

## طراحی و ساخت یک میز لرزه به همراه دستگاه ثبت شتاب سازگار با حسگرهای شتاب *ICP*، بررسی عملکرد و مطالعه نتایج

نصرت ا. فلاح\*؛ ملک محمد رنجبر\*\*؛ سالار بصیری\*\*\*

### چکیده

در این مقاله طراحی و ساخت یک میز لرزه و یک دستگاه ثبت شتاب و همچنین نحوه بررسی صحت عملکرد دستگاه ثبت شتاب ارائه می شود. میز ارتعاش قادر به تولید حرکت ارتعاشی خطی هارمونیک می باشد. دستگاه ثبت شتاب که سازگار با سنسورهای از نوع *ICP* می باشد دارای هشت کانال ورودی بوده که به کمک سنسورهای شتاب متصل به آن قادر است شتاب هشت نقطه مختلف سازه را بطور همزمان ثبت کند. با ارائه روش هایی برای ارزیابی صحت اطلاعات ثبت شده، درستی عملکرد دستگاه ثبت شتاب مورد بررسی قرار می گیرد.

**واژه های کلیدی:** میز ارتعاش، دستگاه ثبت شتاب، سنسور شتاب *ICP*، تحلیل لرزه ای تجربی

### ۱- مقدمه

مقوله طراحی و اجرای ساختمانهای مقاوم در مقابل زلزله همیشه چالشی برای جامعه مهندسين عمران در کشورهای زلزله خیز بوده است. اگرچه در بعضی از کشورها روش های نوینی مانند سیستمهای جدایش لرزه ایی برای ایجاد ساختمانهای مقاوم در مقابل زلزله بکار گرفته شده است [۱]، [۲]، ولی در کشور ما این روشها در عمل مورد استفاده واقع نشده اند. این در حالی است که از سالها قبل مطالعات تحلیلی مسئله در کشور ما شروع شده است [۳]، [۴]. انتقال تکنیکهای نوین طراحی و ساخت به داخل کشور در محدوده ایی عملی است اما بستر سازی برای رشد نوآوریهای داخلی در کنار بومی سازی تجربیات کسب شده از دیگر نقاط جهان از ضروریاتی است که نیازمند توجه است. از جمله موارد برای ایجاد چنین بستری، توسعه امکانات و تجهیزات لازم برای مطالعات تجربی در مقوله مهندسی زلزله می باشد که به مدد آن بتوان ایده های جدید را به کمک تجربه آزمود. گرانتیست بودن تجهیزات مربوط به آزمایشگاه زلزله از جمله میز لرزه، شتاب دهنده ها و دستگاه های اندازه گیری همواره از عامل های محدود کننده در راه اندازی آزمایشگاه های زلزله بوده است. اما با عنایت به پتانسیل های موجود میتوان بخشی از تجهیزات مورد نیاز را در کشور طراحی و ساخت. در راستای تامین چنین نیازی، در این مقاله تجربه طراحی و ساخت تجهیزات مذکور، هر چند با ابعاد محدود، و نیز نحوه ارزیابی عملکرد آنها ارائه میشود.

### ۲- میز لرزه

قسمتهای مختلف میز لرزه عبارتند از: پایه، عرشه، موتور و مبدل. میز لرزه یا منبع نوسان دارای عرشه ایی به

\* ستادیار گروه عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت ص پ ۳۷۵۶، [fallah@guilan.ac](mailto:fallah@guilan.ac)

\*\* ستادیار گروه عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان.

\*\*\* دانشجوی گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان.

