

## بررسی مکان‌یابی زمین‌لرزه‌های محلی به روش غیرخطی و کاربرد آن در تعیین محل زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی $M_n \geq 4.0$ در ناحیه البرز مرکزی (۲۰۰۶-۲۰۱۰)

وحید ملکی<sup>۱\*</sup>، ظاهر حسین شمالی<sup>۲</sup> و محمدرضا حاتمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۰/۷/۱۶، پذیرش نهایی: ۹۱/۴/۱۳)

### چکیده

روش تعیین محل غیرخطی با بهره‌گیری از حل احتمالاتی و تشکیل تابع چگالی احتمال آن، پاسخ قابل قبول‌تر و دقیق‌تری را در مقایسه با روش‌های معمول در تعیین محل زمین‌لرزه‌ها به دست می‌دهد. در این تحقیق با اجرای آزمایش‌های مصنوعی، تأثیر محدودیت‌های پوشش ایستگاهی بر روش غیرخطی بررسی می‌شود. همچنین تأثیر افزایش گپ آزمون‌ی و حذف ایستگاه‌های نزدیک و تأثیر آن بر تعیین محل زمین‌لرزه‌ها شبیه‌سازی می‌شود. در ادامه نیز با استفاده از روش غیرخطی، ۱۶ زمین‌لرزه رخ داده در ناحیه البرز مرکزی تعیین محل می‌شود و نتایج با تعیین محل زمین‌لرزه‌ها به روش خطی شده که از سوی مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IGUT) و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) که به صورت معمول صورت می‌گیرد، مقایسه می‌شود. همچنین مقاطع عمقی زمین‌لرزه‌های مکان‌یابی شده در این تحقیق با نتایج مراکز ذکر شده به منظور بررسی کیفی نتایج، مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: تعیین محل، روش غیرخطی، گپ آزمون‌ی، تابع چگالی احتمال، البرز مرکزی

## Analysis of local earthquake relocation method using a nonlinear method: an application to relocate earthquakes with $M_n \geq 4.0$ in Central Alborz region (2006-2010)

Maleki, V.<sup>1</sup>, Shomali, Z. H.<sup>2</sup> and Hatami, M. R.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 08 Oct 2011, Accepted: 03 Jul 2012)

### Abstract

Earthquake location process has an important role in any seismological applications including seismic tomography etc. The relationship between the travel-time of seismic phases and earthquake hypocenter (latitude, longitude, depth) and origin-time is non-linear and many different linearized methods have been implemented in recent years to linearize the relationship. The principal underlying linearized methods is given by Geirger (1912) based on the Taylor series. However, attempts have been made to incorporate higher terms of the Taylor series in earthquake location process (e.g. Thurber, 1985).

Using more higher-terms of the Taylor series provides more constrained solution at the expense of computation costs. Full-nonlinear earthquake location algorithm was also developed and discussed earlier e.g. by Tarantola and Vallette (1982) and Tranatola (1987). In this algorithm, the location of earthquake is defined using Probability Density Functions (PDF) of all possible points around the hypocenter. In this study we use a nonlinear probabilistic method based on global search methods. In this method, the calculations of the partial derivatives are not required, and there is a higher probability to converge to the global minima due to the nonlinearity of the problem. (E.g. Lomax et al, 2008). The optimal solution in this method can be found using different algorithms such as Metropolis -Gibs (Metropolis et al, 1953), grid search (e.g. Sambridge and Mosegaard, 2002) and Octtree (oct-tree) Importance sampling algorithm (Lomax and Curtis, 2001). The oct-tree importance sampling algorithm is very faster, more complete and simple in comparison to the other methods e.g. grid search and metropolis-Gibs algorithms. The application using oct-tree algorithm is provided to produce accurate, efficient and complete mapping of Probability Density Functions (PDFs) (e.g. Lomax and Curtis, 2001). In this study we use the oct-tree importance sampling to find the optimized solution.

In this study, we apply non-linear earthquake location method developed by Lomax et al. (2000) for local earthquakes during 2006-2010, for magnitude  $M_n \geq 4$  occurred in the Central Alborz region. Non-linear location method is based on a posterior Probability Density Functions (PDF) determined for the model parameters. This function represents a complete probabilistic solution for the earthquake location problem including information on the uncertainties due to phase-picking uncertainties, calculated travel-time and the network geometry. We perform different synthetic tests to evaluate the performances of non-linear method, where the location problem is ill-conditioned due to station geometry and phase picking error. In this regard we test the effect of azimuthal gap and distance to the nearest station using various synthetic tests conducted in this research.

In the synthetic tests conducted, we consider 4 events in different situations located outside of an assumed seismic network. The seismic network includes 8 stations with station-spacing of order of 15 km. The azimuthal gap of the events varies in the range of 225-317 degree. In these tests we also add noise with Gaussian distribution in arrival-times, in order to investigate the performance of the nonlinear location method in the presence of large azimuthal gap and noise in the data simultaneously. In other synthetic-tests to consider the performance of nonlinear location method due to distance of nearest station to earthquake, we perform tests using different situations in presence of noise in the data with different levels in arrival times. In first case we consider an event in a dense network with station spacing of order of 15 km, and in second case we expand the network to 150 km station spacing.

In this study to relocate earthquakes occurred in the Central Alborz region during 2006-2010, for magnitude  $M_n \geq 4$ , we have used the data set of Iranian Seismological Center (IRSC), including the arrival times of P and S phases. In this regard we used three sub networks, Tehran, Sari and Semnan belonging to the IRSC network. Also in order to enhance the station coverage especially in the southern part of the Alborz region, we added data-set of two other stations from Isfahan sub network, namely KLH and ZEF stations.

Finally, we show the robustness of the non-linear location algorithm in the presence of outliers by analyzing the shape, size and position of the 68% confidence ellipsoid that can be calculated from the PDF to track the changes in the distribution of the PDF with changing station geometry.

We find that the non-linear method is robust in the presence of high azimuthal gap e.g.

300 degree and high Gaussian errors up to 1.0 sec, and is able to locate earthquakes with error less than 5 km. We relocate 16 earthquake occurred in the Central Alborz region with  $M_n \geq 4.0$  between 2006 -2010. Despite of high azimuthal gap and high station spacing in the dataset used in this study, 10 earthquakes located with horizontal error less than 3 km. In order to verify the quality of results, we compare the non-linear location results with those reported by IGUT and IIEES. The comparison shows that the nonlinear relocation solutions are, in most of cases, closer to IGUT solutions.

**Key words:** Earthquake location, Non-linear, Central Alborz, Probability Density Functions

## ۱ مقدمه

برنامه، برنامه‌های رایانه‌ای دیگری طراحی شدند که شکل اصلاح شده اصول گایگر به شمار می‌روند. برنامه Hypoellips که لاهر (۱۹۸۹) معرفی کرد یکی از این برنامه‌ها است که با نمایش خطای تعیین محل زمین‌لرزه‌ها به شکل بیضوی‌های خطای با سطح اعتماد ۶۸٪ (به جای یک عدد منحصر به فرد)، نمایش قابل قبول‌تری را از خطای مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها به دست داده است. یکی دیگر از برنامه‌های مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها به منظور مرتفع کردن مشکلات اساسی در اصول گایگر، برنامه HypoDD (والدهاوسر و الزورت، ۲۰۰۰) است. این برنامه با استفاده از تابع اختلاف زمانی دو گانه (Difference) حساسیت روش‌های خطی شده را به مدل سرعتی کاهش می‌دهد (والدهاوسر و الزورت، ۲۰۰۰). اما در این روش محدودیت‌هایی برای استفاده از نظریه اختلاف زمانی دو گانه وجود دارد که از مهم‌ترین آنها نیاز به وجود زمین‌لرزه‌های نزدیک به هم و پوشش آزمایشی مناسب است. با قابلیت دسترسی به رایانه‌هایی با سرعت بیشتر، تربر (۱۹۸۵) از جملات بیشتری در بسط تیلور معادلات گایگر استفاده کرد و روشن ساخت که تعیین عمق کانونی زمین‌لرزه‌های با عمق کم در مقایسه با فاصله رومرکزی، بدون استفاده از روابط غیرخطی امکان‌پذیر نیست. استفاده از جملات بالاتر در روش‌های گایگر نیازمند محاسبه مشتقات مراتب بالا است. در استفاده از مدل‌های سرعتی سه‌بُعدی این محاسبات بسیار پیچیده

