آزمایش کالیبره کردن نسبی حس گرهای سرعت سنج SS-1 و شتاب سنج FBA-11 بر روی میز لرزان

محمدکاظم جعفری، استادیار و عضو هیأت علمی پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک پژوهشگاه
محمد داودی، دانشجوی دکترای ژئوتکنیک لرزه ای پژوهشگاه

۱- چکیده

در طرحهای مطالعات لرزه ای تجربی، کالیبره بودن دستگاههای اندازه گیری ارتعاشات از اهمیت خاصی برخوردار است. حس گرهای *(Sensor)* لرزه نگار *SS-1* و شتاب سنج *FBA-11* به همراه ثباتهای *SSR-1* را که از بقیهٔ دستگاههای موجود در پژوهشگاه به دلیل ویژگیهای خاص خود با تناوب بیشتری در طرحهای مختلف استفاده شده اند، به روشهای متفاوتی می توان کالیبره کرد. در این مقاله، به کالیبره نمودن دستگاههای مذکور که بر روی میز لرزان پژوهشگاه صورت گرفته، پرداخته شده است. آزمایش کالیبره نمودن در دو مرحله انجام گرفت. در مرحلهٔ اول از ۹ حس گر *SS-1* و ۹ حس گر *FBA-11* با پنج دستگاه ثبات *SSR-1* و دو حس گر تغییرمکان سنج به منظور تعیین محدودهٔ کاربرد حس گرها از نظر دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات میز لرزان در فرکانس های ارتعاشی پایین تر از ۵۰ هرتز و مقایسهٔ نسبی دامنه و محتوای فرکانسی ثبت شده با آنها استفاده شد. نتایج حاصله علاوه بر مشخص نمودن محدودهٔ کاربرد که برای سرعت سنجها، $16.6mm/s$ و برای شتاب سنجها $1g$ به دست آمد، از حداکثر اختلاف در دامنه و محتوای فرکانسی برای نگاشتهای ثبت شده با $SS-1$ برابر ۵٪ و برای نگاشتهای ثبت شده با $FBA-11$ برابر ۱۵٪ حکایت می کرد. مرحلهٔ دوم آزمایش نیز با استفاده از سه حس گر لرزه نگار، سه حس گر شتاب سنج، دو دستگاه ثبات و دو حس گر تغییرمکان سنج به منظور تعیین قابلیت حس گرها برای ثبت ارتعاشات با محتوای فرکانسی بالاتر از ۵۰ هرتز و امکان استفاده از فیلترهای با فرکانس حدی بالا انجام شد و نشان داد با وجود دارا بودن قابلیت ثباتها به منظور استفاده از چنین فیلترهایی، به دلیل محدودیت موجود در حس گرها، نمی توان ارتعاشات بالاتر از فرکانس ۵۰ هرتز را به درستی ثبت کرد.

کلیدواژه ها: کالیبره نمودن، سرعت سنج *SS-1* ، شتاب سنج *FBA-11*، میز لرزان.

۲- مقدمه

حس گرهای سرعت سنج *SS-1* و شتابنگار *FBA-11* به همراه ثباتهای *SSR-1* به دلیل مزایا و قابلیتهایی که نسبت به دیگر دستگاههای اندازه گیر ارتعاشات موجود در پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله دارند، در طرحهای مختلف ثبت ارتعاشات سازه ای به طور وسیعی استفاده شده اند. قابلیت حمل و استقرار آسان، ساختمان محکم و با دوام در شرایط سخت آب و هوایی، حساسیت بالا و بهره برداری راحت از دستگاههای مذکور باعث شده است که با وجود متعلق بودن این دستگاهها به دههٔ ۷۰، هنوز هم در مطالعات صحرایی مورد استفاده قرار گیرند؛ به طوری که آزمایشهای ارتعاش محیطی و اجباری ساختمان دانشکدهٔ مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف، آزمایش ارتعاش اجباری ساختمان فعلی پژوهشگاه، آزمایشهای ارتعاش اجباری بر روی مدل ۱:۲ ساختمان چهار طبقه موجود در پژوهشگاه، آزمایش ارتعاش محیطی سکوهای نفتی لاوان، آزمایشهای ارتعاش محیطی و اجباری سد بتنی دو قوسی شهید رجایی، آزمایش ارتعاش محیطی سد بتنی قوسی ساوه، آزمایشهای ارتعاش محیطی (شامل انفجارهای مختلف سایتی) سدهای خاکی مارون و مسجد سلیمان، ثبت ارتعاشات حاصل از انفجار در مغار نیروگاه مسجدسلیمان، ثبت ارتعاشات میکروترمور تهران، ثبت ارتعاشات محل

استقرار ایستگاههای ثابت لرزه نگاری و چندین طرح مهم دیگر توسط دستگاههای اندازه گیر مذکور انجام شده است.

در آزمایشهای مذکور که از چندین دستگاه و یا کلیهٔ حس گرهای *SS-1* و *FBA-11* و ثباتهای *SSR-1* موجود در پژوهشگاه استفاده شده است، کالیبره بودن دستگاههای مذکور به هنگام انجام آزمایشها از اهمیت خاصی برخوردار بود.

برای کالیبره کردن یک لرزه نگار باید سه پارامتری را که حساسیت سرعت *(Velocity Sensitivity)* را مشخص- می کنند تعیین گردند. حساسیت سرعت (VS) به صورت نسبت تبدیل لاپلاس ولتاژ خروجی لرزه نگار $E(s)_{out}$ به سرعت حرکت ورودی زمین $\dot{X}_s$ تعریف می شود [۱]. سه پارامتر مورد نظر که تعیین دقیق آنها هدف کالیبره نمودن دستگاهی می باشد عبارتند از: ثابت مولد بار شده *(Loaded Generator Constant)* و یا ثابت مولد میرا شده *(Damped Generator Conotant)* G_d برحسب $V/m/s$، فرکانس تشدید $f = \frac{\omega}{2\pi}$ و نسبت میرایی ξ [۲]. با این توصیف، حساسیت سرعت برای لرزه نگارهای نوع الکترومغناطیسی *(Electromagnetic Seismometer)* با رابطهٔ (۱) به سه پارامتر مذکور مرتبط می گردد [۲]:

$$VS(s) = \frac{E(s)_{out}}{\dot{x}(s)} = \frac{G_d s^2}{s^2 + 2\xi\omega_o s + \omega_o^2} \quad (V/m/s) \qquad (۱)$$

رابطهٔ مذکور در تبدیلات لاپلاس معرفی شده است. حساسیت شتاب *(Acceleration Sensitivity)* را نیز می توان طبق رابطهٔ (۲) به صورت تابع تبدیل فوریهٔ لرزه نگار *(Fourier Transfer Function)* با تابع $H(\omega)$ برحسب $V/m/s^2$ معرفی کرد [۳]:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{G_d^2\omega^2}{\left(\omega_o^2 - \omega^2\right)^2 + 4\xi^2\omega_o^2\omega^2} \quad \left(\frac{V^2/HZ}{\left(m/s^2\right)^2/HZ}\right) \qquad (۲)$$

با گذشت زمان و کارکرد دستگاهها در شرایط محیطی مختلف، سه پارامتر مذکور به مرور زمان تغییر می کنند و بعد از گذشت مدت زمانی باید مقادیر جدید با توجه به ویژگیهای حس گر تغییر یافته پیدا شوند. کالیبره نمودن حس گرها یا به صورت مطلق (توسط کارخانهٔ سازنده) و یا به دلیل مشکلات کالیبره نمودن مطلق به صورت نسبی (در محل انجام آزمایش) انجام می گیرد. دستگاههای مذکور که ساخت کارخانهٔ کینمتریکس آمریکا *(Kinemetrix)* می باشند به دلیل تحریم ایران توسط این کشور، کالیبره نمودن مطلق آنها میسر نیست؛ بنابراین، در آزمایشهای ارتعاش محیطی و اجباری انجام یافته در پژوهشگاه می توان از کالیبره نمودن نسبی که روش رایجی است استفاده نمود. در کالیبره نمودن نسبی، کلیهٔ حس گرها در نقطه ای از محل انجام آزمایش و در جهات موردنظر به نحوی نزدیک یکدیگر و با رعایت حداقل فاصله آرایش می یابند که ارتعاشات ورودی به حس گرها تا حد امکان یکسان باشد. سپس، کلیهٔ حس گرها به صورت همزمان شروع به ثبت ارتعاشات (محیطی، اجباری و انفجار) می کنند و با مقایسهٔ دامنهٔ ارتعاشات و محتوای فرکانسی نگاشتهای هر کدام از حس گرها، ضرایب کالیبره نمودن نسبی بین آنها به دست- می آید. بدین منظور، بهتر است محتوای طیفی نگاشت کلیهٔ حس گرها در یک نمودار رسم گردد و به دلیل اینکه در هر کدام از سه محدودهٔ فرکانسی خاص، تغییر در یکی از پارامترهای سه گانه، باعث تغییر دامنهٔ طیف فرکانسی می شود به راحتی می توان سه پارامتر را در نگاشت هر حس گر طوری تغییر داد که محتوای فرکانسی آنها حداقل اختلاف ممکن را با یکدیگر داشته باشد. البته در داخل حس گرهای *SS-1* سیم پیچ کالیبراسیونی تعبیه شده است که می توان با متصل کردن حس گر به ثبات *SSR-1* ، اعمال پالسی به سیم پیچ مذکور، ثبت ارتعاش جرم و در نهایت محاسبهٔ مدت زمان یک سیکل، مقدار پریود طبیعی حس گر را به دست آورد [۴]؛ ولی، این روش در عمل با مشکلاتی مانند تأثیر منفی نوفه محیط بر پاسخ حس گر مواجه می شود.

