

دانشکده مهندسی
گروه عمران

رساله

برای دریافت درجه دکتری در رشته

عمران، گرایش سازه

عنوان

شناسایی میرایی سازه‌ای به کمک تست‌های ارتعاش محیطی و یادگیری عمیق نظارت نشده برای پایش سلامت سازه

استاد راهنما

دکتر حسن حاجی کاظمی

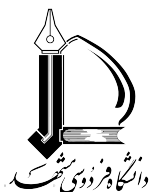
استاد مشاور

دکتر عباس کرم‌الدین

نگارنده

حامد سرمست

اردیبهشت ماه ۱۴۰۲



بسمه تعالی
مشخصات رساله تحصیلی دانشجویان
دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان: شناسایی میرایی سازه‌ای به کمک تست‌های ارتعاش محیطی و یادگیری عمیق نظارت نشده برای پایش سلامت سازه

نام نویسنده: حامد سرمست
استاد راهنما: دکتر حسن حاجی‌کاظمی
استاد مشاور: دکتر عباس کرم‌الدین

دانشکده: مهندسی گروه: عمران رشته تحصیلی: عمران

تاریخ تصویب: تاریخ دفاع: ۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۲

مقطع تحصیلی: دکتری تعداد صفحات: ??

چکیده رساله: مهم‌ترین بخش در بحث بهسازی لرزه‌ای، ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌های موجود می‌باشد، برای این منظور با پیاده‌سازی شرایط موجود و استفاده از اطلاعات در دسترس و نقشه‌های چون ساخت و در نهایت بازرسی‌های چشمی از وضعیت سازه، اطلاعات لازم برای مدل‌سازی سازه را بدست می‌آید. این سازه‌ها می‌توانند ساختمان‌هایی باشند که پس از وقوع هر نوع رخداد از جمله زلزله، آتش‌سوزی، انفجار، ضربه و... دچار گسیختگی نشده، ولی نیاز به ارزیابی مجدد برای بهره‌برداری از آن، ضروری باشد و یا سازه‌هایی که در اثر گذشت زمان فرسوده شده و با توجه به آئین‌نامه‌های جدید نیاز به ارزیابی مجدد دارند. در همه موارد فوق، برای بدست آوردن و بهنگام سازی مشخصه میرایی همانند زمان طراحی تلاش زیادی صورت نمی‌گیرد و از نسبت‌های میرایی ۵ درصد و یا میرایی متناسب استفاده می‌شود. هدف این تحقیق بدست آوردن میرایی مودال سازه‌ای است که به کمک رکوردهای گرفته شده از تست ارتعاش محیطی به روش یادگیری عمیق نظارت نشده و تحلیل مولفه مستقل (*ICA*) است. برای نیل به این هدف، در این تحقیق میدانی یک دستگاه اکتساب داده ۴ کاناله به همراه یک سنسور شتاب سنج ۳ محوره و دو سنسور شتاب سنج تک محوره بکار گرفته شد. تست‌های ارتعاش محیطی بر روی سه ساختمان در مشهد شامل بیمارستان امام حسین (ع)، ساختمان کوه نور و ساختمان محمدیه ۵ صورت گرفت و پس از آن مدل سازی این ساختمان‌ها در نرم افزار *OPENSEES* برای تحلیل مودال انجام شد و فرکانس‌ها و پریودها و شکل مودها بدست آمد. برای رسیدن به مقادیر میرایی مودال از زبان برنامه نویسی پایتون و کتابخانه‌های موجود برای یادگیری عمیق از جمله *Sickit-learn*، روش تحلیل مولفه مستقل پیاده سازی شد و مشخصات دینامیکی سازه‌ها از رکوردها بعنوان ورودی به شبکه یادگیری عمیق بدست آمد. استفاده از این روش برای بهسازی سازه‌ها در قبل و بعد از بهسازی و همچنین ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌ها پس از زلزله می‌تواند موثر باشد.

واژگان کلیدی: یادگیری عمیق نظارت نشده، تست ارتعاش محیطی، تحلیل مودال

امضای استاد راهنما: تاریخ:

اظهارنامه

عنوان رساله : شناسایی میرایی سازه‌ای به کمک تست‌های ارتعاش محیطی و یادگیری عمیق نظارت نشده برای پایش سلامت سازه

اینجانب حامد سرمست دانشجوی دوره دکتری دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده رساله تحت راهنمایی دکتر حسن حاجی‌کاظمی متعهد می‌شوم:

- آ. تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- ب. در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- ج. مطالب مندرج در این رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی به جایی ارائه نشده است.
- د. کلیه حقوق این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد است و مقالات مستخرج با نام "دانشگاه فردوسی مشهد" و یا "Ferdowsi University of Mashhad" به چاپ خواهد رسید.
- ه. حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از آن رعایت شده است.
- و. در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- ز. در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ
امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد است. این مطلب بایستی به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج این رساله بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

هوالعلم

زیباترین نام را بر زبان جاری می کنم ... که هر کس زبان به حمد تو گشود بی تردید نگاه تو بر او افتاده. پس بر قلبم آن جاری کن که خود می پسندی در ثنایت لب گشایم. در وادی معرفت نگنجد، سرچشمه هدایت نجوشد، سر بر قامت بندگی فرو نیافتد ...، گر گنجینه ای را که مقدسش خواندی و به آن قسم یاد کردی^۱، کوچک شمرده شود و تنها خاطره جوهر خشک شده ای از آن بر برگ برگ صفحات زندگی باقی ماند.

تو علم را روشنی قرار دادی و فانوسی در بیغوله راه که مسیر را، راه نماید و تزکیه را مقدم بر آن دانستی تا نگاهبانش باشد که تزکیه و تعلیم در معیت هم گوهر وجودی انسان را به نور تو منور کند، پرده از واقعیات کنار زند. آن جاست که حقیقت رخ نمایاند، نظر فراتر افتد، خوان گنجینه های دانش رنگین شود و ... آری آنجاست که آدمی معنا یابد.

من اگر وعده هایم با تو زیر خروارها تل فراموشی و غفلت مدفون گردیده، اگر زشتی طغیان در نظرم زیبا جلوه گری می کند و چشمانم خشک تر از آن است که در مقام توبه اشکی بر آن جاری شود، بدان از سر جهل است و نسیان ... اما بار الها چشم طمع بر رحمت دوخته ام و در تمنای رهایی از ظلمت ضلالت، ترنم باران معرفت را می طلبم، امید آنکه جوانه های حقیقت را در وجودم برویاند و انعکاس آن چشمانم را روشن کند.

اکنون چهره بر چهره خاک می سایم و تو را به حبیبیت قسم می دهم که ... "هر آن خصلت ناپسند که در من می بینی به لطف واسع خویش اصلاحش فرمای تا پسندیده شود و هر آن عیب که نفسم را به فساد بیالاید از من بازگیر و هر آن نقص که جانم را از کمال باز دارد برطرفش فرمای!"

و در آن روز که نوبت زندگانی به سر رسد و پیک مرگ حلقه بر در خانه تن بکوبد و دعوت واجب الاجابه تو از آسمان ها به گوش آید ... پروردگارا! بر محمد (ص) و آل پاکش درود فرست و به حق ایشان عمر ما را با رستگاری به پایان آور و عاقبتمان را ختم به خیر فرمای ...!

زبان قاصر است و مجال کوتاه ...

تو خود قصیده ی مہرا از لوح نانوشتی قلبم بخوان ...!

^۱ ان و القلم و ما یسطرون

پاس‌گزاری...

«مَنْ لَمْ يَشْكُرِ الْمَخْلُوقَ لَمْ يَشْكُرِ الْخَالِقَ»

بر خود لازم می‌دانم از زحمات پدر و مادر خودم کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم که در تمامی این سالها پشتیبان بنده بوده‌اند. تشکر ویژه‌ای از همسر عزیزم باید داشته باشم که در طی این سالها با وجود مشغله بسیار زیاد بچه‌داری، همیشه مشوق و سنگ صبور بنده بوده‌اند. همچنین از دوست عزیزم، مهندس علیرضا اصلان‌زاده که زحمات زیادی در بخش‌های اجرایی و تست‌ها کشیدند قدردانی خود را ابراز می‌دارم. در نهایت از استاد راهنما، جناب آقای دکتر حسن حاجی کاظمی بابت راهنمایی‌ها و کمک‌های فکری ایشان در مسائل علمی و زندگی کمال تشکر را دارم.

حامد سرمدت

ارده‌بشت ماه ۱۴۰۲

فهرست مطالب

۱۸	مقدمه	۱
۱۸	اهمیت موضوع	۱.۱
۲۰	تشریح هدف	۲.۱
۲۵	کاربرد	۳.۱
۲۶	روش تحقیق و دلایل انتخاب آن	۴.۱
۲۸	ساختار پایان نامه	۵.۱
۲۹	پیشینه تحقیق	۲
۳۱	تحقیقات نظری	۱.۲
۳۱	حوزه زمان	۱.۱.۲
۳۳	حوزه فرکانس	۲.۱.۲
۳۴	روش های سری زمانی	۳.۱.۲
۳۶	تاثیرات محیطی و شرایط عملیاتی	۴.۱.۲
۳۷	دسته بندی دیگر از تحقیقات نظری	۲.۲
۴۱	تحقیقات تجربی	۳.۲
۴۱	نمونه شماره یک: تشریح یک تست ارتعاش محیطی در مرکز شهر گرنوبل فرانسه	۱.۳.۲

۲.۳.۲	نمونه شماره دو: تشریح یک تست ارتعاش محیطی روی اتحادیه بانک ها در
۴۵	شهر لس آنجلس
۳.۳.۲	نمونه شماره سه: تشریح یک تست ارتعاش محیطی در شهر لیسبون
۴۶	
۴.۲	مروری بر برخی تحقیقات انجام شده در زمینه یادگیری ماشین در مهندسی سازه
۴۸	
۱.۴.۲	روش یادگیری ماشین برای شناسایی مودال سازه‌ای:
۵۱	
۲.۴.۲	شناسایی مودال در چارچوب شبکه عصبی عمیق:
۵۲	
۳.۴.۲	طراحی شبکه عصبی عمیق
۵۵	
۵.۲	نتیجه‌گیری
۵۷	
۵۸	۳ سخت افزارها
۵۸	۱.۳ معرفی سخت افزارها
۵۹	۱.۱.۳ سنسور شتاب
۶۹	۲.۳ مشخصات فنی سنسورهای شتاب سنج
۶۹	۱.۲.۳ تعداد محورهای داده‌نگاری
۷۰	۲.۲.۳ بیشینه تراز
۷۰	۳.۲.۳ نویز خود ساخته
۷۱	۴.۲.۳ بازه دینامیکی
۷۱	۵.۲.۳ دقت سنسور
۷۱	۶.۲.۳ فرکانس گوشه
۷۲	۷.۲.۳ پهنای باند مطلوب
۷۲	۸.۲.۳ ثابت مولد در خروجی
۷۳	۹.۲.۳ دقت حساسیت
۷۳	۱۰.۲.۳ انحراف هارمونیک کل
۷۳	۱۱.۲.۳ حساسیت محور عرضی

۷۴	۱۲.۲.۳ خطی بودن
۷۴	۲.۳ اکتساب داده (DAQ)
۷۵	۱.۳.۳ کاربردهای دستگاه اکتساب داده
۷۶	۲.۳.۳ مشخصه‌های دستگاه اکتساب داده
۷۹	۴ سازه‌های نمونه مورد مطالعه
۷۹	۱.۴ ساختمان کوه نور
۸۳	۱.۱.۴ پلان و نما
۸۳	۲.۴ ساختمان بیمارستان امام حسین (ع)
۸۶	۱.۲.۴ پلان و نما
۸۷	۳.۴ ساختمان مسکونی محمدیه ۵
۹۰	۵ مدل سازی
۹۱	۱.۵ مقدمه
۹۲	۲.۵ پروژه کوه نور
۹۲	۱.۲.۵ نتایج مدل تحلیلی
۹۴	۲.۲.۵ نتایج مدل تجربی:
۱۰۴	۳.۵ پروژه بیمارستان امام حسین (ع)
۱۰۵	۱.۳.۵ تست ارتعاش محیطی بیمارستان
۱۰۶	۲.۳.۵ ایجاد مدل تحلیلی
۱۲۰	۴.۵ پروژه محمدیه ۵
۱۲۰	۱.۴.۵ مشخصات سازه ی مورد مطالعه
۱۳۰	۶ یافته‌های نظری و تجربی
۱۳۱	۱.۶ نتایج گرفته شده بر اساس روش یادگیری عمیق

۲.۶	مراحل پیاده‌سازی :	۱۳۲
۱.۲.۶	تعیین مدت زمان رکورد در تست ارتعاش محیطی سازه‌های مورد مطالعه	۱۳۴
۲.۲.۶	جانمایی و نصب سنسورها و تعیین نرخ نمونه برداری	۱۳۴
۳.۲.۶	انجام تست ارتعاش محیطی	۱۳۴
۴.۲.۶	خواندن داده‌های گرفته شده از تست‌های ارتعاش محیطی	۱۳۴
۵.۲.۶	نرمالایز کردن داده‌ها	۱۳۵
۶.۲.۶	حذف نویزهای اضافی	۱۳۵
۷.۲.۶	کنار گذاشتن داده‌های پرت (<i>Outlier</i>)	۱۳۵
۸.۲.۶	تغییر بعد دادن رکوردها	۱۳۵
۹.۲.۶	تعریف شبکه عصبی به کمک کتابخانه تورچ پای (<i>TorchPy</i>)	۱۳۶
۱۰.۲.۶	تابع فعال‌سازی (<i>ActivationFucntion</i>)	۱۳۶
۱۱.۲.۶	تابع هزینه (<i>CostFunction</i>)	۱۳۶
۱۲.۲.۶	تابع بهینه‌یاب	۱۳۶
۱۳.۲.۶	مشخص کردن تعداد تکرارها (<i>Epoch</i>) و نرخ یادگیری (<i>LearningRate</i>)	۱۳۶
۱۴.۲.۶	بدست آوردن سیگنال‌های مستقل (مودال)	۱۳۷
۱۵.۲.۶	بدست آوردن پیک‌ها و برازش منحنی	۱۳۷
۳.۶	الگوریتم‌های بکار رفته در این تحقیق	۱۳۷
۴.۶	پروژه تجاری اداری کوه نور	۱۳۸
۱.۴.۶	تست‌های در راستای طولی ساختمان	۱۳۸
۵.۶	پروژه بیمارستان امام حسین (ع)	۱۴۳
۱.۵.۶	تست‌های در راستای طولی ساختمان	۱۴۳
۶.۶	پروژه مسکونی محمدیه ۵	۱۴۹
۱.۶.۶	تست‌های در راستای طولی ساختمان	۱۴۹

۱۵۱	۷ نتیجه گیری
۱۵۱	۱.۷ مقایسه نتایج
۱۵۲	۱.۱.۷ ساختمان کوه نور
۱۵۲	۲.۱.۷ ساختمان بیمارستان
۱۵۳	۳.۱.۷ ساختمان محمدیه ۵
۱۵۶	۲.۷ پیشنهاداتی برای کارهای آینده:
۱۵۸	آ روشهای برپایه مبانی غیرفیزیک
۱۶۲	ب شناسایی میرایی
۱۶۲	۱.ب مساله معکوس
۱۶۳	۱.۱.ب سیستم یک درجه آزادی و شناسایی مودال
۱۶۴	۲.۱.ب شناسایی مکانی سیستم های چند درجه آزادی
۱۶۶	۳.۱.ب شناسایی با استفاده از مدل های مودال؛
۱۶۶	۴.۱.ب ارتعاش محیطی
۱۶۸	پ نتایج تست های ارتعاش محیطی در راستای عرضی
۱۶۸	۱.پ نتایج خروجی های ساختمان کوه نور عرضی
۲۱۰	۲.پ نتایج خروجی های ساختمان بیمارستان امام حسین (ع)
۲۲۰	۳.پ نتایج خروجی های ساختمان محمدیه ۵
۲۲۴	مراجع

فهرست جداول

۶۱	.....	مشخصات سنسورهای شتاب سنج ممز	۱.۳
۷۷	.....	مشخصات دستگاه اکتساب داده	۲.۳
۷۷	.....	مشخصات دستگاه اکتساب داده استفاده شده در این تحقیق	۳.۳
۹۳	.....	فرکانس ها و پریودهای بدست آمده از نرم افزار ETABS	۱.۵
۹۶	.....	فرکانس ها و پریودهای بدست آمده از نرم افزار به روش FDD	۲.۵
۹۷	.....	فرکانس ها و پریودهای بدست آمده از نرم افزار به روش EFDD	۳.۵
۹۸	.....	فرکانس ها و پریودهای بدست آمده از نرم افزار به روش CFDD	۴.۵
		فرکانس ها و میرایی بدست آمده از رکوردهای طبقه ۲۴م در راستای طولی ساختمان کوه	۵.۵
۱۰۰	.....	نور	
۱۰۱	..	فرکانس ها و میرایی های بدست آمده با روش های مختلف شناسایی زیرفضای اتفاقی	۶.۵
۱۰۲	.....	فرکانس ها و میرایی بدست آمده با روش های مختلف در حوزه فرکانس	۷.۵
۱۰۳	..	فرکانس ها و میرایی های بدست آمده با روش های مختلف شناسایی زیرفضای اتفاقی	۸.۵
۱۰۴	.....	فرکانس ها و میرایی بدست آمده با روش های مختلف در حوزه فرکانس	۹.۵
۱۱۹	.....	فرکانس ها و میرایی بدست آمده از نرم افزار OPENSEES	۱۱.۵
		فرکانس ها و میرایی بدست آمده با روش های مختلف شناسایی زیرفضای اتفاقی با نرم افزار	۱۰.۵
۱۱۹	.....	ARTEMIS	

۱۲۳	فرکانس ها و میرایی بدست آمده از نرم افزار OPENSEES
۱۳۵	فرکانس ها و میرایی بدست آمده با روش های مختلف تجزیه حوزه فرکانس با نرم افزار
۱۲۹	ARTeMIS
۱۲۹	مقادیر بدست آمده در دو راستای طولی و عرضی ساختمان مسکونی محمدیه ۵
۱۵۲	فرکانس های ساختمان کوه نور
۱۵۲	نسبت میرایی ساختمان کوه نور در فرکانس ۱.۷۵ هرتز
۱۵۳	فرکانس های ساختمان بیمارستان
۱۵۳	نسبت میرایی ساختمان بیمارستان در فرکانس ۱.۱ هرتز
۱۵۳	فرکانس های ساختمان محمدیه ۵
۱۵۳	نسبت میرایی ساختمان محمدیه ۵ در فرکانس ۲.۴۹۶ هرتز
۲۱۹	پ.۱ *

فهرست تصاویر

۱.۱	فرآیند پایش سلامت	۲۴
۲.۱	فلوچارت پایش سلامت سازه بر پایه ارتعاش	۲۴
۳.۱	گراف روش بدست آوردن مدل بهینه به کمک تحلیل مودال بهره‌برداری	۲۶
۱.۲	تصویر ساختمان واقع در شهر گرنوبل فرانسه تحت تست ارتعاش محیطی	۴۳
۲.۲	تصویر جانمایی سنسورها در ساختمان واقع در شهر گرنوبل فرانسه تحت تست ارتعاش محیطی	۴۴
۳.۲	ساختمان اتحادیه بانک‌ها در شهر لس‌آنجلس	۴۶
۴.۲	ساختمان تست شده در شهر لیسبون	۴۷
۵.۲	فلوچارت روش	۵۲
۶.۲	دیاگرام شبکه رمزگذاری خودکار	۵۵
۷.۲	معماری شبکه برای شناسایی مودال	۵۶
۱.۳	تصویر سنسور ممز	۶۱
۲.۳	جزئیات میکروکنترلر آردوینو اوانو	۶۲
۳.۳	جزئیات اتصال شتاب سنج MPU-۶۰۵۰ به آردوینو	۶۲
۴.۳	مدار بازخورد شتاب سنج های متعادل نیرویی	۶۴
۵.۳	نحوه عملکرد شتاب سنج های فیبر نوری	۶۵

۶۷	نحوه عملکرد شتاب سنج های پیزوالکتریک	۶.۳
۶۷	اجزای تشکیل دهنده شتاب سنج های پیزوالکتریک	۷.۳
۶۹	نمونه ای از حسگر پیزوالکتریک روی سازه	۸.۳
۷۲	پاسخ فرکانسی شتاب سنج و پارامترهای آن	۹.۳
۷۵	دستگاه های اکتساب داده با تعداد کانال های مختلف	۱۰.۳
۷۷	تصویر دستگاه اکتساب داده	۱۱.۳
۷۸	مشخصات سنسورها	۱۲.۳
۸۰	نمایی از پروژه ی کوه نور	۱.۴
۸۱	جانمایی سنسور در طبقه ۲۴ام از پروژه ی کوه نور	۲.۴
۸۲	جانمایی سنسور در طبقه ۲۲ام از پروژه کوه نور	۳.۴
۸۳	جانمایی سنسور در طبقه ۲۰ام از پروژه ی کوه نور	۴.۴
۸۴	نمایی از بیمارستان امام حسین (ع)	۵.۴
۸۴	نمایی از جداسازهای بکا رفته در بیمارستان امام حسین (ع)	۶.۴
۸۵	جانمایی سنسور در تراز ۲۹۰ از بیمارستان امام حسین (ع)	۷.۴
۸۶	جانمایی سنسور در تراز ۴۹۰ از بیمارستان امام حسین (ع)	۸.۴
۸۶	جانمایی سنسور در تراز ۳۳۰ از بیمارستان امام حسین (ع)	۹.۴
۸۷	نمایی از پروژه ی محمدیه ۵	۱۰.۴
۸۸	جانمایی نصب سنسور در طبقه هم کف از پروژه ی محمدیه ۵	۱۱.۴
۸۸	جانمایی نصب سنسور در طبقه سوم از پروژه ی محمدیه ۵	۱۲.۴
۸۹	جانمایی نصب سنسور در طبقه بام از پروژه ی محمدیه ۵	۱۳.۴
۹۳	مدل سازه کوه نور در نرم افزار	۱.۵
۹۵	رکوردهای بدست آمده از طبقه ی ۲۴ام ساختمان در راستای طولی	۲.۵
۹۶	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس	۳.۵

۴.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر	۹۷
۵.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط	۹۸
۶.۵	نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا	۹۹
۷.۵	۷.۵ (آ) تجهیزات تست ارتعاش محیطی، ۷.۵ (ب) سنسور تک محوره	۱۰۵
۸.۵	۳۰.۵ (آ) پلان مدل سازی شده، ۳۰.۵ (ب) نمای سه بعدی مدل سازی شده	۱۰۶
۹.۵	نتایج خروجی آنالیز مودال بیمارستان با استفاده از OPENSEES	۱۰۷
۱۰.۵	سیگنال های گرفته شده از بلوک A بیمارستان در راستاری طولی	۱۰۸
۱۱.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس	۱۰۹
۱۲.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر	۱۰۹
۱۳.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط	۱۱۰
۱۴.۵	نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا	۱۱۰
۱۵.۵	سیگنال های گرفته شده از بلوک A بیمارستان در راستاری عرضی	۱۱۱
۱۶.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس	۱۱۱
۱۷.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر	۱۱۲
۱۸.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط	۱۱۲
۲۰.۵	سیگنال های گرفته شده از بلوک B بیمارستان در راستاری طولی	۱۱۳
۱۹.۵	نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا	۱۱۳
۲۱.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس	۱۱۴
۲۲.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر	۱۱۴
۲۳.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط	۱۱۵
۲۴.۵	نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا	۱۱۵
۲۵.۵	سیگنال های گرفته شده از بلوک B بیمارستان در راستاری عرضی	۱۱۶
۲۶.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس	۱۱۶
۲۷.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر	۱۱۷

۲۸.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط	۱۱۷
۲۹.۵	نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا	۱۱۸
۳۰.۵	(آ) پلان معماری زیرزمین ، (ب) پلان معماری همکف ، (ج) پلان معماری طبقات	۱۲۱
۳۲.۵	نتایج خروجی نرم افزار اپنسیس برای مدل محمدیه ۵	۱۲۲
۳۱.۵	(آ) مدل سه بعدی ساختمان مسکونی محمدیه ۵ ، (ب) مدل پلان سازه	۱۲۲
۳۳.۵	سیگنال های گرفته شده از ساختمان مسکونی محمدیه ۵ در راستاری طولی	۱۲۳
۳۴.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس	۱۲۴
۳۵.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر	۱۲۴
۳۶.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط	۱۲۵
۳۷.۵	نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا	۱۲۵
۳۸.۵	سیگنال های گرفته شده از ساختمان مسکونی محمدیه ۵ در راستاری عرضی	۱۲۶
۳۹.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس	۱۲۷
۴۰.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر	۱۲۷
۴۱.۵	نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط	۱۲۸
۴۲.۵	نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا	۱۲۸
۱.۶	رکوردهای گرفته شده از طبقات ۲۴ام، ۲۲ام و ۲۰ام	۱۳۹
۲.۶	رکوردهای گرفته شده از طبقات ۲۴ام، ۲۲ام و ۲۰ام پس از پیش پردازش	۱۳۹
۳.۶	رکوردهای گرفته شده از طبقات ۲۴ام، ۲۲ام و ۲۰ام پس از پیش پردازش	۱۴۰
۴.۶	رکوردهای خروجی گرفته شده بوسیله شبکه عصبی	۱۴۱
۵.۶	اختلاف رکوردهای خروجی گرفته شده با رکوردهای اولیه بوسیله شبکه عصبی	۱۴۲
۶.۶	مقدار اختلاف بدست آمده از سیگنال خروجی و اولیه	۱۴۳
۷.۶	فرکانس های بدست آمده از سیگنال های بازسازی شده بوسیله شبکه عصبی	۱۴۴
۸.۶	فرکانس های بدست آمده از سیگنال های بازسازی شده بوسیله شبکه عصبی	۱۴۵

- ۹.۶ فرکانس‌های بدست آمده از سیگنال‌های بازسازی شده بوسیله شبکه عصبی ۱۴۵
- ۱۰.۶ فرکانس‌های بدست آمده از سیگنال‌های بازسازی شده بوسیله شبکه عصبی ۱۴۶
- ۱۱.۶ فرکانس‌های بدست آمده از ساختمان بیمارستان در راستای طولی ۱۴۷
- ۱۲.۶ رکوردهای خروجی گرفته شده از لایه سوم بوسیله شبکه عصبی ۱۴۷
- ۱۳.۶ اختلاف رکوردهای خروجی گرفته شده با رکوردهای اولیه بوسیله شبکه عصبی ۱۴۸
- ۱۴.۶ فرکانس‌های بدست آمده از خروجی شبکه عصبی عمیق ساختمان بیمارستان ۱۴۸
- ۱۵.۶ سیگنال‌های دریافت شده از ساختمان محمدیه ۵ ۱۴۹
- ۱۶.۶ فرکانس‌های بدست آمده از ساختمان محمدیه ۵ در راستای طولی ۱۵۰
- ۱.آ معماری مدل موجک ۱۵۹
- ۱.پ سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۲۲، ۲۴ و ۲۰م در راستای طولی ۱۶۹
- ۲.پ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۱۶۹
- ۳.پ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۱۷۰
- ۴.پ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۱۷۰
- ۵.پ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۱۷۱
- ۶.پ سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۲۰، ۱۸ و ۱۶م در راستای طولی ۱۷۲
- ۷.پ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۱۷۳
- ۸.پ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۱۷۳
- ۹.پ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۱۷۴
- ۱۰.پ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۱۷۴
- ۱۱.پ سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۱۶، ۱۴ و ۱۲م در راستای طولی ۱۷۵
- ۱۲.پ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۱۷۶
- ۱۳.پ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۱۷۶
- ۱۴.پ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۱۷۷

- پ.۱۵ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۱۷۷
- پ.۱۶ سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۱۰، ۱۲ و ۱۸م در راستای طولی ۱۷۸
- پ.۱۷ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۱۷۸
- پ.۱۸ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۱۷۹
- پ.۱۹ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۱۷۹
- پ.۲۰ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۱۸۰
- پ.۲۱ سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۸، ۶ و ۴م در راستای طولی ۱۸۰
- پ.۲۲ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۱۸۱
- پ.۲۳ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۱۸۱
- پ.۲۴ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۱۸۲
- پ.۲۵ شکل نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۱۸۲
- پ.۲۶ سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۴، ۲ و همکف در راستای طولی ۱۸۳
- پ.۲۷ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۱۸۴
- پ.۲۸ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۱۸۴
- پ.۲۹ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۱۸۵
- پ.۳۰ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۱۸۵
- پ.۳۱ مشخصه‌های آماری سنسورهای شتاب در راستای طولی ۱۸۶
- پ.۳۲ رکوردهای بدست آمده از طبقه‌ی ۲۴م در راستای عرضی ۱۸۷
- پ.۳۳ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۱۸۸
- پ.۳۴ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۱۸۹
- پ.۳۵ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۱۸۹
- پ.۳۶ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۱۹۰
- پ.۳۷ سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۲۴، ۲۲ و ۲۰م در راستای عرضی ۱۹۱
- پ.۳۸ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۱۹۲

- پ.۳۹ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۱۹۲
- پ.۴۰ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۱۹۳
- پ.۴۱ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۱۹۳
- پ.۴۲ سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۲۰، ۱۸ و ۱۶م در راستای عرضی ۱۹۴
- پ.۴۳ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۱۹۵
- پ.۴۴ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۱۹۵
- پ.۴۵ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۱۹۶
- پ.۴۶ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۱۹۶
- پ.۴۷ سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۱۶، ۱۴ و ۱۲م در راستای عرضی ۱۹۷
- پ.۴۸ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۱۹۸
- پ.۴۹ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۱۹۸
- پ.۵۰ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۱۹۹
- پ.۵۱ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۱۹۹
- پ.۵۲ سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۱۰، ۱۲ و ۱۸م در راستای عرضی ۲۰۰
- پ.۵۳ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۲۰۱
- پ.۵۴ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۲۰۱
- پ.۵۵ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۲۰۲
- پ.۵۶ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۲۰۲
- پ.۵۷ سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۸، ۶ و ۴م در راستای عرضی ۲۰۳
- پ.۵۸ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۲۰۴
- پ.۵۹ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۲۰۴
- پ.۶۰ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۲۰۵
- پ.۶۱ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۲۰۵
- پ.۶۲ سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۴، ۲ و همکف در راستای عرضی ۲۰۶

- پ.۶۳ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۲۰۷
- پ.۶۴ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۲۰۷
- پ.۶۵ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۲۰۸
- پ.۶۶ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۲۰۸
- پ.۶۷ مشخصه‌های آماری سنسورهای شتاب در راستای عرضی ۲۰۹
- پ.۶۸ سیگنال‌های گرفته شده از بلوک A بیمارستان در راستاری عرضی ۲۱۰
- پ.۶۹ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۲۱۱
- پ.۷۰ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۲۱۱
- پ.۷۱ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۲۱۲
- پ.۷۲ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۲۱۲
- پ.۷۳ سیگنال‌های گرفته شده از بلوک B بیمارستان در راستاری طولی ۲۱۳
- پ.۷۴ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۲۱۳
- پ.۷۵ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۲۱۴
- پ.۷۶ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۲۱۴
- پ.۷۷ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۲۱۵
- پ.۷۸ سیگنال‌های گرفته شده از بلوک B بیمارستان در راستاری عرضی ۲۱۵
- پ.۷۹ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۲۱۶
- پ.۸۰ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۲۱۶
- پ.۸۱ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۲۱۷
- پ.۸۲ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۲۱۷
- پ.۸۳ (آ) مدل سه بعدی ساختمان مسکونی محمدیه ۵، (ب) مدل پلان سازه ۲۲۰
- پ.۸۴ نتایج خروجی نرم افزار اپنسیس برای مدل محمدیه ۵ ۲۲۰
- پ.۸۵ سیگنال‌های گرفته شده از ساختمان مسکونی محمدیه ۵ در راستاری عرضی ۲۲۱
- پ.۸۶ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس ۲۲۱

- پ.۸۷ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر ۲۲۲
- پ.۸۸ نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط ۲۲۲
- پ.۸۹ نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا ۲۲۳

فصل ۱

مقدمه

۱.۱ اهمیت موضوع

امروزه نگرانی در مورد عمر بالا و خسارت سازه‌های تعداد زیادی از زیرساخت‌های عمرانی همانطور که بطور مثال در (FHWA, ۲۰۰۸) گزارش شده است، همراه با نیاز به صحت سنجی رفتار سازه‌های جدید با پیچیدگی زیاد (IABSE, ۲۰۰۹) وجود دارد. پایش سلامت سازه در دهه‌های گذشته از اهمیت خاصی برای اغلب کشورها بخصوص کشورهای پیشرفته برخوردار شده است به نحوی که بطور مثال در دهه ۱۹۸۰، سازمان نقشه برداری ایالات متحده برای اولین بار عهده‌دار انجام و جمع‌آوری رکوردهای ارتعاش محیطی در ساختمان‌های بلندمرتبه و پل‌ها برای تعیین پارامترهای دینامیکی آنها شد و همچنین در کشور چین تعبیه سیستم‌های پایش سلامت برای پل‌های بزرگراهی از سال ۲۰۱۰ میلادی به بعد الزامی شده است. حین دو دهه گذشته ثبت ارتعاشات محیطی بخاطر هزینه کمترشان نسبت به ارتعاش اجباری ترجیح داده شده است.

ساخت سازه‌های بسیار انعطاف‌پذیر که پتانسیل ایجاد ارتعاش بیشتر را که بوسیله انواع مختلفی از بارهای دینامیکی (باد، عبور قطارهای پر سرعت یا عابرین پیاده) با افزایش چشمگیر توجه طراحان، سازندگان و مالکین سازه‌های مهم روی تست‌های دینامیکی و برنامه‌های پایش سلامت بر پایه ارتعاش تلفیق شده است [۱].

طراحی معماری در سالهای اخیر با توجه به لاغری بیش از پیش سازه‌ها، تحلیل دینامیکی این سازه‌ها را الزامی می‌سازد. مهندسان عمران باید به غیر از تحلیل تئوری، نوعی از تکنیک‌های تجربی را نیز بکار گیرند. در حال حاضر مقدار میرایی برای انواع سازه‌ها به صورت یک کمیت تقریبی خود را در بخش‌های مختلف بارگذاری و طراحی و بهسازی نشان می‌دهد.

مهم‌ترین بخش در بحث بهسازی لرزه‌ای، ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌های موجود می‌باشد، در این بخش با پیاده سازی شرایط موجود و استفاده از اطلاعات در دسترس و نقشه‌های چون ساخت و در نهایت بازرسی‌های چشمی از وضعیت سازه، اطلاعات لازم برای مدل سازی سازه را بدست می‌آورند. این سازه‌ها می‌توانند ساختمان‌هایی باشند که پس از وقوع هر نوع رخداد از جمله زلزله، آتش سوزی، انفجار، ضربه و... دچار گسیختگی نشده است و نیاز به ارزیابی مجدد برای بهره‌برداری از آن ضروری به نظر می‌رسد و یا سازه‌هایی که از عمر آن گذشته و با توجه به آئین‌نامه‌های جدید نیاز به ارزیابی مجدد دارند. در همه مواردی که در فوق از آن صحبت به میان آمد، برای بدست آوردن و بهنگام سازی مشخصه میرایی همانند زمان طراحی تلاش زیادی صورت نمی‌گیرد و از نسبت‌های میرایی ۵ درصد و یا میرایی متناسب استفاده می‌شود.

همانطور که می‌دانیم میرایی همانند جرم و سختی در مشخصه‌های دینامیکی سازه‌ها نقش اساسی دارد و بدست آوردن مقادیر دقیق آن کمک بزرگی در شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت سازه‌ها ایفا می‌کند. یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در روند پایش سلامت سازه، نحوه مدل‌سازی آن می‌باشد. پایش سلامت سازه در این تحقیق بصورت یک مسأله شناسایی سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. واضح است که جواب مسأله شناسایی سیستم آسان نیست و اغلب بسیار دشوار می‌باشد. در بسیاری از حالتها، این مسائل دارای جواب منحصر به فرد نمی‌باشند. این بدین خاطر است که جوابها به تعداد زیادی پارامتر که اثرشان روی خروجی نامشخص است، وابسته است. اکثر مسائل شناسایی سیستم نیازمند تعیین تابع انتقال یا تابع پاسخ فرکانسی سیستم (FRF)^۱، که تعیین‌اش نیاز به مدل‌های ریاضی صوت دارد، می‌باشد.

یک فشار تکنولوژیکی در پیشبرد سیستمهای پایش سلامت سازه بصورت بازرسی‌های چشمی و سنجش غیرمخرب (NDE)^۲ برای ارزیابی ایمنی و دوام سازه‌های عمرانی وجود داشته است. امتیاز روش‌های ارزیابی

¹Frequency Response Function

² Non-Destructive Evaluation

غیرمخرب و چشمی این است که به کمک آنها اطلاعات بسیار دقیقی در مورد سازه بدست می‌آید، در مورد سازه های ساختمانی بلندمرتبه، این روش ها فاقد توانایی برای تامین اندازه گیری های بی وقفه در مورد کل سازه می باشند. در مقابل، سیستم پایش سلامت سازه برای اطلاع از چگونگی شرایط و اطلاعات در مورد هر نقطه از سازه بطور پیوسته کار پایش را انجام می دهد.

مشکلات دیگر در هنگامی که سازه موجود چندین زلزله کوچک و متوسط را حین عمر بهره برداری سازه تجربه می کند، رخ می دهد. افزایش عمر سازه و اینکه تحت بارهای خستگی با سیکل های نسبتا کم ناشی از زلزله های کوچکتر قرار می گیرد، سازه رفتاری متفاوت از آنچه در آغاز برای آن طراحی شده است را از خود نشان می دهد. این قبیل بارهای خستگی شاید از نظر اندازه کوچکتر از بارهای تراز طراحی باشد و هیچ خسارتی در سازه نمایان نکند، اما به طور قابل ملاحظه ای عمر باقیمانده سازه را کاهش می دهد. علاوه بر این، از رفتارهای غیرخطی در فرآیندهای طراحی معمولا یا صرفنظر می شود یا ساده سازی می شود که روی عملکرد سازه در مقابل بارهای زلزله حین بهره برداری اثر می گذارد. در مجموع، این عوامل سازه های موجود را غیرقابل اعتماد و رفتارشان را بدون پایش منظم دوره ای غیرقابل تخمین می سازد. این مقوله علی الخصوص برای ساختمان های بحرانی از قبیل بیمارستان ها و شریان های حیاتی اصلی که بعد از رخداد های فاجعه آمیز زلزله کارایی آنها بسیار مورد نیاز است، اهمیت دارد [۲].

۲.۱ تشریح هدف

هدف در این پایان نامه بدست آوردن مشخصات دینامیکی سازه با استفاده از تکنیک پایش سلامت سازه می باشد. فقدان اطلاعات دقیق در مورد مشخصه میرایی ذاتی در سازه های عمرانی بطور گسترده ای تشخیص داده شده است. پایش سلامت سازه به دو طریق قابل انجام است:

روش اول استفاده از اعمال ورودی (نیرو) به سازه است که برای تولید تابع نیروی مورد نظر، ابزاری از قبیل چکش ضربه ای، لرزاننده ها یا وزنه های ثقلی بکار گرفته می شود، در مقایسه فن آوری های بکار رفته در تولید ورودی تحریک اجباری سازه ای، ضربه چکش موثرتر، قابل حمل تر و آسان تر است، ولی ضربه چکش نسبت سیگنال به نویز ضعیفی دارد.

دیگر فن آوری پر کاربرد برای تولید ورودی تحریک اجباری، وزنه ثقلی است. وزنه ثقلی امکان کنترل دامنه تابع نیروی ورودی را مهیا می‌کند و فرکانس‌های پائین سازه را به تحریک در می‌آورد اما مشابه ضربه چکش، دارای نسبت سیگنال به نویز ضعیف می‌باشد و برای پایش پیوسته نمی‌توان از آن بهره برد. در نهایت، لرزاننده‌ها می‌توانند فرکانس مودهای بالاتر (تا ۱۰۰ هرتز) نسبت به فن آوریهای ضربه چکش یا وزنه ثقلی را به تحریک درآورد، اما گران تر و نصب آن دشوارتر است.

روش دوم برداشت خروجی‌ها (تغییر مکان، کرنش، سرعت و شتاب) از سازه و تحلیل سیستم (سازه) به کمک روابط موجود برای سیگنال‌های معین می‌باشد.

ابتدائی و پر کاربرد ترین تست دینامیکی که در صنعت خودرو بسیار رواج دارد، تحلیل مودال تجربی (یا کلاسیک) (EMA)^۱ است. استفاده از این روش در سازه‌های بزرگ مهندسی عمران غیر ممکن است و به همین خاطر روش تحلیل مودال تجربی برای این موارد بی‌استفاده می‌باشد.

اما روشی که ما در این پایان نامه هم از آن استفاده کردیم، شامل برداشت خروجی تنها می‌باشد و فرض اینکه ورودی ما سیگنال احتمالاتی است که شامل مجموعه‌ای از بارهای محیطی به سازه می‌باشد. روشهای خروجی تنها شامل اندازه‌گیری ارتعاش خروجی سازه در پاسخ به تحریک محیطی می‌باشد. تحریکات محیطی شامل بارگذاری می‌باشد که به سبب باد، زلزله‌های کوچک، عبور وسایط نقلیه و امواج اقیانوس به وجود می‌آید.

تحریک محیطی بعنوان یک فرآیند تصادفی دائمی که دارای طیف فرکانسی مسطح می‌باشد، فرض شده است، که در عوض استفاده در تحلیل مودال تجربی، در تحلیل مودال بهره برداری (OMA)^۲ بکار برده می‌شود.

بزرگترین امتیاز تحلیل مودال بهره برداری، عدم نیاز به اندازه‌گیری تحریک است. پارامترهای مودال (مقادیر ویژه، بردارهای ویژه و میرایی مودال) را هنگامی که سازه بوسیله اثرات محیطی (باد، ترافیک، حرکت عابرین پیاده، جریان آب و غیره) تحریک شده است، تخمین زد. تنها شرطی که باید ارضا شده باشد این است که تحریک بصورت نویز سفید رفتار (*White Noise*) کند.

استفاده از تحلیل مودال بهره برداری در دو نوع اصلی الگوریتم بکار می‌رود: حوزه زمان و حوزه فرکانس. تعداد

¹Experimental Modal Analysis

²Operational Modal Analysis

زیادی الگوریتم تحلیل مودال تجربی در هر دو حوزه زمان و فرکانس توسعه داده شده اند. اکثر این الگوریتم ها بصورت فن آوری های تک ورودی- تک خروجی (SISO)^۱، تک ورودی- چند خروجی (SIMO)^۲ یا چند ورودی- چند خروجی (MIMO)^۳ پیاده سازی شده اند. تکنیک تحلیل مودال تجربی بصورت وسیعی برای کاربردهای هوافضا، مکانیک و همچنین کاربردهای عمرانی استفاده شده است. مشابه تحلیل مودال تجربی، (EMA) تحلیل مودال بهره برداری، (OMA) تکنیکی است که به موجب آن مشخصات مودال سازه استخراج می شود.

شاخه ای که روی مشخصه های سیستم تحت ارتعاشات محیطی مطالعه می کند، تحلیل مودال بهره برداری (OMA) یا تحلیل مودال منحصر به خروجی نامیده می شود که روشهای مفید زیادی برای مهندسی عمران مهیا کرده است. تحلیل مودال بهره برداری، مشخصات مودال سازه را بوسیله تحلیل خروجی پاسخ دینامیکی به ورودی تحریک بهره برداری اش استخراج می کند. عبارت دیگر، تحلیل مودال بهره برداری پاسخ سازه را بر پایه بارهای منحصر محیطی تحلیل می کند. فقدان نیاز به تولید ورودی تحریک اجباری، بطور قابل ملاحظه ای هزینه پایش سلامت سازه را کاهش می دهد و امکان انجام پایش سلامت سازه را هنگامی که سازه در حالت بهره برداری است، مهیا می کند. برای کاربردهای عمرانی، تحلیل مودال بهره برداری به یک تکنیک بسیار جذاب برای استخراج پارامترهای مودال که در تحقیقات پایش سلامت سازه بر پایه ارتعاش مورد استفاده قرار گرفته، تبدیل شده است [۳].

یکی از روش های شناسایی میرایی که به تست میدانی می توان پی به مقدار آن برد، تست ارتعاش محیطی (AVT)^۴، می باشد. تست ارتعاش محیطی جزئی از فرآیند پایش سلامت سازه

(SHM)^۵ است که بطور نمایشی در شکل ۱.۱ و روند انجام آن بصورت فلوجارت در شکل ۲.۱ نشان داده شده و دارای شش مرحله اصلی بصورت زیر می باشد :

۱. انجام تست ارتعاش محیطی روی سازه مورد نظر

۲. طراحی و بهنگام سازی مدل اجزای محدود سازه

¹Single Input- Single Output

²Single Input- Multi Output

³Multi Input- Multi Output

⁴Ambient Vibration Test

⁵Structural Health Monitoring

۳. شبیه سازی سطوح ارتعاش محیطی به کمک روش اجزای محدود

۴. اضافه کردن نویز به سیگنال های شبیه سازی شده

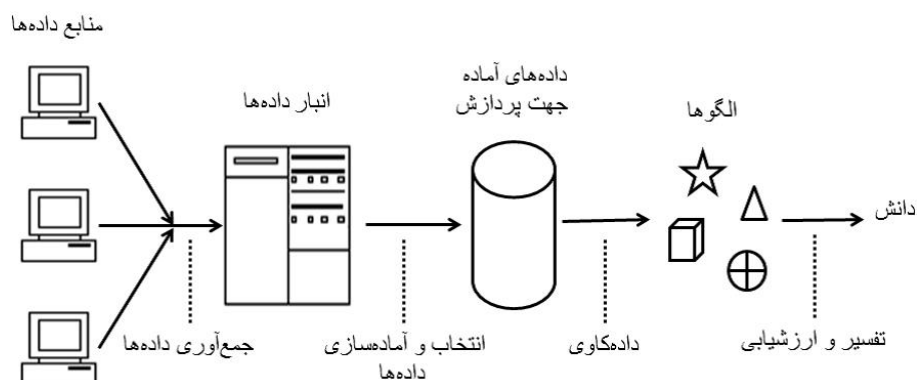
۵. انتخاب روش متناسب با کاربرد

۶. انتخاب چیدمان سنسورها

نتایج تست ارتعاشات محیطی برای کل فرآیند عیب یابی و بهسازی اهمیتی حیاتی دارد. مشخصه های دینامیکی در بهنگام سازی مدل بکار می روند (مرحله دوم). سطوح ارتعاشات اندازه گیری شده زمین را می توان بصورت ورودی به مدل اجزای محدود برای شبیه سازی بکار برد و از تخمین های میرایی بدست آمده، در شبیه سازی استفاده کرد (مرحله دوم). ترازهای نویز با سیگنال های رکورد شده کالیبره می شوند (مرحله چهارم). مدل های ریاضی مناسب برای پس پردازش خروجی اندازه گیری شده جهت تخمین پارامترهای دینامیکی آن مورد نیاز است. برخی از مدل های ریاضی پرکاربرد شامل روشهای اختلاف محدود (FDM)، روش المان محدود (FEM) و روش اجزاء مرزی (BEM) می باشد. از میان این ها روش اجزاء محدود قدرتمندترین و روان ترین روش بخاطر قابلیت مدل کردن هندسه های پیچیده می باشد.

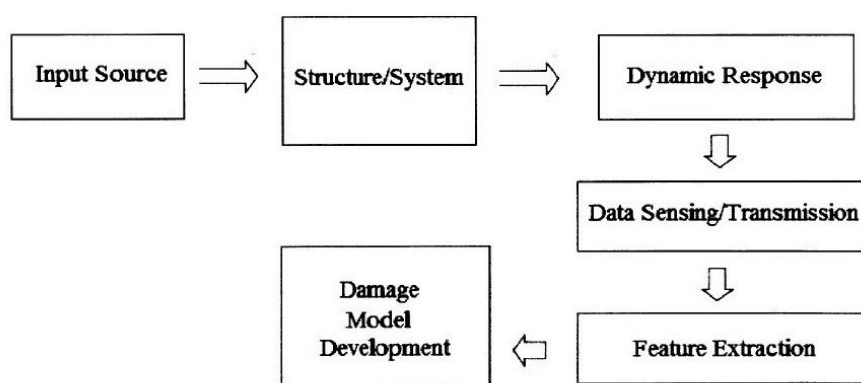
روش اجزاء محدود یک تکنیک عددی قدرتمند برای حل مسائل بدست آمده از معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی، روی نواحی پیچیده می باشد. معمول است حل مسائل در سازه ها بصورت مستقیم باشد، که بدین صورت است که برای بارگذاری داده شده (ورودی)، می توان به سادگی تغییر شکل های سازه تحت بارگذاری (خروجی) را تعیین کرد. پایش سلامت سازه نیازمند تخمین وضعیت سازه بوسیله خروجی اندازه گیری شده (تغییر شکل، سرعت، شتاب، ولتاژ و غیره) برای ورودی داده شده و از پیش تعریف شده (نیرو) می باشد. پایش سلامت سازه زیرمجموعه مسائل شناسایی سیستم^۱ قرار می گیرد. این قبیل مسائل به مسائل معکوس هم مشهور هستند.

¹System Identification



شکل ۱.۱: فرآیند پایش سلامت

تکنیک‌های پایش سلامت سازه برپایه ارتعاش از روش‌های عیب‌یابی محلی از قبیل نشر صوت و مافوق صوت متمایز هستند. اکثر شیوه‌های عیب‌یابی محلی برای پایش سازه‌های عمرانی بزرگ خیلی کاربردی نیستند. بطور ایده‌آل، طرح‌های پایش سلامت سازه برپایه ارتعاش با تکنیک‌های عیب‌یابی محلی بصورت متوالی بکار می‌روند. پایش سلامت سازه برپایه ارتعاش در ابتدا برای تحلیل سازه و در صورت وجود آسیب کلی سازه بکار می‌رود و سپس آسیب شناسایی و موقعیت‌یابی خواهد شد، تکنیک‌های محلی برای یافتن ابعاد آسیب مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۲.۱: فلوچارت پایش سلامت سازه بر پایه ارتعاش

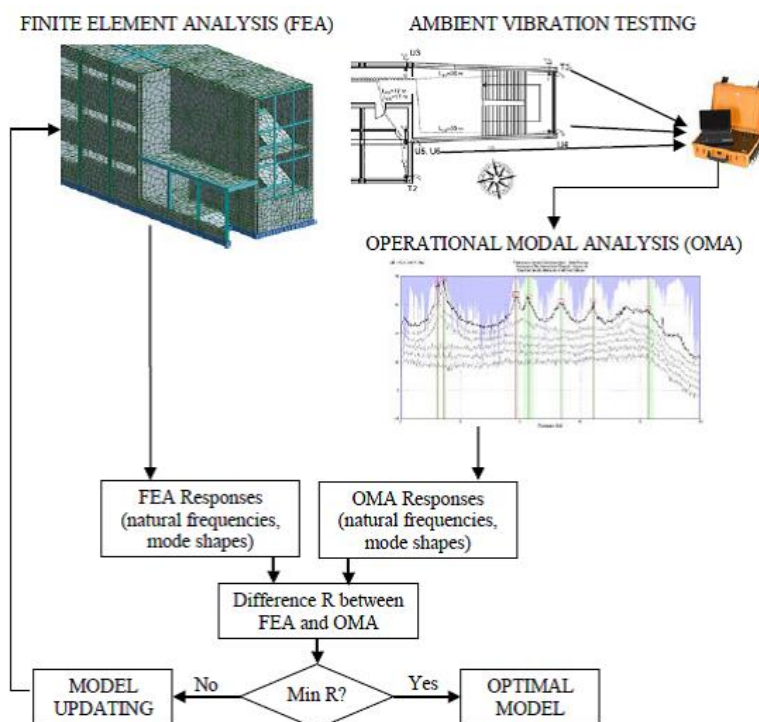
۳.۱ کاربرد

از جمله کارکردهای بکارگیری تست ارتعاش محیطی در ساختمان‌ها، پل‌ها، سد‌ها، خطوط راه‌آهن و هر نوع سازه‌ای که نسبت به عملکرد و رفتار سازه‌ای و یا حتی غیرسازه‌ای آن حساس باشیم، می‌توان به برآورد وضعیت سازه، تعیین میزان و مقدار خرابی، تعیین عمر باقیمانده سازه، پایش سلامت لحظه‌ای سازه، شناسایی پارامترهای سازه‌ای و ... اشاره کرد.

مشابه زلزله، ارتعاشات محیطی هم سازه‌های مهندسی عمران شبیه پل‌ها، ساختمان‌ها و سد‌ها را مجبور به ارتعاش می‌کند. منبع این ارتعاش قرار است توسط روش‌های بکار رفته تبدیل به نویز سفید شود، یعنی با طیف مسطح نویز، پاسخ سیستم رکورد شده در واقع همان مشخصه خود سیستم باشد. این ارتعاشات برای بشر تنها در حالت‌های محدودی (پل‌ها، ساختمان‌های بلند) قابل درک است. ارتعاشات محیطی ساختمان‌ها همچنین بوسیله باد و منابع داخلی (ماشین‌ها، عبور و مرور عابرین پیاده و ...) ایجاد می‌شود اما معمولاً از این منابع برای توصیف سازه‌ها استفاده نمی‌شود.

به نظر می‌رسد که مهم‌ترین کاربرد این تحقیق را می‌توان به بحث ارزیابی مقاومت سازه‌ها در مراحل مختلف از مرحله اسکلت تا انتهای سفت‌کاری ساختمان و حتی بعد از گذشت چند سال از عمر سازه اختصاص داد. در مراحل ساخت، کنترل و ارزیابی رفتار سازه‌ی نیمه‌کاره برای مقابله با حوادث احتمالی از جمله زلزله و طوفان و همچنین برای سازه‌های ساخته شده بعد از وقوع رخداد‌های طبیعی، از شرایط سازه اطلاعات مفیدی کسب کرد.

در تمامی حالت‌های گفته شده، بدست آوردن مقادیر دقیق میرایی کمک بسیار زیادی در ارزیابی صحیح سازه‌ها ایفا می‌کند. مساله‌ی دیگری که بدست آوردن دقیق پارامترهای دینامیکی را با اهمیت می‌سازد، به روز رسانی مدل (*ModelUpdating*) می‌باشد که روند انجام آن در شکل ۳.۱ نشان داده شده است و امروزه کاربردهای فراوانی در زمینه تدقیق مدل‌سازی دارد.



شکل ۳.۱: گراف روش بدست آوردن مدل بهینه به کمک تحلیل مودال بهره‌برداری

۴.۱ روش تحقیق و دلایل انتخاب آن

عدم قطعیت در مدل‌سازی گاهی پیامدهای قابل توجهی هنگام مواجهه با شناسایی سیستم به بار می‌آورد [۴]. با مروری بر آئین‌نامه‌های طراحی و بهسازی کشور و جهان به این نتیجه می‌رسیم که بحث مقدار میرایی و اثرات آن، با رویکردی کاملاً محتاطانه مقادیری را بصورت تجویزی اعمال می‌کنند و طراحی نسبت به مقوله‌ی میرایی برای سازه حساس نمی‌باشد و جز یک عدد ثابت جایی در محاسبات ندارد. میرایی به عکس جرم و سختی در سازه، پارامتر شناخته شده‌ای نیست. پس به نظر می‌رسد تا رسیدن به شناخت کامل میرایی و مؤلفه‌های آن بتوان با استفاده از سیگنال‌های گرفته شده از سازه‌های موجود مقادیر میرایی آنها را استخراج کرد. امروزه با پیشرفت تکنولوژی در عرصه‌های گوناگون علی‌الخصوص مهندسی برق و کامپیوتر، بکارگیری و استفاده مناسب از آنها در رشته‌های مختلف بسیار فراگیر شده است. در رشته مهندسی سازه، استفاده از دستگاه اکتساب

داده برای پایش سلامت سازه در کشورهایی که در برابر بلایای طبیعی (از جمله زلزله و باد) پرخطر محسوب می شوند، بسیار پرکاربرد شده است.

پایش سلامت سازه، بصورت فرآیندی از ارزیابی وضعیت سلامت سازه و تخمین عمر باقیمانده آن تعریف می شود. فرایندهایی از قبیل خوردگی، خستگی، سایش، فرسایش و سربارها، عمر سازه را از مدت زمانی که برای آن در نظر گرفته شده، می کاهد.

روشی که در انجام پایان نامه اتخاذ شده است، هم بصورت تحلیلی و هم بصورت تست میدانی است. برای تحلیل داده های بدست آمده از تست های میدانی، از شناسایی سیستم پارامتری و غیر پارامتری استفاده شده است. در شناسایی سیستم غیر پارامتری از تکنیک جداسازی حوزه فرکانس و در شناسایی سیستم پارامتری از تکنیک شناسایی زیر فضای اتفاقی (*SSI*)^۱ استفاده شده است.

تکنیک جداسازی حوزه فرکانس از ساده ترین و پرکاربردترین روشها در حوزه فرکانس می باشد که از دقت کافی برای بدست آوردن مشخصه های سازه ای از داده های اکتساب شده برخوردار است که البته تنها در تخمین نسبت میرایی این تکنیک ضعف هایی داشته که با ارتقا و تلفیق آن با روش های دیگر، نتایج حاصل از نسبت میرایی نیز بهبود یافته است. تکنیک شناسایی زیر فضای اتفاقی هم بهترین روش در حوزه زمان است که از نتایج بهتری در مقایسه با دیگر تکنیک ها در این حوزه برخوردار است.

فواید پایش سلامت سازه شامل:

۱. امکان استفاده بهینه از سازه را فراهم میکند، کمینه کردن زمان مرده و بلااستفاده و ممانعت از تخریب های فاجعه بار.

۲. امکان طراحی بهینه برای مهندس طراح ایجاد می کند.

۳. بصورت فوق العاده ای در ساز و کار خدمات تعمیر و نگهداری تغییر ایجاد می کند.

روش های ورودی - خروجی دارای امتیاز جلوگیری از اثرات نویز روی پاسخ سازه می باشند که روش های خروجی تنها دارای این امتیاز نمی باشند. با این وجود، راه حل های ورودی - خروجی پرهزینه تر از راه حل های خروجی تنها می باشند و معمولاً در استفاده معمول از سازه اختلال ایجاد می کنند. راه حل های خروجی تنها امکان

¹Stochastic Subspace Identification

پایش سلامت سازه بصورت پیوسته و بی وقفه را به علت اینکه پاسخ سازه را می تواند تحت شرایط بهره برداری اندازه گیری کرد، مهیا می کند. با این وجود، روش های خروجی تنها دارای معایبی هستند که از آن جمله نیروهای تحریک معلوم نیستند و اغلب توانایی به تحریک درآوردن مودهای فرکانسی بالای سازه را ندارند [۲].

۵.۱ ساختار پایان نامه

در فصل اول به تعاریف و معرفی روش ها و شیوه های پایش سلامت سازه و استخراج پارامترهای دینامیکی سازه از جمله میرایی و اهمیت آنها و کاربردهای متنوع آن پرداخته شده است. در فصل دوم به مطالعه ادبیات فنی و مرور کارهای انجام شده در این حوزه همراه با چند مثال موردی در کشورهای مختلف می پردازد. در فصل سوم راجع به معرفی دستگاه های استفاده شده در این تحقیق با جزئیات هر کدام بطور تفصیل پرداخته می شود. در فصل چهارم به معرفی ساختمان هایی که در این تحقیق، آزمایشات میدانی بر روی آنها انجام شده است و مشخصات سازه ای آنها می پردازد. در فصل پنجم سازه های مورد مطالعه مدل سازی شده و تحلیل مودال روی آنها صورت گرفته و نتایج مشخصه های دینامیکی آنها استخراج شده است.

در فصل ششم به بررسی سیگنال های دریافتی از سازه های نمونه پرداخته و پردازش سیگنال روی خروجی ها صورت گرفته و مشخصه های دینامیکی از این طریق به کمک روش های یادگیری عمیق و الگوریتم های بکار رفته، استخراج شده که مراحل پیاده سازی آن در زبان برنامه نویسی پایتون به تفکیک شرح داده شده است. در فصل آخر به مقایسه نتایج بدست آمده مقادیر میرایی مودال از روش های مختلف و نتیجه گیری از کارهای صورت گرفته و پیشنهادات برای ادامه تحقیق پرداخته می شود.

فصل ۲

پیشینه تحقیق

مرور ادبیات فنی پایش سلامت سازه شامل دو بخش تحقیقات نظری و تحقیقات تجربی می‌باشد. تاکید بیشتر ما در مرور ادبیات فنی روی روش‌های بکار گرفته شده در سازه‌های عمرانی می‌باشد. روشهای پایش سلامت سازه را بطور کلی می‌توان در چند دسته تقسیم کرد: روشهای مبتنی بر ارتعاش، بازرسی چشمی و تست‌های محلی (Aktan et al. ۲۰۰۲).

روش‌های مبتنی بر ارتعاش فراگیرترین بخش تحقیقات را در این حوزه به خود اختصاص داده است. یک مرور جامعی از روش‌های بر پایه ارتعاش تا پیش از سال ۱۹۹۶ میلادی توسط (Doebeling et al. ۱۹۹۶) صورت گرفت. یک تحقیق بوسیله (Sohn et al. ۲۰۰۳) برای مرور کارهای صورت گرفته در بین سالهای ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۱ میلادی در همین حیطه صورت پذیرفت. الگوریتم‌های موجود پایش سلامت سازه در مقالات را می‌توان در دو گروه اصلی دسته‌بندی کرد: روشهای پارامتری و غیرپارامتری.

در پایش سلامت سازه پارامتری، مدل ریاضی حاکم بر رفتار سازه‌ای شناخته شده است و برای شناسایی تغییرات محتمل در پارامترهای سازه‌ای نسبت به مدل مرجع برای یافتن و موقعیت آسیب کارایی دارد. در مقابل، روش‌های غیرپارامتری ورودی‌های سازه را به خروجی‌ها بدون هیچگونه اطلاعاتی در مورد مدل داخلی سازه نگاشت می‌کند. آسیب بوسیله شناسایی تغییرات در پارامترهای ذاتی یا مدل غیر-فیزیکی ساخته شده، بدست می‌آید.

با این وجود، مدل های غیر پارامتری نمی توانند موقعیت آسیب را بدون اطلاعات قبلی از مدل فیزیکی مشخص کنند.

امتیاز بارز روشهای پایش سلامت سازه غیرپارامتری نسبت به نگرش های پارامتری، توانایی آنها در لحاظ کردن دینامیک کامل سازه شامل دینامیک ساده شده یا مدل سازی نشده می باشد [۵]. مرور ارائه شده در این فصل را می توان به روش های حوزه زمان، روش های حوزه فرکانس، تحقیقات صورت گرفته ناشی از تاثیر شرایط محیطی و عملکردی روی پایش سلامت سازه و روش های خاص استفاده از تکنیک های تحلیل سری های زمانی تقسیم بندی کرد.

شناسایی تجربی پارامترهای مودال یک عنوان تحقیقی است که در چند دهه گذشته توسعه یافته است. شروع کاربرد آن در مهندسی مکانیک برای مشخص کردن رفتار دینامیکی سازه های نسبتاً کوچک تست شده در محیط تحت کنترل، داخل آزمایشگاه، بوده است. به این رویکرد اولیه امروزه تحلیل مودال تجربی (EMA) گفته می شود، که بر اساس اندازه گیری پاسخ سازه به یک یا چند نیروی دینامیکی اندازه گیری شده است. از رابطه بین ورودی اعمال شده و خروجی مشاهده شده، شناسایی پارامترهای مودال امکانپذیر است. از کاربردهای عملی اولیه تابحال، تجهیزات و ابزار آزمایش و الگوریتم ها برای پردازش داده ها بطور چشمگیری رشد کرده اند. بنابراین، تحلیل مودال تجربی در حال حاضر یک حیطه مناسب در پایگاه های جامدات نظری که در کتاب های مرجع بدان استناد شده است (۱۹۹۷. *Maia and Silva*, ۲۰۰۷. *Heylen et al*, ۲۰۰۰. *Ewins*), ایجاد شده است و بطور وسیعی در عمل بکار رفته، برای مثال در صنعت خودرو و هوافضا (چندین کاربرد در کنفرانس بین المللی تحلیل مودال (IMAC) بدان پرداخته شده است، کنفرانسی سالانه که از سال ۱۹۸۲ میلادی سازمان یافته است.

اخیراً، تکنیک های تست مودال ترکیبی، تحلیل مودال بهره برداری با ورودی های برون زاد (OMAX) اسم گذاری شده، مورد تحقیق قرار گرفته است. در این نوع تست دینامیکی یک نیروی مصنوعی در شرایط بهره برداری بکار برده است. تفاوت اصلی بین تحلیل مودال بهره برداری با ورودی های برون زاد و تحلیل مودال تجربی این است که نیروهای بهره برداری به جای نویز در مدل سیستم شناسایی فرضی، گنجانده شده اند. در این روش، دامنه نیروی مصنوعی اعمالی می تواند هم سطح یا پائین تر از تحریک محیطی دائمی باشد. در نتیجه، تجهیزات تحریک نسبتاً کوچک می توانند مورد استفاده قرار گیرند. پیش زمینه تئوری این رویکرد به همراه جزئیات کاربردی در سازه

های مهندسی عمران در (Reynders, ۲۰۰۹) شرح داده شده است. کاربردهای ارائه شده نشان می دهد که الگوریتم های OMAX برای پردازش داده های جمع آوری شده در تست ارتعاش اجباری با استفاده از لرزاننده (بعنوان ارتعاش محیطی که حین تست نمی توان از آن ممانعت کرد، بطور صریح در مدل در نظر گرفته شده است) یا پردازش داده های جمع آوری شده در پل پیاده رویایی که تحریک طبیعی بوسیله تحریک مصنوعی تولید شده بوسیله یک ابزار تحریک کوچک (مانند چکش) کامل شده بود، می تواند مفید باشد.

