

ماتریس عملگرهای تابع گرین گسل‌های درون‌صفحه‌ای

امیرحسین بحرانی^۱ و ناصر خاجی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران-زلزله، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
^۲ دانشیار، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
(دریافت: ۸۶۵/۲۲، پذیرش نهایی: ۸۷/۱۱/۵)

چکیده

در تحقیق حاضر، روشی عددی برای تعیین ماتریس عملگرهای تابع گرین در گسل‌های درون‌صفحه‌ای عرضه می‌شود. با داشتن این ماتریس و معکوس آن، می‌توان از روی اندازه‌گیری‌های تغییرمکان‌های سطح زمین، میزان لغزش‌های گسل و محل این لغزش‌ها را برآورد کرد. با داشتن محل و میزان این لغزش‌ها، می‌توان محل وقوع زلزله‌های بزرگ آینده را پیش‌بینی کرد. برای در نظر گرفتن تغییرشکل‌های گسل‌ها در محاسبات المان‌های محدود، روشی ساده پیشنهاد شده است. در این روش ساده که «روش ماده نرم» نام‌گذاری شده است، می‌توان گسل را با یک المان کم‌ضخامت از ماده‌ای نرم (یعنی با ضریب ارتجاعی بسیار کم) برآورد کرد. این ماده، علاوه بر اینکه مانع پدیده هم‌پوشانی دو سطح مجاور می‌شود، تطابق خوبی با رفتار واقعی گسل دارد، به این معنا که از مقاومت سنگ‌های مجاور هم در دو سوی گسل که خرد شده و در آستانه لغزش هستند صرف‌نظر می‌کند. در این تحقیق، بدون درگیر شدن با مسئله غیرخطی تماس، دو سمت گسل به اندازه واحد جابه‌جا شده و نتایج به‌صورت جابه‌جایی سطحی روی سطح زمین اندازه‌گیری شده است. ابتدا مدل پیشنهادی با پاسخ‌های تحلیلی موجود مقایسه شده است و پس از اطمینان از دقت قابل قبول روش، گسل شمال تهران مدل شده و ماتریس عملگرهای تابع گرین آن به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: تابع گرین، گسل درون‌صفحه‌ای، مسائل معکوس، روش المان محدود، روش ماده نرم

Green's function operator matrix of intraplate faults

Bahrany, A. H.¹ and Khaji, N.²

¹ M.Sc. in Earthquake Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Associate Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbia Modares University, Tehran, Iran

(Received: 13 Aug 2007, Accepted: 24 Jan 2009)

Abstract

This research presents a numerical tool to estimate the Green's function operator matrix of intraplate faults. Having this matrix and its inverse, spatial distribution of fault slippage could be investigated through the inverse analysis of geodetic data. This information could be employed to predict the location of future powerful earthquakes. To implement fault sliding in FE calculations, Soft Material Technique as a simple method is applied. In this technique, the fault is modeled by a flexible (very low elasticity modulus) thin element. This material not only prevents fault planes overlapping, but exhibits a good consistency with the physical behavior of fault. In other words, this material ignores the strength of neighboring rocks ready to trigger sliding. In this research, without involving the nonlinear contact problem, two sides of the fault are dislocated as one unit, and the ground surface deformation is measured.

Available geodetic data provides a proper opportunity to detect underground interactions. We can express observation equations with m observation data as:

$$B_i = \sum_j A_{ij} X_j + E_i \quad (i = 1, \dots, m) \quad (1)$$

where B_i are the observed surface deformations, X_j the slippage components along the fault, E_i the random errors, and A_{ij} Green's function operators (i.e., the elastic response at a point i to a unit source at a point j on the model source region). This equation can be rewritten in a matrix form as:

$$B = AX + E \quad (2)$$

where A is an $m \times n$ coefficient matrix.

To minimize the errors, the length of the vector E has to be minimized. It may be shown that, standard inversion equations based on the least-square method are obtained as:

$$X = (ATA)^{-1}ATB \quad (3)$$

where superscripts T and -1 indicate the transpose and inverse of a matrix, respectively. This relation offers a straightforward way for finding the source vector X . One of the new aspects of the present study is the calculation of the Green's function operator matrix A by means of FEM. This issue enables us to overcome all limitations of traditional inverse methods.

How can the Green's function operators be found by FEM? By applying unit source vectors in each degree of freedom, the relevant response of ground surface nodes is the corresponding component of the coefficient matrix A .

The proposed numerical model is first compared by available analytical approaches, and gains its proper validity, one of the Tehran faults is modeled by this method to calculate the corresponding Green's function operator matrix.

Key words: Green's Function, Intraplate fault, Inverse problems, Finite Element Method, Soft Material Technique

۱ مقدمه

(Tectonic Boundaries) یک صفحه سنگ کره‌ای تولید می‌شوند. گسل‌های مسبب این زلزله‌ها که به گسل‌های درون‌صفحه‌ای (Intraplate) موسوم‌اند، موضوع اصلی پژوهش حاضر هستند.

روش‌های تحلیلی (Analytical Approaches) بررسی رفتار گسل‌ها در آنالیز تغییرشکل‌های پوسته زمین، محدودیت‌های فراوانی دارند. یکی از محدودیت‌های مهم این روش‌ها، ایدنال‌سازی یک جابه‌جایی (dislocation) یکنواخت برای یک صفحه گسل مستطیل شکل واقع در یک قلمرو همگن نیم‌فضا (half-space) است. در حقیقت، سرچشمه (source) واقعی زلزله پیچیده‌تر از آن چیزی است که در این گونه مدل‌ها فرض می‌شود و در

بخش مهمی از زلزله‌های بزرگ در میان رویه (Interface) نواحی فرورانش تولید می‌شوند. این رویدادهای بزرگ بیانگر فرورفتن (underthrusting) یک صفحه سنگ کره‌ای (Lithospheric Plate) به زیر یک صفحه دیگر است. فرورفتن یک صفحه در نواحی فرورانش می‌تواند عامل ایجاد زلزله‌هایی در طول مرز صفحات (Interplate) در مناطق سطحی و کم‌عمق شود، درحالی‌که این پدیده در اعماقی بیش از یک حد معین، معمولاً همراه با تغییرشکل‌های غیرلززه‌ای (Aseismic) است.