۳- کالیبره نمودن دینامیکی حس گرها در چندین طرح مهم

در این بخش تاریخچهٔ ادبیات فنی کالیبره نمودن دستگاههای اندازه گیر در طرحهای مختلف ارتعاش سازه های مهم در دنیا، اشاره شده است.

تریفوناک *(Trifunac)* در سال ۱۹۷۰ در آزمایش ارتعاش محیطی ساختمان ۲۲ طبقهٔ فولادی گاز و برق سان دیاگو برای کالیبره نمودن چهار لرزه سنج از نوع رنجر *(Earth Science Ranger Seismometer)* از روش کالیبره نمودن

نسبی هر دو لرزه سنجی که در یک جهت جغرافیایی ثبت می کردند استفاده نمود [۵]. وی همچنین در آزمایش ارتعاش محیطی ساختمان ۳۹ طبقهٔ بانک اتحاد شهر لوس آنجلس در سال ۱۹۷۰، چهار لرزه سنج از نوع رنجر تله داین *(Teledyne Ranger Seismometer)* را در کنار یکدیگر و در یک جهت قرار داد و با ثبت ارتعاشات ساختمان، حس گرها را نسبت به یکدیگر کالیبره نمود [۶].

عبدالغفار *(Abdel-Ghaffar)* و همکاران در سال ۱۹۷۶ در آزمایش ارتعاش محیطی پل معلق وینسنت– توماس برای کالیبره نمودن هشت لرزه سنج *SS-1* به دلیل یکسان- نبودن پریود طبیعی و میرایی لرزه سنجها و در نتیجه، یکسان نبودن تابع تبدیل آنها و استفاده از نسبت طیف پاسخ هر حس گر به پاسخ حس گر مرجع، کلیهٔ حس گرها را در ایستگاه مرجع قرار دادند و با ثبت ۱۰ دقیقه نگاشت همزمان حس گرها در دو جهت افقی و قائم، حس گرها را به صورت نسبی کالیبره کردند [۷].

فاچ *(Foutch)* در سال ۱۹۷۷ به هنگام آزمایش ارتعاش محیطی بر روی ساختمان ۱۲ طبقهٔ اداره مرکزی شرکت جهانی پارسنز، کلیهٔ لرزه سنجهای مورد استفاده در آزمایش را یک بار در جهت شمالی- جنوبی و بار دیگر در جهت شرقی- غربی در مرکز پشت بام قرار داد و ارتعاش سقف به طور همزمان توسط کلیهٔ لرزه سنجها ثبت و مقادیر نسبی خروجی هر لرزه سنج برای تمام فرکانس های موردنظر تعیین گردید [۸].

عبدالغفار و همکاران [۹] در سال ۱۹۸۰ که برای انجام آزمایش ارتعاش اجباری و محیطی سد خاکی سانتا فلیسیا *(Santa Felicia)* در آمریکا از هشت لرزه سنج *SS-1* استفاده- کرده بودند برای کالیبره کردن حس گرها برای آزمایش ارتعاش اجباری، ابتدا سد را با فرکانس مشخص توسط دستگاه لرزاننده تحریک کردند و خروجی لرزه نگارها را که نزدیک یکدیگر و در جهت موردنظر مستقر شده بودند به صورت همزمان اندازه گیری نمودند. سپس، با اصلاح مناسبی در میرایی دستگاه گیرنده سیگنال *(Signal Conditioner Attenuation)*، دامنهٔ پاسخ کلیهٔ حس گرها را یکسان کردند. در آزمایش ارتعاش محیطی سد نیز با مقایسهٔ پیکهای مستقل دامنهٔ فوریه نگاشتی به طول ۱۰ دقیقه کالیبره نمودن نسبی در کلیهٔ فرکانس های موردنظر انجام شد و اختلاف خروجی حس گرها در هر فرکانس مشخص به دست آمد. این روش که کالیبره نمودن نسبی دینامیکی *(Relative Dynamic Calibration)* نامیده شده است به دلیل کفایت اندازه گیری دامنه های نسبی در به دست آوردن اشکال مدی استفاده می شود.

آقاکوچک و معماری در سال ۱۳۷۲ در آزمایش ارتعاش اجباری ساختمان دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف برای انجام کالیبره نمودن نسبی شش عدد شتاب سنج *FBA-11* ، حس گرها را در جهات شرق- غرب و شمال- جنوب و در مرکز جرم ساختمان نصب و به صورت همزمان، ارتعاشات ساختمان را بر اثر اعمال نیروی دستگاه لرزاننده در جهات موردنظر و در محدودهٔ فرکانس های ۰/۵ تا ۱۵ هرتز ثبت کردند. سپس، منحنی تشدید حاصل از هر شتاب سنج را با یکدیگر مقایسه کردند و شتاب سنجی که منحنی تشدید مربوط به آن با بقیه متفاوت بود مورد استفاده قرار- نمی گرفت. ایشان همچنین در آزمایش ارتعاش محیطی ساختمان مذکور که از شش لرزه سنج *SS-1* استفاده گردید، حس گرها را در کنار یکدیگر در بام نصب کرده و به صورت همزمان نگاشتها را ثبت کردند [۱۰].

آشتیانی و همکاران[۱۱] در سال ۱۳۷۷ در آزمایش دینامیکی مدل ۱:۲ ساختمان چهار طبقه برای کالیبره نمودن شتاب سنجهای *FBA-11*، هر کدام از شتاب سنجها را به صورت عمودی قرار دادند تا تحت شتاب ثقل قرار گیرند. با قرائت اختلاف پتانسیل دو سر شتاب سنجها که باید در حدود ۲/۵ ولت و متناظر با شتاب *1g* می بود، مقادیر قرائت- شده به عنوان مقادیر اولیه وارد نرم افزار *OASIS-100* گردید.

سیاری [۱۲] در سال ۱۳۷۸ در آزمایش ارتعاش اجباری بر روی سازه یک ساختمان اسکلت فلزی، برای کالیبره نمودن شتابنگارهای *FBA-11* از روش کالیبره نمودن نسبی استفاده نمود. بدین صورت که هفت عدد شتابنگار در کنار هم و در مجاورت دستگاه لرزاننده در جهت شمال- جنوب قرار داد و دستگاه لرزاننده در همین جهت و در چند فرکانس، ساختمان را به ارتعاش درآورد. با محاسبهٔ نسبت بیشینه شتاب و اختلاف فاز هر حس گر نسبت به یک حس گر مرجع، در هر فرکانس تحریک، ضرایب اصلاح به دست آمد.

سیمی لی *(Cimilli)* و همکاران [۱۳] در سال ۱۹۹۸ در آزمایش ارتعاش محیطی و ضربه سد خاکی الی بی در ترکیه که از هشت دستگاه لرزه نگار *L22* استفاده کرده بودند، پس از ثبت همزمان حس گرها در مرکز تاج، کالیبره نمودن را در دو مرحله انجام دادند. در مرحله کالیبره نمودن از نظر محتوای فرکانسی، ابتدا تصحیح خط مبنا بر روی نگاشتهای خام هشت حس گر انجام گردید و با رسم داده ها در حوزهٔ فرکانس و ظاهر شدن دو نوفه با فرکانس کوچک و بزرگ، از فیلتر باند باریک ۰/۵تا ۱۲ هرتز برای حذف نوفه استفاده-شد و تعداد نمونه در ثانیه از ۱۰۰ به ۲۵ کاهش یافت. سپس، با رسم محتوای فرکانسی نگاشتها و ظاهر شدن اولین فرکانس تشدید سد در محدودهٔ ۱/۴ هرتز، از فیلتر باند باریک ۱/۱تا ۱/۵۷ هرتز استفاده شد و اولین فرکانس تشدید کلیهٔ کانال ها برابر اولین فرکانس مدی سد به دست-آمد. در مرحلهٔ دوم کالیبره کردن که باید دامنهٔ کلیهٔ نگاشتها یکسان گردند، دامنهٔ کلیهٔ کانال ها به مقادیر نگاشتهای کانال دوم هم تراز شد و ضرایب تصحیح هر کانال به دست آمد و با اعمال این ضرایب در نگاشتهای هر کانال، اختلاف دامنه ها حذف گردید.

یمینی فرد در سال ۱۳۷۸ آزمایش کالیبره نمودن نسبی ۹ دستگاه لرزه سنج *SS-1* پژوهشگاه را با استفاده از یک دستگاه ثبات *SSR-1* و با اعمال پالسی بر سیم پیچ کالیبره لرزه سنجها انجام داد. آزمایش کالیبره نمودن در ایستگاه چاران (به دلیل نوفهٔ پایین محل) انجام شد و پاسخ پله ای *(Step Response)* لرزه سنجها در حوزهٔ زمان و فرکانس به دست آمد. مقایسهٔ پاسخ پله ای حس گرها با یکدیگر نشان داد که تمامی دستگاهها (بجز دو مورد) در محدودهٔ فرکانسی ۰/۲ تا ۱۰ هرتز از پاسخ یکسانی برخوردارند. لازم به ذکر است در این روش از روش ثبت نگاشت پیوسته استفاده نشد؛ بلکه با اعمال یک پالس الکتریکی از طرف دستگاه *SSR-1* بر سیم پیچ حس گر *SS-1* ، پاسخ حس گر به این تحریک و ارتعاش آزاد پس از آن ثبت گردید [۱۴ و ۴]. البته روشهای دیگر کالیبره نمودن بر روی حس گرهای مذکور هم اکنون به کمک کارشناسان پژوهشگاه در حال انجام می باشد.

