محیط دو بُعدی در نظر گرفته شده است. طول و عرض محیط به ترتیب ۱۰۰۰ و ۵۰۰ کیلومتر است. مدل D گسل امتدادلغز (چپ‌گرد) را نشان می‌دهد. طول، عرض و ارتفاع محیط به ترتیب ۱۰۰۰، ۳۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر است.

۵ مقایسه جواب عددی با جواب تحلیلی

برای یک گسلش ثابت میدان‌های جابه‌جایی افقی و قائم در سطح زمین برآورد شد. به منظور ارزیابی دقت روش عددی بردار جابه‌جایی افقی و قائم حاصل از مدل‌سازی عددی و تحلیلی در نقاط متناظر با هم در فاصله ۳۰ کیلومتری از شرق و غرب مرکز گسل‌ها مقایسه شد. فرمول تحلیلی برآورد جابه‌جایی در یک محیط همگن، همسانگرد، کشسان خطی از رابطه (۲) به دست می‌آید (اوکادا، ۱۹۹۲):

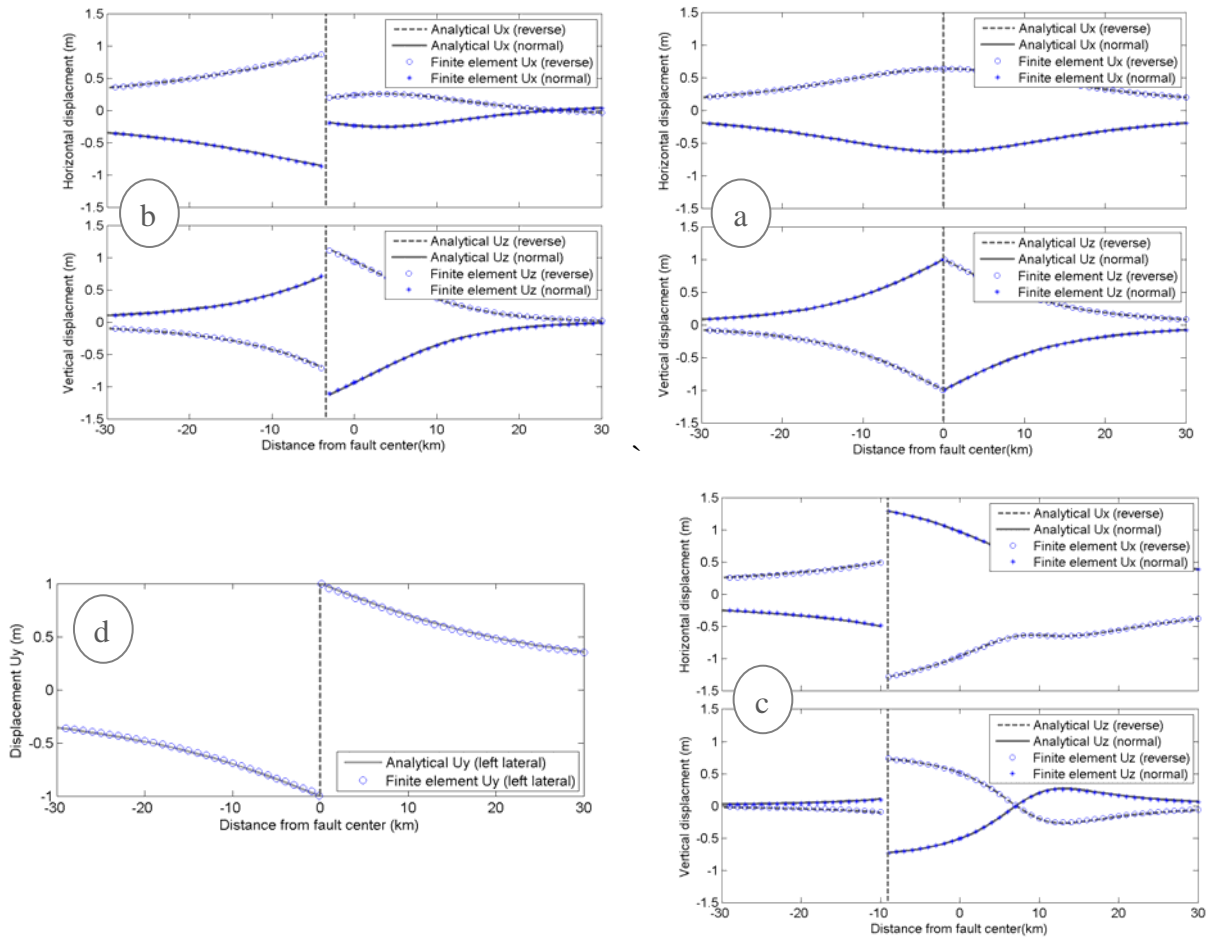
$$u_k(x) = \int_{\Sigma} S_i(\xi) \left[ \mu \left( \frac{\partial g_k^i}{\partial \xi_j} + \frac{\partial g_k^j}{\partial \xi_i} \right) + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial g_k^m}{\partial \xi_m} \right] n_j d\Sigma(\xi) \quad k = 1, 2, 3 \quad (2)$$