ازسوی دیگر، بخش قابل توجهی از زلزله‌های بزرگ در نواحی داخلی (دور از مرزهای زمین‌ساختی یا

طول قابل توجهی از گسل رخ دهد، شاهد زلزله‌ای بزرگ خواهیم بود. به بیان دیگر، لغزش صفحات گسل پدیده‌ای است که در طول دوره‌ی میان‌لرزه‌ای (interseismic) به‌طور مستمر در حال وقوع است. یک دوره‌ی میان‌لرزه‌ای، فاصله‌ی زمانی بین دو زلزله‌ی بزرگ است که در طول آن انرژی کرنشی در پوسته‌ی زمین به‌طور تدریجی در حال افزایش است. در طی یک دوره‌ی زمانی میان‌لرزه‌ای، ناحیه‌ای از گسل درون‌صفحه‌ای به صورت قفل‌شده باقی می‌ماند، درحالی‌که نواحی دیگر به صورت غیرقفل‌شده‌ای رفتار می‌کنند که در آنها لغزش‌های دائمی در حال وقوع هستند. این نوع لغزش‌های غیرلرزه‌ای با ریزلرزه‌های (micro-earthquakes) ثبت شده در نواحی لرزه‌ای فعال قابل شناسایی هستند (خاجی و هیگاشیهارا، ۱۳۸۴ الف و ۱۳۸۴ ب).

اما چگونه می‌توان میزان لغزش‌های یک گسل را اندازه‌گیری کرد؟ داده‌های ژئودزی (Geodetic Data)، ابزاری مناسب برای ردیابی و شناسایی برهم‌کنش‌های زیرسطحی فراهم می‌آورند. خاجی و هیگاشیهارا (۱۳۸۴ الف) روش جدیدی برای برآورد میدان لغزش گسل بین‌صفحه‌ای درحکم پارامتر اصلی برهم‌کنش صفحات گسل، عرضه کرده‌اند. در این روش، معادلات شناسایی (observation equations) برای m داده را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$B_i = \sum_j A_{ij} X_j + E_i \quad (i = 1, \dots, m) \quad (1)$$

که در آن، B_i تغییرشکل‌های سطحی ثبت شده، X_j درایه‌های بردار لغزش در طول گسل، E_i خطاهای تصادفی، و A_{ij} عملگرهای تابع گرین (Green's Function Operators) هستند. درایه‌های مزبور، پاسخ کشسان در یک نقطه‌ی i به یک تحریک واحد در یک نقطه‌ی j از ناحیه‌ی سرچشمه مدل هستند. در بخش ۵، نحوه استخراج این درایه‌ها بیان می‌شود.

نتیجه، صرفاً تقریبی اولیه از مشخصات فیزیکی سرچشمه لرزه‌ای، به کمک این نوع مدل‌ها قابل حصول است (هوانگ و یه، ۱۹۹۲). فرض خاصیت‌های مصالح همگن و ایزوتروپ، از فرضیات اساسی این نوع روش‌ها است.

از سوی دیگر، روش المان محدود (Finite Element Method) درحکم روشی عددی (Numerical Approach)، برای حل مسائل لرزه‌شناسی (seismology)، به سرعت در حال گسترش است. به کمک این روش، به سهولت می‌توان مرزهای پیچیده و تنوع خاصیت مصالح را مدل کرد. این روش قادر است هندسه پیچیده سرچشمه لرزه‌ای را شبیه‌سازی کند.

برای شناسایی سرچشمه زلزله‌های بزرگ و محتمل آینده، لازم است در مورد مکان، میزان و جهت لغزش صفحات گسل، تا حد امکان، اطلاعات جامعی حاصل شود. طبیعی است که با توجه به عمق زیاد نواحی گسلش، نمی‌توان این لغزش‌ها را به صورت مستقیم و با دقت زیاد ردیابی کرد و تحت نظر قرار داد (monitoring)، لذا باید مسئله معکوسی طراحی و حل شود تا با استفاده از آن بتوان به مطلوب مسئله رسید. به عبارت ساده‌تر، با اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های روی سطح زمین (که به نحوی قابل حصول است) و با در دست داشتن تابع گرین برای گسل مربوط (که بیانگر رابطه جابه‌جایی‌های گسل و جابه‌جایی‌های سطح زمین است)، با یک آنالیز معکوس می‌توان جابه‌جایی‌های گسل را برآورد کرد. در بخش‌های بعدی، جزئیات این روش عرضه می‌شود.

۲ لغزش صفحات گسل

تمام گسل‌های فعال پوسته‌ی زمین به‌طور مداوم در حال لغزش هستند و اکثر زمین‌لرزه‌ها در اثر این لغزش‌ها به وجود می‌آیند. اگر این لغزش مختصر باشد، زمین‌لرزه‌ای کوچک حاصل می‌شود که تنها با ابزارهای خاص و لرزه‌نگارها قابل تشخیص است، و اگر لغزش زیاد و در

(Iterative Procedures) نقش کلیدی را ایفا می‌کنند (خاجی، ۱۳۸۳). به بیان دیگر، برای در نظر گرفتن یک ناپیوستگی در یک محیط پیوسته و محاسبه تغییر شکل‌های ناشی از لغزش ناپیوستگی مزبور در کل محیط پیوسته، مسئله بایستی به صورت تکراری حل شود. در تحقیق حاضر، تلاش بر این است که اثرات ناشی از لغزش یک ناپیوستگی بر کل یک قلمرو، به کمک فنی ساده‌تر از دیدگاه‌های پیش‌گفته تبیین شود. این روش مستقیم (که روش ماده نرم نامیده می‌شود) برای لحاظ کردن ناپیوستگی و لغزش روی آن در یک محیط پیوسته (بدون هیچگونه روند تکرار) در بخش ۶ عرضه می‌شود.