نخستین روش‌های تعیین محل زمین‌لرزه‌ها بر اساس روش گرافیکی استفاده از اختلاف زمانی میان فازهای P و S در حداقل سه ایستگاه و منطبق کردن دایره‌هایی با شعاع (S-P) به مرکز ایستگاه‌ها بود (میلنه، ۱۸۸۶). از ۱۹۷۲ با ظهور برنامه‌های رایانه‌ای در روش‌های تعیین محل زمین‌لرزه‌ها عمدتاً از روش‌های خطی شده بر پایه معادلات گایگر (۱۹۱۲) استفاده می‌شود و تاکنون الگوریتم‌های زیادی برای تعیین محل زمین‌لرزه‌ها ایجاد شده است، که اغلب بر اساس اصول گایگر عمل می‌کنند. اولین قدم در این روش‌ها حدس زدن یک نقطه به منزله مکان زمین‌لرزه و زمان وقوع آن است،  $(X_0, Y_0, Z_0, t_0)$ . در روش‌های خطی شده فرض می‌شود که مکان واقعی زمین‌لرزه به اندازه کافی به مکان حدس زده شده اولیه نزدیک باشد، بنابراین اختلاف میان زمان رسیدهای محاسبه شده و مشاهده شده از طریق روش‌های کمترین مربعات (least squares) کمینه می‌شود. برنامه‌های رایانه‌ای زیادی بر اساس روش‌های خطی شده عرضه شده است. بعضی از آنها اکنون نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند، مانند برنامه Hypo71 که لی و لاهر (۱۹۷۲) عرضه کردند و نخستین برنامه‌ای است که بر مبنای اصول گایگر (۱۹۱۲) نوشته شده است. به منظور رفع مشکلات اساسی که در این برنامه وجود داشت مانند بروز خطای تعیین محل زمین‌لرزه‌ها، حساسیت زیاد به مدل سرعتی مورد استفاده و وابستگی پاسخ نهایی به مکان حدس زده شده در شروع الگوریتم

بالاتر این سری، دقت نهایی حل مسئله تعیین محل کمتر خواهد شد.

مسئله تعیین محل می‌تواند به صورت کاملاً غیرخطی براساس حل احتمالاتی و روش جست‌وجوی شبکه‌ای صورت گیرد نظیر روش لوماکس و همکاران، (۲۰۰۰). اساس روش احتمالاتی، ساختن تابع چگالی احتمال (probability density function, PDF) و یافتن احتمال بیشینه (maximum likelihood) آن است. برای حالت عمومی یک مسئله احتمالاتی به صورت خلاصه می‌توان نوشت؛  $d = \theta(d, p) \cdot p$  که در آن  $d$  بردار داده‌ها و  $p$  بردار پارامترهای مجهول و  $\theta$  بیان‌کننده روابط میان داده‌ها و پارامترهای مجهول است که تابع شباهت (likelihood function) نامیده می‌شود. حل احتمالاتی برای یافتن پارامترهای مجهول مسئله با انتگرال‌گیری روی داده‌ها به شکل زیر ممکن می‌شود (تارانتولا و والت، ۱۹۸۲).

$$\sigma_p(p) = \rho_p(p) \int_d \frac{\rho_d(d) \cdot \theta(d|m)}{\mu_d(d)} \partial d \quad (1)$$

که در آن،  $\rho_d(d)$  و  $\rho_p(p)$  به ترتیب تابع چگالی اطلاعات اولیه (priori information) بر روی داده‌ها و تابع چگالی پارامترهای مجهول مدل هستند.  $\mu_d(d)$  نیز توصیف‌کننده وضعیت کلی اطلاعات (information null) است. پارامترهای مجهول مدل همان مکان کانونی (hypocenter) و زمان وقوع زمین‌لرزه هستند. رابطه ۱ بیان‌کننده احتمال وقوع زمین‌لرزه در هر نقطه از فضای مکانی و زمانی است، که به صورت انتگرال‌گیری تابع چگالی (PDF) روی داده عرضه شده است.

در این روش یافتن مکان کانونی زمین‌لرزه‌ها مستقل از زمان وقوع زمین‌لرزه است، که این عمل باعث می‌شود تعداد مجهولات مسئله تعیین محل از چهار به سه مجهول کاهش یابد. یافتن زمان وقوع زمین‌لرزه در این روش از

می‌شود تا جایی که مسئله تعیین محل را با مشکل روبه‌رو می‌کند. به‌منظور رهایی از مشکلات مشتقات مراتب بالا، تارانتولا و والت (۱۹۸۲) روشی مطرح ساختند که در آن مسئله تعیین محل زمین‌لرزه‌ها با روابط کاملاً غیرخطی و بدون نیاز به استفاده از مشتقات بالاتر صورت می‌گیرد. این روش براساس ساختن تابع توزیع احتمال برای مکان زمین‌لرزه و یافتن نقطه‌ای با بیشینه احتمال در آن است. مبانی نظری روش تعیین محل غیرخطی احتمالاتی را تارانتولا و والت (۱۹۸۲) مطرح ساختند و تارانتولا (۱۹۸۷) آن را مورد بازبینی کلی قرار داد. بسیاری از تحقیقات لرزه‌زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی از روش تعیین محل احتمالاتی استفاده کرده‌اند (ویتلینگر و همکاران، ۱۹۹۳؛ ویلاردو و همکاران، ۱۹۹۶؛ کالورت و همکاران، ۱۹۹۷؛ جونز و استوارت، ۱۹۹۷؛ گرستا و همکاران، ۱۹۹۸). روش غیرخطی تعیین محل زمین‌لرزه‌ها بر مبنای نظریه حل معکوس احتمالاتی تارانتولا و والت (۱۹۸۲) و تارانتولا (۱۹۸۷)، را لوماکس و همکاران (۲۰۰۰) معرفی کردند که در تحقیق حاضر نیز از این روش استفاده شده است.

## ۲ روش غیرخطی برای تعیین محل زمین‌لرزه‌ها

تعیین محل زمین‌لرزه‌ها، ۴ پارامتر مجهول دارد.  $(X, Y, Z)$  پارامترهای مکانی و  $t$  زمان وقوع (time-origin) زمین‌لرزه است. تعیین این پارامترها معمولاً بر اساس تحلیل منطبق نبودن (miss-fit) میان زمان رسیدهای مشاهده شده در هر ایستگاه و زمان رسیدهای پیش‌بینی شده با استفاده از یک مدل سرعتی صورت می‌گیرد. یافتن این پارامترهای مجهول منجر به حل یک مسئله معکوس می‌شود که می‌تواند با استفاده از اعمال تکرار (iteration) و یا به صورت مستقیم و با حل تحلیلی صورت گیرد. در روش‌های تکرار اغلب از معادلات خطی شده حاصل از بسط سری تیلور استفاده می‌شود. در این روش‌ها به خاطر استفاده از جمله اول سری تیلور و از دست دادن جمله‌های

(رابطه ۴).

$$g(X, Y, Z, T) = [\tilde{t}_i - \hat{h}_i(X, Y, Z, T)]^T (C_T + C_i)^{-1} [\tilde{t}_i - \hat{h}_i(X, Y, Z, T)] \quad (4)$$

که در آن،

$$\tilde{t}_i = t_i - \frac{\sum_j (C_T + C_i)_j t_j}{\sum_j (C_T + C_i)_j}, \quad \hat{h}_i = h_i - \frac{\sum_j (C_T + C_i)_j h_j}{\sum_j (C_T + C_i)_j}$$

$\tilde{t}_i$  و  $\hat{h}_i$  به ترتیب بردار زمان رسیده‌های مشاهده شده و محاسبه شده منهای وزن میانگین محاسبه شده آنها است. در رابطه (۴)، داده‌های مشاهده‌ای شامل مجموعه‌ای از زمان رسیده‌های مشاهده شده در ایستگاه‌ها و  $h_i$  زمان سیرهای محاسبه شده از روابط نظری را می‌دهند.  $C_T$  بیان‌کننده دانسته‌هایی در باره عدم قطعیت در زمان رسیده‌ها مانند خطای خوانش فاز و  $C_i$  بیان‌کننده دانسته‌هایی از عدم قطعیت در محاسبه زمان سیرها از مدل سرعتی مورد استفاده است.