ابعاد  $50 \times 50$  سانتیمتر بوده که از یک ورق فلزی به ضخامت ۱۰ میلیمتر ساخته شده است. نیروی محرکه عرشه بوسیله یک موتور الکتریکی سه فاز تامین می شود که در زیر عرشه قرار گرفته و با بکارگیری مکانیزمی حرکت دورانی موتور موجب حرکت ارتعاشی خطی هارمونیک عرشه می شود. مکانیزم انتقال نیروی موتور به عرشه به گونه ایست که فرکانس دورانی موتور و فرکانس ارتعاشی عرشه برابر می باشند. جهت تامین امکان ایجاد تغییرات پیوسته در فرکانس ارتعاشی عرشه یک دستگاه مبدل (*Inverter*) ارتباط بین موتور و منبع جریان برق را تامین می کند. به کمک دستگاه مبدل می توان بدون کاهش قابل ملاحظه در قدرت موتور، فرکانس دورانی موتور (*rpm*) را تغییر داد. مقدار فرکانس دورانی موتور یا فرکانس ارتعاشی عرشه در هر لحظه روی صفحه نمایشگر دستگاه مبدل قابل رویت می باشد. حداکثر طول جابجایی عرشه ۱۲۰ میلیمتر ( $\pm 60$ ) در نظر گرفته شده است برای فراهم آوری امکان مطالعه تجربی رفتار دینامیکی قابهای فلزی، مدلی از قاب برشی فلزی چهار طبقه ساخته شده است. قاب برشی مدل از چهار سقف به ابعاد  $25 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$  و چهار ستون به طول  $92 \text{ cm}$  تشکیل شده است. سقف ها از ورق فلزی به ضخامت  $8 \text{ mm}$  و ستونهای قاب از تسمه های فلزی با انعطاف پذیری مناسب ساخته شده اند. فاصله کف تا سقف در طبقات یکسان و برابر  $22 \text{ cm}$  می باشد. جهت فراهم آوری امکان تغییر در جرم طبقات قاب، در مرکز سقف ها پیچی در نظر گرفته شده است که امکان نصب وزنه های اضافی را تامین می کند. قسمتهای مختلف میز لرزه در شکل (۱) مشاهده می شود.



شکل (الف): مبدل      شکل (ب): موتور      شکل (ج): قاب مدل  
شکل (۱): قسمتهای مختلف میز لرزه.

### ۳- دستگاه ثبت شتاب

این دستگاه برای اندازه گیری مقادیر شتاب یک جسم در حال ارتعاش طراحی و ساخته شده است. به منظور مطالعه رفتار سازه در برابر بارهای دینامیکی سنسورهای شتاب می توانند در ۸ نقطه مختلف سازه نصب شوند و مقادیر شتاب لحظه ای به کمک دستگاه فوق قابل ثبت می باشد. برای ثبت شتاب ابتدا سنسورهای شتاب از نوع *ICP* توسط سیم های رابط به دستگاه متصل می شوند. اگر سنسورها را به جسم در حال ارتعاش نیز متصل کنیم دستگاه می تواند مقادیر شتاب لحظه ای هر کدام از سنسورها را با فرکانس نمونه برداری حداکثر  $5 \text{ ks/sec}$  بطور همزمان اندازه گیری کرده و در فایل ذخیره نماید. همچنین سخت افزار دستگاه این قابلیت را دارد که مقادیر مؤثر شتاب را بدون استفاده از کامپیوتر محاسبه کرده و ذخیره نماید. برای انتقال اطلاعات به کامپیوتر از پورت موازی استفاده شده است و همچنین تنظیمات سخت افزاری کارت جمع آوری داده ها نیز توسط این پورت به کارت اعمال می شود.



شکل (الف): نمای خارجی دستگاه ثبت شتاب      شکل (ب): مدار کامل مونتاژ شده در جعبه  
شکل (۲): دستگاه ثبت شتاب.

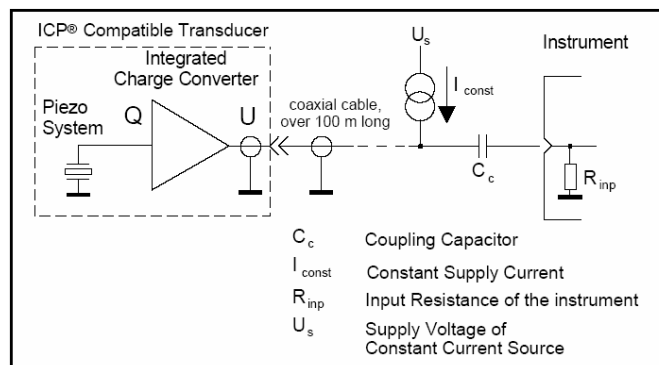
شکل (۲) نمای کلی دستگاه ساخته شده را نشان می دهد. مشخصات کلی دستگاه مذکور عبارتند از :  
- دستگاه دارای ۸ کانال ورودی است که سنسورهای شتاب از نوع *ICP* توسط سوکت های *BNC* به این کانالها