۴ شرایط مرزی دوردست

در بسیاری از مسائل فیزیکی و مهندسی، قلمروهای بی‌نهایت یا نیم‌بی‌نهایت وجود دارند. به‌طور کلی وقتی یک ناحیه مشخص که تحت آنالیز قرار دارد، از محدوده‌ای بزرگ جدا می‌شود، باید یک روش ریاضی خاص برای در نظر گرفتن اثرات قسمت‌های باقی‌مانده به کار رود. یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای این مسئله، المان نامحدود (Infinite Element) است که اولین بار بتیس (Bettess) آن را پیشنهاد کرد. مرور کاملی از نوشتارهای علمی المان نامحدود را عبدالفتاح و همکاران (۲۰۰۰) عرضه کرده‌اند. توسعه یک المان نامحدود، به صورت فرض شده (یا صورت لازم) برای نحوه کاهش پارامتر مورد نظر در دوردست بستگی دارد. در حالت کلی، پارامتر مزبور ممکن است صفر یا غیر صفر باشد (کومار، ۲۰۰۰). به بیان دیگر، صورت کاهش متغیر مسئله (مثلاً تغییر مکان) باید قبل از تحلیل مشخص باشد. این صورت کاهش در مسائلی قابل برآورد است که جواب تحلیلی آنها (مثلاً تابع گرین) از قبل موجود است.

برای احتراز از پیچیدگی‌هایی که روش فوق دارد، از ایده‌های ساده‌تر بهره برده‌ایم. با فرض کوچک بودن تغییر

معادله (۱) را می‌توان به صورت ماتریسی زیر نیز نوشت:

$$B = AX + E \quad (2)$$

که در آن A ماتریس ضرایب با ابعاد $m \times n$ است. با کمینه ساختن خطاها، می‌توان نشان داد (خاجی و هیگاشیهارا، ۱۳۸۴ الف) معادلات معکوس استاندارد، براساس روش کمترین مربعات (Least Squares Method) به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (3)$$

که بالانویس‌های T و -1 به ترتیب نشان‌دهنده ترانپوز و معکوس یک ماتریس هستند.

رابطه اخیر، مسیری مستقیم برای استخراج بردار مجهولات X در اختیار قرار می‌دهد. در تحقیق حاضر، ماتریس عملگرهای تابع گرین A به کمک روش المان‌های محدود محاسبه می‌شود. این روش، همه محدودیت‌های روش‌های تحلیلی (analytic) رایج در مسائل معکوس را مرتفع می‌سازد.

۳ مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته

تاکنون دیدگاه‌های متفاوتی برای لحاظ کردن ناپیوستگی‌ها در یک محیط پیوسته براساس روش المان محدود عرضه شده است که در میان آنها می‌توان به مسائل تماس (Contact Problems) و المان‌های درز (Joint Elements) اشاره کرد (سیمو و همکاران، ۱۹۸۵؛ اتروویچ و باته، ۱۹۹۱؛ سیمو و لارسن، ۱۹۹۲؛ سسکوتو و چارلییر، ۱۹۹۳؛ اودن و پیرس، ۱۹۸۳؛ باته و چاودری، ۱۹۸۵؛ گودمن و همکاران، ۱۹۶۸؛ کالیاکین و لی، ۱۹۹۵؛ مهتاب و گودمن، ۱۹۷۰؛ قابوسی و همکاران، ۱۹۷۳؛ دسای و همکاران، ۱۹۸۴؛ هرمان، ۱۹۷۸ و زینکیوویچ و همکاران، ۱۹۷۰). دیدگاه‌های مزبور مورد بررسی قرار گرفته و روشن شده است که در آنها، فرایندهای تکراری

یکی از قسمت‌های X_j X_{j-1} را روی گسل در نظر می‌گیریم و این قسمت را به میزان واحد می‌لغزانیم. به بیان دیگر، نقاط روی این بخش گسل در یک سمت را به اندازه واحد در امتداد گسل (در یک جهت مثبت اختیاری) و نقاط سمت دیگر را در همان امتداد (و در جهت عکس جهت مثبت اختیاری) جابه‌جا می‌کنیم. لازم به ذکر است که جهت‌های اختیاری مزبور به سهولت به کمک یک حل بسته موجود (مثلاً، فروند و بارت، ۱۹۷۶) قابل انتخاب است. اعمال این لغزش باعث ایجاد جابه‌جایی‌هایی در نقاط B_i روی سطح زمین می‌شود. این جابه‌جایی‌ها را با A_{ij} نشان می‌دهیم. بردار زیر را در نظر بگیریم:

$$A_j^T = \{ A_{1j} \ A_{2j} \ \dots \ A_{mj} \} \quad (4)$$

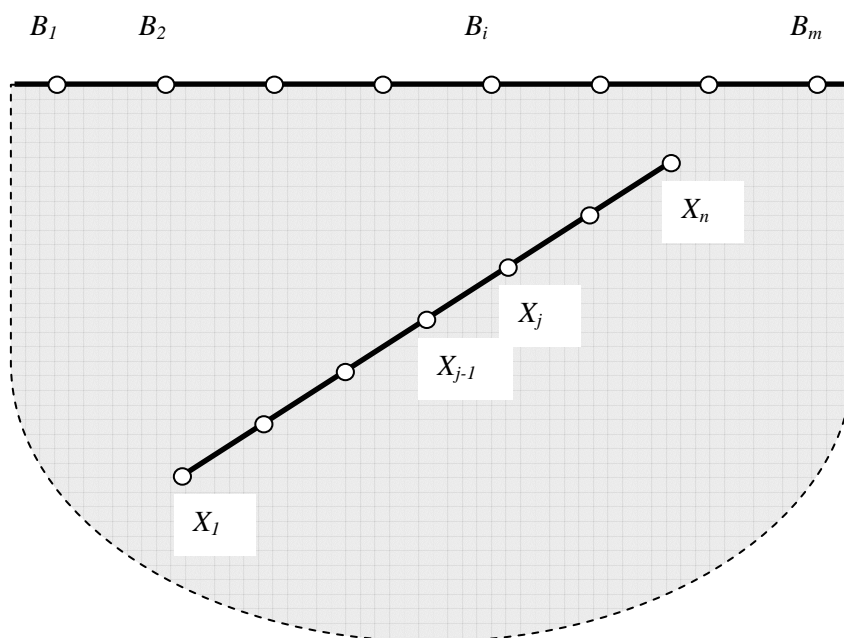
این بردار، ستون j - ام ماتریس عملگرهای تابع گرین برای گسل مربوط خواهد بود. سایر ستون‌های ماتریس نیز به همین ترتیب، از اعمال لغزش واحد در سایر قسمت‌های گسل به دست می‌آیند.