ماتریس توابع پاسخ فرکانسی (FRF) توسط برش عرضی مؤلفه های ماتریس تابع انتقال در راستای محور موهومی تشکیل شده است: $s = i\omega$. در نتیجه، FRF حقیقتاً یک حالت خاصی از تابع انتقال است. با این وجود، در عمل، ممکن است بتوان تابع انتقال را بدون از دست دادن اطلاعات مفید جایگزین آن کرد (Heylen et al., ۲۰۰۷). مؤلفه های FRF پیک های با دامنه محدود (برای سازه های دارای میرایی) برای ω معادل با فرکانس های طبیعی میرا شده ی سیستم را که دارای شکل زنگوله ای است، نشان می دهد و با کاهش میرایی نوک تیزتر می شود.

در حقیقت، این روش تغییر شکل های بهره برداری را در عوض شکل مودها شناسایی می کند. برای مودهای بسیار نزدیک به هم، این تغییر شکل های بهره برداری از برآیند سهم چندین مود خواهد بود. بعلاوه این روش نیازمند مهارت بالای مهندسی است و هیچ اطلاعاتی در مورد نسبت میرایی مودها ارائه نمی دهد. علاوه بر این، صحت تخمین ها بستگی زیادی به دقت فرکانسی دارد که در تست ها مورد استفاده قرار گرفته است.

۱.۲ تحقیقات نظری

۱.۱.۲ حوزه زمان

روش های شناسایی غیرپارامتری سیستم با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۱ بطور وسیعی برای پایش سلامت سازه مورد مطالعه قرار گرفته است. (Nakamura et al., ۱۹۹۸) یک ساختمان قاب فلزی هفت طبقه با ارتفاع ۲۳ متر را که در زلزله سال ۱۹۹۵ میلادی کوبه ژاپن آسیب دیده بود، مورد مطالعه قرار داد. با وجود

^۱Artificial Neural Network

اینکه در این ساختمان حین زلزله تجهیزاتی نصب نبود، این محققان اندازه گیری ارتعاش محیطی ساختمان را در حالت های آسیب دیده و بهسازی شده انجام دادند. تعمیرهای انجام شده برای بازگشت سازه به حالت بدون آسیب اولیه صورت پذیرفت. شبکه عصبی مصنوعی برای ارتباط تغییر مکان نسبی به نیروی الاستیک هنگامی که ساختمان بدون آسیب بوده، بکار گرفته شد. خطاهای پیش بینی بین شبکه عصبی مصنوعی و اندازه گیری ها برای شناسایی آسیب در سازه بکار گرفته شد. بخاطر ماهیت غیر پارامتری، این روش قابلیت تعیین اینکه کدام عضو و به چه اندازه آسیب دیده را نداشت.

(Wu et al. ۲۰۰۲) تحقیقات Nakamura را ادامه داد و روش شناسایی پارامتری غیرمتمرکز را با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی برای تشخیص آسیب سازه های چند درجه آزادی توصیف کرد. سازه چند درجه آزادی به چند زیرسازه با درجات آزادی کمتر تقسیم شده بود. شبکه عصبی مصنوعی برای هر زیرسازه برای تخمین نیروی الاستیک ناشی از تغییر مکان و سرعت نسبی بعنوان ورودی ها، آموزش داده شده بود. خطای پیش بینی بین شبکه عصبی مصنوعی و اندازه گیری ها بعنوان ورودی داخل شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. این شبکه آسیب را بصورت تغییر در سختی کمی سازی کرده بود. (Huang et al. ۲۰۰۳) از شبکه عصبی مصنوعی برای شناسایی تغییرات در پاسخ دینامیکی ساختمان ها و آسیب سازه ای متناسب با آن استفاده کرد. این محققان شبکه را برای پیش بینی پاسخ سازه بدون آسیب در زلزله های خفیف آموزش دادند که سازه رفتاری خطی داشته است. خطاهای بین پیش بینی شبکه و پاسخ اندازه گیری شده هنگامی رخ می دهد که سازه رفتار غیر خطی داشته باشد. (Jiang and Adeli, ۲۰۰۷) از شبکه عصبی - فازی موزون برای تشخیص آسیب در یک مدل ۳۸ طبقه بتنی ناشی از تحریک لرزه ای استفاده کردند. این سازه به چند زیرسازه کوچکتر تقسیم شده بود و پاسخ های هر زیرسازه و تحریک زمین بصورت مدل فضای حالت فرمول بندی شده بود. بردار حالت بعنوان ورودی شبکه بکار گرفته شده بود در حالیکه خروجی، پاسخ تخمین زده برای هر زیرسازه بود. خطای پیش بینی بعنوان یک ویژگی از شبه طیف، برای تخمین آسیب بکار گرفته شد.

(Godin et al. ۲۰۰۴) استفاده از یک تکنیک تشخیص الگوی با نظارت، $K - Nearest$ و دو تکنیک تشخیص الگوی بدون نظارت، $K - means$ و SOM ، برای دسته بندی مکانیسم های مختلف آسیب در کامپوزیت ها مورد استفاده قرار داد. این محققان از مشخصه های مختلف سیگنال نشر آکوستیک بعنوان ویژگی های حساس به آسیب استفاده کردند. نتایج عملکردی مشابه برای SOM و $K - Nearest$ از خود نشان

دادند. (Alvandi and Cremona, ۲۰۰۶) عملکرد چندین روش پایش سلامت سازه بر پایه ارتعاش را مرور و ارزیابی کردند. اینها شامل انحنای شکل مودی، تغییرات در ماتریس انعطاف پذیری، انحنای انعطاف پذیری و روش های انرژی کرنشی بودند. این محققین به این نتیجه رسیدند که روش انرژی کرنشی مؤثرترین روش مورد مطالعه بوده است.

محققان زیادی نشان دادند که غیرخطی شدن، فرکانس های تشدید را در هنگامی که تراز بارگذاری افزایش می یابد، متأثر می سازد. این غیرخطی شدن بخاطر بازشدگی ترک های ریز بتن حین ارتعاشات، که گاهی بطور موقت، یا بطور دائم سختی، و سپس فرکانس های تشدید سازه را می کاهد است. با این وجود، مطالعات اخیر نشان داد این کاهش برای حرکت های ضعیف تا متوسط، کم است و معمولاً کمتر از ۲۰ درصد می باشد که این خود تأییدی در استفاده از رکوردهای ارتعاش محیطی ساختمان ها می باشد.

۲.۱.۲ حوزه فرکانس

(Wu et al. ۱۹۹۲) از طیف فوریه تاریخیچه زمانی شتاب ها و شبکه عصبی مصنوعی BP برای تشخیص آسیب در یک مدل خطی ساده شده ساختمان سه طبقه استفاده کرد. طیف فوریه بعنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی بکار رفته بود در حالیکه خروجی، آسیب در هر طبقه بود. (Worden ۱۹۹۷) مفهوم تشخیص جدیدی را معرفی کرد، که به روش تشخیص آسیب بدون نظارت نام گذاری شد. داده های بدست آمده در شرایط بدون آسیب بعنوان ورودی در داخل یک شبکه عصبی مصنوعی انجمنی بکار گرفته می شود. هنگام حضور آسیب شبکه عصبی مصنوعی دیگر قادر به بازتولید ورودی در لایه خروجی نیست و این خطا اشاره به حضور آسیب دارد.

(Zang and Imregun, ۲۰۰۱) توابع پاسخ فرکانسی را با روش PCA کاهش مرتبه داد و بعنوان ورودی ها در شبکه عصبی مصنوعی از آن استفاده کرد. BP بدون کاهش مرتبه با استفاده از PCA کاربرد شبکه عصبی مصنوعی غیرعملی خواهد بود همانگونه که آموزش شبکه عصبی مصنوعی نیازمند تلاش محاسباتی زیادی است. محققان از این روش برای تشخیص آسیب در چرخ های قطار استفاده کردند. (Sohn and Law, ۲۰۰۱) استفاده از بردارهای ریتز را در تشخیص آسیب سازه پل مورد مطالعه قرار دادند. بردارهای ریتز از ماتریس انعطاف پذیری داده های ارتعاش، استخراج می شود. این محققان نشان دادند که با انتخاب مناسب الگوهای بارگذاری،

بردارهای ریتز حساس تر از بردارهای مودال به آسیب بودند. (Demetriou and Hou, ۲۰۰۳) دو روش تشخیص آسیب، نگرش بر پایه موجک و نگرش بر پایه RBF ، را مورد مطالعه قرار دادند و برای سیستم مکانیکی یک و سه درجه آزادی بکار بردند. آسیب بوسیله یک فنر شکسته شبیه سازی شده بود که سبب افت ناگهانی در سختی می شود. با وجود اینکه هر دوی نگرشها تغییر در سیستم را که به علت افت سختی بوجود آمده بود، توانستند تشخیص دهند، اما تنها شیوه RBF توانست سختی را هم تخمین بزند.

(Ni et al. ۲۰۰۶) تشخیص آسیب لرزه ای را در مدل با مقیاس ۲۰/۱ از یک ساختمان ۳۸ طبقه مورد مطالعه قرار دادند. ساختمان تحت ترازهای مختلفی از تحریک بوسیله میز لرزان قرار گرفت. این ترازهای مختلف از تحریک با حالت های آسیب ساختمان متناسب بود. توابع پاسخ فرکانسی از تست های ارتعاش محیطی هنگامی که ساختمان در شرایط سالم و آسیب دیده قرار داشت، بدست آمد و متعاقب آن بوسیله PCA کاهش مرتبه داده شده بود. این محققان اظهار داشتند که در این مطالعه دو هدف مد نظر داشتند که یکی کاهش مرتبه و دیگری حذف نویز بوده است. مؤلفه های اصلی بعنوان ورودی های شبکه عصبی مصنوعی و خطای پیش بینی بعنوان ویژگی حساس به آسیب مورد استفاده قرار گرفت. شناسایی موقعیت آسیب بوسیله شبکه عصبی مصنوعی چندگانه که هر پایش شامل چندین طبقه بوده است.

(Hou et al. ۲۰۰۶) یک روش برپایه موجک برای تشخیص آسیب در سازه های تحت تحریک لرزه ای پیشنهاد داد. تحلیل موجک و تبدیل هیلبرت برای شناسایی آنالین پارامترهای مودال از داده های پاسخ ارتعاشی بکار رفته است. تغییر در شکل مودها برای تشخیص آسیب استفاده شده بود.

۳.۱.۲ روش های سری زمانی

استفاده از تکنیک های تحلیل سری های زمانی برای پایش سلامت سازه تاکنون توجه کمی از محققان را به خود جلب کرده است. با این حال، این روش ها امیدوارکننده هستند و توانسته بر بعضی از مشکلات روش های دیگر پایش سلامت سازه با آن مواجه شده اند، غلبه کند. بطور مثال، حساسیت به اثرات محیطی و شرایط عملیاتی. در یک تحقیق پیشگام بوسیله (Sohn et al. ۲۰۰۰) مدل های خودکار (AR) برای برازش رفتار دینامیکی پایه پل بتنی استفاده شده بود. با انجام تجزیه و تحلیل نمودار کنترل آماری روی ضرایب مدل خودکار، محققان

توانستند پاسخ سیستم‌های آسیب دیده را از آسیب ندیده تمیز دهند. با این حال، هیچ تلاشی برای تعیین موقعیت و مقدار آسیب صورت نگرفت. (Sohn and Farrar, ۲۰۰۱) نگرش مدل سازی $AR - ARX$ را برای تشخیص آسیب در یک سیستم هشت درجه آزادی بکار گرفتند. بوسیله مدل کردن سیگنال نمونه برداری شده با مدل AR و مقایسه ضرایب با پایگاه داده مرجع ضرایب AR شناخته شده، محققان توانستند سیگنال نمونه را با استفاده از نزدیک ترین ضرایب AR در پایگاه داده بازتولید کنند. نسبت انحراف معیارهای خطای باقیمانده بدست آمده از مدل ARX برای سیگنال نمونه و مرجع بعنوان ویژگی حساس به آسیب بکار برده شده بود.

(Fugate et al. ۲۰۰۱) از مدل های AR برای برازش پاسخ پایه پل بتنی مشابه سازه ای که در تحقیقات (Sohn et al. ۲۰۰۰) بکار گرفته شده بود، استفاده کرد. خطاهای باقیمانده بین پاسخ تخمین زده شده بوسیله مدل AR و پاسخ واقعی اندازه گیری شده بعنوان ویژگی حساس به آسیب بکار گرفته شده بود. (Manson et al ۲۰۰۱) پیش بینی دوبعدی از داده های ضریب AR با استفاده از PCA و نگاشت Sammon ایجاد کند. ضرایب AR از برازش سیگنال انتشار آکوستیک سری های زمانی شاه تیر بدست آمده است.

(Moyo and Brownjohn, ۲۰۰۲) داده های کرنش از پایش دائم سیستم نصب شده روی پل ارتباطی سنگاپور به مالزی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها تحلیل مداخله ای برای ارزیابی تاثیر تغییرات ناگهانی کرنش روی حالت کرنش بعدی در پل بکار بردند. (Omenzetter et al. ۲۰۰۴) بر روی داده های کرنش چند کاناله جمع آوری شده از پل ارتباطی سنگاپور به مالزی تحقیق کردند. محققان یک روش در شناسایی و موقعیت یابی رخداد های ناگهانی در داده های کرنش توسعه دادند. بردار مدل $ARMA$ برای برازش ضرایب مویک از تحلیل مویک قبلی تاریخچه های زمانی کرنش مورد استفاده قرار گرفت.

در تحقیقات بعدی، (Omenzetter and Brownjohn, ۲۰۰۶) استفاده از مدل برداری $ARIMA$ برای داده های مشابه را مورد تحقیق قرار دادند. مدل سری های زمانی فصلی برای تغییر دوره ای کرنش ناشی از چرخه ی درجه حرارت مورد استفاده قرار گرفت. ضرایب مدل $ARIMA$ با استفاده از فیلتر کالمن گسترش یافته، بصورت آنلاین شناسایی شد. تغییرات در این ضرایب برای تشخیص رخداد های ناگهانی تجربه شده بوسیله سازه بکار برده شده است.

(Nair et al. ۲۰۰۶) از سری های زمانی $ARMA$ برای مدل سازی سیگنال ارتعاشی از سازه های معیار پایش سلامت سازه تجربی انجمن مهندسی عمران آمریکا $ASCE$ استفاده کردند. این محققان یک ویژگی حساس به

آسیب را برای تمایز بین حالت های آسیب دیده و آسیب ندیده بر پایه سه ضریب اول AR معرفی کردند، که میانگین آماری این ویژگی برای سازه های آسیب دیده و آسیب ندیده متفاوت بودند. آزمون t برای تعیین اینکه سازه آسیب دیده است، بکار رفته است. موقعیت آسیب با معرفی مجموعه ای دیگر از ویژگی ها که با افزایش از مقدار پایه هنگامی که آسیب رخ داده نزدیک به موقعیت سنسور می باشد، بدست آمده است. (Gul et al. ۲۰۰۷) از ضرایب بدست آمده از تیر فولادی آزمایشگاهی برای دسته بندی شرایط متغیر تکیه گاهی با استفاده از تکنیک الگوریتم خوشه بندی استفاده کرد.

۴.۱.۲ تاثیرات محیطی و شرایط عملیاتی

یکی از مساله ساز ترین عوامل در انجام پایش سلامت سازه، تاثیر تغییرات شرایط محیطی و عملکردی می باشد. محققان بسیار کمی با موفقیت پیامدهای این تاثیرات را روی روش شناسی پایش سلامت سازه پیشنهادی، اعمال کرده اند.

انجام این قبیل تحقیقات مستلزم پایش دراز مدت سازه ساخته شده می باشد. تاثیرات محیطی مثل درجه حرارت، باد، رطوبت و غیره سبب ایجاد تفاوت هایی در پاسخ سازه می شود. (Sohn et al. ۱۹۹۹) نشان داد که تغییرات بوجود آمده در پارامترهای مودال ناشی از عوامل محیطی می تواند بزرگ تر از تغییرات بوجود آمده بوسیله آسیب سازه ای است. نویسندگان این تحقیق یک رویکرد فیلتر سازگار که آسیب از تغییر فرکانس های طبیعی گرفته شده ارائه دادند. رویکرد ارائه شده تغییر در فرکانس های طبیعی را با تغییر در درجه حرارت درهم آمیختند.

(Peeters et al. ۲۰۰۱) مدل ورودی خودکار برون زاد (ARX) را برای ارتباط فرکانس طبیعی با درجه حرارت بکار برد و خطای تخمین را برای تشخیص آسیب مورد استفاده قرار داد.

(Farrar et al. ۲۰۰۰) تغییر در فرکانس های طبیعی پل آلاموسا کنیون در یک بازه ۲۴ ساعته اندازه گیری کرد. تغییرات به طور عمده به دلیل تغییرات در درجه حرارت در نظر گرفته شد. یک تغییر ۵ درصدی در فرکانس مود اول در این بازه زمانی مشاهده شد. شرایط عملیاتی هم می تواند تاثیر روی پاسخ سازه داشته باشد. در تحقیق مشابهی، آزمایشات برای ارزیابی تغییرات فرکانس طبیعی که بوسیله وزن وسایط نقلیه ایجاد شده، انجام گرفت. چهار ماشین روی پل پارک شده بود، که به مجموع ۷۰۳ کیلونیوتن وزن دهانه بتنی مقدار ۹۹ کیلونیوتن

اضافه می‌کرد. نتایج بدست آمده با تئوری سازگاری نداشت و نویسندگان نتیجه گرفتند که بعضی اندرکنش‌های پیچیده با تعلیق خودرو باید رخ داده باشد.

(Kullaa ۲۰۰۲) از تحلیل عوامل برای تشخیص آسیب در سازه‌هایی از قبیل خرپای چوبی و جرثقیل تحت شرایط مختلف درجه حرارت، رطوبت، بارگذاری و پیکربندی استفاده کرد. تحلیل عوامل یک تکنیک آماری است که ویژگی قابلیت تغییر بین مجموعه بزرگ از متغیرهای رندوم مشاهده شده و مجموعه کوچکتر از متغیرهای مشاهده نشده را مورد استفاده قرار می‌دهد.

این نویسنده بعدها با استفاده از کاربرد مفهوم داده‌های از دست رفته برای رسیدن به تفکیک مشخصات نتایج ناشی از آسیبهای ایجاد شده بوسیله محیط عملیاتی را تغییر داد. (Kullaa ۲۰۰۵) (Sohn, ۲۰۰۷) تحقیقات روی تاثیرات تغییر شرایط محیطی و عملیاتی را در سازه‌های واقعی مرور کرد. تکنیک‌های نرمال سازی داده‌ها بعنوان یک رویکرد مؤثر برای از بین بردن سهم تغییرات محیطی و عملیاتی معرفی شدند.

۲.۲ دسته‌بندی دیگر از تحقیقات نظری

تقسیم‌بندی در تحقیقات نظری را به نوع دیگری غیر از آنچه در بالا ذکر شد هم می‌توان برشمرد که روش‌های موجود را برای انجام شناسایی پارامترهای دینامیکی سیستم‌ها برپایه پاسخ آنها به ارتعاش محیطی می‌توان به دو دسته روش‌های حوزه زمان یا حوزه فرکانس تقسیم کرد. روش‌های شناسایی حوزه فرکانس می‌توانند پارامتری یا غیرپارامتری باشند. روش‌های شناسایی حوزه فرکانس غیرپارامتری، ساده‌تر هستند و بنابراین زودتر مورد استفاده قرار گرفتند (MacLamore et al. ۱۹۷۱).

در میان این روش‌ها، روش انتخاب پیک معروف‌ترین روش می‌باشد و هنوز هم بطور گسترده‌ای در تست دینامیکی برای سازه‌های مهندسی عمران کاربرد دارد. استفاده از این روش برای کنترل اولیه کیفیت داده‌های جمع آوری شده و اولین نگاه برای گرفتن مشخصات دینامیکی سیستم کافی است.

روش انتخاب پیک، روشی بسیار ساده و سریع است که فرکانس‌های تشدید را بوسیله انتخاب پیک‌ها از طیف خروجی‌های اندازه‌گیری شده تخمین می‌زند. شکل مودها از تحلیل یک ردیف یا ستون ماتریس طیفی استخراج می‌شود، همانطور که می‌توان نشان داد، تحت شرایط میرایی اندک و مودهای کاملاً جدا از هم، یک ردیف یا ستون

تنها از ماتریس طیفی، در نزدیکی فرکانس طبیعی ارزیابی شده، می تواند به عنوان برآوردی از شکل مودی مرتبط با آن فرکانس در نظر گرفته شود (Bendat and Piersol, ۱۹۸۰).

نسبت های میرایی مودال را می توان به طور مستقیم از طیف با استفاده از روش پهنای باند نیم توان تخمین زد (Bendat and Piersol, ۱۹۸۰). البته این شیوه بسیار دقیق نیست. (Felber, ۱۹۹۳) به چندین جنبه عملی در ارتباط با پیاده سازی این روش در زمینه تست دینامیکی پل اشاره کرده است.

تفکیک حوزه فرکانس^۱ (FDD) روش کمی پیچیده تر از روش انتخاب پیک در میان روش های حوزه فرکانس غیرپارامتری می باشد. از سوی دیگر، شناسایی در حوزه فرکانس می تواند براساس نگاشت یک مدل به طیف خروجی باشد که پارامترهای مودال آن در فاز دوم استخراج شده است. نگاشت داده های تجربی به یک مدل، مساله ی بهینه یابی برپایه تابع هزینه می باشد که از طریق روش حداقل مربعات خطی یا برآورد احتمال حداکثر قابل حل است (Guillaume et al, ۱۹۹۹).

یک روش پیشرفته تر از انتخاب پیک، تابع مشخصه مود مختلط ($CMIF$) است. این روش بر اساس تجزیه مقدار تکین از ماتریسی است که یا شامل پاسخ های طیف توان (در حالت داده های خروجی تنها) یا توابع FRF (در حالت داده های ورودی - خروجی) می باشد. این روش از ابتدا بعنوان ابزاری برای شمارش تعداد مودها در مجموعه ای از اندازه گیری ها در نظر گرفته می شد. بعنوان یک دستاورد جانبی مفید، این تکنیک همچنین قادر به شناسایی پارامترهای مودال برای مجموعه های اندازه گیری می باشد. (Shih et al, ۱۹۸۸)، از $CMIF$ برای شناسایی پارامترهای مودال از توابع FRF استفاده کرده بود. بعد از گذشت مدتی این روش مجددا مورد توجه قرار گرفت و این بار بعنوان جایگزینی برای تکنیک انتخاب پیک برای سازه های مهندسی عمران مورد استفاده قرار گرفت (Brincker et al, ۲۰۰۰).

تمامی ترکیبات محتمل از این مدل ها و شیوه های نگاشت در (Cauberghe, ۲۰۰۴) همراه با دسته ای از روش ها (الگوریتم های تحقق) که از مدهای حوزه فرکانس فضای حالت استفاده می کند، مورد بررسی قرار گرفته است تا روش های شناسایی زیرفضای تصادفی حوزه فرکانس را طراحی کند. علاوه بر این، در (Devriendt and Guillaume, ۲۰۰۷)، یک الگوریتم شناسایی حوزه فرکانس جایگزین بر پایه مفهوم توابع انتقال معرفی کرده است. باید گفت که بیشتر روش های پارامتری حوزه فرکانس برای تحلیل مودال بهره

¹Frequency Domain Decomposition

برداری از تبدیل الگوریتم‌هایی که در گذشته برای تحلیل مودال ورودی خروجی توسعه یافته بودند، استفاده شده است.

یکی از روش‌های پارامتری حوزه فرکانس، روش حوزه فرکانس حداقل مربعات مختلط^۱ ($p - LSCF$) است. در میان روش‌های این دسته، این روش بیشترین کاربرد را در کارهای مهندسی عمران دارد، که علتش عملکرد خوب آن می‌باشد. تشابه بین عبارت‌های ریاضی تابع انتقال و طیف خروجی سیستم تحریک شده با نویز سفید، در حوزه زمان، تشابه بین همبستگی خروجی‌های سیستم تحریک شده با نویز سفید و پاسخ‌های ضربه متناسب با ورودی بود. این مساله در اوایل عمر تحلیل مودال بهره‌برداری برپایه روش‌های حوزه زمانی برای سازگار کردن تکنیک‌های موجود برای تحلیل پاسخ‌های ضربه رکورد شده در زمینه تست ارتعاش اجباری مورد تحقیق قرار گرفته بود. برای مثال روش معروف ERA^۲ (Juang and Pappa/۱۹۸۵) به یک روش تحلیل مودال بهره‌برداری، $NE\text{XT}$ ، بوسیله (James et al. ۱۹۹۲) تبدیل شده بود.

امروزه، روش‌های حوزه زمانی در تحلیل مودال بهره‌برداری، به طور جامعی توسط (Peeters. ۲۰۰۰) مطالعه شد، که مبتنی بر دو نوع مدل هستند: مدل‌های فضای حالت تصادفی زمان گسسته و $ARMA$ ^۳ یا تنها مدل‌های AR . فرمول‌بندی‌هایی که از مدل‌های فضای حالت استفاده می‌کنند، روش‌های شناسایی زیرفضای تصادفی طرح شده (SSI)، تشکیل شده از رویکردی پارامتری که معمولاً برای کاربردهای مهندسی عمران بکار گرفته می‌شود. مدل را می‌توان یا از طریق همبستگی (یا کوواریانس‌ها) خروجی‌ها: شناسایی زیرفضای تصادفی گرفته شده از کوواریانس ($SSI - COV$)؛ یا بطور مستقیم از سری‌های زمانی جمع‌آوری شده در سازه تست شده بوسیله استفاده از پیش‌بینی‌ها: شناسایی زیرفضای تصادفی گرفته شده از داده‌ها ($SSI - DATA$)؛ همانطور که توسط (Peeters, ۲۰۰۰) گزارش شده است، این دو روش بسیار به هم نزدیک هستند. $SSI - COV$ دارای امتیاز سرعت بیشتر و برپایه اصول ساده‌تر، در حالیکه $SSI - DATA$ اجازه برای بدست آوردن برخی از اطلاعات بیشتر با یک پردازش پسین مناسب را می‌دهد. بعنوان مثال، امکان تجزیه پاسخ اندازه‌گیری شده در سهم مودهای مختلف.

روش‌های برپایه مدل‌های $ARMA$ یا AR ، اغلب بوسیله جامعه مهندسان عمران استفاده نمی‌شود. (Andersen. ۱۹۹۷)

¹Least Squares Complex Frequency domain merhod

²Eigensystem Realization Algorithm

³Auto-Regressive Moving Average

مدل های $ARMA$ می تواند بعنوان مثال از همبستگی های خروجی با استفاده از روش متغیر ابزار (IV) شناسایی شود (Peeters, ۲۰۰۰). اگر همبستگی های خروجی بوسیله پاسخ های ضربه جایگزین شود، معادلات این روش با روش استاندارد تحلیل مودال تجربی مطابقت خواهد داشت: روش حوزه زمانی چند مرجعی (PTD). همچنین تخمین مدل های $ARMA$ یا AR بطور مستقیم از سیگنال های زمانی خروجی با استفاده از روش حداقل مربعات ممکن است. با این وجود، این رویکردها هنوز به سطحی از اطمینان کافی برای کارهای عملی نرسیده اند.

تمامی روش های شناسایی مودال خروجی تنها فرض می کنند که تحریک محیطی، شناخته شده برای ایجاد ورودی های متعدد با محتوای فرکانس باند گسترده، یک نویز سفید با میانگین صفر است. همانطور که این فرض خیلی واقع بینانه نیست، تحریک واقعی را می توان بصورت خروجی از یک فیلتر خطی تحت نویز سفید در نظر گرفت و این بدان معناست که پارامترهای مودال شناسایی شده نه تنها با سازه مورد تست، بلکه با سیستم مجازی که موجب تحریک واقعی می شود هم مرتبط است.

روش های حوزه زمانی شامل روش شاخص نمایی مختلط حداقل مربعات ($LSCF$) (Hermans, Vander Auweraer and Guillaume, ۱۹۹۸) و بازه وسیعی از تکنیک های شناسایی زیرفضای تصادفی (SSI) (Van Overschee and DeMoor, ۱۹۹۶) و (Ljung, ۱۹۹۹; Peeters and De Roeck, ۱۹۹۹) می باشد. مرور همراه با جزئیات روش های شناسایی سیستم خروجی تنها را می توان در (Peeters and De Roeck, ۲۰۰۱b) و (Peeters, ۲۰۰۰) و (Hermans and Van der Auweraer, ۱۹۹۹) یافت. روش حوزه فرکانسی شاخص احتمال حداکثر (ML) توسط (Schoukens and Pintelon, ۱۹۹۱) و (Pintelon et al., ۱۹۹۴) و (Guillaume, ۱۹۹۲; Guillaume et al., ۱۹۹۸) توسعه یافته است. روش مورد نظر یک روش مبتنی بر بهینه سازی است که پارامترهای مودال را با به حداقل رساندن تابع هزینه درجه دوم که با توجه به عدم اطمینان در داده های تجربی وزن دار شده، تخمین زد. روش ML به معادلات غیر خطی در پارامترها منجر می شود و بنابراین نیاز به یک روش بهینه سازی دارد. طی سالیان گذشته، توجهات به بهینه سازی روش ML معطوف شده است (Guillaume et al., ۱۹۹۸; Verboven, ۲۰۰۲). این روش برای حفظ حافظه و ملزومات محاسباتی

تا حداقل مقدار ممکن سازگار شده است. نشان داده شد که شناسایی ML یک روش پایدار برای شناسایی صحیح تخمین‌های پارامتر مودال از مجموعه داده‌های بزرگ و همراه با نویز است (Guillaumet et al., ۱۹۹۸; Vanlanduit et al., ۱۹۹۸).

علاوه بر این، شاخص ML قادر به ایجاد فواصل اطمینان روی پارامترهای مودال تخمین زده، می باشد. (Guillaume et al., ۱۹۹۹) این روش را با استفاده از طیف توان متقابل برای شناسایی پارامترهای مودال از داده‌های خروجی تنها توسعه داده بود [۱].

۳.۲ تحقیقات تجربی

۱.۳.۲ نمونه شماره یک: تشریح یک تست ارتعاش محیطی در مرکز شهر گرنوبل فرانسه

برای تشریح استفاده از ارتعاش محیطی برای ارزیابی سختی ساختمان، آزمایشی در ساختمانی مسکونی در مرکز شهر گرنوبل (فرانسه) صورت پذیرفت. ارتعاش محیطی و ارتعاشات بدست آمده در این سازه ناشی از تخریب پلی در نزدیکی آن، استخراج پارامترهای مودال ساختمان را به کمک روش تفکیک حوزه فرکانس مهیا ساخت. پارامترهای مودال بدست آمده از هر دو آزمایش مقایسه شد و از آنها برای ساخت مدل مودالی که بتوان بوسیله رکوردهای ریزش پل، اعتبار سنجی شده باشد، بکار گرفته شد.

ساختمان مورد تست یک ساختمان ۹ طبقه بتن مسلح همراه با دیوار برشی بوده است که در سال ۱۹۳۹ میلادی ساخته شده بود. تصویری از ساختمان در شکل ۱.۲ نمایش داده شده است. این ساختمان یکی از مهم ترین ساختمان ها در محدوده شهر گرنوبل به حساب می آمد. بتن ساختمان به خوبی مسلح نشده بود و در طراحی آن از آئین نامه لرزه ای ساختمان استفاده نشده بود. این سازه در داخل بلوک های شهری قرار گرفته بود و با دو دیوار با ساختمان های اطراف در تماس بود که تنها با درزهایی پر شده از مصالح ساختمانی، از هم جدا شده بودند. بر طبق معیار لرزه ای اروپا این ساختمان در دسته ساختمان های از نوع "ساختمان قاب بتن مسلح" قرار می گرفت که یکی از آسیب پذیرترین دسته ها در سازه های بتن مسلح است. در این آزمایش از سیستم جمع آوری داده ۲ Cityshark که یک ایستگاه لرزه شناسی کاربر پسند است و به آزمایش های ارتعاشات محیطی اختصاص

دارد، استفاده شد. این دستگاه امکان ثبت همزمان از ۱۸ کانال را مهیا می‌کند. برای آزمایش، ارتعاشات محیطی برای مدت ۱۵ دقیقه یا ۹۰۰ ثانیه رکورد شده بود، با نرخ نمونه برداری ۲۰۰ هرتز که با توجه به معیار برینکر^۱ (هزار برابر پریود مود اول) کافی به نظر می‌رسید. سنسورها در راستای طولی ساختمان تنظیم شده بودند که جانمایی آنها در شکل ۲.۲ نشان داده شده است. دو سری از رکوردها برای ثبت کردن یک نقطه در هر کف در نظر گرفته شده بودند. سنسورها در بالای ساختمان (کف های هشتم و نهم) بعنوان مرجع نگه داشته شده بودند بدین خاطر که این سنسورها بزرگترین دامنه ها را در هنگامی که بقیه سنسورها جابجا می شدند، دارا بودند.

با استفاده از روش FDD دو مود اول خمشی در راستای طولی با فرکانس های ۷۳.۲ و ۷۱.۷ هرتز و در راستای عرضی با فرکانس ۲۸.۲ و ۶۹.۸ هرتز استخراج شدند. علاوه بر این، علیرغم تراز پائین انرژی، احتمال شناسایی فرکانس مود سوم خمشی در هر دو راستا وجود داشت اما نه برای شکل مودها، که ممکن است این به همان دلیلی باشد که برای دومین مود عرضی شکل مود عجیبی را نمایش داد. برای راستای طولی، نسبت بین فرکانس های اصلی و هارمونیک به ترتیب از نظر تئوری ۱، ۳ و ۵ برای مدل تیر برشی فرض شده است. در راستای عرضی، این نسبت ها ۱، ۸.۳ و ۸.۶ بودند.

¹Brincker criterion



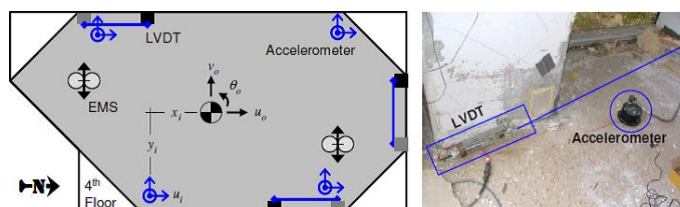
شکل ۱.۲: تصویر ساختمان واقع در شهر گرنوبل فرانسه تحت تست ارتعاش محیطی

این نسبت، مشخصه‌ای از مدل است و به لحاظ اینکه کدام مدل تناسب بیشتری با ساختمان دارد، حائز اهمیت است. این ساختمان در راستای عرضی رفتاری بیشتر خمشی نسبت به راستای طولی داشت. این مساله را همچنین در شکل موده‌های تجربی جایی که شکل مود اول در راستای عرضی شبیه یک تیر طره است، می‌توان مشاهده کرد. با این وجود، مدل تیر برشی را با دانستن اینکه این مدل تنها راستای طولی را ارائه می‌دهد، برای دو راستای ساختمان بکار برده شد. از آنجایی که سختی با مربع فرکانس متناسب است، اولین فرکانسها بیانگر این بوده است که راستای طولی ۴۰ درصد از راستای عرضی سخت‌تر است.

روش تجزیه حوزه فرکانس، دیگر مودها که رفتار پیچشی داشتند را نمایان ساخت. موقعیت نامنظم دیوارهای برشی و تیرها، بی‌شک این نوع از حرکت پیچشی را موجب شد که می‌تواند تاییدی بر استفاده از چندین نقطه رکورد در یک کف مشخص باشد.

شبیه سازی رفتار ساختمان در مقابل زلزله و محاسبه سختی، برای اعتبار سنجی روش شناسی فوق بوده است. در ابتدا حرکت ساختمان هنگامی که تحت ارتعاش اجباری ناشی از تخریب پل قرار گرفت، بوسیله مدل مودال ارتعاش محیطی به خوبی پیش‌بینی شد. سپس، شکل موده‌های تجربی تعریف شده و حرکت ساختمان و رفتارش تحت زلزله‌های مختلف شبیه‌سازی شدند و در نهایت پارامترهای مودال تجربی از ارتعاشات محیطی استخراج شد. در این تحقیق تنها دو مود اول در هر راستا، مورد مطالعه قرار گرفتند. نسبت میرایی متناسب با استفاده از

روش کاهش اتفاقی^۱ بصورت ۴ درصد برای تمامی مودها باستثای مود اول طولی (۲ درصد) تخمین زده شد. تغییرمکانهای محاسبه شده و رکورد شده در بالای ساختمان تطابق خوبی بین داده و مدل از خود نشان دادند. همچنین محاسبه تغییرمکان نسبی میان طبقه ای بوسیله اختلاف بین تاریخچه پاسخ تغییرمکانها در کف های متوالی امکان پذیر می ساخت. حداکثر تغییرمکان نسبی میان طبقه ای در این روش با استفاده از مدل مودال و رکوردهای ناشی از ریزش پل محاسبه شده است. مدل، اندازه ی حداکثر تغییرمکان نسبی میان طبقه ای را فقط در راستای طولی بدست آورد، تغییرمکان نسبی میان طبقه ای در طبقات بالاتر و علی الخصوص طبقه چهارم دست پایین تخمین زده شده است.



شکل ۲.۲: تصویر جانمایی سنسورها در ساختمان واقع در شهر گرنوبل فرانسه تحت تست ارتعاش محیطی

با این وجود، این مقایسه ها ارتباط پارامترهای مودال استخراج شده ساختمان را از ارتعاشات محیطی تأیید می کند. بنابراین، در ابتدا پارامترهای مودال بدست می آید و سپس ارزیابی توان مقاومت ساختمان در مقابل بار لرزه ای متناسب با هر سناریوی حرکت پیشین زمین عملی خواهد بود. اگر فرض شود که حداکثر تغییرمکان نسبی میان طبقه ای بدست آمده بوسیله دیوارهای برشی بتنی کنترل شونده با برش بدون هیچ خسارتی مقدار 4×10^{-3} است، تعیین برای حرکت زمین میسر می شود که آیا ساختمان به این حد رسیده است یا خیر. همانطور که انتظار می رفت، در حالت تجربه ریزش پل حداکثر تغییرمکان نسبی میان طبقه ای بسیار پائین باقی می ماند 6×10^{-6} . این اعداد کاملاً مطابق با راستاهای طولی و عرضی هستند.

¹Random Decrement Method

۲.۳.۲ نمونه شماره دو: تشریح یک تست ارتعاش محیطی روی اتحادیه بانک‌ها در شهر

لس آنجلس

(Trifunac) در سال ۱۹۷۰ میلادی آزمایشی را روی ساختمان اتحادیه بانک‌ها در شهر لس آنجلس انجام داد. در این تحقیق، ساختمان اتحادیه بانک‌ها که تصویر آن در شکل ۳.۲ نشان داده شده است، دارای پلان مستطیلی و ۳۹ طبقه با ارتفاع ۴۹۶ فوت تحت تست ارتعاش محیطی قرار گرفته بود. رفتار دینامیکی ساختمان هم بوسیله محاسبات تحلیلی پاسخ برای زلزله السنترو، ۱۸ می ۱۹۴۰، مولفه شمال- جنوب زمین بررسی شد. در ابتدا هر چهار لرزه سنج در راستای یکسان تنظیم شد و روی کف ۳۹ ام برای کالیبره کردن دینامیکی خروجی‌های همزمان هر چهار سنسور قرار گرفت. بعد از اینکه کالیبراسیون انجام شد، دو لرزه سنج (شماره‌های ۳ و ۴) روی کف ۳۹ ام در راستای شمال- جنوب و شرق- غرب باقی ماندند و دو تای دیگر (شماره‌های ۱ و ۲) به کف ۳۶ ام با جهت شمال- جنوب و شرق- غرب آورده شدند، پنج دقیقه رکوردگیری صورت گرفت و بعنوان رکورد شماره ۲ در نظر گرفته شد، بطور مشابه رکوردهای ۳ تا ۱۵ صورت گرفت و لرزه‌سنج‌های شماره ۱ و ۲ بصورت پشت سر هم به کف‌های پائین‌تر با هر رکورد دارای ۵ دقیقه یا ۳۰۰ ثانیه رکوردگیری از ارتعاش منتقل شدند. رکوردهای ۱۶ و ۱۷ برای تعیین ارتعاشات پیچشی صورت گرفت. در زمان رکورد ۱۶ ام تمامی لرزه‌سنج‌ها در کنج جنوب شرقی، دو تا روی کف ۳۹ ام و دو تا روی کف ۲۱ ام و حین رکورد ۱۷ ام هر چهار لرزه‌سنج روی کف ۳۹ ام در کنج‌های شمال شرقی و جنوب غربی برج قرار داشتند. کمیت رکورد شده، سرعت نسبی جرم لرزه سنج بود که دارای فرکانس طبیعی نزدیک به ۱ سیکل بر ثانیه بود. طیف دامنه فوریه با کمک از الگوریتم کولی- توکی (Cooley-Tukey) محاسبه شده بود. هفت فرکانس اول و پنج شکل مود اول ارتعاشات انتقالی و پیچشی تعیین شده بودند. این فرکانس‌ها و شکل مودها بر پایه ارتعاشات دامنه کوتاه بودند و بنابراین رفتار سازه‌ای در دامنه پاسخ خطی قرار داشت.



شکل ۳.۲: ساختمان اتحادیه بانک‌ها در شهر لس‌آنجلس

۳.۳.۲ نمونه شماره سه: تشریح یک تست ارتعاش محیطی در شهر لیسبون

Baptista و همکاران تحقیق تجربی و تحلیلی روی ساختمان اداری ۱۶ طبقه ای که ۱۲ طبقه آن روی زمین قرار داشت، انجام دادند. تصویر این ساختمان در شکل ۴.۲ نشان داده شده است و ساختمان روی بستر آبرفتی و نزدیک رودخانه تاگوس در شهر لیسبون قرار داشت. برای بدست آوردن پارامترهای دینامیکی، تست ارتعاش محیطی صورت گرفته بود. برای مطالعه تحلیلی، مدل اجزای محدود ساختمان با استفاده از نرم افزار SAP ۲۰۰۰ ایجاد شده بود.



شکل ۴.۲: ساختمان تست شده در شهر لیسبون

دو تکنیک، انتخاب پیک (P.P) برپایه تجزیه حوزه ی فرکانسی (F.D.D) و شناسایی زیرفضای تصادفی (S.S.I) برپایه روش حوزه زمانی (T.M.D) برای استخراج مشخصه های دینامیکی بکار برده شده است. فرکانس های طبیعی شناسایی شده بوسیله این دو تکنیک تطابق خوبی با یکدیگر داشتند.

سینگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۶ میلادی یک تست ارتعاش محیطی روی ساختمان مسکونی نه (۹) طبقه ای در شهر احمد آباد گوجارات، برای تعیین پارامترهای مودال پس از زلزله سال ۲۰۰۱ میلادی بوج انجام دادند. پارامترهای مودال با استفاده از تکنیک تجزیه حوزه ی فرکانسی تعیین شده بودند که یک تکنیک شناسایی مودال صرفاً با استفاده از خروجی هاست. فرکانس و شکل مودها در پنج مود اول ساختمان از داده ها و در مقایسه با تحلیل مودال اجزای محدود استخراج شده است. مدل اجزای محدود شامل اثرات میانقاب ها، کف ها و دال ها در مدل سازی ساختمان است. مشاهده شد که الگوهای پنج مود اول بدست آمده از تست ارتعاش محیطی و مدل

¹Singh

اجزای محدود تطابق خوبی داشتند.

۴.۲ مروری بر برخی تحقیقات انجام شده در زمینه یادگیری ماشین در مهندسی سازه

روش‌های شناسایی مودال به روش خروجی تنها برای استفاده در زمینه‌های مهندسی سازه‌های در مقیاس بزرگ اجرایی هستند. اخیراً، تحلیل مؤلفه‌های مستقل (ICA) که یکی از محبوب‌ترین تکنیک‌های جداسازی منبع کور (BSS) است برای شناسایی مودال به روش خروجی تنها برای جداسازی مستقیم پاسخ‌های مودال و بدست آوردن مشخصات دینامیکی از پاسخ‌های ارتعاشی استفاده شده است. با این حال، این روش فقط برای سازه‌های بدون میرا یا میرا کم دقیق است. برای بهبود عملکرد ICA برای سازه‌های با میرایی بالا، این مقاله یک روش مبتنی بر ICA توسعه یافته به نام ICA-F را ارائه می‌کند که یک مدل BSS را در حوزه فرکانس ایجاد می‌کند. ابتدا، ایده اصلی BSS و ICA به کار رفته در شناسایی مودال به تفصیل معرفی شده است. پاسخ‌های ارتعاش آزاد و توابع همبستگی پاسخ‌های محیطی را می‌توان تنها با نگاشت پاسخ‌های تاریخچه زمانی به حوزه فرکانس از طریق تبدیل فوریه سریع (FFT) به حوزه فرکانس انجام داد. سپس، یک روش مبتنی بر ICA در حوزه فرکانس به نام ICA-F برای استخراج دقیق پاسخ‌های مودال برای سازه‌های با میرایی کم و زیاد پیشنهاد شده است [۵۳].

شناسایی پارامتر مودال ساختاری تحت تحریک محیطی دارای ارزش مهندسی قوی و اهمیت نظری است. به عنوان محبوب‌ترین ابزار برای حل مسائل جداسازی منبع کور (BSS)، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های مستقل (ICA) قادر است به طور مستقیم پارامترهای مودال حوزه زمان، از جمله فرکانس‌ها، نسبت‌های میرایی و اشکال مودال را استخراج کند. با این حال، ICA دارای یک نقص مهلك است که در شناسایی سازه‌هایی با میرایی بالاتر ناتوان است. برای غلبه بر نقص فوق، مقاله روش جدیدی به نام «ICA+IDT» پیشنهاد می‌کند. در مرحله اول، پاسخ ارتعاش آزاد یک سازه از خروجی‌های سازه تحت تحریک محیطی به دست می‌آید. انتقال معکوس میرایی (IDT) برای تبدیل سیگنال با میرایی بالا به سیگنال پاسخ میرایی کم بدون تغییر فرکانس‌ها و شکل حالت استفاده می‌شود. سپس پارامترهای مودال ساختاری از سیگنال پاسخ میرایی کم توسط ICA استخراج می‌شوند.

در نهایت، نسبت‌های میرایی شناسایی شده برای از بین بردن تأثیر IDT تنظیم می‌شوند. برای تأیید اثربخشی و کاربرد IDT+ICA پیشنهادی در اینجا، دو شبیه‌سازی عددی - مدل چشمه جرم و تیر بتنی ساده - و یک مدل آزمایشی از قاب فولادی سه طبقه ساخته شده‌اند و نتایج تحلیل نشان می‌دهد که روش ارائه شده می‌تواند شناسایی کند. سازه‌هایی با میرایی بالاتر به طور موثر [۵۴].

در این تحقیق روش جدیدی برای شناسایی پارامترهای دینامیکی سازه‌ها با دقت بالاتر نسبت به روش‌های فعلی پیشنهاد شده است. ابتدا، نمایش تبدیل موجک پاسخ‌های سیستم از رکوردهای اندازه‌گیری شده استخراج می‌شود و سپس از تحلیل مؤلفه‌های مستقل برای دستیابی به ویژگی‌های مودال استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی یک سیستم چند درجه آزادی نشان می‌دهد که این روش قادر به شناسایی دقیق اطلاعات مودال سازه‌های با میرایی کم و زیاد است. نشان داده شده است که تبدیل موجک پیوسته، با توجه به دقت زمان-فرکانس تطبیقی آن، در مقایسه با تبدیل فوریه کوتاه مدت (STFT) برای گنجاندن در تحلیل مؤلفه‌های مستقل کارآمدتر است. ضمن اینکه روش تبدیل فوریه کوتاه مدت قادر به تعیین دقیق پاسخ مودال نیست، به خصوص در فرکانس‌های بالاتر، در حالی که روش پیشنهادی می‌تواند سیستم را با دقت مشخص شناسایی کند. کارایی روش پیشنهادی تحت نویزهای اضافی بررسی شده است. نتایج نشان داد که برای سیستم با میرایی زیاد و کم، روش پیشنهادی قادر است پارامترهای مودال را به ویژه در فرکانس‌های بالاتر ارتعاش به همراه مقادیر معیار اطمینان مودال با دقت رضایت‌بخش ثبت کند که نشان‌دهنده استحکام روش در مقایسه با روش‌های دیگر است [۵۵].

با توجه به تقسیم‌بندی صورت گرفته در مورد روش‌های یادگیری عمیق که بصورت نظارت شده^۱ و غیر نظارت شده^۲ بود، که در این تحقیق با توجه به شرایط حاکم بر تست‌های پایش سلامت و ارتعاش محیطی از روش غیر نظارت شده استفاده شده است. در روش یادگیری عمیق نظارت نشده نیز دسته‌بندی‌های مختلفی وجود دارد که در این تحقیق از روش تفکیک منبع کور^۳ (BSS) استفاده شده است.

استفاده از الگوریتم رمزگذاری خودکار^۴ هم از جمله روشهای یادگیری ماشین غیرنظارت شده است که امروزه مورد استقبال محققین قرار گرفته است. در عصر داده‌های بزرگ و حجیم، نیاز به استفاده از شیوه‌های یادگیری

¹Supervised

²Un-Supervised

³Blind Source Separation

⁴Autoencoder

ماشین همزمان با افزایش تعداد داده‌ها در اثر پیشرفت چشمگیر فناوری‌های اطلاعات، به سرعت در حال رشد می‌باشد. بنابراین، یادگیری ماشین فن آوری است که روش‌های سنتی تحلیل داده را با الگوریتم‌های دشوار برای پردازش حجم‌های زیاد داده ترکیب کرده است. [۵۶].

بطور کلی، این روش‌های تحلیل جهت مشخص کردن ارتباط بین نمونه‌ها، بصورت نقاط داده‌ای، در داده‌های اخذ شده یا تخمین مشخصات خاص از داده‌های ناشناخته مربوط به داده‌های اخذ شده هدف گذاری شده است (Baladrametal., ۲۰۲۰). بر اساس نظر (Baladrametal., ۲۰۲۰)، یادگیری ماشین با نظارت در تلاش است برای تعیین ارتباط یا یافتن تابعی بر پایه داده‌های آموزش، برچسب زده شده و از این تابع برای نگاشت داده‌های جدید غیربرچسب زده استفاده می‌کند. در این روش‌ها از جمله درخت تصمیم‌گیری، پرسپترون چند لایه‌ای، رگرسیون لجستیک و ماشین بردار پشتیبانی (SVM) یک مدل از دیتاست آموزش توسعه یافته است که مقادیر ورودی و خروجی قبلاً معلوم بوده است. برای داشتن یک عملکرد مناسب بطور مثال تولید یک مدل خوب، روش‌های یادگیری نظارت شده نیازمند یک تعداد قابل قبول از رکوردهای برچسب زده شده می‌باشد. گفتن این عبارت اهمیت دارد که این روش‌ها الگوهای مخفی در داده‌های برچسب زده را کشف می‌کند.

بطور کلی، روش یادگیری نظارت شده تولید یک تخمین گر می‌کند که داده‌های ورودی را پذیرش می‌کند و نتیجه تخمینی در مقابل داده‌های ورودی را می‌دهد. در این فرآیند، دو فاز اصلی وجود دارد: فازهای یادگیری و تخمین. در فاز یادگیری، سیستم، ورودی‌ها و بردارهای هدف را می‌خواند و قوانین را بهبود می‌بخشد. این پروسه تا آنجا تکرار می‌شود که کیفیت قوانین به اندازه‌ی کافی خوب باشد تا حد امکان عملکرد خوبی از تخمین گرفته شود. در نهایت، در فاز تخمین، مشخصات یا ویژگی‌های داده‌های جدید بوسیله سیستم تخمین زده می‌شود (Baladrametal., ۲۰۲۰). تکنیک‌های یادگیری نظارت شده برای استفاده در دو نوع متفاوت از فرم بسته به مساله‌ای که باید حل شود، بکار می‌رود: دسته‌بندی^۱ و رگرسیون^۲.

از سوی دیگر، یادگیری نظارت نشده شامل شناسایی الگوهایی بر ارتباط بین نقاط داده‌ای با خودشان است. هیچ متغیر خروجی برای تخمین زدن وجود ندارد. یعنی، قبلاً فقط ورودی‌ها معلوم شده بودند. این الگوریتم‌ها برای یادگیری کل توزیع احتمالی که یک مجموعه داده را ایجاد می‌کند، چه به طور صریح یا بطور ضمنی استفاده

¹Classification

²Regression

می‌شد.

خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، خوشه‌بندی $K - Means$ ، رمزگذاری خودکار، تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) از دیگر روش‌های یادگیری نظارت نشده هستند. در این تحقیق، نوع خاصی از تحلیل مؤلفه اصلی یعنی تحلیل مؤلفه مستقل (ICA)^۱ استفاده و پیاده شده است.

۱.۴.۲ روش یادگیری ماشین برای شناسایی مودال سازه‌ای:

اصول روش: بر اساس تئوری دینامیک سازه‌ها، برای یک سیستم سازه‌ای چند درجه آزادی خطی ثابت با زمان، معادله‌ی مشخصه حرکت را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (۱.۲)$$

جایی که M ماتریس جرم، C ماتریس میرایی و K ماتریس سختی، $f(t)$ نیروی خارجی و $x(t)$ پاسخ سیستم و علامت نقطه بالای پارامتر (t) نشان‌دهنده مشتق نسبت به زمان می‌باشد. پاسخ سیستم $x(t) = [x_1, \dots, x_n]^T$ را می‌توان به کمک بسط مودال بصورت زیر نوشت:

$$x(t) = \Phi q(t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i q_i(t) \quad (۲.۲)$$

جایی که Φ ماتریس مودال شامل بردار شکل مودی φ_i و $q(t) = [q_1, \dots, q_n]^T$ پاسخ مودی بعبارتی مختصات مودی می‌باشد. در ارتعاش آزاد که نیروی خارجی صفر است ($f(t) = 0$)، پاسخ مودی ($q_i(t)$) را می‌توان بعنوان سینوسی‌های نمایی کاهشی به فرم زیر بیان کرد:

$$q_i(t) = u_i e^{(-\zeta_i \omega_i t)} \cos(\omega_{di} t + \theta_i), i = 1, \dots, n \quad (۳.۲)$$

جایی که ω_i و ζ_i فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی و $\omega_{di} = \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2}$ هستند.

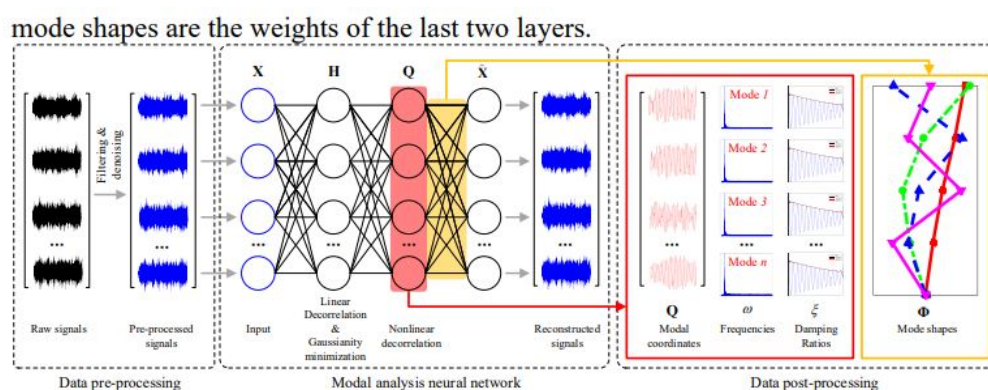
مقادیر u_i و θ_i تحت شرایط آغازین ثابت هستند. در ارتعاش اتفاقی، $q_i(t)$ را می‌توان بصورت تابع پوش

$e_i(t)$ مطابق زیر تخمین زد:

$$q_i(t) \cong e_i(t) e^{(-\zeta_i \omega_i t)} \cos(\omega_{di} t + \theta_i), i = 1, \dots, n \quad (۴.۲)$$

¹Independent Component Analysis

از اینرو، مسأله، چگونگی بدست آوردن پاسخ‌های مودال $q(t)$ و شکل مودی Φ از پاسخ سیستم $x(t)$ می‌باشد. با الهام از BSS و DNN ، مسأله شناسایی مودال یا همان فرمول (۲.۲) به درون شبکه عصبی عمیق و استفاده از قابلیت بهینه‌سازی قدرتمند DNN در حل فرمول (۲.۲) برای جداسازی پاسخ مودال $q(t)$ و شکل مودها Φ از پاسخ سیستم بکار گرفته می‌شود. در طراحی شبکه عصبی، مشخصه مستقل پاسخ‌های مودال بصورت قید برای تابع ضرر بکار رفته است. در شکل زیر روش استفاده شده نمایش داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده، داده‌های پاسخ زمانی خام سازه با روش فیلتر کردن و از بین بردن نویز، پیش پردازش شده است. سپس، داده‌ها به داخل شبکه عصبی برای بدست آوردن پاسخ‌های مودال و شکل مودها داده شده است. بعد از بدست آوردن پاسخ‌های مودی، فرکانس‌ها و نسبت‌های میرایی بوسیله روش قدیمی چگالی طیف توان PSD و روش‌های برازش منحنی بدست می‌آید.



شکل ۵.۲: فلوچارت روش

۲.۴.۲ شناسایی مودال در چارچوب شبکه عصبی عمیق:

اصل استقلال

هدف اصلی در این تحقیق استفاده از شبکه عصبی عمیق طراحی شده جهت جدا کردن پاسخ‌های مودال از پاسخ ارتعاشی سازه می‌باشد. روش استفاده از مشخصه‌های مودال مستقل برای شناسایی پارامترهای مودال سازه‌های با میرایی کم هنگامی معتبر است که فرکانس‌های طبیعی غیرقابل تقسیم به یکدیگر باشند (یعنی، فرکانس‌های

طبیعی نمی توانند نسبت عدد صحیحی از یکدیگر باشند). در حالت ارتعاش آزاد یا ارتعاش اتفاقی سیستم با میرایی کم، ماتریس ترکیبی و پاسخ های مودال سازه بصورت نگاشت یک به یک هستند. از اینرو، پاسخ مودال را می توان بصورت منابع مستقل مجازی مشاهده کرد و به کمک روش های تفکیک کور منبع برای جداسازی آن اقدام کرد. تحت تحریکات محیطی، پاسخ های مودال سیستم با میرایی کم بطور استاتیکی مستقل هستند. معمولاً، دو پارامتر برای اندازه گیری مستقل بودن به نام های غیر گاوسی^۱ و عدم همبستگی^۲ وجود دارد.

غیر-گاوسی

ایده ی حداکثر غیر گاوسی بودن از تئوری حد مرکزی می آید به این معنی که اگر سیگنال برداشت شده ترکیبی خطی از چندین منبع مستقل باشد، آن سیگنال به توزیع گاوسی نزدیکتر از سیگنال های منبع است، یعنی، غیر گاوسی بودن سیگنال منبع قوی تر از سیگنال برداشت شده است. از اینرو، نتایج بهینه جداسازی بوسیله ی به حداکثر رساندن نتایج جداسازی بدست آورده می شود. دو شاخص وجود دارد که می توان به کمک آنها معیار غیر گاوسی بودن را اندازه گیری کرد: کورتوسیس^۳ و آنترپی منفی^۴. با این حال، کورتوسیس به مقادیر ویژه (تکین) حساس است و این بدان معناست که شاخص اندازه گیری مطمئنی برای پارامتر غیر گاوسی نیست.

$$J(s_i) \approx [EG(s_i) - EG(\nu)]^2 \quad (5.2)$$

جایی که E عملگر مورد انتظار است، s_i متغیر خروجی با میانگین صفر و واریانس واحد، ν متغیر رندوم گاوسی با میانگین صفر و واریانس واحد و G یک تابع غیر خطی غیر مربعی می باشد. در عمل، غالباً تابع زیر انتخاب می شود:

$$G_1(s) = \frac{1}{a_1} \log_2 \cosh(a_1 s) \quad (6.2)$$

$$G_2(s) = -\exp\left\{-\frac{s^2}{\gamma}\right\} \quad (7.2)$$

¹Non-Gaussianity

²Uncorrelation

³kurtosis

⁴Negative Entropy

$$G_3(s) = \frac{s^4}{4} \quad (8.2)$$

جایی که $1 \leq a_1 \leq 2$ ، معمولا یک گرفته می شود. G_1 برای سیگنال هایی مناسب است که حضور همزمان سیگنال های زیرگوسی و فوق گوسی باشد. G_2 برای تفکیک سیگنال های ترکیبی فوق گوسی مناسب است و G_3 برای تفکیک سیگنال های ترکیبی زیرگوسی مناسب هستند در جایی که سیگنال های ارتعاش سیگنال های ترکیبی زیرگوسی باشند. برای سیگنال زیرگوسی، هنگامی که تابع G_3 مقدار حداقل به خود می گیرد، مشخصه گوسی کمینه و مشخصه غیرگوسی بیشینه است. در روش جدا کردن سیگنال ها بوسیله ی آنتروپی منفی، سفید کردن معمولا بعنوان ابزار پیش پردازش داده ها بکار می رود که بدست آوردن مولفه های متقابل مستقل از سیگنال را ساده تر می کند. ماهیت سفید کردن رسیدن به یک سیگنال خطی غیر همبسته است، یعنی، بوسیله تبدیل خطی u ، متغیر به یک متغیر خطی غیر همبسته تبدیل می شود که :

$$E\{yy^T\} = I, y = us$$

هنگامی که میانگین سیگنال s صفر است، فرمول بالا تبدیل می شود به:

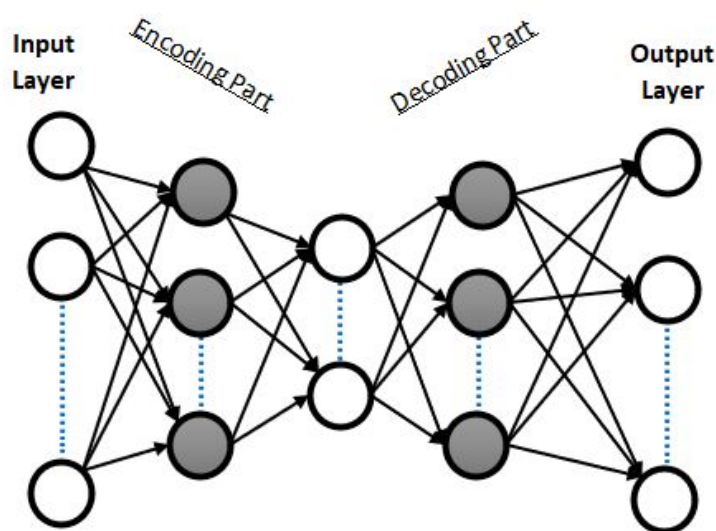
$$E\{uu^T\} = I$$

عدم همبستگی

عدم همبستگی شامل عدم همبستگی خطی و غیرخطی دو متغیر است که نشان دهنده دو متغیر مستقل است.

$$E\{s_1 s_2\} = E\{s_1\}E\{s_2\} \quad (9.2)$$

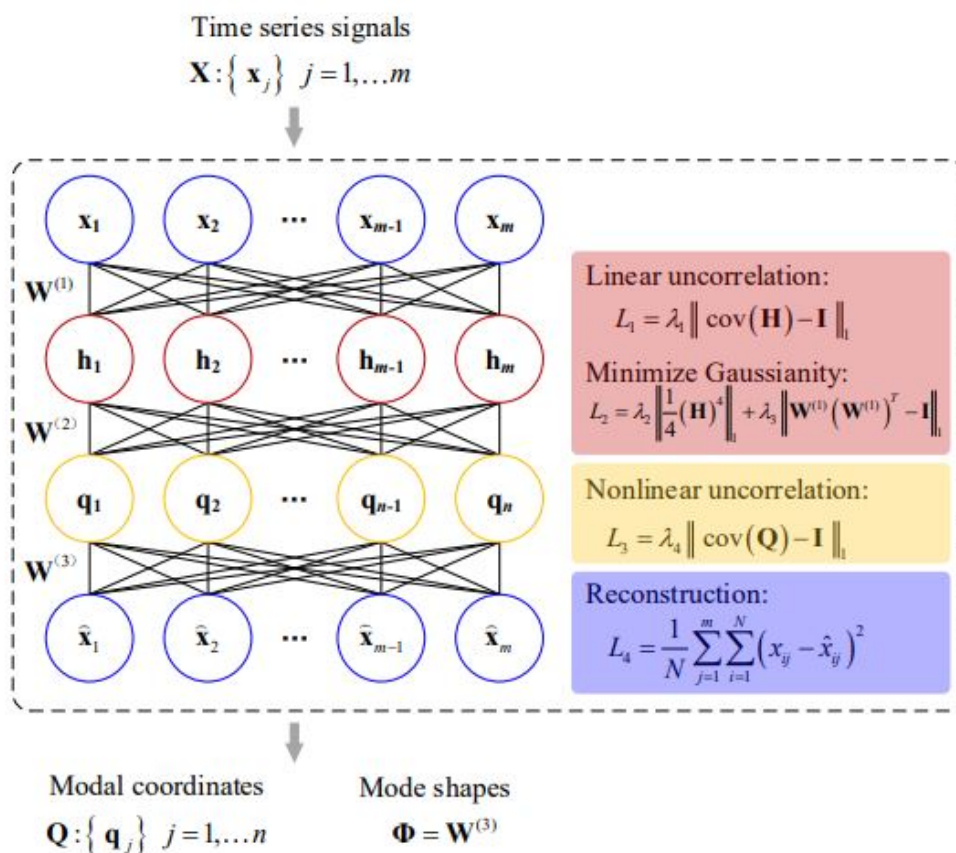
که s_1 و s_2 دو متغیر هستند، $f(\cdot)$ و $g(\cdot)$ تبدیل غیرخطی هستند. بر طبق معادله ی شماره ۲.۲، پاسخ های مودال $q_i(t), i = 1, \dots, n$ شامل غیرگوسی بودن و عدم همبستگی است. از اینرو، این مشخصات را می توان برای جدا کردن پاسخ های مودال از سیگنال های ارتعاشی اصلی سازه ها به کار گرفت. برای افزایش موثر جداسازی پاسخ مودال، هر دو مشخصه عدم همبستگی و غیرگوسی مد نظر قرار می گیرد در حالیکه در روش های قدیمی تفکیک کور منبع تنها مشخصه غیرگوسی را مد نظر قرار داده است.