در سال ۱۳۷۹ بر مبنای طرح پایان نامه دکترای تعریف-شده ای در پژوهشگاه، آزمایشهای ارتعاش اجباری و محیطی (از جمله انفجارهای مختلف سایتی) بر روی سدهای خاکی مارون و مسجدسلیمان در دستور کار قرار گرفت. در این طرح که تا راه اندازی دستگاههای اندازه گیر جدید، از لرزه نگارهای *SS-1* و شتابنگارهای *FBA-11* به همراه ثباتهای *SSR-1* استفاده می شود از روش نسبی برای کالیبره نمودن دستگاههای مذکور استفاده شده است. نمونه ای از کالیبره نمودن دستگاههای مذکور در مرکز تاج سد خاکی مسجدسلیمان در شکل (۱) نشان داده شده است. به دلیل اینکه به هنگام آزمایش ارتعاش محیطی سد، نگاشتهای حاصله توسط حس گرهای مذکور عمدتاً برای محاسبهٔ پارامترهای مدی و از جمله اشکال مدی سازه ها استفاده-می شود، پارامترهای نسبی به دست آمده از آزمایش کالیبره نمودن، جوابگوی اهداف آزمایشها می باشند.

شکل (۱): آزمایش کالیبره نمودن حس گرهای سرعت سنج SS-1 و شتاب نگار FBA-11 در مرکز تاج سد مسجدسلیمان. کلیهٔ حس گرها، ارتعاشات محیطی مرکز تاج سد را به صورت همزمان در جهت قائم ثبت می کنند.

در برخی از آزمایشهای دیگر مانند ثبت ارتعاشات حاصل از انفجار در مغار نیروگاه سد مسجدسلیمان که ثبت دامنهٔ مطلق ارتعاشات مورد درخواست کارفرما بود و به دلیل عدم امکان کالیبره نمودن مطلق، باید از روش ابتکاری جدیدی استفاده می شد. از طرف دیگر به دلیل محتوای بالای فرکانسی ارتعاشات حاصل از انفجار، مخصوصاً هنگامی که محل ثبت ارتعاشات فاصلهٔ کمی از محل انفجار داشته-باشد (مانند آنچه در مغار نیروگاه مسجدسلیمان موردنظر بود) و شفاف نبودن اطلاعات موجود در مشخصات فنی حس گر و

ثباتها در مورد حداکثر قابلیت ثبت محتوای فرکانسی دستگاهها با توجه به محدودیت فرکانسی حس گر و نوع فیلتر استفاده شده در آن و پیرو مکاتبات صورت گرفته با شرکت کینمتریکس و عدم دریافت جواب مشخص، استفاده از دستگاه میز لرزان بهترین گزینه بود. بدین منظور، ۹ دستگاه حس گر *SS-1* و ۹ دستگاه حس گر *FBA-11* به همراه چهار دستگاه ثبات *SSR-1* سه کاناله و یک دستگاه ثبات *SSR-1* شش کاناله، یک دستگاه حس گر و ثبات *SSA-2*، دو دستگاه ژئوفون ژئوسایزمیک با فواصل مشخص و در جهت ارتعاش میز لرزان بر روی میز نصب گردیدند. به منظور عدم آسیب به صفحهٔ اتصال میز لرزان و افزایش سطح استقرار حس گرها، ابتدا یک صفحهٔ فولادی به ابعاد ۱×۱۱۵× ۱۱۵ سانتیمتر به کمک هشت پیچ به صفحهٔ آلومینیومی میز لرزان وصل شدند و حس گرها بر روی صفحهٔ فولادی مذکور به کمک چسب محکم گردیدند. به منظور کنترل نحوهٔ کارکرد اتصال محکم شده با چسب، آزمایش دیگری برنامه ریزی شد و در این آزمایش یک حس گر *SS-1* با اتصال چسبی و حس گر دیگری به کمک تسمه های فلزی به صفحه متصل گردید. به منظور کنترل مضاعف ارتعاش میز لرزان نیز از دو حس گر تغییرمکان سنج دینامیکی آزمایشگاه دینامیک خاک استفاده گردید. شکل (۲) نمایی از دستگاه میز لرزان پژوهشگاه به همراه تعدادی از حس گرهای نصب شده بر روی آن برای انجام آزمایش کالیبره نمودن را نشان می دهد. در قسمتهای بعدی مشخصات دستگاههای استفاده شده، نحوهٔ انجام آزمایش و نتایج حاصل از کالیبره نمودن حس گرهای *SS-1* و *FBA-11* به اجمال ارائه گردیده است.

۴- مشخصات دستگاههای استفاده شده در آزمایش کالیبره نمودن

در آزمایش کالیبره نمودن، دستگاههای متعددی مورد استفاده قرار گرفت که مشخصات آنها به اجمال ارائه گردیده است.

۴-۱- مشخصات حس گرهای *SS-1*

لرزه سنجهای *SS-1* که ساخت کارخانهٔ کینمتریکس می باشند به طور وسیعی به عنوان لرزه سنج پریود کوتاه در کارهای صحرایی مورد استفاده قرار می گیرند. این دستگاهها دارای خصوصیات حساسیت بالا، قابلیت تنظیم فرکانس طبیعی، ساختمان محکم و بادوام و ضد آب با ابعاد ۱۴۰ میلیمتر قطر، ۳۰۵ میلیمتر طول و وزن ۵ کیلوگرم هستند [۴].

شکل (۲): آزمایش کالیبره کردن حس گرهای SS-1 و FBA-11 بر روی میز لرزان پژوهشگاه

۴-۲- مشخصات حس گرهای *FBA-11*

شتاب سنجهای *FBA-11* ساخت کارخانهٔ کینمتریکس بسیار حساس و سبک می باشد و حمل و نقل و بهره برداری از آنها به راحتی انجام می گیرد. دقت این شتاب سنجها *0.001g* و حداکثر شتاب قابل اندازه گیری توسط آنها *1g* می باشد و این در حالی است که اختلاف پتانسیل دو سر آن با وجود مقاومت ۱۰۰۰۰ اهمی مقدار ۲/۵ ولت را نشان می دهد. این شتاب سنج های تک مؤلفه ای را می توان با چسب و یا با پیچ در سطوح افقی یا عمودی نصب کرد. ابعاد آنها ۶۵×۷۵×۱۲۵ میلیمتر و وزن آنها ۷۰۰ گرم می باشد [۱۵].

۴-۳- مشخصات ثباتهای *SSR-1*

ثباتهای *SSR-1* ساخت کارخانه کینمتریکس می تواند نگاشتهای حس گرهای *SS-1* و *FBA-11* را ضبط کند. این دستگاهها در حالت معمولی قابلیت ضبط سه کانال را (که تا شش کانال نیز قابل افزایش است) دارند و قادر به نرخ نمونه برداری تا ۱۵۰۰ نمونه در ثانیه (بسته به تعداد کانال های ضبط) می باشند. در این ثباتها، وضوح اسمی *(Nominal Resolution)* و محدودهٔ دینامیکی *(DynamicRange)* مبدل *A/D* برابر ۱۶ بیت می باشد. هنگام ضبط نگاشتها، اطلاعات نخست بر روی دیسک سخت این ثبات ضبط می شود و سپس به فلاپی دیسک و یا کامپیوتر منتقل می گردد [۱۶].

۴-۴- مشخصات حس گرهای تغییرمکان سنج

دو حس گر تغییرمکان سنج استفاده شده در آزمایش از نوع غیرتماسی *(Non-Contact Type Sensor)* با قابلیت ثبت بیشینه پنج میلیمتر تغییرمکان پیک تا پیک دینامیکی و ساخت کارخانهٔ سیکن *(Seiken)* ژاپن می باشند و تا دقت $10^{-4}\,mm$ قابلیت ثبت تغییرمکان را دارند. یکی از پایه های حس گر بر روی قطعهٔ متحرک و پایهٔ دیگر به تکیه گاه صلبی متصل می شود و تغییرمکان نسبی بین قطعهٔ متحرک و تکیه گاه صلب را بر اثر تغییر میدان مغناطیسی بین دو صفحه حس گر اندازه گیری می کند. خروجی حس گرها پس از عبور از دستگاه امپلی فایر، به یک دستگاه ثبات رقمی از نوع *DR-F3* ساخت شرکت تیک *(Teac)* و با مشخصات حداکثر نرخ نمونه برداری *200 kHz* ، حداکثر حافظهٔ *2Mb* و ورودی آنالوگ و رقومی *(Analog & Digital Input)* ۱۶ بیتی منتقل و سپس بر روی دیسکت به صورت تاریخچهٔ زمانی ولتاژ ثبت می گردد.

۴-۵- مشخصات کلی دستگاه میز لرزان

دستگاه میز لرزان هیدرولیکی دو محورهٔ *(Bi-Axial Servohydraulic Vibration Test System)* ساخت کارخانه سروتست *(Servotest)* که اخیراً در پژوهشگاه مستقر و به بهره برداری رسیده است دارای قابلیت اعمال حداکثر فرکانس بارگذاری *500Hz*، حداکثر شتاب *82g*، حداکثر سرعت *0.64 m/s* و حداکثر تغییرمکان پیک تا پیک *50mm* می باشد و قادر است در یک جهت افقی یا قائم بر مدل ساخته شده بر روی میز، ارتعاش وارد سازد [۱۷].