فرمول اکادا در واقع جواب صورت ناویر (Navier) معادلات تعادل در نظریه کشسان با شرایط مرزی رابطه (۳) است:

$$\mu \nabla^2 u_i + (\lambda + \mu) \frac{\partial u_{k,k}}{\partial x_i} + \rho f_i = 0 \quad (3)$$

$$k = 1, 2, 3 \quad i = 1, 2, 3$$

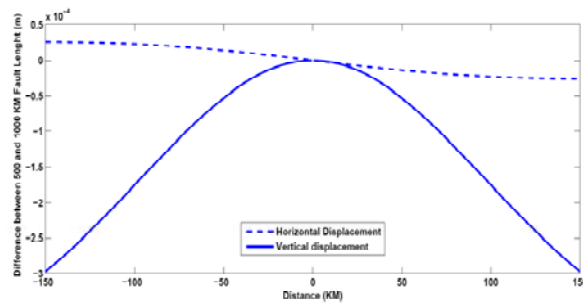
$$s_i \equiv u_i^{+(F)} - u_i^{-(F)}$$



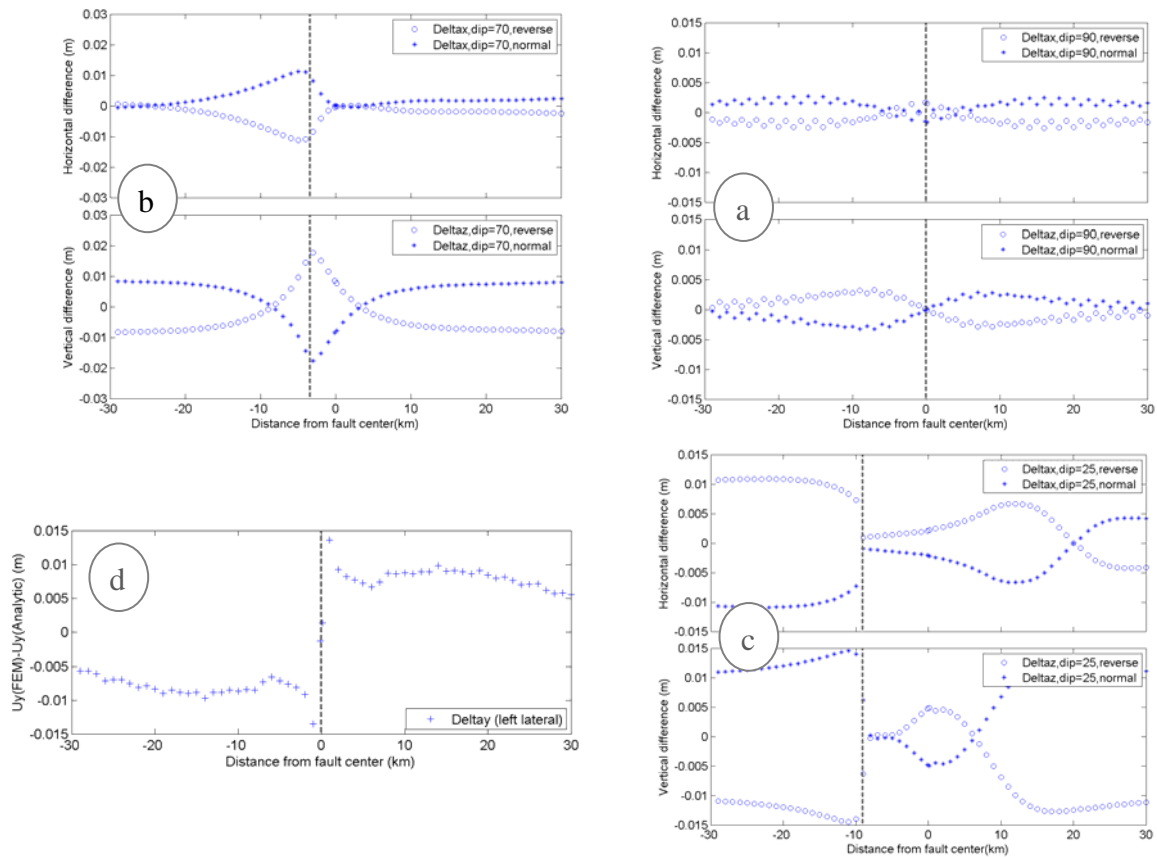
شکل ۳. شکل‌های a, b, c, d میدان جابه‌جایی افقی و قائم را برای چهار مدل A, B, C, و D نشان می‌دهد. خطوط خط‌چین موقعیت گسل‌ها را در سطح زمین نسبت به مرکز گسل نشان می‌دهد.