- وصل میشوند. دستگاه بصورت همزمان از هر ۸ کانال نمونه برداری میکند.
- رزولوشن  $A/D$  استفاده شده ۱۲ بیت می باشد.
- سرعت نمونه برداری از هر کانال میتواند بین ۲۰۰ تا ۵۰۰۰ نمونه در ثانیه انتخاب شود.
- ضریب بهره تقویت کننده های سیگنال بصورت مستقل از ۱ تا ۲۲۰۰ برای هر کانال و بکمک آنالوگ مالتی پلکسر بصورت نرم افزاری مشخص می شود.
- نشاندهنده های  $LED$  وضعیت کاری دستگاه را نشان می دهند.
- انواع مختلف سنسورهای شتاب منطبق با  $ICP$  را میتوان به دستگاه متصل کرد و جریان راه اندازی آنها را از ۲ تا ۱۰ میلی آمپر تنظیم نمود.
- برنامه جمع آوری داده ها با استفاده از فیلترهای پایین گذر  $FIR$  قادر به حذف فرکانس های بالا می باشد.

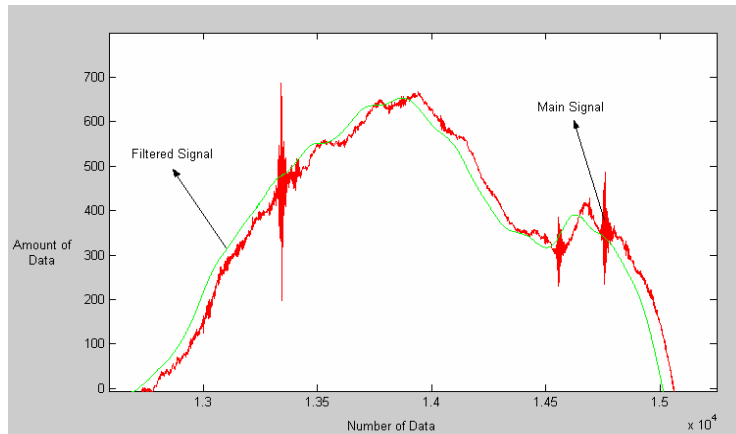
عوامل مؤثر بر دقت دستگاه عبارتند از رزولوشن  $A/D$ ، دامنه تغییرات شتاب، نوع سنسور مورد استفاده و انتخاب ضریب بهره مناسب. امکان انتخاب مناسب پارامترهای فوق از طریق  $GUI$  فراهم شده، عملی میباشد.

#### ۴- سنسورهای شتاب $ICP$

در اندازه گیری مقادیر شتاب از سنسورهای متفاوتی استفاده می شود. در این مطالعه از سنسورهای شتاب نوع  $ICP$  استفاده شده است. سنسورهای  $ICP$  نوعی از سنسورهای شتاب پیزو الکتریک هستند که در آنها مدارات مبدل جریان به ولتاژ به صورت آماده وجود. در سنسورهای شتاب نوع  $ICP$  خطوط تغذیه و داده یکسان هستند و در آنها تنها از دو سیم استفاده می شود. امپدانس خروجی این سنسورها در حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ اهم است. منبع توان مدار داخلی این گونه سنسورها یک منبع جریان است که جریان ثابتی را در حدود  $2\text{ mA}$  تا  $10\text{ mA}$  (با توجه به نوع سنسور) از طریق خطوط تغذیه به مدار داخلی سنسور اعمال می کند. هرچه مقدار جریان ثابت بیشتر باشد امپدانس خروجی مدار هم بیشتر است. مزیت سنسورهای  $ICP$  این است که طول سیم "توان / داده" می تواند بسیار بلند و در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر انتخاب شود و با توجه به اینکه تجهیزات ایجاد کننده لرزه ها معمولاً نویزهای الکترو مغناطیسی تولید می کند دور بودن تجهیزات اندازه گیری از میز لرزه می تواند در کاهش نویز کلی و صحت عملکرد سیستم تأثیر مطلوب بگذارد. در شکل (۳) اصول کارکرد این سنسورها نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳) خازن  $C_c$  و مقاومت داخلی کارت نمونه برداری کننده از ولتاژ تشکیل یک فیلتر بالا گذر را می دهند، مقادیر  $C_c$  و  $R_{inp}$  باید طوری انتخاب شوند که فرکانس قطع این فیلتر به اندازه کافی پایین باشد تا سیگنالهای شتاب را عبور دهد. برای انتقال مقادیر اندازه گیری شده به کامپیوتر برنامه درایور دستگاه، اعمال خواندن داده ها، تنظیمات سخت افزاری و محاسبه مقادیر  $RMS$  و  $Peak$  را انجام می دهد و در محیط ویندوز (شامل تمام نگارشها) قابل اجرا می باشد. لازم به ذکر می باشد که این امکان برای کاربر فراهم شده است که برای کاهش نویزهای فرکانس بالای موجود در سیگنال شتاب از امکانات پیش بینی شده در دستگاه استفاده کند. بدین منظور از فیلترهای نرم افزاری  $FIR$  در دستگاه استفاده شده است. فیلتر نرم افزاری طراحی شده دارای قابلیت انتخاب فرکانسهای قطع متنوع برای هر کانال را دارا می باشد. در شکل (۴) سیگنال اصلی و سیگنال فیلتر شده توسط دستگاه نشان داده شده اند.