۵- نحوهٔ انجام آزمایش کالیبره نمودن

آزمایش کالیبره نمودن حس گرهای *SS-1* و *FBA-11* به کمک میز لرزان پژوهشگاه در دو مرحله به ترتیب در تاریخ ۱۳۷۹/۸/۱۱ و ۱۳۷۹/۱۱/۲ انجام شد. در هر مرحله از آزمایش، ابتدا دستگاههای ثبات *SSR-1* با استفاده از دو دستگاه کامپیوتر همزمان شدند و پس از نصب حس گرها بر روی صفحهٔ فولادی مستقر بر میز لرزان، به منظور کنترل نهایی از صحت کارکرد حس گرها و ثباتها و اتصال کابلها،به کلیهٔ دستگاههای ثبات دستور *FT* داده شد. نحوهٔ انجام آزمایش به تفکیک در دو مرحله زیر پیگیری شد.

۵-۱- مرحلهٔ اول

این مرحله از آزمایش مطابق شکل (۲) به کمک کلیهٔ حس گرهای سرعت سنج *SS-1* و شتابنگار *FBA-11* و پنج دستگاه ثبات *SSR-1* در فرکانس های ۰/۵، ۰/۸، ۱، ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ هرتز و در پله های تغییرمکان میز لرزان برابر ۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۷ و ۰/۱ الی ۱ میلیمتر (با افزایش ۰/۱ میلیمتر) به منظور تعیین محدودهٔ کاربرد حس گرها و مقایسهٔ نسبی دامنه و محتوای فرکانسی نگاشتهای ثبت شده با آنها انجام گردید. برای ثبت پاسخ میز لرزان به فرکانس و تغییرمکان اعمال شده نیز از دو حس گر بیرونی تغییرمکان سنج استفاده شد.

تعداد نمونه برداری برای حس گرهای سرعت سنج و شتابنگار برابر ۲۰۰ نمونه در ثانیه و برای حس گر تغییرمکان سنج نیز بسته به فرکانس بارگذاری، ۵۰ تا ۲۰۰۰ نمونه در ثانیه انتخاب گردید. مقدار *Gain* دستگاههای *SSR-1* نیز به صورت آزمایشی برابر ۱۰۰، ۱۰ و ۱ انتخاب شد و پس از بازبینی نگاشتها، این مقدار برای ادامهٔ کار برابر یک برگزیده شد. مدت زمان ضبط نگاشت برای هر پلهٔ بارگذاری با توجه به تعداد حداقل نقاط مورد نیاز جهت پردازش، تعداد زیاد پله های بارگذاری و مهارت اپراتور دستگاه میز لرزان، از حدود ۱۰ ثانیه تا ۳۰ ثانیه انتخاب شد. در این مرحله از آزمایش از فیلتر آنتی الیاس *(Anti-Alias Filter)* با فرکانس حدی *50Hz* و از نوع باتروورث با شش پل *(6- Pole Butterworth)* استفاده گردید.

۵-۲- مرحله دوم

مرحله دوم آزمایش کالیبره نمودن با استفاده از سه حس گر *SS-1* و سه حس گر *FBA-11* متصل به کانال های یک تا سه دو دستگاه ثبات *SSR-1* و یک دستگاه حس گر و ثبات سه کانالهٔ *SSA-2* به منظور بررسی قابلیت ثبت نگاشت حس گرهای مذکور در فرکانس های بزرگ (۵۰ الی ۱۳۰ هرتز) انجام شد. در این مرحله نیز برای کنترل ارتعاشات میز لرزان از دو حس گر تغییرمکان سنج آزمایشگاه دینامیک خاک استفاده شد. با استفاده از دو حس گر تغییرمکان سنج به جای یک حس گر، علاوه بر کنترل دقیقتر ارتعاشات میز لرزان، اطمینان به صحت کارکرد حس گرها نیز بیشتر می شد. هنگام آزمایش با دستگاه میز لرزان با ایده گرفتن از نتایج آزمایشهای مرحله اول و جهت پرهیز از افزایش دامنهٔ

جدول (۱): فرکانس و دامنهٔ بارگذاری میز لرزان در مرحلهٔ دوم آزمایش

فرکانس (Hz)	۴۰	۵۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۰	۱۳۰
تغییرمکان (میلیمتر)	۰/۰۱۵	۰/۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱

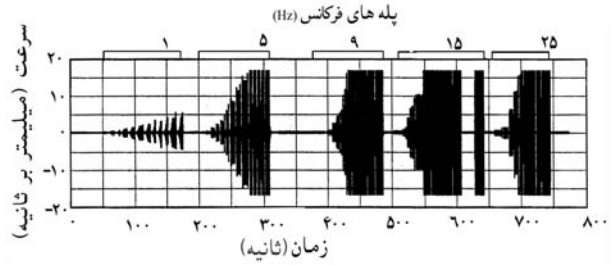
ارتعاشات از حداکثر قابلیت ثبت (*Clipping Level*) حس گرها ، فرکانس و دامنهٔ تغییرمکان بارگذاری میز لرزان مطابق جدول (۱) انتخاب گردید. تعداد نمونه برداری برای حس گرهای سرعت سنج و شتابنگار برابر ۱۰۰۰ نمونه در ثانیه و برای حس گرهای تغییرمکان سنج نیز بسته به فرکانس بارگذاری، برابر ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نمونه در ثانیه انتخاب گردید. مقدار *Gain* دستگاههای *SSR-1* برابر ۱ و مدت زمان ثبت نگاشت در هر پلهٔ بارگذاری نیز از حدود ۱۰ تا ۳۰ ثانیه تعیین گردید. در این مرحله از آزمایش در برخی از پله های بارگذاری از هر دو فیلتر باتروورث با فرکانس حدی ۵۰ و ۲۵۰ هرتز استفاده شد.

۶- تحلیل نگاشتهای ثبت شده در آزمایش

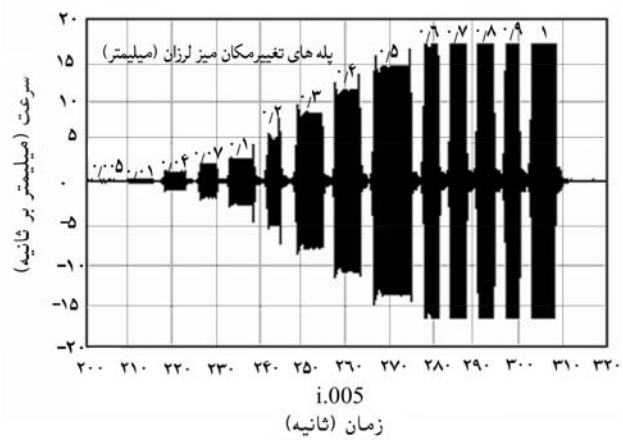
عملیات پردازش نگاشتهای ثبت شده توسط حس گرهای مستقر بر میز لرزان، پس از انتقال از ثباتها به رایانه، با استفاده از نرم افزار *MATHCAD-8* انجام شد و تاریخچهٔ زمانی نگاشت، محتوای فرکانسی و تاریخچهٔ زمانی تغییرمکان حس گرهای *SS-1* با استفاده از روش انتگرال گیری به دست آمد.

۶-۱- تحلیل نگاشتهای مرحلهٔ اول آزمایش

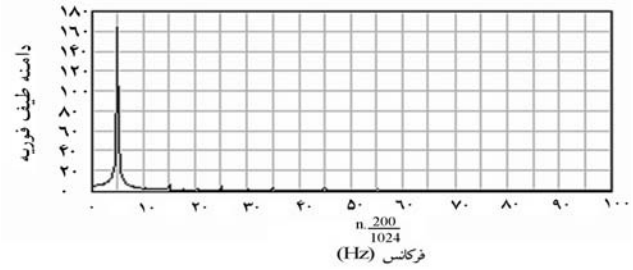
تحلیلهای این مرحله از آزمایش به منظور تعیین محدودهٔ کاربرد حس گرها و مقایسهٔ نسبی دامنه و محتوای فرکانسی ثبت شده با آنها انجام شد. نمونه ای از نتایج تحلیل در اشکال (۳) و (۴) مشاهده می شود. در شکل (۳) که مربوط به نگاشتهای ثبت شده با یک حس گر *SS-1* و یک دستگاه ثبات *SSR-1* می باشد، شکل (۳، الف) تاریخچهٔ زمانی سرعت ثبت شده با حس گر مذکور را برحسب میلیمتر بر ثانیه به ترتیب در پنج فرکانس بارگذاری ۱، ۵، ۹، ۱۵ و ۲۵ هرتز نشان می دهد. شکل مذکور نشان می دهد که در هر فرکانس بارگذاری، دامنه های تغییرمکان میز لرزان از مقادیر کوچک (۰/۰۰۵ میلیمتر) تا مقادیر نسبتاً بزرگ (۱ میلیمتر) تغییر می یابد. قطعهٔ مربوط به فرکانس بارگذاری پنج هرتز در فاصلهٔ زمانی ۲۰۰ تا ۳۲۰ ثانیه به همراه پله های تغییرمکان تفکیک شده در شکل (۳، ب) ملاحظه می گردد. مشاهده می شود که حس گر سرعت سنج در فرکانس پنج هرتز حداکثر تا پله تغییرمکان ۰/۵ میلیمتر میز لرزان را می تواند ثبت کند و بیش از آن، دامنهٔ ارتعاش بریده خواهد شد که مقدار حد سرعت از این شکل برابر ۱۶/۶۷ ± میلیمتر بر ثانیه به دست می آید. در شکل (۳، پ) نیز محتوای فرکانسی ۱۰۲۴ نقطه از نگاشت مربوط



