

## بررسی خطای زمان رسید امواج لرزه‌ای در ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری تهران

مهدی رضاپور<sup>۱\*</sup> و علی اصغر متقی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۵/۱۲/۲۳، پذیرش نهایی: ۸۶/۱۰/۲۵)

### چکیده

در این مقاله با استفاده از اطلاعات موجود در بانک اطلاعاتی مرکز لرزه‌نگاری کشوری از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ میلادی، زمان سیر امواج لرزه‌ای در ۹ ایستگاه شبکه لرزه‌نگاری تهران که بیشترین تعداد زمان-رسیدها را ثبت کرده‌اند مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این کار میانگین زمان باقی‌مانده امواج P ثبت شده در فواصل ۱۰۰ کیلومتری در پنجره‌های ۵ درجه آزیموت ایستگاهی، برحسب آزیموت پستی (Back Azimuth) رسم شد و یک منحنی مطابق معادله (۱) بر آن برزاش شد. از رسم زمان باقی‌مانده برحسب آزیموت ایستگاهی و برزاش یک منحنی وابسته به آزیموت ایستگاهی می‌توان تغییرات قاعده‌مند در زمان باقی‌مانده در ایستگاه‌ها را بررسی کرد. در این بررسی مقدار ثابت در معادله برزاش شده که نشانگر شیفت کلی داده‌ها است درحکم معیاری از خطای قاعده‌مند مطرح می‌شود. نتایج به‌دست آمده براساس روش فوق نشان می‌دهد که خطای قاعده‌مند در ایستگاه‌های دماوند، رازقان و فیروزکوه بسیار بارز است و ایستگاه‌های افجه و فیروزکوه نیز بیشترین خطا را نشان می‌دهند. ایستگاه‌های قم، ورامین و ماهدشت قابل اعتمادترین ایستگاه‌ها هستند. این تحقیق نشان می‌دهد که نیاز به در نظر گرفتن خطاهای قاعده‌مند و دستگاری در ایستگاه‌ها به منظور بهبود مکان‌یابی زمین‌لرزه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

واژه‌های کلیدی: شبکه لرزه‌نگاری تهران، زمان باقی‌مانده، آزیموت پستی، خطای قاعده‌مند

## Investigations of seismic-wave arrival time biases in the stations of Tehran Seismic Network

Rezapour, M<sup>1</sup>. and Motaghi, A. A<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Assistant professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>Graduate student in Geophysics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 14 Mar 2007, Accepted: 15 Jan 2008)

### Abstract

The travel time observations contain information about the location and time of origin of the seismic source and the velocity structure in the region between the source and receivers. So, the travel-time residuals as criteria are used in the seismic topographical studies and locating seismic events, etc. There are many possible factors that create systematic bias in travel-time residuals. Some of the important systematic factors which might lead to such bias include: azimuth variation due to geological structure; systematic errors in recording system or instrumental error; phase picking error; location error and etc.

Systematically biases and instrumental errors in seismic stations are very difficult to

address in many earthquake location methods. Minimizing the effects of these errors is very important to improve earthquake locations. In order to identify and minimize them, we analyze the time residuals of the first P-wave arrivals at 9 stations of the Tehran network using the data base from 1996 through 2005.

The azimuth variation can be due to a combination of earth structure near the source and receiver. In order to identify earth structure near the stations we used the data of events which occurred within 100 kilometers of each station. Also, to discriminate different source regions we divided the Earth's surface into  $5^\circ$  in azimuth by 100 km in distance relative to the station.

In this analysis time residual versus back azimuth data of stations from events located within 100 kilometers are sorted, then averaged over  $5^\circ$  back azimuthal intervals. In each bin, we have an average residual and an azimuth centered on the bin. Then, for the average residual versus the corresponding back azimuth, a least square curve was fitted due to dependent equation of the form (Dziewonski and Anderson, 1983):

$$\delta t = A_0 + A_1 \cos(\theta - A_2) + A_3 \cos 2(\theta - A_4)$$

Where  $\theta$  is the azimuth from the station (back azimuth) to the event and  $\delta t$  is the average P-wave travel time residual into the bin  $5^\circ \times 100$  km.  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  and  $A_4$  are constants. The value of  $A_0$  can be jointly related to instrumental error, phase picking error, location error and etc. Since separation of these biases is difficult, and  $A_0$  value indicates the total shift of data, we consider  $A_0$  as instrumental error or station offset. Therefore, the constant term in azimuth dependent equation is attributed to the average systematic errors at the stations. The value of  $A_0$  can indicate an operational quality of a station. By using this procedure we can identify "pathological" stations.

As a result, DMW, RAZ and FIR stations show significant azimuthal biases and FIR and AFJ stations have had considerable systematic errors. QOM, VRN and MHD stations have had reliable records according to the stability of the azimuthally dependent curve. Also, all of the stations are graded in 4 azimuth windows according to their functional quality.