جابه‌جایی مدل اوکادا برای گسل‌ها با طول متفاوت، گسل با طول ۱۰۰۰ کیلومتر را برای آزمون مدل عددی گسل‌های شیب‌لغز در نظر می‌گیریم. در شکل ۵ مولفه-های افقی و قائم میدان جابه‌جایی حاصل از مدل‌سازی عددی المان محدود و مدل تحلیلی با هم مقایسه شده است. دقت سری‌های زمانی مختصات افقی شبکه‌های دائم GPS در وسعت‌های جهانی بهتر از ۱۰ میلی‌متر است. در وسعت مناطق‌های دقت ۱-۳ میلی‌متر برای مولفه‌های افقی و بهتر از ۱۰ میلی‌متر برای مولفه قائم قابل دستیابی است (هرینگ، ۱۹۹۹).

به دلیل اینکه مدل‌سازی عددی میدان تغییر شکل گسل‌های درون صفحه‌ای (مدل‌های A-B-C) در دو بُعد صورت گرفته است. به منظور مقایسه میدان دو بُعدی عددی با مدل اوکادا ناگزیر به بررسی اثر طول گسل در میدان تغییر شکل حاصل از مدل اوکادا هستیم. میدان‌های تغییر شکل قائم و افقی مدل اوکادا را برای طول‌های گسل ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلومتر با هم مقایسه می‌کنیم. در شکل ۴ اختلاف مولفه افقی و قائم بردار جابه‌جایی مدل اوکادا برای گسل به طول‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلومتر نشان داده شده است. با مقایسه میدان



شکل ۴. اختلاف مولفه افقی و قائم بردار جابه‌جایی مدل اوکادا برای گسل به طول‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلومتر.



شکل ۵. شکل‌های a، b، c، d اختلاف میدان جابه‌جایی افقی و قائم حاصل از مدل‌سازی تحلیلی و المان محدود را برای چهار مدل A، B، C و D نشان می‌دهد. خطوط خط‌چین، موقعیت گسل‌ها را در سطح زمین نسبت به مرکز گسل نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات هندسی گسل‌ها.

مدل	زاویه Dip (درجه)	عرض گسل (کیلومتر)	گسلش (متر)	طول گسل (کیلومتر)
A	۹۰	۲۰	۱ (نرمال - معکوس)	بی‌نهایت
B	۷۰	۲۰	۱ (نرمال - معکوس)	بی‌نهایت
C	۲۵	۲۰	۱ (نرمال - معکوس)	بی‌نهایت
D	۹۰	۲۰	۱ (چپ‌گرد)	۳۰۰



جدول ۳. پارامترهای آماری اختلاف مولفه‌های افقی و قائم مدل تحلیلی و المان محدود. واحدها برحسب میلی‌متر است. با توجه به تقارن میدان جابه‌جایی برای گسلش‌های نرمال و معکوس مربوط به مدل‌های A، B و C، در استخراج پارامترهای آماری این سه مدل از گسلش معکوس استفاده شده است.