خطای تعیین پارامترهای مکان‌یابی داده شده به روش غیرخطی با محاسبه یک ماتریس  $3 \times 3$  کواریانس روی نقاط پراکنده PDF داده می‌شود. در این ماتریس ریشه دوم عضوهای روی قطر اصلی معرف میزان خطا و عضو غیر قطر اصلی شکل و جهت‌گیری خطا را نمایش می‌دهند که معمولاً به صورت یک بیضوی با سطح اعتماد ۶۸٪ محاسبه می‌شود. اما به لحاظ ماهیت غیرخطی مسئله تعیین محل زمین‌لرزه و وجود خطاهای غیرمستقل از یکدیگر، (مانند استفاده از مدل سرعتی و پوشش ایستگاهی نامناسب) تابع توزیع احتمال (PDF) ممکن است به شکل غیرنرمال و نامنظم باشد (تارانتولا و والت، ۱۹۸۲) که این حالت باعث شود در همه نقاط PDF، کمینه‌های محلی (local minimum) به وجود آیند، که یافتن پاسخ نهایی بهینه (global minimum) یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش‌های تعیین محل در این روش است. این مسئله نیاز به ارزیابی دقیق همه نقاط پراکنده PDF در سرتاسر شبکه

حل معکوس خارج شده است و پس از یافتن پاسخ با بیشینه احتمال برای مکان زمین‌لرزه می‌توان با محاسبه مستقیم از زمان سیرها آن را محاسبه کرد. در نتیجه با انتگرال‌گیری تابع چگالی احتمال روی زمان وقوع آن، احتمال نهایی برای مکان کانونی زمین‌لرزه به دست خواهد آمد. بدیهی است نتیجه این انتگرال، مستقل از زمان است. این انتگرال تابع چگالی حاشیه‌ای (marginal density function) نامیده می‌شود، (تارانتولا و والت، ۱۹۸۲) و به صورت زیر داده می‌شود.

$$\sigma_p(X, Y, Z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma_p(X, Y, Z, T) .dT \quad (2)$$

حل نهایی رابطه (۲) که به صورت گسترده تر در رابطه (۳) آمده است، دربرگیرنده همه عدم قطعیت‌ها روی پارامترهای مدل و داده‌های مشاهده‌ای است، که این عدم قطعیت‌ها درحکم ماتریس‌های کواریانس مدل و داده‌ها در حل نهایی تاثیرگذار خواهند بود. فرض اساسی این روش این است که عدم قطعیت‌ها دارای توزیع زنگوله‌ای (Gaussian) و یکنواخت در سراسر داده‌ها باشند. نتیجه نهایی که منجر به تعیین مکان زمین‌لرزه می‌شود از یافتن مقدار بیشینه احتمال میسر می‌شود.

$$\sigma_p(X, Y, Z, T) = k \rho(x) \exp\left(-\frac{1}{2} g(x)\right) \quad (3)$$

رابطه (۳)، برای هر نقطه و یک بازه که شامل همه زمان وقوع‌های ممکن است، تابع چگالی احتمال نهایی را محاسبه می‌کند. (تارانتولا و والت، ۱۹۸۲). همچنین می‌توان در رابطه (۲) با انتگرال‌گیری روی زمان وقوع T تابع نهایی توزیع احتمال را برای مختصات کانونی زمین‌لرزه به دست آورد. در رابطه (۳)، k فاکتور نرمال‌ساز است و  $\rho(x)$  یک تابع چگالی احتمال از اطلاعات اولیه روی پارامترهای مدل و  $g(x)$  تابعی برای کمینه کردن منطبق نبودن داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای به شکل نرم ۲ (least squares) است که در آن پارامتر x حالت کلی مسئله است و همه مجهولات تعیین محل را در بر دارد

سطح نوفه متفاوت، بررسی شده است.

#### ۴ تاثیر پوشش آزیموتی در تعیین محل زمین لرزه‌ها به روش غیرخطی

یک شبکه شامل ۸ ایستگاه با میانگین فاصله ۱۵ کیلومتر از یکدیگر در نظر گرفته شده است. به منظور مشاهده تاثیر پوشش آزیموتی، ۴ زمین لرزه در خارج از شبکه ایستگاهی و به ترتیب دارای پوشش‌های آزیموتی ۲۲۵، ۲۷۵، ۳۰۰ و ۳۲۰ درجه و بدون اضافه کردن نوفه در زمان رسیده‌ها در نظر گرفته شده است (شکل ۱). سپس با استفاده از روش غیرخطی NonLinLoc مکان‌یابی صورت پذیرفته است. مطابق نتایج به دست آمده در این قسمت حتی با وجود پوشش آزیموتی تا ۳۰۰ درجه نیز خطای (misslocation) کمتر از ۲ کیلومتر برای زمین لرزه‌ها به دست آمده است. نتایج در جدول ۱ فهرست شده است.

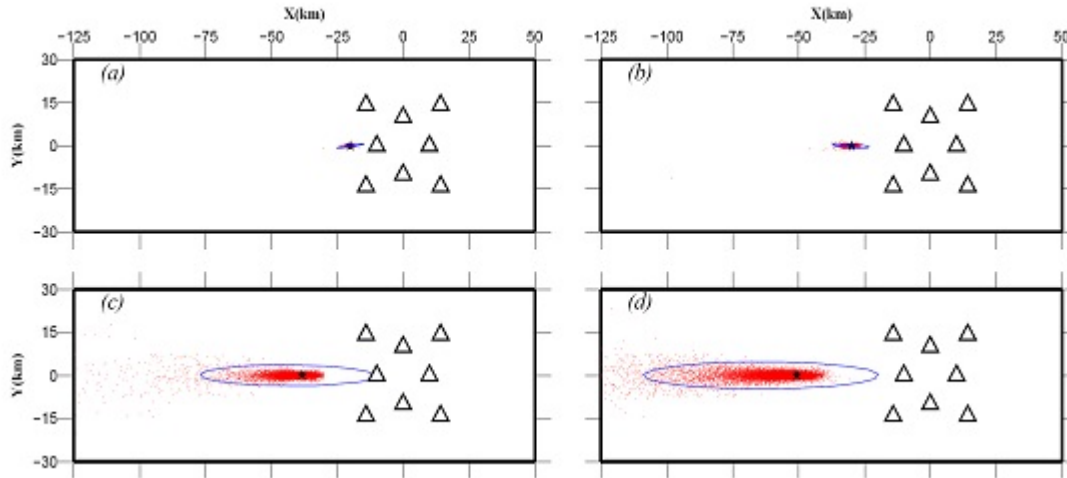
ERH و ERZ در جدول شماره ۱ خطای عرضه شده در روش غیرخطی‌اند که ریشه دوم عضوهای قطری ماتریس کواریانس محاسبه شده از نقاط PDF هستند. در این حالت نبود پوشش آزیموتی مناسب، موجب پراکندگی نقاط PDF در جهت خارج از ایستگاه‌ها شده که در نتیجه آن، مقادیر ماتریس کواریانس بیش از مقدار خطای واقعی (misslocation) برآورد شده است.