**Key words:** Tehran Seismic Network, Arrival time residual, Back azimuth, Systematic error

## ۱ مقدمه

مکان‌یابی صحیح‌تر زمین‌لرزه، که مهم‌ترین دغدغه مرکز لرزه‌نگاری کشوری است نیازمند کاری منسجم و شناخت کافی از ایستگاه‌ها و خطاهای مرتبط است. پژوهشگران روشن ساخته‌اند که عدم قطعیت در پارامترهای مکان زمین‌لرزه‌ها به خطاهای موجود در زمان وقوع زمین‌لرزه، خطای استخراج زمان رسید فازها از رکوردها، خطای جدول‌های زمان رسید مورد استفاده (مدل سرعتی) و مانند آن بستگی دارد (اسپرینگر و همکاران، ۲۰۰۲)، داکلاس و همکاران، ۲۰۰۵a؛ داکلاس و همکاران، ۲۰۰۵b). به منظور درک صحیح از خطاهای

بانک داده مرکز لرزه‌نگاری کشوری مؤسسه ژئوفیزیک با سابقه ده ساله در ثبت و رکوردگیری از زمین‌لرزه‌های کشور تا به حال بیش از ۳۰۰۰۰ زمین‌لرزه را در کشور به ثبت رسانده است. با وجود اینکه سال‌هاست شبکه‌های لرزه‌نگاری نصب و راه‌اندازی شده و مشغول ثبت زمین‌لرزه‌های رخ داده هستند اما بررسی کیفیت و خطای داده‌های ثبت شده به‌جز یکی دو مورد (قدس و ثبوتی، ۲۰۰۵) به‌طور جدی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. از این‌رو تحلیل کار شبکه از نظر کمی و کیفی از دیدگاهی متفاوت ضروری است.

است. در ایستگاه‌های شبکه از لرزه‌سنج SS-1 ساخت شرکت کینمتریکس (Kinematics) که نوعی سرعت‌نگار است استفاده شده که بسامد پایه آن ۱ هرتز است. در هر ایستگاه از سه دستگاه لرزه‌سنج در سه راستای قائم (Z)، شمالی-جنوبی (N-S) و شرقی-غربی (E-W) برای ثبت سه مؤلفه سرعت جابه‌جایی زمین استفاده شده است. جدول ۱ اطلاعات مربوط به ایستگاه‌ها و موقعیت جغرافیایی آنها را نشان می‌دهد و در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های لرزه‌نگاری به همراه گسل‌های عمده منطقه نشان داده شده است.

به‌منظور تعیین محل زمین‌لرزه‌های ثبت شده از نرم‌افزار Data Analysis Nanometrics (DAN) استفاده می‌شود. با این نرم‌افزار برای تعیین موقعیت زمین‌لرزه می‌توان از برنامه Hyp071 نوشته لی و همکاران (۱۹۷۲)، لی و لاهر (۱۹۷۵) و همچنین برنامه LOC (تدوین شده سازمان زمین‌شناسی کانادا) استفاده کرد. در شبکه لرزه‌نگاری تهران برای تعیین محل رخداد‌های لرزه‌ای از برنامه LOC استفاده می‌شود.

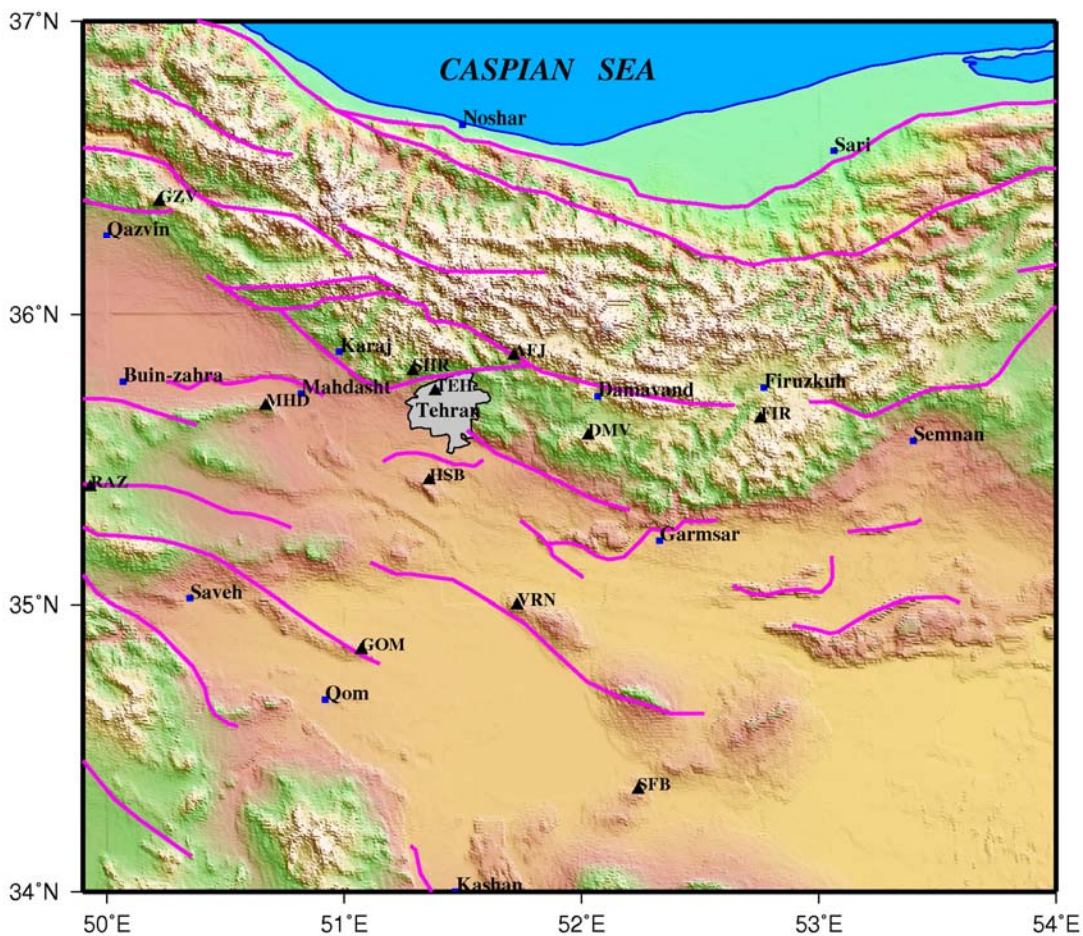
قاعده‌مند و دستگاهی در داده‌ها، متوسط زمان باقی‌مانده موج P در هر یک از ایستگاه‌ها در پنجره‌های ۵ درجه آزیموت پشتی (back azimuth) مورد بررسی قرار گرفته و ایستگاه‌ها از نظر کیفیت داده‌های ثبت شده و مشارکت در مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## ۲ شبکه لرزه‌نگاری تهران