شکل‌های گسل، می‌توان مرزهای مدل را به اندازه کافی دور کرد که اثرات این لغزش مختصر در آن نواحی، قابل اغماض باشد. برای مثال، می‌توان از تغییر شکل‌های سطح زمین در فاصله بیش از ۳۰ کیلومتر از گسلی که ۱۰ سانتی‌متر جابه‌جا شده است، صرف‌نظر کرد. بنابراین، از تغییر شکل‌های افقی در مرزهای قائم دور دست و نیز از تغییر شکل‌های قائم در مرزهای افقی دور دست صرف‌نظر و این مرزها را با تکیه‌گاه‌های غلطکی به صورتی مدل می‌کنیم که به ترتیب آزادی حرکت در جهت‌های قائم و افقی (در مرزهای دور دست) فراهم شود.

۵ ماتریس عملگرهای تابع گرین

با توجه به مطالبی که اشاره شد، مسئله به شکل ساده‌ای قابل بیان است.

یک گسل درون‌صفحه‌ای با شکل هندسی و جهت‌گیری دلخواه را در عمق زمین فرض می‌کنیم (شکل ۱). این گسل را به n قسمت مساوی تقسیم می‌کنیم و نقاط تقسیم را X_j می‌نامیم. روی سطح زمین نیز m نقطه B_i را در نظر می‌گیریم.



شکل ۱. بیان طرحوار مفهوم ماتریس عملگرهای تابع گرین یک گسل درون‌صفحه‌ای. در این شکل، گسل را به n قسمت و سطح زمین را به m قسمت تقسیم کرده‌ایم.

۶ روش ماده نرم

در تحقیق حاضر از روشی ساده برای مدل‌سازی ناپیوستگی (درز) استفاده می‌شود. در این روش، در دو سمت ناپیوستگی، نواری باریک از محیط با ماده‌ای نرم مدل می‌شود. این ماده نرم دارای ضریب ارتجاعی کمی است که تنها برای جلوگیری از هم‌پوشانی دو صفحه گسل ساخته می‌شود. می‌توان این لایه را به قسمت خردشده نزدیک صفحه گسلش تشبیه کرد که دارای مقاومت برشی کمی است و می‌توان از این مقاومت صرف نظر کرد.

در واقع ایده اصلی این روش بر مبنای المان درز زینکیوویچ و همکاران (۱۹۷۰) استوار است. المان پیشنهادی ایشان، توسعه المان درز گودمن و همکاران (۱۹۶۸) به حالت غیرخطی مصالح است. المان درز زینکیوویچ، یک المان باریک و پیوسته ایزوپارامتریک (isoparametric) است که در آن یک خاصیت ساده غیرخطی مصالح برای تنش‌های نرمال و برشی در نظر گرفته شده است. همچنین فرض می‌شود که یک حالت کرنش یکنواخت در جهت ضخامت المان حاکم است. به بیان دیگر، المان مزبور یک المان استاندارد است که در آن خواص غیرخطی اعمال شده است.

از آنجاکه در تحقیق حاضر، رفتار غیرخطی درز مدنظر قرار ندارد، پارامتر مزبور از خواص المان درز زینکیوویچ حذف شده است. به دیگر سخن، دیدگاه حاکم بر المان پیشنهادی، دیدگاهی سینماتیکی (Kinematical)، و نه جنبشی (Kinetic) است، چرا که نکته مهم در این تحلیل، جابه‌جایی‌های ایجاد شده در گسل و نیز در سطح زمین، صرف نظر از عوامل ایجادکننده آنها (مانند نیروهای زمین‌ساختی و نظایر آنها) است. نکات اساسی در این المان، عبارت‌اند از تعیین ضخامت و خواص مصالحی که المان درز را تشکیل می‌دهند. در تحقیق حاضر، با سعی و خطا در چند مدل ساده که پاسخ‌های تحلیلی آنها موجود

هستند (گودمن و همکاران، ۱۹۶۸)، مرتبه مناسب برای ضریب ارتجاعی ماده نرم در حدود 10^{-4} تا 10^{-6} برابر ضریب ارتجاعی سنگ بستر تعیین شد. ضخامت لایه نرم، دلخواه و بسته به نظر کاربر است، اما نباید بیشتر از ۱۰۰ برابر جابه‌جایی واحدی باشد که در دو سوی ناپیوستگی اعمال می‌شود. در بیان کلی می‌توان گفت که هرچه ضخامت این لایه کمتر شود، دقت محاسبات بیشتر می‌شود و در عوض تعداد المان‌های لازم بیشتر و حل مسئله طولانی‌تر خواهد شد.

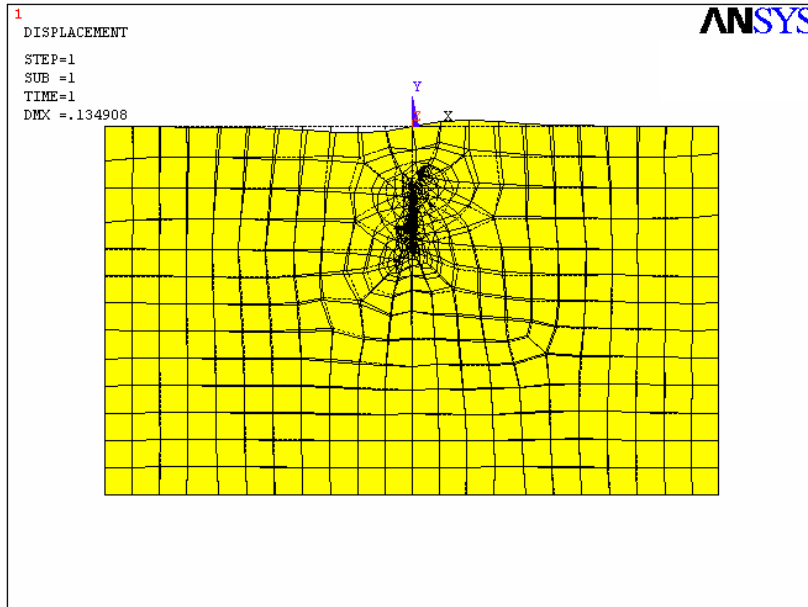
برای آگاهی از میزان خطاهای روش فوق، باید مدل پیشنهادی را با پاسخ‌های تحلیلی انطباق دهیم. این پاسخ‌ها که در (گودمن و همکاران، ۱۹۶۸) به دست آمده‌اند، تعیین‌کننده میزان صحت جواب‌های عددی هستند. در مرجع فوق روابطی برای محاسبه میزان جابه‌جایی افقی و قائم سطح زمین، در ازای جابه‌جایی معلوم در دو سوی گسل درون صفحه‌ای با زاویه شیب، طول و عمق مشخص به صورت تحلیلی آورده شده است.