در مرحله بعد به منظور بررسی تاثیر هم‌زمان وجود نوفه و نبود پوشش آزیموتی، به هرایستگاه نوفه با توزیع زنگوله‌ای و میانگین ۰/۲ ثانیه اضافه شده است. سپس مکان‌یابی با استفاده از روش غیرخطی صورت گرفته است. مکان‌یابی حتی با وجود هم‌زمان نوفه در زمان رسیده‌ها و نبود پوشش آزیموتی تا ۳۰۰ درجه با خطای (misslocation) کمتر از ۵ کیلومتر محاسبه شده است (جدول ۲). در این حالت محل زمین لرزه و ایستگاه‌ها مانند مرحله قبل است.

دارد. الگوریتم‌های زیادی به منظور یافتن حل بهینه بر اساس نقاط پراکنده توزیع احتمال وجود دارد. الگوریتم‌های متروپالیس-گیس (Metropolis-Gibbs) (متروپالیس و همکاران، ۱۹۵۳)، جستجوی شبکه‌ای (grid search) (سامبریج و موزگارد، ۲۰۰۲) و درخت هشت‌تایی (oct tree importance sampling) (لوماکس و کورتیس، ۲۰۰۱) در روش غیرخطی به کار گرفته می‌شوند. در این میان الگوریتم درخت هشت‌تایی با سرعت زیاد و کارایی مناسب‌تر نسبت به دیگر الگوریتم‌ها، در تشخیص کمینه‌های محلی، قدرتمندتر عمل می‌کند (لوماکس و کورتیس، ۲۰۰۱). به این ترتیب در این تحقیق به منظور یافتن حل بهینه در نقاط پراکنده توزیع احتمال از الگوریتم درخت هشت‌تایی لوماکس و کورتیس (۲۰۰۱) استفاده می‌شود.

#### ۳ داده‌های مصنوعی

در این تحقیق به منظور بررسی ویژگی‌های روش غیرخطی مورد استفاده، از داده‌های زمان سیر مصنوعی برای شرایط متفاوت چشمه-گیرنده استفاده شده است. تولید داده‌ها با استفاده از برنامه Time2EQ که یکی از قسمت‌های برنامه رایانه‌ای NonLinLoc است که لوماکس و همکاران (۲۰۰۰) تهیه کرده‌اند، صورت گرفته است. مدل سرعتی مورد استفاده یک مدل نیم‌فضا با سرعت ثابت ۶ کیلومتر بر ثانیه برای موج P است و خطا در زمان رسیده‌ها به صورت توزیع زنگوله‌ای (نرمال) و با توجه به نیاز هر آزمایش به میزان ۰/۲، ۰/۵ و ۱/۰ ثانیه به زمان رسیده‌ها اضافه شده است. نخست، تاثیر پوشش آزیموتی در دو حالت، بدون اضافه شدن نوفه به زمان رسیده‌ها و با اضافه شدن نوفه به زمان رسیده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در آزمایش دوم، تاثیر پراکندگی ایستگاه‌ها شامل استفاده از دو شبکه با پراکندگی متنوع و در حضور زمان رسیده‌ها با چهار



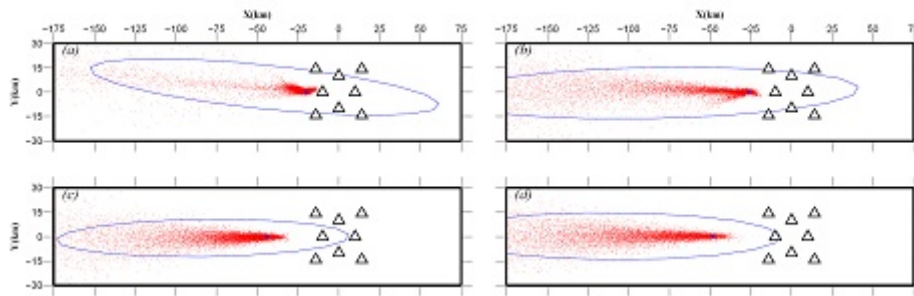
شکل ۱. آزمایش مصنوعی تاثیر پوشش آزیموتی بدون اضافه کردن نوفه به زمان رسیده‌ها برای ۴ زمین‌لرزه با پوشش‌های آزیموتی (a) ۲۲۵ درجه (b) ۲۷۵ درجه (c) ۳۰۰ درجه (d) ۳۲۰ درجه. مثلث‌ها محل ایستگاه را نشان می‌دهند و نقاط سرخ‌رنگ، نقاط پراکنده توزیع احتمال و بیضی آبی‌رنگ بیضوی خطا ۶۸٪ را نشان می‌دهند. مکان زمین‌لرزه با ستاره مشخص شده است.

در این حالت، نبود نوفه و پوشش آزیموتی مناسب به صورت هم‌زمان، موجب پراکندگی بیش از اندازه نقاط PDF شده است (شکل ۲) که در نتیجه ERH و ERZ محاسبه شده در این مرحله بیشتر از خطای واقعی زمین‌لرزه‌ها حساسیت آن به نبود پوشش آزیموتی کمتر است.

در این حالت، نبود نوفه و پوشش آزیموتی مناسب به صورت هم‌زمان، موجب پراکندگی بیش از اندازه نقاط PDF شده است (شکل ۲) که در نتیجه ERH و ERZ محاسبه شده در این مرحله بیشتر از خطای واقعی زمین‌لرزه‌ها

جدول ۱. نتایج آزمایش مصنوعی تاثیر پوشش آزیموتی بدون اضافه کردن نوفه به زمان رسیده‌ها برای ۴ زمین‌لرزه با پوشش‌های آزیموتی (۱) ۲۲۵ درجه (۲) ۲۷۵ درجه (۳) ۳۰۰ درجه (۴) ۳۲۰ درجه. Misslocation longitude، Misslocation latitude و Misslocation depth به ترتیب خطای واقعی مکان زمین‌لرزه در راستای طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و عمق زمین‌لرزه را نشان می‌دهند. RMS میزان زمان باقی‌مانده محاسبه شده در روش غیر و Azimuthal gap آزیموتی را نشان می‌دهند. ERZ و ERH به ترتیب خطای رومرکزی و عمق زمین‌لرزه و Ellipsoid length طول بزرگ‌ترین قطر بیضوی خطای ۶۸٪ را نشان می‌دهد. Gaussian noise مقدار نوفه وارد شده در زمان رسیده‌ها را نشان می‌دهد.

Event	Misslocation longitude (km)	Misslocation latitude (km)	Misslocation depth (km)	RMS (Sec)	Azimuthal gap(°)	ERH (km)	ERZ (km)	Ellipsoid length (km)	Gaussian noise (sec)
1	0.0272	0.007	-0.042	0.00	224	2.8	1.7	6.12	0.0
2	0.131	0.015	-0.157	0.00	276	3.8	2.5	8.28	0.0
3	1.740	0.059	-1.508	0.01	299	17.9	10.1	37.3	0.0
4	9.260	0.117	-5.595	0.03	317	24.0	11.0	47.3	0.0



شکل ۲. آزمایش مصنوعی تاثیر پوشش آزمون با اضافه کردن نوفه میانگین ۰/۲ ثانیه به زمان رسید برای ۴ زمین لرزه با پوشش های آزمون (a) ۲۲۵ درجه (b) ۲۷۵ درجه (c) ۳۰۰ درجه (d) ۳۲۰ درجه. مثلث ها محل ایستگاه، و نقاط سرخ رنگ، نقاط پراکنده توزیع احتمال و بیضی آبی رنگ بیضی خطا ۳۸٪ را نشان می دهند.