شبکه لرزه‌نگاری دورسنجی (تله متری) تهران متشکل از ۱۲ ایستگاه لرزه‌نگاری در اواخر سال ۱۹۹۵ میلادی در گستره‌ای به وسعت تقریبی ۵۸۰۰۰ کیلومتر مربع در حاشیه جنوبی البرز مرکزی نصب و راه‌اندازی شد. داده‌های هفت ایستگاه به‌طور مستقیم و داده‌های پنج ایستگاه دیگر با استفاده از تکرارکننده به مرکز شبکه مخابره می‌شوند. مکان ایستگاه‌های شبکه با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه، در دسترس بودن و داشتن دید مستقیم به مرکز شبکه و ملاحظات دیگر تعیین شده‌اند. فاصله بین ایستگاه‌ها از ۳۵ تا ۱۲۵ کیلومتر متغیر

جدول ۱. مختصات ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری تهران.

نام ایستگاه	علامت اختصاری	طول جغرافیایی (درجه، شرقی)	عرض جغرافیایی (درجه، شمالی)	ارتفاع (متر)	ملاحظات
افچه	AFJ	51.71	35.85	2740	ایستگاه لرزه‌نگاری
دماوند	DMV	52.03	35.57	2300	ایستگاه لرزه‌نگاری و تکرارکننده
فیروزکوه	FIR	52.75	35.64	2380	ایستگاه لرزه‌نگاری
قزوین	GZV	50.21	36.38	2400	ایستگاه لرزه‌نگاری
حسن‌آباد	HSB	51.35	35.42	1098	ایستگاه لرزه‌نگاری
ماهدشت	MHD	50.66	35.68	1645	ایستگاه لرزه‌نگاری و تکرار کننده
قم	QOM	51.07	34.84	975	ایستگاه لرزه‌نگاری
رازقان	RAZ	49.92	35.40	1920	ایستگاه لرزه‌نگاری
سفیدآب	SFB	52.23	34.35	1000	ایستگاه لرزه‌نگاری
شهران	SHR	51.28	35.80	~1470	ایستگاه لرزه‌نگاری
تهران	THE	51.38	35.73	1462	ایستگاه لرزه‌نگاری و مرکز شبکه
ورامین	VRN	51.72	34.99	1120	ایستگاه لرزه‌نگاری و تکرار کننده



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری تهران.

پنج لایه استفاده شده است که در تحقیق حاضر، این داده‌ها مورد بررسی قرار نگرفته‌اند چراکه تعداد داده‌ها به اندازه‌ای کم است که بررسی نتایج مناسبی را به همراه نداشت.

بررسی داده مورد استفاده در این تحقیق نشان می‌دهد که در شبکه لرزه‌نگاری تهران از مدل سرعتی دو لایه طبق جدول ۲ استفاده می‌شود. البته در بازه‌های زمانی کوتاهی به صورت آزمایشی از مدل‌های سرعتی سه لایه و

جدول ۲. مدل سرعتی مورد استفاده در شبکه لرزه‌نگاری تهران.

سرعت موج S برحسب $\text{kms}^{-1}$	سرعت موج P برحسب $\text{kms}^{-1}$	عمق سطح بالایی لایه از سطح آزاد برحسب km	شماره لایه
3.57	6.20	0.00	1
3.70	8.20	36.0	2

که بتوان به زمان ثبت امواج با تقدم یا تأخر زمانی قابل ملاحظه در هر آزمون پی‌برد (بولت و ناتلی، ۱۹۶۶؛ هرین و تاقارت، ۱۹۶۸؛ دزیونسکی و اندرسن، ۱۹۸۳).