شکل ۶.۲: دیاگرام شبکه رمزگذاری خودکار

۳.۴.۲ طراحی شبکه عصبی عمیق

عدم همبستگی و غیر گاوسی، یعنی آنتروپی منفی سیگنال‌های ارتعاشی بعنوان توابع قید در شبکه عصبی تعبیه شده‌اند. معماری شبکه طراحی شده برای شناسایی مودال در شکل ۷.۲ نشان داده شده است. چهار مرحله وجود دارد: (۱) داده‌های پاسخ زمانی سازه را به شبکه تزریق و وزن‌ها به طور تصادفی مقداردهی می‌شود. (۲) انجام انتشار رو به جلو و محاسبه تابع ضرر هر لایه برای بدست آوردن تابع ضرر کل (۳) انجام انتشار رو به عقب و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای به‌روزرسانی وزن شبکه و (۴) به‌روزرسانی مکرر وزن‌ها و رفع اشکال ابرپارامترها تا زمانی که شبکه همگرا شود.



شکل ۷.۲: معماری شبکه برای شناسایی مودال

تابع ضرر کل شبکه عصبی طراحی شده بصورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned}
 L &= L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = \lambda_1 \| \text{cov}(\mathbf{H}) - \mathbf{I} \|_1 + \\
 &\lambda_2 \| \frac{1}{4} \Delta(\mathbf{H})^4 \|_1 + \lambda_3 \| \mathbf{W}^{(1)} [\mathbf{W}^{(1)}]^T - \mathbf{I} \|_1 + \\
 &\lambda_4 \| \text{cov}(\mathbf{Q}) - \mathbf{I} \|_1 + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (x_{ij} - \hat{x}_{ij})^2 \\
 &= \lambda_1 \max_{1 \leq k \leq m} |\text{cov}(\mathbf{H}) - \mathbf{I}| + \lambda_2 \left| \frac{1}{4} \Delta(\mathbf{H})^4 \right| + \\
 &\lambda_3 |\mathbf{W}^{(1)} [\mathbf{W}^{(1)}]^T - \mathbf{I}| + \lambda_4 |\text{cov}(\mathbf{Q}) - \\
 &\mathbf{I}| + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (x_{ij} - \hat{x}_{ij})^2
 \end{aligned} \tag{۱۰.۲}$$

۵.۲ نتیجه‌گیری

در این تحقیق بطور خاص به دنبال یافتن مقادیر نسبت میرایی مودال از طریق خروجی لایه‌های میانی شبکه عصبی عمیق نظارت نشده می‌باشد که با توجه به خاصیت تعامد و استقلال پاسخ‌های مودال می‌توان پاسخ‌های گرفته شده از سازه را به پاسخ‌های مودال به تعداد سنسورهای موجود در سازه تفکیک کرد (تکنیک تحلیل مؤلفه مستقل (ICA)) و خروجی لایه انتهایی شبکه مجدد سیگنال ابتدائی را بازسازی کرده و اختلاف این دو سیگنال ورودی و خروجی شبکه دقت کار را نشان می‌دهد.

برای یکسان‌سازی مقادیر اختلاف سیگنال‌های ورودی و خروجی با توجه به زمان‌های متفاوت سیگنال‌ها، بایستی مقادیر اختلاف سیگنال‌ها را به طول مدت سیگنال تقسیم کرد تا در واحد زمان مقادیر اختلاف را بشود با هم مقایسه کرد.

فصل ۳

سخت افزارها

در انجام تست های ارتعاش محیطی از تجهیزات سخت افزاری مختلفی استفاده شده است که در این فصل به معرفی و ویژگی آنها خواهیم پرداخت. این فصل شامل بخش سخت افزار است که به معرفی ابزارهای مورد استفاده از جمله سنسور و دستگاه اکتساب داده (دیتالاگر) پرداخته شده است.

۱.۳ معرفی سخت افزارها

در این تحقیق تست ارتعاش محیطی با سنسور شتاب سنج صورت گرفته است فلذا تنها به معرفی و خصوصیات تجهیزات متناسب با این نوع تست اکتفا می کنیم چرا که این مبحث بسیار گسترده ای است و از طرح جزئیات در یک فصل پایان نامه فراتر است.

۱.۱.۳ سنسور شتاب

سنسور ابزاری است که تغییر در کمیت های فیزیکی از قبیل ارتعاش، فشار، شتاب، تغییر مکان، رطوبت و ... را تشخیص می دهد و یک خروجی الکتریکی دیجیتال یا آنالوگ متناظر با این تغییرات مهیا می کند. به طور مفهومی، یک شتاب سنج، مانند یک جسم میرا کننده روی یک فنر عمل می کند. هنگامی که شتاب سنج با شتاب حرکت می کند، جسم به اندازه ای جابجا می شود که نیروی وارد شده از فنر به جسم، جسم را با شتابی برابر شتاب بدنه ی شتاب سنج حرکت می دهد. سپس با اندازه گیری میزان جابجایی مقدار شتاب اندازه گیری می شود. سنسور ارتعاش سنج، حرکت ارتعاشی را حس کرده و آن را به یک سیگنال الکتریکی متناسب با حرکت ارتعاشی، تبدیل می کند. با تبدیل ارتعاشات به سیگنال الکتریکی، امکان ذخیره سازی، انجام پردازش های بعدی و نیز مشاهده سیگنال از طریق دستگاه های الکترونیکی (تجهیزات داده برداری) فراهم می شود. این بخش را به تقسیم انواع سنسورهای شتاب سنج و مشخصات آنها اختصاص داده ایم.

MEMS

سیستم های الکترومکانیکی (MEMS)، تلفیقی از اجزای مکانیکی، حسگرها، بازوهای مکانیکی و اجزای الکترونیکی هستند که بر روی لایه ای از ماده سیلیکون قرار دارند. این ساختار مکانیکی بسیار کوچک در ابعاد میکرون بر پایه تکنولوژی تراشه های الکترونیکی استوار است [۶]. این حسگرها در ساده ترین حالت خود با کمک اندازه گیری پدیده های مکانیکی، گرمایی، زیستی، شیمیایی، نوری و مغناطیسی، اطلاعات را از محیط جمع آوری می کنند. پس از اخذ اطلاعات از حسگرها، دستگاه های الکترومکانیکی به کمک قدرت تصمیم گیری خود، محرک ها را به پاسخ هایی چون: حرکت، جابجایی، شتاب، تنظیم کردن، پمپ کردن و فیلتر کردن وادار کرده و محیط را به سمت نتایج مورد نظر هدایت می کند. شتاب سنج های جدید معمولاً بر پایه سیستم های میکرو الکترومکانیک هستند.

سیستم MEMS فاصله بین سیستم های مکانیکی پیچیده و مدارهای مجتمع الکترونیکی را پر می کند. حسگرها و محرک ها عموماً گران قیمت اند، به علاوه سیستم الکترونیکی، محرک ها و حسگرها در ابعاد بزرگ قابل اعتماد نیستند. فناوری MEMS امکان ساخت سیستم های میکرو الکترومکانیکی را با استفاده از تکنیک های ساخت ناپوسته

فراهم کرده و موجب برابری قیمت و اعتبار حسگرها و محرک‌ها با مدارهای مجتمع می‌شود و حتی انتظار می‌رود کارایی دستگاه‌ها و ابزارهای MEMS بالاتر از عناصر و سیستم‌های مقیاس ماکرو و قیمت آن خیلی پایین‌تر از آن‌ها باشد. به عنوان یک نمونه جدید از فواید فناوری MEMS می‌توان به شتاب‌سنج‌های MEMS اشاره کرد. شتاب‌سنج MEMS خیلی کوچک‌تر، کارآمدتر، سبک‌تر و قابل‌اعتمادتر بوده و قیمتی بسیار کمتر از شتاب‌سنج‌های مرسوم دارد. تصویر این نوع از شتاب‌سنج‌ها در شکل شماره ۱.۳ نشان داده شده است. یکی از ژيروسکوپ‌های ساخته شده با این تکنولوژی، ماژول ۶۰۵۰MPU می‌باشد که در دو نوع ۵۲۱GY- و ۶۰۵۰MPU IMU Filter Kalman موجود می‌باشد. این ماژول یک واحد اندازه‌گیری داخلی شش محوره با بهره‌گیری از سنسور ۶۰۵۰MPU- است، که بر اساس فیلتر کالمن، داده‌های شتاب‌سنج و ژيروسکوپ را دریافت و پس از ترکیب داده خروجی‌های استاندارد پردازش شده را در بستر سریال تحویل می‌دهد. این ماژول دارای سنسور gyro سه محوره، سنسور شتاب سه محوره و دماسنج محصول Invensense شامل مجموعه شتاب‌سنج و gyro با دقت بالا (۱۶ بیتی) می‌باشد. همچنین دارای بافر FIFO با ظرفیت ۱۰۲۴ بایت و نیز سنسور دما با رنج اندازه‌گیری ۴۰- تا ۸۵+ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این ماژول با تجمیع و ترکیب یک ژيروسکوپ ۳ محوره با یک شتاب‌سنج ۳ محوره روی یک چیپ سیلیکونی و بهره‌گیری از یک پردازشگر دیجیتال حرکت، قادر است الگوریتم‌های پیچیده ۹ محوری را اجرا کند.

در شکل ۱.۳ نمایی از ماژول ۶۰۵۰MPU- نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱.۳ مشخصات عملکردی این ماژول آورده شده است.

Current: <10mA
voltage: 3V ~ 6V
Size: 15.24mm X 15.24mm X 2mm
Measuring dimensions: Acceleration: 3-dimensional angular velocity: 3-dimensional
attitude angle: 3-dimensional
Range acceleration: +2g,-2g, angular velocity: +250°/s
Stability: Acceleration: 0.001g , angular speed: 0.02°/s
Attitude measurement Stability: 0.01°
Data output frequency: 100Hz(baud 115200) / 20Hz(baud 9600)
Data Interface: Serial(TTL level), I2C (directly connected MPU6050, no gesture output)

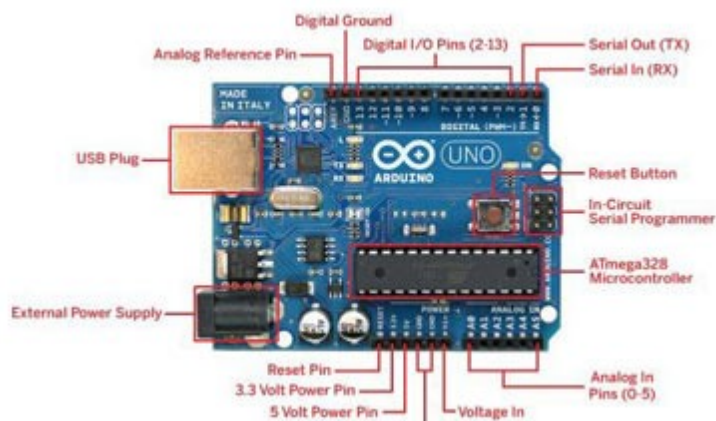
جدول ۱.۳: مشخصات سنسورهای شتاب سنج ممز



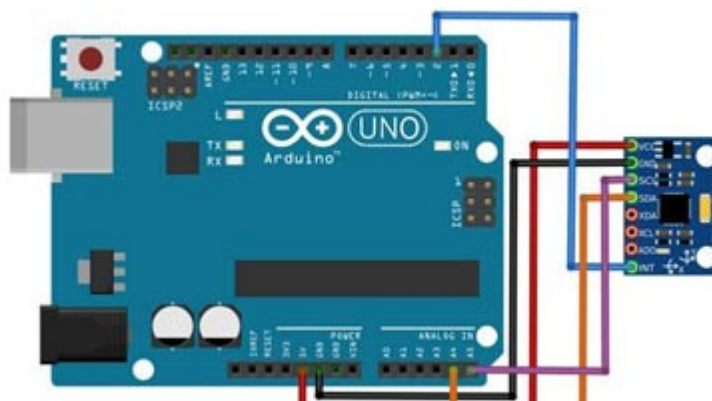
شکل ۱.۳: تصویر سنسور ممز

به منظور راه اندازی این سنسور از میکروکنترلر آردوینو می توان استفاده کرد [۶]. آردوینو، یک پلتفرم کد باز الکترونیک است. کد باز بودن و رایگان بودن پلتفرم آردوینو باعث شده تا تعداد زیادی در سراسر جهان از این پلتفرم استفاده نمایند و روز به روز بیشتر آن را توسعه دهند. تصویر این میکروکنترلر در شکل ۲.۳ نشان داده شده است. آردوینو می تواند پارامترهایی مانند نور محیط، کلیدها یا حتی یک ایمیل را به عنوان ورودی دریافت نماید

و بعد از پردازش، خروجی‌هایی مانند روشن کردن یک وسیله برقی، تغییر رنگ LED ها یا ارسال یک ایمیل یا نظیر آن را ارائه دهد.



شکل ۲.۳: جزئیات میکرو کنترلر آردوینو اونیو



شکل ۳.۳: جزئیات اتصال شتاب سنج - MPU-6050 به آردوینو

پلتفرم آردوینو شامل نرم‌افزار و سخت‌افزار متن‌باز می‌شود. سخت‌افزار آردوینو متشکل از بردهای مختلفی بر پایه میکروکنترلرهای مختلف است که پرمصرف‌ترین سخت‌افزار آردوینو، UNO Arduino است. بردهای آردوینو را بدون نیاز به برنامه نویسی می‌توان از طریق کابل USB برنامه ریزی کرد. نرم‌افزار آردوینو دارای کتابخانه‌های بسیار کامل و رابط کاربری بسیار ساده‌ای است. نرم‌افزار آردوینو در مقایسه با کامپایلرهایی مانند

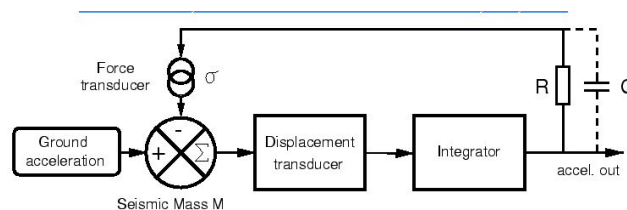
کدویژن و بسکام بسیار کامل تر و قدرتمندتر است و بدون نیاز به برنامه ریزی پیشرفته می تواند به طور مستقیم میکروکنترلر را برنامه ریزی نماید. در شکل ۳.۳ نمایی از نحوه اتصال MPU-۶۰۵۰ به آن نشان داده شده است.

شتاب سنج های از نوع متعادل نیرویی (FBA)

در لرزه نگار غیرفعال (*Passive*) معمولی، نیروی اینرسی تولید شده بوسیله حرکت لرزه ای زمین، جرم سنسور را از موقعیت تعادلش جابجا می کند و سپس تغییر مکان یا سرعت آن جرم به سیگنال الکتریکی تبدیل می شود. این اصول اندازه گیری در حال حاضر تنها برای لرزه نگارهای پریود کوتاه بکار برده می شود. لرزه نگارهای پریود بلند یا پهن باند بر اساس اصل تعادل نیرو ساخته شده اند. این بدان معناست که نیروی اینرسی با نیروی الکتریکی تولید شده متعادل شده است به نحوی که جرم لرزه ای به مقدار حداقل ممکن حرکت می کند، البته بعضی حرکت های کوچک همچنان مورد نیاز است چراکه در غیر این صورت نیروی اینرسی قابل مشاهده نیست.

نیروی بازخورد با یک مبدل نیرویی الکترومغناطیس تولید شده است. بخاطر تاخیرات غیرقابل اجتناب در حلقه بازخورد، سیستم های متعادل نیرویی دارای پهنای باند محدودی هستند. با این وجود، در فرکانس هایی که آنها مؤثر هستند، آنها بوسیله تولید نیروی بازخورد که کاملاً متناسب با شتاب زمین است جرم را وادار به حرکت با زمین می کند. هنگامی که نیرو با جریان داخل مبدل متناسب می شود، ولتاژ در طول مقاومت بازخورد R ، و ولتاژ خروجی همگی متناسب با شتاب زمین هستند. بنابراین ما شتاب را بدون وابستگی به دقت تعلیق مکانیکی به یک سیگنال الکتریکی تبدیل می کنیم.

پاسخ سیستم تعادل نیرویی بطور تقریبی عکس قدرت (*Gain*) مسیر بازخورد است. به آسانی می توان آن را بوسیله دادن مسیر بازخورد قدرت وابسته به فرکانس را اصلاح کرد. تصویری از این نوع شتاب سنج در شکل ۴.۳ نشان داده شده است. برای مثال، اگر ما یک خازن با ظرفیت C به قدری بزرگ که آن جریان بازخورد را تعیین کند، سپس قدرت مسیر بازخورد بطور خطی با فرکانس افزایش یابد، ما دارای یک سیستم هستیم که پاسخ به شتاب با عکس فرکانس متناسب است و بنابراین نسبت به سرعت روی یک باند عبوری مشخص ثابت و مسطح است.



شکل ۴.۳: مدار بازخورد شتاب سنج های متعادل نیرویی

شتاب سنج های از نوع Optic

سنسورهای فیبر نوری قطعاتی بر پایه تکنولوژی فیبر هستند، که برای اندازه گیری کمیت هایی نظیر دما و کشش مکانیکی از آن ها استفاده می شود. البته گاهی از این سنسورها نیز می توان برای اندازه گیری میزان ارتعاش، فشار، شتاب، و یا حتی تعیین غلظت یک ماده شیمیایی استفاده نمود. اساس کار این قطعات مبتنی بر ارسال یک پرتو نور از منبع لیزری (اغلب نور لیزر تک فرکانسی) یا یک منبع فوق درخشان درون یک فیبر نوری است. خواص نور ارسال شده در طول فیبر با توجه به عوامل و اثرات فیزیکی وارد به آن تغییر یافته و سرانجام در سوی دیگر فیبر به یک آشکارساز می رسد. از مزایای این روش اندازه گیری نسبت به سایر روش ها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

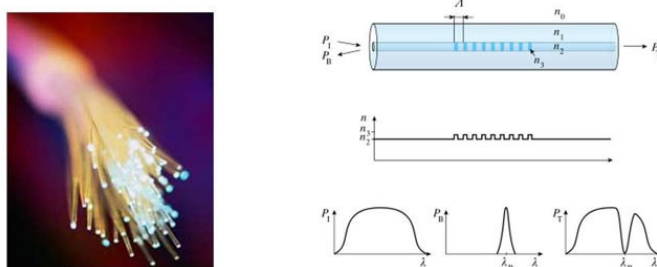
۱. سنسورهای مبتنی بر فیبر نوری از مواد عایق الکتریکی ساخته شده اند و به کابل برق نیاز ندارند لذا در محیط هایی که تحت ولتاژ بسیار بالایی هستند به راحتی می توانند بکار گرفته شوند.
۲. این سنسورها نسبت به تداخلات الکترومغناطیسی و حتی رعد و برق مصون هستند و خود نیز هیچ تداخل الکتریکی برای سایر وسایل ایجاد نمی کنند.
۳. از مواد شیمیایی خنثی ساخته می شوند، لذا مشمول خوردگی و یا آلوده کردن محیط پیرامون نمی شوند.
۴. در محیط های با قابلیت انفجار، نظیر پالایشگاه های گاز، فراوری بنزین و ... قابل استفاده اند، چراکه جرقه الکتریکی ندارند حتی اگر معیوب باشند.

۵. این قطعات گستره وسیعی از دمای کار را شامل می‌شوند که تقریباً هیچ قطعه الکترونیکی دیگری مانند آن‌ها نیست.

۶. سنسورهای مختلف، مبتنی بر فیبر نوری توانایی به‌کارگیری هم‌زمان در یک رشته فیبر را دارند.

تئوری کار این سنسورها بر اساس شبکه فیبر براگ است. این شبکه در اصطلاح FBG نامیده می‌شود. شبکه براگ شامل اختلالات تناوبی یا غیر تناوبی ضریب شکست مؤثر در هسته یک فیبر نوری است. این تداخل‌ها تقریباً در طول معینی از فیبر به اندازه مثلاً چند میلی‌متر یا چند سانتیمتر تناوبی است و دوره تناوب آن معمولاً توانی از صد نانومتر یا بیشتر است.

یک FBG انعکاس‌دهنده (یا فیلتر) وابسته به طول موج، از گنجاندن شاخص انکساری دوره‌ای، با فاصله‌ای در حد طول موج نور، در داخل هسته فیبر نوری تشکیل می‌شود. هر زمان که طیف گسترده‌ای از پرتو نور به شبکه برخورد می‌کند، قسمتی از انرژی آن انتقال می‌یابد و قسمت دیگر منعکس می‌شود. سیگنال نوری منعکس شده خیلی باریک خواهد بود (nm) و در طول موج براگ متمرکز خواهد شد که برابر با دو برابر فاصله واحد تناوبی است. هر تغییری در شاخص یا گام FBG به سبب کرنش یا دمای تغییرات قطبش، تغییرات طول موج براگی را به بار خواهند آورد. تنش‌های مکانیکی با این روش قابل اندازه‌گیری هستند. یکی از مزایا، آشکارسازی سیگنال از نظر رمزگذاری طیفی است. بنابراین اتلاف در انتقال قابل توجه نیست. در شکل ۵.۳ سنسور فیبر نوری و نحوه عملکرد آن نشان داده شده است.



شکل ۵.۳: نحوه عملکرد شتاب‌سنج‌های فیبر نوری

Piezo

از انواع شتاب سنج‌های رایج در این دسته پیزوالکتریک‌ها هستند. یک سنسور پیزوالکتریک می‌تواند، اطلاعات را از محدوده‌ی مکانیکی به یک سیگنال الکتریکی قابل پردازش، با استفاده از اثر پیزوالکتریک مستقیم تبدیل کند. سیگنال الکتریکی تولید شده پس از اعمال اولیه نیرو، به سرعت کاهش می‌یابد. بنابراین، این سنسورها برای اندازه‌گیری نیروهایی که در مدت زمان کوتاهی اعمال می‌شوند، بسیار مناسب هستند اما برای اندازه‌گیری نیروهای استاتیکی مناسب نیستند.

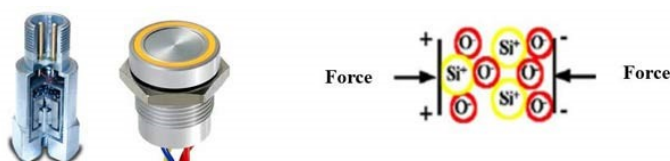
براساس این خاصیت، این گروه از مواد در برابر تنش مکانیکی، بار الکتریکی تولید می‌کنند. در واقع، واژه پیزوالکتریک به مفهوم تولید جریان الکتریسیته در اثر اعمال نیروی مکانیکی است. این واژه برآمده از لغت یونانی پیزو یا پیزن به معنای فشردن یا فشار دادن و الکتریک یا الکترون، که در روزگاران گذشته برای کهربا به کار می‌رفته است، می‌باشد.

اثر پیزوالکتریک به عنوان یک واکنش خطی-الکترو مکانیکی بین دو حالت الکتریکی و مکانیکی در مواد عایق و بلورهایی که تقارن مرکزی ندارند، تعریف می‌شود. در واقع پیزوالکتریک‌ها موادی هستند که در صورت اعمال فشار یا تنش به آنها، بار الکتریکی در سطوح خاصی از آنها ظاهر می‌شود. این پدیده، اثر پیزوالکتریک مستقیم نام دارد. شتاب سنج پیزو الکتریک شامل کریستالی است که به یک جرم متصل بوده و همراه با یک فنر در محفظه‌ی قرار گرفته است. علاوه بر خواص میرایی طبیعی ذاتی در کریستال و فنر، گاهی از میرایی اضافی نیز استفاده می‌شود (به عنوان مثال، با پر کردن محفظه از روغن). مطابق شکل ۶.۳ وقتی به جسم شتابی وارد شود، بر اثر اینرسی جرم، بین بدنه و جرم جابجایی نسبی به وجود می‌آید. کرنشی که در نتیجه اثر پیزوالکتریک در کریستال به وجود آمده باعث جابجایی بار بین پوشش‌های رسانای دو طرف کریستال می‌گردد. شتاب سنجی که از کریستال پیزوالکتریک استفاده می‌کند به هیچ منبع تغذیه خارجی نیاز ندارد.

توجه به این مسئله مهم است که شتاب سنج، شتاب را تنها در جهتی که در آن نصب شده است (یعنی در راستای محور فنر، جرم و کریستال) اندازه‌گیری می‌کند [۷].

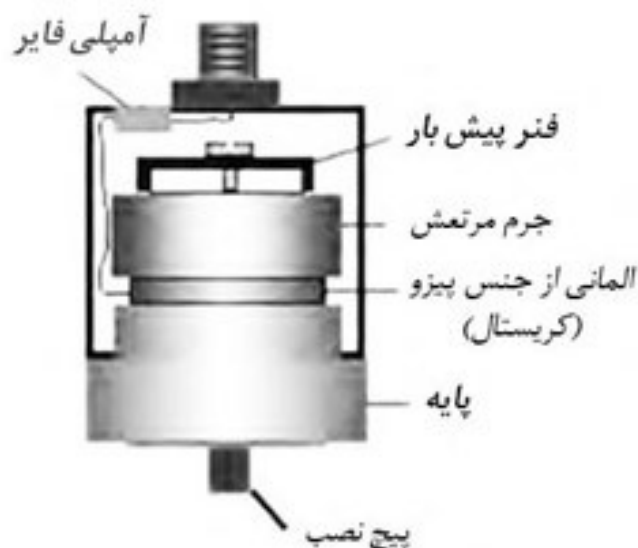
خاصیت پیزوالکتریک، در سال ۱۸۸۰ میلادی، توسط ژاکوب کوری، فیزیکدان برجسته فرانسوی و استاد رشته کانی شناسی دانشگاه مونپلیه، و پیئر کوری، فیزیکدان شهیر فرانسوی، برنده جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۰۳

میلادی و پیشگام در عرصه‌هایی چون بلور شناسی، مغناطیس و واپاشی هسته‌ای، کشف و معرفی شد. در بسیاری از متون و مقالات علمی، اثر پیزوالکتریک به عنوان تبادل الکترو مکانیک میان وضعیت الکتریکی و مکانیکی در مواد بلورین معرفی شده است. بدین صورت که رابطه‌ای برگشت پذیر میان این دو وجود دارد؛ یعنی در اثر اعمال نیروی مکانیکی به یک ماده پیزوالکتریک، بار الکتریکی تولید می‌شود و یا در اثر تولید بار الکتریکی در آن، ماده مورد نظر کشیده یا فشرده می‌شود [۷].



شکل ۶.۳: نحوه عملکرد شتاب سنج های پیزوالکتریک

اجزای اصلی این نوع از شتاب سنج‌ها از مواد پیزوالکتریک مثل کوارتز و یا انواع خاصی از سرامیک ساخته می‌شود. این مواد بر اثر تحریک شدن، سیگنال الکتریکی تولید می‌کنند. شماتیک ساختمان این نوع از سنسورها در شکل ۷.۳ نشان داده شده است.

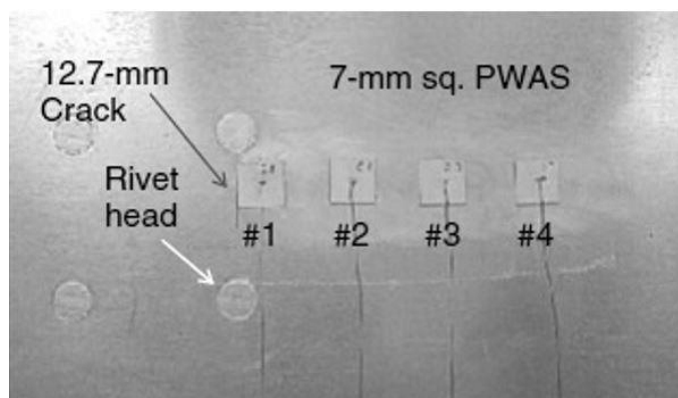


شکل ۷.۳: اجزای تشکیل دهنده شتاب سنج های پیزوالکتریک

همان‌طور که در شکل شماره ی ۷.۳ پیداست، اجزاء اصلی عبارت هستند از: یک وزنه، ماده کریستال (پیزوالکتریک)، یک فتر برای اعمال پیش بار، تقویت کننده و پایه. این نوع پیکربندی به گونه‌ای است که نیروی وارد بر ماده پیزوالکتریک و در نتیجه سیگنال الکتریکی تولید شده توسط آن، متناسب با شتابی است که بر پایه وارد می‌شود. از آنجایی که سیگنال ایجادشده معمولاً ضعیف است، از یک مدار داخلی برای تقویت سیگنال استفاده می‌شود. نهایتاً خروجی سنسور از طریق کابل‌های مناسب به ابزارهای پردازش سیگنال (دستگاه‌های داده برداری) هدایت می‌شوند و می‌توان در برنامه پایش از این داده‌ها استفاده نمود. از مزایای این دسته از پیزوالکتریک‌ها می‌توان به ساختمان مقاوم، حساسیت نداشتن به میدان‌های مغناطیسی، قابل استفاده در هر جهت، ابعاد کوچک، بدنه فولادی زنگ‌زن و غیرقابل نفوذ بودن آنها اشاره نمود. همچنین دارای معایبی مثل حساسیت کم در اندازه‌گیری فرکانس‌های پایین می‌باشند.

از انواع شتاب‌سنج‌های رایج در دسته پیزوالکتریک‌ها که از نظر نحوه تأثیر پذیری از ارتعاش و تولید سیگنال الکتریکی، به دو نوع دسته‌بندی می‌شوند شامل شتاب‌سنج نوع فشاری (*CompressionType*) و شتاب‌سنج نوع برشی (*ShearType*) است.

سنگ در سال ۱۹۹۰ میلادی، لستر و لفبر در سال ۱۹۹۳ میلادی طرح حسگرها و محرک‌های پیزوالکتریک را برای اندازه‌گیری و کنترل دینامیکی مدل نمودند. برای عیب‌یابی، بانکس و همکاران در سال ۱۹۹۶ میلادی از این حسگرها برای تحریک سازه و حس کردن پاسخ آزاد حاصل از رفع عیب استفاده کردند. همچنین استفاده از حسگرهای فعال پیزوالکتریک، برای عیب‌یابی با استفاده از انتشار امواج لمب هدایت شده، توسط چانگ و همکارانش به طور گسترده دنبال شد. آنها استفاده از این حسگرها را برای ارسال و دریافت امواج الاستیک در مواد مرکب مطالعه نمودند. همان‌گونه که بیان شد، این حسگرها بسیار کوچک‌اند و فضای کمی را اشغال می‌کنند. در شکل ۸.۳ نمونه‌ای از این حسگرها نمایش داده شده است.



شکل ۸.۳: نمونه‌ای از حسگر پیزوالکتریک روی سازه

مطابق شکل ۸.۳، یک حسگر پیزوالکتریک، که به بدنه سازه متصل است، ۷ میلی‌متر مربع مساحت، ۲ میلی‌متر ضخامت و ۷۸ گرم وزن دارد. این حسگرها عملکردی بسیار بهتر از کرنش سنج‌های مقاوم‌تری دارند، زیرا پایش سلامت سازه‌ها را به صورت لحظه‌ای و آنلاین انجام می‌دهند. حال آنکه کرنش سنج‌های مقاوم‌تری ابزارهایی غیرفعال‌اند که تنها توانایی کنترل و اندازه‌گیری کرنش سازه‌ها را در همان لحظه دارند. به طور کلی حسگرهای فعال پیزوالکتریک بر سه اساس استوارند، انتشار امواج الاستیک، امپدانس اکوستیکی و تحلیل مودال [۸].

۲.۳ مشخصات فنی سنسورهای شتاب سنج

۱.۲.۳ تعداد محورهای داده‌نگاری

تعداد محورهای داده‌نگاری می‌تواند شامل ثبت شتاب در یک، دو یا سه محور متعامد باشد. هر یک از این مؤلفه‌ها باید مستقل از یکدیگر باشند.

۲.۲.۳ بیشینه تراز

به حداکثر شتاب قابل ثبت توسط شتاب سنج، بیشینه تراز گفته می شود. این تراز بستگی به مکانیک شتاب سنج ها و مشخصات بخش دیجیتالیزر دارد.

۳.۲.۳ نویز خود ساخته

کلیه تجهیزات برقی و شتاب سنج های الکترونیکی تولید نویز می کنند. در غیاب ارتعاشات محیطی و بیرونی، نویز خودساخته همچنان وجود دارد. شیوه محاسبه RMS بصورت زیر است:

- استفاده از سری های زمانی بدون ضریب وزنی

- استفاده از روش $Welch$ برای محاسبه PSD

- استفاده از تکه های تاریخچه زمانی با همپوشانی 50% درصد

- استفاده از تابع پنجره $Hanning$

- حداقل تعداد تکه های تاریخچه زمانی باید 10 عدد باشد

- برش تاریخچه زمانی به نحوی که طول هر تکه عدد صحیحی از ثانیه باشد

RMS نویز خود ساخته شتاب سنج باید کمتر از $\frac{\mu}{\sqrt{Hz}} 100$ باشد. بنابراین، حداقل RMS نویز قابل قبول باید بصورت زیر باشد:

$$RMS\ of\ Noise = Self\ noise * (frequency\ bandwidth)^{0.5}$$

$$RMS\ of\ Noise = 100 * \sqrt{25} = 0.49 \frac{cm}{s^2}$$

لازم به ذکر است که تراز بیشینه $1/5g$ و بازه دینامیکی $85dB$ این معیار را پاس می کند.

۴.۲.۳ بازه دینامیکی

بازه دینامیکی، نسبت بزرگترین به کوچکترین سیگنال ضبط شده است. کوچکترین سیگنال ثبت شده بستگی به نویز خود ساخته و دقت دیجیتالیزر شتاب سنج دارد. بزرگترین سیگنال ثبت شده بستگی به تراز بیشینه شتاب سنج دارد. بازه دینامیکی بطور معمول با dB بیان می شود.

$$Dynamic\ range = 20 * \log \frac{ClipLevel}{RMS\ of\ Self - noise} (dB)$$

۵.۲.۳ دقت سنسور

به حداقل تغییر ارتعاش قابل ثبت بوسیله شتاب سنج، دقت سنسور گفته می شود. این پارامتر تابعی از حساسیت دیجیتالیزر است و اغلب با bit بیان می شود.

دیجیتالیزر وسیله ای است که سیگنال آنالوگ (ولتاژ) را به سیگنال دیجیتال تبدیل می کند و معمولاً در داخل جعبه شتاب سنج قرار داده می شود. از اینرو خروجی شتاب سنج، دیجیتال خواهد بود. در یک شتاب سنج با دقت n بیتی، یک بیت معمولاً برای علامت سیگنال ولتاژ نگه داشته می شود. حداقل ولتاژ یا شتاب قابل اندازه گیری برابر است با:

$$minimum\ measurable\ acceleration = \frac{maximum\ measurable\ acceleration}{2^{n-1}}$$

دقت شتاب سنج ها، دقت مبدل های آنالوگ به دیجیتال (ADC) یا دیجیتالیزر شتاب سنج ها می باشد.

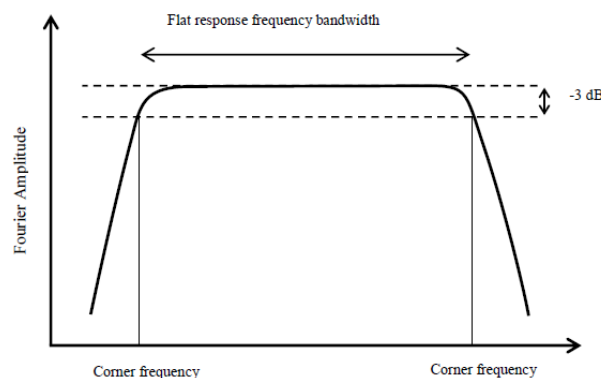
۶.۲.۳ فرکانس گوشه

در شتاب سنج های FB ، فرکانس گوشه نقطه ای را که پاسخ شروع به کاهش می کند مشخص می نماید. این پارامتر تابعی از فرکانس طبیعی سیستم است. فرکانس گوشه شتاب سنج ها باید حداقل برابر با $100Hz$ باشد. این مقدار برای اطمینان از این موضوع می باشد که فرکانس گوشه شتاب سنج به اندازه کافی از پهنای باند مطلوب

سنسور دور است.

۷.۲.۳ پهنای باند مطلوب

به بازه فرکانس برای استفاده خاص، پهنای باند مطلوب گفته می شود. این بازه فرکانسی باید کمتر از پهنای باند فرکانس پاسخ تخت از شتاب باشد. پهنای باند فرکانس پاسخ تخت بازه ای از فرکانس های حرکت زمین است که می توان بوسیله داده های دیجیتال حاصل از آن بطور صحیح بازتولید کرد.



شکل ۹.۳: پاسخ فرکانسی شتاب سنج و پارامترهای آن

بعنوان یک تعریف، این محدوده معمولاً بصورت بازه بین -3 dB نقاط پائین تر از حداکثر پاسخ فرکانسی سنسور محسوب می شود. همانطور که در شکل ۹.۳ نشان داده شده است. بازه پهنای باند شتاب سنج باید شامل فرکانس های بین $10^0 - 25$ هرتز باشد. حداقل نرخ نمونه برداری بر اساس قاعده نایکوئیست باید 50 هرتز باشد.

۸.۲.۳ ثابت مولد در خروجی

ثابت مولد در خروجی، ولتاژ تولید شده بوسیله شتاب سنج برای شتاب $\frac{1}{g}$ یا یک برابر شتاب ثقل ($1g$) است. این پارامتر تابعی از فرکانس های ارتعاش است و باید در 1 هرتز اندازه گیری شود. ثابت مولد در خروجی برای

شتاب سنج ها باید بیش تر از $\frac{1}{g}$ باشد.

۹.۲.۳ دقت حساسیت

به انحراف شتاب ثبت شده از شتاب واقعی دقت حساسیت یا خطای حساسیت گفته می شود. خطای حساسیت شتاب سنج باید در داخل محدوده ۱٪ انحراف از مقدار واقعی باشد.

۱۰.۲.۳ انحراف هارمونیک کل

انحراف هارمونیک کل^۱ (THD) یک سنسور، اندازه گیری انحراف هارمونیک موجود است و بصورت نسبت توان فرکانس غالب به مجموع توان های تمامی مؤلفه های هارمونیک تعریف می شود. برای شتاب سنج ها این مقدار باید کمتر از -35 dB باشد. این اندازه گیری اغلب بصورت نسبت ریشه میانگین مربعات دامنه فرکانس غالب به ریشه میانگین مربعات مجموعه ای از دیگر فرکانس های هارمونیک انجام می گیرد. برای اندازه گیری TDH ، شتاب سنج را باید با یک فرکانس خاص تحریک کرد و محاسبات برطبق خروجی شتاب سنج صورت می گیرد.

۱۱.۲.۳ حساسیت محور عرضی

حساسیت محور عرضی، اندازه گیری میزان خروجی یک محور است هنگامی که شتاب روی محور دیگر اعمال شده است، معمولاً بصورت ٪ یا dB مشخص می شود.

$$\text{Cross-axis Sensitivity} = 20 * \log \frac{\sqrt{Ay^2 + Az^2}}{Ax}$$

جایی که Ax حساسیت اندازه گیری شده در راستای اندازه گیری، Ay و Az حساسیت اندازه گیری شده در راستاهای متعامد دیگر هستند. حساسیت های بکار رفته در محاسبات محورهای متعامد باید در واحد $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$ باشد.

¹Total Harmonic Distortion

مقدار حساسیت محور عرضی باید کمتر از -35 dB باشد. عبارت دیگر، اگر شتاب $1g$ به یک محور شتاب سنج وارد شود، ریشه مربعات شتاب اندازه گیری شده روی دو محور دیگر باید کمتر از $0.18g$ باشد.

۱۲.۲.۳ خطی بودن

یک شتاب سنج ایده آل آن است که رفتارش همانند سیستم خطی باشد به نحوی که بطور مثال با دو برابر کردن ورودی، خروجی آن هم دو برابر شود. عبارت دیگر، خطی بودن، ارتباط خطی بین ورودی و خروجی شتاب سنج را مشخص می کند. خطی بودن حداکثر انحراف خروجی از مناسب ترین خط مستقیم در کالیبراسیون شیب استاتیک است و در واحد dB اندازه گیری می شود. خطای خطی بودن شتاب سنج ها باید کمتر از -35 dB باشد.

۳.۳ اکتساب داده (DAQ)

ثبت کننده داده یا ثبت و یا داده بردار^۱ وسیله ای است که داده های اندازه گیری شده توسط خود و یا توسط یک حسگر یا دستگاه خارجی را در طول زمان ذخیره می کند.

اکثر دیتالاگرها معمولاً کوچک و قابل حمل بوده و کاربرد آزمایشگاهی و تست و اندازه گیری دارند. دیتالاگرها دارای یک حسگر بوده که داده های پارامتر مورد نظر را اندازه گیری کرده و سپس در حافظه داخلی خود ذخیره می کنند. برخی از ثبت کننده ها دارای نمایشگر بوده و می توان داده های ذخیره شده را در آن مشاهده کرد. دیتالاگرها معمولاً از طریق رابط USB به کامپیوتر وصل شده و توسط نرم افزار مخصوص دیتالاگر می توان داده های اندازه گیری شده را بر روی کامپیوتر مشاهده و پردازش کرد.

یکی از مزایای مهم استفاده از دیتالاگرها قابلیت جمع آوری ۲۴ ساعته اطلاعات است. دیتالاگرها معمولاً به محض فعال سازی بدون مراقبت رها شده تا در طول دوره پایش اندازه گیری نموده و اطلاعات را ذخیره کند. این قابلیت اجازه می دهد تا تصویری جامع و دقیق از شرایط محیط تحت نظر مانند دمای هوا، رطوبت، شتاب و غیره

¹Data Logger

بدست آورد. در شکل ۱۰.۳ تصویری از انواع مختلف آن نشان داده شده است.



شکل ۱۰.۳: دستگاه‌های اکتساب داده با تعداد کانال‌های مختلف

۱.۳.۳ کاربردهای دستگاه اکتساب داده

کاربرد دستگاه اکتساب داده شامل موارد زیر می‌شود:

- مانیتورینگ ابنیه تاریخی و موزه‌ها
- ذخیره داده‌های حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی مانند سرعت باد/ و جهت باد، دما، رطوبت نسبی، تشعشعات خورشیدی در ایستگاه هواشناسی بدون مراقبت
- ذخیره داده‌های سطح آب، عمق آب، جریان آب، pH آب، رسانایی آب در ایستگاه‌های بدون مراقبت هیدروگرافی
- شمارش ترافیک جاده
- مانیتورینگ محیط زیست
- آزمایش خودرو
- مانیتورینگ وضعیت رله در سیگنال دهی راه آهن

• داده برداری از متغیرهای دما و فشار در طول خط لوله

• مانیتورینگ پل ها

۲.۳.۳ مشخصه های دستگاه اکتساب داده

برخی از مهم ترین مشخصات دستگاه اکتساب داده شامل موارد زیر می باشد:

۱. تعداد کانال ها: تعداد کانال های دیتالاگر بیانگر تعداد سنسورها و مبدل هایی است که هم زمان قابل اتصال به دیتالاگر هستند.

۲. فرکانس نمونه برداری: تعداد دفعاتی که دیتالاگر داده های هر سنسور را خوانده و به کامپیوتر یا حافظه منتقل می کند را فرکانس نمونه برداری دیتالاگر می گویند. به عنوان مثال دیتالاگری که دارای فرکانس نمونه برداری ۳۰۰ هرتز است به این معنی است که در هر یک سیصدم ثانیه $1/300$ داده های بدست آمده از سنسورها به کامپیوتر منتقل می شود.

۳. نوع سنسورهای پشتیبانی کننده: معمولاً هر دیتالاگری سنسورها و مبدل های خاصی را پشتیبانی می کند. مثلاً یک دیتالاگر ممکن است تنها قادر به پشتیبانی سنسورهای حرارتی RTD باشد ولی قادر به پشتیبانی ترموکوپل ها نباشد.

۴. پردازش داده های جمع آوری شده: معمولاً هر دیتالاگر مجهز به یک نرم افزار است که امکان اعمال تنظیمات آن و مشاهده نمودارهای بدست آمده از سنسورها را حین نمونه برداری ممکن می سازد.

۵. مدت زمان ثبت اطلاعات: یک پارامتر اساسی در سیستم های دیتالاگر قابلیت ثبت اطلاعات برای مدت زمانی طولانی مثلاً چندین سال است. برای دستیابی به این هدف لازم است سیستم های دیتالاگر دارای سامانه ذخیره سازی در حجم های بالا و مصرف انرژی بسیار کم باشند.

جدول ۲.۳: مشخصات دستگاه اکتساب داده

Resolution	24 Bit
Communication Interface	Ethernet
No of Channels	4/8/16 Channels in one box
Type of Measurement	Differential
Synchnization	True Simultaneous
Sampling Rate	2 kHz (2000sps) / Channel
Filtering	Anti-Aliasing / Low Pass
Dynamic Range	140dB
Measurement Range	+17.2 mV to +12 V , -17.2 mV to -12 V
Channel Gain	1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128
Power	12V DC , maximum 40W
Microprocessor	ARM Cortex , embedded Linux Operating System

جدول ۳.۳: مشخصات دستگاه اکتساب داده استفاده شده در این تحقیق

اجزای تشکیل دهنده دستگاه اکتساب داده

یک دستگاه دیتالاگر از اجزای زیر تشکیل شده است:

- سخت افزار: سخت افزار سیگنال‌های مورد نظر را به داده‌های دیجیتال تبدیل می‌کند که شامل سنسورها، مدارات بهبود سیگنال (مانند تقویت کننده و کاهنده‌های نویز) و مدارهای مبدل آنالوگ به دیجیتال است.
- سخت افزار ذخیره سازی بلند مدت داده‌ها که معمولاً کارت حافظه یا رایانه می‌باشد.
- نرم افزار دیتالاگر که برای جمع آوری، آنالیز و نمایش داده‌ها استفاده می‌شود.
- کابل دیتالاگر که رابط بین دیتالاگر و کامپیوتر برای انتقال داده‌های ذخیره شده بر روی کامپیوتر



شکل ۱۱.۳: تصویر دستگاه اکتساب داده

SENSEBOX 7021, $\pm 3g$, 130 dB @ 0,1 – 120 Hz,
135 dB @ 0,1 – 10 Hz, Uniaxial Accelerometer

SENSEBOX 7023, $\pm 3g$, 130 dB @ 0,1 – 120 Hz,
135 dB @ 0,1 – 10 Hz, Triaxial Accelerometer

شكل ١٢.٣: مشخصات سنسورها

فصل ۴

سازه‌های نمونه مورد مطالعه

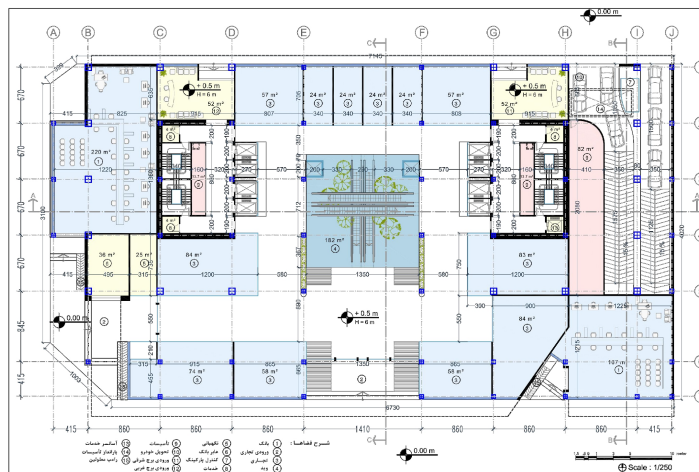
برای انجام بخش عملی این پایان نامه که شامل تست‌های ارتعاش محیطی می‌باشد، سه ساختمان مد نظر قرار گرفتند که در این فصل به معرفی آنها می‌پردازیم. وجوه مشترک در بین سازه‌های انتخابی، فلزی بودن اسکلت آنها بود و اینکه هیچکدام به مرحله بهره‌برداری نرسیده بودند و این مساله تا حدودی انجام مطالعات را تسهیل نموده بود.

مسئله دیگر این بود که هر کدام از این سه سازه در مراحل مختلفی از ساخت قرار داشتند و هر یک دارای سیستم سازه‌ای خاص و منحصر به خود داشت. در قسمت اول این فصل، به مشخصات کلی سازه‌ها اشاره شده و سپس به مشخصات جزئی‌تر آنها اشاره خواهد شد و نقشه‌های معماری و جانمایی سنسورها در آن نمایش داده می‌شود.

۱.۴ ساختمان کوه نور

این ساختمان در میدان جانباز شهر مشهد در زمینی به مساحت ۲۴۸۲ مترمربع و با زیربنای ۶۵۲۲۷ مترمربع ساخته شده است، تعداد ۶ طبقه زیرزمین و ۲۵ طبقه روی زمین قرار دارند. تصویری از نما و پلان این ساختمان در شکل ۱.۴ نشان داده شده است. کاربری این ساختمان مختلط بوده است. تراز منفی این سازه ۵.۲۲- متر و

تراز مثبت آن ۴.۱۲۶ متر می‌باشد. این سازه دارای اسکلت فلزی بوده که برای مقاومت در برابر بارهای جانبی از دو هسته بتنی که در دو طرف بطور متقارن قرار گرفته و بوسیله خریاهایی در چهار طبقه در ترازهای فوقانی به یکدیگر وصل شده‌اند، بعلاوه از مهاربندهای پیرامونی (*Mega Brace*) نیز استفاده شده است.

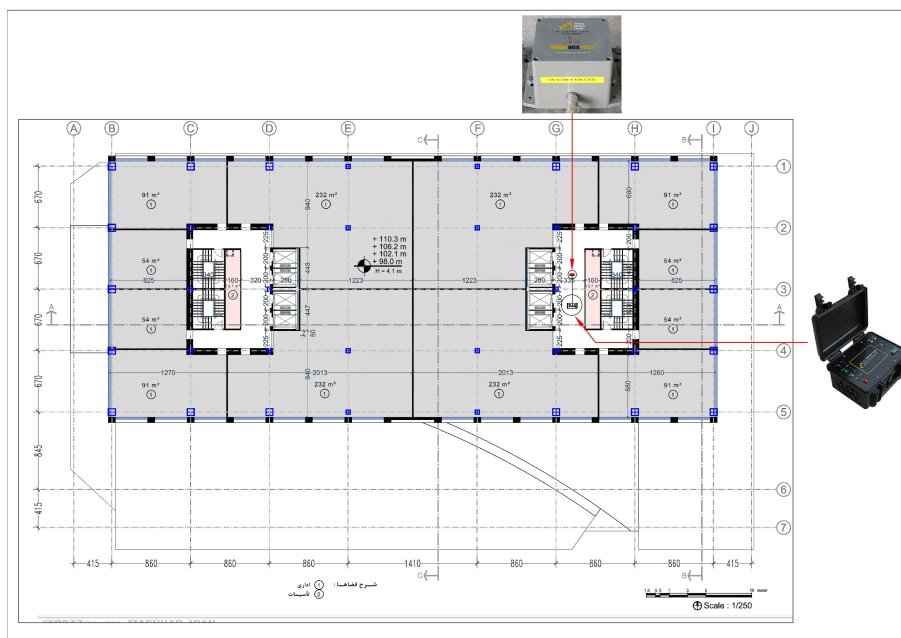


شکل ۱.۴: نمایی از پروژه‌ی کوه نور

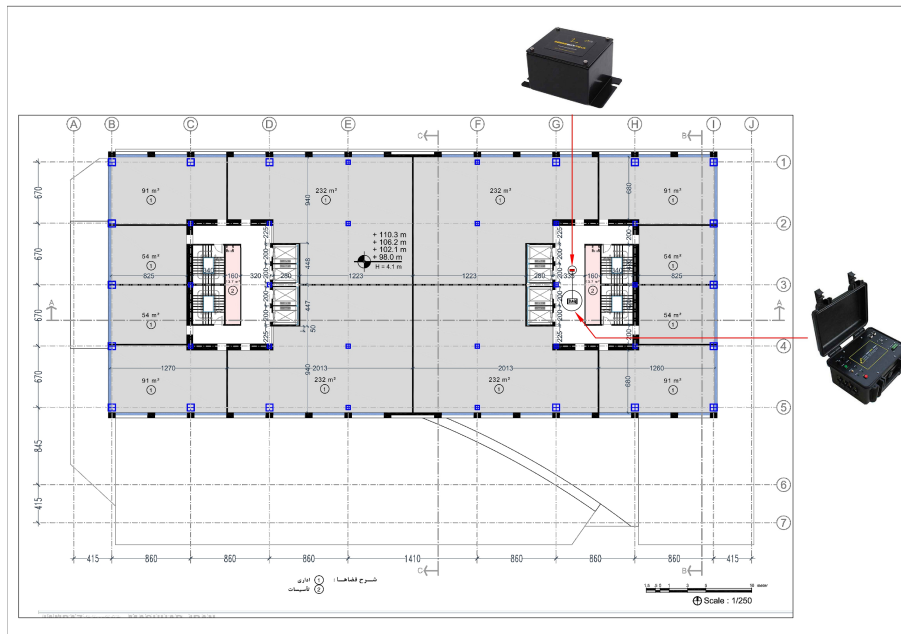
بزرگ‌ترین چالش در انجام تست‌های این پایان‌نامه، در این ساختمان بوجود آمد و آن هم محدودیت تعداد سنسورها و طول سیم‌ها بود و با توجه به ارتفاع سازه باید برای آن فکری صورت می‌گرفت. جانمایی سنسورها در شکل‌های ۲.۴، ۳.۴ و ۴.۴ نشان داده شده است. با توجه به اینکه امکان برداشت از کل طبقات در یک زمان واحد امکان‌پذیر نبود، تصمیم به جابجایی سنسورها در طبقات گرفتیم و با توجه به تعداد سنسورهای در دسترس که سه عدد بیشتر نبودند و طول سیم‌های آنها که ۱۵ متر بود به شیوه‌ی زیر عمل کردیم:

از طبقه ۲۴ام ساختمان شروع کرده و یک سنسور در این تراز نصب گردید، سنسور بعدی به همراه دستگاه اکتساب

داده را در طبقه ۲۲م قرار داده و یک سنسور در طبقه ۲۰م به کف چسبانده شد. با این چیدمان هر رکورد در این تست ارتعاش محیطی سه طبقه را در بر می‌گرفت که پس از اتمام تست، جهت سنسورها را در راستای عمود بر جهت اولیه برگردانده و تست تکرار می‌شد. در مرحله بعد، سنسورها در طبقات ۲۴ و ۲۲ را از کف جدا کرده و به طبقات ۱۸ و ۱۶ منتقل می‌شد ولی سنسور در طبقه ۲۰م بعنوان سنسور مرجع برای تست بعدی باقی می‌ماند. در این مرحله برداشت در سه طبقه ۱۸، ۲۰ و ۱۶ صورت گرفته و در دو راستای عمود بر هم تست صورت می‌گرفت. به همین ترتیب تا رسیدن به طبقات پائین ساختمان این پراشت‌ها انجام شده و هر تست با تست بعدی دارای یک سنسور مشترک بود که برای هم‌پایه کردن برداشت‌ها استفاده شده است.



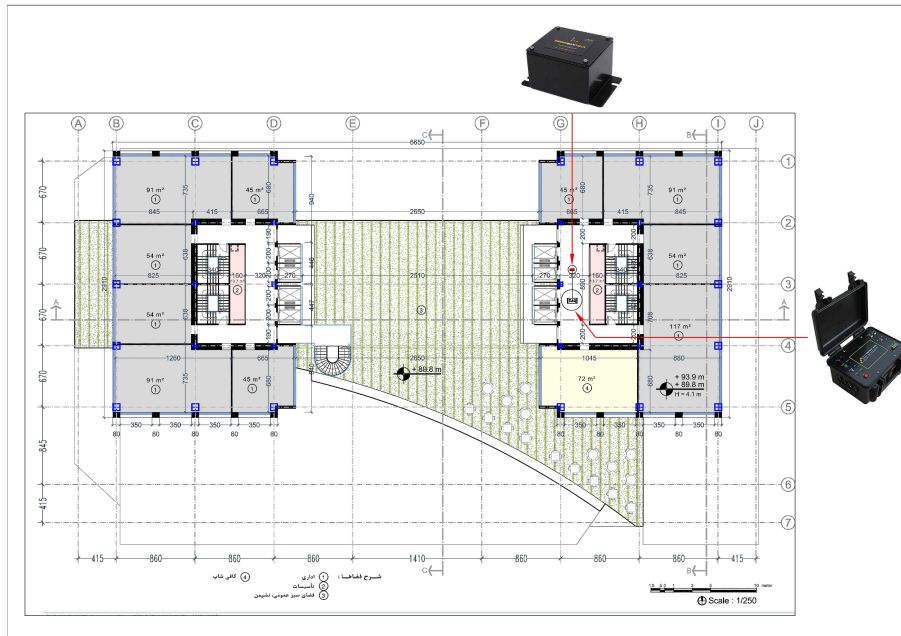
شکل ۲.۴: جانمایی سنسور در طبقه ۲۴م از پروژه‌ی کوه نور



شکل ۳.۴: جانمایی سنسور در طبقه ۲۲ام از پروژه کوه نور

برای این ساختمان در تراز طبقه ۲۴ام تستی صورت گرفت که نشان دهد آیا دال کف در نقاط مختلف آن رفتار دیاگرام صلب دارد یا خیر. مشخصات تست و چیدمان سنسورها بدین صورت در نظر گرفته شد که هر سه سنسور را در نقاط مختلف طبقه ۲۴ام قرار داده و رکورد برداشت شده در دو راستای طولی و عرض ساختمان را با یکدیگر مقایسه کرده و نتایج بدست آمده نشان داد که شتاب‌های برداشت شده در یک طبقه از سنسورهای مختلف از تشابه خوبی برخوردار بودند و در نتیجه برای تست ارتعاش محیطی این ساختمان می‌توان برای هر طبقه تنها از یک سنسور بهره برد.

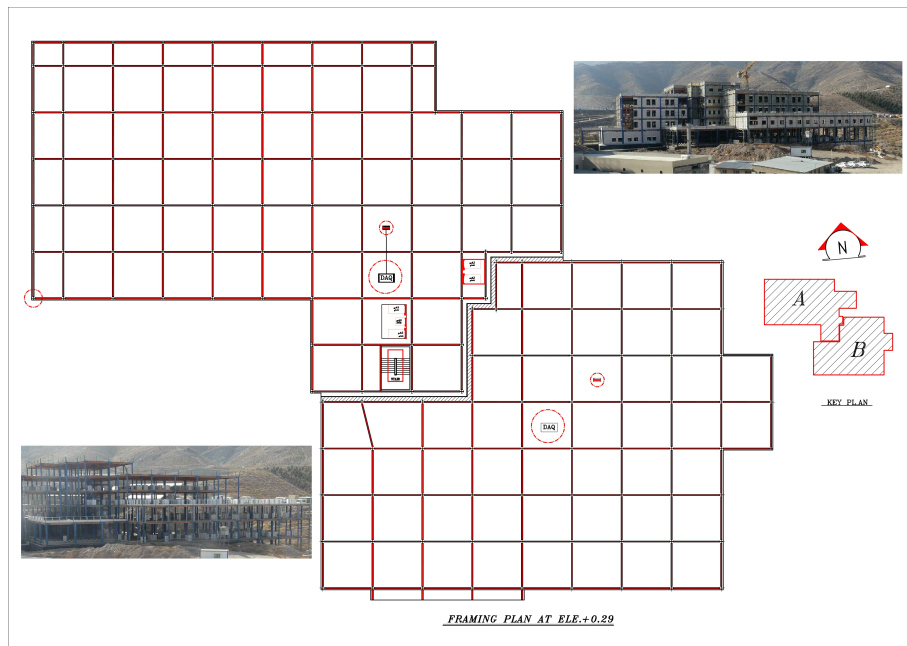
۱.۱.۴ پلان و نما



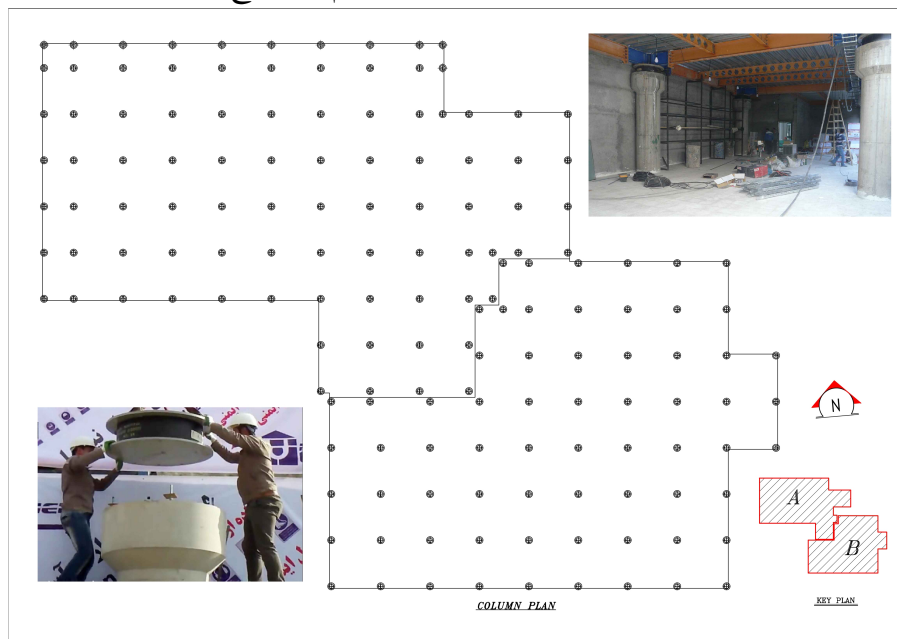
شکل ۴.۴: جانمایی سنسور در طبقه ۲۰ام از پروژه‌ی کوه نور

۲.۴ ساختمان بیمارستان امام حسین (ع)

این بیمارستان با زیربنای ۳۰۰۰۰ مترمربع در ۶ طبقه در قسمت غربی شهر مشهد بصورت دو بلوک به فاصله ۳۵ سانتی متری از هم قرار گرفته بودند، که در زمان انجام تست‌ها در وضعیت سفت‌کاری قرار داشت. نمایی از این ساختمان در شکل ۵.۴ نشان داده شده است. این سازه دارای اسکلت فلزی بوده و بر روی جداساز بنا شده بود. تراز منفی این سازه ۶۵.۴- متر و تراز مثبت آن که همان بام ساختمان است در ارتفاع ۷۵.۲۳ متری از سطح زمین قرار داشت. تصاویر جداسازهای بکار رفته در ساختمان این بیمارستان در شکل ۶.۴ نشان داده شده است.



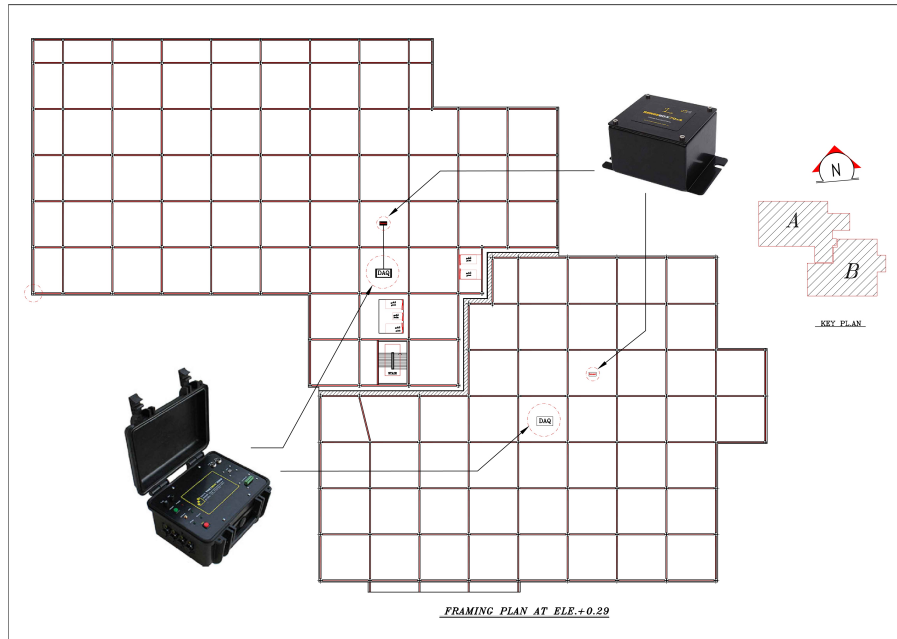
شکل ۵.۴: نمایی از بیمارستان امام حسین (ع)



شکل ۶.۴: نمایی از جداسازهای بکا رفته در بیمارستان امام حسین (ع)

تست ارتعاش محیطی بر روی سازه بیمارستان که بنام امام حسین (ع) نامگذاری شده بود، صورت گرفت. این

ساختمان بر روی جداسازهایی با هسته سربی^۱ و همچنین جداساز با میرایی زیاد^۲ که توسط شرکت رابینسون ساخته شده بود، مورد استفاده قرار گرفته بود. در این ساختمان از ۵۵ عدد جداساز با هسته سربی و همچنین ۸۸ عدد جداساز با میرایی زیاد استفاده شده بود. قطر جداسازهای بکار رفته ۸۰ سانتی‌متر و هسته سربی آنها دارای قطری معادل ۲۰ سانتی‌متر داشت.