الف: تاریخچهٔ زمانی سرعت ثبت شده در پنج پلهٔ فرکانس بارگذاری



ب: تاریخچهٔ زمانی سرعت ثبت شده در پلهٔ بارگذاری فرکانس پنج هرتز و ۱۴ دامنهٔ تغییرمکان میز لرزان



پ: محتوای فرکانسی نگاشت ثبت شده در فاصلهٔ زمانی ۲۶۹ الی ۲۷۴ ثانیه مربوط به فرکانس پنج هرتز و دامنهٔ بارگذاری ۰/۵ میلیمتر

شکل (۳): نگاشتهای ثبت شده با یک حس گر SS-1 بر روی میز لرزان

بـه فرکانس و دامنهٔ بارگذاری پنج هرتز و ۰/۵ میلیمتر را که در فاصـله زمانـی ۲۶۹ تا ۲۷۴ ثانیه قرار گرفته است، نشان‌می دهد. در این شکل، علاوه بر پیک اصلی در فرکانس *5Hz*، پـیکهای کوچکـتری نـیز در برخـی فـرکانس هـای دیگـر مشـاهده می شود که متعلق به ارتعاشات جانبی بجز ارتعاش اصـلی مـیز لـرزان (مانـند ارتعـاش حاصـل از کارکـرد پمپ هیدرولـیک دسـتگاه مـیز لـرزان و یـا دیگـر مـنابع ارتعاش محیطـی اطـراف) مـی باشد. در شکل (۴) که مراحلی مشابه با شکل (۳) برای نگاشت ثبت شده با یک شتابنگار *FBA-11* و یک دستگاه ثبات *SSR-1* پیگیری شده است، حداکثر شتاب قـابل ثبـت بـا این شتابنگار در شکل (ب) برابر *±1g* ملاحظه‌می گـردد. بـر مبنای مطالعات تکمیلی که در فرکانس ها و دامـنه هـای بـارگذاری مخـتلف دستگاه میز لرزان انجام شد حداکثـــــر محدودهٔ قابـــل ثبت توسط حس گرهای *SS-1* و *FBA-11* مطابق جدول (۲) به دست آمد.

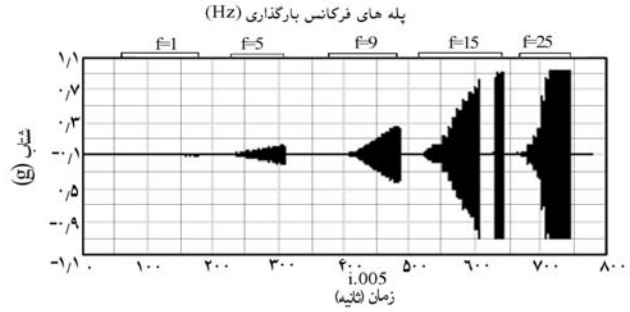
جدول (۲): حداکثر محدودهٔ قابل اندازه‌گیری با حس‌گرهای سرعت‌سنج SS-1 و شتابنگار FBA-11 برحسب فرکانس و دامنهٔ تغییرمکان میز لرزان

D(mm) \ f(Hz)	۳	۷	۱۱	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
۰/۰۷							
۰/۱							
۰/۲							
۰/۳							
۰/۵							
۰/۸							
۱							

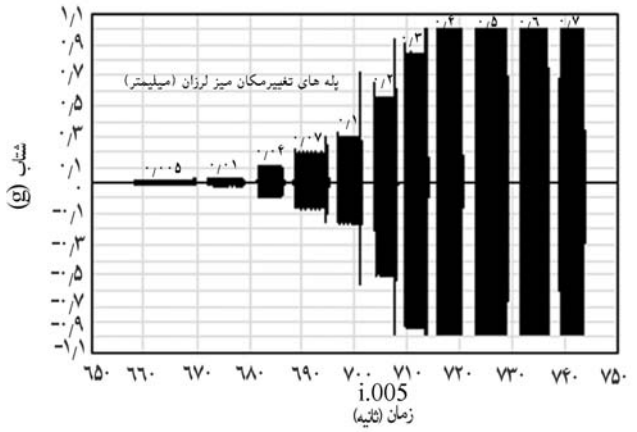
SS-1 ←

FBA-11 ←

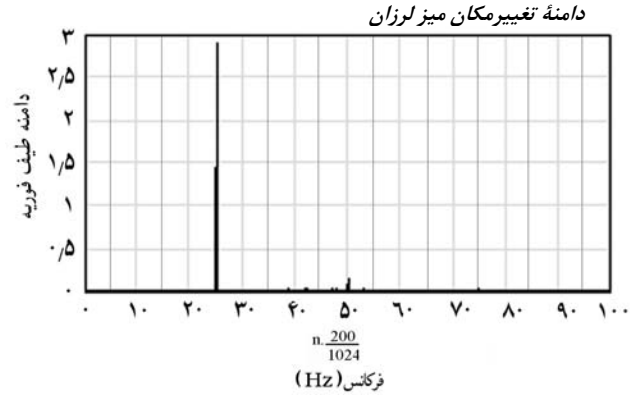
هـدف دیگـر از انجـام آزمایش مرحلهٔ اول، مقایسهٔ نسبی دامـنه و محـتوای فرکانسـی ثبـت شـده بـا حـس گـرها در یک ارتعاش ثابت میز لـرزان بود که با ثبت همزمان کلیهٔ حـس گـرهای مسـتقر بر روی میز لرزان انجام شد. در شکل (۵، الف) تاریخچهٔ زمانی ســـرعت ثبت شده با سه حس گر *SS-1* متصل به کانال های اول تا سوم یک دستگاه ثبات *SSR-1* و در شکل (۵، ب) نیز محتوای فرکانسی نگاشتهای سه حس گر مذکـور بـا یکدیگر مقایسه شده اند. در نگاشتهای مذکور که در فرکانس و دامنهٔ بارگذاری ۱۰ هرتز و ۰/۱ میلیمتر میـــز



الف: تاریخچهٔ زمانی شتاب ثبت شده در پنج پله فرکانس بارگذاری



ب: تاریخچهٔ زمانی شتاب ثبت شده در پله بارگذاری با فرکانس ۲۵ هرتز و ۱۱ دامنهٔ تغییرمکان میز لرزان



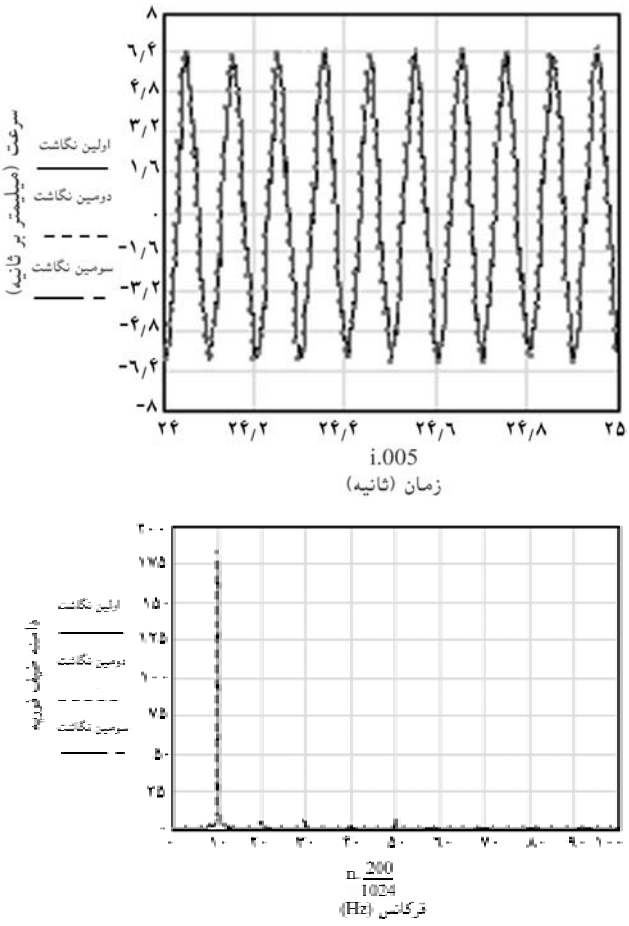
پ: محتوای فرکانسی نگاشت ثبت شده در فاصلهٔ زمانی ۶۸۹ الی ۶۹۴ ثانیه مربوط به فرکانس ۲۵ هرتز و دامنهٔ بارگذاری ۰/۰۷ میلیمتر