از آنجا که بررسی چنین خطاهایی در مورد زمین‌لرزه‌های نزدیک به ایستگاه مشهودتر است، فقط از اطلاعات مربوط به زمین‌لرزه‌هایی استفاده می‌کنیم که در فاصله کمتر از ۱۰۰ کیلومتری ایستگاه اتفاق افتاده‌اند. در بحث پراکندگی زمین‌لرزه‌ها نیز برای جلوگیری از توزیع نامناسب یا به بیانی دیگر برای جلوگیری از تکرار زمین‌لرزه در یک آزمون خاص و از طرفی فقدان زمین‌لرزه در آزمونی دیگر و همچنین در بحث تنوع ساختار منابع زمین‌لرزه‌ای از روش میانگین‌یابی استفاده کرده‌ایم (لارین و کلاپتون، ۱۹۹۱)، یعنی به این صورت که میانگین زمان باقی‌مانده‌های مربوط به هر پنجره آزمون ۵ درجه تعیین شده است و به آن پنجره آزمون نسبت داده‌ایم. بدیهی است که در معرفی پنجره آزمون هر ۵ درجه، آزمون وسط پنجره را در نظر می‌گیریم.

در بررسی وابستگی آزمون‌یابی زمان سیر امواج بعد از رسم نقاط مربوط به آزمون زمان باقی‌مانده برحسب آزمون پستی از روش دزیونسکی و اندرسن (۱۹۸۳) که به صورت معادله (۱) استفاده شده و بر داده مشاهده‌ای برازش شده است.

$$\delta t = A_0 + A_1 \cos(\theta - A_2) + A_3 \cos 2(\theta - A_4) \quad (1)$$

در معادله فوق  $A_0, A_1, A_2, A_3$  و  $A_4$  اعداد ثابتی هستند که برای هر ایستگاه متغیر خواهند بود.  $\theta$  و  $\delta t$  نیز به ترتیب نمایانگر آزمون پستی و متوسط زمان باقی‌مانده مربوطه‌اند.

در توجیه منحنی برازش شده می‌توان چنین گفت که اگر تغییرات این منحنی نسبت به آزمون پستی پایدار باشد تغییرات موجود در زمان باقی‌مانده را می‌توان به خود

در این تحقیق اطلاعات موجود در بانک اطلاعاتی مرکز لرزه‌نگاری تهران از ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای انتخابی مورد استفاده از این بانک داده‌ها شامل زمان وقوع، فاصله زمین‌لرزه از ایستگاه، آزمون پستی (back azimuth)، زمان باقی‌مانده امواج P که یا همان تفاوت زمان رسید مشاهده‌ای با زمان رسید محاسبه‌ای است. در این مقاله منظور از آزمون پستی همان back azimuth یا به عبارتی زاویه بین بردار وصل‌کننده ایستگاه به رومرکز زمین‌لرزه با امتداد شمال در جهت عقربه‌های ساعت است.

### ۳ روش مورد استفاده در ارزیابی خطای ایستگاه‌ها

خطاهایی مانند جهت‌گیری غیردقیق دستگاه‌ها نسبت به شمال جغرافیایی، کج‌بودن نامحسوس دستگاه در یک زمین ناهموار و ایرادهای کلی اجزای دستگاه را به‌مثابه خطای مربوط به دستگاه در نظر می‌گیریم. خطاهای دیگر نیز ناشی از خوانش نامناسب فازها و خطای موجود در مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها به صورت پراکنده وجود خواهد داشت که تفکیک چنین خطاهایی تقریباً ناممکن است؛ مگر اینکه خوانش فازها دوباره با استفاده از روش‌های پیشرفته‌ای همچون cross-correlation از نو صورت گیرد. در این صورت این خطاها تا میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهند یافت. خطای ناشی از ساختار زمین‌شناسی اطراف ایستگاه نیز در آزمون‌های متفاوت وجود خواهد داشت و انحراف قابل توجه و یکباره زمان باقی‌مانده نمایانگر این خطا خواهد بود. و در واقع ناپایداری شدید و یک‌سویه زمان باقی‌مانده حکایت از این موضوع دارد. در نگاه کلی می‌توان گفت که همه این خطاها در ایجاد خطای قاعده‌مند و ایستگاهی سهم‌اند. در صورت وجود خطای دستگاهی جابه‌جایی ثابتی در همه داده‌ها ایجاد خواهد شد. از طرفی خطای قاعده‌مند مربوط به ساختار زمین‌شناسی زیر ایستگاه نیز زمانی خود را بروز می‌دهد

ساختار منبع زمین لرزه نسبت داد و در غیر این صورت یعنی ناپایداری این منحنی و تغییرات بارز آن در آزمون‌های پستی متفاوت تا جایی که نتوان با تصحیح خطای دستگاهی اثر این تغییرات را از بین برد به ساختار زمین‌شناسی اطراف ایستگاه و زیر ایستگاه مربوط خواهد بود (لارین و کلاتون، ۱۹۹۱).

مقدار  $A_0$  در معادله (۱) را می‌توان به‌طور مشترک به فرایند موج‌گیری ایستگاه و خطای دستگاه و همچنین خطای موجود در خواندن فاز و خطای مکان‌یابی زمین‌لرزه و مانند آن ارتباط داد ولی از آنجا که تفکیک این خطاها بسیار مشکل است و همچنین مقدار  $A_0$  شیف کلی داده‌ها را نشان می‌دهد در اینجا از این مقدار  $A_0$  فقط به‌مثابه خطای قاعده‌مند دستگاهی یاد می‌کنیم. پس مقدار  $A_0$  را به خود دستگاه نسبت می‌دهیم که ممکن است نشانگر کار کیفی دستگاه باشد و همچنین معیاری از خطای موجود در ایستگاه را ارائه دهد. بدیهی است که هر چه اندازه  $A_0$  بیشتر باشد، جابه‌جایی در داده‌ها بیشتر و معیار خطای ایستگاهی بالاتر خواهد بود.