شماره مدل	مدل	محدود شرق گسل				محدوده غرب گسل		
		کمترین	میانگین	بیشترین	خطای میانگین مربعی	کمترین	میانگین	بیشترین
۱	A	-۳	-۱	۲	۱	-۳	۱	۱
	B	-۱۱	-۱	۲	۴	-۱۱	۰	۲
	C	۷	۱۰	۱۱	۱	-۴	۷	۴
۴	A	۰	۱	۳	۱	-۳	۰	۱
	B	-۸	-۶	۱۰	۴	-۸	۱۸	۷
	C	-۱۴	-۱۱	-۱۰	۱	-۱۳	۵	۶
۷	D	-۱۴	-۶	۰	۳	۰	۱۴	۳

گسل با هم برابر است. در مدل‌های B و C، مناطق شرقی در مقایسه با مناطق غربی گسل انطباق بهتری با مدل تحلیلی دارند. مدل‌سازی المان محدود با تغییر نوع المان از حالت خطی به غیرخطی و همچنین تغییر اندازه المان مورد ارزیابی قرار گرفت. اندازه المان طوری انتخاب شد که تاثیر معنی‌داری در نتایج نداشته باشد. همچنین تغییر نوع المان تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای در نتایج ندارد. مدل‌های ساخته شده نسبت به شرایط مرزی حساس است به طوری که اعمال نشدن صحیح شرایط مرزی، باعث اختلاف فاحش با مدل تحلیلی می‌شود. با مقایسه دقت‌های قابل حصول از مشاهدات ژئودتیکی و نتایج جدول ۳ کارایی روش عددی المان محدود برای مدل‌سازی فرایندهای زمین‌ساختی به اثبات می‌رسد.

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی میدان تغییر شکل حاصل از گسل شیب‌لغز (نرمال و معکوس) و امتدادلغز (چپ‌گرد) به روش حل عددی المان محدود پرداخته شد. به‌منظور

شکل ۵ اختلاف بین مولفه‌های افقی و قائم مدل تحلیلی و المان محدود را برای مدل A، B و C در گسلش‌های نرمال و معکوس و مدل D برای گسل امتدادلغز چپ‌گرد نشان می‌دهد. اختلاف در این شکل‌ها برای حرکت‌های نرمال، معکوس، چپ‌گرد و راست‌گرد متقارن است و به همین دلیل استخراج پارامترهای آماری برای حرکت معکوس و چپ‌گرد صورت گرفته است. خطای میانگین مربعی برای ۷ مدل برای گسل‌های شیب‌لغز (نرمال و معکوس) و امتدادلغز (چپ‌گرد) در جدول ۳ آورده شده است.

خطای میانگین مربعی برای مولفه افقی حرکت معکوس بین ۱ تا ۴ میلی‌متر، برای مولفه قائم بین ۱ تا ۷ میلی‌متر و برای گسلش امتدادلغز ۳ میلی‌متر است. در مدل A که در آن گسل نسبت به محیط تقارن دارد نسبت به سایر مدل‌ها خطا کمتر است به طوری که خطای میانگین مربعی برای مولفه افقی و قائم ۱ میلی‌متر است و خطا برای محدوده شرق و غرب گسل با هم اختلافی ندارد. مدل D نیز نسبت به محیط متقارن و خطا در محدوده شرق و غرب