شکل (۳): اصول کارکرد و درایو کردن سنسورهای شتاب  $ICP$



شکل (۴): مقایسه سیگنالهای دارای نویز و سیگنالهای فیلتر شده

## ۵- تست و کالیبراسیون دستگاه

عوامل مؤثر بر دقت دستگاه عبارتند از رزولوشن  $A/D$ ، دامنه تغییرات شتاب، نوع سنسور و ضریب بهره انتخابی. بعنوان مثال به ازای یک شتاب خاص دقت سنسوری با خروجی  $100\text{mv/g}$  بیشتر از سنسوری با خروجی  $10\text{mv/g}$  می باشد. ضریب بهره انتخاب شده نیز بر روی دقت دستگاه مؤثر است و هر چه ضریب بهره بالاتر انتخاب شود دقت دستگاه بالاتر می رود ولی حداکثر شتاب ورودی قابل ثبت کاهش می یابد. در جدول (۱) مقادیر دقت و ماکزیمم دامنه شتاب ورودی به ازای ضریب بهره های مختلف ارائه شده است نوع سنسور استفاده شده در این برآورد  $A/120/V$  می باشد. برای کالیبراسیون سنسورهای شتاب از روشهای متفاوتی استفاده می شود که می توان از آنها برای کالیبره کردن دستگاه ثبت شتاب نیز استفاده نمود. در این مطالعه از روش های زیر استفاده شده است.

جدول (۱): مقادیر دامنه و دقت اندازه گیری شتاب

مقدار ضریب بهره	ماکزیمم دامنه شتاب $(m/s^2)$ قابل اندازه گیری	دقت اندازه گیری شتاب $(m/s^2)$
۱	$\pm 8280$	۴,۰۴
۴	$\pm 2070$	۱,۰۱
۸	$\pm 1035$	۰,۵
۴۰	$\pm 207$	۰,۱
۸۰	$\pm 104$	۰,۰۵
۴۰۰	$\pm 20,7$	۰,۰۱۰۱۱
۸۰۰	$\pm 10,3$	۰,۰۰۵۰۳
۲۲۰۰	$\pm 3,8$	۰,۰۰۱۸۵۵

### ۵-۱- کالیبراسیون دامنه با استفاده از جرم و فنر

در اولین روش از یک جرم و فنر به عنوان منبع نوسان استفاده شده است. مزیت استفاده از جرم و فنر، علاوه بر سادگی انجام آزمایش، در این می باشد که دامنه ارتعاش را می توان در نوسانات اولیه تقریباً ثابت فرض کرد. ابتدا جرم با فرکانس پایین به نوسان در آمده سپس دامنه ارتعاش در نوسانات اولیه توسط یک گیج اندازه گیری شده است. با استفاده از سنسور متصل به جرم مرتعش سیگنال شتاب مربوطه نیز ثبت می شود. حال با استفاده از نمودار شتاب، نمودار جابجایی محاسبه می شود. با مقایسه دامنه بدست آمده از سیگنال جابجایی و دامنه اندازه گیری شده توسط گیج دقت دستگاه مشخص می شود. در جدول (۲) برای چند دامنه متفاوت دقت محاسبه برآورده شده است. در این آزمایش تاثیر بهره فیلتر  $FIR$  با انتخاب فرکانس قطع بالا کاهش یافته است [۵].