با داشتن این اطلاعات، می‌توان مدل‌های ساده‌ای از گسل ساخت و با این نتایج تحلیلی، صحت آنها را آزمود. مدل‌های اولیه با زوایای متفاوت صفر، ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به امتداد قائم، و در دو حالت گسل سطحی و گسل عمقی (با عمقی به اندازه طول عمقی آن) ساخته شده‌اند و میزان جابه‌جایی سطحی زمین در ازای لغزش واحد در گسل به دست آمده است. شکل‌های ۲ تا ۵ نمونه‌ای از نتایج را نشان می‌دهند.

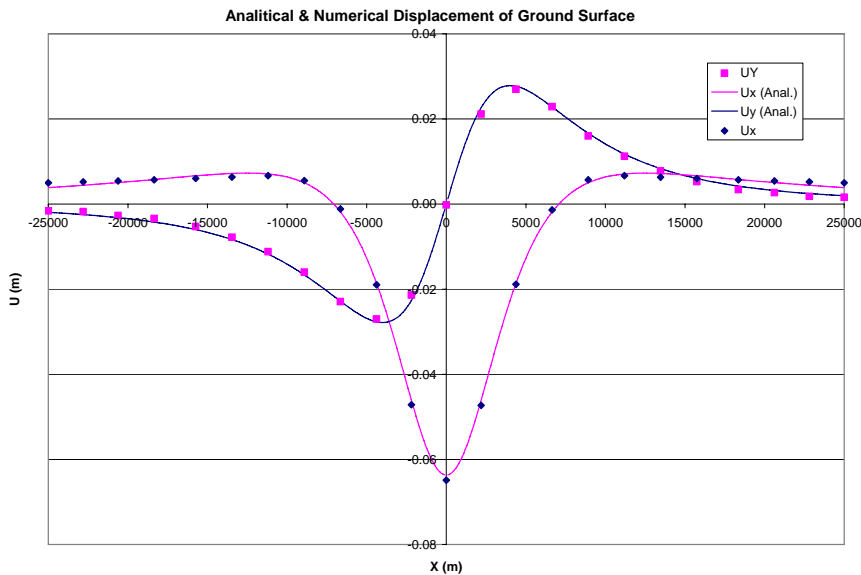
در نهایت، مدلی ساده از گسل شمال تهران به‌طور طرحوار (حالت تنش صفحه‌ای) ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفته است. اطلاعات مربوط به مشخصات گسل شامل عمق، طول و زاویه شیب، از تحقیقات آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (جایگاه، ۲۰۰۰) به دست آمده است. پس از ساخته شدن مدل، طول گسل به تعدادی قطعه تقسیم شده، و برای هر کدام از این قطعات،

تحلیل‌ها در ماتریسی مرتب شود، ماتریس عملگرهای تابع گرین برای این گسل خاص به دست می‌آید. مدل و نتایج این تحلیل در شکل‌های ۶ و ۷ و جدول ۱ آمده است.

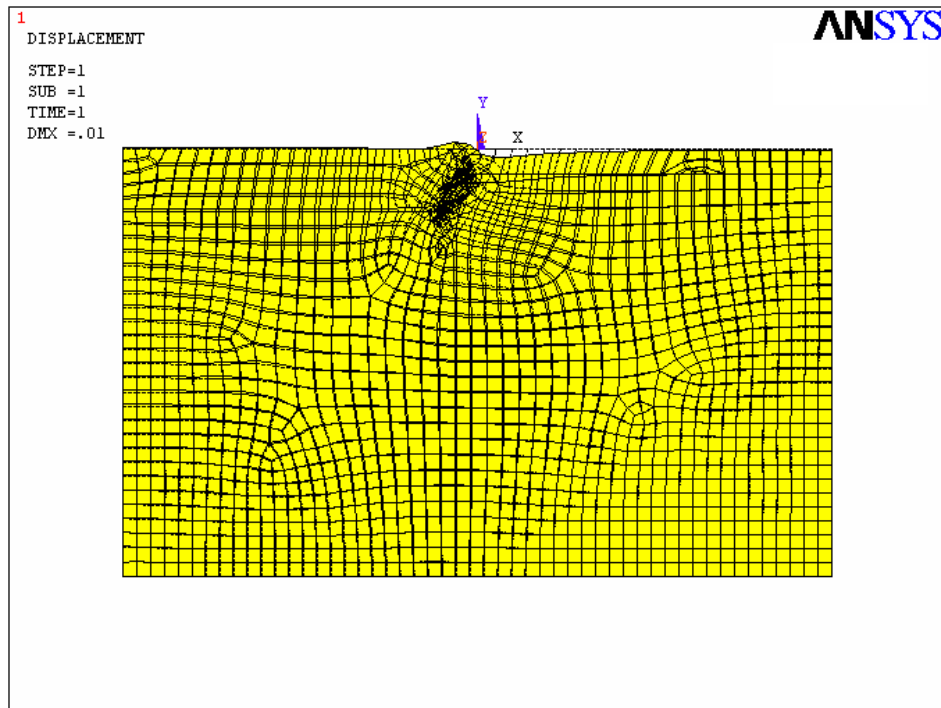
لغزشی به میزان واحد به دو سوی گسل اعمال، و نتایج جابه‌جایی‌های سطح زمین در نقاط مشخصی اندازه‌گیری شده است. اگر نتایج این