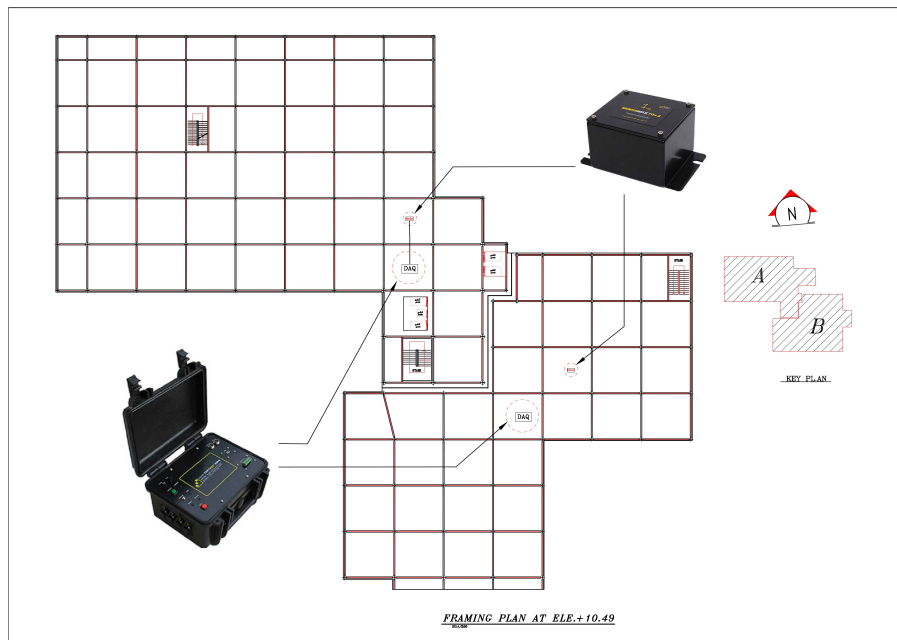


شکل ۷.۴: جانمایی سنسور در تراز ۲۹.۰ از بیمارستان امام حسین (ع)

با توجه به تعداد طبقات سازه‌ی بیمارستان و طول سیم‌ها امکان برداشت رکوردها در هر راستا در یک تست امکان‌پذیر بود، فلذا برای روسازه دو تست برای هر کدام از بلوک‌ها انجام شده که در مجموع چهار رکورد برای تست ارتعاش محیطی سازه‌ی بیمارستان بدست آمد. با توجه به اینکه از سه عدد سنسور در این تست استفاده شده بود و قصد بر این بود که کل روسازه را در یک زمان رکورد کنیم، در طبقات اول، سوم و پنجم سنسورها را نصب کرده و بعد از برداشت در راستای طولی سازه، سنسورها را ۹۰ درجه چرخانده و تست در راستای عرضی سازه تکرار شد. جانمایی سنسورها در اشکال ۷.۴، ۸.۴ و ۹.۴ نشان داده شده است.

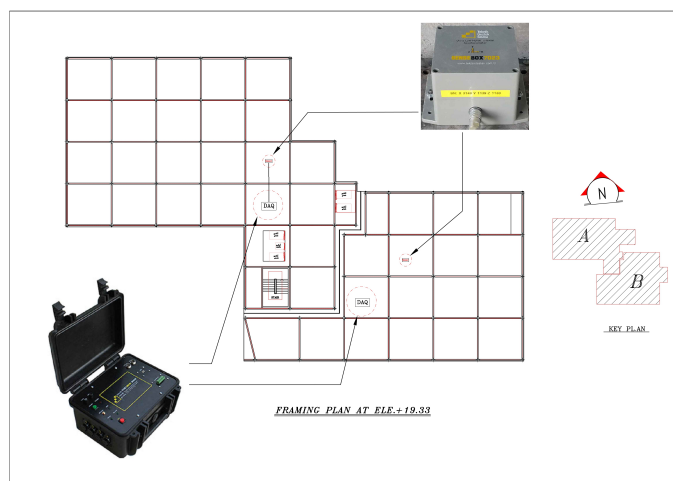
¹Lead Rubber Bearing

²High Damping Rubber Bearing



شکل ۸.۴: جانمایی سنسور در تراز ۴۹.۱۰ از بیمارستان امام حسین (ع)

۱.۲.۴ پلان و نما



شکل ۹.۴: جانمایی سنسور در تراز ۳۳.۱۹ از بیمارستان امام حسین (ع)

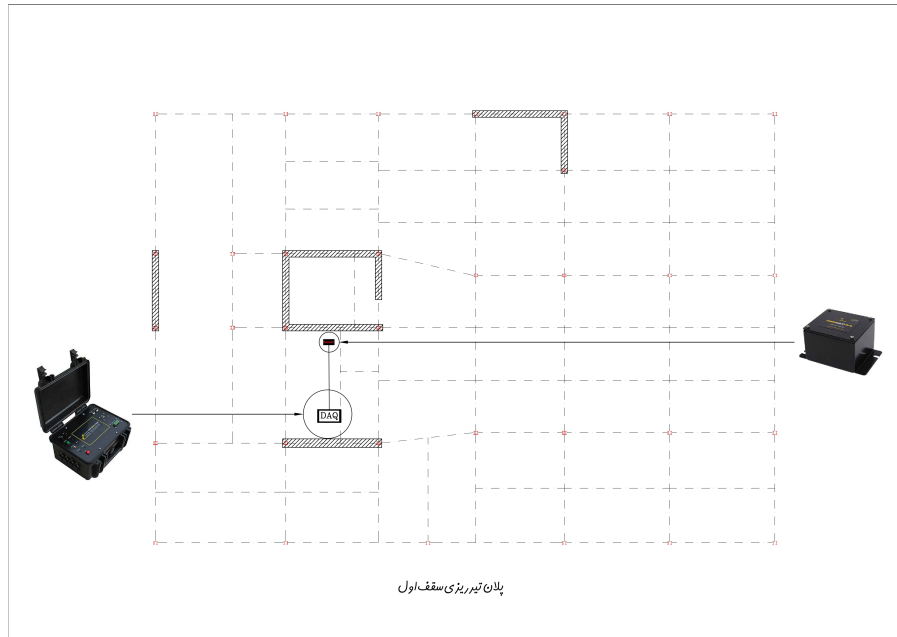
۳.۴ ساختمان مسکونی محمدیه ۵

این ساختمان از لحاظ ارتفاع و کاربری جزء متداول‌ترین سازه‌های ساخته شده در سطح کشور می‌باشد و به همین دلیل یکی از انتخاب‌ها را به خود اختصاص داده بود. ساختمانی شش طبقه با کاربری مسکونی که از اسکلت فلزی به همراه دیوار برشی بتنی استفاده شده بود و در بلوار محمدیه شهر مشهد در مراحل پایانی نازک‌کاری قرار داشت. نمایی از این ساختمان در شکل ۱۰.۴ نشان داده شده است.

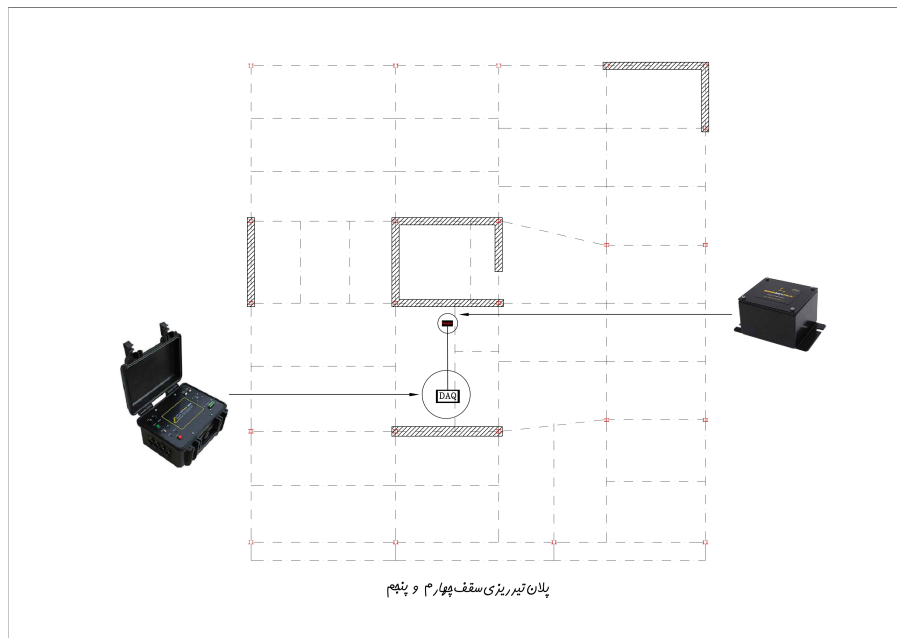


شکل ۱۰.۴: نمایی از پروژه‌ی محمدیه ۵

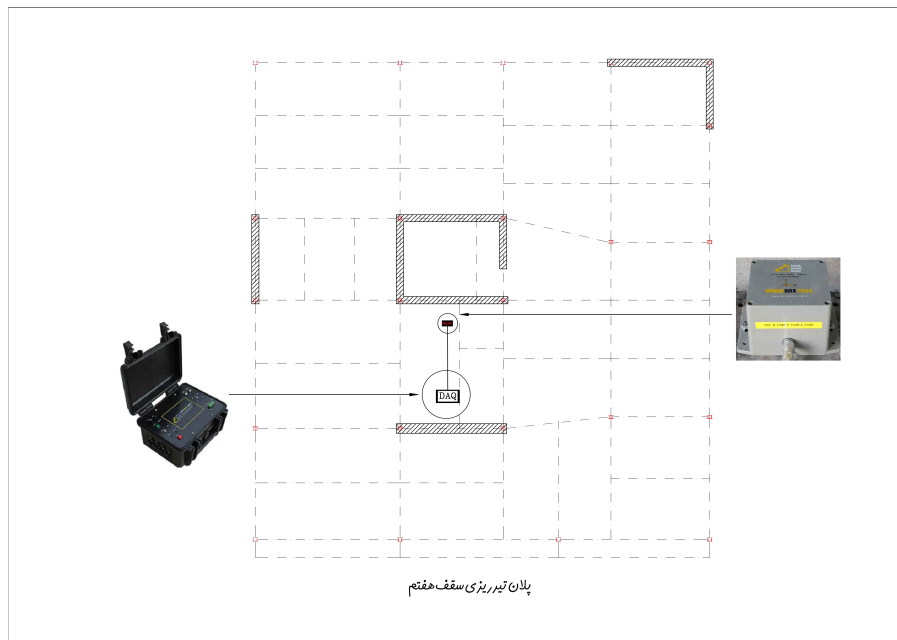
برای تست ارتعاش محیطی این ساختمان، در ترازهای طبقه بام، طبقه سوم و طبقه هم‌کف سنسورها نصب شده و رکورد در دو راستای طولی و عرضی ساختمان برداشت شد. جانمایی سنسورها در اشکال ۱۱.۴، ۱۲.۴ و ۱۳.۴ نشان داده شده است. این ساختمان در مراحل پایانی نازک‌کاری قرار داشت و در روند اجرایی از دو سازه‌ی مورد تست دیگر جلوتر بود.



شکل ۱۱.۴: جانمایی نصب سنسور در طبقه هم کف از پروژه ی محمدیه ۵



شکل ۱۲.۴: جانمایی نصب سنسور در طبقه سوم از پروژه ی محمدیه ۵



شکل ۱۳.۴: جانمایی نصب سنسور در طبقه بام از پروژه‌ی محمدیه ۵

فصل ۵

مدل سازی

جایگاه مدل سازی و گرفتن پاسخ از آن همواره دارای عدم قطعیت های گوناگونی بوده است. امروزه با گسترش و ارتقای تجهیزات ابزار دقیق، اکتفا به خروجی های نرم افزار در جایی که نیاز به دقت بالایی باشد، دارای خطای زیادی خواهد بود. این امر در برخی موقعیت ها خود را بیشتر نمایان می کند، از جمله ارزیابی مقاومت سازه برای مشخص کردن ریسک سازه جهت بیمه و یا بهسازی سازه ها که بتوان با قطعیت اعلام کرد مقاومت سازه به چه مقدار افزایش یافته است و مورد دیگر سازه هایی که یک زلزله را تجربه کرده اند و برای استقرار مجدد ساکنین باید دانست که سازه تحت زلزله چه مقدار از مقاومت و یا سختی خود را از دست داده است.

عدم قطعیت بعدی در خصوص عدم اندازه گیری دقیق بارهای مرده و زنده ساختمان است و ما بر طبق آئین نامه بارگذاری مقادیری را در نظر می گیریم. با توجه به آنکه در بسیاری موارد حین اجرا این اعداد دستخوش تغییرات می شود و ضرایب بار و مقاومت هم سعی در دست بالا بودن طرح ها دارند. اما در مواقعی از جمله موارد ذکر شده در پاراگراف بالا، مقاومت دقیق سازه مد نظر می باشد.

ما در این تحقیق علیرغم مطالب ذکر شده در بالا، برای اینکه بتوانیم به مقدار اختلاف بدست آمده در خروجی های نرم افزار که همان روش تحلیلی می باشد و روش عددی، ناگزیر به مدل سازی شده ایم. برای ایجاد مدل های تحلیلی از سازه های مورد مطالعه، از نرم افزارهای *OPENSEES* و *ETABS* استفاده

شده است. در این فصل با استفاده از مدل های تحلیلی، پارامترهای مودال این سازه ها بدست آمده است.

۱.۵ مقدمه

کاربردهای وسیعی از سنسورهای بی سیم و با سیم در پایش سلامت سازه های مختلف در حیطه مهندسی عمران دنبال می شود. مدل سازی یک بخش مهمی در روند پایش سلامت سازه محسوب می شود. داده های اندازه گیری شده بصورتی هستند که نمی توان به کمک آنها محل و نوع عیب ها را در سازه مشخص کرد.

این داده ها نیازمند پس پردازش از طریق ابزارهای ریاضی قوی هستند که داده های اندازه گیری شده در کمیت های معنادار که نه تنها به مشخص کردن محل عیب ها کمک می کند، بلکه مقدار آنها را نیز کمی می کند. تکنیک های مدل سازی عمومی روش اجزاء محدود (FEM) قابلیت مدل کردن هندسه های پیچیده را دارند. بهر حال، هنگامی که اندازه عیب کوچک باشد، ضروری است که از سیگنالی با محتوای فرکانسی بسیار بالا بهره ببریم. در فرکانسهای بالاتر، طول موج ها خیلی کم هستند و ضروری است که اندازه مش های بکار رفته در روش اجزاء محدود متناسب با طول موج باشد. توصیه های کلی پیشنهاد استفاده از ۸ تا ۱۰ المان در طول موج تغییر شکل برای استخراج صحیح پدیده موج و اندر کنش آنها با عیب ها می باشد. بنابراین روش اجزاء محدود نیازمند استفاده از مش های بسیار ریز برای این قبیل مسائل است، که منتج به زمان محاسبه بسیار زیاد برای گرفتن نتایج صحیح می شود.

مدل ریاضی مناسب برای این قبیل مسائل اول برپایه روشهای انتشار موج و فراگیرترین آنها روش اجزاء محدود طیفی (SFEM) می باشد [۹].

در برخی از موارد، در کارهای بهسازی به خصوص در سازه های بتنی با توجه به عمری که از بتن گذشته و عدم یکسان بودن نتایج کرگیری یا آزمایش های غیرمخرب از تکنیک بهنگام سازی مدل^۱ استفاده می کنند که پس از تست ارتعاش محیطی و استخراج مشخصه های سازه، مدل ساخته شده را با مقاومت های مختلف آنقدر سعی و خطا می کنند تا به مقدار نتایج بدست آمده از تست برسد و این مقدار مقاومت بتن را به عنوان مبنا در تحلیل سازه و کارهای بهسازی بعدی مد نظر قرار می دهند.

¹Model Updating

در انجام کلیه تحلیل های این فصل با توجه به نوع کار انجام شده که تست ارتعاش محیطی می باشد، سازه ها همگی در محدوده خطی قرار دارند و نیاز به استفاده از تحلیل های غیرخطی نمی باشد. این مساله باعث می شود دقت تحلیل ها بسیار بالا باشد.

البته در صورتی که بخواهیم از این تکنیک برای عیب یابی در سازه استفاده شود، ناگزیر به استفاده از روش های غیرخطی هستیم. با توجه به نرم افزارهای بکار رفته در این پایان نامه که در بخش ابتدایی فصل بدان اشاره شد، از روش های تحلیل ماتریسی برای حل معادلات استفاده می شود، بنابراین، مشخصه های سازه را با روش *EigenValueProblem* بدست آورده شده است. از نرم افزار مخصوص آنالیز مودال تحت عنوان آرتمیس^۱ در این تحقیق برای تحلیل مودال بهره برداری در حوزه زمان و فرکانس استفاده شده است. نتایج سه روش از تجزیه حوزه فرکانس و یک روش از شناسایی زیرفضای اتفاقی با یکدیگر مقایسه شده و مورد تحلیل قرار گرفته اند.

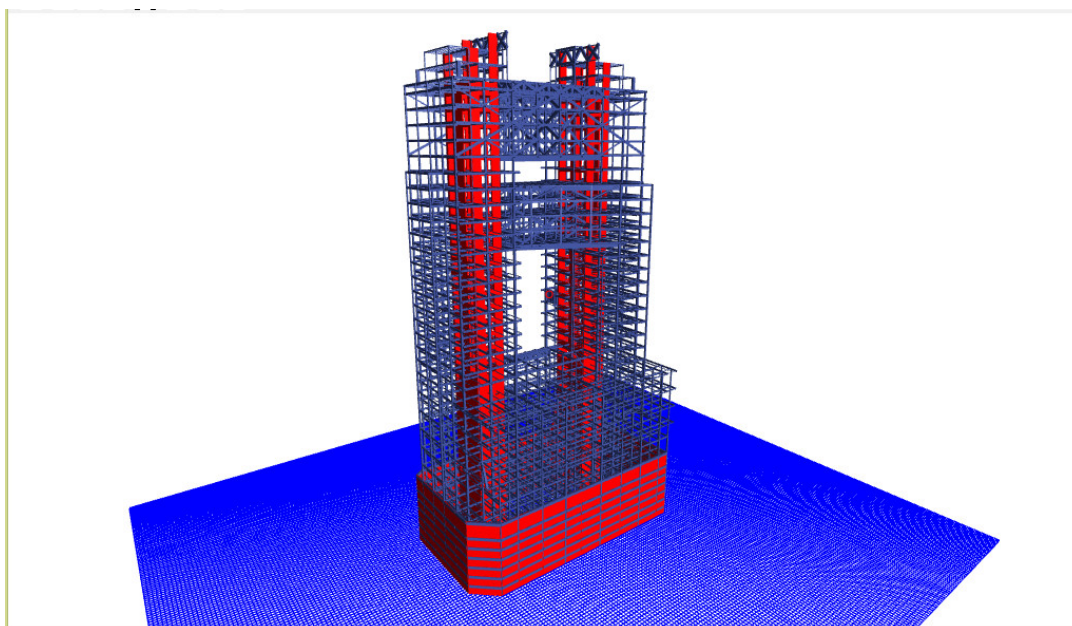
۲.۵ پروژه کوه نور

این پروژه با توجه به ابعاد پلان و ارتفاع و اینکه دارای تعداد المان های بسیار زیادی بوده است و قصد ما در اینجا مقایسه با نتایج حاصل از تست های ارتعاش محیطی می باشد و در زمان انجام تست، سازه ها تحت اثر کامل بارگذاری نبوده اند در نتیجه باید شرایط یکسانی در انجام هر دو نوع تحلیل (عددی، تجربی) حاکم باشد.

۱.۲.۵ نتایج مدل تحلیلی

نتایج آنالیز مودال از مدل تحلیلی بدست آمده از سازه، با توجه به ابعاد و حجم المانهای آن امکان مدل سازی در *OpenSEES* وجود نداشت فلذا نرم افزار *ETABS* بکار گرفته شد. تصاویری از این مدل سازی در شکل ۱.۵ نشان داده شده است.

^۱ARTEMIS Modal PRO



شکل ۱.۵: مدل سازه کوه نور در نرم افزار

جدول ۱.۵: فرکانس ها و پریودهای بدست آمده از نرم افزار ETABS

Modes	Frequency(Hz)	Period (Sec)	Damping(%)	State
First	0.415	2.41	-	Torsional (Rz)
Second	0.589	1.697	-	Local
Third	0.831	1.203	-	Translational (X)
Fourth	1.045	0.957	-	Translational (Y)
Fifth	1.095	0.913	-	Translational (Y)
Sixth	1.121	0.892	-	Translational (Y)
Seventh	1.453	0.688	-	Torsional (Rz)

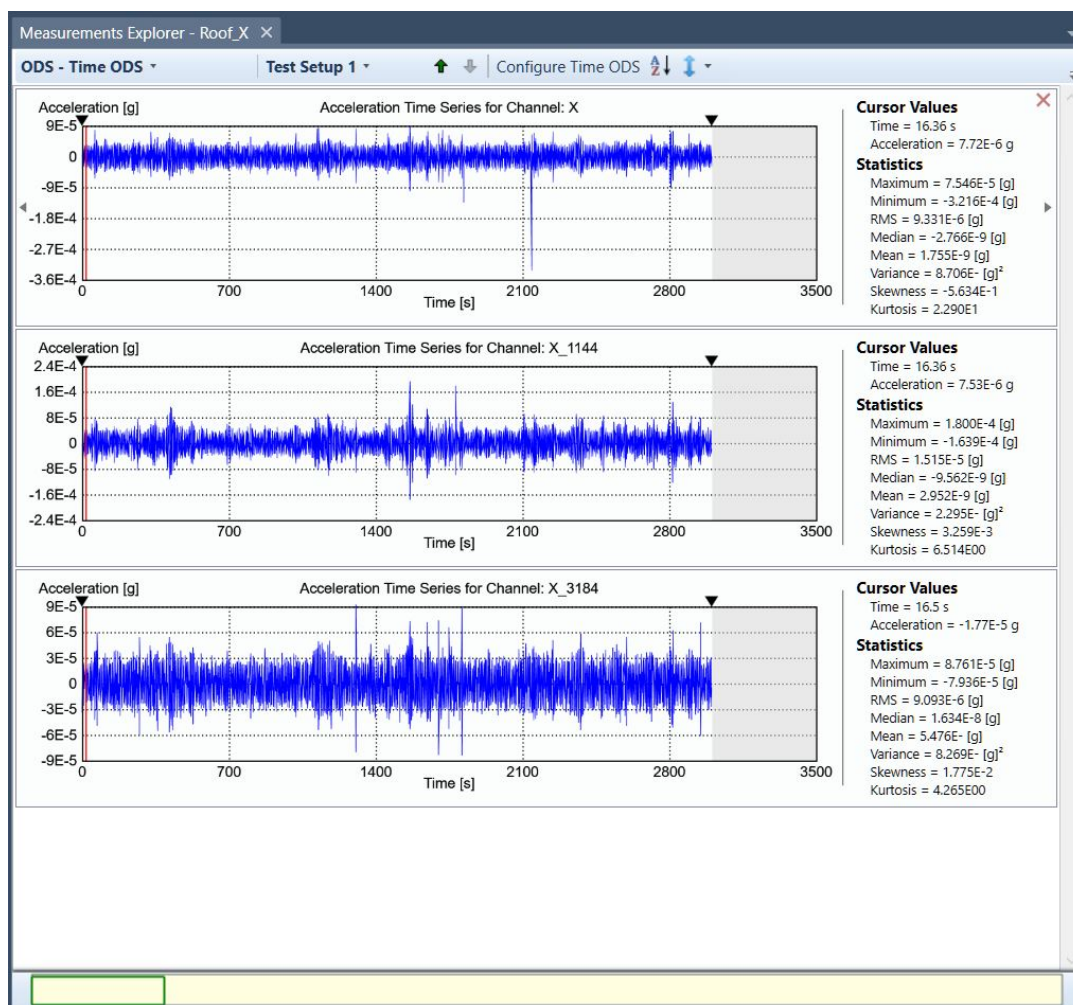
خروجی نتایج تحلیلی از مدل ساخته شده در جدول ۱.۵ نشان داده شده است.

۲.۲.۵ نتایج مدل تجربی:

در پایش سازه‌ای مانند ساختمان کوه نور که دارای تعداد طبقات زیاد می‌باشد و همچنین تعداد سنسورهای موجود و دستگاه اکتساب داده چهار کاناله، ناگزیر کار پایش را در چند نوبت و هر بار چند طبقه، دنبال کردیم. با توجه به تعداد طبقات این ساختمان بطور کلی تست خود را در هر نوبت با کارگذاری سنسورها در سه طبقه و بین هر سنسور فاصله دو طبقه‌ای با توجه به محدودیت طول سیم‌ها گذاشته شد و عملاً در هر تست چهار طبقه مورد تست قرار گرفت. تنها در طبقه بام این ساختمان یک تست مجزا با استقرار سنسورها در موقعیت‌های مختلف صورت گرفت.

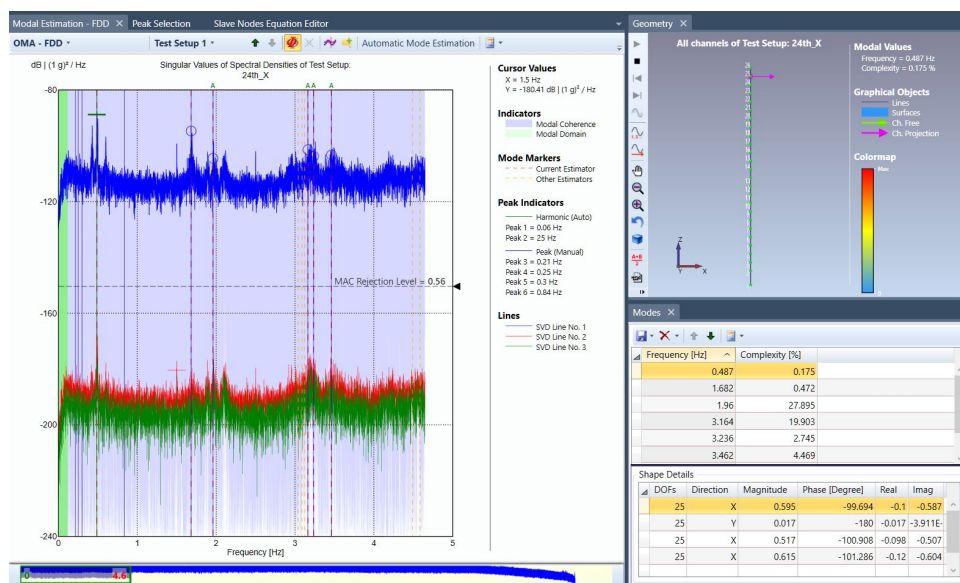
تنها راهی که به ذهن محقق این تست متبادر شد، قرار دادن یک سنسور مشترک در بین هر دو تست متوالی بود، بدین صورت که برای هر تست سنسور قرار گرفته در پائین‌ترین طبقه در تست بعدی بدون تغییر بعنوان بالاترین سنسور در نظر گرفته شد تا بتوان بعنوان معیاری جهت صحت سنجی تست‌ها در نظر گرفت. هر تست در دو راستای عمود بر هم با یک مدت زمان یکسان که جهت‌های اصلی ساختمان بود، مورد بررسی و تست قرار گرفت. موقعیت قرارگیری سنسورها در کف طبقات، سعی شد تا حد امکان در مرکز سطح طبقات و همه در یک راستای قائم قرار گیرند. بطور کلی تمامی تست‌های میدانی در راستاهای طولی و عرضی ساختمان صورت پذیرفته و بر این اساس نتایج هر راستا بصورت مجزا بدست آمده است، مشابه آنچه در شکل ۲.۵ نشان داده شده است. در ابتدا از تست‌های طبقات بالا شروع کرده و با چیدمان گفته شده، نتایج مورد بررسی قرار داده شده است. رکوردهای بدست آمده از تست ارتعاش محیطی را مورد بررسی قرار داده و به استخراج ویژگی و پس پردازش آنها می‌پردازیم.

نامگذاری سنسورها بدین قرار صورت گرفت که برای سنسور سه محوره که تنها از دو محور صفحه‌ای آن استفاده شد، X و Y و برای دو سنسور تک محوره اسامی $X - ۱۱۴۴$ و $X - ۳۱۸۴$ انتخاب شدند. نرخ نمونه برداری ها ۱۰۰ و ۲۰۰ هرتز با توجه به شرایط سخت افزار و معیار نایکوئیست در نظر گرفته شد.



شکل ۲.۵: رکوردهای بدست آمده از طبقه ی ۲۴ ام ساختمان در راستای طولی

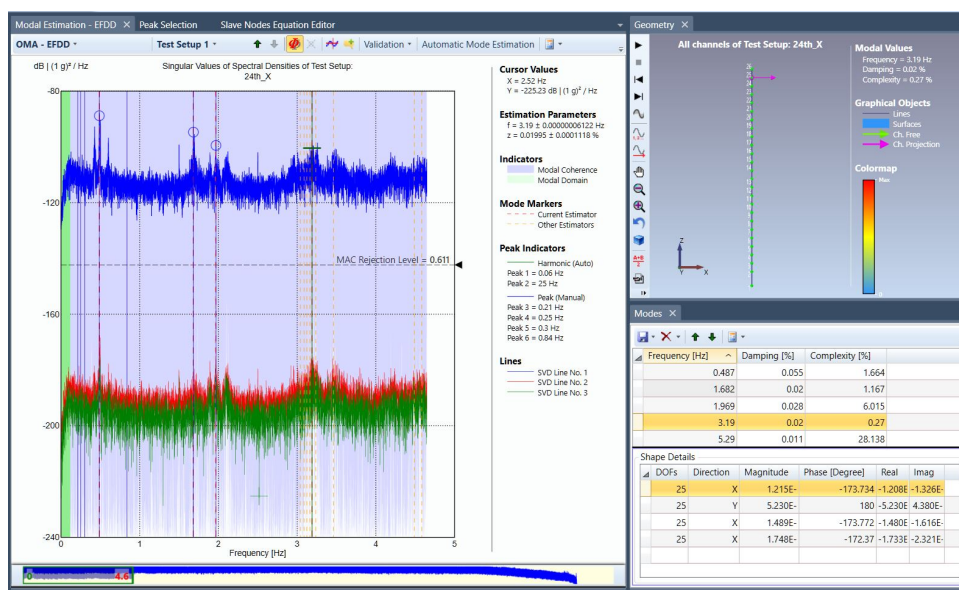
با بردن این رکوردها از حوزه زمان به حوزه فرکانس و استفاده از تکنیک تجزیه حوزه فرکانس، مقادیر فرکانس مودی سازه در راستای مورد نظر بدست آمده است که در شکل (۳.۵) نشان داده شده است.



شکل ۳.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس

جدول ۲.۵: فرکانس‌ها و پریودهای بدست آمده از نرم افزار به روش FDD

Modes	Frequency(Hz)	Period (Sec)	Damping(%)
First	0.487	2.053	-
Second	1.682	0.594	-
Third	1.96	0.51	-
Fourth	3.164	0.316	-
Fifth	3.462	0.288	-



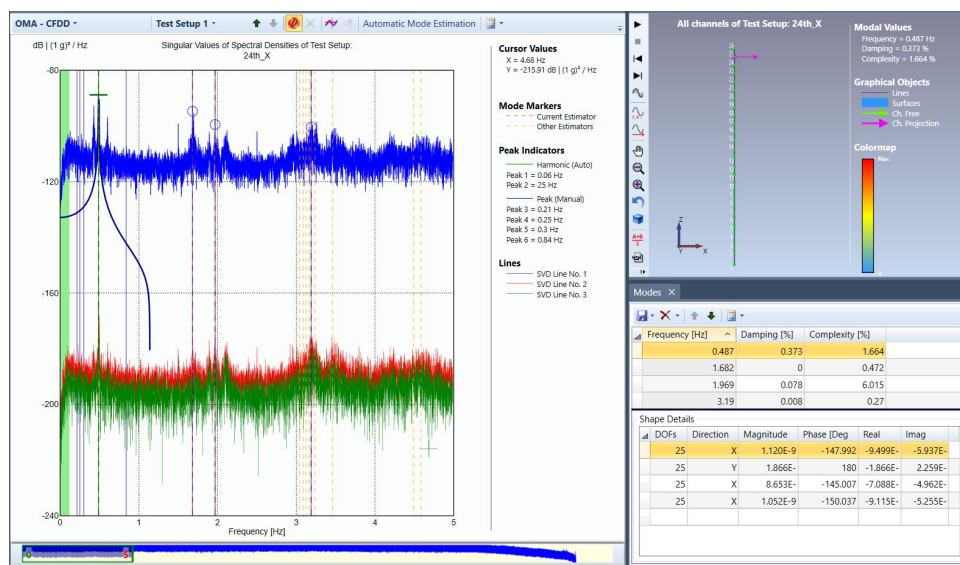
شکل ۴.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر

جدول ۳.۵: فرکانس ها و پریودهای بدست آمده از نرم افزار به روش EFDD

Modes	Frequency(Hz)	Period (Sec)	Damping(%)
First	0.487	2.053	0.055
Second	1.682	0.594	0.02
Third	1.969	0.51	0.028
Fourth	3.19	0.316	0.02
Fifth	5.29	0.288	0.011

این بار از تکنیک تجزیه حوزه فرکانس مؤثر استفاده شده که علاوه بر مقادیر فرکانس، مقادیر نسبت میرایی

مودی را هم بدست آورده است که در شکل (۴.۵) نشان داده شد است.

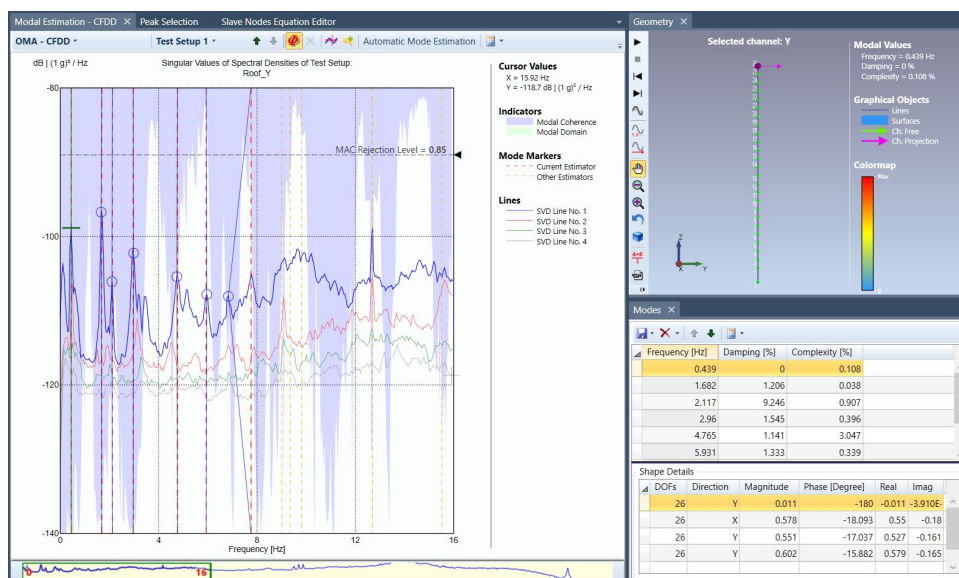


شکل ۵.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط

آخرین روش حوزه فرکانس، روش حوزه فرکانس مختلط می باشد که نتایج بدست آمده که در شکل (۵.۵) نشان داده شده است.

جدول ۴.۵: فرکانس ها و پریودهای بدست آمده از نرم افزار به روش CFDD

Modes	Frequency(Hz)	Period (Sec)	Damping(%)
First	0.487	2.053	0.373
Second	1.682	0.594	0
Third	1.969	0.51	0.078
Fourth	3.19	0.316	0.008



شکل ۶.۵: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

در روش شناسایی تصادفی زیرفضا^۱ SSI که در شکل (۶.۵) نشان داده شده است، جزء روش های حوزه زمان می باشد.

^۱Stochastic Subspace Identification

جدول ۵.۵: فرکانس ها و میرایی بدست آمده از رکوردهای طبقه ۲۴م در راستای طولی ساختمان کوه نور

Modes	Method	Frequency(Hz)	Period(Sec)	Damping(%)
First	SSI/UPC	0.895	1.117	1.793
	SSI/CVA	0.895	1.117	1.138
	SSI/PC	2.201	0.454	2.749
Second	SSI/UPC	1.009	0.991	8.978
	SSI/CVA	2.156	0.464	2.501
	SSI/PC	2.542	0.393	1.934
Third	SSI/UPC	2.19	0.456	3.537
	SSI/CVA	2.529	0.395	1.696
	SSI/PC	3.142	0.318	2.162
Fourth	SSI/UPC	2.562	0.39	2.125
	SSI/CVA	5.026	0.199	2.49
	SSI/PC	5.051	0.198	1.943

مقایسه ی بین نتایج بدست آمده از روش های عددی در حوزه زمان و فرکانس در زیر نشان داده شده است.

روش های ^۱UPC و ^۲PC و ^۳CVA و ^۴UPCX و همچنین در حوزه فرکانس روش های ^۵FDD و ^۶EFDD و ^۷CFDD می باشند.

¹Unweighted Principal Component

²Principal Component

³Canonical Variate Analysis

⁴Extended Principal Component Anaysis

⁵Frequency Domain Decomposition

⁶Enhanced Frequency Domain Decomposition

⁷Curve-fit Frequency Domain Decomposition

جدول ۶.۵: فرکانس ها و میرایی های بدست آمده با روش های مختلف شناسایی زیرفضای اتفاقی

Modes	Method	Frequency(Hz)	Period(Sec)	Damping(%)
First	SSI/UPC	0.895	1.117	1.793
	SSI/CVA	0.895	1.117	1.138
	SSI/PC	2.201	0.454	2.749
	SSI/UPCX	2.201	0.454	2.749
Second	SSI/UPC	1.009	0.991	8.978
	SSI/CVA	2.156	0.464	2.501
	SSI/PC	2.542	0.393	1.934
	SSI/UPCX	2.201	0.454	2.749
Third	SSI/UPC	2.19	0.456	3.537
	SSI/CVA	2.529	0.395	1.696
	SSI/PC	3.142	0.318	2.162
	SSI/UPCX	2.201	0.454	2.749
Fourth	SSI/UPC	2.562	0.39	2.125
	SSI/CVA	5.026	0.199	2.49
	SSI/PC	5.051	0.198	1.943
	SSI/UPCX	2.201	0.454	2.749

جدول ۷.۵: فرکانس ها و میرایی بدست آمده با روش های مختلف در حوزه فرکانس

Modes	Method	Frequency(Hz)	Period(Sec)	Damping(%)
First	FDD	0.895	1.117	1.793
	EFDD	0.895	1.117	1.138
	CFDD	2.201	0.454	2.749
Second	FDD	1.009	0.991	8.978
	EFDD	2.156	0.464	2.501
	CFDD	2.542	0.393	1.934
Third	FDD	2.19	0.456	3.537
	EFDD	2.529	0.395	1.696
	CFDD	3.142	0.318	2.162
Fourth	FDD	2.562	0.39	2.125
	EFDD	5.026	0.199	2.49
	CFDD	5.051	0.198	1.943

جدول ۸.۵: فرکانس ها و میرایی های بدست آمده با روش های مختلف شناسایی زیرفضای اتفاقی

Modes	Method	Frequency(Hz)	Period(Sec)	Damping(%)
First	SSI/UPC	0.895	1.117	1.793
	SSI/CVA	0.895	1.117	1.138
	SSI/PC	2.201	0.454	2.749
	SSI/UPCX	2.201	0.454	2.749
Second	SSI/UPC	1.009	0.991	8.978
	SSI/CVA	2.156	0.464	2.501
	SSI/PC	2.542	0.393	1.934
	SSI/UPCX	2.201	0.454	2.749
Third	SSI/UPC	2.19	0.456	3.537
	SSI/CVA	2.529	0.395	1.696
	SSI/PC	3.142	0.318	2.162
	SSI/UPCX	2.201	0.454	2.749
Fourth	SSI/UPC	2.562	0.39	2.125
	SSI/CVA	5.026	0.199	2.49
	SSI/PC	5.051	0.198	1.943
	SSI/UPCX	2.201	0.454	2.749

جدول ۹.۵: فرکانس ها و میرایی بدست آمده با روش های مختلف در حوزه فرکانس

Modes	Method	Frequency(Hz)	Period(Sec)	Damping(%)
First	FDD	0.895	1.117	1.793
	EFDD	0.895	1.117	1.138
	CFDD	2.201	0.454	2.749
Second	FDD	1.009	0.991	8.978
	EFDD	2.156	0.464	2.501
	CFDD	2.542	0.393	1.934
Third	FDD	2.19	0.456	3.537
	EFDD	2.529	0.395	1.696
	CFDD	3.142	0.318	2.162
Fourth	FDD	2.562	0.39	2.125
	EFDD	5.026	0.199	2.49
	CFDD	5.051	0.198	1.943

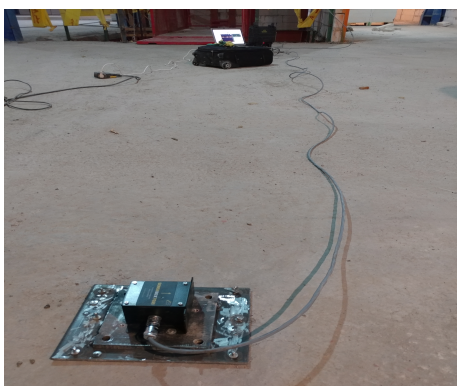
۳.۵ پروژه بیمارستان امام حسین (ع)

این پروژه بدلیل اینکه پس از سفت کاری چندین سال به حالت بلااستفاده درآمده بود و در زمان انجام تست ارتعاش محیطی بار نازک کاری روی ساختمان وارد نشده بود، برای تحلیل به کمک نرم افزار هم باید تنها بار نازک کاری به سازه وارد شود تا نتایج بدست آمده از تحلیل مودال مطابقت با شرایط تست ارتعاش داشته باشد.

۱.۳.۵ تست ارتعاش محیطی بیمارستان

برای انجام تست ارتعاش محیطی از دستگاه اکتساب داده به همراه سنسورهای شتاب سه محوره و تک محوره با تاییدیه کالیبراسیون بهره گرفته شد. با توجه به رجوع به منابع، مشخص شد که طول مدت زمان رکورد تست ارتعاش محیطی برای استخراج مشخصه های دینامیکی سازه باید بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ برابر پریود مود اول باشد. فرکانس نمونه برداری برای کارهای ساختمانی معمولاً با توجه به فرکانس نایکوئیست ۱۰۰ یا ۲۰۰ هرتز در نظر گرفته می شود که در این تست برابر ۱۰۰ هرتز در نظر گرفته شد.

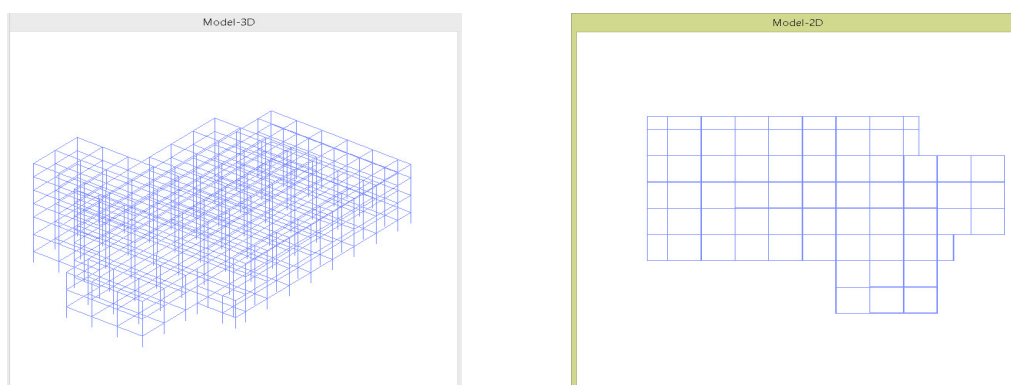
با توجه به محدودیت های موجود در رابطه با تعداد سنسورها (دو سنسور تک محوره و یک سنسور سه محوره) و همچنین طول کابل ها که ارتباط بین دستگاه اکتساب داده را با سنسورها برقرار میکرد، در هر دو کف پشت سر هم تنها یک سنسور در یک جهت بکار گرفته شد و ضبط داده در جهت عمود بر راستای اولیه با چرخاندن سنسورها به مقدار ۹۰ درجه مجدد صورت می گرفت. با توجه به تعداد طبقات روسازه و اینکه در نظر داشتیم در هر رکورد، داده های هر راستا در کل ارتفاع سازه را داشته باشیم، فلذا یک کف در میان از سنسور استفاده کردیم.



شکل ۷.۵: ۷.۵ (آ) تجهیزات تست ارتعاش محیطی، ۷.۵ (ب) سنسور تک محوره

۲.۳.۵ ایجاد مدل تحلیلی

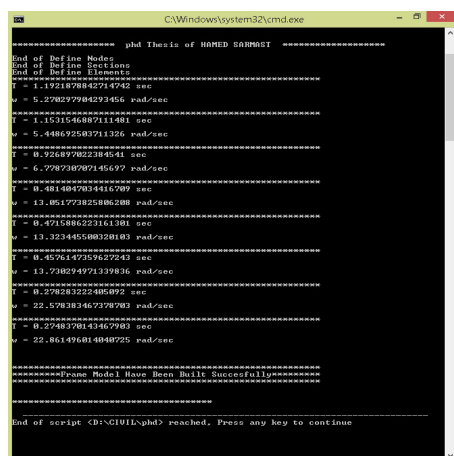
برای ایجاد مدل تحلیلی با توجه به در دست داشتن نقشه های چون ساخت^۱ از نرم افزار متن باز OpenSEES استفاده گردید. آنالیز مودال به کمک این نرم افزار با المان های فایبر خطی انجام گردید و مشخصات دینامیکی سازه استخراج گردید. جداسازهای با هسته سربی با استفاده از تعدادی مدل های تحلیلی، از سادگی مدل خطی معادل متشکل از سختی مؤثر و نسبت میرایی معادل که توسط هوآنگ در سال ۱۹۹۶ میلادی فرمول بندی شد تا پیچیدگی فرمولاسیون اجزای محدود که توسط سالومون در سال ۱۹۹۹ میلادی ایجاد شد، ارائه شده اند. اما، گسترده ترین مدل اتخاذ شده برای تحلیل سازه های با جداساز لرزه ای، چرخه هیسترتیک نیرو جابجایی دوخطی ایده آل سازی شده می باشد (Ali.etal., ۱۹۹۵) [۱].



(ب)

شکل ۸.۵: ۳.۵ (آ) پلان مدل سازی شده، ۳.۵ (ب) نمای سه بعدی مدل سازی شده

^۱As-Built



```

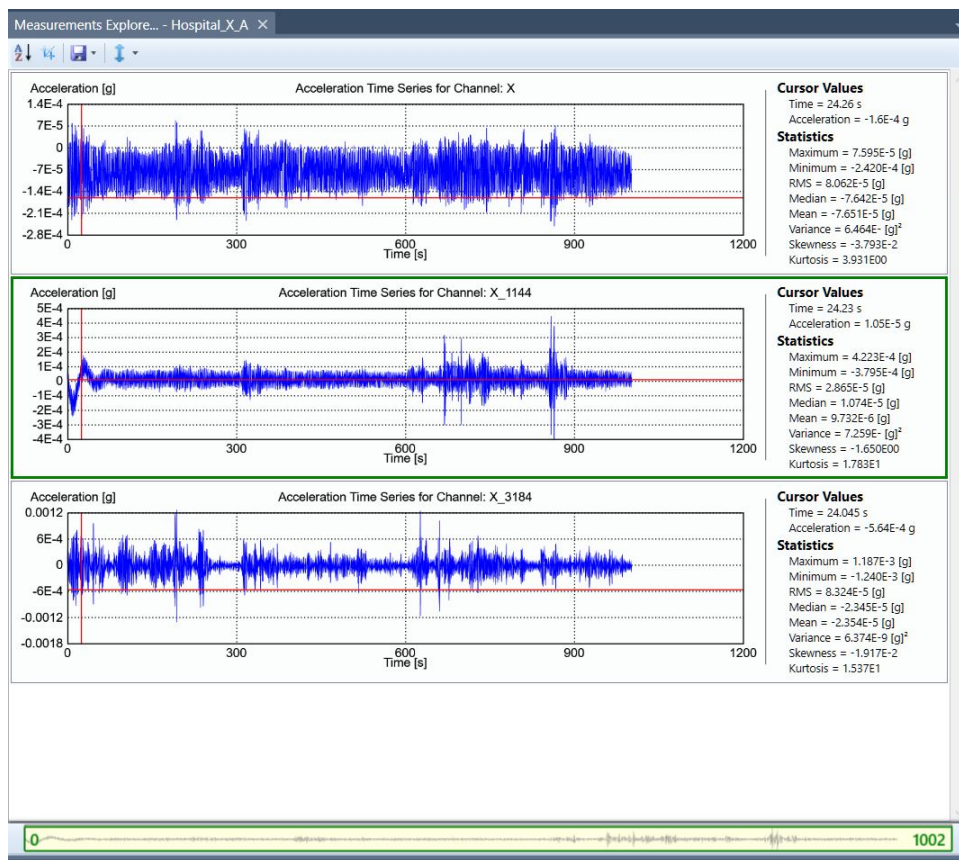
C:\Windows\system32\cmd.exe

===== phd Thesis of HOMED EORHMET =====
End of Define Modes
End of Define Sections
End of Define Elements
=====
T = 1.1921878842914742 sec
v = 5.278297984293456 rad/sec
=====
T = 1.153154688711481 sec
v = 5.448692583711326 rad/sec
=====
T = 0.926897822384541 sec
v = 6.778738707145697 rad/sec
=====
T = 0.4814897034415789 sec
v = 13.051773825886288 rad/sec
=====
T = 0.4715886223161381 sec
v = 13.323445588328183 rad/sec
=====
T = 0.4576147357627243 sec
v = 13.798294971339836 rad/sec
=====
T = 0.27828322485892 sec
v = 22.578383467378783 rad/sec
=====
T = 0.2748378143467983 sec
v = 22.861496814848725 rad/sec
=====
=====Frame Model Have Been Built Successfully=====
=====
End of script <D:\CIU\L\phd> reached, Press any key to continue

```

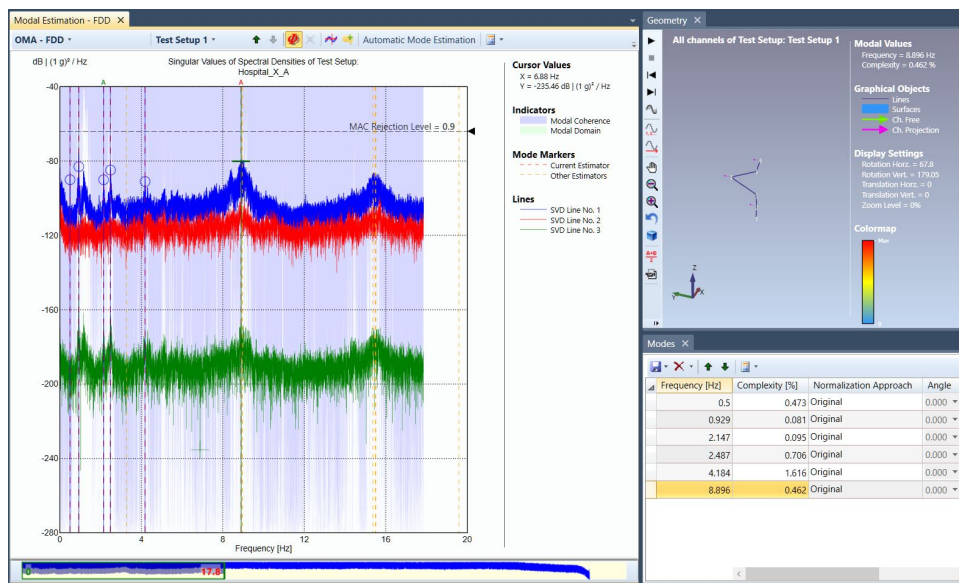
شکل ۹.۵: نتایج خروجی آنالیز مودال بیمارستان با استفاده از OPENSEES

با توجه به اینکه بیمارستان در بخش روسازه از دو بخش مجزا که بوسیله درز انقطاع از یکدیگر جدا شده بودند، ساخته شده بود برای برداشت رکوردها این تقسیم بندی صورت گرفت و تست بصورت جداگانه در این سازه ها صورت گرفت. برای تفکیک تست ها از یکدیگر نامگذاری بلوک ها را تحت عناوین A و B انجام داده و در دو راستای عمود بر هم و در مجموع ۴ تست برای این بیمارستان صورت گرفته است.

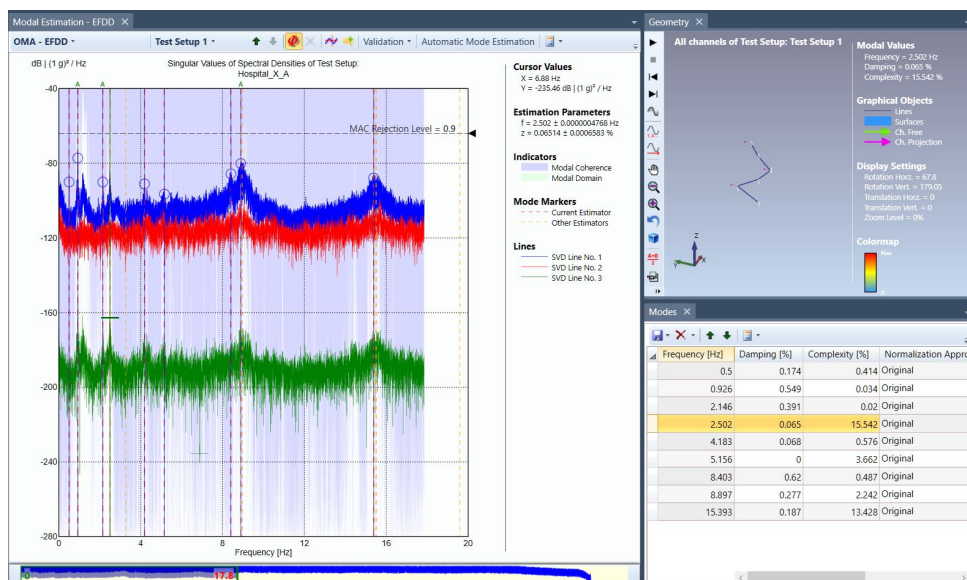


شکل ۱۰.۵: سیگنال‌های گرفته شده از بلوک A بیمارستان در راستاری طولی

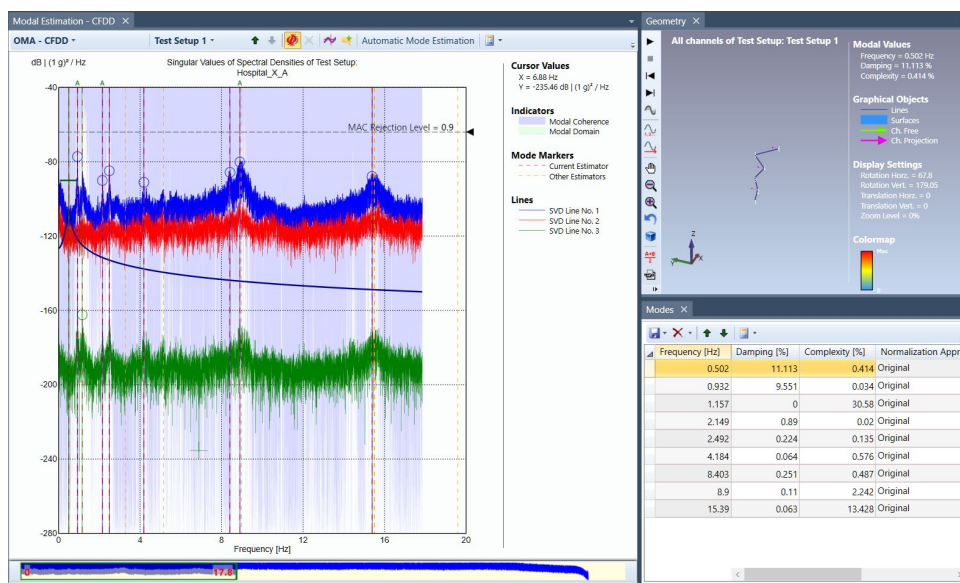
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه سازه‌ی قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



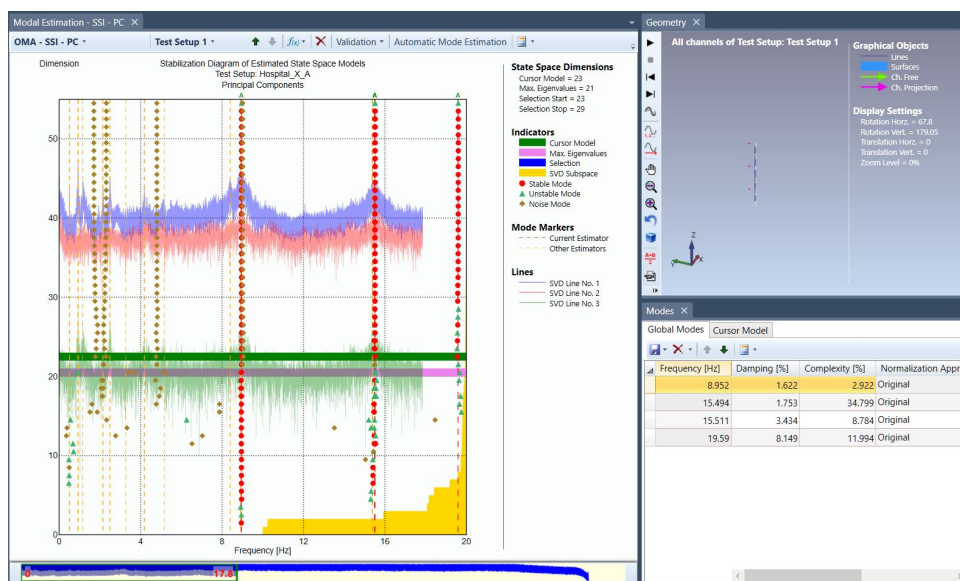
شکل ۱۱.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



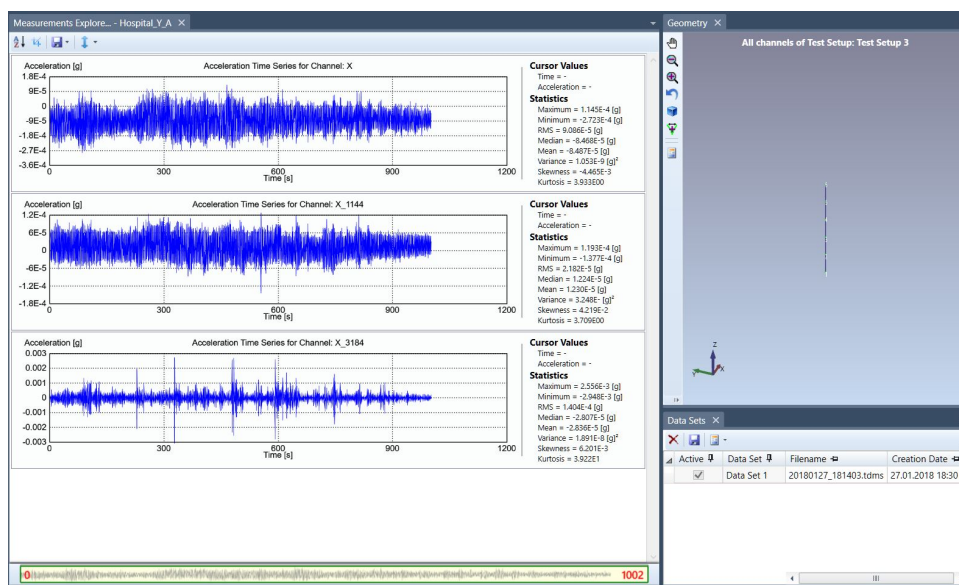
شکل ۱۲.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



شکل ۱۳.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط

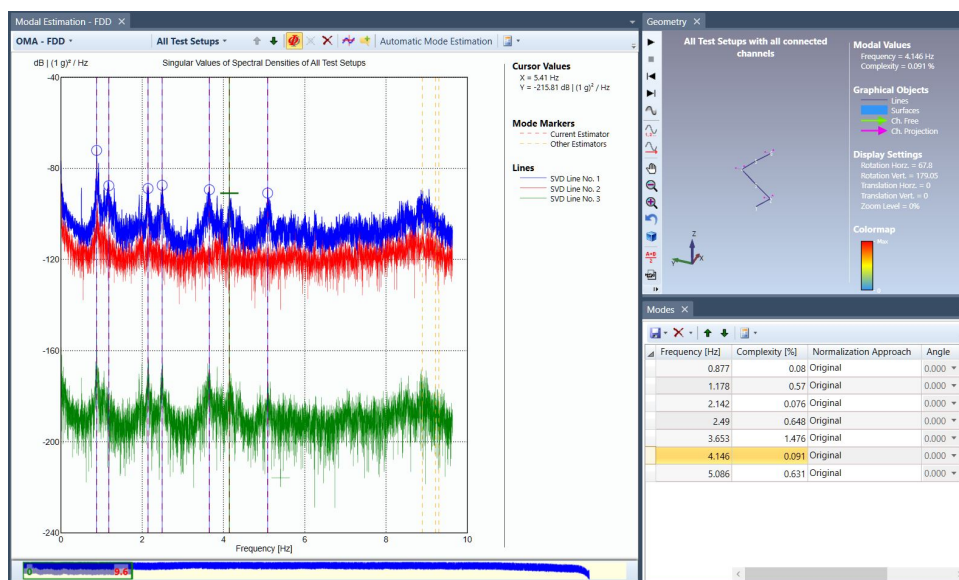


شکل ۱۴.۵: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

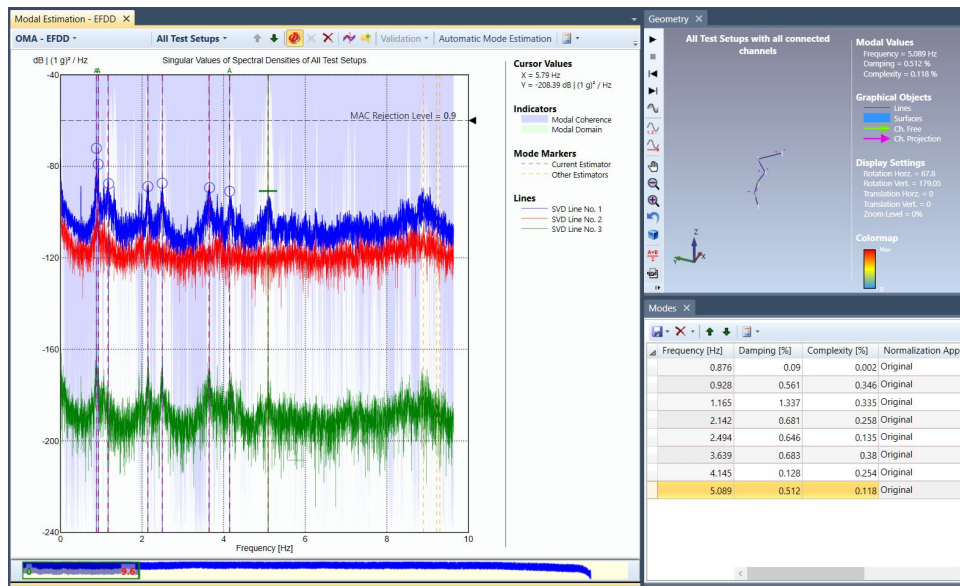


شکل ۱۵.۵: سیگنال‌های گرفته شده از بلوک A بیمارستان در راستاری عرضی

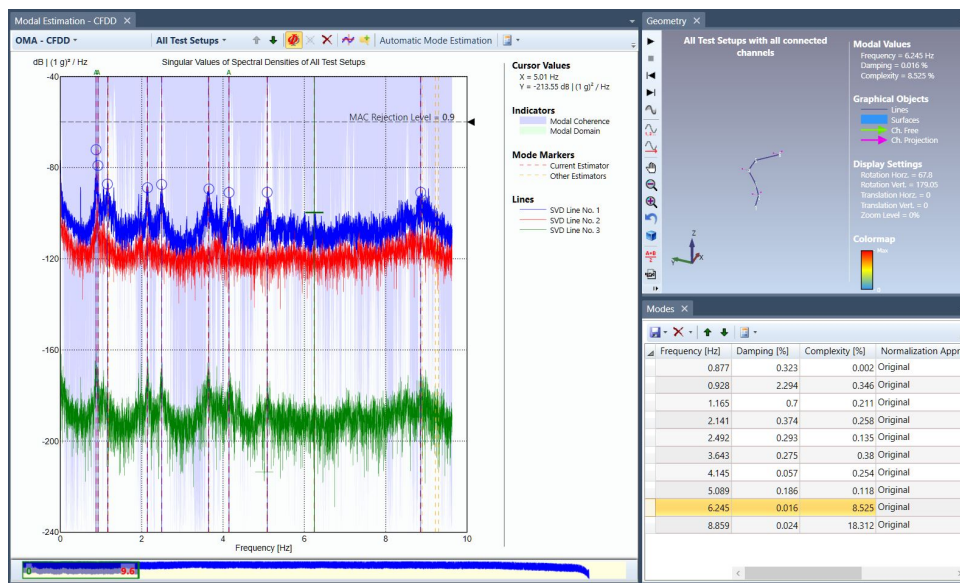
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه سازه‌ی قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