شکل (۴): نگاشتهای ثبت شده با یک حس گر FBA-11 بر روی میز لرزان

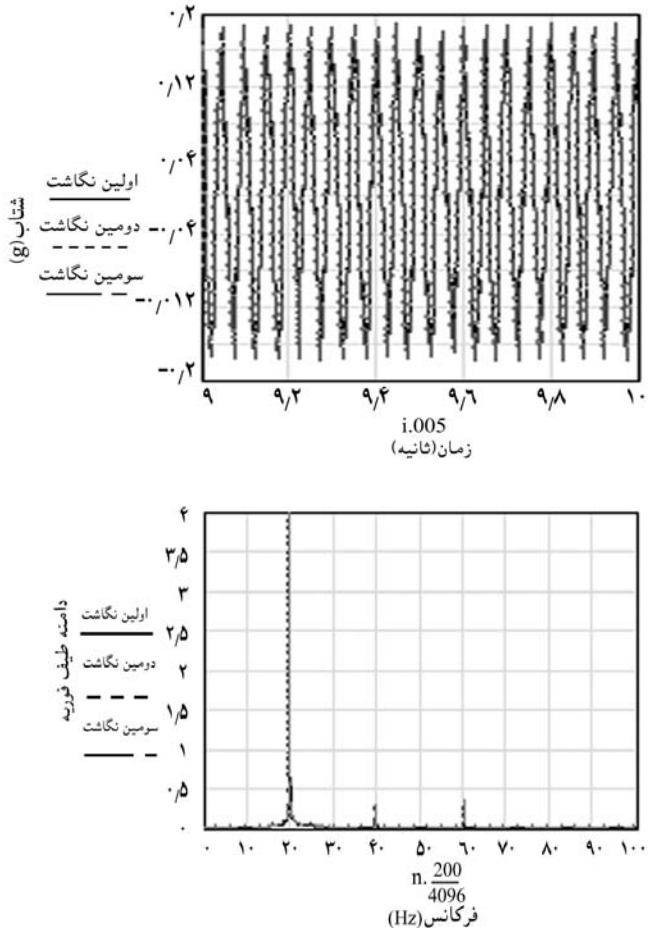
لرزان ثبت شده اند، حداکثر اختلاف سرعت‌اندازه گیری شده بین دو حس گر برابر ۳/۵٪ و حداکثر اختلاف دامنهٔ تبدیـل فوریـه نـیز برابـر ۳/۵٪ محاسـبه شده است. حداکثر اختلاف دیگر حس گرهای *SS-1* نیز (بجز یک مورد) در فرکانس ها و تغیـیرمکانهای مخـتلف میز لرزان کمتر از ۵٪ بوده است. در کلیهٔ تحلیلهای مـــزبور، از مقدار یکسان ثابت مولد میرا شدهٔ $G_d = 150\,V/m/s$ اسـتفاده شـده اسـت کـه انتخاب این مقدار بـرای حـس گرهای *SS-1* رایج است [۱۸]. لازم به ذکر است کـه خطـای محاسبه شدهٔ بین حس گرها در حالات مختلف

ارتعـاش مـیز لرزان مقدار ثابتی نیست و به فرکانس و دامنهٔ تغیـیرمکان ارتعـاش مـیز لـرزان بستگی دارد. در صورتی که در برخی مطالعات خاص، دقت بیشتری مـــورد نیاز بـــاشد، می توان حس گرها را به طور نسبی کالیبره کرد و ضرایب کالیبره نمودن نسبی بین حس گرها را به دست آورد. در این صورت، توصیه می شود ابتدا با کلیهٔ حس گرها تحت فرکانس بارگذاری ۱۳ هرتز به صورت همزمان ثبت نگـاشت کرده و طیف *PSD (Power Spectral Density)* نگاشتها را در یک نمودار رسم نمود. به دلیل اینکه پارامترهای فرکانس طبیعی (f_o) و نسبت میرایی (ξ) حس گرها در محدودهٔ اطراف فرکانس ۱۳ هرتز، پاسخ را تحت تأثیر قرار نمی دهند، می توان ابتدا برای هر حس گر، مقدار بهینهٔ G_d را طوری پیدا کرد که کمترین اختلاف در مقدار طیف نگاشتها در باند فرکانسی مذکور به وجود آید. سپس، در باند فرکانسی ۰/۱ تا ۰/۴ هرتز مقدار بهینهٔ f_o را به دلیل عدم تأثیر پارامتـر ξ بر پاسخ در این محدودهٔ فرکانسی و در باند فرکانسی ۰/۸ تا ۱/۲ هرتز مقدار بهینهٔ ξ را (که پارامتر ξ، پاسخ را تحت تأثیر قرار می دهد و پارامترهای f_o و G_d نیز که قبلاً بهینه-شده اند) پیدا نمود.

مقایسهٔ دامنه و محتوای فرکانسی شتابهای ثبت شده با حس گرهای *FBA-11* توجه بیشتری می طلبد؛ زیرا به-نظر می رسد تأثیر نوفه در فرکانس های پایین بارگذاری، شتاب سینوسی اعمال شده از طرف میز لرزان را تحت تأثیر قرار می دهد. به عنوان نمونه، نگاشتهای حاصل از ارتعاش میز لرزان در دو فرکانس ۲۰ و ۱۰ هرتز به ترتیب در شکلهای (۶) و (۷) پردازش شده اند. در شکل (۶، الف) تاریخچهٔ زمانی شتاب ثبت شده با سه حس گر *FBA-11* که به کانال های اول تـــا سوم یک دستگاه ثبات *SSR-1* متصل شده بودند و در شکل (۶، ب) محتوای فرکانسی نگاشتهای سه حس گر با یکدیگر مقایسه شده است. البته در نگـــاشت شتاب، اختلاف

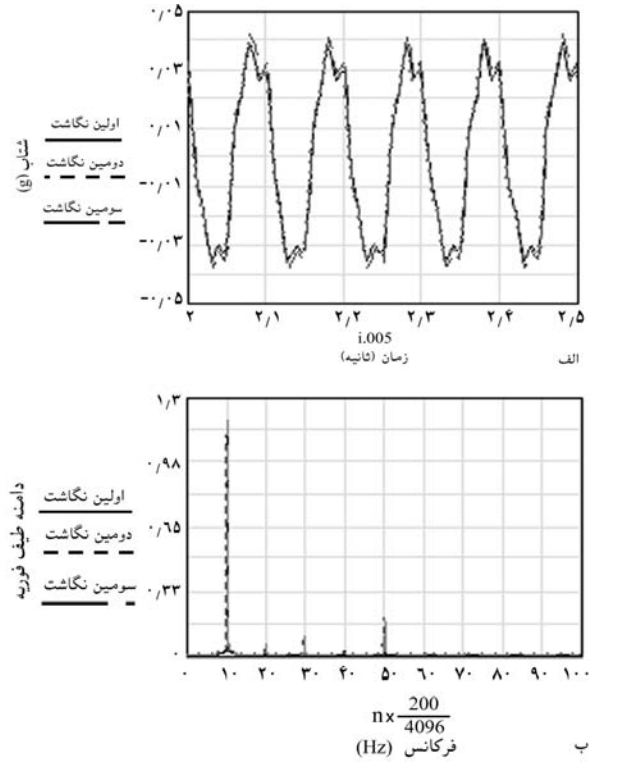


شکل (۵): الف) مقایسهٔ تاریخچهٔ زمانی سرعت؛ ب) محتوای فرکانسی برای نگاشتهای ثبت شده با سه حس گر SS-1 در حالت ارتعاش میز لرزان با فرکانس ۱۰ هرتز و دامنهٔ تغییرمکان ۰/۱ میلیمتر

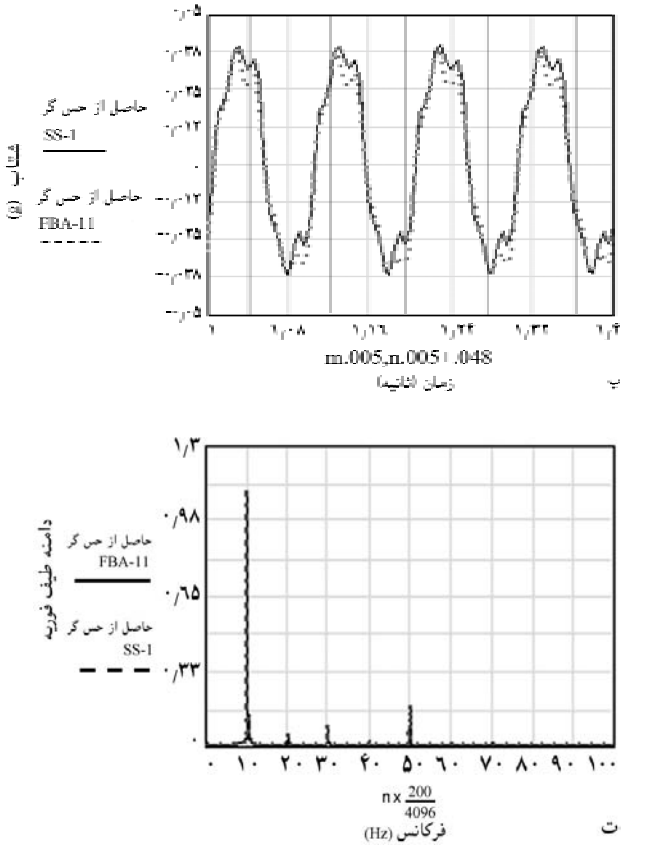


شکل (۶): الف) مقایسهٔ تاریخچهٔ زمانی شتاب؛ ب) محتوای فرکانسی نگاشتهای ثبت شده با سه حس گر FBA-11 در حالت ارتعاش میز لرزان، با فرکانس ۲۰ هرتز و دامنهٔ تغییرمکان ۰/۱ میلیمتر