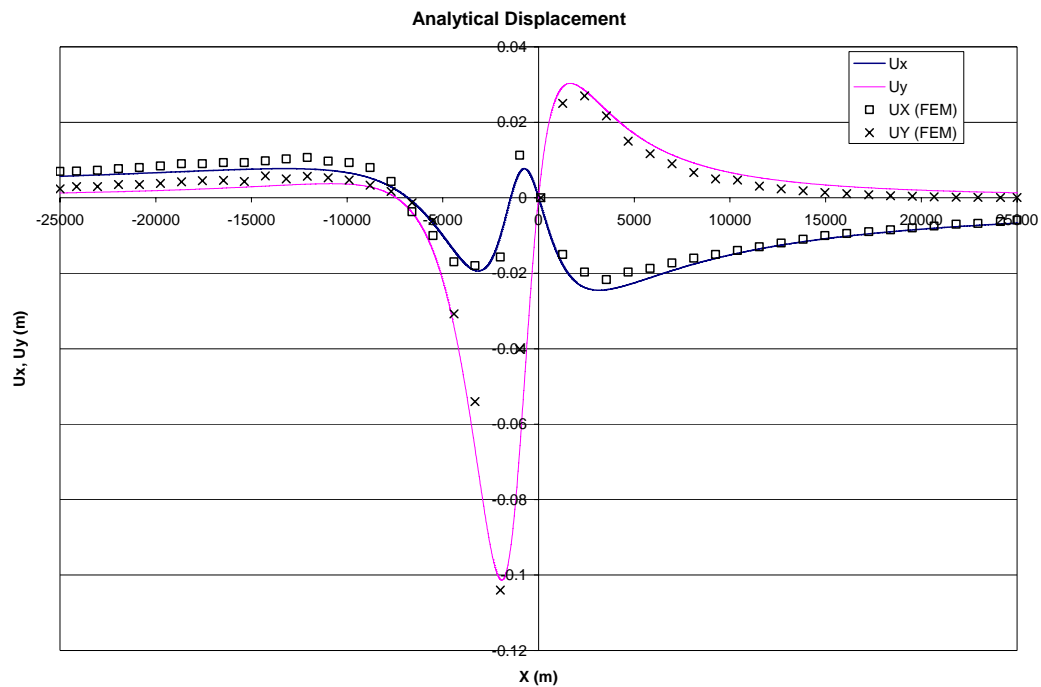
شکل ۲. یکی از مدل‌های ساده ساخته شده که در آن گسل قائم عمقی تحت بررسی است. در این شکل، شبکه‌المان‌های محدود، قبل و بعد از جابه‌جایی واحد مشاهده می‌شود.



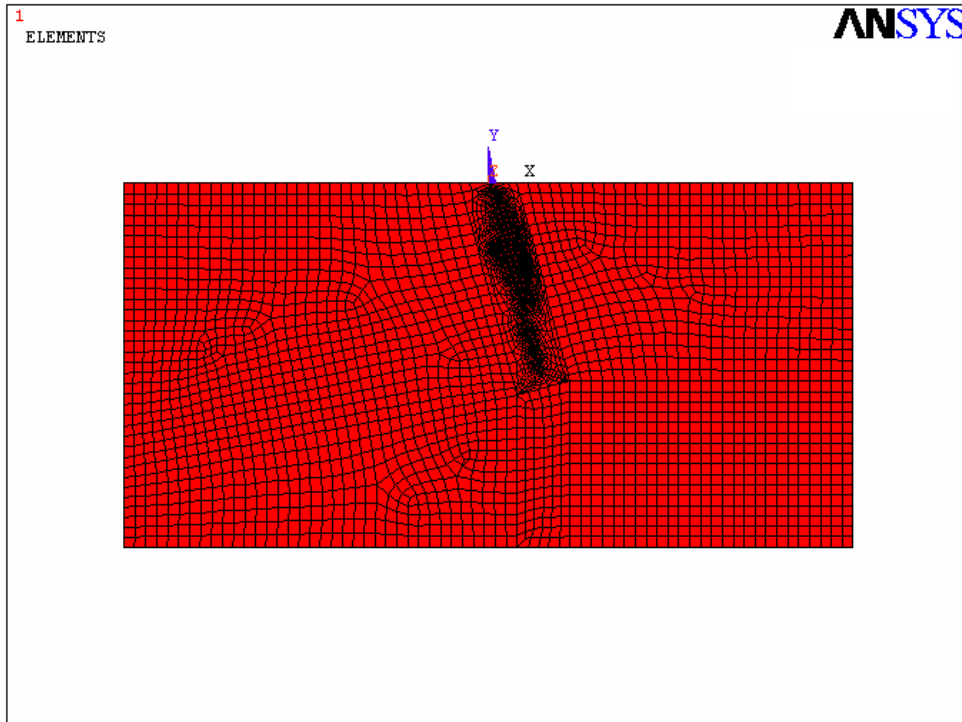
شکل ۳. نتایج حاصل از مدل گسل قائم عمقی. در این شکل تغییرشکل‌های افقی (U_x) و قائم (U_y) در سطح آزاد زمین و در حوالی گسل نشان داده شده‌اند. خطوط پیوسته نشان‌دهنده نتایج تحلیلی و نقاط منفصل نشان‌دهنده نتایج عددی مدل المان محدود هستند. مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین نتایج عددی و تحلیلی وجود دارد.



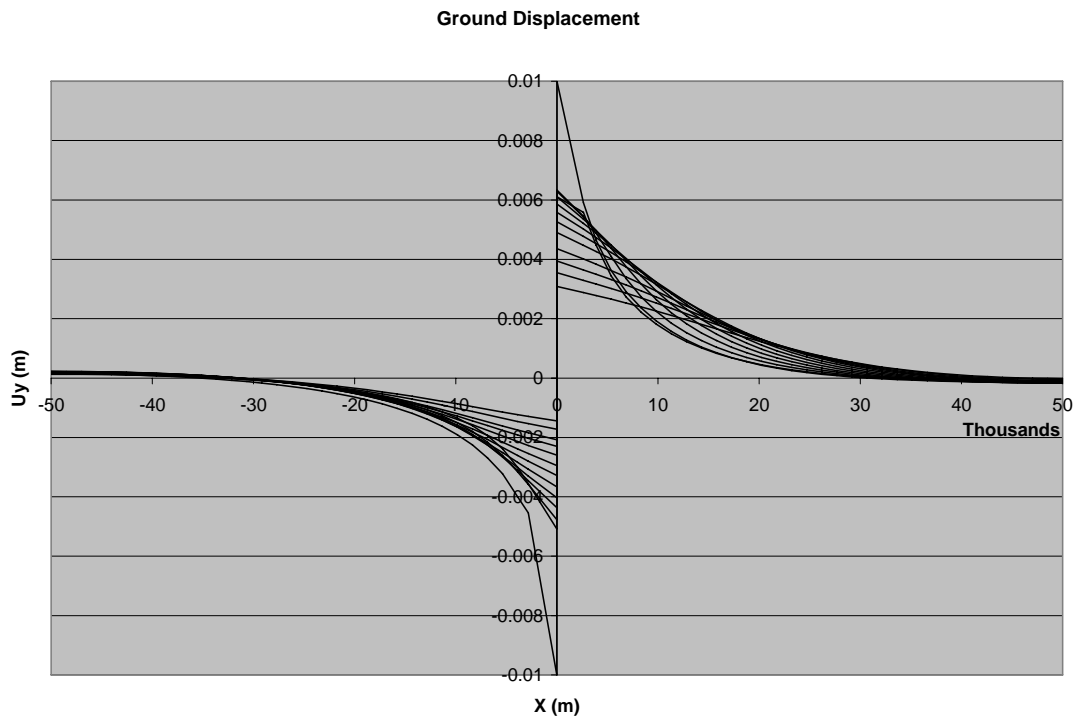
شکل ۴. مدل گسل ۳۰ درجه عمقی، قبل و بعد از ایجاد جابه‌جایی واحد در سطح گسل.