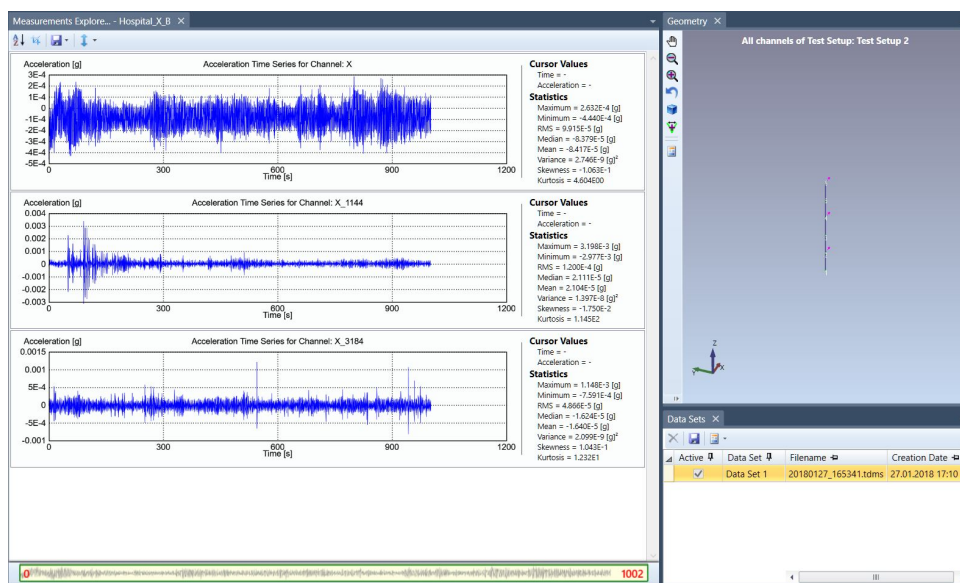
شکل ۱۶.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



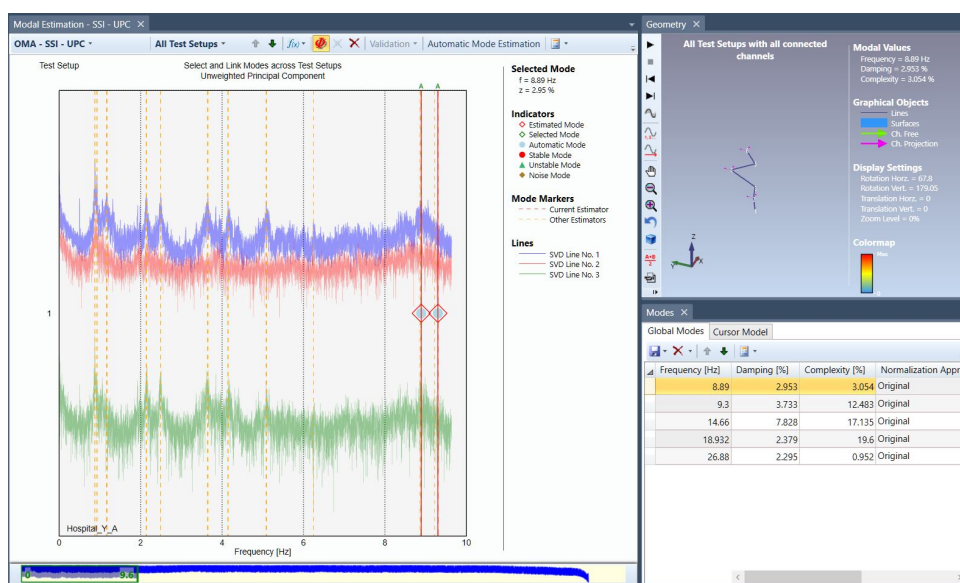
شکل ۱۷.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



شکل ۱۸.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط

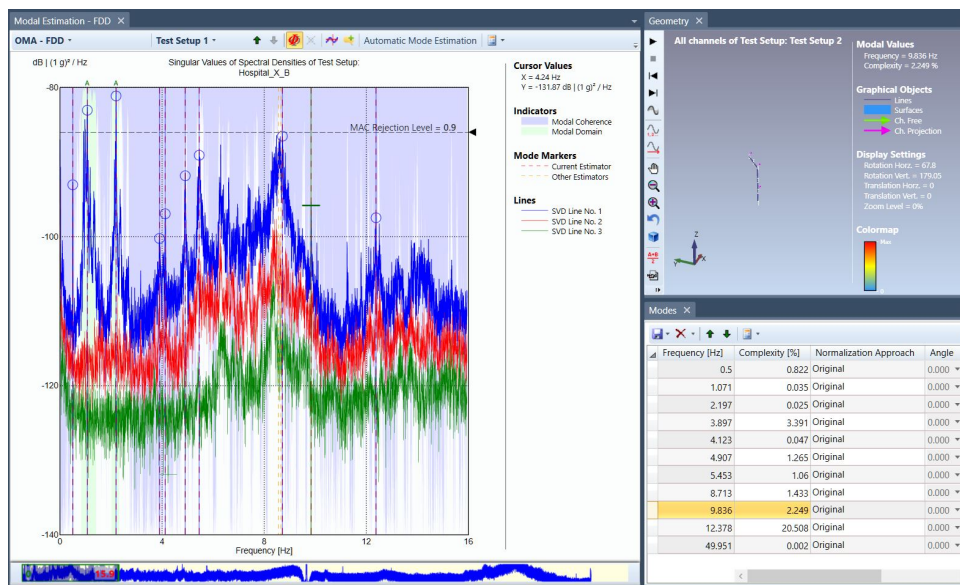


شکل ۲۰.۵: سیگنال‌های گرفته شده از بلوک B بیمارستان در راستاری طولی

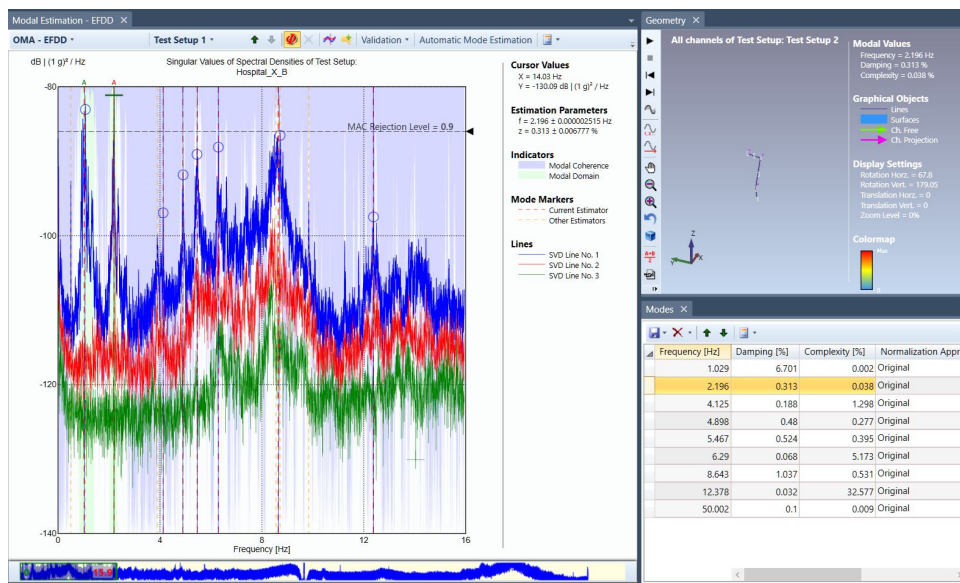


شکل ۱۹.۵: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

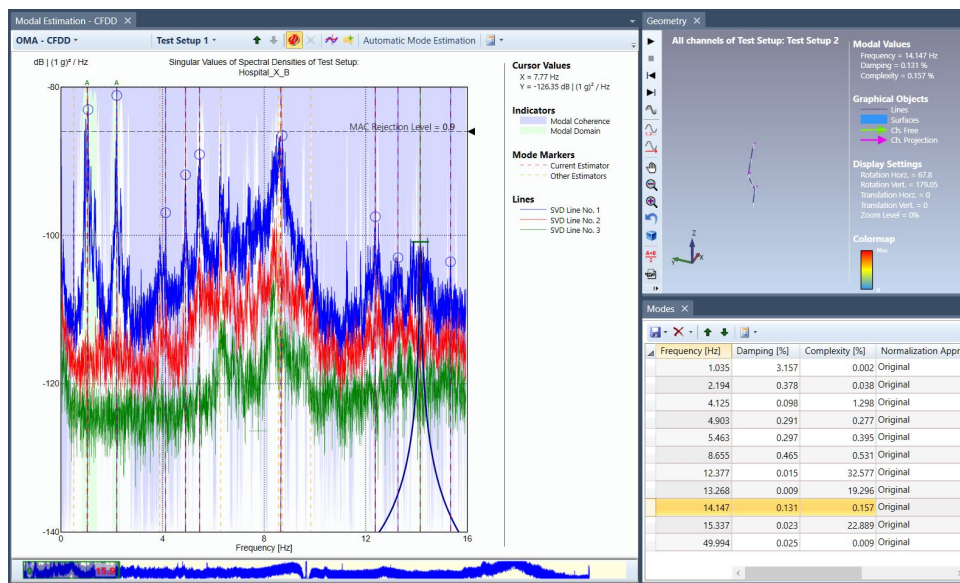
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه سازه‌ی قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



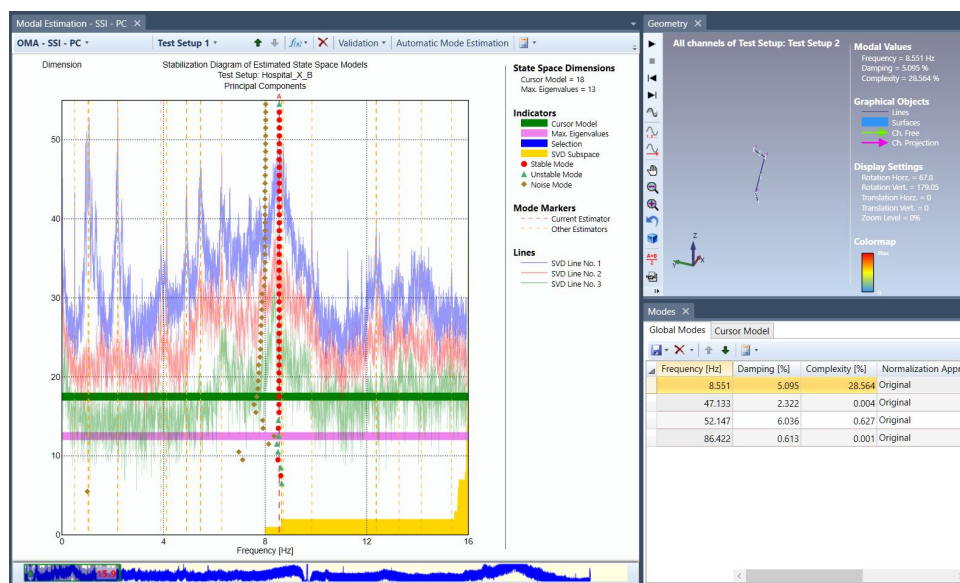
شکل ۲۱.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



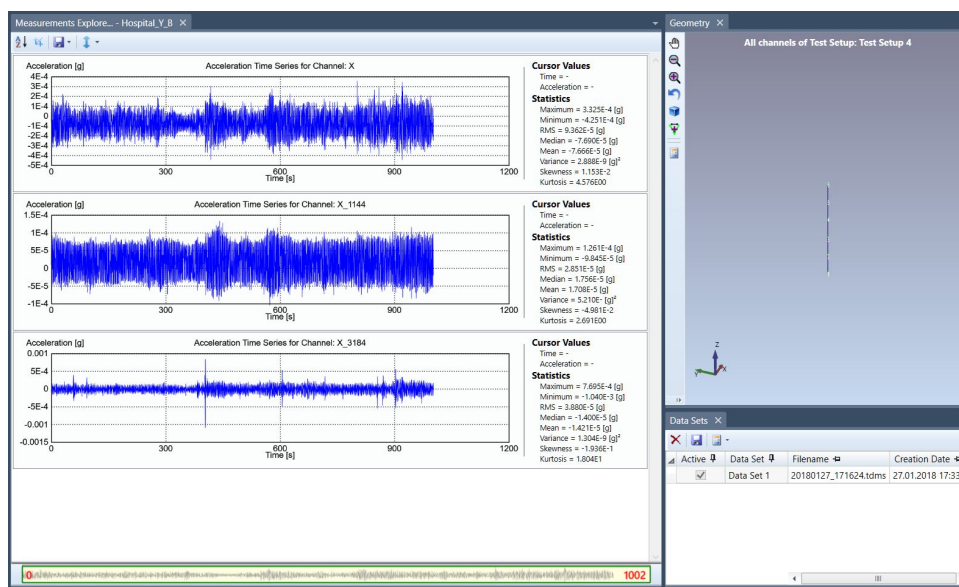
شکل ۲۲.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



شکل ۲۳.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط

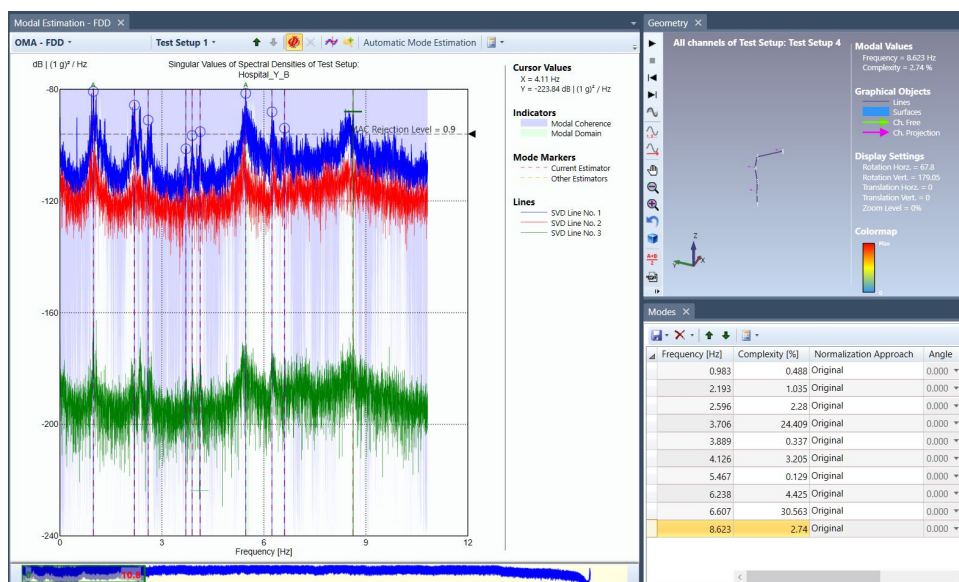


شکل ۲۴.۵: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

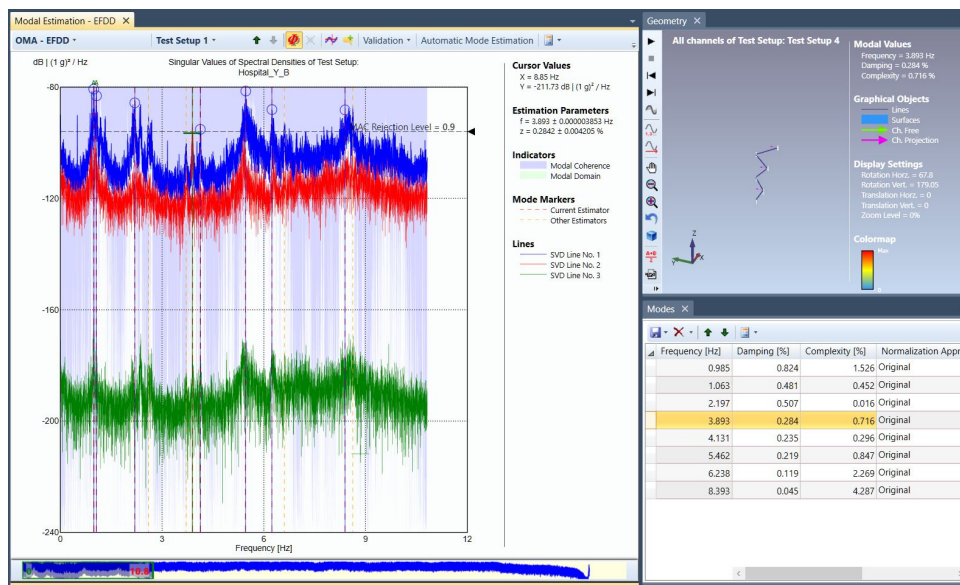


شکل ۲۵.۵: سیگنال‌های گرفته شده از بلوک B بیمارستان در راستاری عرضی

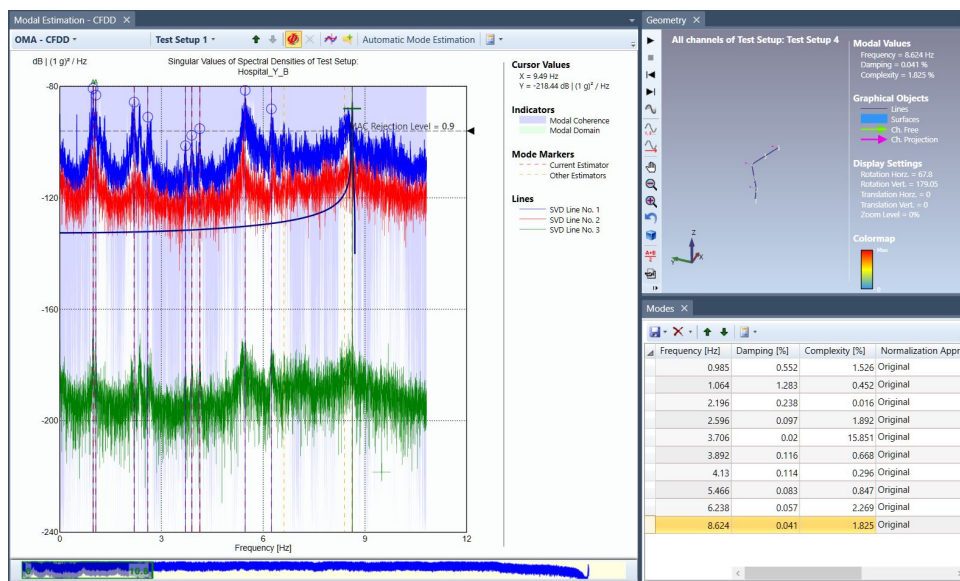
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه مثال سازه‌ای قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



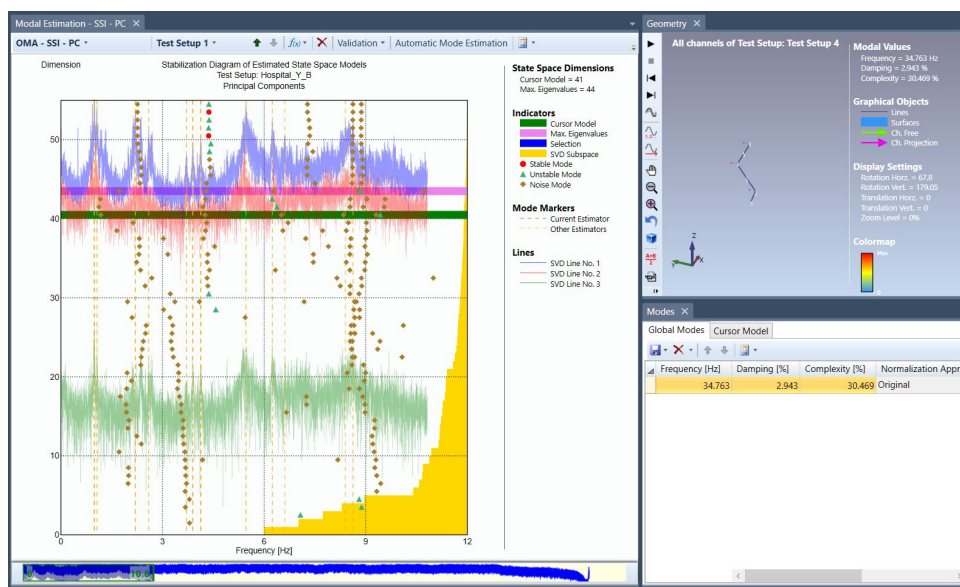
شکل ۲۶.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل ۲۷.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



شکل ۲۸.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



شکل ۲۹.۵: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

جدول ۱۱.۵: فرکانس ها و میرایی بدست آمده از نرم افزار OPENSEES

Modes	Frequency(Hz)	Period (Sec)	Damping(%)
First	0.839	1.192	-
Second	0.867	1.153	-
Third	1.078	0.927	-
Fourth	2.079	0.481	-
Fifth	2.188	0.457	-
Sixth	3.597	0.278	-

جدول ۱۰.۵: فرکانس ها و میرایی بدست آمده با روش های مختلف شناسایی زیرفضای اتفاقی با نرم افزار

ARTEMIS

Modes	Method	Frequency(Hz)	Period(Sec)	Damping(%)
First	SSI/UPC	0.895	1.117	1.793
	SSI/CVA	0.895	1.117	1.138
	SSI/PC	2.201	0.454	2.749
Second	SSI/UPC	1.009	0.991	8.978
	SSI/CVA	2.156	0.464	2.501
	SSI/PC	2.542	0.393	1.934
Third	SSI/UPC	2.19	0.456	3.537
	SSI/CVA	2.529	0.395	1.696
	SSI/PC	3.142	0.318	2.162
Fourth	SSI/UPC	2.562	0.39	2.125
	SSI/CVA	5.026	0.199	2.49
	SSI/PC	5.051	0.198	1.943

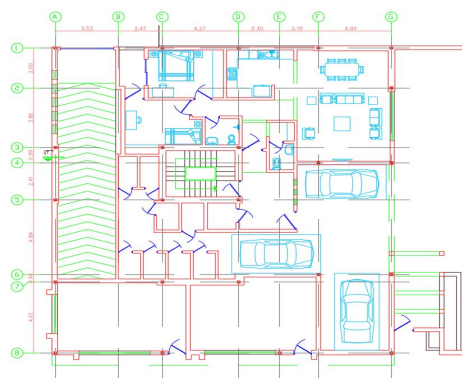
نتایج مدل تحلیلی

۴.۵ پروژه محمدیه ۵

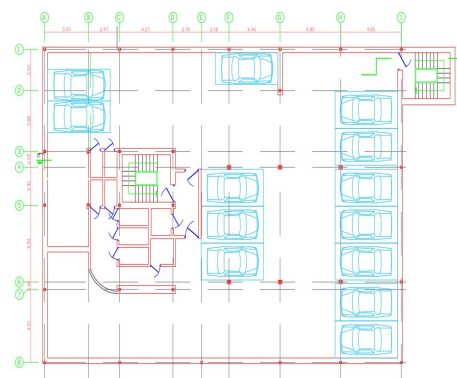
این پروژه در زمانی تست روی آن انجام شد که تقریباً کار سفت کاری ساختمان رو به اتمام بود و در نتیجه کل بارگذاری به سازه باید وارد می شد. مدل تحلیلی از این ساختمان به صورت سه بعدی در نرم افزار *OpenSEES* صورت گرفت.

۱.۴.۵ مشخصات سازه ی مورد مطالعه

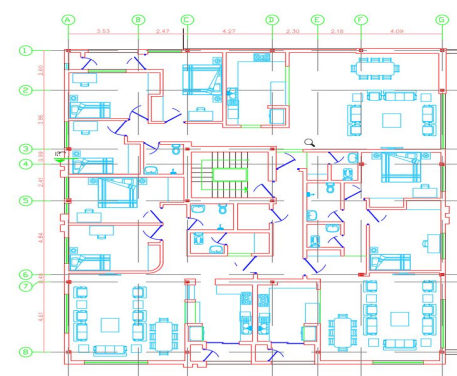
تست ارتعاش محیطی بر روی سازه ساختمانی مسکونی که در شهر مشهد و در خیابان محمدیه قرار دارد، صورت گرفت. این سازه بصورت قاب خمشی فلزی و دیوار برشی بتنی در ۶ طبقه ساخته شده بود. موقعیت قرارگیری دیوارهای برشی در نقشه سازه ای زیر نشان داده شده است.



(ب)



(i)



(ج)

شکل ۳۰.۵: (i) پلان معماری زیرزمین، (ب) پلان معماری همکف، (ج) پلان معماری طبقات

نتایج مدل تحلیلی

مدل سازی این سازه در نرم افزار *OpenSEES* صورت گرفت و نتایج تحلیل مودال آن به صورت زیر بدست آمد.

```

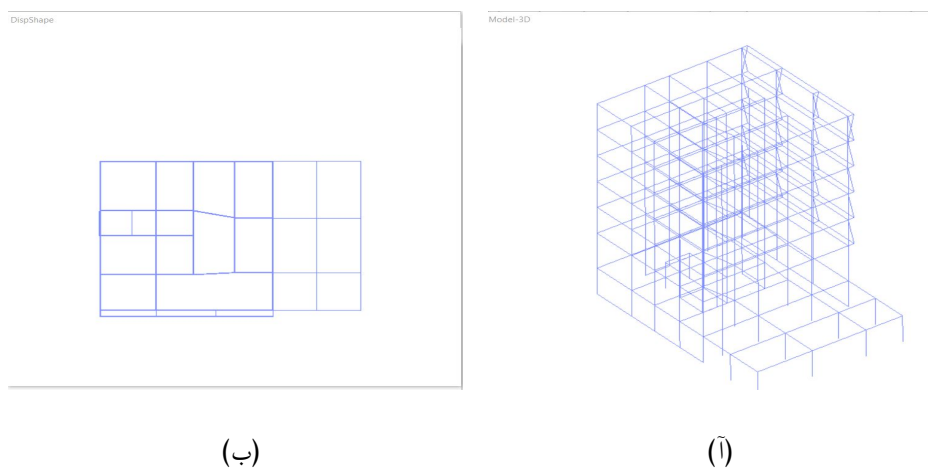
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe

Start of Program
Start the Modeling
End of Define Nodes
End of Define Sections
End of Define Elements
*****
T = 1.085631302971505 sec
w = 5.787586716412982 rad/sec
*****
T = 0.5733864453739812 sec
w = 10.958029019855715 rad/sec
*****
T = 0.4022698928116958 sec
w = 15.619327770425974 rad/sec
OpenGLRenderer::setClippingPlanes() - invalid planes0 150
End of Static Analysis

*****
*****Frame Model Have Been Built Succesfully*****
*****

```

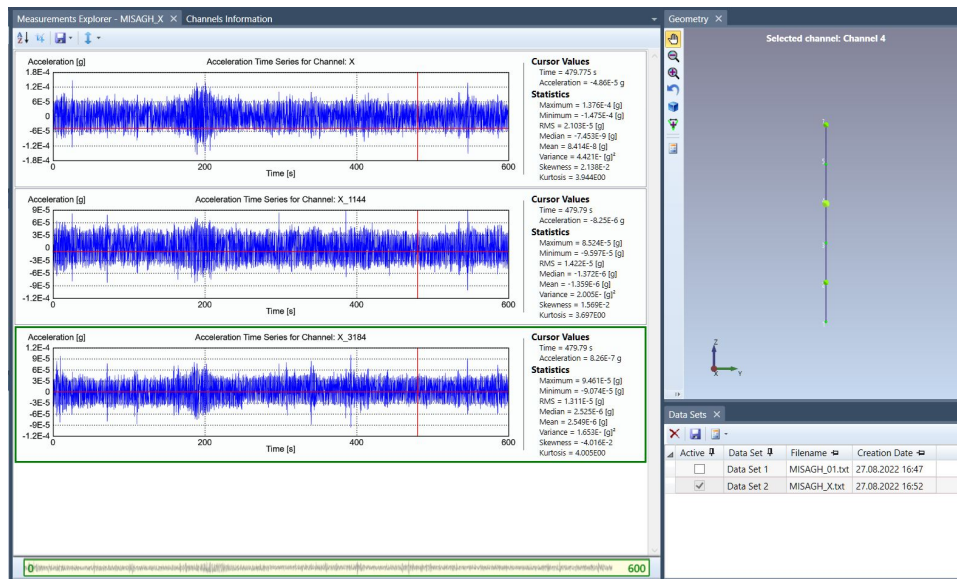
شکل ۳۲.۵: نتایج خروجی نرم افزار اپنسیس برای مدل محمدیه ۵



شکل ۳۱.۵: (ا) مدل سه بعدی ساختمان مسکونی محمدیه ۵، (ب) مدل پلان سازه

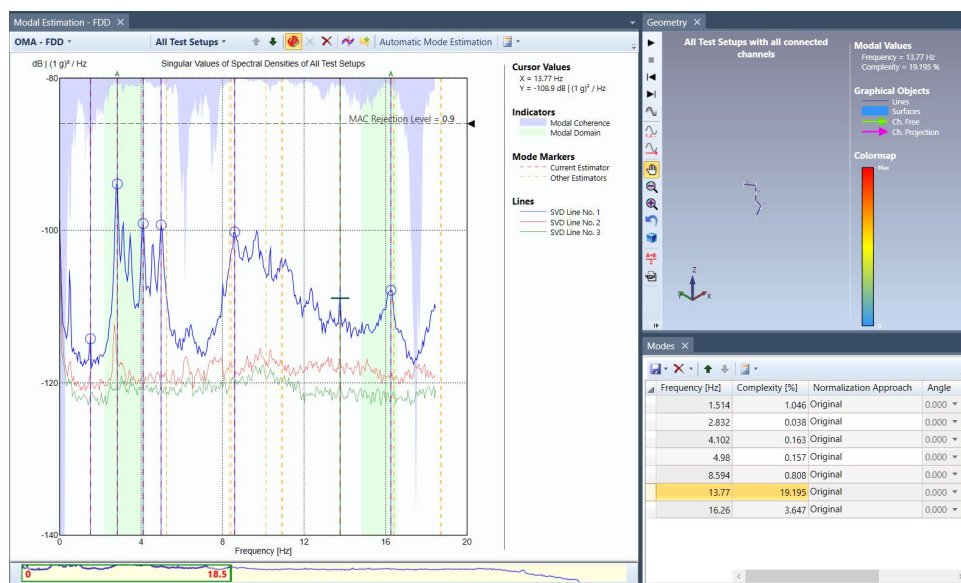
جدول ۱۲.۵: فرکانس ها و میرایی بدست آمده از نرم افزار OPENSEES

Modes	Frequency(Hz)	Period (Sec)	Damping(%)
First	0.921	1.086	-
Second	1.745	0.573	-
Third	2.487	0.402	-

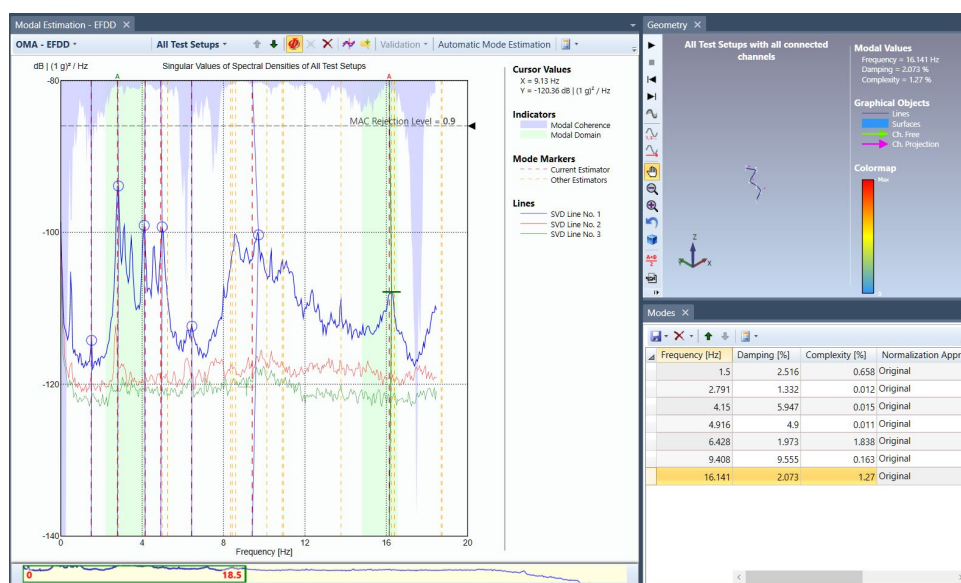


شکل ۳۳.۵: سیگنال های گرفته شده از ساختمان مسکونی محمدیه ۵ در راستاری طولی

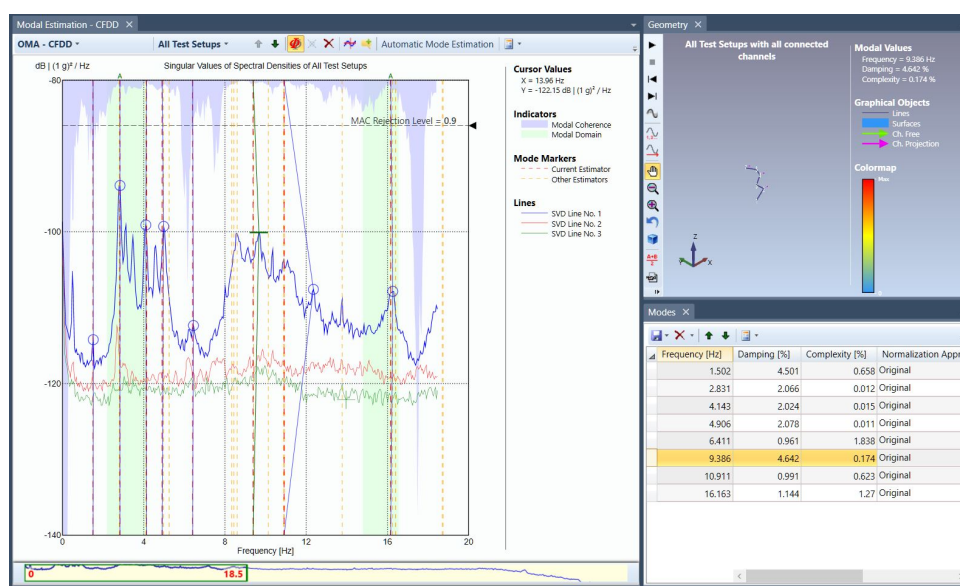
روش های حوزه فرکانس را مشابه سازه ی قبل برای سیگنال های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



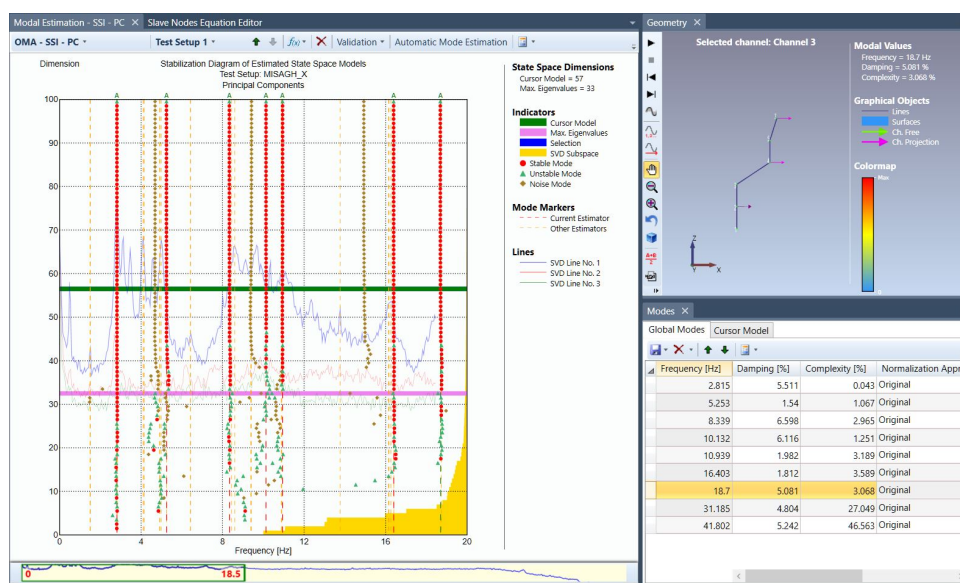
شکل ۳۴.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل ۳۵.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



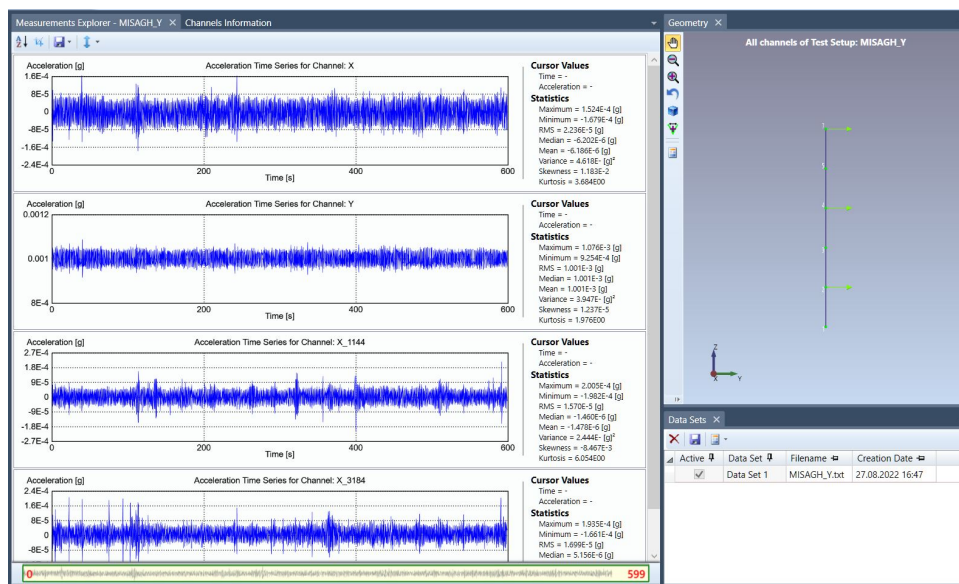
شکل ۳۶.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



شکل ۳۷.۵: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

پس از پردازش سیگنال‌ها در راستای طولی ساختمان مسکونی محمدیه ۵، سیگنال‌های راستای عرضی را گرفته و پردازش آن‌ها را مطابق سازه‌های نمونه قبل مورد ارزیابی قرار داده و مشخصه‌های سازه در راستای

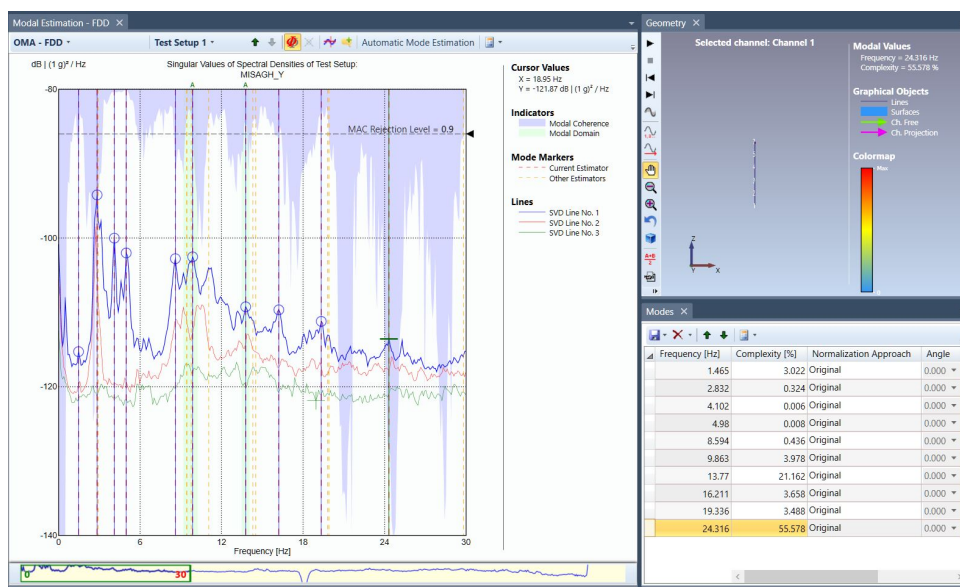
مورد تست استخراج می گردد.



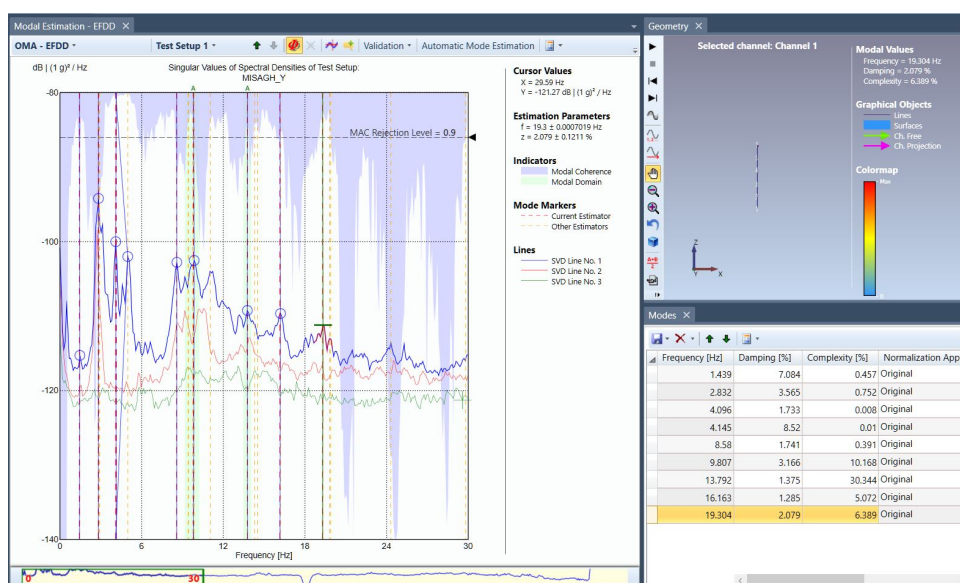
شکل ۳۸.۵: سیگنال های گرفته شده از ساختمان مسکونی محمدیه ۵ در راستاری عرضی

روش های حوزه فرکانس را مشابه سازی قبل برای سیگنال های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از

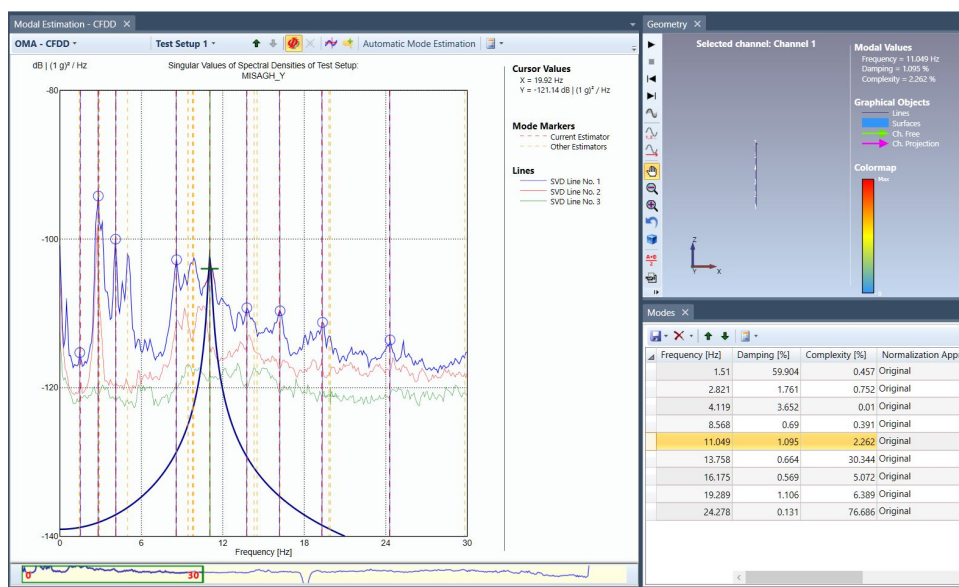
آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



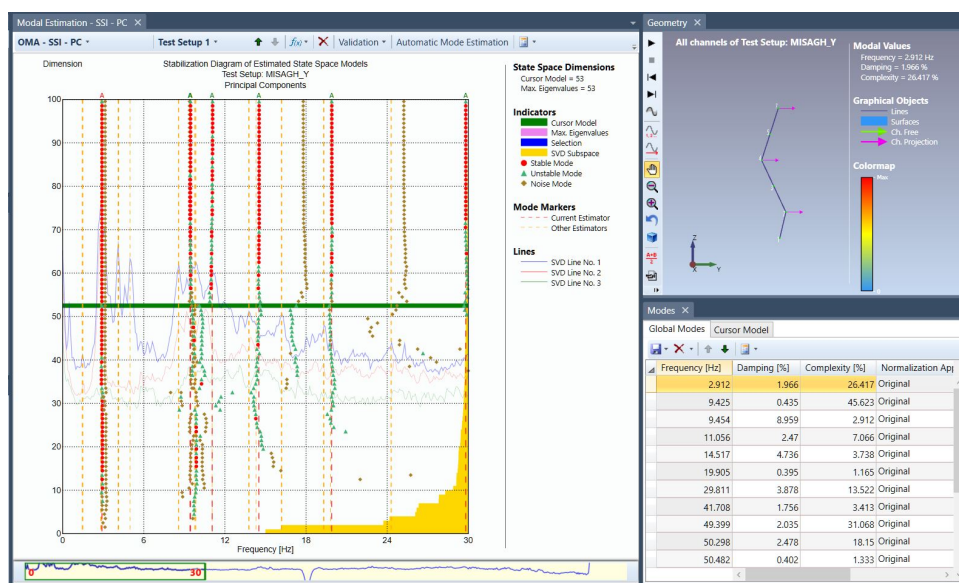
شکل ۳۹.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل ۴۰.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



شکل ۴۱.۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



شکل ۴۲.۵: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

جدول ۱۳.۵: فرکانس ها و میرایی بدست آمده با روش های مختلف تجزیه حوزه فرکانس با نرم افزار ARTEMIS

Modes	Method	Frequency(Hz)	Period(Sec)	Damping(%)
First	FDD	0.877	1.14	-
	EFDD	0.878	1.139	0.231
	CFDD	0.878	1.139	0.278
Second	FDD	0.923	1.083	-
	EFDD	0.926	1.08	0.369
	CFDD	0.926	1.08	1.181
Third	FDD	2.487	0.402	-
	EFDD	2.496	0.4	0.592
	CFDD	2.493	0.401	0.257
Fourth	FDD	4.146	0.241	-
	EFDD	4.146	0.241	0.095
	CFDD	4.165	0.24	0.048

جدول ۱۴.۵: مقادیر بدست آمده در دو راستای طولی و عرضی ساختمان مسکونی محمدیه ۵

فصل ۶

یافته‌های نظری و تجربی

در این فصل نتایج بدست آمده از تست‌های ارتعاش محیطی، با روش یادگیری ماشین نظارت نشده و به کمک زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی شده است که با توجه به حجم زیاد داده‌های برداشت شده نیاز به استفاده از برنامه‌های مرتبط با داده‌های کلان را الزامی می‌ساخت.

در این بخش از تحقیق از کتابخانه‌های (*Scikit – Learn, PyTorch, Matplotlib, Pandas*) متداول در بکارگیری علوم داده و یادگیری ماشین موجود در زبان برنامه‌نویسی پایتون استفاده شده است. نامگذاری سنسورها همانطور که در فصل قبل هم بدان اشاره شد بدین قرار صورت گرفت که برای سنسور سه محوره که تنها از دو محور صفحه‌ای آن استفاده شد، X و Y و برای دو سنسور تک محوره اسامی $X - ۱۱۴۴$ و $X - ۳۱۸۴$ انتخاب شدند.

۱.۶ نتایج گرفته شده بر اساس روش یادگیری عمیق

با توجه به تقسیم‌بندی صورت گرفته در مورد روش‌های یادگیری عمیق که در فصل دوم این تحقیق بدان اشاره شد بصورت نظارت شده^۱ و غیر نظارت شده^۲ بود، در این تحقیق با توجه به شرایط حاکم بر تست‌های پایش سلامت و ارتعاش محیطی از روش غیر نظارت شده استفاده شده است. در روش یادگیری عمیق نظارت نشده نیز دسته‌بندی‌های مختلفی وجود دارد که در این تحقیق از روش تفکیک منبع کور^۳ (*BSS*) استفاده شده است [۵۳]. استفاده از الگوریتم رمزگذاری خودکار^۴ هم از جمله روشهای یادگیری ماشین غیر نظارت شده است که امروزه مورد استقبال محققین قرار گرفته است. در عصر داده‌های بزرگ و حجیم، نیاز به استفاده از شیوه‌های یادگیری ماشین همزمان با افزایش تعداد داده‌ها در اثر پیشرفت چشمگیر فناوری‌های اطلاعات، به سرعت در حال رشد می‌باشد. بنابراین، یادگیری ماشین فن‌آوری است که روش‌های سنتی تحلیل داده را با الگوریتم‌های دشوار برای پردازش حجم‌های زیاد داده ترکیب کرده است. [۵۶].

بطور کلی، این روش‌های تحلیل جهت مشخص کردن ارتباط بین نمونه‌ها، بصورت نقاط داده‌ای، در داده‌های اخذ شده یا تخمین مشخصات خاص از داده‌های ناشناخته مربوط به داده‌های اخذ شده هدف گذاری شده است (*Baladrametal.*, ۲۰۲۰). بر اساس نظر (*Baladrametal.*, ۲۰۲۰)، یادگیری ماشین با نظارت در تلاش است برای تعیین ارتباط یا یافتن تابعی بر پایه داده‌های آموزش، برچسب زده شده و از این تابع برای نگاشت داده‌های جدید غیر برچسب زده استفاده می‌کند. در این روش‌ها از جمله درخت تصمیم‌گیری، پرسپترون چند لایه‌ای، رگرسیون لجستیک و ماشین بردار پشتیبانی (*SVM*) یک مدل از دیتاست آموزش توسعه یافته است که مقادیر ورودی و خروجی قبلاً معلوم بوده است. برای داشتن یک عملکرد مناسب بطور مثال تولید یک مدل خوب، روش‌های یادگیری نظارت شده نیازمند یک تعداد قابل قبول از رکوردهای برچسب زده شده می‌باشد. گفتن این عبارت اهمیت دارد که این روش‌ها الگوهای مخفی در داده‌های برچسب زده را کشف می‌کند. بطور کلی، روش یادگیری نظارت شده تولید یک تخمین گر می‌کند که داده‌های ورودی را پذیرش می‌کند و

¹Supervised

²Un-Supervised

³Blind Source Separation

⁴Autoencoder

نتیجه تخمینی در مقابل داده‌های ورودی را می‌دهد. در این فرآیند، دو فاز اصلی وجود دارد: فازهای یادگیری و تخمین. در فاز یادگیری، سیستم، ورودی‌ها و بردارهای هدف را می‌خواند و قوانین را بهبود می‌بخشد. این پروسه تا آنجا تکرار می‌شود که کیفیت قوانین به اندازه‌ی کافی خوب باشد تا حد امکان عملکرد خوبی از تخمین گرفته شود. در نهایت، در فاز تخمین، مشخصات یا ویژگی‌های داده‌های جدید بوسیله سیستم تخمین زده می‌شود (Baladrametal., ۲۰۲۰). تکنیک‌های یادگیری نظارت شده برای استفاده در دو نوع متفاوت از فرم بسته به مساله‌ای که باید حل شود، بکار می‌رود: دسته‌بندی^۱ و رگرسیون^۲ از سوی دیگر، یادگیری نظارت نشده شامل شناسایی الگوهایی بر ارتباط بین نقاط داده‌ای با خودشان است. هیچ متغیر خروجی برای تخمین زدن وجود ندارد. یعنی، قبلاً فقط ورودی‌ها معلوم شده بودند. این الگوریتم‌ها برای یادگیری کل توزیع احتمالی که یک مجموعه داده را ایجاد می‌کرد، چه به طور صریح یا بطور ضمنی استفاده می‌شد.

خوشه‌بندی سلسله مراتبی، خوشه‌بندی $K - Means$ ، رمزگذاری خودکار، تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) از دیگر روش‌های یادگیری نظارت نشده هستند. در این تحقیق، نوع خاصی از تحلیل مؤلفه اصلی یعنی تحلیل مؤلفه مستقل (ICA)^۳ استفاده و پیاده شده است.

۲.۶ مراحل پیاده‌سازی :

بطور کلی هر مساله‌ای برای پیاده‌سازی در شبکه عصبی نیازمند مراحل پیش پردازش و پس پردازش است. مرحله‌ای که در این تحقیق برای رسیدن به هدف مساله بوسیله پیاده‌سازی آن در زبان برنامه‌نویسی طی شده است، به قرار زیر بوده است:

¹Classification

²Regression

³Independent Component Analysis

۱. تعیین مدت زمان رکورد در تست ارتعاش محیطی سازه‌های مورد مطالعه
۲. جانمایی و نصب سنسورها و تعیین نرخ نمونه‌برداری
۳. انجام تست ارتعاش محیطی
۴. خواندن داده‌های گرفته شده از تست‌های ارتعاش محیطی
۵. نرمالایز کردن داده‌ها برای یکسان سازی و داشتن رکوردهایی با میانگین صفر
۶. استفاده از کتابخانه پردازش سیگنال سای پای (*SciPy*) برای حذف نویزهای اضافی
۷. بردن سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس برای کنار گذاشتن داده‌های پرت (*Outlier*)
۸. برگرداندن سیگنال از حوزه فرکانس به حوزه زمان
۹. تغییر بعد دادن رکوردهای نرمالایز شده به جهت ورودی به شبکه عصبی
۱۰. تعریف شبکه عصبی به کمک کتابخانه تورچ پای (*TorchPy*)
۱۱. تعریف تابع فعال‌سازی (*ActivationFucntion*)
۱۲. تعریف تابع هزینه (*CostFunction*)
۱۳. تعریف تابع بهینه‌یاب
۱۴. مشخص کردن تعداد تکرارها (*Epoch*)
۱۵. مشخص کردن نرخ یادگیری (*LearningRate*)
۱۶. گرفتن خروجی از لایه‌های مختلف و ضرایب وزن از شبکه
۱۷. بدست آوردن سیگنال‌های مستقل (مودال) به تعداد سیگنال‌های ورودی با الهام از روش تحلیل مؤلفه مستقل (*ICA*)

۱۸. پاسخ‌های مودال بدست آمده را از حوزه زمان به حوزه فرکانس برده و آنها را بر اساس توان طیفی منظم کرده (*Sorting*)

۱۹. مقادیر قله (*Peak*) را انتخاب کرده

۲۰. برازش منحنی (*Curve – fitting*)

۲۱. بدست آوردن مقادیر میرایی مودال

۱.۲.۶ تعیین مدت زمان رکورد در تست ارتعاش محیطی سازه‌های مورد مطالعه

مدت زمان نمونه‌برداری حدود ۱۰۰۰ برابر پریود مود اول مطابق معیار برینکر از تحلیل مودال در نظر گرفته شد.

۲.۲.۶ جانمایی و نصب سنسورها و تعیین نرخ نمونه‌برداری

سعی شد در تمامی تست‌ها سنسورها در نزدیکی محل سختی سازه‌ها قرار داده شود که البته این مساله در برخی سازه‌ها با توجه به شرایط پلان دقیقاً در مرکز نصب نشد، همچنین نرخ نمونه‌برداری‌ها ۱۰۰ و ۲۰۰ هرتز با توجه به شرایط سخت افزار و معیار نایکوئیست در نظر گرفته شد

۳.۲.۶ انجام تست ارتعاش محیطی

تست‌ها به کمک سخت‌افزارهایی که در فصل سوم مشخصات آن‌ها آمده است، صورت پذیرفت.

۴.۲.۶ خواندن داده‌های گرفته شده از تست‌های ارتعاش محیطی

با توجه به اینکه نرم‌افزاری که برای دستگاه اکتساب داده نوشته شده بود، به کمک *LabView* بود تمامی داده‌ها را در فایل‌هایی با پسوند *.tdms* بوده است که تمامی آن‌ها را به فایل‌های اکسل با پسوند *.xlsx* تبدیل شده است.

۵.۲.۶ نرمالایز کردن داده‌ها

یکی از مسائلی که در تست‌های ارتعاش محیطی رخ می‌دهد، یکسان نبودن شرایط تست‌ها از نظر شرایط حاکم بر تست‌های مختلف و حتی سنسورها بوده است که برای یکسان‌سازی سیگنال‌ها، مقادیر میانگین هر رکورد از تک تک داده‌ها کسر شده تا داده‌هایی با میانگین صفر وجود داشته باشد. این مساله در ورودی داده‌های شبکه عصبی هم حائز اهمیت است.

۶.۲.۶ حذف نویزهای اضافی

حذف نویزهای اضافی شناخته شده و دانستن منشا نویز تا حد امکان در رسیدن به پاسخ صحیح کمک شایانی کرده است. در تست‌های ارتعاش محیطی بدلیل اینکه شرایط تست در محیط آزمایشگاهی صورت نگرفته تسلطی بر عوامل پیرامونی نداشته و ممکن است عواملی ناخواسته در حین تست‌ها داخل شود که برای حذف آن‌ها از فیلترهای گوناگونی استفاده شده است.

۷.۲.۶ کنار گذاشتن داده‌های پرت (*Outlier*)

گاهی برخی تک داده‌ها که با سایر داده‌ها همخوانی نداشته، می‌تواند بر روی مقدار میانگین تاثیر گذار بوده و پاسخ‌ها را دچار ایراداتی اساسی نماید. یافتن این داده‌های پرت به کمک کتابخانه‌های پردازش سیگنال این امر را تسهیل نموده است.

۸.۲.۶ تغییر بعد دادن رکوردها

همیشه برای وارد کردن داده‌ها به شبکه عصبی آن‌ها را بصورت دسته‌ای^۱ تقسیم کرده و وارد شبکه می‌کنند. این دسته‌بندی در سرعت شبکه تاثیرگذار بوده است.

^۱Batch

۹.۲.۶ تعریف شبکه عصبی به کمک کتابخانه تورچ پای (*TorchPy*)

در حال حاضر برای تعریف شبکه عصبی عمیق از دو کتابخانه پای تورچ و یا کراس *Keras* استفاده می‌شود که در این تحقیق از پای تورچ استفاده شده است.

۱۰.۲.۶ تابع فعال‌سازی (*ActivationFucntion*)

توابع فعال‌سازی در حوزه یادگیری ماشین شامل موارد زیادی هستند از جمله *Softmax*, *Relu*, *Tgh*, ... در این تحقیق از *Tgh* استفاده شده است.

۱۱.۲.۶ تابع هزینه (*CostFunction*)

در این تحقیق برای تابع هزینه از حداقل مربعات خطا در کتابخانه عصبی *nn.MSELoss* استفاده شده است.

۱۲.۲.۶ تابع بهینه‌یاب

از تابع بهینه‌یاب به‌روز و کارآمد *torch.optim.Adam* در این تحقیق استفاده شده است.

۱۳.۲.۶ مشخص کردن تعداد تکرارها (*Epoch*) و نرخ یادگیری (*LearningRate*)

دو هاپیر پارامتر که در اکثر مسائل حوزه شبکه عصبی چالش برانگیز بوده و هستند، همین دو پارامتر نرخ یادگیری و تعداد تکرار می‌باشد. با توجه به نوع مسأله‌ای که با آن روبرو شده و اینکه آیا ممکن است دچار *Local Minimum* و *Overfitting* و *Zero – Gradient* شود استراتژی را مشخص کرده و تعداد تکرار و نرخ یادگیری را به نحوی انتخاب کرده که در زمان منطقی به پاسخ رسیده و از اتلاف وقت جلوگیری شود. نرخ یادگیری را در سه مقدار 0.001 , 0.01 , 0.1 به شبکه وارد کرده و تعداد تکرار با توجه به روند مقادیر به مقدار 1000 محدود گردید.

۱۴.۲.۶ بدست آوردن سیگنال‌های مستقل (مودال)

خروجی لایه سوم از شبکه عصبی، سیگنال‌های مودال را بدون ترتیب خاص استخراج کرده و پاسخ‌ها را به حوزه فرکانس برده و عملیات *Sorting* را از فرکانس کم به زیاد صورت می‌گیرد.

۱۵.۲.۶ بدست آوردن پیک‌ها و برازش منحنی

مقادیر ماکزیمم بدست آمده در حوزه فرکانس را به همراه بازه مشخص به حوزه زمان برگردانده و مقادیر پیک منحنی نزولی را به کمک `scipy.signal.findpeaks` گرفته و برازش منحنی را روی مقادیر پیک به کمک `curvefit` صورت داده و مقادیر پارامترهای منحنی برازش شده که همان نسبت میرایی می‌باشد و مقادیر خطا *RMSE* و *Rsquared* بدست آمده است.

۳.۶ الگوریتم‌های بکار رفته در این تحقیق

در این تحقیق در استفاده از شبکه عصبی عمیق از الگوریتم‌های متفاوتی بهره برده شد و در نهایت الگوریتمی که سریعتر و با تکرار کمتر به پاسخ همگرا شد که *FCGRU* بود، انتخاب شده است.

۱. Convolution ۱D

۲. Convolution ۲D

۳. RNN-GRU^۱

۴. FCGRU

«سلول‌های واحدهای بازگشتی گیتی» (Gated Cells Units Recurrent (GRU) نوعی از سلول‌های حافظه کوتاه مدت بلند (LSTM) هستند. این سلول‌ها نیز از گیت‌هایی برای جلوگیری از مفقود شدن اطلاعات

¹Recurrent Neural Network- Gated Recurrent Unit

استفاده می‌کنند، اما این کار را تنها با استفاده از دو گیت «به روز رسانی» (Update) و «بازنشانی» (Reset) انجام می‌دهند. این امر موجب می‌شود که آن‌ها اندکی کمتر شفاف باشند و در عین حال، سرعت آن‌ها اندکی بیشتر است زیرا همه جا از اتصالات کمتری استفاده می‌کنند. سلول‌های GRU، حالت سلول پنهانی که توسط یک گیت خروجی محافظت شود را ندارند و ورودی را ترکیب می‌کنند و گیت را در یک به روز رسانی گیت، فراموش می‌کنند. ایده آن است که اگر کاربر بخواهد که میزان زیادی از اطلاعات جدید را بپذیرد، احتمالاً می‌تواند برخی از اطلاعات قدیمی را فراموش کند.

پایه‌ای‌ترین راه برای اتصال نورون‌ها برای شکل دادن نمودارها، اتصال همه چیز به همه چیز است. این مورد در شبکه‌های هاپفیلد و ماشین‌های بولتزمن مشاهده می‌شود. البته، این یعنی تعداد اتصالات به صورت صعودی افزایش پیدا می‌کند. به این نوع از لایه‌ها، کاملاً متصل (Fully Connected) | Completely Connected گفته می‌شود.

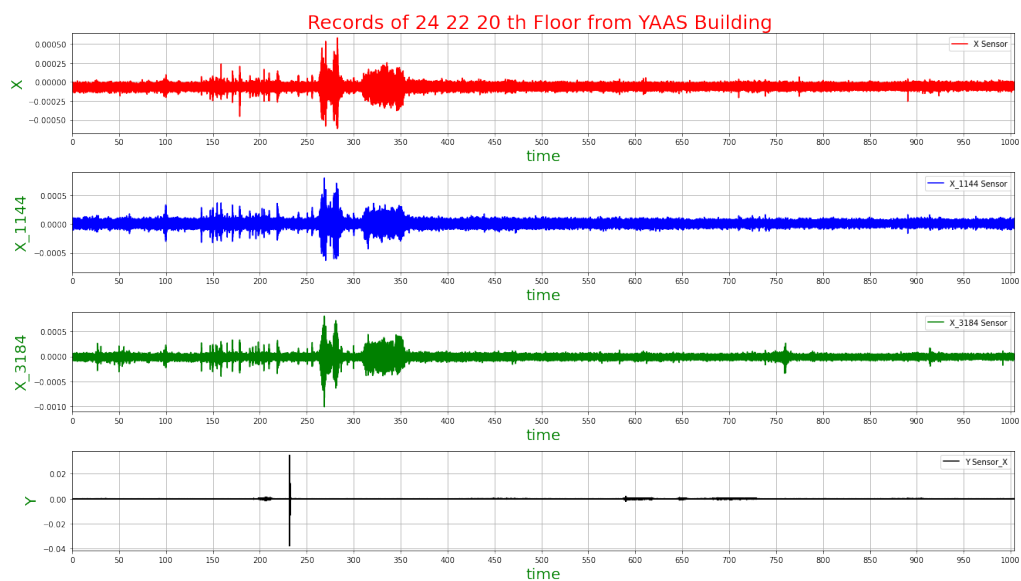
۴.۶ پروژه تجاری اداری کوه نور

۱.۴.۶ تست‌های در راستای طولی ساختمان

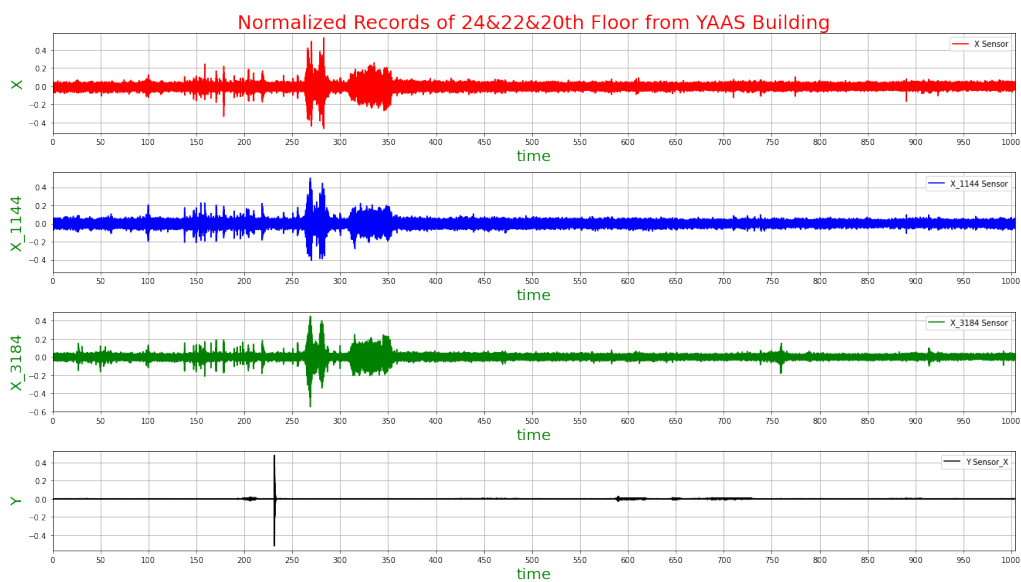
نمایش رکوردهای گرفته شده از طبقات ۲۴، ۲۲ و ۲۰م جهت ورود به مرحله پیش پردازش سیگنال در شکل ۱.۶ نشان داده شده است. همانطور که در بخش مراحل تحقیق هم بدان اشاره شد، مرحله پیش پردازش شامل نرمالایز کردن رکوردها و حذف داده‌های پرت و همچنین حذف نویز تا حد امکان می‌باشد. تعداد تکرار در هر مساله هوش مصنوعی از اهمیت خاصی برخوردار بوده است چرا که زمان حل گاهی با افزایش آنها بسیار طولانی و خسته‌کننده به نظر می‌سد. بطور مثال برای انجام همین تحقیق که تعداد تکرار به حدود ۱۰۰ هزار مرتبه رسید، زمانی حدود یک هفته سیستم کامپیوتر با مشخصات فنی خوب بایستی روشن می‌ماند.