### ۵-۲- کالیبراسیون دامنه با استفاده از میز لرزه

در این آزمایش با اتصال قلم ثبات به عرشه میز دامنه ارتعاش اجباری میز روی صفحه کاغذ روبروی آن ثبت شده سپس با کولیس اقدام به اندازه گیری دامنه نوسان میز لرزه شده است. اندازه گیری ها با دقت  $0,1$  میلیمتر صورت گرفته است. سپس سنسور شتاب به کانال های مختلف وصل شده و شتاب عرشه میز ثبت گردید.

جدول (۲): دقت اندازه گیری شتاب بوسیله دستگاه ثبت شتاب

ردیف آزمایش	ماکزیمم دامنه شتاب ( $m/s^2$ )	دوره تناوب (SEC)	ماکزیمم دامنه جابجایی بدست آمده از شتاب (mm)	ماکزیمم دامنه جابجایی واقعی (mm)	خطا %
۱	۲,۲۸	۰,۷۳	۳۱	۳۰	۳
۲	۳,۶۶	۰,۷۳	۴۹	۵۰	۲
۳	۳,۳۹	۰,۷۳	۴۶	۵۰	۸
۴	۳,۸۴	۰,۷۳	۵۲	۵۰	۴
۵	۴,۰۹	۰,۷۳	۵۵	۵۰	۱۰
۶	۳,۷۲	۰,۷۳	۵۰	۵۰	۱<

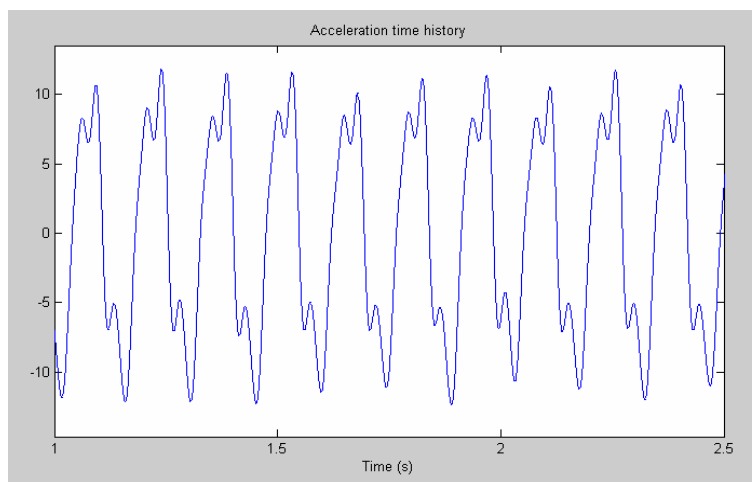
با مقایسه مقادیر جابجایی بدست آمده از سیگنال شتاب هر کانال و جابجایی واقعی عرشه دقت دستگاه محاسبه شد. نتایج این بررسی در جدول (۳) آورده شده است. فرکانس نوسان  $392rpm$  و مقدار  $Gain$  برابر  $40$  و فرکانس قطع فیلتر  $FIR$  برابر  $20$  انتخاب شده است. علت خطا در کانال ها وجود آفست در تبدیل داده  $A/D$  است. برای حذف آن باید در حالتی که سنسور کاملا ثابت است شتاب را اندازه گیری کرد. مقداری که دستگاه در این حالت نشان میدهد آفست آن کانال است. این موضوع خصوصا در مورد انتگرال گیری برای بدست آوردن سیگنال های سرعت و جابجایی اهمیت بسیار دارد.

جدول (۳): مقایسه جابجایی های بدست آمده از سیگنالهای شتاب و جابجایی واقعی در کانال های ورودی مختلف