شکل ۵. نتایج حاصل از مدل گسل ۳۰ درجه عمقی. در این شکل تغییر شکل‌های افقی (U_x) و قائم (U_y) در سطح آزاد زمین و در حوالی گسل نشان داده شده‌اند. خطوط پیوسته نشان‌دهنده نتایج تحلیلی و نقاط منفصل نشان‌دهنده نتایج عددی مدل المان محدود هستند. مشاهده می‌شود که نتایج عددی تا حدود قابل قبولی به نتایج تحلیلی نزدیک هستند.



شکل ۶. مدل المان محدود گسل شمال تهران.



شکل ۷. جابه‌جایی‌های قائم سطح زمین در مدل المان محدود گسل شمال تهران. در این شکل، ۱۳ نمودار مشاهده می‌شود که به ترتیب نشان‌دهنده جابه‌جایی‌های سطح زمین در ازای لغزش واحد در هر کدام از قسمت‌های گسل هستند.

جدول ۱. ماتریس عملگرهای تابع گرین برای گسل مفروض شمال تهران. ستونهای ماتریس نشان‌دهنده قسمت لغزش داده شده و سطرها نشان‌دهنده نقاط کلیدی روی زمین می‌باشند.

X (m)	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 9	Zone 10	Zone 11	Zone 12	Zone 13
-11321.0	-0.00163	-0.00114	-0.00127	-0.00135	-0.00141	-0.00141	-0.00137	-0.00131	-0.00123	-0.00114	-0.00107	-0.00091	-0.00078
-9833.0	-0.00191	-0.00135	-0.00151	-0.00160	-0.00165	-0.00165	-0.00158	-0.00151	-0.00139	-0.00129	-0.00120	-0.00102	-0.00087
-8345.3	-0.00225	-0.00161	-0.00180	-0.00190	-0.00194	-0.00191	-0.00182	-0.00171	-0.00157	-0.00144	-0.00133	-0.00113	-0.00096
-6857.6	-0.00268	-0.00194	-0.00216	-0.00225	-0.00226	-0.00220	-0.00207	-0.00193	-0.00176	-0.00160	-0.00147	-0.00124	-0.00105
-5370.0	-0.00322	-0.00238	-0.00261	-0.00266	-0.00263	-0.00251	-0.00234	-0.00216	-0.00195	-0.00176	-0.00162	-0.00135	-0.00114
-3882.3	-0.00400	-0.00301	-0.00315	-0.00311	-0.00301	-0.00284	-0.00261	-0.00238	-0.00214	-0.00192	-0.00175	-0.00146	-0.00123
-2834.1	-0.00454	-0.00356	-0.00358	-0.00346	-0.00330	-0.00307	-0.00280	-0.00254	-0.00227	-0.00203	-0.00185	-0.00154	-0.00129
-5.2	-0.01000	-0.00508	-0.00477	-0.00436	-0.00403	-0.00366	-0.00328	-0.00294	-0.00260	-0.00230	-0.00208	-0.00172	-0.00144
5.2	0.01000	0.00611	0.00633	0.00629	0.00611	0.00587	0.00558	0.00527	0.00490	0.00436	0.00395	0.00355	0.00309
2612.6	0.00591	0.00558	0.00546	0.00543	0.00536	0.00521	0.00502	0.00477	0.00448	0.00401	0.00365	0.00329	0.00288
3882.3	0.00464	0.00447	0.00488	0.00497	0.00497	0.00488	0.00473	0.00453	0.00427	0.00384	0.00350	0.00317	0.00278
5370.0	0.00362	0.00344	0.00410	0.00437	0.00448	0.00447	0.00438	0.00423	0.00401	0.00363	0.00332	0.00302	0.00266
6857.6	0.00291	0.00273	0.00335	0.00375	0.00396	0.00403	0.00401	0.00391	0.00374	0.00340	0.00313	0.00286	0.00253
8345.3	0.00236	0.00221	0.00273	0.00316	0.00343	0.00358	0.00362	0.00358	0.00346	0.00317	0.00294	0.00270	0.00240
9833.0	0.00192	0.00181	0.00225	0.00264	0.00294	0.00313	0.00323	0.00324	0.00316	0.00293	0.00273	0.00253	0.00226
11321.0	0.00157	0.00149	0.00185	0.00220	0.00249	0.00271	0.00284	0.00290	0.00286	0.00268	0.00252	0.00235	0.00211

۷ جمع‌بندی

لغزش‌های واحد معلوم در آورد و با توجه به خطی بودن تحلیل و کشسان و همگن بودن سنگ بستر، با استفاده از اصل برهم‌نهی، میزان جابه‌جایی نقاط متفاوت سطح زمین را به دست آورد.