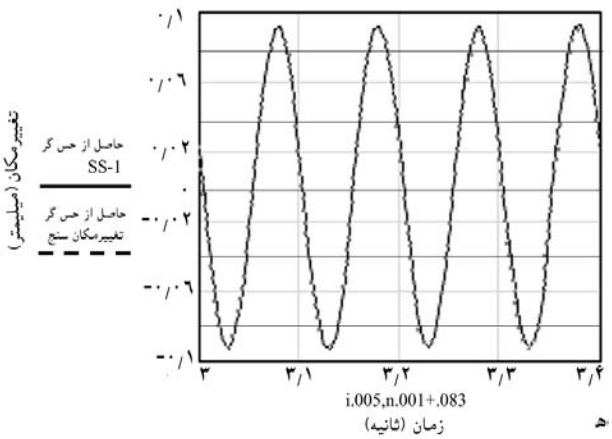
عـرض از مـبدأ *(Offset)* کـه در نگاشتهای *FBA-11* به صورت معمـول وجود دارد حذف گردیده است. در نگاشتهای مذکور کـه در فـرکانس ۲۰ هرتـز و دامـنهٔ بـارگذاری ۰/۱ میلیمتر میز لرزان ثبت شده اند حداکثر اختلاف شتاب اندازه گیری-شـده بیـن دو حـس گـر برابر ۱۴٪ و حداکثر اختلاف دامنهٔ تـبدیل فوریـه نـیز برابـر ۱۱٪ محاسـبه شـده اسـت. شـکل (۶، الـف) نشـان مـی دهد که شتاب اعمال شده از طرف میز لـرزان در فـرکانس و دامنهٔ ارتعاشی ۲۰ هرتز و ۰/۱ میلیمتر از شـکل سینوسـی منظمی برخوردار است و پیک موجود در شـکل (۶، ب) در فـرکانس مذکور نیز مؤید این مطلب است. در صـورتی کـه دستگاه میز لرزان در فرکانس های کوچکتر ارتعاش کند، مانند آنچه که در شکل (۷، الف) برای تاریخچهٔ زمانـی و در شکل (۷، ب) برای محتوای فرکانسی شتاب میز لرزان در حالت بارگذاری با فرکانس و دامنهٔ ارتعاش ۱۰ هرتز و ۰/۱ میلیمتر نشان داده شده است، علاوه بر موج سینوسی بـا فـرکانس ۱۰ هرتز، ارتعاشات ضعیفی نیز با فرکانس های ۵۰، ۳۰ و ۲۰ هرتـز نگاشـت را تحـت تأثـیر قرار می دهد. به منظور اطمینان به صحت نگاشتهای گرفته شده با شتاربنگارها، شـتاب محاسبه شده از سرعت یک لرزه نگار *SS-1* و محتوای فرکانسـی حاصـله که در حالت بارگذاری مذکور ثبت شده-است (شکل ۵) در شکـل (۷،پ و ت) بـا شتـاب و محتوای فرکانسـی یـک حس گر *FBA-11* مقایسه شده است و حاکی از اخـتلاف ناچیز بین نگاشتهای دو نوع حس گر شتاب سنج و سرعت سنج و در نتیجه صحت کارکرد نسبی آنها دارد. در شـکل (۷، هـ) نـیز کـه تغیـیرمکان محاسبه شده از سرعت لـرزه نگـار مذکـور (پـس از انجـام تصـحیح خـط مبـنا) بـا تغییرمکان اندازه گیـری شده با حس گر تغییرمکـــان سنج مقایسـه گـردیده است، حکایت از اختلاف ۰/۵٪ و در نتیجه درستی کارکرد حس گرها دارد. در مجموع، مقایسهٔ شکلهای (۵) و (۷) نشـان مـی دهـد که در حالت بارگذاری میز لرزان بـا فـرکانس ۱۰ هرتـز و دامـنهٔ ۰/۱ میلیمـتر، سـرعت و تغیـیرمکان حالـت مـنظم سینوسی دارد؛ ولی، شتاب نگارها نوفـه هـای ضـعیف دیگـری را نیز ثبت می کنند. با افزایش فـرکانس و دامـنهٔ بـارگذاری، شـتاب مـیز نـیز حالت منظم سینوسی پیدا می کند؛ به طوری که در فرکانس ۱۵ هرتز و



شکل (۷، الف و ب): مقایسهٔ تاریخچهٔ زمانی و محتوای فرکانسی نگاشتهای شتاب ثبت شده با سه حس گر FBA-11



شکل (۷، پ و ت): مقایسهٔ تاریخچهٔ زمانی و محتوای فرکانسی شتاب ثبت شده با یک حس گر FBA-11 و محاسبه شده از یک حس گر SS-1



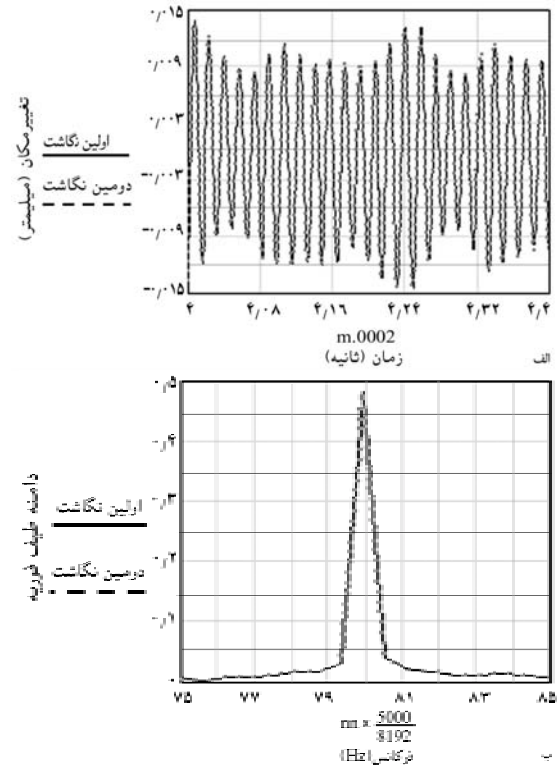
(هـ) مقایسهٔ تاریخچهٔ زمانی تغییرمکان ثبت شده با یک حس گر تغییرمکان سنج و محاسبه شده از یک حس گر SS-1

شکل (۷): مقایسهٔ نگاشتهای شتاب، سرعت و تغییرمکان ثبت شده با حس گرها در حالت بارگذاری میز لرزان با فرکانس ۱۰ هرتز و دامنهٔ تغییرمکان ۰/۱ میلیمتر

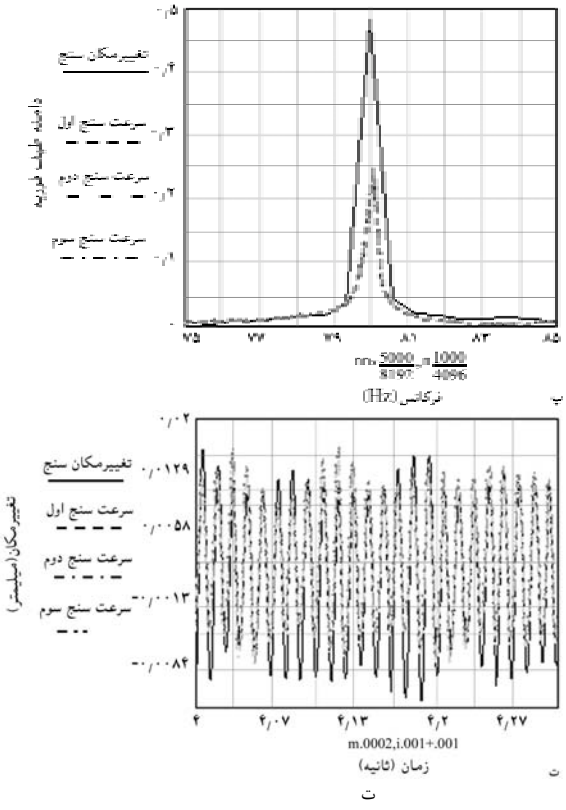
دامنهٔ ۰/۳ میلیمتر تأثیر نوفه ها کمتر و در این فرکانس و دامنهٔ ۰/۸ میلیمتر تأثیر نوفه ها تقریباً از بین می رود.

۶-۲- تحلیل نگاشتهای مرحلهٔ دوم آزمایش

در این مطالعه، نگاشتهای به دست آمده از مرحلهٔ دوم آزمایش به منظور بررسی قابلیت ثبت نگاشت با حس گرهای لرزه نگار و شتاب سنج در محدودهٔ فرکانس های بزرگ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به دلیل ابهام در اطلاعات موجود در مشخصات فنی حس گرها و ثباتهای به کار رفته در آزمایش در مورد حداکثر قابلیت ثبت محتوای فرکانسی حس گرها توسط حس گرهای سرعت سنج و شتابنگار و امکان یا عدم امکان استفاده از فیلتر باتروورث با فرکانس حدی ۲۵۰ هرتز، در این مرحله از آزمایش نتایج حاصل از حس گرهای لرزه نگار و شتاب سنج با نتایج حاصل از نگاشتهای حس گرهای تغییرمکان سنج به صورت نسبی مقایسه شد. به عنوان نمونه، در شکل (۸) نتایج تحلیل نگاشتها در حالت بارگذاری میز لرزان با فرکانس ۸۰ هرتز و دامنهٔ تغییرمکان ۰/۰۰۷ میلیمتر نشان داده شده-است. در شکل (۸، الف) تاریخچهٔ زمانی تغییرمکان ثبت-شده با دو حس گر تغییرمکان سنج که در طرفین میز لرزان به صفحهٔ فولادی زیر حس گرهای لرزه نگار وصل شده-بودند و در شکل (۸، ب) نیز محتوای فرکانسی دو نگاشت مذکور با یکدیگر مقایسه شده است. دو شکل مذکور که از اختلاف ناچیز بین دامنه و محتوای فرکانسی نگاشتهای دو



(الف و ب): به ترتیب مقایسهٔ تاریخچهٔ زمانی و محتوای فرکانسی نگاشتهای تغییرمکان ثبت شده با دو حس گر تغییرمکان سنج