تعیین محل صورت پذیرفته است. در این حالت مکان یابی غیرخطی حتی با وجود فاصله ای با میانگین ۱۵۰ کیلومتری فاصله بین ایستگاهی با خطای (misslocation) کمتر از ۱ کیلومتر محاسبه شده است (جدول ۳).

در مرحله بعد به هرایستگاه به صورت تصادفی خطا اضافه شد که میانگین خطای اضافه شده به همه ایستگاه ها به ترتیب ۰/۲، ۰/۵، ۱/۰ ثانیه است. سپس با استفاده از برنامه غیرخطی NonLinLoc تعیین محل صورت گرفت. مکان یابی غیرخطی حتی با وجود افزایش نوفه، به جز محاسبه عمق در حالت اضافه شدن نوفه ۰/۵، با خطای (misslocation) کمتر از ۳ کیلومتر محاسبه شده است. نتایج در جدول ۳ آمده است.

## ۵ تاثیر پراکندگی ایستگاه ها روی تعیین محل

زمین لرزه به روش غیرخطی

۱-۵ حالت اول: میانگین فاصله بین ایستگاهی ۱۵۰ کیلومتر

به منظور بررسی تاثیر پراکندگی ایستگاه ها در نتایج حاصل از تعیین محل زمین لرزه ها به روش غیرخطی NonLinLoc در مرحله اول، یک زمین لرزه در عمق ۳۰ کیلومتری و ۴ ایستگاه در فاصله ۱۰۰ کیلومتری و ۴ ایستگاه دیگر در فاصله ۲۰۰ کیلومتری در آزمون های متفاوت در نظر گرفته شده است (شکل ۳). زمان رسید زمین لرزه در محل ۸ ایستگاه بدون اضافه کردن نوفه در زمان رسیده ها تولید شده و سپس با استفاده از برنامه غیرخطی NonLinLoc

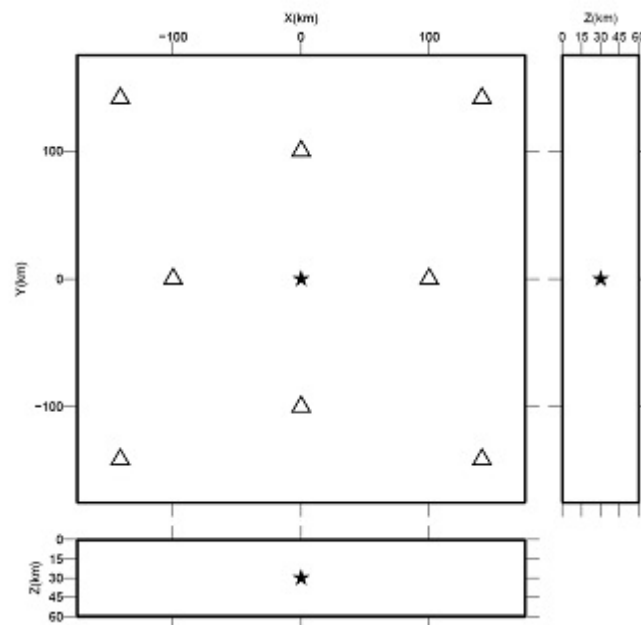
جدول ۲. نتایج آزمایش مصنوعی تاثیر پوشش آزمون با اضافه کردن نوفه میانگین ۰/۲ ثانیه به زمان رسیده ها برای ۴ زمین لرزه با پوشش های آزمون (۱) ۲۲۵ درجه (۲) ۲۷۵ درجه (۳) ۳۰۰ درجه (۴) ۳۲۰ درجه.

Event	Misslocation longitude (km)	Misslocation latitude (km)	Misslocation depth (km)	RMS (Sec)	Azimuthal gap(°)	ERH (km)	ERZ (km)	Ellipsoid length (km)	Gaussian noise (sec)
1	0.02	-0.06	-0.89	0.07	224	58.1	34.6	124.0	0.2
2	3.63	0.35	-2.78	0.07	261	70.2	50.2	155.0	0.2
3	-4.30	-0.23	-2.87	0.06	309	48.6	23.9	96.8	0.2
4	11.48	0.23	-9.55	0.07	315	55.8	24.1	108.0	0.2



جدول ۳. نتایج آزمایش مصنوعی تاثیر ایستگاه‌های نزدیک با اضافه کردن نوفه به زمان رسیده‌ها در شبکه ایستگاه با میانگین فاصله بین ایستگاهی ۱۵۰ کیلومتر.

Event	Misslocation longitude (km)	Misslocation latitude (km)	Misslocation depth (km)	RMS (Sec)	Azimuthal gap(°)	ERH (km)	ERZ (km)	Ellipsoid length (km)	Gaussian noise (sec)
1	-0.04	-0.04	0.95	0.01	45	0.20	0.76	2.66	0.0
2	-0.18	0.18	0.06	0.06	45	0.49	3.67	6	0.2
3	-1.05	1.05	-0.35	0.31	45	2.24	14.73	25.4	0.5
4	-2.46	1.76	-2.46	0.61	46	4.30	16.46	30.9	1.0



شکل ۳. زمین‌لرزه شبیه‌سازی شده در عمق ۳۰ کیلومتری و رومرکز  $(X=0$  و  $Y=0)$  در شبکه با میانگین فاصله ایستگاهی ۱۵۰ کیلومتر. مثلث‌ها محل قرارگیری ایستگاه‌ها را نشان می‌دهند. پنجره عمودی نمای عمقی از سمت شرق و پنجره افقی نمای از سمت جنوب را نشان می‌دهد. مکان زمین‌لرزه با ستاره مشخص شده است.

زمین‌لرزه در عمق ۳۰ کیلومتری و ۴ ایستگاه در فاصله ۱۰ کیلومتری و ۴ ایستگاه در فاصله ۲۰ کیلومتری فرض شده‌اند. مانند حالت ۵-۱ زمان رسید زمین‌لرزه در محل ۸ ایستگاه تولید شده و سپس با استفاده از برنامه غیرخطی Nonlinloc مکان‌یابی صورت گرفته است. مکان‌یابی غیرخطی با میانگین فاصله بین ایستگاهی ۱۵ کیلومتر با

۲-۵ حالت دوم: میانگین فاصله بین ایستگاهی ۱۵ کیلومتر

در این حالت یک شبکه ایستگاهی شامل ۸ ایستگاه با پراکندگی کمتر نسبت به حالت ۵-۱ در نظر گرفته شده است. شرایط قرارگیری آزمایشی ایستگاه‌ها نسبت به زمین‌لرزه مانند حالت اول (۵-۱) در نظر گرفته شده است.

تاثیر مقدار نوفه با توجه به میزان زمان سیر امواج است. در این حالت با افزایش متوسط فاصله رومرکزی به میزان ۱۵۰ کیلومتر، زمان سیر امواج به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد (به توجه به سرعت ۶ کیلومتر بر ثانیه برای مدل سرعتی مورد استفاده، مقدار زمان سیر امواج به صورت تقریبی از ۲۰ تا ۳۰ ثانیه متغیر است)، که در نتیجه آن افزایش نوفه به میزان ۰/۵ و ۱/۰ ثانیه، درصد کمتری از زمان سیر را تشکیل می‌دهد و از پراکندگی نقاط PDF کاسته می‌شود.

#### ۶ تعیین محل زمین‌لرزه‌های ناحیه البرز مرکزی با

$$M_n \geq 4/0$$

از میان زمین‌لرزه‌های ثبت شده در مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به موسسه ژئوفیزیک در بازه زمانی ۲۰۰۶-۲۰۱۰ در ناحیه البرز مرکزی، ۱۶ زمین‌لرزه با بزرگای  $M_n \geq 4/0$  انتخاب شده است.