اما نتیجه بهتر و کاربردی‌تری که از ماتریس به دست آمده می‌توان گرفت، حل مسئله معکوس است. به این معنا که با داشتن جابه‌جایی‌های سطحی (که با ابزار دقیق و به طور مستمر قابل اندازه‌گیری است) و با معکوس کردن ماتریس پیش‌گفته، می‌توان میزان و محل لغزش ایجاد شده در گسل را محاسبه کرد. این کاربرد می‌تواند به بخشی از نیازهای ما در مورد زلزله‌های محتمل آینده (مثلاً در تهران) پاسخ دهد. با داشتن این ماتریس و معکوس آن، می‌توان نقاط غیرقفل‌شده گسل‌های تهران را که در حال لغزش دائم هستند، یافت و با استفاده از آن محل احتمالی نواحی قفل‌شده را که سرچشمه زلزله‌های بزرگ خواهند بود، پیش‌بینی کرد. این روش قبلاً برای ناحیه ژاپن مرکزی مورد استفاده قرار گرفته است (خاجی و هیگاشیهارا، ۱۳۸۴ ب).

منابع

خاجی، ن، ۱۳۸۳. کاربرد روش گره مشترک برای مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها در محیط پیوسته. مجله فنی و

هدف از این تحقیق، به دست آوردن ماتریس عملگرهای تابع گرین برای گسل‌های درون‌صفحه‌ای است. این کار با روش عددی المان‌های محدود صورت گرفته و فن ساده‌ای به نام روش ماده نرم برای مدل کردن ناپیوستگی موجود در سنگ بستر عرضه شد. در این تحقیق یکی از گسل‌های تهران به صورت فرضی تحلیل و ماتریس مفروض برای این گسل به دست آمد که در جدول ۱ مقادیر آن عرضه شد. این روش می‌تواند برای سایر گسل‌های مشابه نیز به کار رود. از نقطه‌نظر ریاضی، ماتریس مزبور بیانگر یک نگاشت (mapping) بین دو فضا است: فضای سرچشمه (source space) و فضای پاسخ (response space). فضای سرچشمه، رژیم لغزش گسل، و فضای پاسخ، تغییرشکل‌های سطح زمین است که با داده‌های ژئودزی اندازه‌گیری می‌شود. ماتریس به دست آمده، در واقع رابط بین لغزش‌های گسل و جابه‌جایی‌های سطح زمین به حساب می‌آید. همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، با داشتن این ماتریس می‌توان هر لغزشی در گسل را به جابه‌جایی‌های سطح زمین تبدیل کرد. به این صورت که لغزش به میزان دلخواه را که در نقاط دلخواهی از گسل رخ می‌دهد، به صورت ترکیبی خطی از

- Area in the Islamic Republic of Iran. Final Report.
- Kaliakin V.N., and Li J., 1995, Insight into deficiencies associated with commonly used zero-thickness interface elements. *Comput. Geotech.*, **17**, 225-252.
- Kumar, P., 2000, Finite element method computations in unbounded domains with nonzero but uniform far field decay. *Comput Struct.*, **75**, 457-462.
- Mahtab M.A., and Goodman R.E., 1970, Three-dimensional finite element analysis of jointed rock slopes. *Proceedings of the 2nd Congress of the International Society of Rock Mechanics, Belgrad*, pp. 353-360.
- Oden J.T., and Pires E.B., 1983, Nonlocal and nonlinear friction laws and variational principles for contact problems in elasticity. *J. Appl. Mech., ASME*, **50**, 67-76.
- Simo J.C., and Laursen T.A., 1992, An augmented lagrangian treatment of contact problems involving friction. *Comput Struct.*, **42**, 97-116.
- Simo J.C., Wriggers P., and Taylor R.L., 1985, A perturbed lagrangian formulation for the finite element solution of contact problems. *Comput. Method. Appl. Mech. Eng.*, **50**, 163-180.
- Zienkiewicz O.C., Best B., Dullage C., and Stagg K.G., 1970, Analysis of non-linear problems in rock mechanics with particular reference to jointed rock systems. *Proceedings of the 2nd Congress of the International Society of Rock Mechanics, Belgrad*, pp. 501-508.
- مهندسی مدرس، ۱۵، ۳۷-۴۹.
- خاجی، ن. و هیگاشیهارا، ه.، ۱۳۸۴ الف. دیدگاهی نوین در مدل‌سازی عددی تغییرشکل‌های پوسته زمین، قسمت اول: نظریه. *مجله فنی و مهندسی مدرس*، ۱۹، ۱۳-۳۰.
- خاجی، ن، هیگاشیهارا، ه، ۱۳۸۴ ب. دیدگاهی نوین در مدل‌سازی عددی تغییرشکل‌های پوسته زمین، قسمت دوم: کاربرد. *مجله فنی و مهندسی مدرس*، ۱۹، ۳۱-۵۱.
- Abdel-Fattah, T.T., Hodhod, H.A., and Akl, A.Y., 2000, A novel formulation of infinite elements for static analysis. *Comput Struct.*, **77**, 371-379.
- Bathe K.J., and Chaudhary A., 1985, A solution method for planar and axisymmetric contact problems. *Int. J. Numer Methods in Eng.*, **21**, 65-88.
- Cescotto S., and Charlier R., 1993, Frictional contact finite elements based on mixed variational principles. *Int. J. Numer Meth Eng.*, **36**, 1681-1701.
- Desai, C.S., Lightner, J.G., Siriwardane, H.J., and Zaman, M.M., 1984, Thin-Layer Element for Interfaces and Joints. *Int Numer Anal Met Geomech*, **8**, 19-43.
- Eterovic A.L., and Bathe K.J., 1991, On the treatment of inequality constraints arising from contact conditions in finite element analysis. *Comput Struct*, **40**, 203-209.
- Freund, L.B., Barnett, D.M., 1976, A Two-Dimensional Analysis of Surface Deformation Due to Dip-Slip Faulting. *B. Seismol Soc Am.*, **66**, 667-675.
- Ghaboussi J., Wilson E.L., and Isenberg J., 1973, Finite element for rock joints and interfaces. *J. Soil Mech Found Div., ASCE*, **99**, 833-848.
- Goodman R.E., Taylor R.L., and Brekke T.L., 1968, A model for the mechanics of jointed rock. *J. Soil Mech. Found Div., ASCE*, **99**, 637-659.
- Herrmann L.R., 1978, Finite element analysis of contact problems. *J. Eng. Mech Div., ASCE*, **104**, 1043-1059.
- Huang, B.S. and Yeh, Y.T., 1992, Source geometry and slip distribution of the April 21, 1935 Hsinchu-Taichung, Taiwan earthquake. *Tectonophysics*, **210**, 77-90.
- JICA & Tehran Municipality, 2000, The Study on Seismic Microzoning of the Greater Tehran