شکل ۲.۶ رکوردها را پس از پیش پردازش نشان داده است.

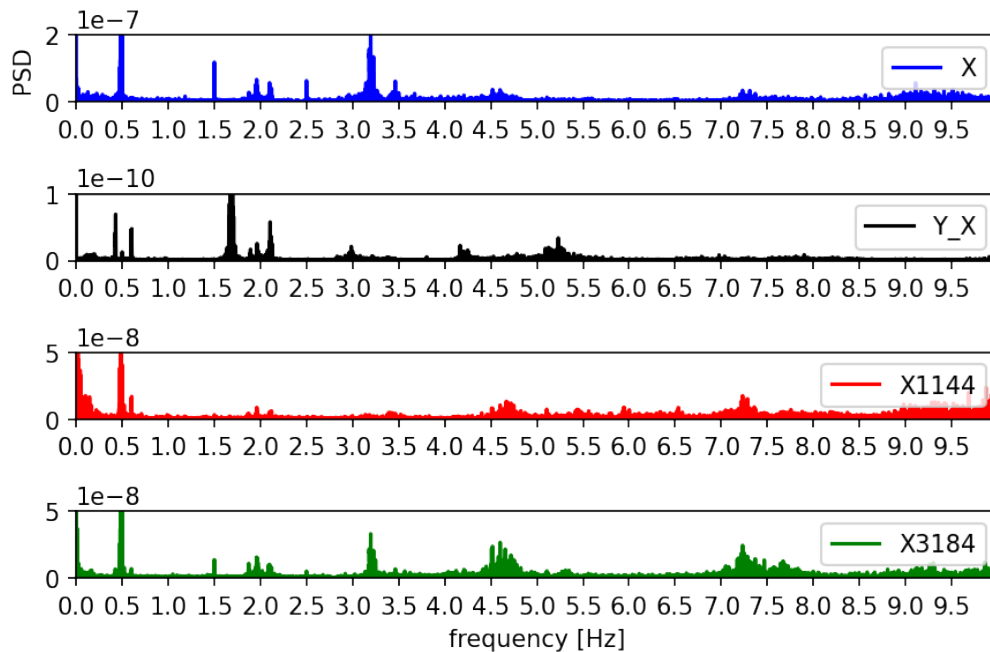
برای ورود به حوزه فرکانس از کتابخانه سای پای (SciPy) و دستور *Periodogram* استفاده شده است.



شکل ۱.۶: رکوردهای گرفته شده از طبقات ۲۴، ۲۲ و ۲۰ ام



شکل ۲.۶: رکوردهای گرفته شده از طبقات ۲۴، ۲۲ و ۲۰ ام پس از پیش پردازش



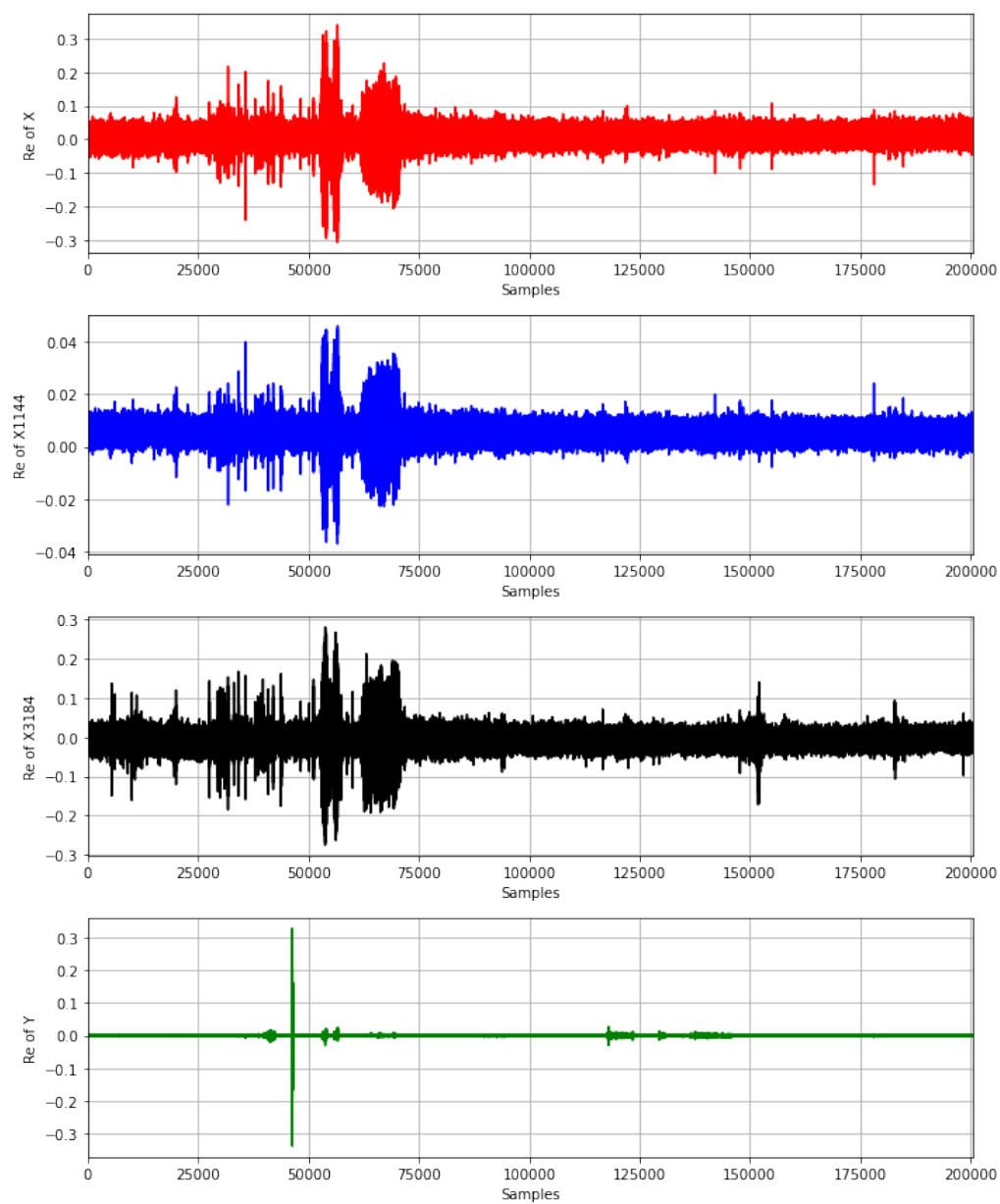
شکل ۳.۶: رکوردهای گرفته شده از طبقات ۲۴ام، ۲۲ام و ۲۰ام پس از پیش پردازش

برای همین رکورد صورت گرفته خروجی بدست آمده در شکل ۳.۶ نشان داده شده است.

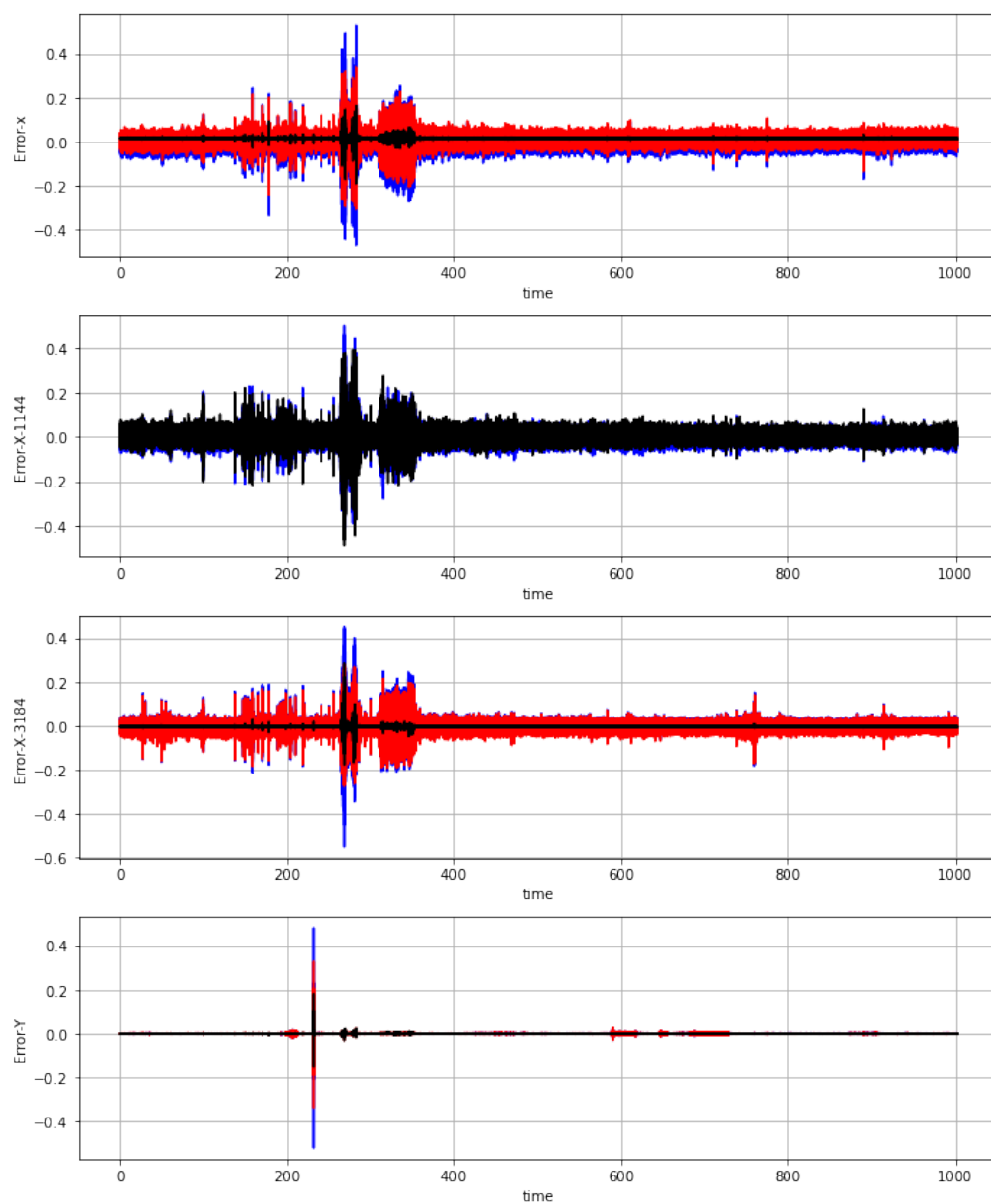
سیگنال‌های بدست آمده از خروجی شبکه عصبی که طبق استفاده از تحلیل مؤلفه مستقل همان سیگنال‌های پاسخ مودال هستند، در محیط برنامه نویسی بصورت شکل ?? درآمده است.

یکی از محاسن استفاده از روش تحلیل مؤلفه مستقل این است که می‌توان رکوردهای اولیه و ورودی به شبکه عصبی را پس از بدست آوردن پاسخ‌های مودال و به کمک ضرایب بدست آمده، مجدداً بازسازی کرد. البته هر چه اختلاف سیگنال بازسازی شده با سیگنال ابتدائی کمتر باشد، دقت کار بهتر بوده است. در شکل ۵.۶ اختلاف سیگنال اولیه با سیگنال بازسازی شده نشان داده شده است.

بدست آوردن اختلاف دو سیگنال به تنهایی معیار مناسبی برای مقایسه و ارزیابی تحلیل نخواهد بود، به دلیل اینکه مدت زمان سیگنال ارتباط مستقیمی با مقادیر بدست آمده، خواهند داشت. فلذا به نظر می‌رسد تقسیم اختلاف سیگنال‌ها به طول مدت سیگنال معیار مناسبی باشد. همانطور که در شکل ۶.۶ نشان داده شده است. البته بدست آوردن ماتریس همبستگی (*CrossCorrelationMatrix*) هم می‌تواند راهگشا باشد که در شکل ?? مقادیر ماتریس همبستگی نشان داده شده است.



شکل ۴.۶: رکوردهای خروجی گرفته شده بوسیله شبکه عصبی



شکل ۵.۶: اختلاف رکوردهای خروجی گرفته شده با رکوردهای اولیه بوسیله شبکه عصبی

```

1# absolute error between 4d layer output and input
2mse_list=[]
3for i in range(100):
4    data=input_data[:,i,:]
5    output=model.forward(data)
6    layer4_out=output.detach().numpy()
7    mse_list.append( torch.mean (torch.abs(data-layer4_out) ) )
8torch.mean(torch.FloatTensor(mse_list))

```

executed in 175ms, finished 09:31:41 2023-04-08

tensor(0.0065)

شکل ۶.۶: مقدار اختلاف بدست آمده از سیگنال خروجی و اولیه

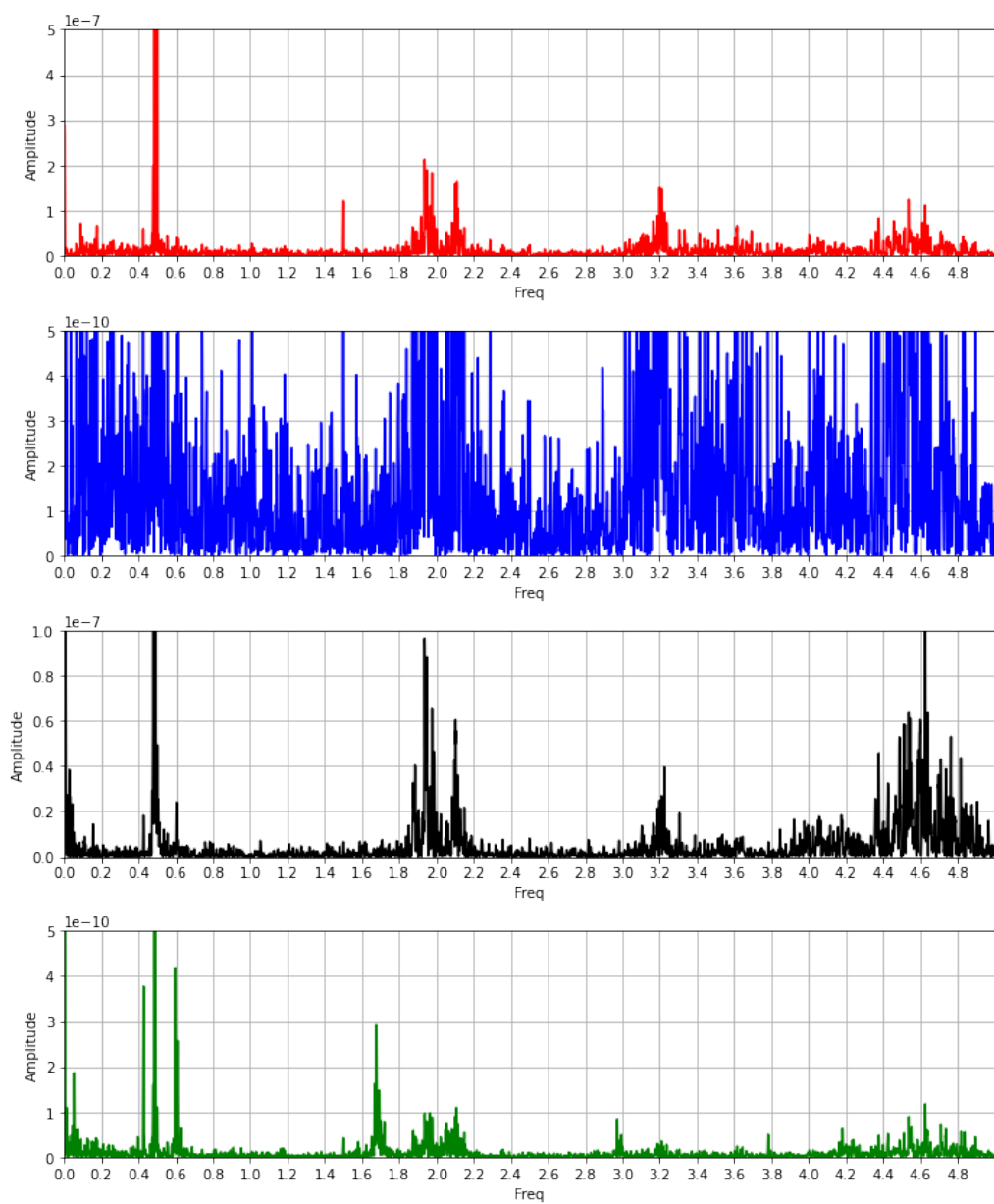
به نظر می‌سد از نظر مقایسه ابتدائی، بردن سیگنال‌های بازسازی شده به حوزه فرکانس و رسم چگالی طیف توان (PSD) بتواند به این کار سرعت ببخشد، ضمن اینکه کاملاً ساده و کاربردی می‌باشد، که در شکل ۷.۶ نشان داده شده است. برای بدست آوردن نسبت میرایی مودال از سیگنال‌های گرفته شده در لایه ۴ام ی شبکه عصبی که همان پاسخ‌های مودال سازه می‌باشد، از برازش منحنی ($CurveFitting$) موجود در ماژول ($Optimize$) کتابخانه ساینای ($SciPy.Optimize$) استفاده شده است.

برازش منحنی از بین نقاط پیک رسم شده است که در شکل ۸.۶ نشان داده شده است. همچنین مقادیر خطاهای بدست آمده از جمله پارامترهای ($RMSE$) و ($R-Square$) منحنی رسم شده در شکل ۸.۶ در شکل ۹.۶ نشان داده شده است.

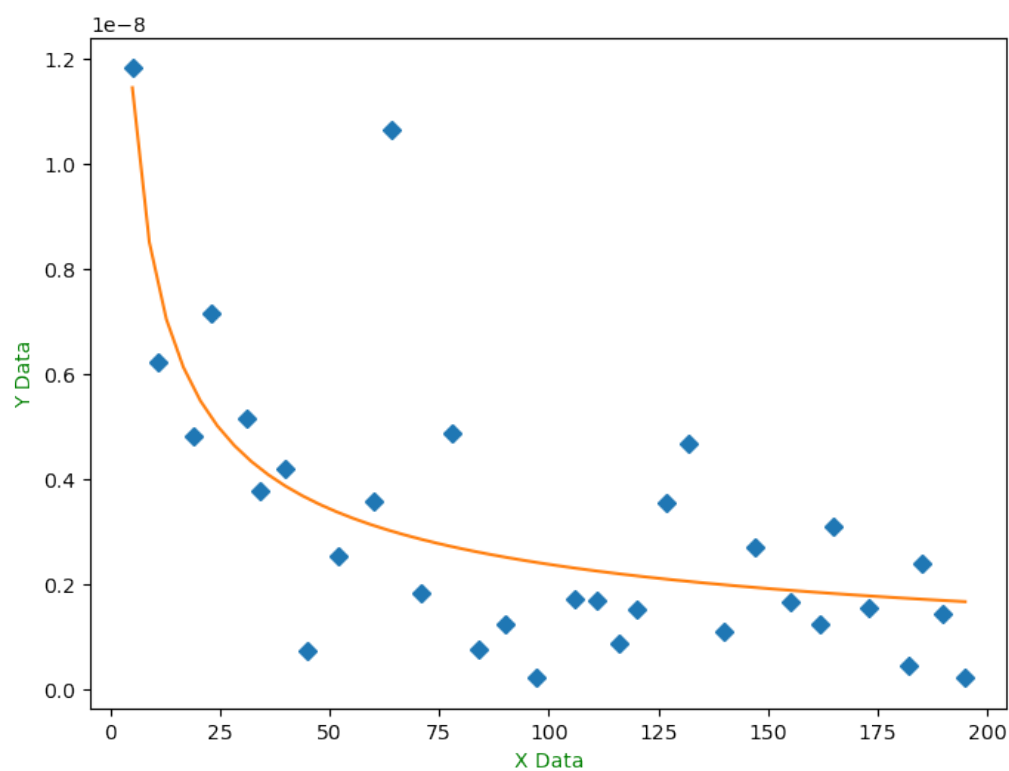
۵.۶ پروژه بیمارستان امام حسین (ع)

۱.۵.۶ تست‌های در راستای طولی ساختمان

برای انجام تست ارتعاش محیطی ساختمان بیمارستان، سنسور سه محوره را در بالاترین طبقه که طبقه ۴ام بود قرار داده شد و سنسورهای تک محوره در طبقات دوم و همکف نصب شدند. طبقه زیرزمین بیمارستان هم همانطور



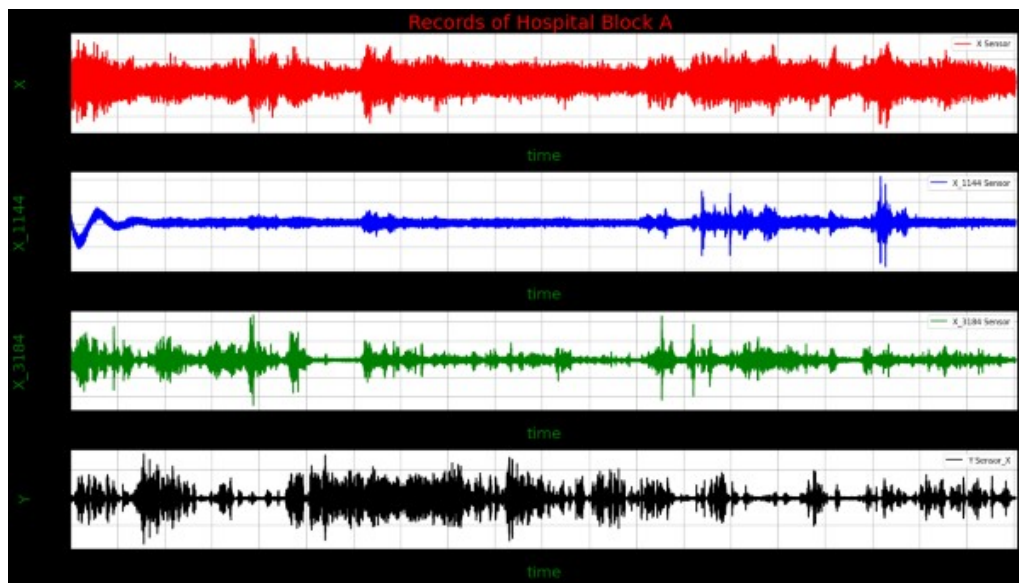
شکل ۷.۶: فرکانس‌های بدست آمده از سیگنال‌های بازسازی شده بوسیله شبکه عصبی



شکل ۸.۶: فرکانس‌های بدست آمده از سیگنال‌های بازسازی شده بوسیله شبکه عصبی

Parameters: [2.80387213e-08 8.91987710e-02 5.33975013e-01]
 RMSE: 1.8545225260472831e-09
 R-squared: 0.5422370636734283

شکل ۹.۶: فرکانس‌های بدست آمده از سیگنال‌های بازسازی شده بوسیله شبکه عصبی

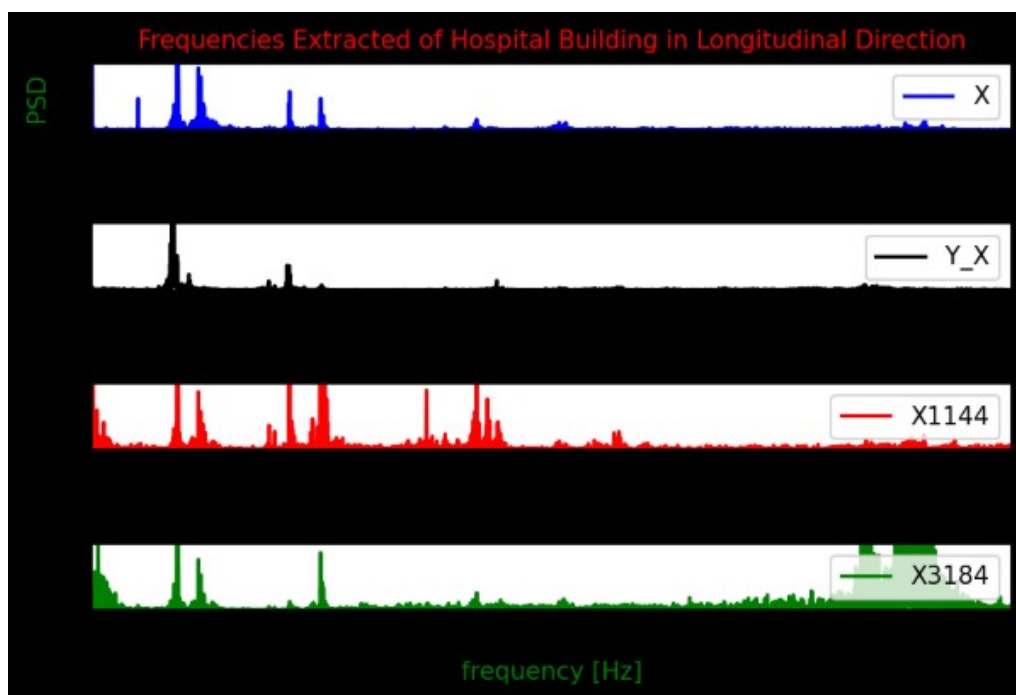


شکل ۱۰.۶: فرکانس‌های بدست آمده از سیگنال‌های بازسازی شده بوسیله شبکه عصبی

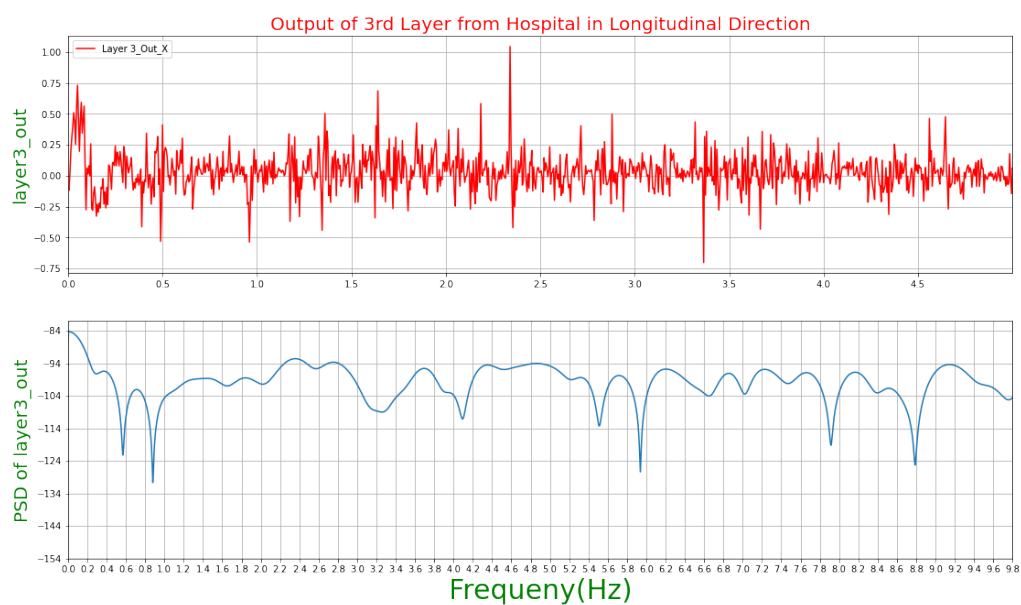
که در فصل چهارم بدان اشاره شد بر روی چداساز قرار گرفته بود. رکوردهای برداشت شده از سازه‌ی بیمارستان در شکل ۱۰.۶ نشان داده شده است.

برای ورود به حوزه فرکانس از کتابخانه ساینی پای (SciPy) و دستور *Periodogram* استفاده شده است. برای همین رکورد صورت گرفته خروجی بدست آمده در شکل ۱۱.۶ نشان داده شده است. پاسخ‌های بدست آمده از خروجی لایه سوم شبکه عصبی که طبق استفاده از تحلیل مؤلفه مستقل همان سیگنال‌های پاسخ مودال هستند، در محیط برنامه‌نویسی بصورت شکل ۱۲.۶ درآمده است. یکی از محاسن استفاده از روش تحلیل مؤلفه مستقل این است که می‌توان رکوردهای اولیه و ورودی به شبکه عصبی را پس از بدست آوردن پاسخ‌های مودال و به کمک ضرایب بدست آمده، مجدداً بازسازی کرد. البته هر چه اختلاف سیگنال بازسازی شده با سیگنال ابتدائی کمتر باشد، دقت کار بهتر بوده است. در شکل ۱۳.۶ اختلاف سیگنال اولیه با سیگنال بازسازی شده نشان داده شده است.

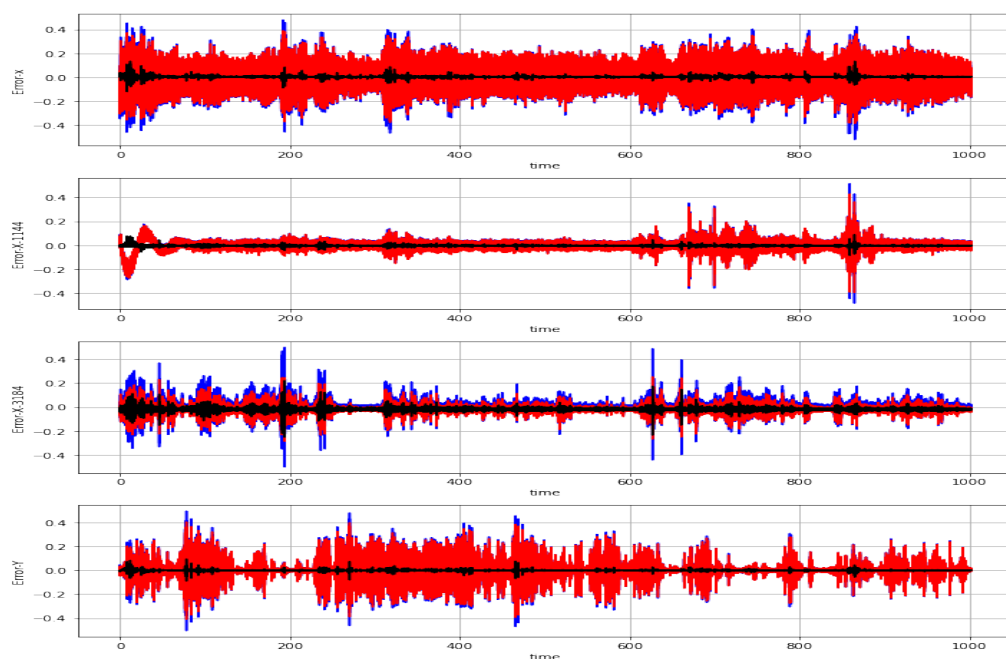
فرکانس‌های بدست آمده از سیگنال‌های بازسازی شده از طریق شبکه عصبی عمیق در شکل نشان ۱۴.۶ داده شد است.



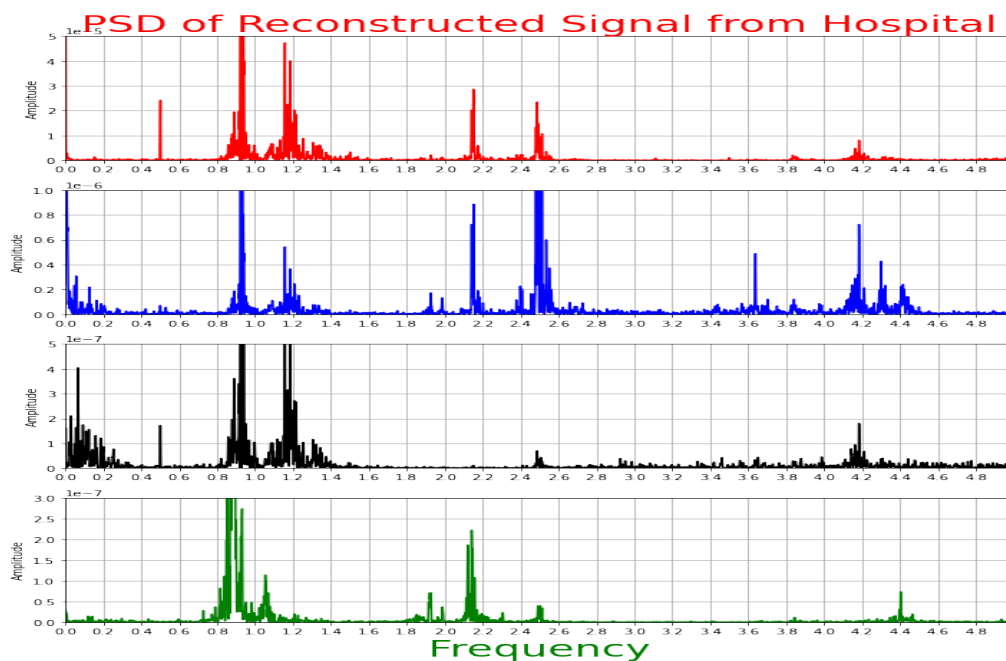
شکل ۱۱.۶: فرکانس‌های بدست آمده از ساختمان بیمارستان در راستای طولی



شکل ۱۲.۶: رکوردهای خروجی گرفته شده از لایه سوم بوسیله شبکه عصبی



شکل ۱۳.۶: اختلاف رکوردهای خروجی گرفته شده با رکوردهای اولیه بوسیله شبکه عصبی

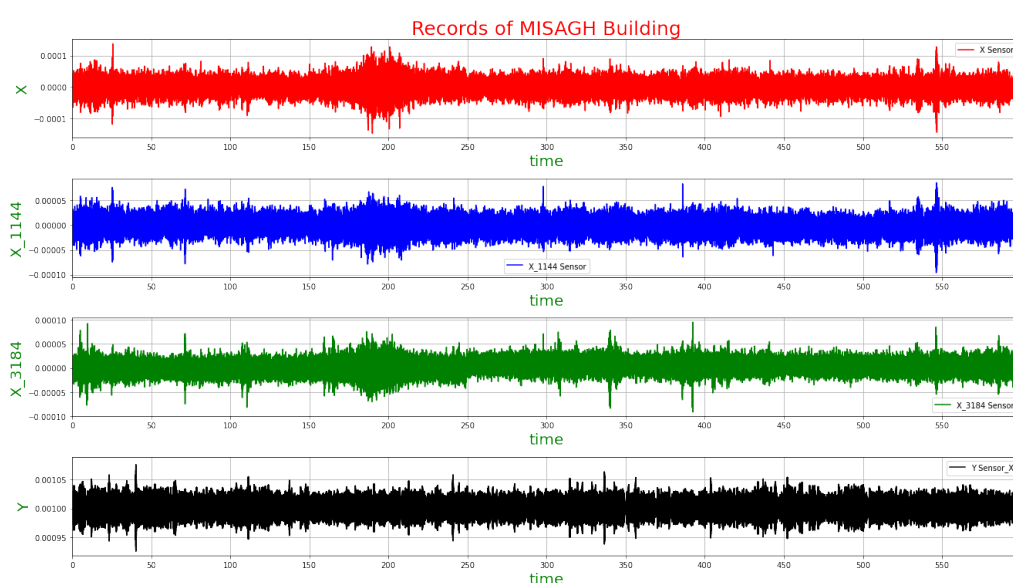


شکل ۱۴.۶: فرکانس‌های بدست آمده از خروجی شبکه عصبی عمیق ساختمان بیمارستان

۶.۶ پروژه مسکونی محمدیه ۵

۱.۶.۶ تست‌های در راستای طولی ساختمان

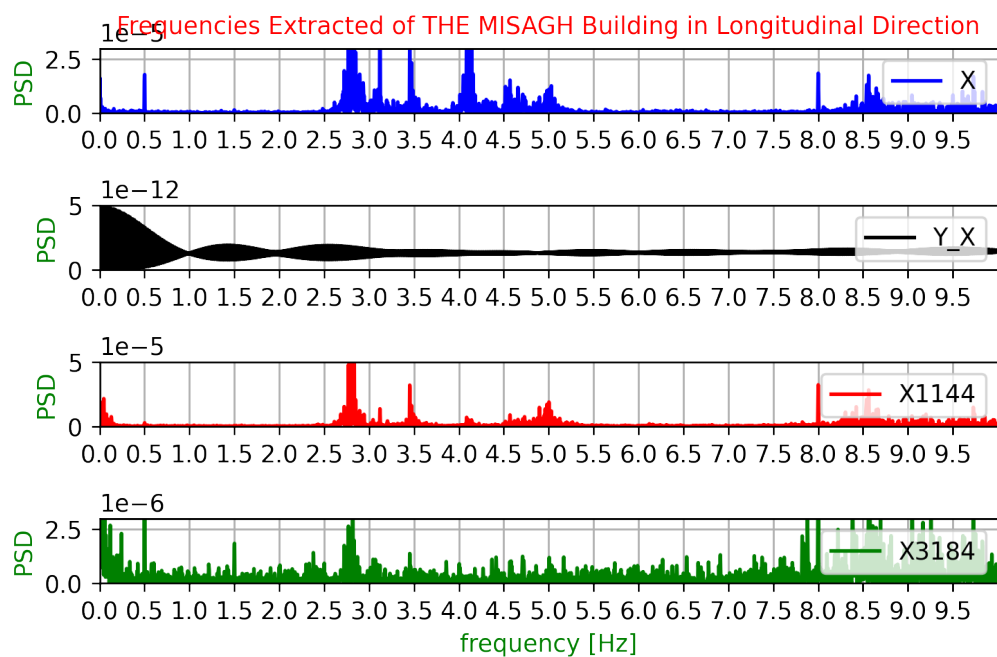
برای انجام تست ارتعاش محیطی ساختمان مسکونی واقع در محله میثاق شهر مشهد سنسور سه محوره را در بالاترین طبقه که بام بود قرار داده شد و سنسورهای تک محوره در طبقات سوم و همکف نصب شدند. رکوردهای برداشت شده از ساختمان در شکل ۱۵.۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۵.۶: سیگنال‌های دریافت شده از ساختمان محمدیه ۵

برای ورود به حوزه فرکانس از کتابخانه سای پای (SciPy) و دستور *Periodogram* استفاده شده است.

برای همین رکورد صورت گرفته خروجی بدست آمده در شکل ۱۶.۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۶.۶: فرکانس‌های بدست آمده از ساختمان محمدیه ۵ در راستای طولی

فصل ۷

نتیجه گیری

۱.۷ مقایسه نتایج

مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج بدست آمده از تست‌های ارتعاش محیطی در این تحقیق از نظر محقق به دلایل زیر صحیح نمی‌باشد:

۱. بارگذاری واقعی صورت گرفته با بارگذاری مدل‌سازی بدلائل مختلف اجرایی مطابقت ندارد
۲. ساختمان‌های تست شده هر کدام در مرحله‌ای از ساخت قرار داشتند که تعیین مقدار درصد بارگذاری شده روی هر کدام میسر نبود
۳. بطور معمول سازه‌هایی که تست ارتعاش محیطی روی آنها صورت می‌گیرد و از روش‌های تحلیل مودال بهره‌برداری برای استخراج پارامترهای دینامیکی استفاده می‌کنند، بعد از گذشت رخدادی یا زمان چند ساله از تست قبلی آن را تکرار کرده و نتایج را با یکدیگر مقایسه می‌کنند.
۴. در این تحقیق داده‌های تست ارتعاش محیطی با توجه به حجم و زمان تحلیل تنها در یک راستا در هر کدام از سازه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت.

علیرغم مطالب مطرح شده در بالا، برای اینکه نتایج روش‌های مختلف را در یک بخش مجزا داشته باشیم، مقایسه مقادیر فرکانس و نسبت‌های میرایی به تفکیک سازه‌های مورد مطالعه صورت گرفته است.

۱.۱.۷ ساختمان کوه نور

در این قسمت مقایسه فرکانس و نسبت میرایی مودهای مختلف ساختمان کوه نور که از روش‌های مختلف بدست آمده است در جدول‌های ۱.۷ و ۲.۷ نشان داده شده است.

جدول ۱.۷: فرکانس‌های ساختمان کوه نور

Modes	Analytical	SSI	FDD	DNN
First	0.415	0.509	0.487	0.486
Second	0.589	0.58	—	0.61
Third	0.831	0.88	—	—

جدول ۲.۷: نسبت میرایی ساختمان کوه نور در فرکانس ۱.۷۵ هرتز

Damping Ratio (%)	SSI	FDD	DNN
	2.785	—	2.874

۲.۱.۷ ساختمان بیمارستان

در این قسمت مقایسه فرکانس و نسبت میرایی مودهای مختلف ساختمان بیمارستان امام حسین (ع) که از روش‌های مختلف بدست آمده است در جدول‌های ۴.۷ و ۳.۷ نشان داده شده است.

جدول ۳.۷: فرکانس‌های ساختمان بیمارستان

Modes	Analytical	SSI	FDD	DNN
First	0.839	0.895	0.877	0.91
Second	1.078	1.009	0.926	1.11
Third	2.079	2.19	2.487	2.21

جدول ۴.۷: نسبت میرایی ساختمان بیمارستان در فرکانس ۱.۱ هرتز

Damping Ratio (%)	SSI	FDD	DNN
	1.793	0.369	1.567

۳.۱.۷ ساختمان محمدیه ۵

در این قسمت مقایسه فرکانس و نسبت میرایی مودهای مختلف ساختمان محمدیه ۵ که از روش‌های مختلف بدست آمده است در جدول‌های ۶.۷ و ۵.۷ نشان داده شده است.

جدول ۵.۷: فرکانس‌های ساختمان محمدیه ۵

Modes	Analytical	SSI	FDD	DNN
First	0.921	—	0.877	—
Second	1.745	1.514 4	—	—
Third	2.487	2.887	2.48	2.81

جدول ۶.۷: نسبت میرایی ساختمان محمدیه ۵ در فرکانس ۲.۴۹۶ هرتز

Damping Ratio (%)	SSI	FDD	DNN
	1.793	0.369	1.567

در روشهای یادگیری عمیق که در پایش سلامت سازه ها از آن استفاده میشود، به نظر میرسد برای سازه هایی که بتوان بعنوان جرم متمرکز در تحلیل آنها استفاده کرد، و دارای بیشترین جرم در طبقات باشد و بطور کلی تر سازه های ساختمانی بتوان نتایج مناسبی از مودهای ارتعاشی و پارامترهای دینامیکی آنها به کمک تکنیک های یادگیری عمیق نظارت نشده استخراج کرد. البته برای سازه هایی که دارای تحلیل مؤلفه مستقل جرم گسترده هستند مشابه دودکش ها و سیلو ها کارهای تحقیقاتی بوسیله محققان در دست انجام می باشد.

روش های نوین هوش مصنوعی و زیرشاخه های آن از جمله یادگیری عمیق می تواند در آینده ای نزدیک و با افزایش برداشت داده های مختلف از سازه های گوناگون روال طراحی و علی الخصوص بهسازی سازه ها و ارزیابی سازه ها را در رشته مهندسی عمران متحول سازد و بدون نیاز به بازرسی های چشمی و دوره ای و حتی دانستن شرایط و مشخصات هندسی و مکانیکی سازه، شرایط سلامت و حتی عیب یابی آن را مشخص نمود. با پیشرفت تکنولوژی، دقت تجهیزات نیز افزایش یافته و هزینه تست های پایش سلامت نیز کاهش خواهد یافت. تنها مساله ای که در مورد آن نگرانی هایی بوجود آورده است، حجم اطلاعات و طریقه و هزینه نگهداری آن ها می باشد.

با توجه به مقالات اخیر که نقص استفاده از روش مؤلفه مستقل را عدم تفکیک مودهای نزدیک به هم عنوان کرده بودند، در این تحقیق بدلیل اینکه در دو راستای متعامد سازه ها نمونه برداری شدند، و دو مود پشت سر هم در یک راستا در سازه های ساختمانی به یکدیگر نزدیک نیستند با این مساله مواجه نشده ضمن اینکه برای سازه های دیگر مثل پل ها، دودکش ها و سازه های پوسته ای ممکن است این مساله ایجاد شود.

معمولا در کارهای تجربی از جمله پایش سلامت سازه، تعداد سنسورها و تجهیزات بر دقت کار تاثیر بسزایی می گذارد که در این تحقیق با توجه به تعداد سنسورهای موجود، امکان بدست آوردن مودهای پیچشی وجود نداشت، که به همین دلیل در ساختمان کوه نور که مود اول آن پیچشی بود در روش های شناسایی در حوزه زمان امکان دست یابی به آن میسر نشد.

شاید بتوان اینطور از این تحقیق نتیجه گیری نمود که روش های نوین هوش مصنوعی و زیرشاخه های آن از جمله یادگیری عمیق می تواند در آینده ای نزدیک و با افزایش برداشت داده های مختلف از سازه های گوناگون روال طراحی و علی الخصوص بهسازی سازه ها و ارزیابی سازه ها را در رشته مهندسی عمران متحول سازد و بدون نیاز به بازرسی های چشمی و دوره ای و حتی دانستن شرایط و مشخصات هندسی و مکانیکی سازه، شرایط سلامت

و حتی عیب‌یابی آن را مشخص نمود. با پیشرفت تکنولوژی، دقت تجهیزات نیز افزایش یافته و هزینه تست‌های پایش سلامت نیز کاهش خواهد یافت. تنها مساله‌ای که در مورد آن نگرانی‌هایی بوجود آورده است، حجم اطلاعات و طریقه و هزینه نگهداری آن‌ها می‌باشد.

استفاده از الگوریتم‌ها و بهینه‌یاب‌های جدید هم به سرعت همگرایی پاسخ‌ها کمک خواهد کرد و شاید دیگر نیازی به ابرکامپیترها برای تحلیل‌های شبکه عصبی عمیق نباشد. همیشه در کارهای تجربی از جمله پایش سلامت سازه، تعداد سنسورها و تجهیزات بر دقت کار تاثیر بسزایی می‌گذارد که در این تحقیق با توجه به تعداد سنسورهای موجود، امکان بدست آوردن مودهای پیچشی وجود نداشت. برای مودهای انتقال حداقل یک سنسور برای هر دو کف الزامی بود و برای کف‌هایی که سنسور وجود نداشت، از درون‌یابی خطی استفاده شد.

در مورد سازه‌ی خاص مورد مطالعه، با جداسازهای بکار رفته، با توجه به سختی افقی جداسازهای با هسته سربی برای تست‌های ارتعاش محیطی، امکان حرکت جداسازها وجود نداشت، فلذا تفاوت چندان با سازه‌ی مشابه با تکیه گاه گیردار ایجاد نکرد. البته اگر از جداسازهای با هسته سربی استفاده نمی‌شد و امکان حرکت جداسازها ناشی از ارتعاشات محیطی وجود داشت این تفاوت می‌توانست خود را به خوبی نمایان سازد، ولی با فلسفه طراحی این تجهیزات که امکان تغییر شکل تحت اثر بارهای محیطی و کوچک را به جهت معیار آسایش ساکنان مناسب نمی‌داند، مغایرت داشت.

درصد میرایی بحرانی برای مودها در دو روش تجزیه حوزه فرکانس و شناسایی زیرفضای اتفاقی، تفاوت زیادی داشت که این امر می‌تواند ناشی از فیلتری باشد که در روش تجزیه حوزه زمان بکار گرفته می‌شود و بخش مهمی از انرژی سیگنال حذف می‌شود. مساله بعدی که در این تحقیق باید بدان اشاره کرد، بحث مدل سازی به کمک نرم افزار است که با توجه به اطلاعات کسب شده و مشاهدات میدانی بارگذاری‌ها صورت گرفت که در عمل ممکن است مطابقت کاملی با آنچه اجرا شده است نداشته باشد و اینکه هیچ اختلافی بین روش عددی و تحلیلی وجود نداشته باشد، واقع بینانه نیست. جانمایی سنسورها هم تا حد امکان سعی شد در مرکز جرم طبقات گذاشته شود و سپس برآشت‌ها صورت پذیرد.

در روش‌های یادگیری عمیق که در پایش سلامت سازه‌ها از آن استفاده می‌شود، به نظر می‌رسد برای سازه‌هایی که بتوان بعنوان جرم متمرکز در تحلیل آنها استفاده کرد، و دارای بیشترین جرم در طبقات باشد و بطور کلی تر سازه‌های ساختمانی بتوان نتایج مناسبی از مودهای ارتعاشی و پارامترهای دینامیکی آن‌ها به کمک تکنیک تحلیل

مؤلفه مستقل (ICA) همراه با یادگیری عمیق نظارت نشده استخراج کرد. البته برای سازه‌هایی که دارای جرم گسترده هستند مشابه دودکش‌ها و سیلوها و... کارهای تحقیقاتی بوسیله محققان در دست انجام می‌باشد. از این روش پایش سلامت سازه‌ها می‌بایستی در ساختمان‌های قدیمی و هنری و موزه‌ها که جزئی از میراث به جا مانده از گذشتگان است بطور پایش پیوسته و دائمی بهره برد تا از کوچکترین تغییر در شرایط سازه‌ای آنها آگاه شد و در جهت رفع و تعمیر آنها عمل نمود. این مقوله دارای دامنه بسیار گسترده‌ای است که در کشور ما هنوز بدان اهمیتی داده نشده است. به امید آن روز.

۲.۷ پیشنهاداتی برای کارهای آینده:

۱. کنترل و ارزیابی اینکه آیا با توجه به اینکه در این تحقیق از مودهای پیچشی صرفنظر گردیده، با در نظر گرفتن این مودها چه تاثیری روی پاسخ‌ها خواهد داشت.
۲. اگر سازه مورد مطالعه دارای مودهای نزدیک به یکدیگر داشته باشد، شرایط چه تغییری خواهد کرد.
۳. در سازه‌های غیرساختمانی شرایط استفاده از این روش و الگوریتم چه تغییراتی خواهد داشت.
۴. کم یا زیاد کردن مدت نمونه برداری چه تاثیری روی پاسخ‌ها خواهد گذاشت.
۵. تغییر در جانمایی سنسورهای شتاب چه تاثیراتی روی نتایج خواهد داشت.
۶. چه راهکار دیگری برای استفاده از تعداد سنسور محدود در سازه‌های بلند می‌توان بکار بست.
۷. در صورت استفاده از سنسورهای شتاب ممز به جای تعادل نیرویی چه تاثیری روی پاسخ‌ها ایجاد می‌شود.
۸. آیا از این روش برای تحلیل مودال غیرخطی هم می‌توان استفاده کرد.
۹. آیا استفاده از الگوریتم‌های دیگر در پاسخ‌ها به چه میزانی تاثیرگذار است.
۱۰. آیا اگر شرایط محیطی از جمله دما تغییر کند، پاسخ‌ها تغییرات معناداری خواهند داشت یا خیر.

۱۱. آیا استفاده از درون‌یابی خطی برای طبقاتی که در آن‌ها سنسور نصب نشده بود، درست بوده است

حجم داده‌های بدست آمده از تست‌های ارتعاش محیطی در این تحقیق علی‌الخصوص ساختمان کوه نور کمیتی در حدود ۲۸ میلیون داده از این ساختمان بدست آمده است

روش‌های شبکه عصبی عمیق به شدت به تعداد داده حساس و دقت آن را افزایش می‌دهد، فلذا محقق نتوانست مدلی را با تمامی این داده‌ها، هم بدلیل زمان تحلیل شبکه و هم سرعت سیستم‌های در اختیار بدست بیاورد. به نظر محقق این تعداد از داده می‌تواند یک مدل بسیار دقیق را تولید کند که هر داده‌ای از هر سازه‌ای داخل مدل شود با پاسخ‌های خوبی خروجی گرفته شود.

این مساله مستلزم انجام این کار و تست کردن حداقل ده‌ها تست دیگر از سازه‌های با شرایط مختلف می‌باشد که امید است در صورت داشتن وقت محقق به این کار همت گماشته در غیر این‌صورت آمادگی کامل جهت مشاوره و همکاری با محققین دیگر وجود دارد.

آپوست

روشهای برپایه مبانی غیرفیزیک

از جمله ابزارهای منحصر بفردی که با تواناییهای ویژه آن می توان به درک واقع بینانه تری از طبیعت سیگنالهای لرزه ای رسید، تبدیل موجک می باشد (*wavelet*). آنالیز دینامیکی سریهای زمانی در گذشته توسط دو تبدیل فوریه و تبدیل سریع (FFT) که این کار را بصورت سریعتری انجام می دهد و محتوای (*waveletTransform*) صورت می گرفت. اشکال تبدیل فوریه آن است که نمی تواند در کنار تعیین مقدار فرکانس، زمان وقوع آن را نیز مشخص کند که البته این اشکال را روش تبدیل قطعه ای فوریه تا حدی برطرف ساخته است اما ایراد اول همچنان پابرجاست.

بطور عمومی بسیاری از سریهای زمانی طبیعی اعم از سریهای زمانی هیدرولوژیکی، از نوع غیرپایا که عنوان گردید تبدیل فوریه گزینه چندان مناسبی در تحلیل محتوای فرکانسی آنها نمی باشد. این (*Wavelet*) تبدیل موجکی ضمن آنالیز فرکانس سیگنال با امکان تغییر مقیاس، می توان زمان و حجم مشکل را کاملاً مرتفع ساخته است. در تبدیل امکان تجزیه و ترکیب سیگنالها به امواج پایه و اختلالات *Wavelet* محاسبات را کاهش داد. از برجسته ترین قابلیت های آن جدا نمودن نویز از سیگنال پایه بوسیله تبدیل موجکی در مراتب مختلف می باشد یک سیستم استنتاج فازی (FIS) می تواند بعنوان نگاشت غیرخطی از فضای ورودی به فضای خروجی بکار

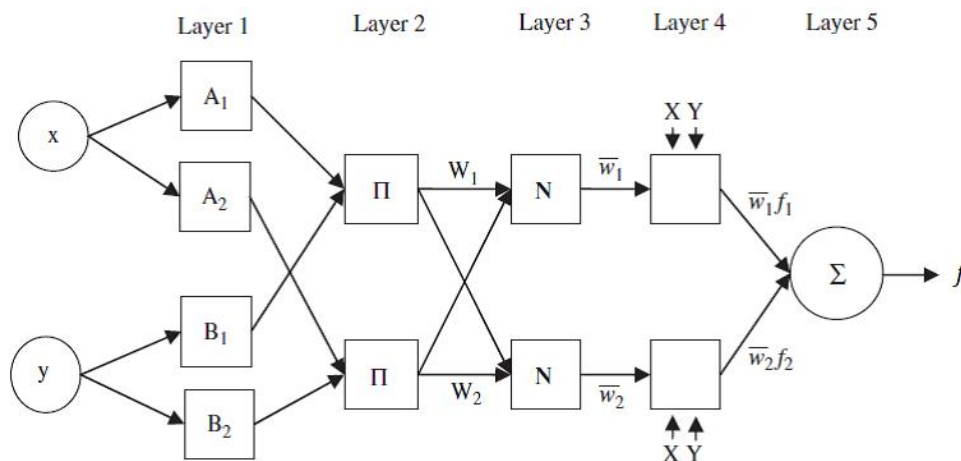
برده شود. مکانیسم نگاشت بر پایه تبدیل ورودیها از حیطه عددی به حیطه فازی با استفاده از سه مولفه عملکردی است: مجموعه قواعد، که شامل انتخاب قواعد فازی می باشد. مجموعه داده ها، که توابع عضویت (MF) را تعریف می کند. مکانیسم استدلال، که شیوه استنتاج از قواعد برای استخراج خروجی را نمایش می دهد.

FIS در قالب شبکه های تطبیقی است، که بوسیله جانگ توسعه یافته است. برای سادگی یک نمونه ANFIS شامل دو قاعده فازی ANFIS یک سیستم استنتاج فازی (اگر-آنگاه) از نوع (TakagiandSugeno) در شکل زیر نمایش داده شده است.

$$Rule1: If \ x \ is \ A_1 \ and \ y \ is \ B_1, \ then \ f_1 = p_1x + q_1y + r_1$$

$$Rule2: If \ x \ is \ A_2 \ and \ y \ is \ B_2, \ then \ f_2 = p_2x + q_2y + r_2$$

که A_1, A_2, B_1, B_2 برچسب هایی برای نمایش توابع عضویت برای ورودیهای X و Y هستند. همچنین (p_i, q_i, r_i) پارامترهای خروجی توابع عضویت هستند.



شکل ۱.۰: معماری مدل موجک

همانطور که در شکل ۱.۰ ساختار کلی ANFIS شامل گره های مربعی و گره های دایره ای تطبیقی است که پارامترهایش حین روند سلسله وار تغییر کرده است. در الگوریتم دانش ترکیبی ANFIS از پارامترهای توابع عضویت متغیرهای ورودی و پارامترهای خطی متغیر خروجی بکار رفته است. این پارامترها با استفاده از الگوریتم

تندرین شیب نزولی و روش حداقل مربعات، بهینه شده است. خروجی نهایی شبکه داده شده با دو ورودی و یک خروجی با پارامترهای بالا را می توان بصورت زیر محاسبه کرد:

$$f = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_{i=1}^2 w_i f_i}{\sum_{i=1}^2 w_i} \quad \text{for } i = 1, 2 \quad (1.)$$

$$w_i = \mu * A_i(x) \mu * B_i(y) \quad \text{for } i = 1, 2 \quad (2.)$$

که w_i قدرت شلیک یا وزن قاعده $\mu_i A(x), \mu_i B(y)$ درجه عضویت در A_i, B_i هستند. توابع گوسی با حداکثر مقدار یک (۱) و حداقل صفر (۰) برای درجات عضویت (ترازهای مشارکت) بصورت زیر انتخاب شده اند:

$$\mu_i A(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-c_i}{a_i}\right)^{2b_i}} \quad (3.)$$

$$\mu_i B(y) = \frac{1}{1 + \left(\frac{y-d_i}{e_i}\right)^{2g_i}} \quad (4.)$$

که $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, g_i$ پارامترهای فرضی هستند که برای تنظیم شکل تابع عضویت بکار برده شده است. از میان تعداد زیادی از تکنیکهای پیشنهاد شده پایش سلامت سازه در مقالات، تنها تعداد کمی، از قبیل فیلترهای کالمن سازگار محو شده (Sato and Takei 1997; Loh et al. 2000)، تکنیک فیلتر H^∞ سازگاری (Sato and Qi 1998)، نگرش فیلتر خودراه انداز (Li et al. 2004a)، روشهای برپایه شبکه های عصبی مصنوعی (Masri et al. 2000; Zapico and et al 2001; Zang et al. 2004)، یا نگرش موجک (Kim and Melhem 2004) می توانند نتایج زمان واقعی یا نزدیک به زمان واقعی را بدست آورند. به

هر صورت، اینها یا دارای هزینه و دشواری محاسباتی چشمگیری هستند یا در یافتن محل و شدت عیب ناتوان هستند. در نتیجه، توسعه تکنیک های پایش بی وقفه سلامت سازه با الگوریتم های ساده و مناسب تر همچنان عرصه چالشی می باشد. علاوه بر شناسایی سازه ای برپایه نرمی و سختی، مشتقات ماتریس سختی را هم می توان برای شناسایی خسارت بکار برد (Catbas et al. 2008)، به همان خوبی شناسایی سازه ای صریح تر با استفاده از داده های تست غیرمخرب از سازه را می توان انجام داد (Sanayei et al. 2006). این شکل از فرآیند تخمین پارامتر، قادر به تنظیم پارامترهایی از جرم و سختی مدل از قبیل صلبیت محوری (EA)، صلبیت خمشی (EI)، صلبیت پیچشی (GJ)، سختی تکیه گاه، جرم متمرکز، و جرم توزیع شده المان در واحد طول است [۱].

پیوست ب

شناسایی میرایی

ب.۱ مساله معکوس

شناسایی میرایی، یک مساله مهندسی معکوس رایج است. هدف آن استفاده از اطلاعات جمع بندی شده بوسیله کارهای تجربی برای استنباط مقادیر پارامترهای مشخصه مدل مورد آزمایش می باشد. حل این نوع از مسائل می تواند به دلایل زیادی بسیار دشوار باشد؛ اولاً؛ پارامترهای شناسایی شده مدل می تواند نادرست یا با دقت ناکافی باشد، که این امر منتج به مقادیر نامفهوم می شود که نمی توان در شبیه سازی سیستم واقعی از آن استفاده کرد. ثانياً؛ مساله معکوس می تواند دست پایین گرفته شده باشد، به نحوی که مقادیر مختلفی از پارامترها با داده ها همخوان باشند اما ضرورتاً با سیستم فیزیکی همخوانی نداشته باشد. مساله معکوس می تواند دست بالا هم گرفته شده باشد، به نحوی که تخمین حداقل مربعات ضروری خواهد بود و پارامترهای شناسایی شده بوسیله این راه حل یک سری از متوسط مقادیر سیستم واقعی تحت شرایط خاص می باشد [۱۳]. تکنیک های ارائه شده در این بخش را می توان به دو دسته اصلی تقسیم نمود: شناسایی میرایی مودال، که مقادیر نسبت میرایی یا ضریب افت هر یک از مودها را تخمین می زند، و شناسایی مکانی میرایی، که هدف آن شناسایی محل و مقدار ضرائب ماتریس میرایی است.

ب.۱.۱ سیستم یک درجه آزادی و شناسایی مودال

شناسایی میرایی در سیستم های یک درجه آزادی را می توان به طرق مختلفی انجام داد: معرفتترین آنها روشهای کاهش لگاریتمی و پهنای باند نیم-توان هستند که برای شناسایی نسبت میرایی یا ضریب افت بکار میرود. دیگر روشها شامل روش انرژی و تخمین میرایی از رسم نایکوئیست و از حلقه چرخه ای می باشد.

کاهش لگاریتمی

تکنیک کاهش لگاریتمی برپایه اندازه های نرخ تاخیر نوسانات آزاد می باشد. روش پهنای باند نیم-توان بر پایه اطلاعات بدست آمده از گراف تابع پاسخ فرکانسی سیستم یک درجه آزادی است، اما از آن می توان برای سیستم های چند درجه آزادی هم استفاده کرد که البته برای مودهایی کارایی دارد که در گراف تابع پاسخ فرکانسی به خوبی از هم تفکیک شده باشند. از نظر تئوری، مقدار میرایی را می توان بطور مستقیم از گراف دریافتی (گیرنده) بدون استفاده از روش پهنای باند نیم توان استخراج کرد؛ با تعریف ضریب بزرگنمایی Q برای سیستم یک درجه آزادی بصورت

$$Q = x^{\circ}xs \quad (\text{ب.۱.۱})$$

که x° دامنه تغییر مکان تحت بار دینامیکی و xs دامنه تغییر مکان تحت بار استاتیکی است و معادل f°/k است. متأسفانه، بدست آوردن مقدار دقیق دامنه پیک (قله) تشدید بسیار دشوار است بنابراین روش عرض باند نیم توان معمولاً ترجیح داده می شود.

روش انرژی تلف شده

روش اتلاف انرژی یا روش تعادل انرژی برای سیستم یک درجه آزادی پیشنهاد شده است و بصورت تجربی و عملی بوسیله لیانگ و فینی (*Liang and Feeny*) در سال ۲۰۰۶ اعتبارسنجی شده است. این روش برپایه تعادل بین انرژی ورودی ایجاد شده بوسیله نیروی خارجی و انرژی تلف شده بوسیله میرایی می باشد که نتیجه آن در شناسایی پارامترهای میرایی کولمب و ویسکوز معادل نشان داده می شود. یک سیستم یک درجه آزادی

در نظر بگیرید:

$$m\ddot{x} + kx + d(x, \dot{x}, \ddot{x}) = f(t) \quad (۲.ب)$$

که $d(x, \dot{x}, \ddot{x})$ تابع میرایی کلی (عمومی، نوعی) تغییر مکانها، سرعت ها و شتاب ها را ارائه می کند. معادله تعادل انرژی بوسیله انتگرال گیری در طول مسیر C بدست می آید. E_C مشارکت انرژی مولفه های پایستار سیستم است، E_d انرژی تلف شده بوسیله میرایی و E_f انرژی ورودی بوسیله نیروی خارجی $f(t)$ است. معادله ۲.ب را می توان حالا بصورت زیر بازنویسی کرد: [۱]

$$E_d = E_f - E_C \quad (۳.ب)$$

در حالت تحریک متناوب $f(t)$ و پاسخ $x(t)$ با زمان تناوب مشابه T، اگر انتگرال گیری روی یک سیکل (دور) از حرکت متناوب یا مضرب صحیحی از زمان تناوب صورت گیرد، E_C با استفاده از تعریف نیروی پایستار صفر می شود. معادله تعادل انرژی در این حالت می شود:

$$E_d = E_f - E_C \quad (۴.ب)$$

برای شناسایی این دو پارامتر (c و حاصلضرب $\mu F n$)، حداقل دو تحریک متفاوت مورد نیاز است. پیش از این اشاره شده بود به نحوه استخراج اطلاعات در مورد میرایی از گراف نایکوئیست^۱ و از حلقه هیستریزس، تکنیک های دیگر، که در این جا بدان پرداخته نشده است شامل روشهای مختلفی برپایه اندازه گیری های بی وقفه ارتعاشات، روشهای مرتبط با انرژی و روشی برپایه تلفیق پاسخ ها و موجک هاست.