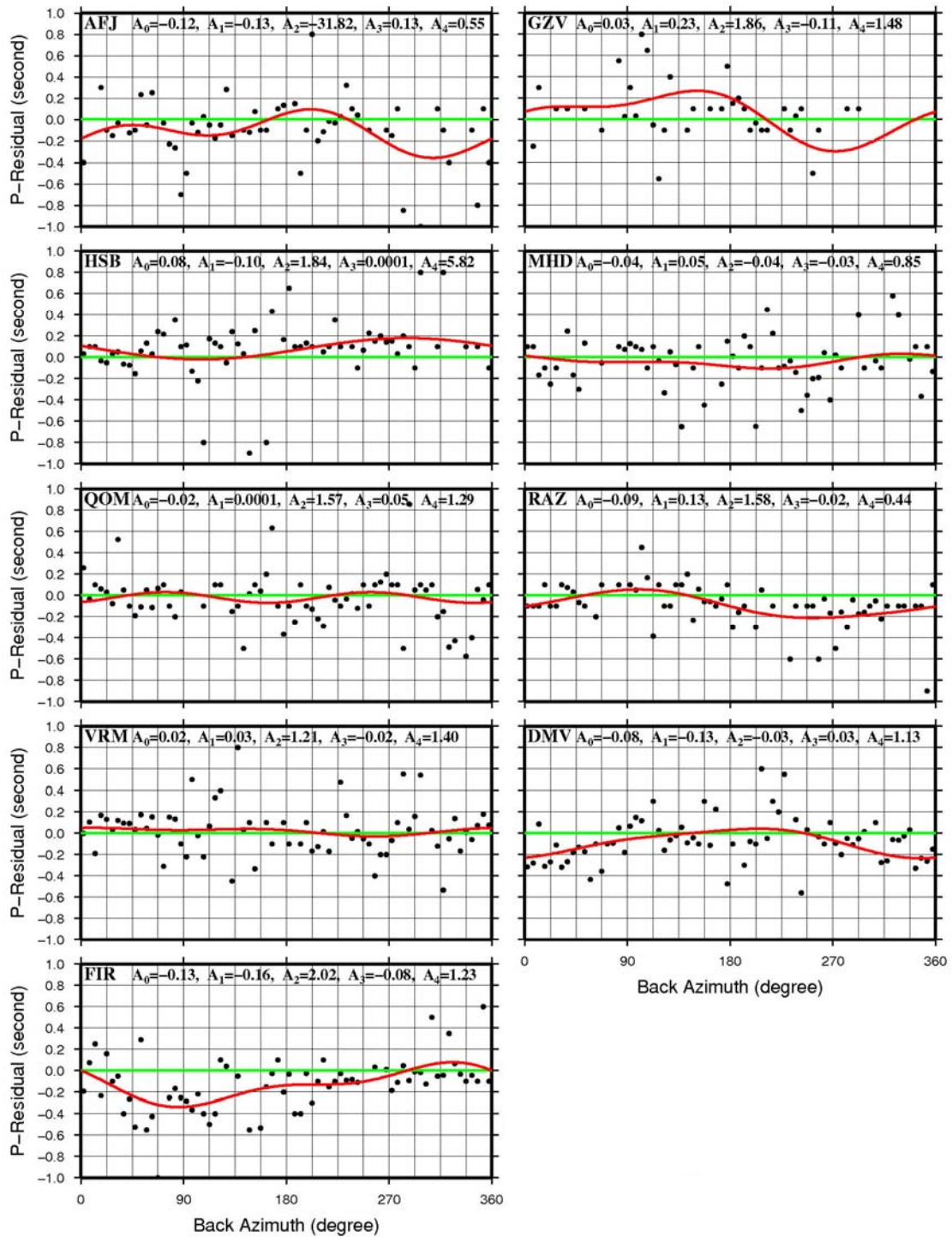
در یک نگاه کلی می‌توان گفت که تقدم و یا تأخر در زمان ورود امواج نسبت به زمان مورد انتظار آنها در آزمون‌های متفاوت، میزان اعتماد به آن ایستگاه را تحت تاثیر قرار خواهد داد و با تحلیل نتایج به‌دست آمده برای هر ایستگاه، مشارکت آن ایستگاه در مکان‌یابی زمین‌لرزه را می‌توان سنجید و با وزن‌دهی یا درجه‌بندی آنها از لحاظ کیفی در تعیین محل زمین‌لرزه به مکان صحیح‌تری دست یافت و بدین صورت محاسبه مکان زمین‌لرزه را بهبود بخشید.

در شکل ۲ زمان باقی‌مانده موج  $P$  یعنی تفاوت زمان رسید مشاهده‌ای از زمان رسید محاسبه شده با توجه به مدل سرعتی مورد استفاده برحسب آزمون پستی برای ۹ ایستگاه شبکه لرزه‌نگاری تهران رسم شده است. برای

سه ایستگاه لرزه‌نگاری شهران، تهران و سفیدآب به‌خاطر کم بودن داده، بررسی فوق صورت نگرفت. در نمودارهای شکل ۲ منحنی برازش شده مطابق معادله (۱) است. در هر نمودار کد ایستگاه و مقادیر ثابت  $A_0$ ،  $A_1$ ،  $A_2$ ،  $A_3$ ،  $A_4$ ، حاصل از برازش معادله (۱) نوشته شده است.