(پ و ت): به ترتیب مقایسهٔ تاریخچهٔ زمانی و محتوای فرکانسی نگاشتهای تغییرمکان ثبت شده با یک حس گر تغییرمکان سنج و سه حس گر سرعت سنج

شکل (۸): مقایسه نگاشتهای ثبت شده در حالت بارگذاری میز لرزان با فرکانس ۸۰ هرتز و دامنهٔ تغییرمکان ۰/۰۰۷ میلیمتر

حس گر تغییرمکان سنج حکایت می کند، همچنین می تواند توانایی بارگذاری دستگاه میز لرزان در فرکانس و دامنهٔ مورد نظر را نشان دهد. به عبارت دیگر، دستگاه میز لرزان می تواند دقیقاً در فرکانس ۸۰ هرتز به بارگذاری ادامه-دهد؛ اما، دامنهٔ بسیار کوچک بار اعمال شده در طول زمان، کمی نوسان دارد. در شکل (۸، پ) تاریخچهٔ زمانی تغییرمکان یک حس گر تغییرمکان سنج با سه حس گر سرعت سنج *SS-1* و در شکل (۸، ت) نیز محتوای فرکانسی نگاشتهای مذکور مقایسه شده است. به منظور محاسبهٔ نگاشتهای تغییرمکان حاصل از حس گرهای سرعت سنج، ابتدا بر روی نگاشتهای سرعت، تصحیح خط مبنا صورت گرفت. سپس، از فیلتر میان گذر ۵-۱۰۰ هرتز عبور داده شد و در نهایت با روش انتگرال گیری، تاریخچهٔ زمانی تغییرمکان به دست آمد. این دو شکل حکایت از انطباق خوب بین دامنه و محتوای فرکانسی تغییرمکان حاصل از سه حس گر لرزه نگار *SS-1* دارد؛ ولی، اختلاف تقریبی ۲۵٪ بین بیشینه دامنهٔ تغییرمکان و اختلاف ۹۵٪ بین بیشینه دامنهٔ طیف فوریهٔ دو نوع حس گر تغییرمکان سنج و سرعت سنج نیز مشاهده می شود. هنگام ثبت نگاشت با حس گرهای سرعت سنج، از فیلتر باتروورث با فرکانس حدی ۲۵۰ هرتز در ثبات *SSR-1* استفاده شده است؛ در صورتی که از فیلتر باتروورث با فرکانس حدی ۵۰ هرتز استفاده گردد مقایسهٔ نگاشتهای ثبت شده حکایت از کاهش شدید در دامنهٔ ارتعاشات سرعت سنج می کند؛ به طوری که دامنهٔ تغییرمکان حاصل از نگاشت ثبت شده با *SS-1* در حدود ۰/۱ دامنهٔ تغییرمکان ثبت شده با حس گرهای تغییرمکان سنج می گردد؛ بنابراین، از این مطلب و تحلیلهای دیگر می توان نتیجه گرفت با وجود اینکه امکان استفاده از فیلتر باتروورث ۲۵۰ هرتز در ثباتهای *SSR-1* وجود دارد (و این قابلیت توسط کارخانهٔ سازنده بر روی دستگاه قرار داده شده است)، ولی حس گرهای سرعت سنج *SS-1* نمی توانند نگاشتهای با محتوای فرکانسی بیش از ۵۰ هرتز را به درستی ثبت کنند.

۷- نتیجه گیری

آزمایش کالیبره نمودن حس گرهای سرعت سنج *SS-1* و شتاب سنج *FBA-11* بر روی دستگاه میز لرزان پژوهشگاه به منظور تعیین محدودهٔ کاربرد حس گرها از نظر دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات ورودی و جهت مقایسهٔ نسبی دامنه و محتوای فرکانسی ثبت شده با آنها انجام شد و در مجموع نتایج زیر به دست آمد:

۱- اگر از ضریب ثابت $G_d = 150V/m/s$ برای تمامی حس گرهای *SS-1* استفاده شود، حداکثر اختلاف در دامنه و محتوای فرکانسی نگاشتهای ثبت شده برابر ۵٪ و در صورتی که از ضریب ثابت $G_d = 2.5V/g$ برای کلیهٔ حس گرهای *FBA-11* استفاده گردد، حداکثر اختلاف بین دامنه و محتوای فرکانسی نگاشتهای ثبت شده برابر ۱۵٪ خواهد بود.

۲- با وجود قابلیت ثباتهای *SSR-1* برای استفاده از فیلتر باتروورث با فرکانس حدی ۲۵۰ هرتز، به دلیل محدودیت موجود در حس گرها نمی توان ارتعاشات بالاتر از فرکانس ۵۰ هرتز را به درستی ثبت کرد. در راستای افزایش این قابلیت، حس گرها باید به کارخانهٔ سازنده فرستاده شوند.

۳- در این آزمایش محدودهٔ کاربرد حس گرها در فرکانس ها و دامنه های مختلف ارتعاش میز لرزان در فرکانس های پایین تر از ۵۰ هرتز به دست آمد. حداکثر شتاب قابل اندازه گیری با شتاب سنجها برابر $\pm 1g$ (منطبق با راهنمای دستگاه) و حداکثر سرعت قابل اندازه گیری با لرزه نگارها نیز برابر $\pm$ ۱۶/۶۷ mm/s محاسبه شد.

۴- توصیه می شود در آزمایشهای کالیبره نمودن، از چند نوع مختلف حس گر دینامیکی برای کنترل نگاشتهای یکدیگر استفاده شود. در شرایط زمان آزمایش، استفاده از حس گرهای تغییرمکان سنج آزمایشگاه دینامیک خاک به دلیل دقت مناسب کارکرد آنها بهترین گزینه بود.

۸- تقدیر و تشکر

از همکاران بخش الکترونیک دستگاهی، آزمایشگاه سازه و آزمایشگاه دینامیک خاک که در مراحل مختلف آزمایشها صمیمانه همکاری نمودند و از همکاران گروه زلزله شناسی دستگاهی که در

انتخاب پارامترهای مناسب مؤلفین را یاری کردند تشکر و قدردانی می گردد.

۹- مراجع

1. Aki, K & Richards, P. “Quantitative Seismic Theory and Methods”, Freeman, San Francisco, California, 1980.

2.Peter, W.R. et.al, “Signal-Coil Calibration of Electromagnetic Seismometers”, BSSA, Vol. 85, No. 3, pp. 845-850, 1995.

3.Peter, W.R., “Frequency Limits for Seismometers as Determined form Signal-to-Noise Ratio, Part 1. the Electromagnetic Seismometer”, BSSa, Vol. 82, No. 2, pp. 1071-1098, 1992.

4.Manual of “Operating Instructions for Model SS-1 Ranger Seismometer”, Kinemetrics Inc., Pasadena, Calif., 1990.

5.Trifunac, M.D., “Wind and Microtremor Induced Vibration of a Twenty-two Story Steel Frame Building”, Report No. EERL 70-01, California Institute of Technology, Pasadena, 1970.

6.Trifunac, M.D., “Ambient Vibration Test of a Thirty-Nine Story Steel Frame”, EERL 70-02, Calif. Int. of Tech., Pasadena, 1970.

7.Abdel-Ghaffar A.M., “Dynamic Analysis of Suspension Bridge Structures” EERL 76-01, Calif. Inst. of Tech., Pasadena, 1976.

8.Foutch, D.A., “A Study of the Vibrational Characteristics of Two Multistory Building”, Ph.D. Thesis, Calif. Inst. of Tech., Pasadena, 1977.

9.Abdel-Ghaffar, A.M., Scott, R.F. & Craig, M.J., “Full Scale Experimental Investigation of a Modern Earth Dam”, Report No. EERL 80-02, California Institute of Technology, Pasadena, 1980.

۱۰- آقاکوچک، علی اکبر؛ معماری، علی محمد. "آزمایشات لرزه ای بر روی ساختمانهای واقعی"، جلد اول و دوم، تهران: پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۲.

۱۱- غفوری آشتیانی، محسن؛ کاظم، حسین؛ تیو، مهران؛ ناطقی الهی، فریبرز."آزمایش دینامیکی مدل ۲:۱ ساختمان چهار طبقه اسکلت فلزی با اتصال خرجینی"، تهران: پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۷.

۱۲- سیاری، آرش. "آزمایش ارتعاش اجباری روی ساختمان جدید مؤسسه و اثر دامنهٔ نیروی ورودی بر فرکانس های طبیعی آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران: پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۷.

13.Cimilli, I.T., “Seismic Response Analysis of Alibey Earth-Fill Dam”, M.S. Thesis, Bogazici University, Turkey, 1998.

۱۴-یمینی فرد، فرزام. "گزارش کالیبراسیون دستگاههای لرزه نگاری *SSR-1* و *SS-1* در چاران مورخه ۷۸/۷/۷"، گزارش داخلی، تهران: پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۸.

15.Manual of “Low Nois Force Balance Accelerometer FBA-11”, Kinemetrics, Inc., Pasadena, Calif., 1990.

16.Manual of “Solid State Recorder SSR-1”, Kinemetrics Inc., Pasadena, Calif., 1990.

17.Manuals of “Bi-Axial Servohydraulic Vibration Test System”, Servotest Ltd., River Gardens, Feltham, Middlesex, 1998.

۱۸- یمینی فرد، فرزام؛ جوان دولویی، غلام؛ علینقی، علیرضا؛ "تعیین پاسخ دستگاهی تجهیزات لرزه نگاری موجود در مؤسسه"، یادداشت فنی بخش زلزله شناسی، تهران: پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۵. ►