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل زمان رسیدهای ثبت شده در سه شبکه محلی، تهران ساری و سمنان و فازهای P و S است. همچنین به منظور پوشش آزمون‌های مناسب‌تر برای زمین‌لرزه‌های رخ داده در جنوب ناحیه مورد بررسی، از دو ایستگاه ZEF و KLH از شبکه محلی اصفهان نیز استفاده شده است. سپس تعیین محل این زمین‌لرزه‌ها با روش غیرخطی صورت گرفته و نتایج حاصل در جدول ۵ آمده است. در این تحقیق از مدل پنج‌لایه اشتری و همکاران (۲۰۰۵) استفاده شد. از زمین‌لرزه‌های مهم در این بازه زمانی زمین‌لرزه مورخ ۶/۱۸/۲۰۰۷ کهک قم با بزرگای  $M_n = 5/9$  است.

این زمین‌لرزه دارای چندین پس‌لرزه است که یکی از آنها به فاصله روز از زمین‌لرزه اصلی و بزرگای  $M_n = 4/4$  رخ داده که بسیار نزدیک به رومرکز زمین‌لرزه اصلی بوده است. یکی دیگر از زمین‌لرزه‌ها، زمین‌لرزه مورخ ۶/۱۸/۲۰۰۷ شهر ری با بزرگای

خطای (misslocation) کمتر از ۰/۲ کیلومتر محاسبه شده است (جدول ۴).

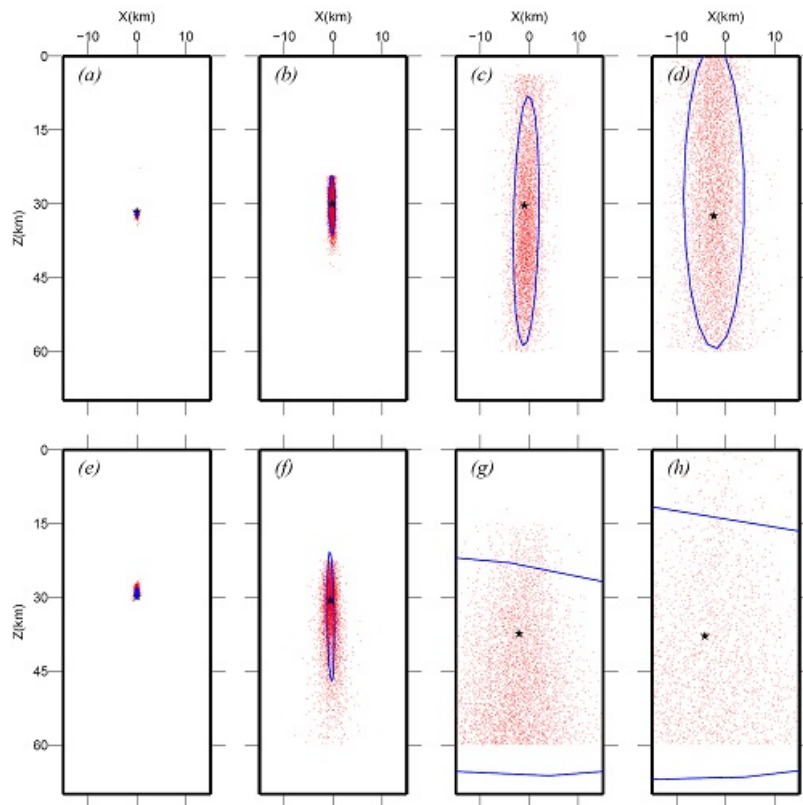
در این مرحله نیز به هر ایستگاه به صورت تصادفی نوفه اضافه شده که میانگین نوفه اضافه شده به همه ایستگاه‌ها به ترتیب ۰/۲، ۰/۵، ۱/۰ ثانیه است. سپس با استفاده از برنامه غیرخطی NonLinLoc تعیین محل زمین‌لرزه‌ها صورت گرفته است. مکان‌یابی غیرخطی حتی با وجود افزایش نوفه، به جز محاسبه عمق در حالت اضافه شدن نوفه ۰/۵ و ۱/۰ ثانیه، با خطای کمتر از ۱ کیلومتر محاسبه شده است (جدول ۴).

مقایسه پراکندگی نقاط PDF در شکل ۴ و خطای واقعی عمق زمین‌لرزه‌ها در جداول ۳ و ۴ نشان می‌دهد که میزان پراکندگی و خطای واقعی در عمق، با وجود ایستگاه‌های نزدیک، بسیار بیشتر از حالت در حضور ایستگاه‌های با فاصله زیاد است. با توجه به قرارگیری زمین‌لرزه در فاصله رومرکزی متوسط ۱۵ کیلومتری و عمق‌های ۲ تا ۴۰ کیلومتری، زمان سیر امواج (با توجه به سرعت ۶ کیلومتر بر ثانیه امواج در مدل سرعتی) از ۱/۳ تا ۷/۲ ثانیه تغییر می‌کند. بنابراین مقدار نوفه ۰/۵ و ۱/۰ ثانیه نسبت به زمان سیر امواج در این آزمایش‌ها درصد زیادی از زمان سیر است. افزایش خطا در رومرکز و عمق زمین‌لرزه‌ها در حضور نوفه به میزان ۰/۵ و ۱/۰ ثانیه می‌تواند به دلیل اضافه شدن درصد بالای نوفه نسبت به زمان سیر امواج باشد. بنابراین، این پدیده به این دلیل رخ می‌دهد که زمان سیر فاز ثبت شده در ایستگاه‌های نزدیک، در مقایسه با ایستگاه‌های دور بسیار کم است و در نتیجه نوفه اضافه شده معادل درصد زیادی از زمان سیر محاسبه شده در ایستگاه است. این امر موجب افزایش عدم قطعیت به میزان زیاد در داده‌ها و پراکندگی بیش از اندازه نقاط PDF می‌شود. همچنین نکته قابل توجه در این حالت، نزدیک شدن خطای برآورد شده در روش غیرخطی به خطای واقعی زمین‌لرزه‌ها است. این موضوع نیز تاییدکننده

$M_{11} = 4/0$  است (شکل ۵).

همچنین مقایسه نتایج با IRSC و IIEES نشان می‌دهد که تعیین محل به روش غیرخطی به نتایج IRSC نزدیک‌تر است. نتایج حاصل عمقی پراکندگی توزیع احتمال برای ۱۶ زمین‌لرزه در شکل ۶ آمده است. زلزله‌های شماره‌های ۵ و ۶ در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب مربوط به زمین‌لرزه کهک قم و پس‌لرزه آن است. با توجه به اینکه پس‌لرزه‌ها در صفحه گسلی مسبب زمین‌لرزه به وقوع می‌پیوندند، بررسی زمین‌لرزه‌های اصلی و پس‌لرزه زلزله کهک قم و محاسبه تعیین محل مجدد به روش غیرخطی و نزدیکی آنها و شباهت نقاط پراکندگی توزیع احتمال و شکل بیضوی خطای ۶۸٪ و RMS محاسبه شده، می‌توان نتیجه گرفت که روش غیرخطی در عرضه عدم قطعیت‌ها و تعیین محل، دقت زیادی دارد (شکل‌های ۵ و ۶).

در این تحقیق از میان ۱۶ زمین‌لرزه، ۱۰ زمین‌لرزه با خطای رومرکزی و عمقی کمتر از ۳ کیلومتر تعیین محل شده‌اند، همچنین ارتباط میان مقادیر زمان پسماند (RMS) و فاصله رومرکزی به نزدیک‌ترین ایستگاه نشان می‌دهد که برای زمین‌لرزه‌هایی که فاصله رومرکزی آنها به ایستگاه‌ها زیاد است، RMS دارای مقادیر زیادی است. با توجه به اینکه مسیر عبوری فازهای ثبت شده در فاصله‌های بیشتر (به‌طور متوسط بیش از ۱۱۰ کیلومتر) عمدتاً از موهو عبور کرده (Sn و Pn)، این افزایش RMS می‌تواند ناشی از نبود برآورد مناسب از عمق موهو در مدل مورد استفاده در این تحقیق (اشتری و همکاران، ۲۰۰۵) باشد. به جدول ۵ نگاه شود.