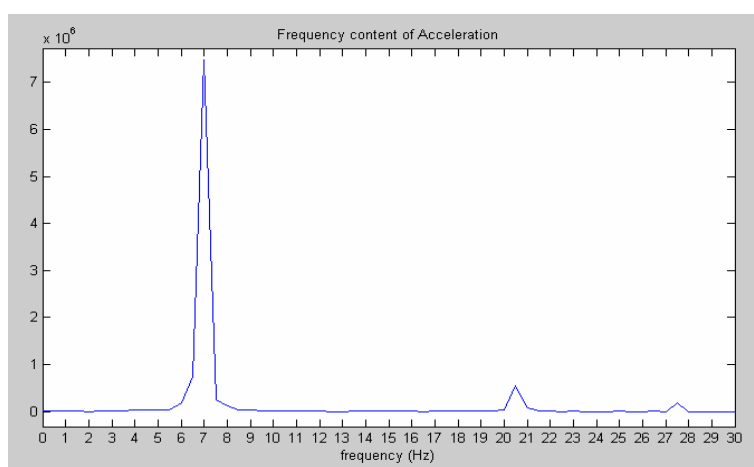
شماره کانال ورودی	ماکزیمم دامنه سیگنال شتاب ( $m/s^2$ )	ماکزیمم جابجایی بدست آمده از سیگنال شتاب (mm)	جابجایی واقعی (mm)	مقدار خطا %
۱	۶۶,۹	۶,۶	۶,۶	۱<
۲	۶۲,۰	۶,۱	۶,۶	۷,۵
۳	۶۶,۳	۶,۵	۶,۶	۱,۵
۴	۶۵,۹	۶,۵	۶,۶	۱,۵
۵	۶۴,۱	۶,۳	۶,۶	۴,۵
۶	۶۴,۷	۶,۴	۶,۶	۳
۷	۶۴,۱	۶,۳	۶,۶	۴,۵
۸	۶۴	۶,۳	۶,۶	۴,۵

### ۵-۳- تحلیل نتایج در حوزه فرکانس

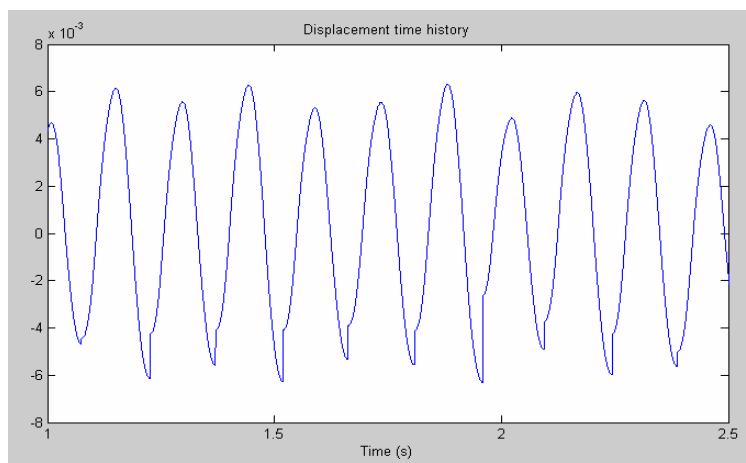
برای بررسی بیشتر صحت عملکرد دستگاه، از تحلیل فرکانسی نتایج بدست آمده در مرحله قبل استفاده شده است. بدین منظور از امکانات موجود در نرم افزار  $MATLAB$  استفاده شد. در شکل (۵) نمودار شتاب ثبت شده میز بکمک دستگاه در فاصله زمانی ۱ تا ۲,۵ ثانیه نشان داده شده است. دامنه جابجایی عرشه بصورت دستی  $6,6$  میلیمتر اندازه گیری شده و فرکانس نوسان میز  $392rpm$  ( $6,53 Hz$ ) میباشد. در شکل (۶) محتوی فرکانسی نمودار شتاب نشان داده شده است. همانطوریکه در شکل مشاهده می شود نمودار در حدود فرکانس  $7Hz$  دارای ماکزیمم می باشد. با دو بار انتگرال گیری از سیگنال شتاب ثبت شده و در نظر داشتن اصلاح مربوط به آفست، سیگنال جابجایی بدست آمده است. منحنی جابجایی در شکل (۷)، مقدار جابجایی ماکزیمم را در حدود  $6,3$  میلیمتر نشان می دهد.