۲.۱.۰ شناسایی مکانی سیستم های چند درجه آزادی

چندین روش شناسایی میرایی سیستم های چند درجه آزادی در ادبیات فنی (مقالات) وجود دارد، هر کدام از آنها دارای محاسن و معایبی می باشند. راجع به شناسایی میرایی ویسکوز خطی، روشها را می توان در سه گروه اصلی بسته به داده های ورودی به کار رفته، دسته بندی کرد: روشهای برپایه ماتریس پاسخ تابع فرکانسی^۲، روشهای برپایه پارامترهای مودال (فرکانسها و شکل مودها) و روشهای برپایه تاریخچه های زمانی.

¹Nyquist

²FRF

روشهای برپایه پاسخ تابع فرکانسی

المان Hp, q ماتریس گیرنده، پاسخ سیستم را در درجه آزادی p هنگامی که سیستم در درجه آزادی q تحریک شده است را نشان می دهد. برای سیستم پایستار خطی، قانون متقابل (نوسان) ماکسول به کار می رود به نحوی که $Hp, q = Hq, p$ و ماتریس تابع پاسخ فرکانسی متقارن است. این مشخصه اغلب برای کنترل کردن کیفیت داده های اندازه گیری شده بوسیله کنترل های نوسان استفاده می شود [۱].

مدل میرایی غیرویسکوز آن مدلی است که نیروهای میرایی وابسته به تاریخچه گذشته حرکت از طریق انتگرال های کانولوشن (حلقه، پیچیده) روی بعضی از توابع کرنل (شالوده، هسته اصلی) دارند. مدل میرایی ویسکوز مشابه این مدل، حالت خاصی از این مدل میرایی خطی عمومی (کلی) است که توابع کرنل دارای هیچ حافظه ای نباشند. مفهوم میرایی متناسب به صورت موشکافانه ای بررسی شد و فرم تعمیم یافته ای از میرایی متناسب پیشنهاد شده است. نشان داده شده است که میرایی متناسب حتی هنگامی که میرایی غیرویسکوز باشد هم می تواند وجود داشته باشد. تحلیل مودال کلاسیک به سیستم های دینامیکی خطی چند درجه آزادی با میرایی غیر ویسکوز عمومی بسط پیدا کرده است. روش جدید مشابه روش موجود است که البته با بعضی اصلاحات بخاطر اثر غیر ویسکوز مکانیسم میرایی همراه است. مفهوم مودهای الاستیک (مختلط) و مودهای غیر ویسکوز تبیین شده و روشهای عددی برای بدست آوردن آنها پیشنهاد شده است. علاوه براین نشان داده شده است که پاسخ سیستم را می توان بطور مستقیم بصورت عبارت هایی از این مودها بدست آورد. روابط تعامد مودها که برای سیستم های با میرایی ویسکوز یا بدون میرایی وجود داشت برای سیستم های با میرایی غیر ویسکوز تعمیم داده شد. نتایج مفید مختلفی که مودها را با ماتریس های سیستم مرتبط می سازد، حاصل شد. این پیشرفت های تئوری در زمینه سیستم های با میرایی غیر ویسکوز، در کنار تحلیل مودال کلاسیک، انگیزه در راستای درک مکانیسم های میرایی در سیستم های مکانیکی عمومی می دهد.

برپایه روش اغتشاش () مرتبه اول، شیوه ای برای بازشناسی ماتریس میرایی ویسکوز غیر متناسب از فرکانس ها و مودهای مختلط اندازه گیری شده پیشنهاد شده است. این شیوه برای شناسایی مدل های میرایی غیر ویسکوز بسط بیشتری یافته است. هر دو شیوه ساده، مستقیم است و می توان با اطلاعات ناقص مودی از اینها بهره برد [۲].

ب.۳.۱ شناسایی با استفاده از مدل‌های مودال؛

بوسیله تعدادی از محققان

(Allemang et al. 1994; Allemang 1995; Farrar et al. 2003; Maia and Silva 1997) روشهایی برای شناسایی پارامترهای مودال بر طبق مرتبه داده‌هایی که از آنها استفاده می‌کند (مرتبه بالا یا پایین) می‌توان دسته‌بندی کرد، و بر اساس حوزه‌ای که داده‌ها در آن تحلیل می‌شوند (حوزه زمان یا فرکانس)، تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها (Catbas et al. 2004)، و حتی تحریک ورودی (محیطی در مقابل لرزه‌ای) تحت نظر افراد زیر صورت گرفت

(Kijewski-Correa and Cycon 2007; Kijewski-Correa et al. 2008)

ب.۴.۱ ارتعاش محیطی

ارتعاشات محیطی، اطلاعاتی در مورد پارامترهای مودال سازه که ما به کمک روشهای تحلیل مودال استخراج می‌کنیم، بدست می‌دهد. تکنیک‌های مختلف زیادی برای شناسایی مودهای طبیعی سازه وجود دارد، که می‌توان آنها را به روشهای پارامتری و غیرپارامتری تقسیم کرد [۱۰].

در دسته اول، پارامترهای مدل در نظر گرفته شده برای داده‌های ثبت شده متناظر در محیط فرکانس یا زمان، به‌نگام می‌شوند. در دسته دوم، روشهای مورد استفاده تنها بعنوان ابزاری برای پردازش سیگنال بکار می‌رود به نحوی که انجام آنها ساده‌تر و آسان‌تر شود. علاوه بر این، مدل کردن مناسب سازه‌های موجود مهندسی عمران اغلب دشوار است، بطوریکه تست این شیوه‌ها قبل از هر روش سخت‌تری ضروری به نظر می‌رسد.

بطور مثال، روش انتخاب حداکثر PP شامل گرفتن قله‌های فرکانس از طیف متوسط برای تمامی حسگرهای نصب شده در نقاط مختلف می‌باشد. تفکیک محیط فرکانسی (FDD) بهبود یافته روش انتخاب حداکثر (PP) می‌باشد. این روش شامل تفکیک کردن ماتریسهای چگالی طیف توان به سیستم‌های یک درجه آزادی بوسیله تفکیک مقادیر تکیه است. هدف اصلی از این روش نمایش بهره‌مندی از داده‌های ارتعاش محیطی برای انجام و بهبود تحقیقات آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های موجود است.

ارتعاشات محیطی ثبت شده در ساختمان ها برای تخمین پارامترهای دینامیکی ساختمان برپایه تخمین های پارامترهای مودال پردازش شده است. ما در ابتدا به توضیح روش FDD که یکی از روشها در میان روشهای موجود است، می پردازیم. سپس مدل تیر برشی را پیشنهاد می کنیم که به شکل کلی داده ها برای تخمین حرکت ساختمان سازگار است. پاسخ تحلیلی برای تخمین سختی هر طبقه بصورت تابعی از شکل مودها پیشنهاد شده است. این کارهای تئوری برای ساختمانی واقع در گرنوبل فرانسه بکار گرفته شد. مشخصات مودال را با استفاده از تست های ارتعاش محیطی و داده های حرکت زمین ناشی از تخریب پل در همان منطقه برآورد کردیم. سپس مدل مودال بدست آمده به کمک پارامترهای مودال تخمین زده از ارتعاشات محیطی بوسیله مقایسه نتایج شبیه سازی تخریب پل با داده های واقعی اعتبارسنجی شده است. در نهایت سختی هر طبقه از این ساختمان و تغییر مکان نسبی میان طبقه ای حین حرکت لرزه ای برآورد می شود و بعضی اطلاعات پیرامون رفتار لرزه ای استنباط می گردد. بخاطر هزینه کمتر و کارایی تحلیل مودال عملیاتی (محاسباتی)، روش ارتعاش محیطی بخوبی برای تحلیل با مقیاس بزرگ (اصلی) ساختمان های بزرگ که باید مورد تحلیل قرار گیرند، سازگار شده است [۱].

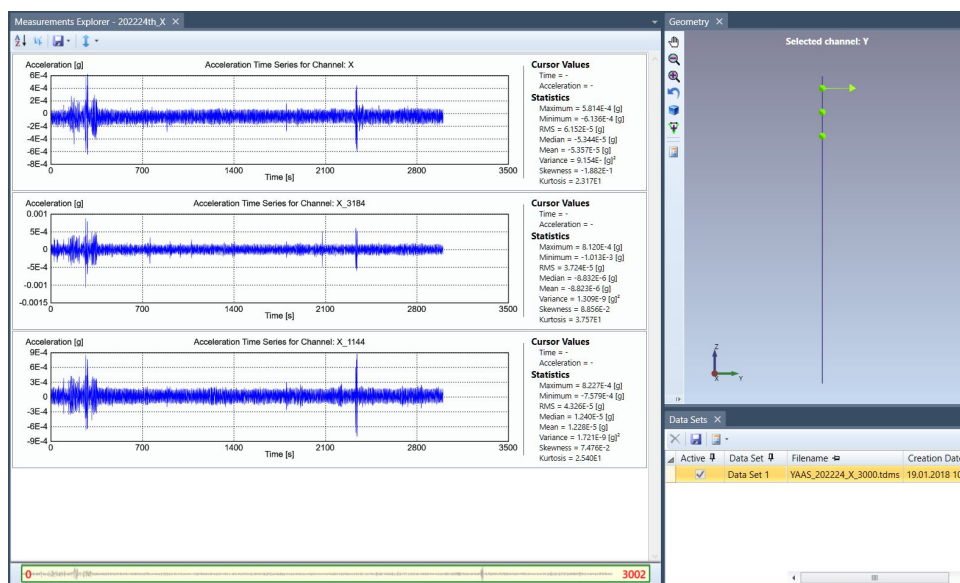


نتایج تست‌های ارتعاش محیطی در راستای عرضی

پ.۱ نتایج خروجی‌های ساختمان کوه نور عرضی

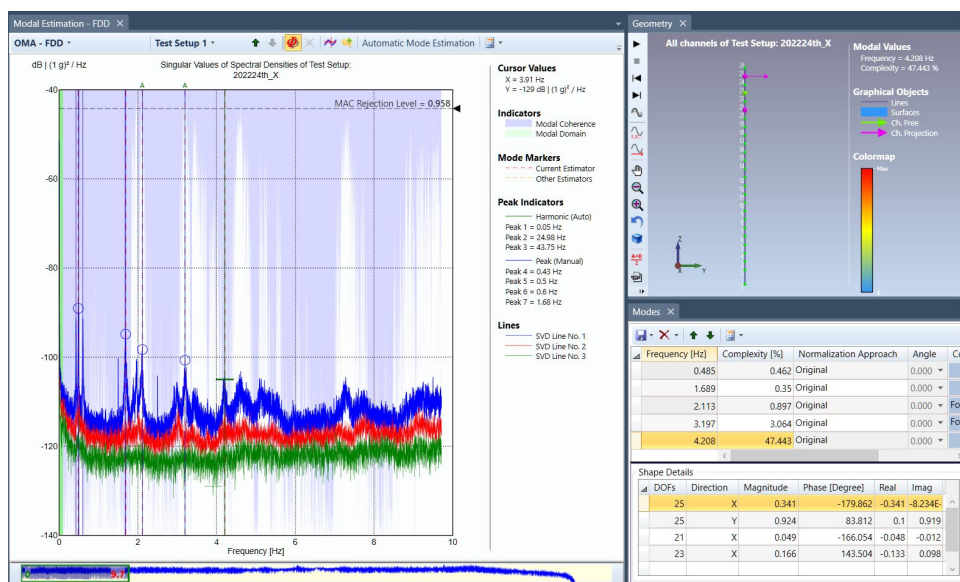
با توجه به تعداد زیاد تست‌های صورت گرفته در این ساختمان، برخی از رکوردها در بخش پیوست آورده شده است.

رکوردهای طبقات ۲۴، ۲۲ و ۲۰م در راستای طولی رفته و سیگنال‌های گرفته شده مورد بررسی قرار داده شد.



شکل پ.۱: سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۲۲،۲۴ و ۲۰م در راستای طولی

روش‌های حوزه فرکانس را مشابه حالت قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



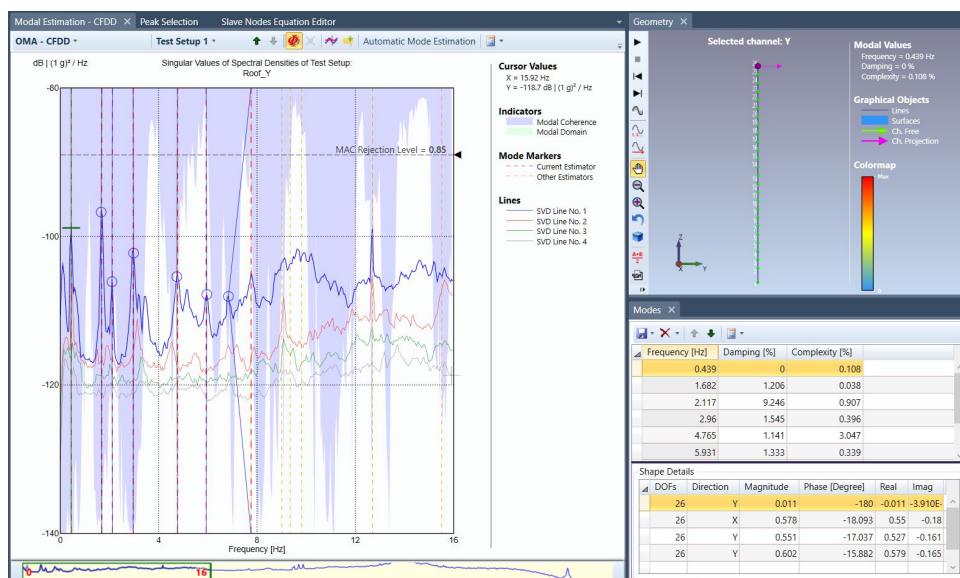
شکل پ.۲: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ.۳: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر

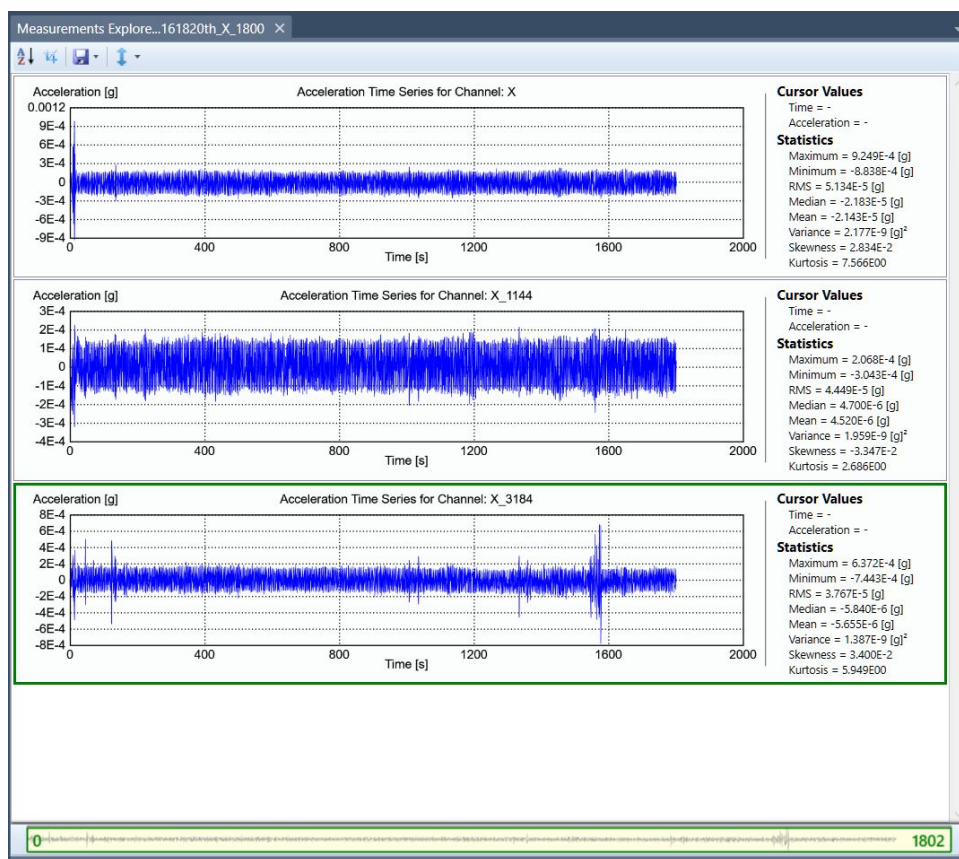


شکل پ.۴: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



شکل پ.۵: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

حال به سراغ رکوردهای طبقات ۲۰، ۱۸ و ۱۶م در راستای طولی رفته و سیگنال‌های گرفته شده مورد بررسی قرار داده شد.

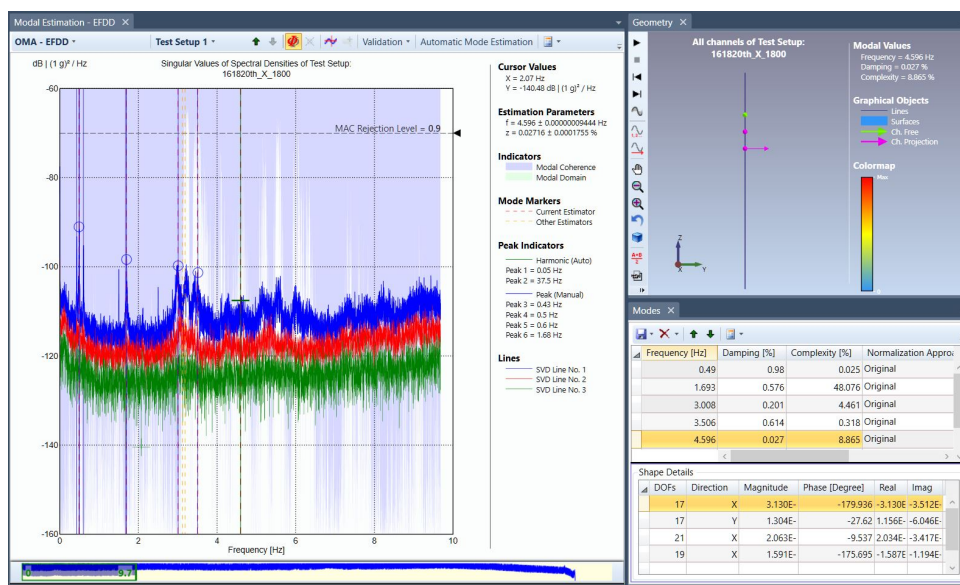


شکل پ.۶: سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۲۰، ۱۸ و ۱۶م در راستای طولی

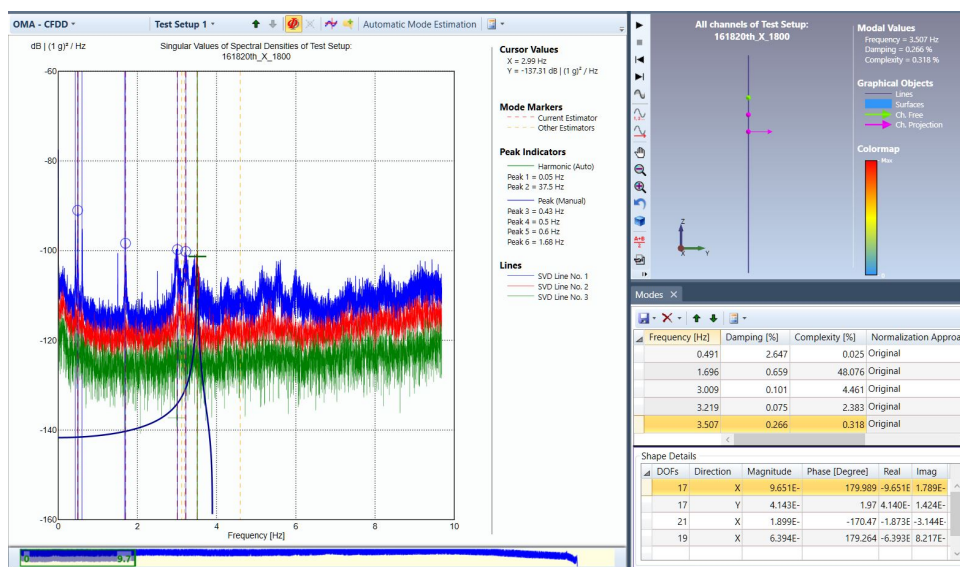
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه حالت قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



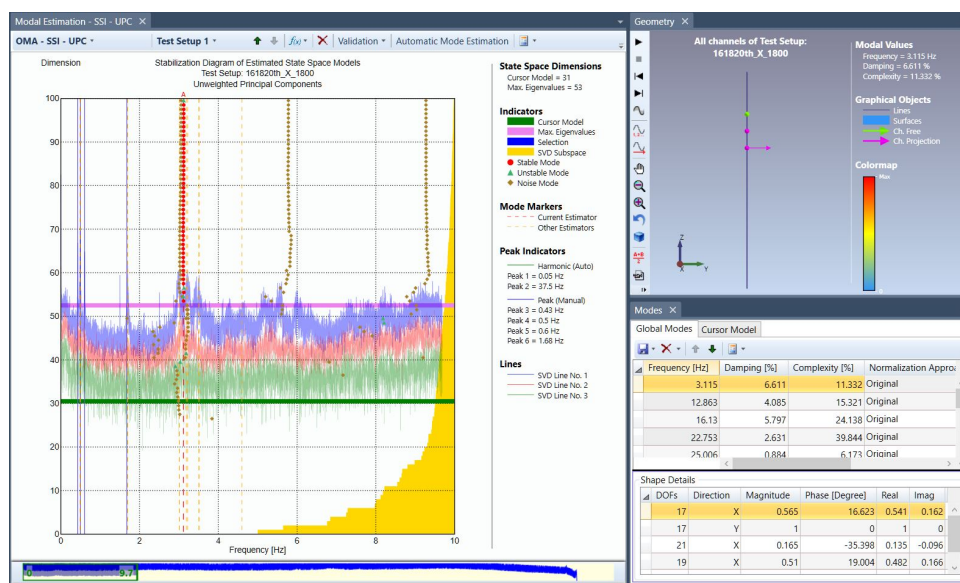
شکل پ.۷: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ.۸: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر

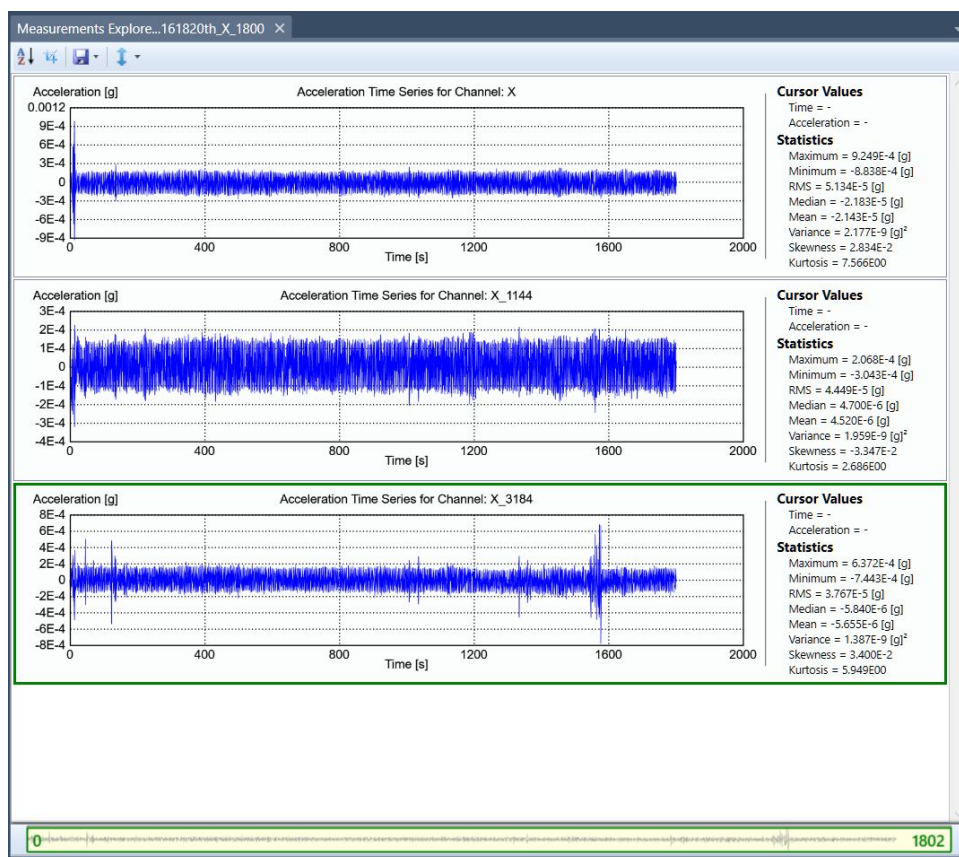


شکل پ.۹: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



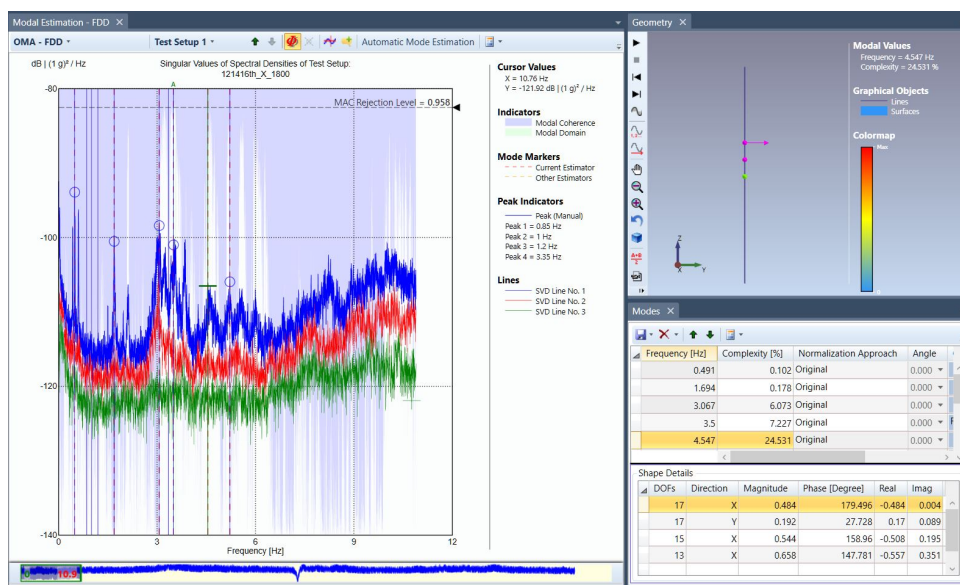
شکل پ.۱۰: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

حال به سراغ رکوردهای طبقات ۱۶، ۱۴ و ۱۲م در راستای طولی رفته و سیگنال‌های گرفته شده مورد بررسی قرار داده شد.

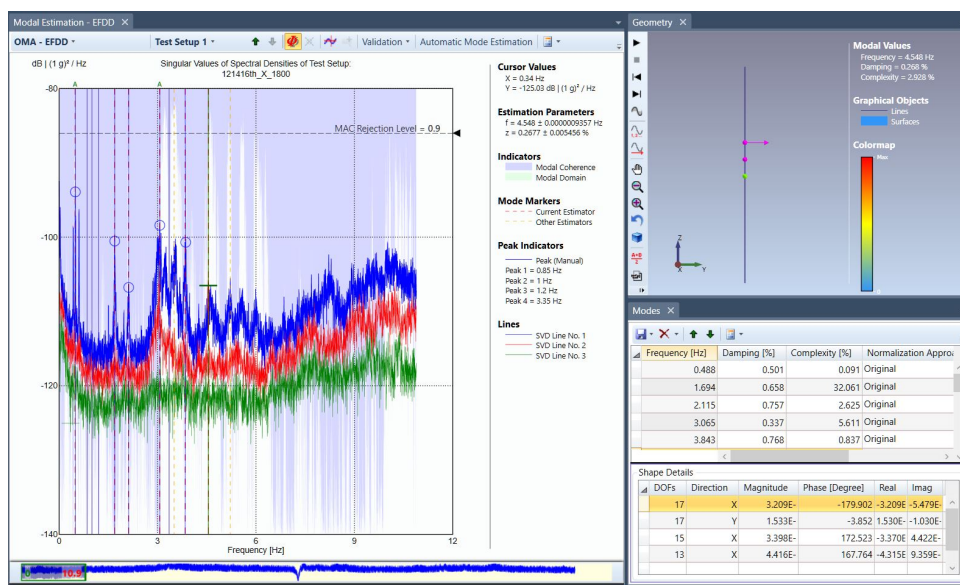


شکل پ.۱۱: سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۱۶، ۱۴ و ۱۲م در راستای طولی

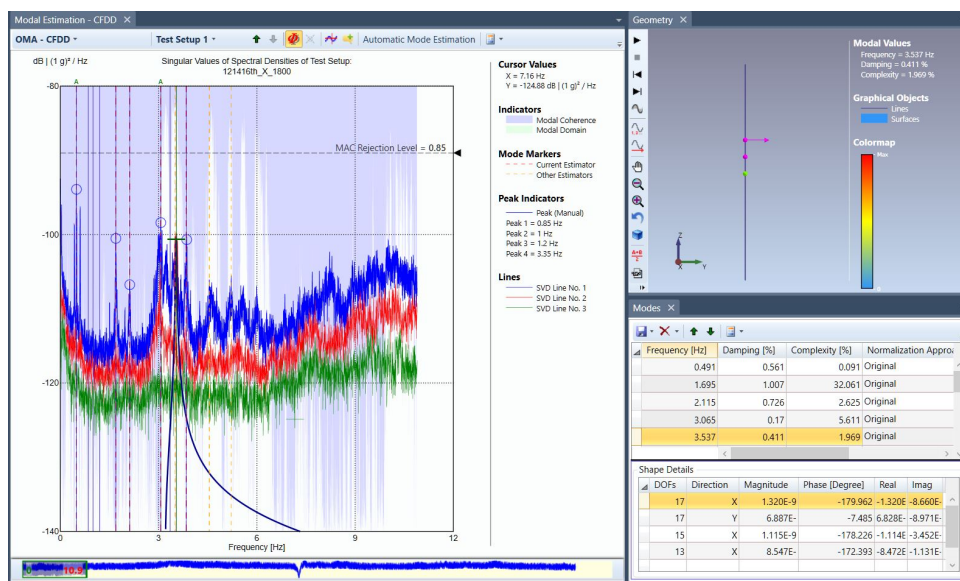
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه حالت قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



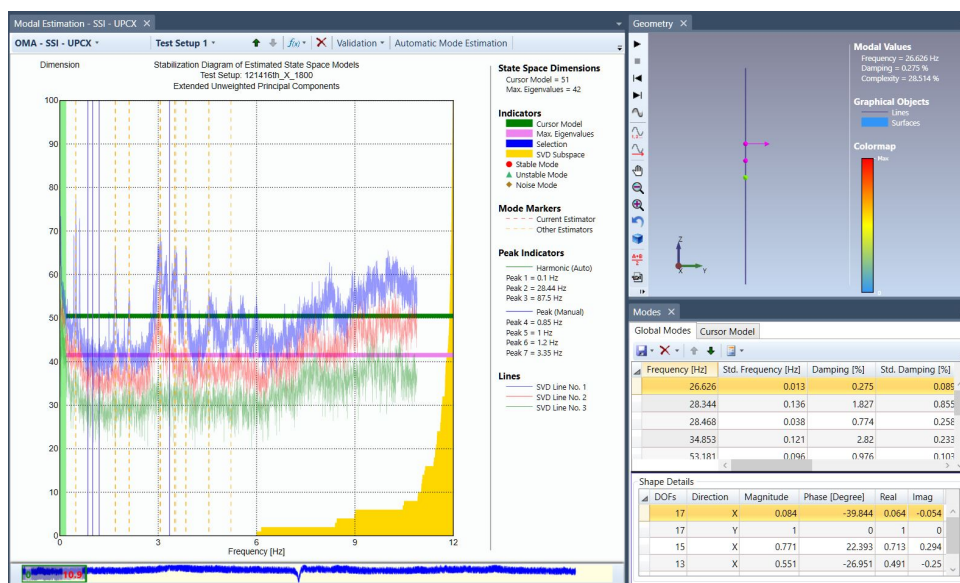
شکل پ.۱۲: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ.۱۳: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



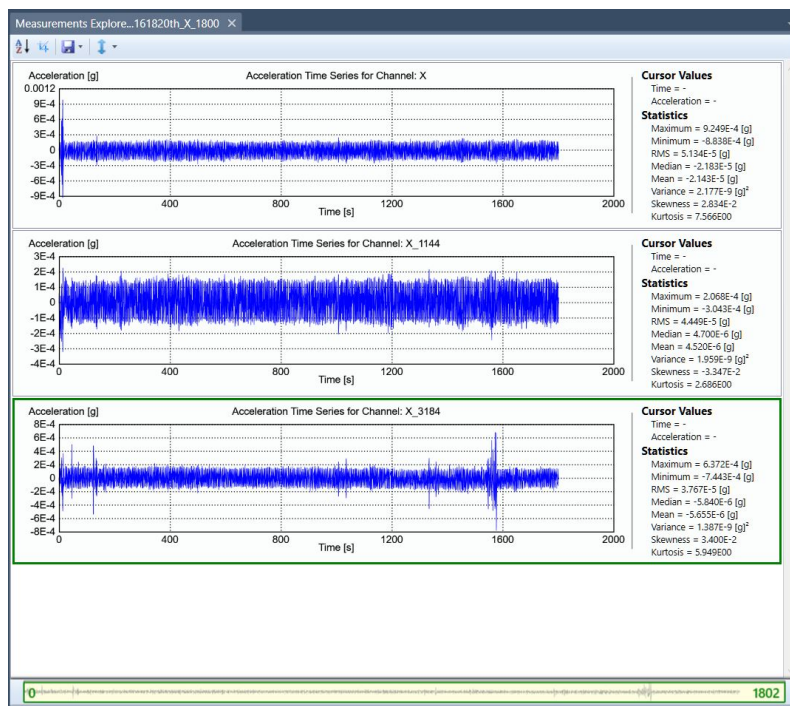
شکل پ.۱۴: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



شکل پ.۱۵: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

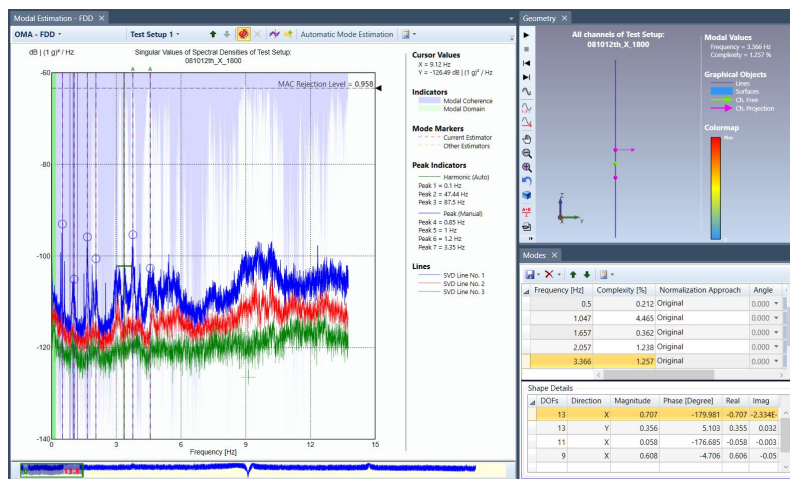
حال به سراغ رکوردهای طبقات ۱۲، ۱۰ و ۸م در راستای طولی رفته و سیگنال‌های گرفته شده مورد بررسی

قرار داده شد.

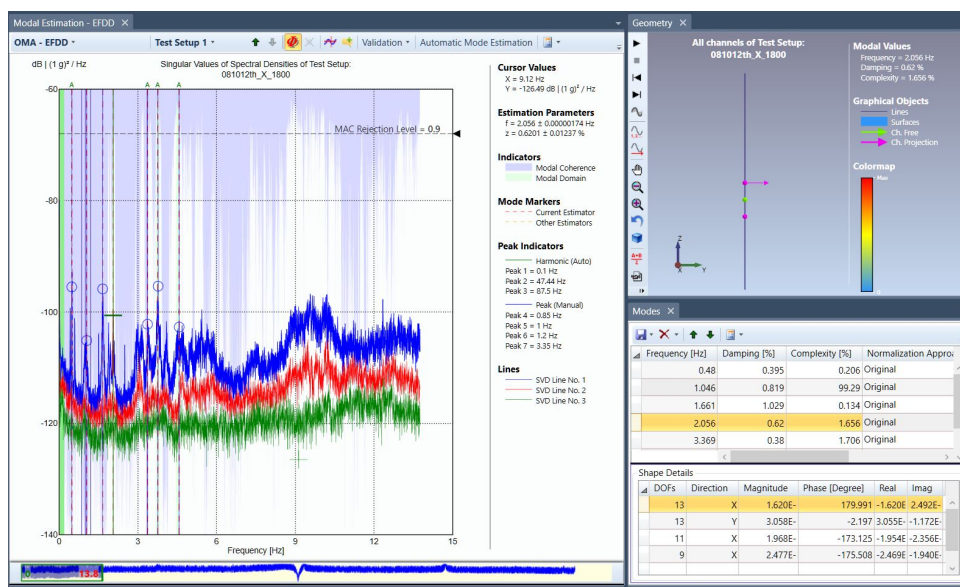


شکل پ.۱۶: سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۱۰، ۱۲ و ۱۸ م در راستای طولی

روش‌های حوزه فرکانس را مشابه حالت قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



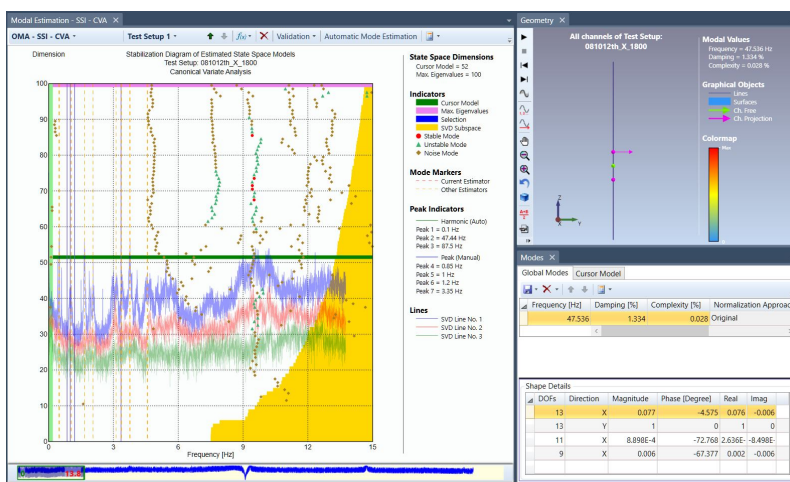
شکل پ.۱۷: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ.۱۸: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر

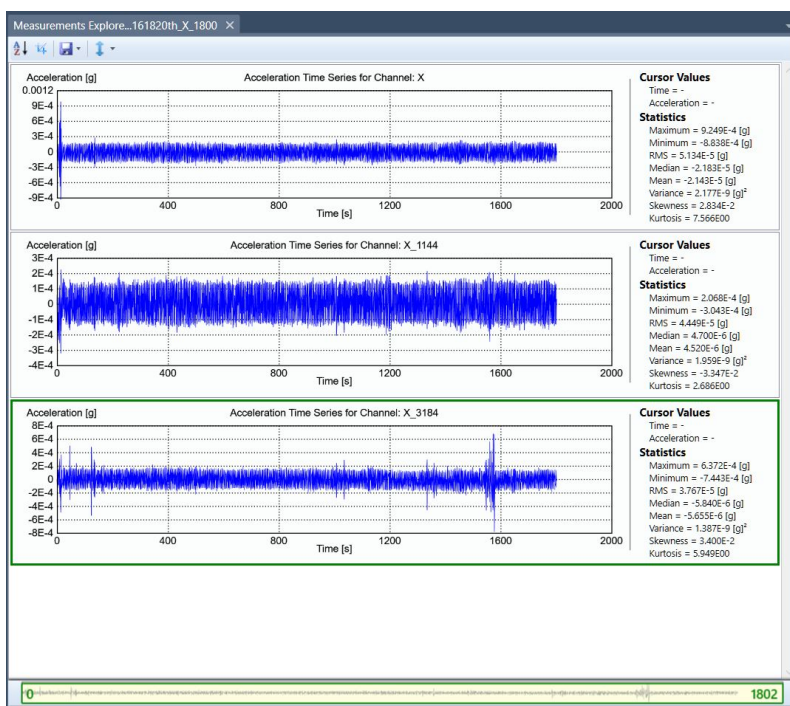


شکل پ.۱۹: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



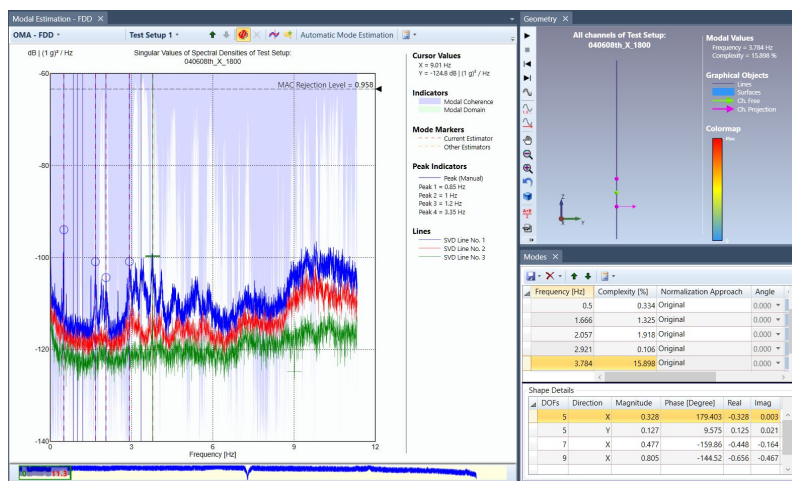
شکل پ.۲۰: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

حال به سراغ رکوردهای طبقات ۸، ۶ و ۴م در راستای طولی رفته و سیگنال‌های گرفته شده مورد بررسی قرار داده شد.

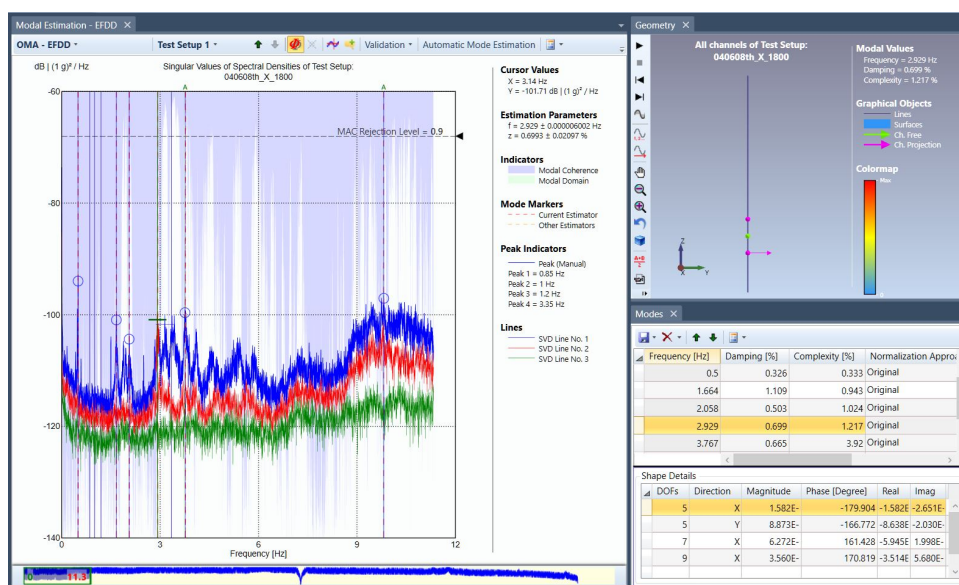


شکل پ.۲۱: سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۸، ۶ و ۴م در راستای طولی

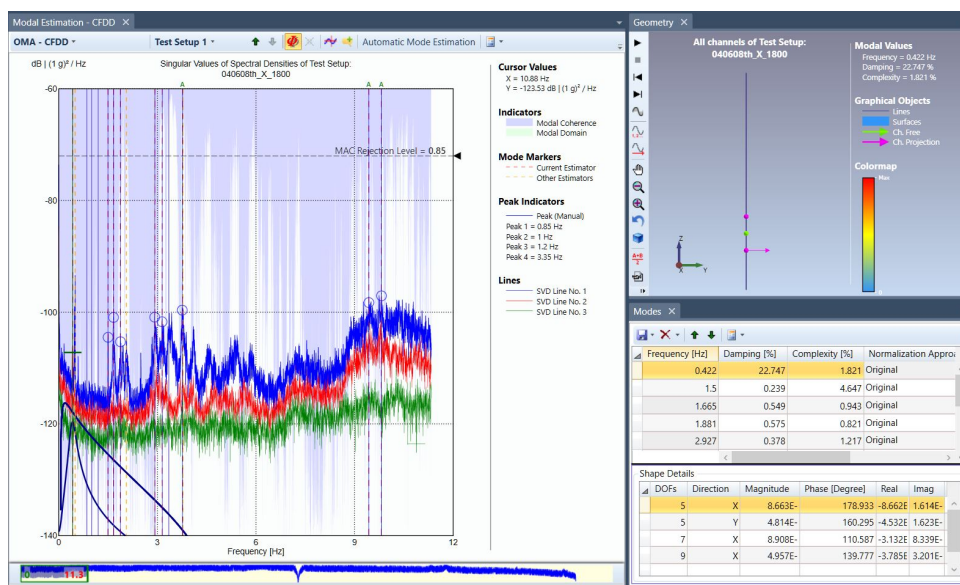
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه حالت قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



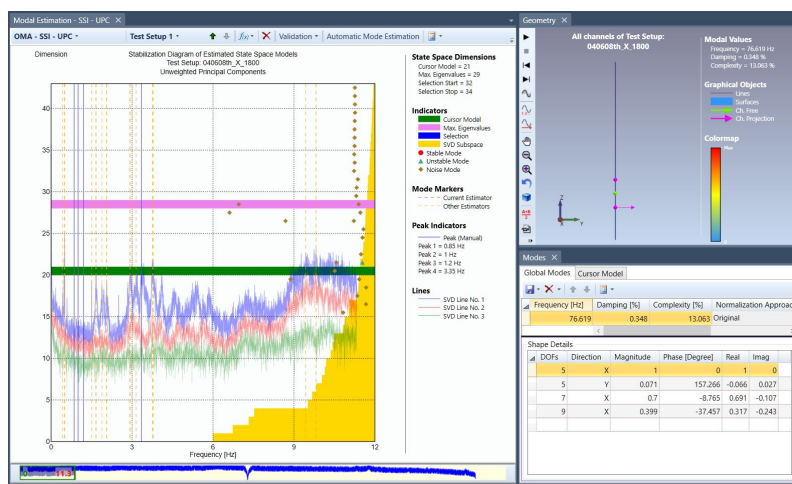
شکل پ.۲۲: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ.۲۳: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر

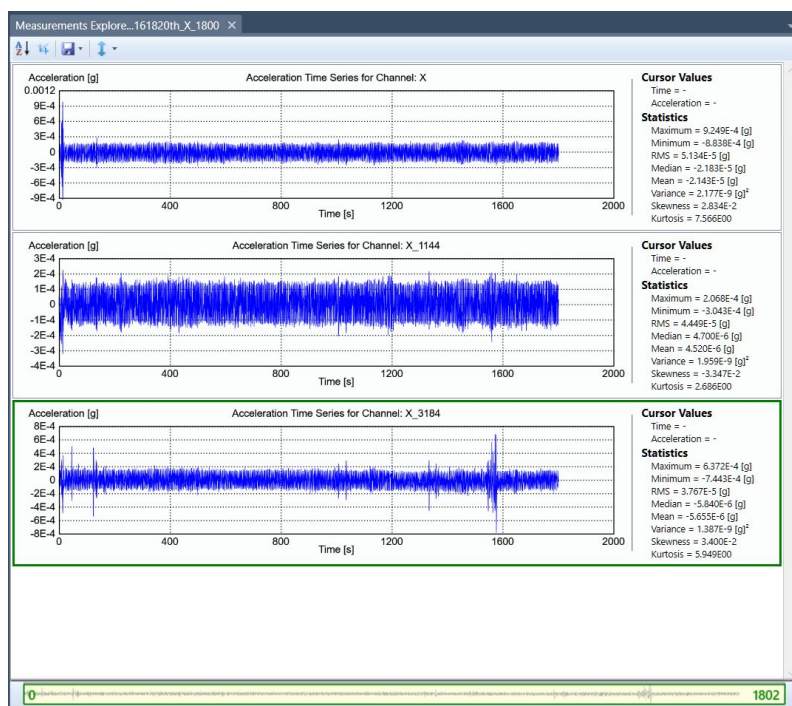


شکل پ.۲۴: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



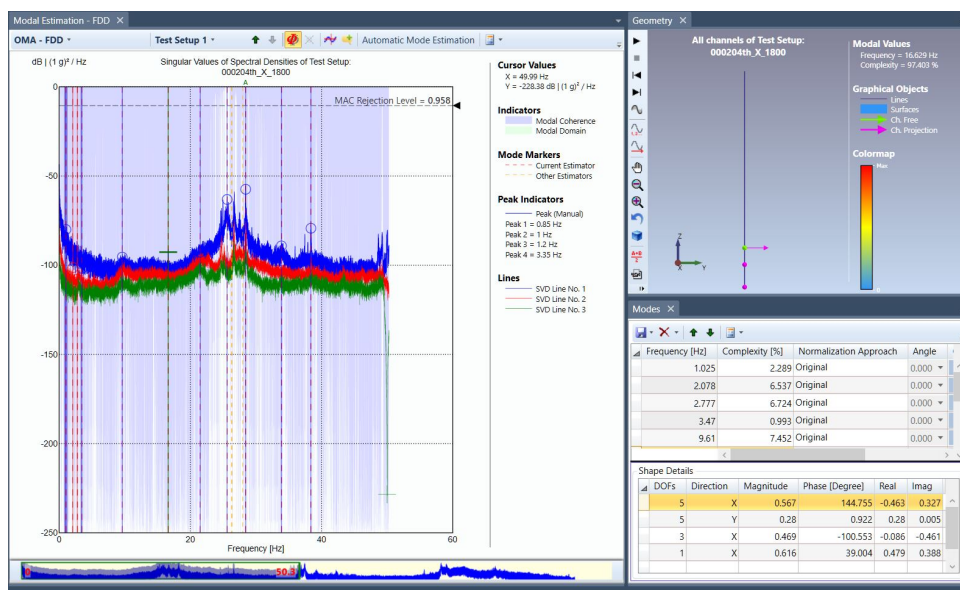
شکل پ.۲۵: شکل نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

حال به سراغ رکوردهای طبقات ۲، ۴ و همکف در راستای طولی رفته و سیگنال‌های گرفته شده مورد بررسی قرار داده شد.

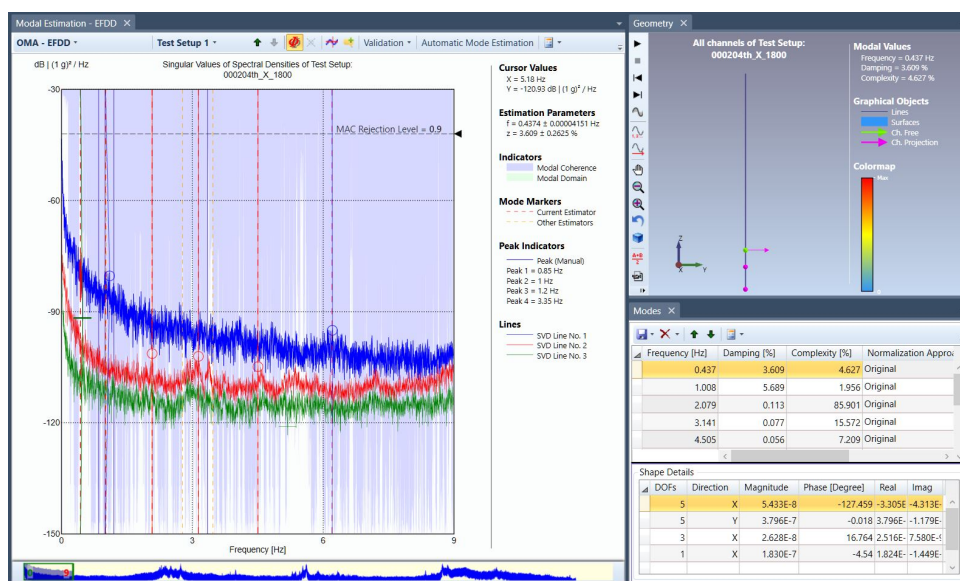


شکل پ.۲۶: سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۲، ۴ و همکف در راستای طولی

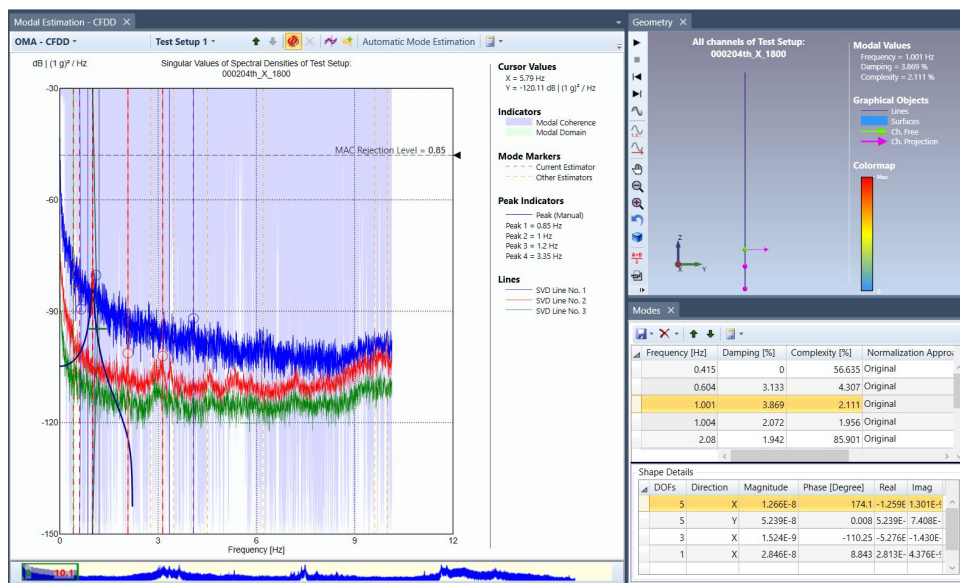
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه حالت قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



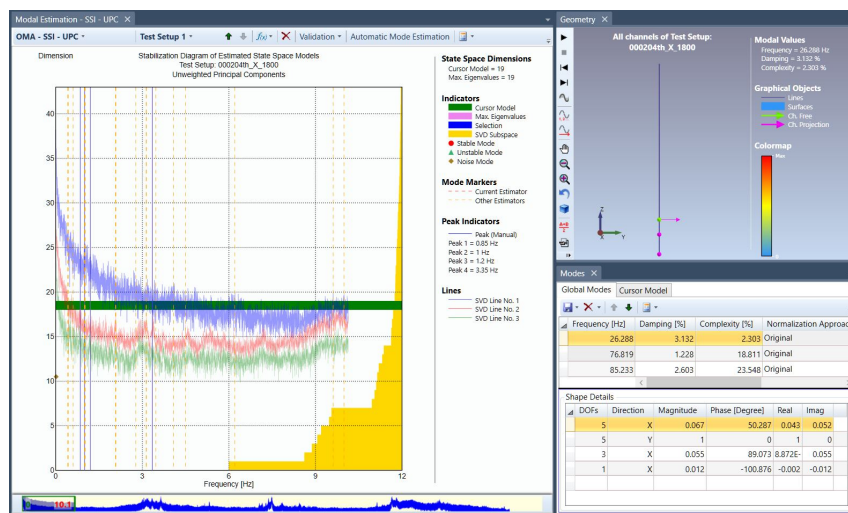
شکل پ. ۲۷: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ. ۲۸: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر

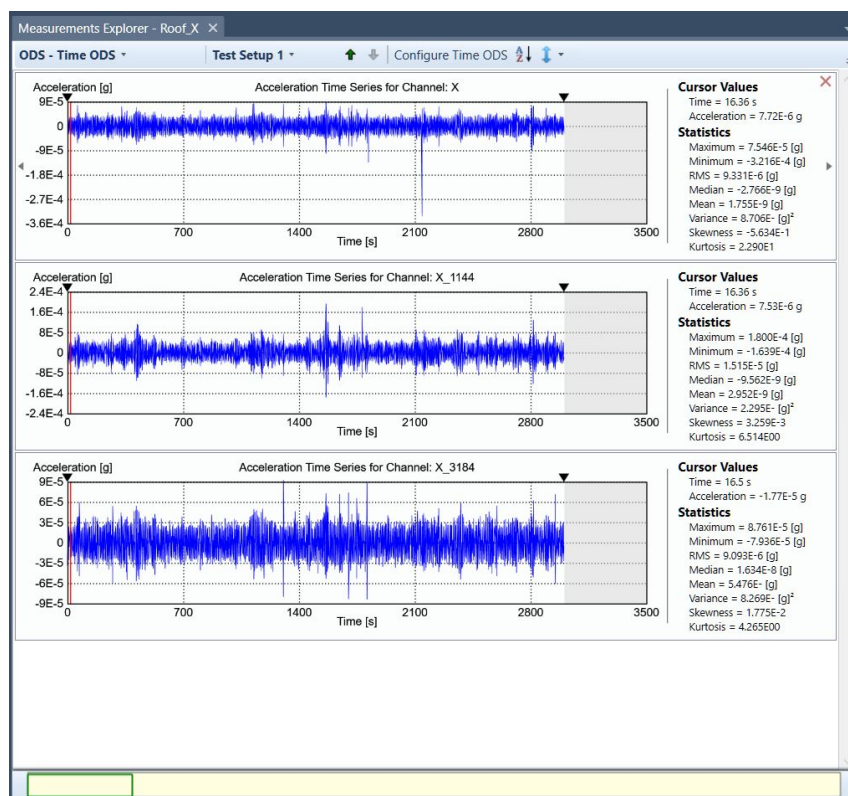


شکل پ. ۲۹: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



شکل پ. ۳۰: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

ابتدا یک تست در طبقه بام به کمک هر سه سنسور صورت گرفت. نرخ نمونه برداری این تست ۱۰۰ هرتز در نظر گرفته شد و مدت زمان رکورد با توجه به معیار برینکر ۳۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد.



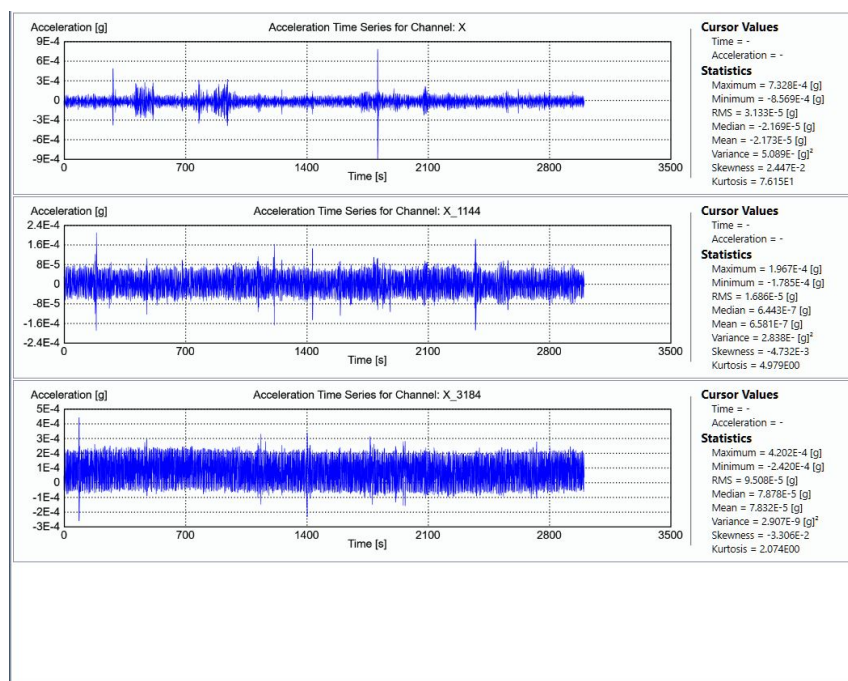
شکل پ.۳۱: مشخصه‌های آماری سنسورهای شتاب در راستای طولی

همانطور که در شکل (پ.۳۱) دیده می‌شود، مشخصات آماری هر کدام از رکوردها به تفکیک از مرتبه اول

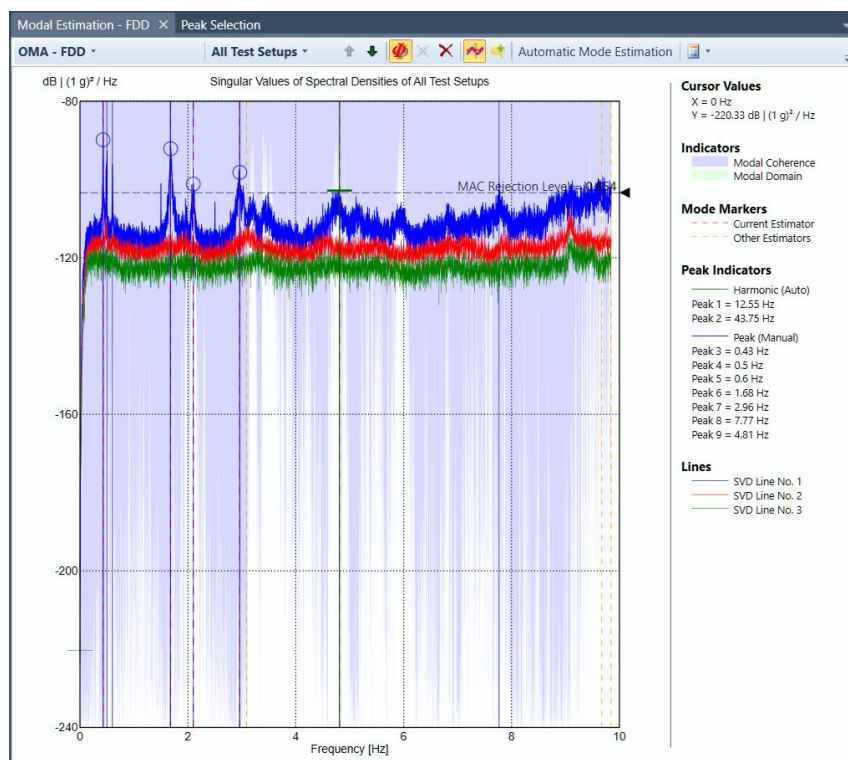
تا مرتبه‌ی چهارم محاسبه شده است.

پس از پردازش رکوردهای بدست آمده در راستای طولی ساختمان در بالاترین برداشت، به بررسی سیگنال‌های

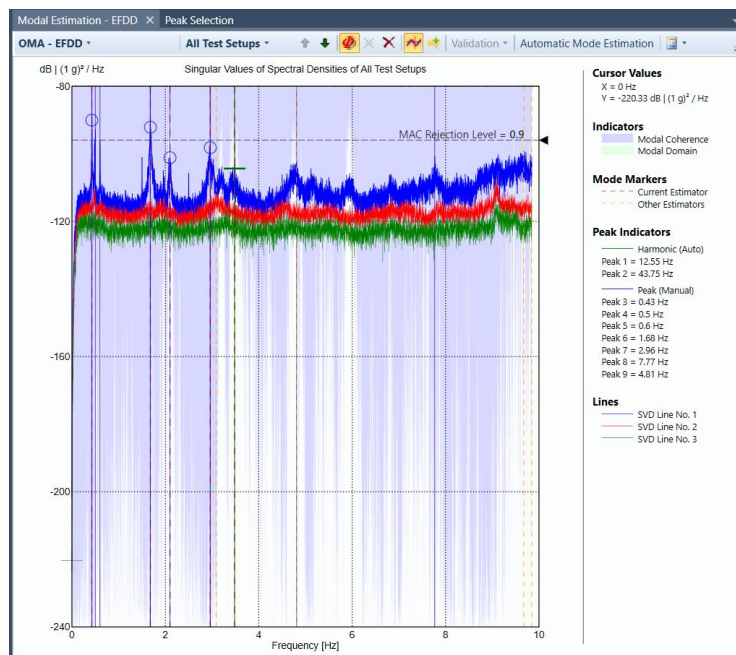
راستای عرضی ساختمان می‌رسیم، که سیگنال‌ها در شکل شماره (پ.۳۲) نشان داده شده است.