- Shallow earthquakes in a viscoelastic shear zone with depth dependent friction and rheology, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **86**, 617-633.
- Bonafede, M., Parenti, B. and Rivalta, E., 2002, On strike-slip faulting in layered media, *Geophys. J. Int.*, **149**, 698-723.
- Bielak, J., Loukakis, K., Hisada, K. and Yoshimura, C., 2003, Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions, Part I. Theory, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **93**, 817-824.
- Crandall, S. H., 1956, *Engineering analysis: a survey of numerical procedures*, McGraw-Hill, New York.
- Finlayson, B. A. and Scriven, L. E., 1966, The method of weighted residuals – a review, *Applied Mechanics Review*, **19**, 735-748.
- Herring, T., 1999, Geodetic application of GPS, *Proceeding of IEEE*, **87**(1), 0018-9219.
- Little, R. W., 1973, *Elasticity*, prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 88-94
- MA, X. Q. and Kusznir, N. J., 1995, Coseismic and postseismic subsurface displacements and strains for dip slip normal fault in a three-layer, *J. Geophys. Res.*, **100**, 12,813-12,828.
- Masterlark, T. and Wang, H. F., 2002, Transient stress coupling between the 1992 Landers and 1999 Hector Mine, California, earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 1470-1486.
- Morelli, A., Bonafede, M. and Dragoni, M., 1987, Twodimensional crack model of faulting in a layered elastic half-space, *Ann. Geophysicae*, **5B**, 281-288.
- Mura, T., and Koya, T., 1992, *Variational methods in mechanics*, Oxford Univ. Press, New York.
- Neou, C. Y., 1957, Direct method for determining airy polynomial stress function, *Jour. Appl. Mech.*, **24**, 387-390.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- Pickett, G., 1944, Application of the Fourier method to the solution of certain boundary problems in the theory of elasticity. *J. appl. Mech*, 11(3), A176-A182.
- Pollitz, F. F., 1997, Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth, *J. Geophys. Res.*, **102**, 17,921-17,941.
- Reddy, J. N., 1984, *Energy and variational methods in engineering*, John Wiley, New York.
- Savage, J. C., 1998, Displacement field for an edge dislocation in a layered half-space, *J. Geophys. Res.*, **103**, 12,311-12,322.
- ارزیابی مدل‌های عددی پیش‌گفته، میدان جابه‌جایی استاتیکی با گسلس ثابت در یک محیط کشسان خطی همگن برآورد شد و با مدل تحلیلی اوکادا مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که روش المان محدود با دقت خیلی خوبی توانایی پیش‌بینی میدان جابه‌جایی حاصل از مدل‌سازی تحلیلی (به‌منزله جواب دقیق) را دارد. روش المان محدود روش انعطاف‌پذیری است به‌طوری‌که توانایی حل پیچیدگی مدل‌سازی پدیده‌های طبیعی که با روش تحلیلی پرزحمت است را دارد. مدل‌های عددی ساخته شده به‌مثابه نمونه، مبنای مدل‌های پیچیده آتی خواهد بود.
- مراجع**
- بحرانی، ا. ح. و حاجی، ن.، ۱۳۸۹، ماتریس عملگرهای تابع گرین گسل‌های درون‌صفحه‌ای، م. فیزیک زمین و فضا، **۳۶**(۱)، ۵۹-۶۹
- حیدری، ر. و میرزائی، ن.، ۱۳۸۸، الگوی لرزه‌زمین‌ساختی گسل اصلی عهد حاضر زاگرس بین ۳۳ تا ۳۵ درجه عرض شمالی، م. فیزیک زمین و فضا، **۳۵**(۳)، ۸۶-۹۳
- فتاحی، م.، رستمی مهربان، س.، طالبیان، م.، بحرودی، ع.، هالینگورت، ح. و والکر، ر.، ۱۳۹۰، بررسی فعالیت گسل شمال نیشابور، م. فیزیک زمین و فضا، **۳۷**(۴)، ۱۷۹-۱۹۳
- واجدیان، س.، سراجیان، م. ر. و منصور، ب.، ۱۳۹۰، استخراج میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با استفاده از فن تداخل‌سنجی رادار با درجه مصنوعی (SAR)؛ بررسی موردی گسل بم، م. فیزیک زمین و فضا، **۳۷**(۲)، ۸۳-۹۶.
- Bustin, A., Hyndman, R. D., Lambert, A., Ristau, J., He, J., Dragert, H. and Van Der Kooji, M., 2004, Fault parameters of the Nisqually earthquake determined from moment tensor solutions and the surface deformation from GPS and InSAR, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **94**, 363-376.
- Dragoni, M., Bonafede, M. and Boschi, E., 1986,

- earthquakes in a multi-layered elastic crust – FORTRAN programs EDGRN/EDCMP, *Comput. Geosci.*, **29**, 195-207.
- Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L., 2000, *The finite element method*, 5th edition, Butterworth-Heinemann.
- Geophys. Res., **103**, 2439-2446.
- Sneddon, I. N., 1978, *Application of integral transforms in the theory of elasticity*, Springer-Verlag, New York.
- Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., 1970, *Theory of elasticity*, McGraw-Hill, New York.
- Wang, R., Martin, F. L. and Roth, F., 2003, *Computation of deformation induced*