شکل ۲ نشان می‌دهد که ایستگاه افجه با خطای دستگاهی نسبتاً زیاد  $A_0 = -0.12$  در بین ایستگاه‌های با درجه اعتماد کم قرار دارد. پراکندگی داده‌ها در آزمون‌های  $270^\circ$  درجه تا  $360^\circ$  درجه یعنی در قسمت شمال غربی ایستگاه بسیار بارز است و بیشتر داده‌ها در آزمون‌های  $0^\circ$  تا  $180^\circ$  درجه تمایل قابل توجهی به طرف زمان باقی‌مانده منفی دارند که این حکایت از ثبت زود هنگام امواج نسبت به زمان مورد انتظارشان دارد. ولی این موضوع را نمی‌توان به ساختار زمین‌شناسی زیر ایستگاه یا اطراف ایستگاه نسبت داد چرا که با تصحیح خطای دستگاهی می‌توان شکل مناسبی از نمودار را ارائه کرد که در آن فقط داده‌های پنجره آزموتی  $270^\circ - 150^\circ$  درجه تمایل اندکی به طرف زمان باقی‌مانده مثبت خواهند داشت.

خطای دستگاهی به‌دست آمده  $A_0 = 0.03$  برای ایستگاه قزوین مقدار قابل قبولی است ولی از طرفی پراکندگی داده‌ها در آزمون‌های صفر تا  $180^\circ$  درجه این آزمون‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در نتیجه میزان اعتماد به امواج رسیده از این آزمون‌ها، احتیاط در تصمیم‌گیری را دو چندان خواهد کرد. این ایستگاه در آزمون‌های  $180^\circ$  تا  $270^\circ$  درجه عملکرد بهتری دارد و از طرفی در پنجره آزموتی  $270^\circ$  تا  $360^\circ$  درجه یعنی شمال غربی ایستگاه با فقدان داده‌ها روبه‌رو هستیم. به وضوح دیده می‌شود که ایستگاه قزوین موجی را از سوی این منطقه ثبت نکرده است. از این رو نتیجه خاصی در این آزمون‌ها به دست نمی‌آید.



شکل ۲. متوسط زمان باقی‌مانده در بازه‌های آزیموتی ۵ درجه برحسب آزیموت پستی برای ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری تهران. در هر نمودار کد ایستگاه و ضرایب ثابت معادله (۱) نشان داده شده است. خط سبز خط مبنا یعنی زمان باقی‌مانده صفر و منحنی سرخ رنگ برازش صورت گرفته مطابق معادله (۱) را نشان می‌دهد.

خطای دستگاهی  $A_0 = 0/08$  برای ایستگاه حسن آباد خطایی قابل توجه است. در پنجره آزمایشی صفر تا ۴۵ درجه یعنی تقریباً شمال شرقی ایستگاه با تصحیح خطای دستگاهی با ثبت زود هنگام امواج روبه‌رو خواهیم بود. ولی با وضعیت فعلی ایستگاه، بدون در نظر گرفتن خطای دستگاهی به جز آزمایش‌های صفر تا ۴۵ درجه نمی‌توان به امواج رسیده در دیگر آزمایش‌ها اعتماد کرد. این امری طبیعی است چرا که حداقل در آزمایش‌های مشرف به منطقه نوفه‌خیز شهر تهران یعنی آزمایش‌های ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه، امواج رسیده دستخوش تغییر قرار داشته‌اند. ثبت دیر هنگام امواج و از طرفی کیفیت نامطلوب امواج رسیده (پراکندگی) به وضوح بیانگر واقعیت پیش‌گفته است. در وضعیت فعلی، ایستگاه در بیشتر آزمایش‌ها با ثبت دیر هنگام مواجه است.

در بحث پراکندگی داده‌ها با توجه به موقعیت ایستگاه‌ها، انتظار داریم که ایستگاه ماهدشت در مقایسه با ایستگاه‌های حسن آباد و افجه در وضعیت مطلوب‌تری قرار داشته باشد. با این حال کمی پراکندگی در داده‌ها قابل مشاهده است که چندان منحنی برازش شده را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. این ایستگاه با خطای دستگاهی  $A_0 = -0/04$  ایستگاهی در حد قابل قبول است. منحنی برازش شده در اکثر آزمایش‌ها پایدارند و پدیده خاصی مشاهده نمی‌شود. می‌توان در همه آزمایش‌ها به امواج رسیده از زمین‌لرزه اعتماد نسبی داشت. این ایستگاه یکی از قابل اعتمادترین ایستگاه‌های شبکه است و در کل می‌تواند سهم ثابتی در تعیین محل زمین‌لرزه داشته باشد.

نوفه کم در منطقه ایستگاه قم که در مقایسه با دیگر ایستگاه‌های شبکه آرام است، یکی از دلایل پایدار بودن منحنی مربوطه در شکل ۲ است. از نظر خطای دستگاهی، کمترین خطا در بین ایستگاه‌های شبکه به ایستگاه قم تعلق دارد. ایستگاه قم روی هم رفته یکی از بهترین ایستگاه‌های شبکه است. ثبت دیر هنگام و یا ثبت زود هنگام در

آزمایش‌ها زیاد مشهود نیست بنابراین  $A_0 = -0/02$  و ظاهر منحنی برازش شده نشان می‌دهد که این ایستگاه مشکلی ندارد.