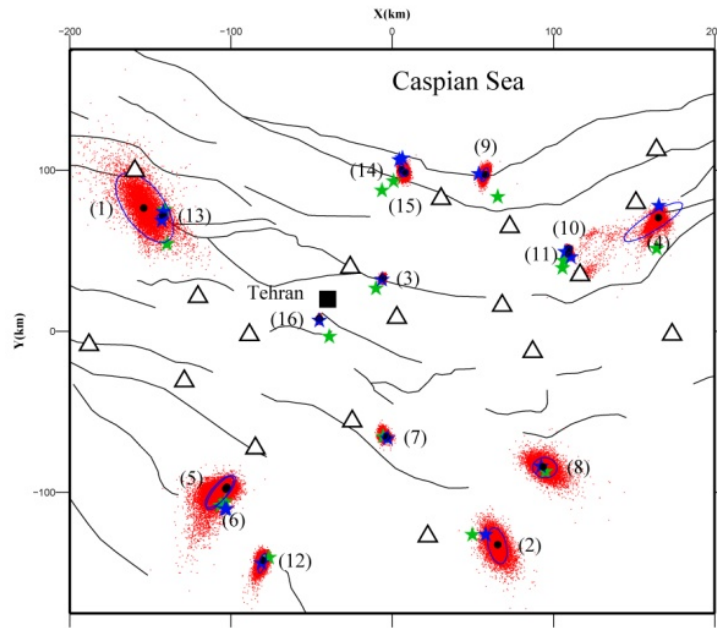
**شکل ۴.** نتایج حاصل از آزمایش مصنوعی تاثیر نبود وجود ایستگاه‌های نزدیک با اضافه کردن نوفه به زمان رسیدها. قسمت‌های (a)، (b)، (c) و (d) نتایج تعیین محل در شبکه ایستگاه با میانگین فاصله بین ایستگاهی ۱۵۰ کیلومتر و قسمت‌های (e)، (f)، (g) و (h) نتایج تعیین محل در شبکه ایستگاه با میانگین فاصله بین ایستگاهی ۱۵ کیلومتر هستند.

جدول ۴. نتایج حاصل از آزمایش مصنوعی تاثیر ایستگاه‌های نزدیک با اضافه کردن نوفه به زمان رسیده‌ها در شبکه ایستگاه با میانگین فاصله بین ایستگاهی ۱۵ کیلومتر.

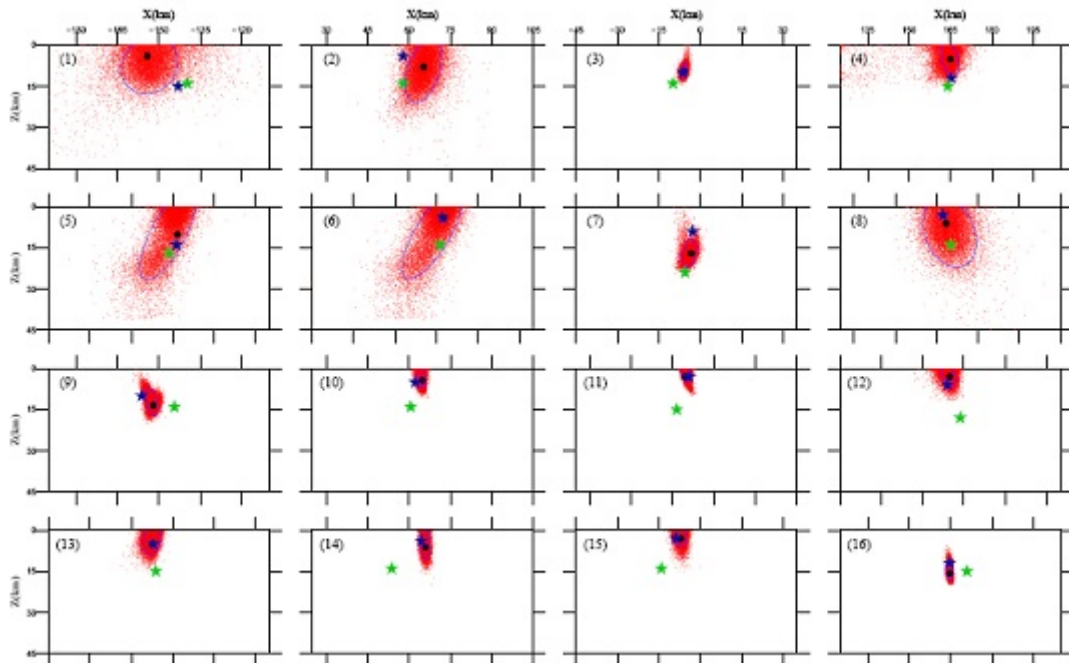
Event	Misslocation longitude (km)	Misslocation latitude (km)	Misslocation depth (km)	RMS (Sec)	Azimuthal gap(°)	ERH (km)	ERZ (km)	Ellipsoid length (km)	Gaussian noise (sec)
1	0.04	0.04	-0.01	0.003	45	0.43	1.82	1.09	0.0
2	-0.53	0.18	-0.64	0.06	47	1.45	6.91	13.1	0.2
3	-2.11	-0.70	-7.39	0.37	54	16.65	12.49	97.1	0.5
4	-4.22	1.41	-7.91	0.59	65	80.97	15.52	156	1.0

جدول ۵. نتایج حاصل از مکان‌یابی زمین‌لرزه‌های با بزرگای  $M_H \geq 4$  در بازه زمانی ۲۰۰۶-۲۰۱۰. Event شماره زمین‌لرزه در شکل‌های ۵ و ۶ و Date تاریخ وقوع رویداد را نشان می‌دهد. Latitude, longitude و Depth به ترتیب مشخصات رومرکزی شامل طول و عرض جغرافیایی و عمق را نمایش می‌دهند. RMS مقدار زمان پسماند (residual) محاسبه شده در مرکز لرزه‌نگاری کشوری و روش غیرخطی را نشان می‌دهد. Az. gap زاویه آزیموتی محاسبه شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. ERH و ERZ به ترتیب خطای رومرکزی و خطای عمقی و Dist. فاصله رومرکز زمین‌لرزه از نزدیک‌ترین ایستگاه را نشان می‌دهند و Mag معرف بزرگی زمین‌لرزه است.

Event	Date	latitude (deg)	longitude (deg)	Depth (km)	RMS (sec) (IGUT)	RMS (sec) (NLL)	Az. gap(°)	ERH (km)	ERZ (km)	Dist. (km)	Mag ( $M_n$ )
1	23-Feb-06	36.177	50.284	04.08	0.4	0.3	264	15.1	5.6	9	4.1
2	19-Dec-06	34.303	52.711	08.02	0.4	0.3	197	7.8	6.4	20	4.1
3	20-Dec-06	35.798	51.934	09.53	0.3	0.2	108	1.1	1.5	17	4.2
4	20-Dec-06	36.122	53.836	05.11	0.4	0.5	258	11.8	3.3	13	4.2
5	18-Jun-07	34.613	50.872	10.08	0.9	0.8	148	8.0	9.1	120	5.9
6	19-Jun-07	34.621	50.882	04.06	0.5	0.8	146	8.2	9.0	120	4.4
7	25-Aug-07	34.907	51.963	17.02	0.2	0.2	087	2.3	2.9	12	4.4
8	19-Nov-07	34.737	53.022	06.13	0.3	0.6	186	7.2	6.8	17	4.8
9	27-Mar-08	36.375	52.647	14.44	0.4	0.3	244	2.8	2.7	17	4.5
10	16-Jul-08	35.958	53.219	04.44	0.5	0.5	110	1.6	2.1	22	4.2
11	16-Jul-08	35.928	53.214	05.02	0.4	0.4	105	1.2	1.6	27	4.0
12	6-Mar-09	34.215	51.129	03.04	0.4	0.6	239	3.8	2.1	103	4.2
13	29-Jul-09	36.140	50.416	05.15	0.4	0.6	118	2.2	2.6	28	4.0
14	13-Aug-09	36.403	52.066	06.25	0.4	0.4	176	2.5	3.0	21	4.1
15	14-Aug-09	36.385	52.090	04.04	0.4	0.4	203	2.2	2.1	18	4.4
16	17-Oct-09	35.570	51.501	15.74	0.4	0.2	083	0.9	2.1	21	4.0