شکل (۵): سیگنال شتاب میز لرزه در بازه زمانی ۱ تا ۲,۵ ثانیه



شکل (۶): محتوی فرکانسی سیگنال شتاب میز لرزه



شکل (۷): سیگنال جابجایی میز لرزه

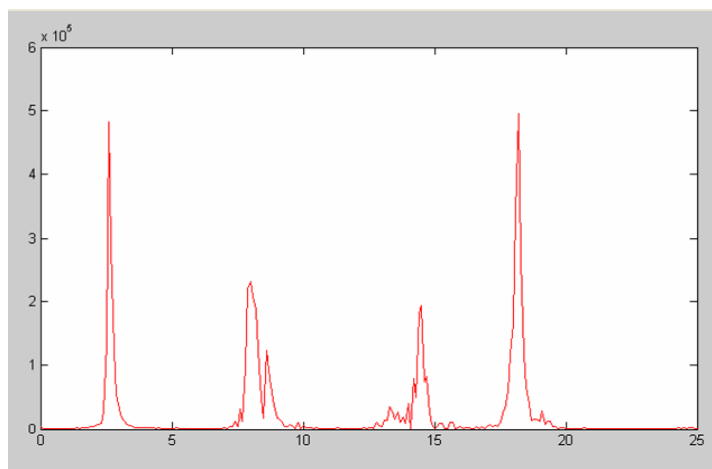
## ۶- تحلیل فرکانسی ارتعاشات آزاد سازه مدل

هدف از این آزمایش تعیین فرکانسهای طبیعی ارتعاشی مدل قاب فلزی معرفی شده در بخش دوم، از طریق ثبت شتاب طبقه دلخواه تحت ارتعاش آزاد و بررسی آن بوده است. در ابتدا با نصب سنسور شتاب بر روی یکی از طبقات اول تا چهارم، طبقه چهارم قاب به اندازه دلخواه جابجا و سپس رها شده است. سیگنال شتاب توسط دستگاه به مدت ۳۰ ثانیه ثبت شده و سپس به کمک نرم افزار *MATLAB* تحلیل فرکانسی بر روی سیگنال شتاب انجام گردید و فرکانس های غالب ارتعاشی در سیگنال های شتاب تعیین شد. برای بررسی درستی عملکرد کانالهای مختلف دستگاه

ثبت شتاب، سنسور به کانالهای ۱، ۲ و ۶ دستگاه متصل گردید و نمونه برداری انجام شد. نظیر کانالهای مختلف، فرکانس های غالب بدست آمده به ترتیب صعودی در جدول (۴) آمده است. شکل (۸) محتوای فرکانسی ارتعاش آزاد طبقه چهارم را نشان می دهد. در نمونه برداری های فوق تنظیمات کارت به صورت زیر بوده است: فرکانس نمونه برداری :  $5000 \text{ S/s}$ ، ضریب بهره تقویت سیگنال : ۸۰، فرکانس قطع فیلتر  $FIR$  :  $100 \text{ Hz}$  و زمان نمونه برداری : ۳۰ ثانیه.

جدول (۴): فرکانسهای غالب برای سیگنال شتاب طبقات مختلف

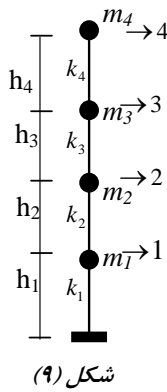
فرکانس های غالب ارتعاشی (Hz)				کانال مورد استفاده	محل نصب سنسور
۱۸/۱	۱۴/۵	۸/۱	۲/۶	کانال ۱	طبقه اول
۱۸/۱	۱۴/۲	۸/۶	۲/۶	کانال ۲	
۱۸/۱	۱۴/۴	۸/۶	۲/۶	کانال ۶	
۱۸/۱	۱۴/۵	۷/۸	۲/۶	کانال ۱	طبقه دوم
۱۸/۱	۱۴/۵	۸/۶	۲/۶	کانال ۲	
۱۸/۰	۱۴/۵	۸/۰	۲/۶	کانال ۶	
۱۸/۱	۱۴/۳	۷/۹	۲/۶	کانال ۱	طبقه سوم
۱۸/۱	۱۴/۴	۷/۹	۲/۶	کانال ۲	
۱۸/۱	۱۴/۵	۷/۹	۲/۶	کانال ۶	
۱۸/۲	۱۴/۵	۸/۰	۲/۶	کانال ۱	طبقه چهارم
۱۸/۱	۱۴/۴	۷/۸	۲/۶	کانال ۲	
۱۸/۱	۱۴/۴	۷/۸	۲/۶	کانال ۶	



فرکانس (Hz)