ایستگاه رازقان از نظر خطای دستگاهی در وضعیت مطلوبی به سر نمی‌برد. خطای دستگاهی  $A_0 = -0/09$  مقدار قابل ملاحظه‌ای است که به سادگی نمی‌توان از آن گذشت. پراکندگی داده‌های آن بسیار کم است و بهتر می‌توان روی مشخصات منحنی برازش شده تصمیم‌گیری کرد. با شرایط فعلی ایستگاه و بدون در نظر گرفتن خطای دستگاهی فقط در آزمایش‌های صفر تا ۱۸۰ درجه اعتماد نسبی به آن وجود دارد. در این آزمایش‌ها بیشتر داده‌ها تمایل اندکی به طرف زمان باقی‌مانده مثبت دارند. با تصحیح خطای دستگاهی، ثبت دیر هنگام امواج در آزمایش‌های ۴۵ تا ۱۸۰ درجه را شاهد خواهیم بود. از طرفی ثبت زود هنگام امواج در آزمایش‌های ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه نیز خود را بروز خواهد کرد.

بی‌شک بهترین ایستگاه شبکه، هم از نظر خطای دستگاهی و قاعده‌مند و هم از نظر تعداد زمان رسیدهای ثبت شده و پراکندگی داده‌ها، ایستگاه ورامین است. در آزمایش‌های صفر تا ۹۰ درجه، ثبت دیر هنگام جزئی امواج مشاهده می‌شود و پدیده خاص دیگری در اطراف آن به چشم نمی‌رسد. این ایستگاه می‌تواند ایستگاه ثابتی در مکان‌یابی زمین‌لرزه‌های محدوده شبکه باشد. خطای دستگاهی  $A_0 = 0/02$  خطایی مطلوب است و درجه اعتماد زیاد به این ایستگاه اجتناب‌ناپذیر است.

در زمان رسید امواج به ایستگاه دماوند از قسمت شمال، خطای قابل توجهی وجود دارد و ثبت دیر هنگام امواج رسیده از شمال بسیار واضح است. شرایط زمین‌شناسی نزدیک ایستگاه، مهم‌ترین خطای قاعده‌مند آنرا به وجود آورده است. این خطای قاعده‌مند تا حدی



جدول ۳. درجه‌بندی کیفی ایستگاه‌ها در سه سطح A, B, C.

نام ایستگاه	علامت اختصاری	آزیموت (درجه)		
		صفر تا ۹۰	۹۰ تا ۱۸۰	۱۸۰ تا ۲۷۰
افچه	AFJ	B	B	*
دماوند	DMV	C	A	C
فیروزکوه	FIR	C	C	B
قزوین	GZV	C	C	*
حسن‌آباد	HSB	A	C	C
ماهدشت	MHD	A	A	A
قم	QOM	A	A	C
رازقان	RAZ	A	A	C
ورامین	VRN	B	A	A

#### ۴ نتایج

بررسی خطاهای دستگاهی و قاعده‌مند در ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری تهران نشان داد که ایستگاه‌های افچه (AFJ) و فیروزکوه (FIR) با خطای دستگاهی نسبتاً زیاد از ایستگاه‌های با درجه اعتماد کم محسوب می‌شوند و ایستگاه‌های ورامین (VRN)، قم (QOM) و ماهدشت (MHD) به ترتیب با خطای دستگاهی کم ۰/۰۲، ۰/۰۲- و ۰/۰۳ بهترین ایستگاه‌های شبکه‌اند. با تصحیح خطای دستگاهی و به منظور تشخیص دادن خطاهای قاعده‌مند مربوط به ساختار زمین‌شناسی منطقه ایستگاه به وضوح دیدیم که ایستگاه دماوند امواج رسیده از جنوب را دیرتر از زمان مورد انتظار ثبت می‌کند. ثبت زود هنگام امواج در آزیموت‌های ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه و ثبت دیر هنگام امواج در آزیموت‌های ۴۵ تا ۱۸۰ درجه ایستگاه رازقان نیز مشخص بود. از طرفی ثبت دیر هنگام امواج در آزیموت‌های ۱۳۵ تا ۳۶۰ درجه و ثبت زود هنگام امواج در آزیموت‌های ۴۵ تا ۱۳۵ درجه ایستگاه فیروزکوه بسیار بارز بود. با توجه به نتیجه حاصل از این تحقیق، ایستگاه‌های شبکه از نظر کار کیفی و نحوه مشارکت در مکان‌یابی صحیح‌تر زمین لرزه در آزیموت‌های متفاوت طبق جدول ۳ درجه‌بندی شدند. در این تحقیق عملکرد کیفی ایستگاه‌ها مورد ارزیابی قرار

است که حتی با در نظر گرفتن تصحیح خطای دستگاهی نیز نمی‌توان تأثیر ساختار زمین‌شناسی این آزیموت‌ها را نادیده گرفت و به سادگی از آن گذشت. با تصحیح خطای ایستگاهی در پنجره‌های آزیموتی صفر تا ۹۰ درجه و ۲۷۰ تا ۳۶۰ درجه، یعنی شمال ایستگاه، بیشتر داده‌ها با حالتی شیب‌دار تمایل قابل توجهی به طرف زمان باقی‌مانده منفی دارند. پراکندگی داده‌ها در حد قابل قبولی است و خطای دستگاهی  $A_0 = -0.08$  بسیار قابل ملاحظه است.