شکل ۵. نتایج تعیین محل روش غیرخطی (دایره مشکی‌رنگ) و مقایسه آن با دو مرکز IRSC (ستاره آبی‌رنگ) و IIEES (ستاره سبزرنگ). مثلث‌ها محل ایستگاه را نشان می‌دهند و نقاط سرخ‌رنگ، نقاط پراکنده توزیع احتمال و بیضی آبی‌رنگ، بیضی سبزی خطا ۶۸٪ را نشان می‌دهند. شماره‌های ۵ و ۱۶ به ترتیب نشانگر زمین‌لرزه کهک قم و شهر ری هستند.



شکل ۶. مقطع عمقی نتایج تعیین محل روش غیرخطی (دایره مشکی‌رنگ) و مقایسه آن با IRSC (ستاره آبی‌رنگ) و IIEES (ستاره سبزرنگ). نقاط سرخ‌رنگ، نقاط پراکنده توزیع احتمال و بیضی آبی‌رنگ، بیضی سبزی خطا ۶۸٪ را نشان می‌دهند. شماره‌های ۵ و ۱۶ به ترتیب نشانگر زمین‌لرزه کهک قم و شهر ری هستند.

## ۷ نتیجه گیری

نتایج حاصل از آزمایش‌های مصنوعی نشان می‌دهد که روش غیرخطی تعیین محل زمین‌لرزه‌ها در شرایط نامطلوب مانند پوشش آزیموتی نامناسب، وجود خطای زیاد خوانش فاز در داده‌ها و همچنین نبود ایستگاه‌های نزدیک به رومرکز زمین‌لرزه، می‌تواند با خطای کمتر از ۵ کیلومتر، رومرکز و عمق زمین‌لرزه‌ها را مکان‌یابی کند. درضمن با توجه به نتایج حاصل این موضوع با فرض وجود خطای تا ۱/۰ ثانیه در خوانش فازها نیز صحیح است. همچنین در آزمایش‌های صورت گرفته براساس داده‌های مصنوعی مشخص شد که روش غیرخطی مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها با وجود فاصله رومرکزی زیاد (تا ۱۵۰ کیلومتر) و وجود نوفه در زمان رسیدها تا ۱/۰ ثانیه می‌تواند عمق زمین‌لرزه‌ها را با خطای کمتر از ۳ کیلومتر تعیین کند. روش غیرخطی عرضه شده در این تحقیق با توجه به شکل پراکندگی نقاط توزیع احتمال و بیضوی خطای ۶۸٪، توصیف کاملی از عدم قطعیت‌ها را به دست می‌دهد.

با توجه به نتایج تعیین محل ۱۶ زمین‌لرزه‌های با بزرگی  $M_n \geq 4/0$  به روش غیرخطی نیز مشاهده شد که خطای تعیین محل زمین‌لرزه‌ها در رومرکز و عمق عمدتاً کمتر از ۳ کیلومتر است، که با توجه به نبود پوشش آزیموتی نامناسب و میانگین فاصله بین ایستگاهی زیاد، نشان‌دهنده عملکرد مناسب این روش است. در مقایسه نتایج تحقیق حاضر و مراکز IIEES و IRSC، مشاهده شد که نتایج روش غیرخطی در بیشتر زمین‌لرزه‌ها همخوانی بیشتری با مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC) دارد و دلیل آن می‌تواند، استفاده از پوشش ایستگاهی مناسب‌تر و شبکه‌های محلی در مقایسه با IIEES باشد.

## تشکر و قدردانی

در اینجا لازم می‌دانیم از مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، به خصوص جناب آقای مهندس سعید ناصریه، به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های زمان رسید در این تحقیق تشکر و قدردانی کنیم. همچنین از زحمات جناب آقای آنتونی لوماکس به خاطر همراهی و حضور موثر در این تحقیق تشکر ویژه داریم.

## منابع

- Ashtari, M., Herzfeld, D. and Kamalian, N., 2005, Microseism city in the region of Tehran, Tectonophysics, **395**(3-4), 193-208.
- Calvert, A., Gomez, F., Seber, D., Barazangi, M., Jabour, N., Ibenbrahim, A. and Demnati, A., 1997, An integrated geophysical investigation of recent seismicity in the Al-Hoceima region of North Morocco, Bull. Seism. Soc. Am., **87**, 637-651.
- Geiger, L., 1912, Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only, (translated from Geiger's 1910 German article) Bull. St. Louis Univ., **8**(1), 56-71.
- Gresta, S., Peruzza, L., Slejko, D. and Distefano, G., 1998, Inferences on the main volcanotectonic structures at Mt. Etna (Sicily) from a probabilistic seismological approach, J. Seis., **2**, 105-116
- Jones, R. H. and Stewart, R. C., 1997, A method for determining significant structures in a cloud of earthquakes, J. Geophys. Res., **102**, 8245-8254.
- Lahr, J. C., 1989, HYPOELLIPSE/Version 2.0: a computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude and first motion pattern, U.S. Geol. Surv. Open-File Rep, **92**, 89-116.
- Lee, W. H. K. and Lahr, J. C., 1972, HYPO71: a computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, U.S. Geological Survey Open-File Report.
- Lomax, A., Virieux, J., Volant, P. and Berge, C., 2000, Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations, in Advances in Seismic

- Tarantola, A. and Valette, B., 1982, Inverse problems = quest for information, *J. Geophys.*, **50**, 159-170.
- Tarantola, A., 1987, Inverse problem theory: methods for data fitting and model parameter estimation, Elsevier, Amsterdam, **613**, 57-75
- Thurber, C. H., 1985, Nonlinear earthquake location: Theory and example, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **75**(3), 779-790.
- Vilardo, G., De Natale, G., Milano, G. and Coppa, U., 1996, The seismicity of Mt. Vesuvius, *Tectonophys.*, **261**, 127-138.
- Waldhauser, F. and W. L. Ellsworth, 2000, A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **90**, 1353-1368.
- Wittlinger, G., Herquel G. and Nakache, T., 1993, Earthquake location in strongly heterogeneous media, *Geophys. J. Int.*, **115**, 759-777.
- Event Location Thurber, C. H., and N. Rabinowitz (eds.), Kluwer, Amsterdam, 101-134.
- Lomax, A. and Curtis, A., 2001, Fast, probabilistic earthquake location in 3-D models using oct-tree importance sampling, *European Geophysical Society*, 101-134.
- Lomax, A., Michelini, A. and Curtis, A., 2008, Earthquake location, direct, global-search methods, In *Encyclopedia of Complexity and System Science*, ed. Meyers, R. A. Springer, New York, 2449-2473.
- Milne, J, 1886, Earthquakes and other earth movements, Appellon, New York.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H. and Teller, E., 1953, Equation of state calculations by fast computing machines, *J. Chem. Phys.*, **1**, 1087-1092.
- Sambridge, M. and Mosegaard, K., 2002, Monte Carlo methods in geophysical inverse problems, *Rev. Geophys.*, **40**, 1009-1038.