شکل (۸): محتوای فرکانسی سیگنال شتاب طبقه چهارم

برای بررسی صحت مقادیر فرکانس های طبیعی قاب که از تحلیل ارتعاشات ثبت شده تعیین گردید، از نرم افزار *ANSYS* نیز برای محاسبه فرکانس ها استفاده شده است. بدین منظور قاب بعنوان یک قاب برشی به نرم افزار مذکور معرفی گردید. با توجه به شکل (۹) ماتریس های جرم و سختی قاب با فرض رفتار برشی بصورت زیر ارائه می شوند [۶]:



شکل (۹)

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

که  $k_2$  بعنوان نمونه برابر است با:  $k_2 = \frac{12EI_2}{h_2^3}$

مقادیر جرم طبقات قاب عبارتند از:

$$m_1 = 4.37 \text{ kg} \quad m_2 = 4.35 \text{ kg} \quad m_3 = 4.36 \text{ kg} \quad m_4 = 4.35 \text{ kg}$$

برای محاسبه سختی طبقات قاب بجای استفاده از رابطه  $k = 12EI/h^3$ ، اقدام به اعمال نیرو به تراز طبقات و اندازه گیری جابجایی ایجاد شده گردید. با تکرار این روش در چند مرحله، مقادیر زیر برای سختی طبقات قاب حاصل شد:

$$k_1 = 11500 \text{ N/m} \quad k_2 = 12400 \text{ N/m} \quad k_3 = 17100 \text{ N/m} \quad k_4 = 12300 \text{ N/m}$$

با توجه به مقادیر فوق، با استفاده از نرم افزار ANSYS فرکانس های طبیعی قاب بشرح زیر محاسبه شدند:

$$f_1 = 2.93 \text{ Hz} \quad f_2 = 8.67 \text{ Hz} \quad f_3 = 12.77 \text{ Hz} \quad f_4 = 17.01 \text{ Hz}$$

ملاحظه می شود تفاوت نتایج حاصل از بکارگیری ANSYS نسبت به نتایج اندازه گیری شده حداکثر ۱۳٪ می باشد. علت تفاوت در نتایج را می توان به فرض نامناسب مدل برشی برای قاب بکار گرفته شده مربوط دانست چراکه اتصال ستونها به سقف های قاب به گونه ای نیست که بتوان قاب را بعنوان یک قاب برشی فرض نمود.

## ۷- نتیجه

در مقاله حاضر مشخصات تجهیزات ساخته شده برای انجام مطالعات تجربی مرتبط با رفتار ارتعاشی سازه ها و همچنین روشهای ارزیابی اطلاعات ثبت شده ارائه شده است. محدوده عملکرد دستگاه ثبت شتاب بر حسب مقادیر مختلف ضریب بهره تعیین گردید. برای ارزیابی درستی اطلاعات ثبت شده بوسیله دستگاه ثبت شتاب سه روش بکار گرفته شده است. روشهای بکار گرفته شده عبارتند از: استفاده از ارتعاش آزاد جرم و فنر، استفاده از ارتعاش میز لرزه و همچنین تعیین فرکانس های طبیعی یک مدل آزمایشگاهی از قاب فلزی و مقایسه نتایج با فرکانس های بدست آمده از نرم افزار ANSYS. ارزیابی های انجام شده بیانگر صحت شتاب ثبت شده توسط دستگاه می باشد.

## مراجع

- [1] Skinner, R. I.; Kelly, J. M.; Heine, A. J.; *Hysteretic Dampers for Earthquake Resistant Structures*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, 1975.
- [2] Kelly, J. M.; *A Seismic Base Isolation, Review and Bibliography*, Soil Dynamic and Earthquake Engineering, Vol. 5, No. 3, 1986.
- [3] سعادت پور، محمد مهدی، آنالیز دینامیکی سیستمهای سازه ای خطی با ایزولاتورهای غیر خطی به روش روبهم گذاری مودها، نشریه استقلال، شماره ۹، اسفند ۱۳۶۹.
- [4] سعادت پور، محمد مهدی، فلاح، نصرت الله تحلیل دینامیکی سازه های نامتقارن متکی بر تکیه گاه لغزشی، نشریه استقلال، شماره ۱۴، ۱۳۷۲.
- [5] Openheim A. V.; Schafer R. W.; Buck J. R.; *Discrete Time Signal Processing*, 2nd Ed, Prentice Hall, 1998.
- [6] Chopra A. K.; *Dynamics of structures, theory and applications to earthquake engineering*, 2nd Ed, Prentice Hall, 2001.