خطای دستگاهی  $A_0 = -0.13$  برای ایستگاه فیروزکوه بیشترین خطای دستگاهی در تحقیق حاضر است. پراکندگی داده‌ها در آزیموت‌های صفر تا ۱۸۰ درجه بیشتر است و کلاً داده‌ها تمایل زیادی به طرف زمان باقی‌مانده منفی دارند. با تصحیح خطای دستگاهی، بیشتر داده‌ها در آزیموت‌های ۴۵ تا ۱۳۵ درجه تمایل به زمان باقی‌مانده منفی دارند و ثبت زود هنگام مشخصه اصلی این آزیموت‌ها است. همچنین داده‌های ۱۳۵ تا ۳۶۰ درجه در سمت زمان باقی‌مانده مثبت قرار می‌گیرند که خود حکایت از ثبت دیر هنگام امواج نسبت به زمان مورد انتظارشان دارد. این موضوع را می‌توان به ساختار زمین‌شناسی نزدیک ایستگاه نسبت داد.

با توجه به نمودارهای رسم شده ایستگاه‌های شبکه از نظر کار کیفی و مشارکت آنها در تعیین محل زمین لرزه‌ها به صورت جدول ۳ درجه‌بندی شده‌اند. درجه‌بندی ایستگاه‌ها در سه سطح خوب، متوسط و ضعیف با نمادهای به ترتیب A، B و C نشان داده شده است. علامت ستاره (\*) مربوط به آزیموت‌هایی است که نتیجه قابل اعتمادی از آنها حاصل نشده است. لازم به ذکر است که این درجه‌بندی با وضعیت فعلی ایستگاه‌ها و بدون در نظر گرفتن خطای دستگاهی صورت می‌گیرد.

- Seismic Telemetry Network. *J. Asian Earth Sci.*, **25**, 687-694.
- Herrin, E., and Taggart, J., 1968, Regional variations in P travel times, *B. Seismol. Soc. Am.*, **52**, 1325-1337.
- Lee, W. H. K., Bennett, R. E., and Meagher, L., 1972, A method for estimating magnitude of local earthquakes from signal duration. USGS Open file report.
- Lee, W. H. K., and Lahr, J. C., 1975, Hypo71 (revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes. Open file report, U.S. Geological Survey, 75-311.
- Lorraine J. H., and Clayton, R. W., 1991, A Station Catalog of ISC Arrivals: Seismic Station Histories and Station Residuals, U.S. Geological Survey Open-File Report 91-295.
- Springer, D. L., Pawloski, G. A., Ricca, J. L., Rohrer, R. F., and Smith, D. K., 2002, Seismic source summary for all U.S. below-surface nuclear explosions, *B. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 1806-1840.

گرفته است. همان طوری که در متن مقاله ذکر شده است، مقدار  $A_0$  در معادله (۱) میزان انحراف زمان باقی مانده از مقدار صفر است. از این کمیت می توان به مثابه معیاری از عملکرد کیفی ایستگاه یاد کرد و برحسب مقدار آن تصحیحاتی را در زمان- رسید امواج به ایستگاه لحاظ کرد؛ در روشی مشابه با توجه به مقدار  $A_0$  می توان وزن هر ایستگاه را در فرایند مکان یابی زمین لرزه ها لحاظ کرد، بدین صورت که هر ایستگاهی که کمترین مقدار  $A_0$  (از لحاظ قدر مطلق) را داشته باشد با وزن یک در مکان یابی مشارکت یابد و  $A_0$  بقیه ایستگاه ها نیز نسبت به این مقدار نرمال شوند.

#### تشکر و قدردانی

این پژوهش در چارچوب طرح پژوهشی شماره ۶۲۰۱۰۲۷/۱/۰۲ به انجام رسیده است. در اینجا از شورای پژوهشی مؤسسه ژئوفیزیک و شورای پژوهشی دانشگاه تهران تشکر و قدردانی می شود.

#### منابع

- Bolt, B. A., and Nuttli, O. W., 1966, P-wave residuals as a function of azimuth, *J. Geophys. Res.*, **71**, 5977-5985.
- DAN User's Guide, Release 2.53, 1995, Nanometrics Inc., Ontario Canada.
- Douglas, A., Bowers, J. B. D., and Marshall, P. D., 2005a, An analysis of P travel times for Nevada test site explosions recorded at regional distances, *B. Seismol. Soc. Am.*, **95**, 941-950.
- Douglas, A., O'Mongain, A. M., Porter, D., and Young, J. B., 2005b, An analysis of P times reported in the reviewed event bulletin for Chinese nuclear underground explosions, *Geophys. J. Int.*, **163**, 559-566.
- Dziewonski, A. M., and Anderson, D. L., 1983, Travel times and station corrections for P waves at teleseismic distances, *J. Geophys. Res.*, **88**, 3295-3314.
- Ghods, A., and Sobouti, F., 2005, Quality assessment of seismic recording: the Tehran