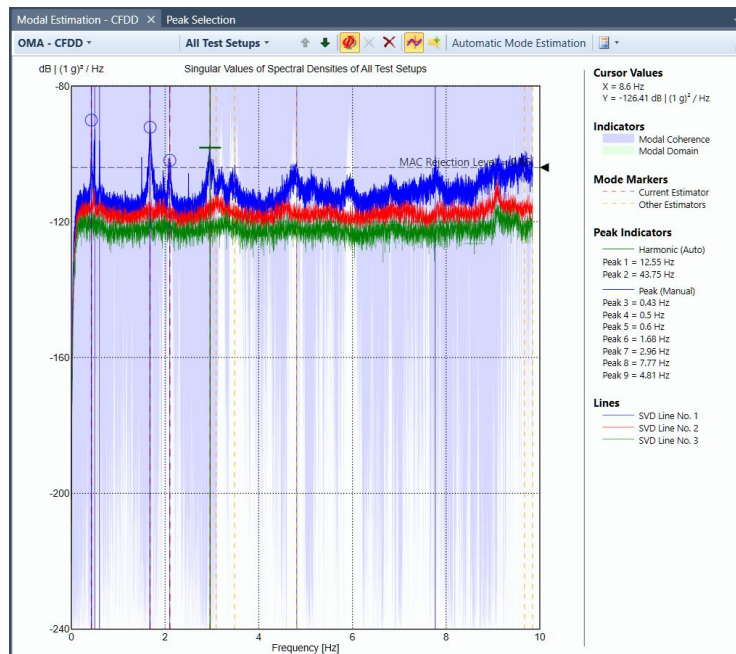
شکل پ.۳۲: رکوردهای بدست آمده از طبقه ی ۲۴ ام در راستای عرضی



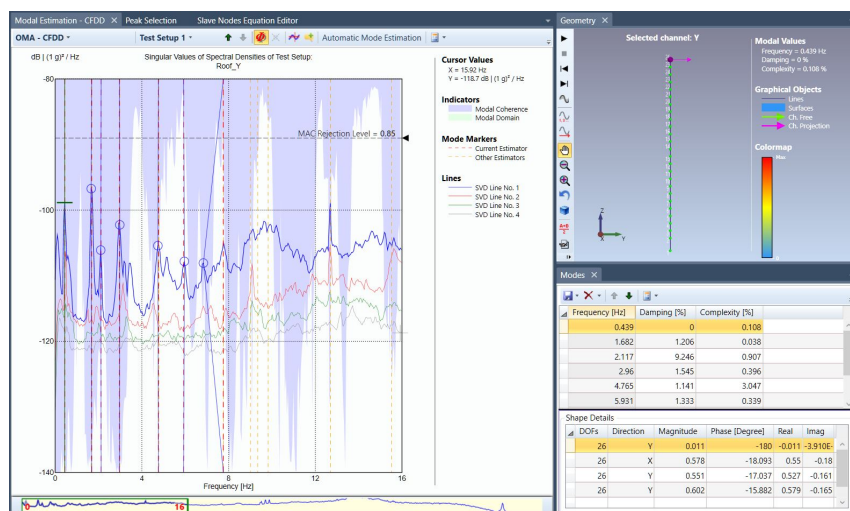
شکل پ.۳۳: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ.۳۴: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر

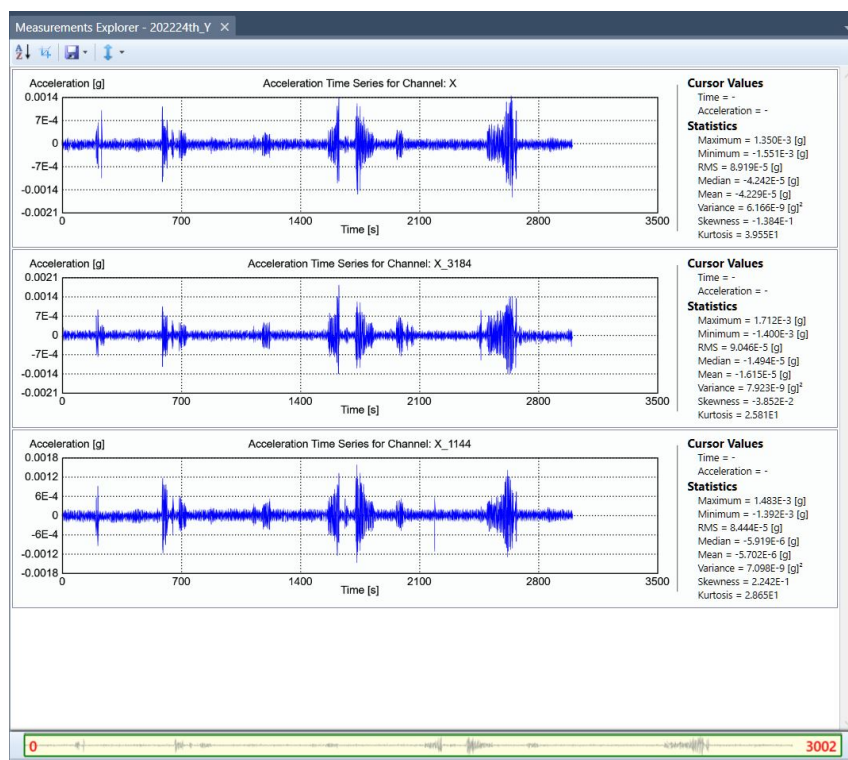


شکل پ.۳۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



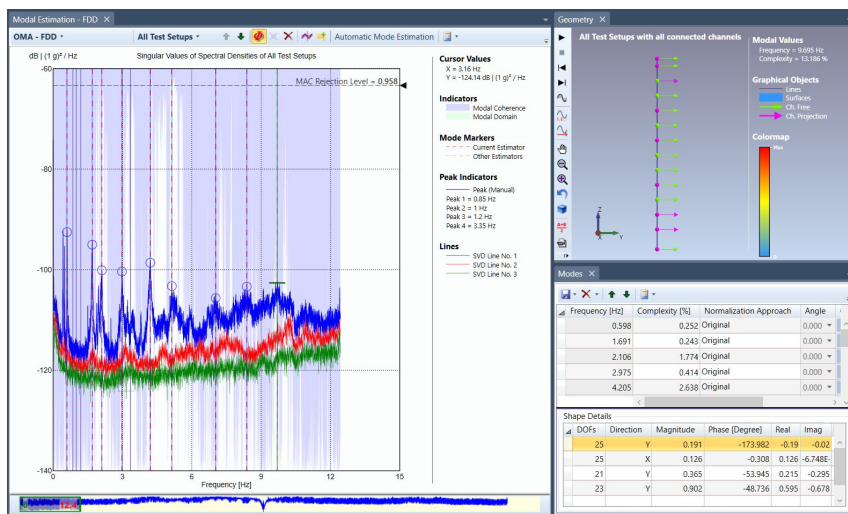
شکل پ.۳۶: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

سپس به سراغ رکوردهای طبقات ۲۴، ۲۲ و ۲۰م در راستای عرضی رفته و سیگنال‌های گرفته شده مورد بررسی قرار داده شد.

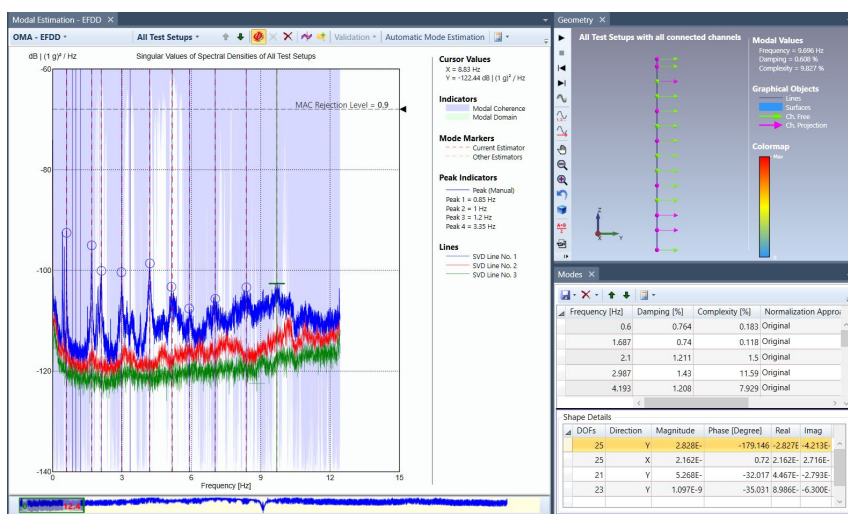


شکل پ.۳۷: سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۲۲،۲۴ و ۲۰م در راستای عرضی

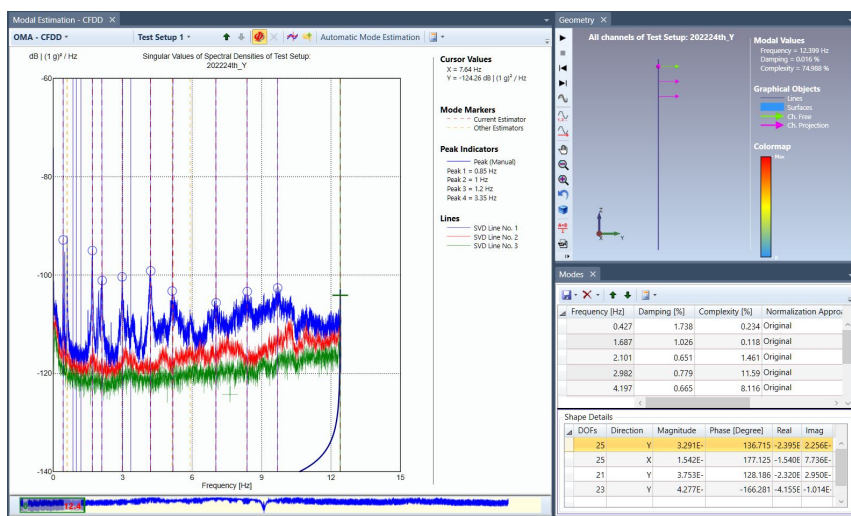
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه حالت قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



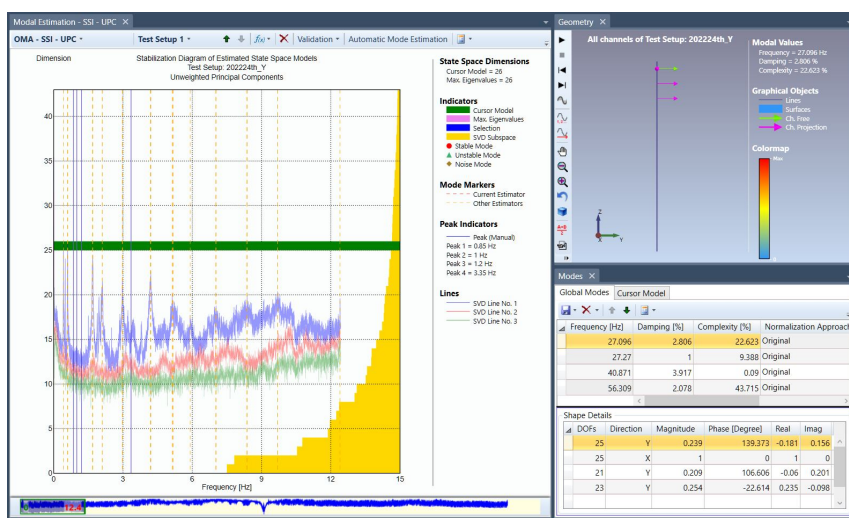
شکل پ.۳۸: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ.۳۹: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



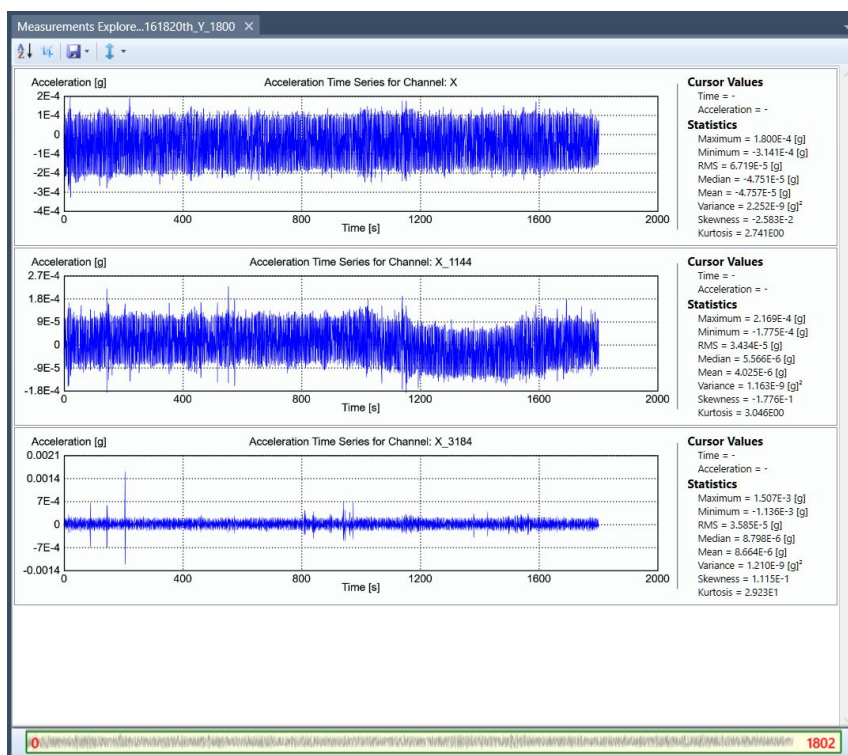
شکل پ.۴۰: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



شکل پ.۴۱: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

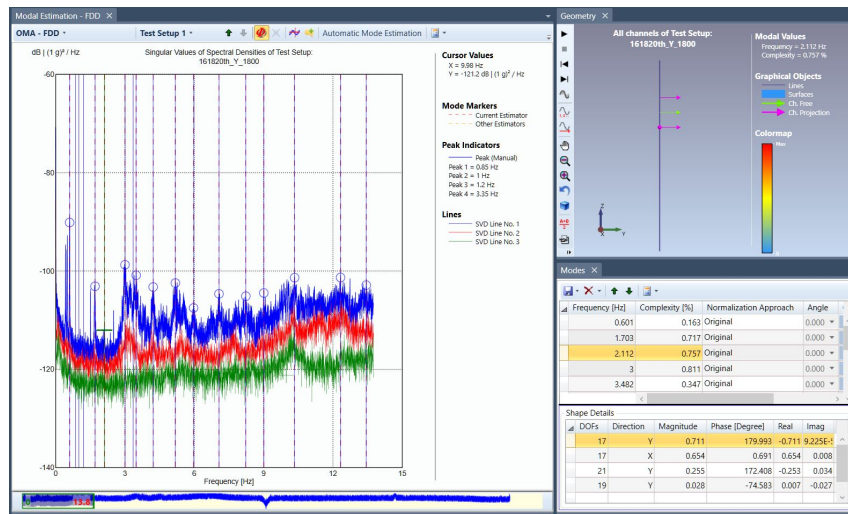
حال به سراغ رکوردهای طبقات ۲۰، ۱۸ و ۱۶م در راستای عرضی رفته و سیگنال‌های گرفته شده مورد

بررسی قرار داده شد.

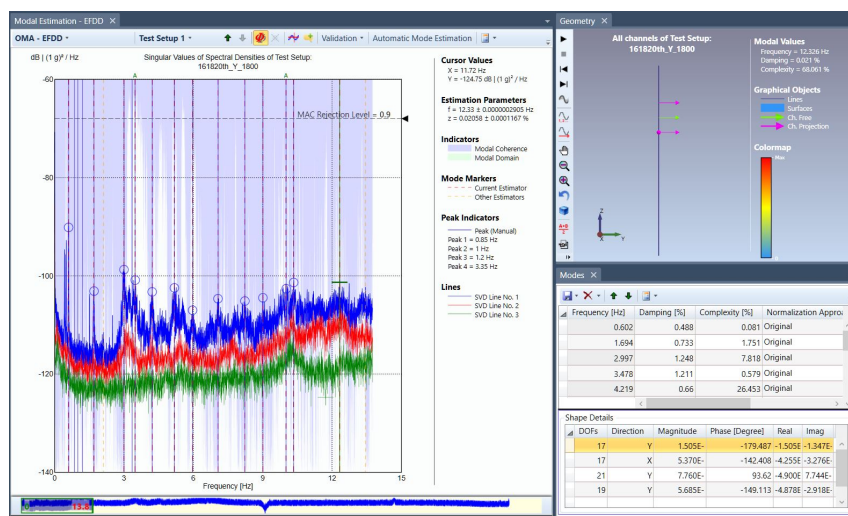


شکل پ.۴۲: سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۲۰، ۱۸ و ۱۶م در راستای عرضی

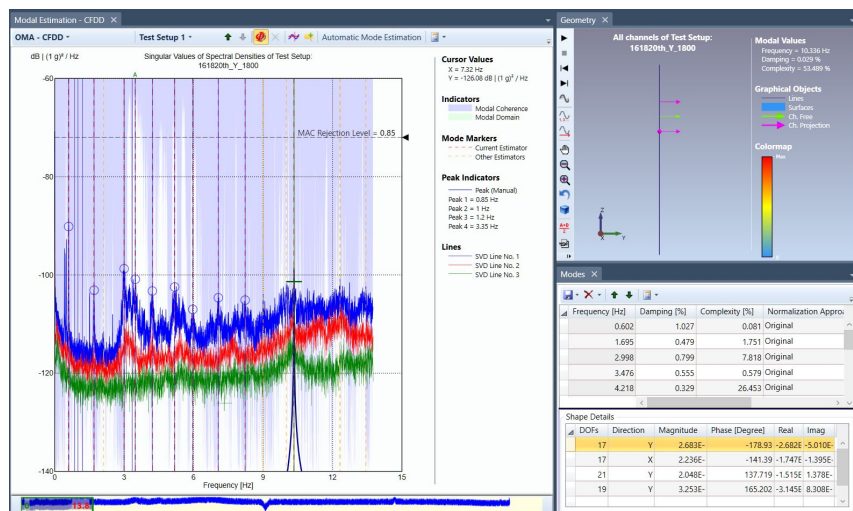
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه حالت قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



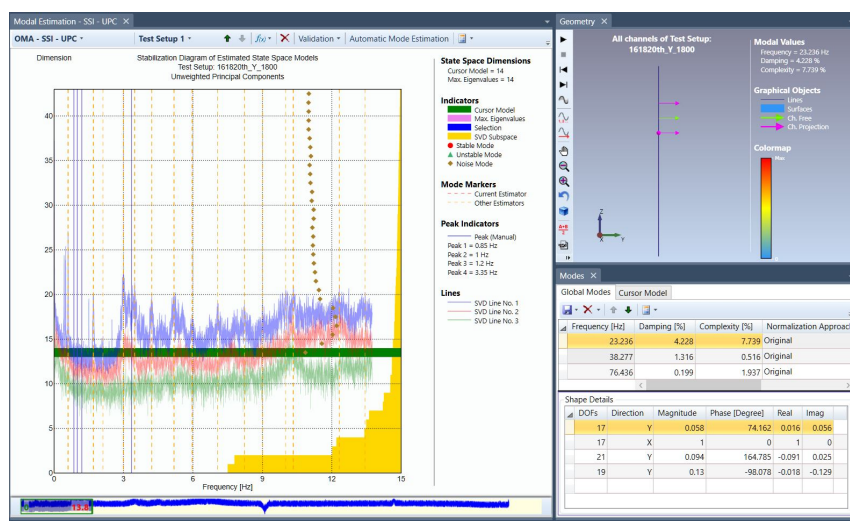
شکل پ.۴۳: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ.۴۴: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



شکل پ.۴۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



شکل پ.۴۶: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

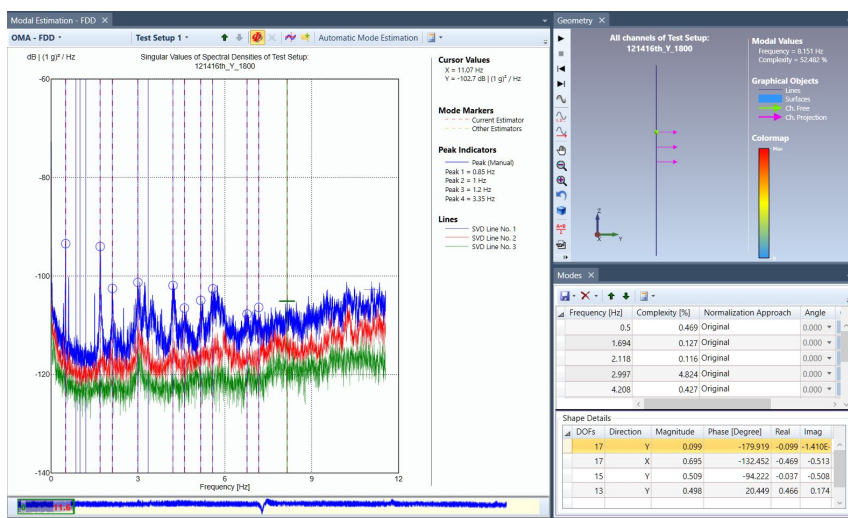
حال به سراغ رکوردهای طبقات ۱۶، ۱۴ و ۱۲م در راستای عرضی رفته و سیگنال‌های گرفته شده مورد

بررسی قرار داده شد.

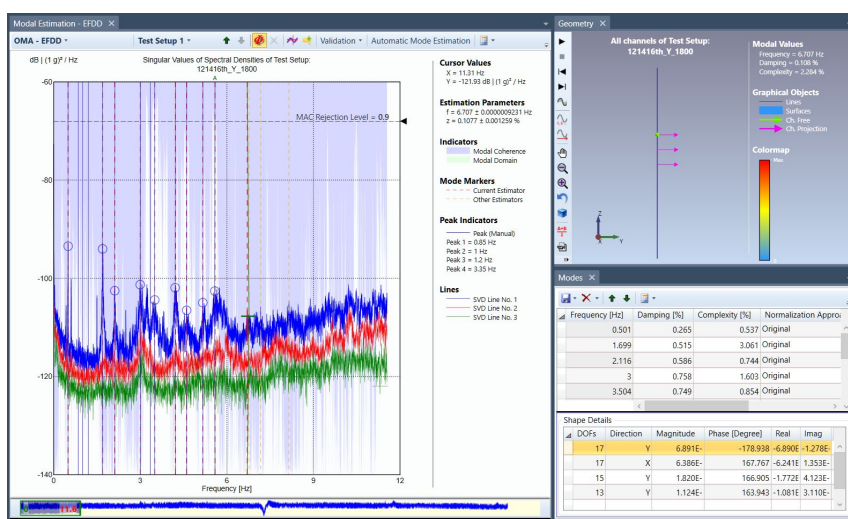


شکل پ. ۴۷: سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۱۶، ۱۴ و ۱۲م در راستای عرضی

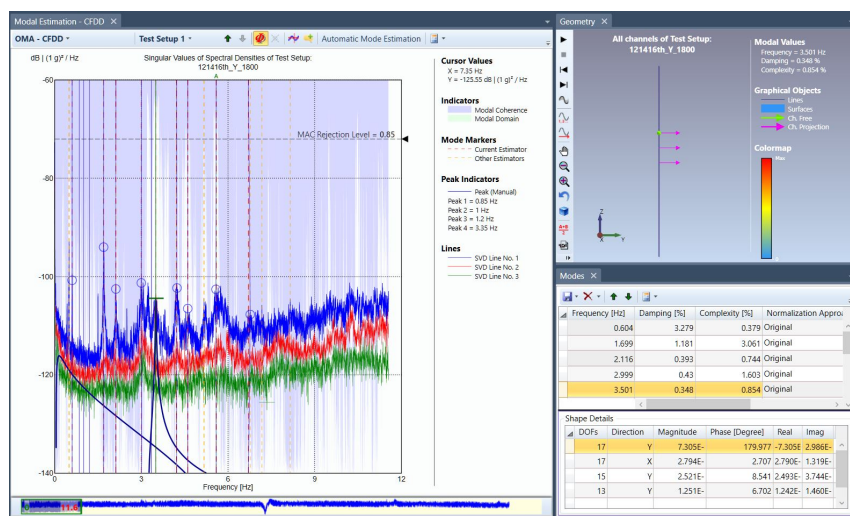
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه حالت قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



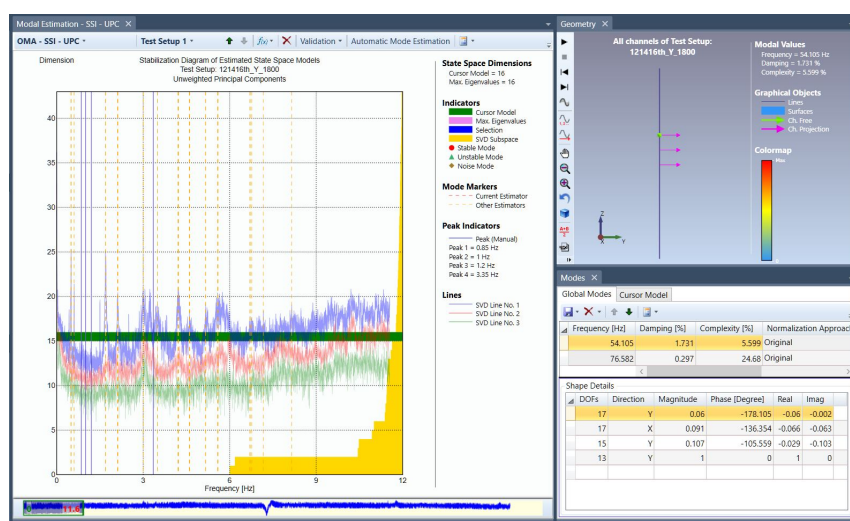
شکل پ. ۴۸: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ. ۴۹: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر

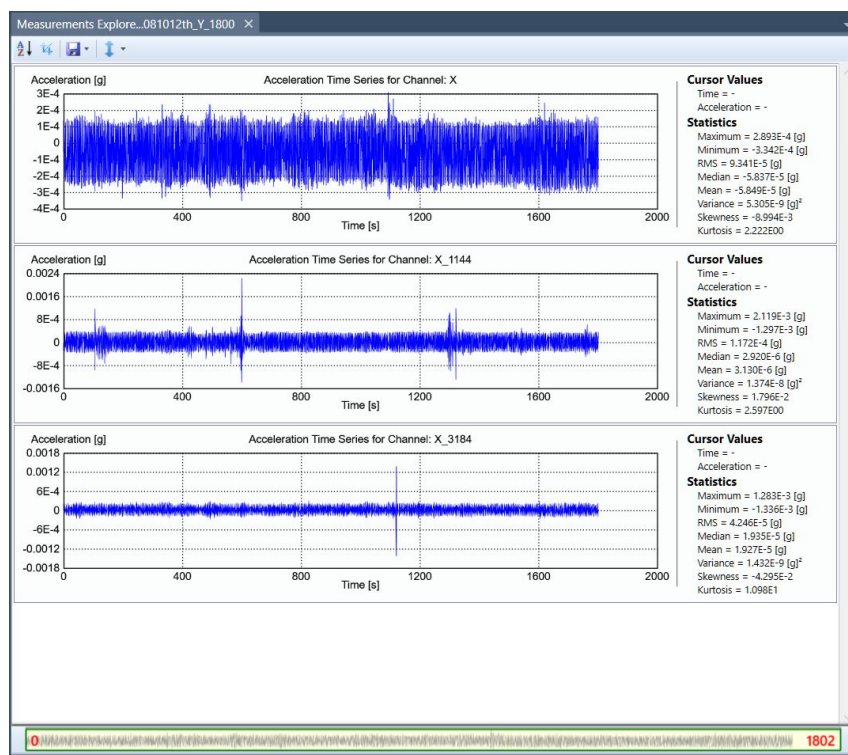


شکل پ.۵۰: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



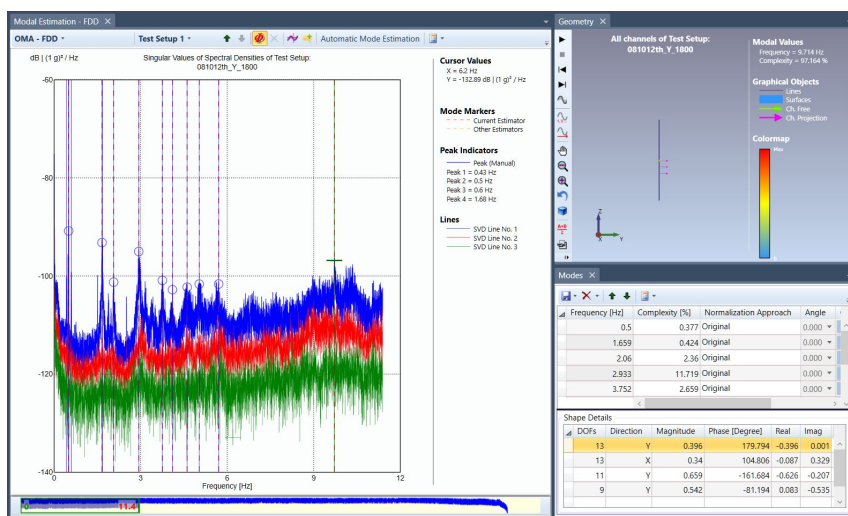
شکل پ.۵۱: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

حال به سراغ رکوردهای طبقات ۱۲، ۱۰ و ۸م در راستای عرضی رفته و سیگنال‌های گرفته شده مورد بررسی قرار داده شد.

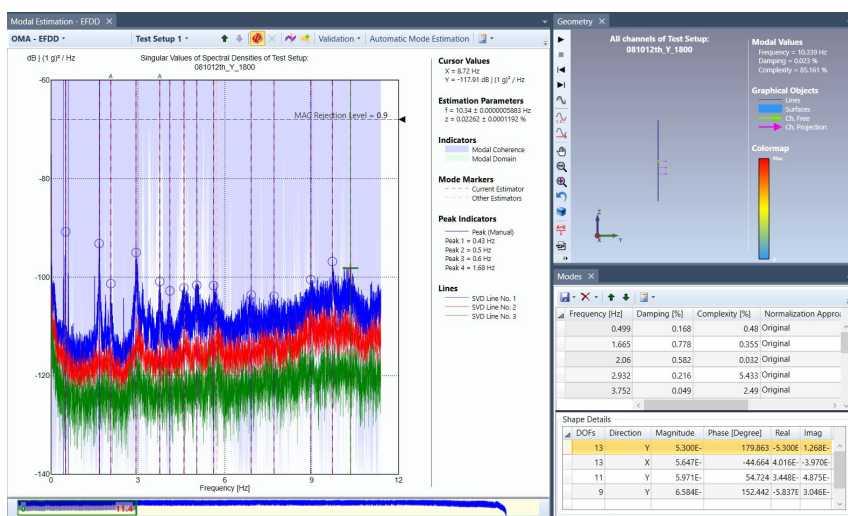


شکل پ.۵۲: سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۱۲، ۱۰ و ۸م در راستای عرضی

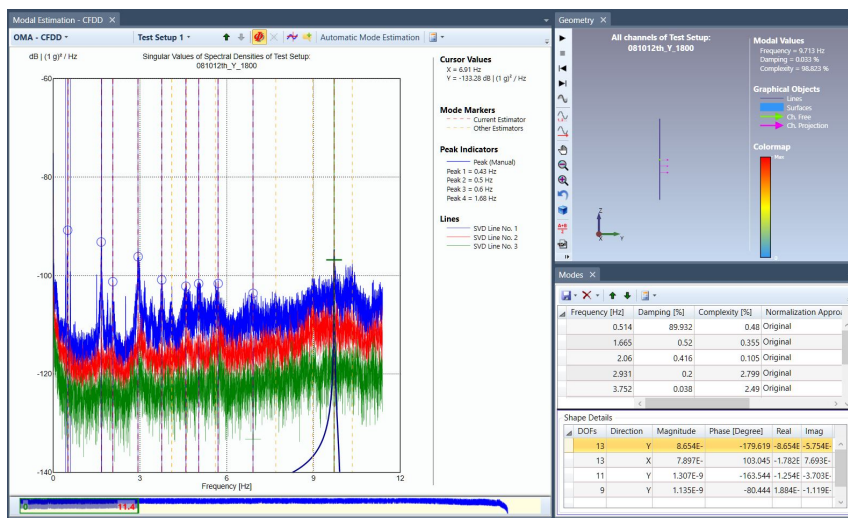
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه حالت قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



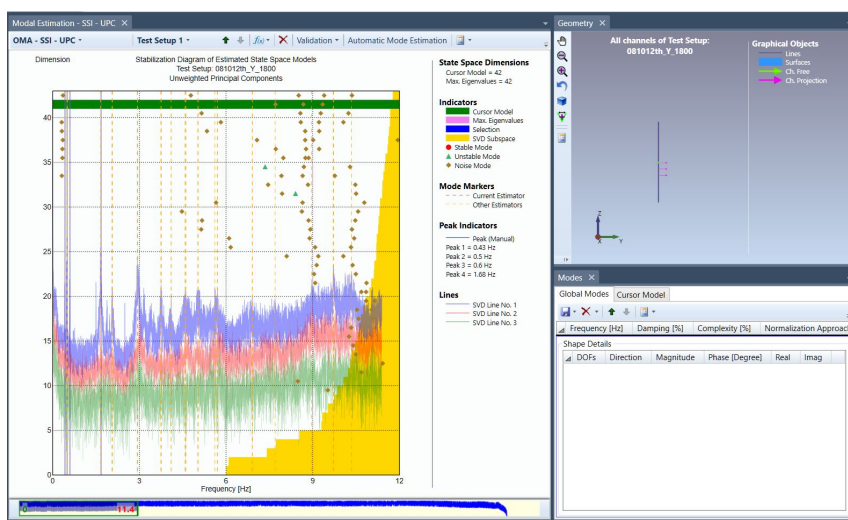
شکل پ.۵۳: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ.۵۴: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



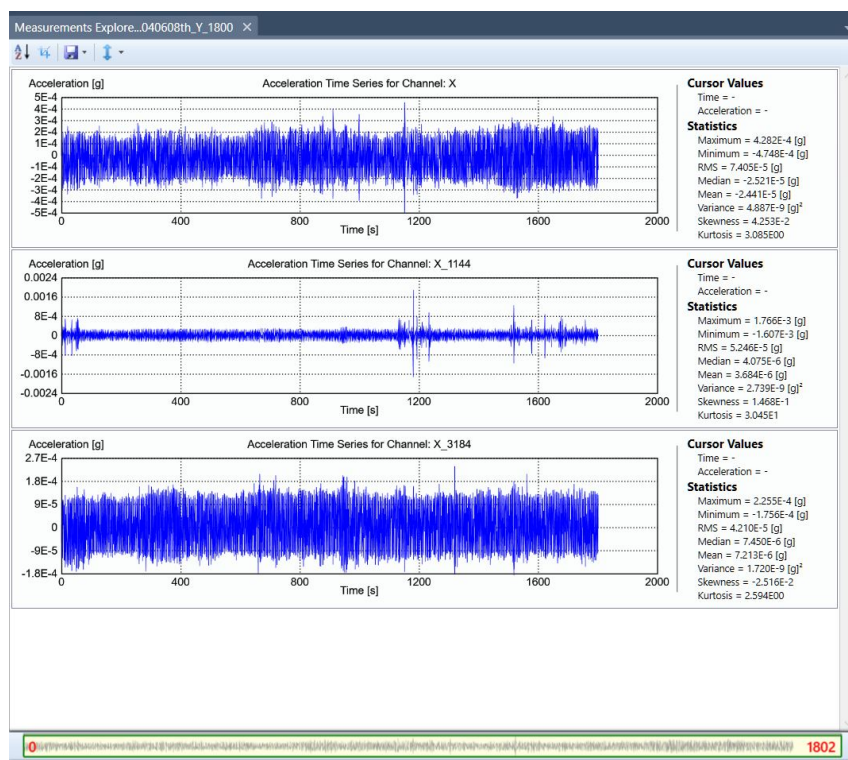
شکل پ.۵۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



شکل پ.۵۶: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

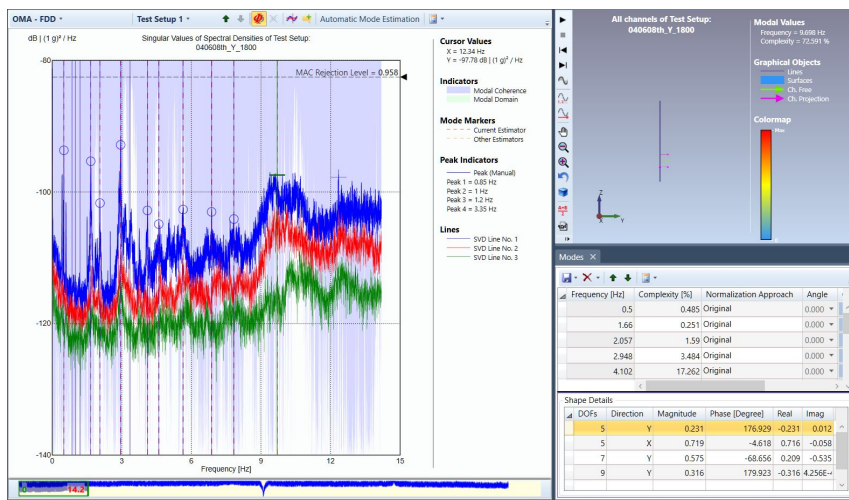
حال به سراغ رکوردهای طبقات ۸، ۶ و ۴م در راستای عرضی رفته و سیگنال‌های گرفته شده مورد بررسی

قرار داده شد.

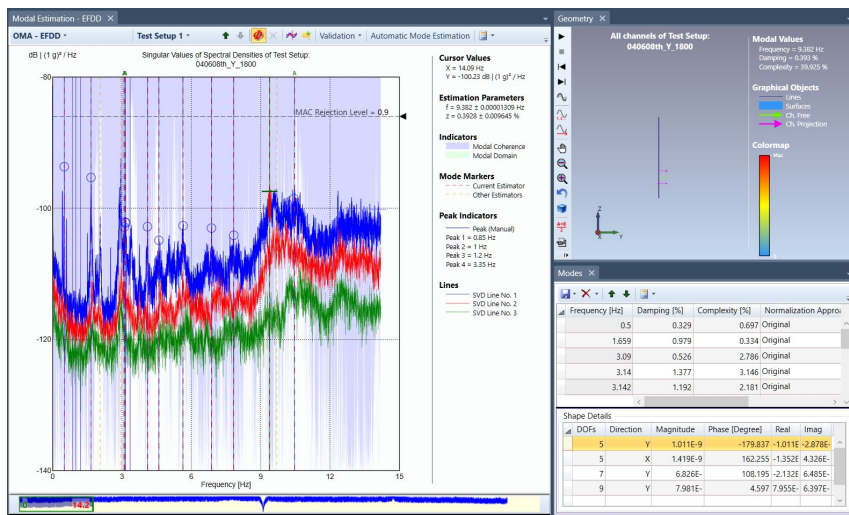


شکل پ.۵۷: سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۸، ۶ و ۴م در راستای عرضی

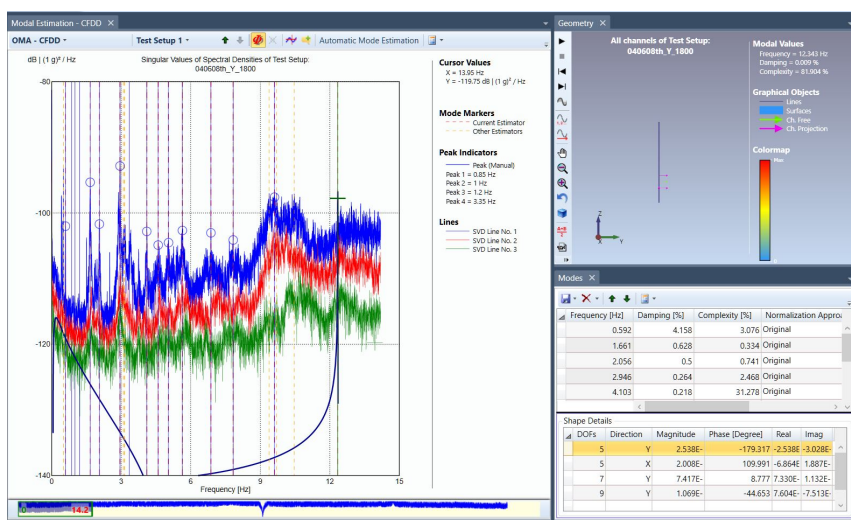
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه حالت قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



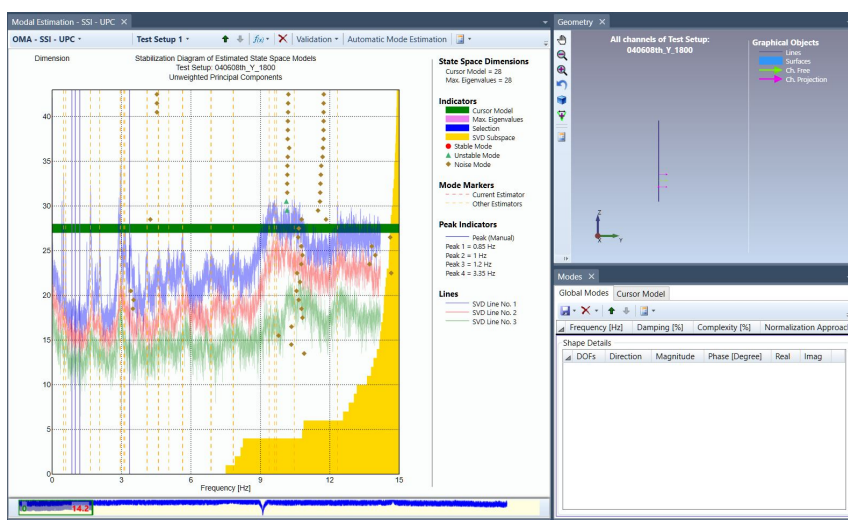
شکل پ.۵۸: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ.۵۹: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر

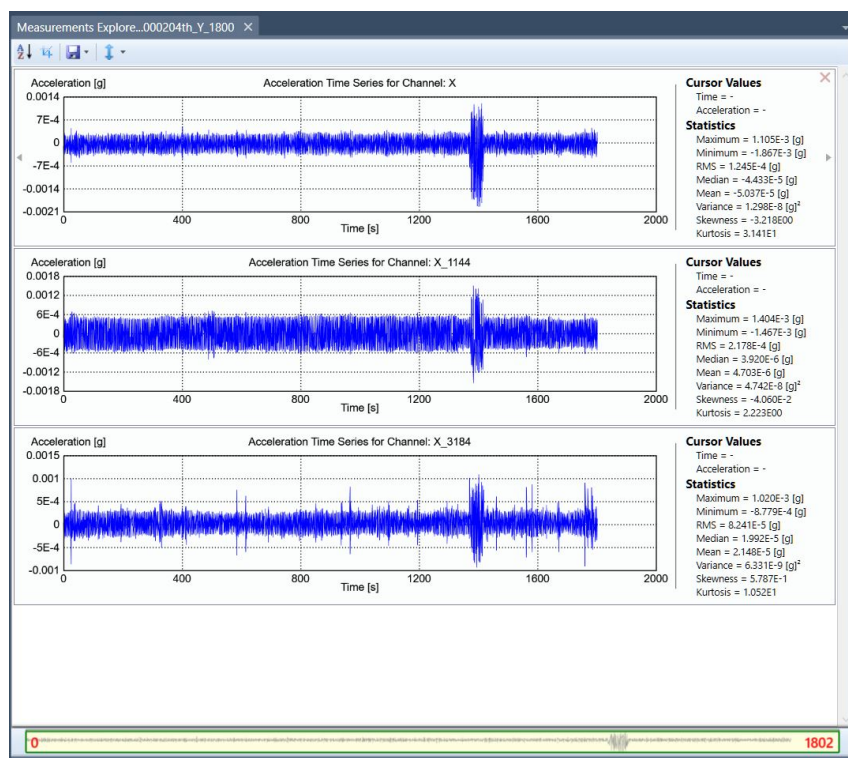


شکل پ.۶۰: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



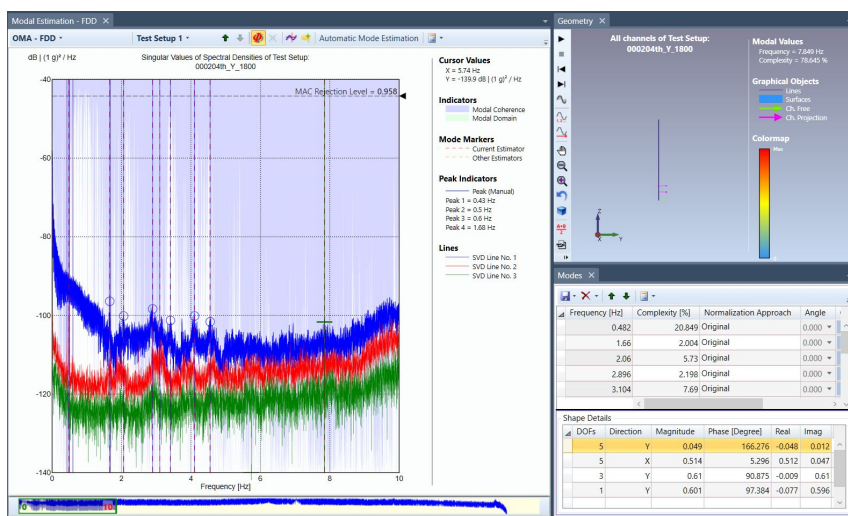
شکل پ.۶۱: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

حال به سراغ رکوردهای طبقات ۲، ۴ و همکف در راستای عرضی رفته و سیگنال‌های گرفته شده مورد بررسی قرار داده شد.

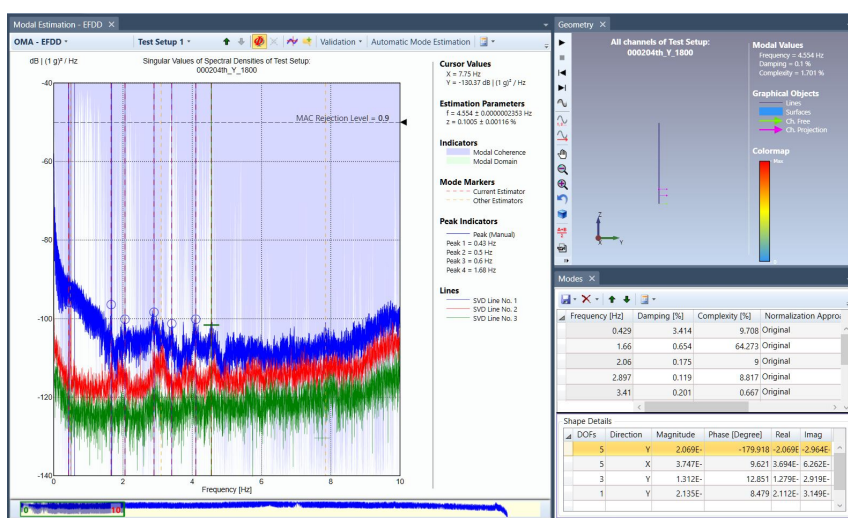


شکل پ.۶۲: سیگنال‌های گرفته شده از طبقات ۲، ۴ و همکف در راستای عرضی

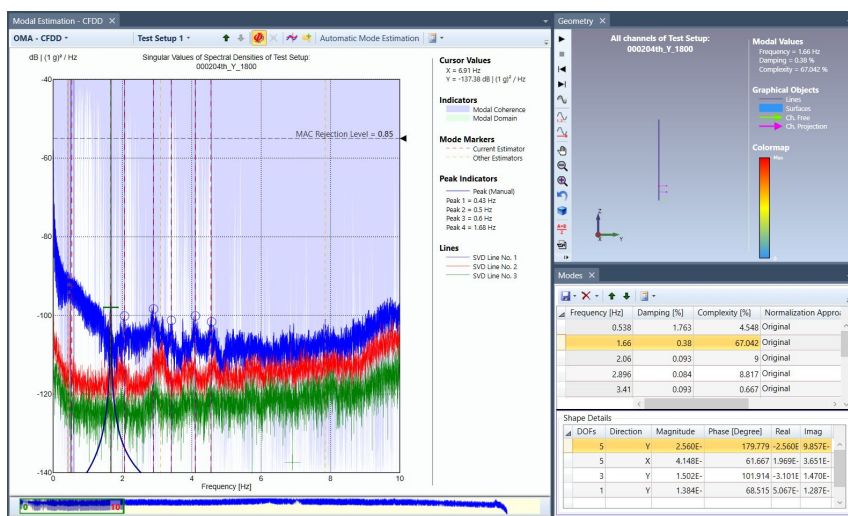
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه حالت قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



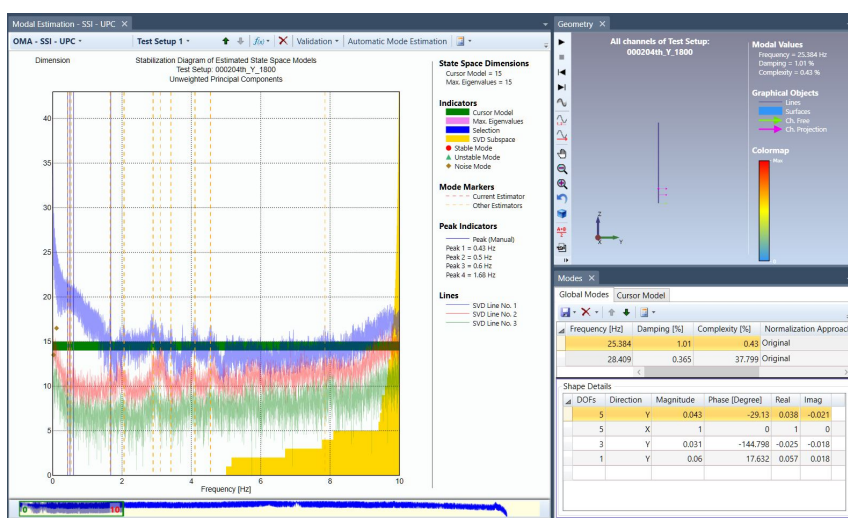
شکل پ.۶۳: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



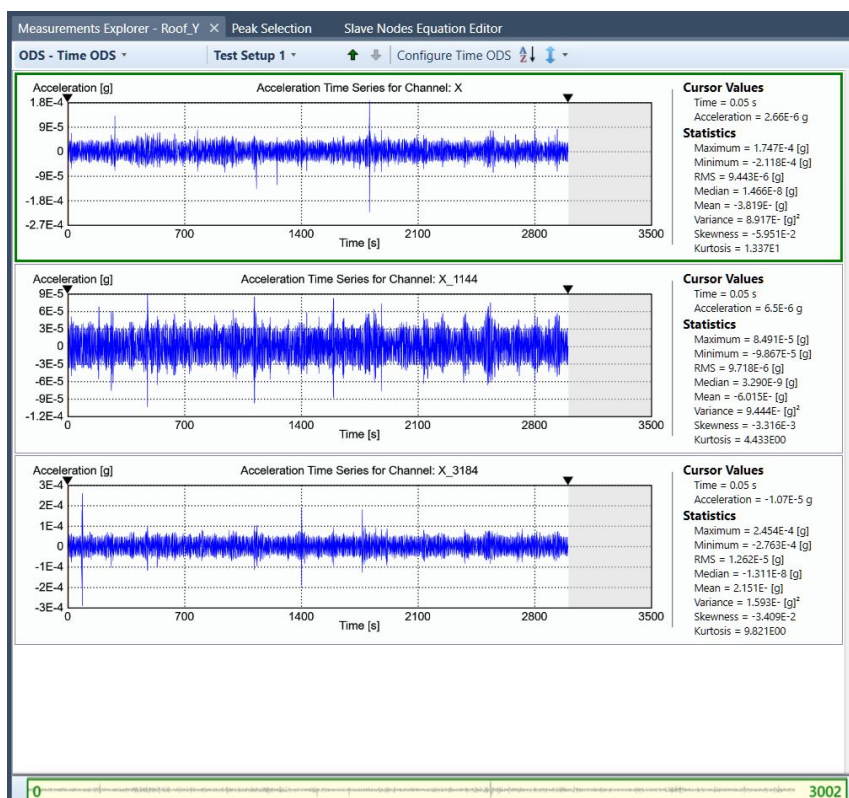
شکل پ.۶۴: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



شکل پ.۶۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط

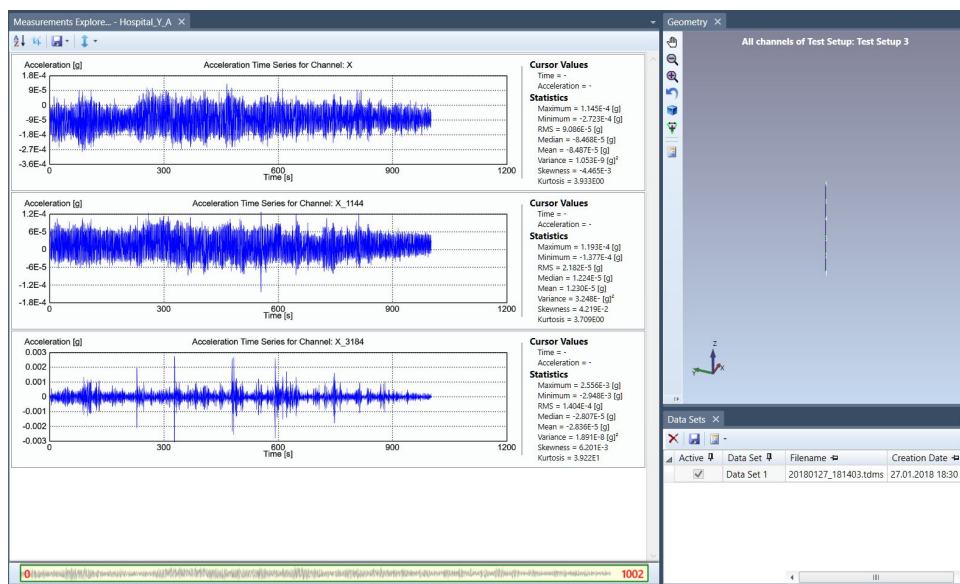


شکل پ.۶۶: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا



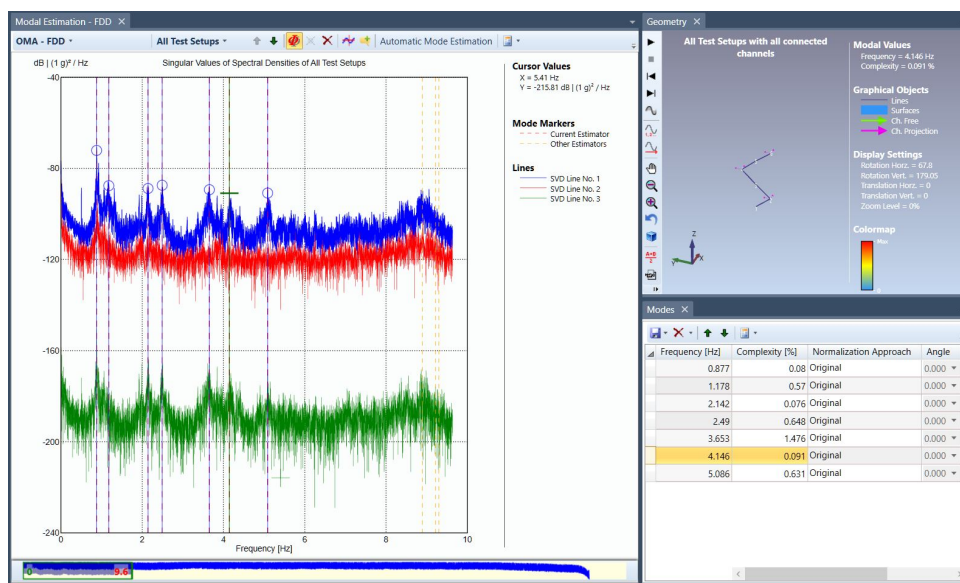
شکل پ.۶۷: مشخصه‌های آماری سنسورهای شتاب در راستای عرضی

پ.۲ نتایج خروجی‌های ساختمان بیمارستان امام حسین (ع)

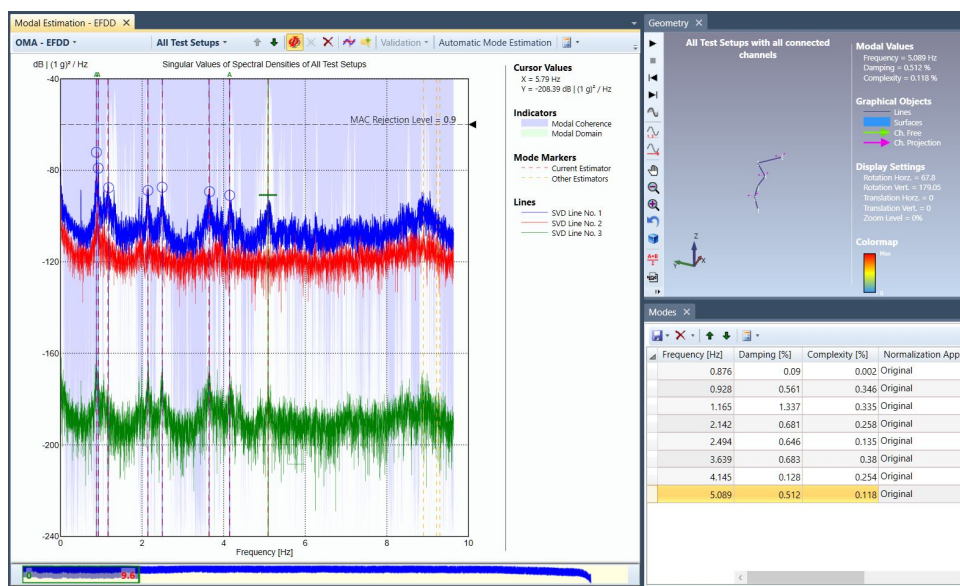


شکل پ.۶۸: سیگنال‌های گرفته شده از بلوک A بیمارستان در راستای عرضی

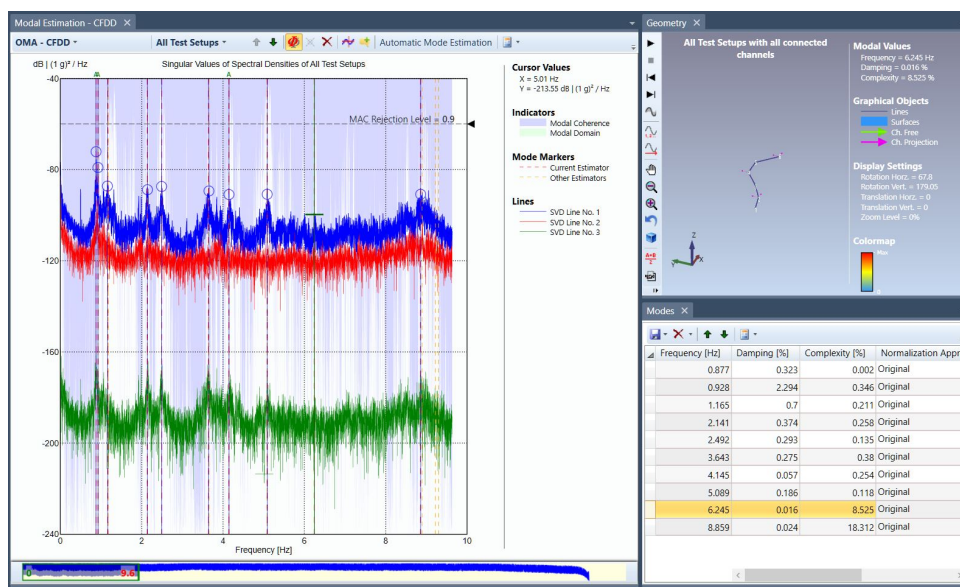
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه سازه‌ی قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



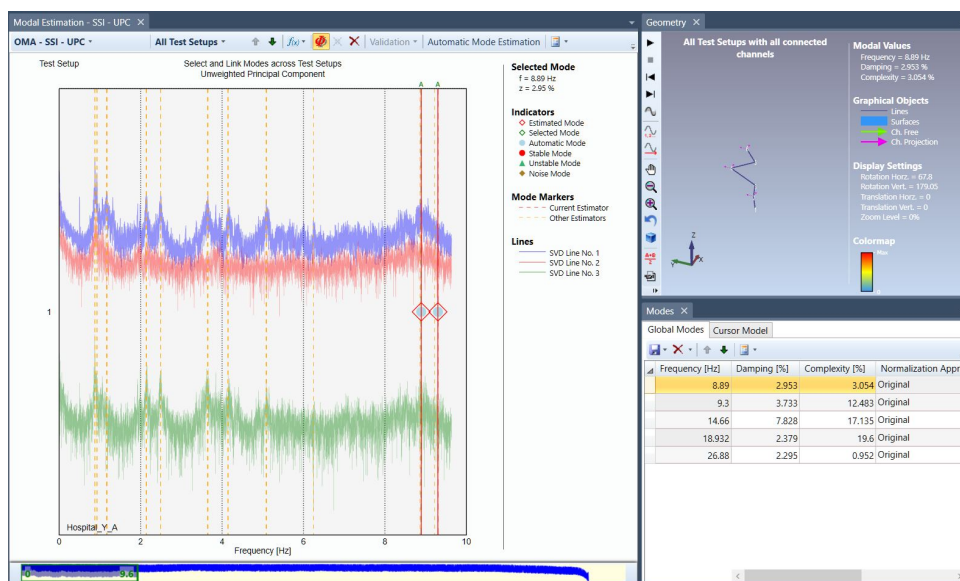
شکل پ.۶۹: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



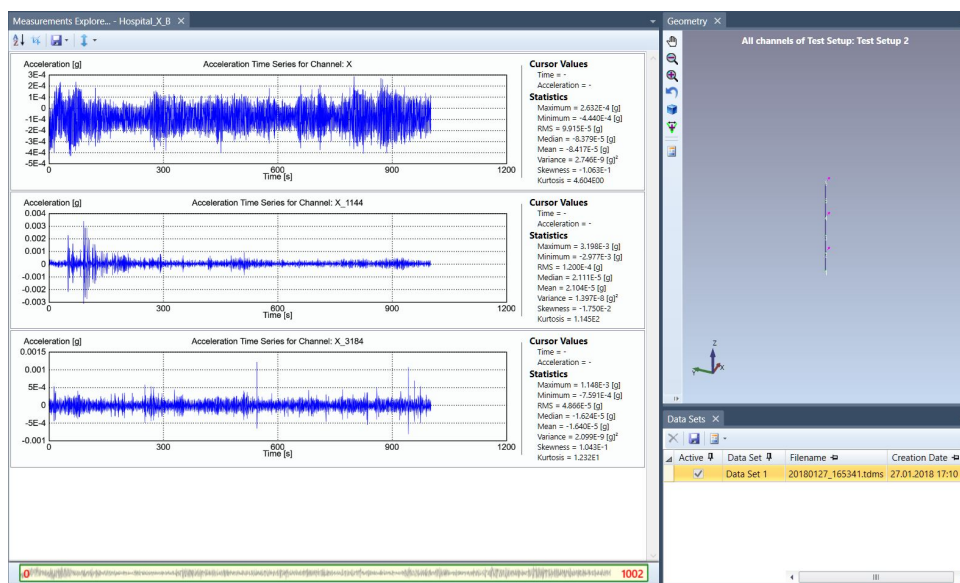
شکل پ.۷۰: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



شکل پ. ۷۱: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط

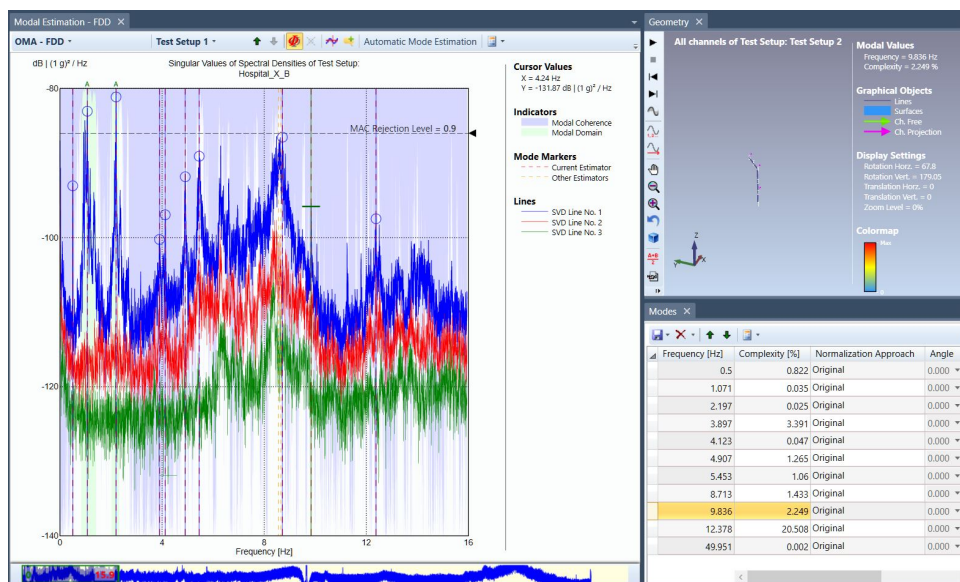


شکل پ. ۷۲: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

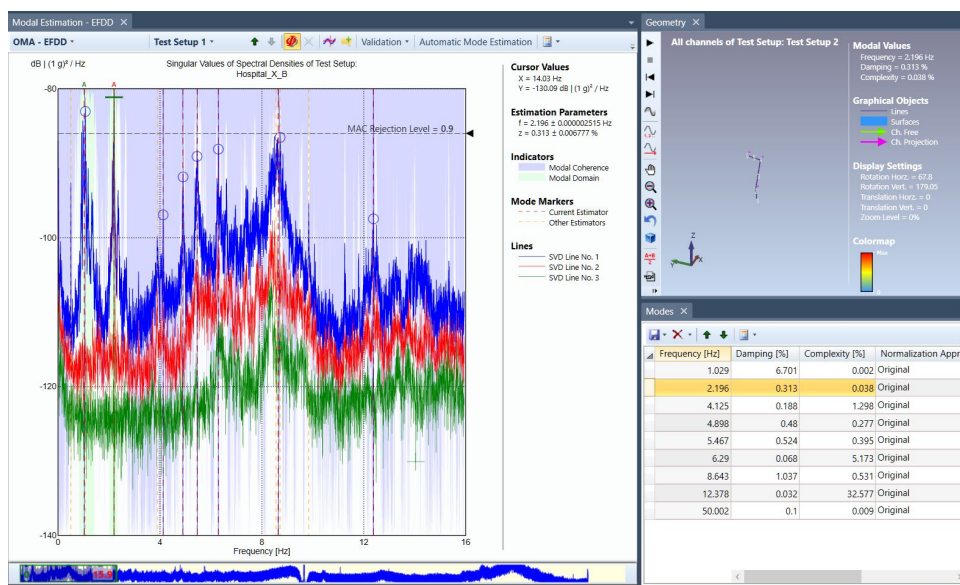


شکل پ.۷۳: سیگنال‌های گرفته شده از بلوک B بیمارستان در راستای طولی

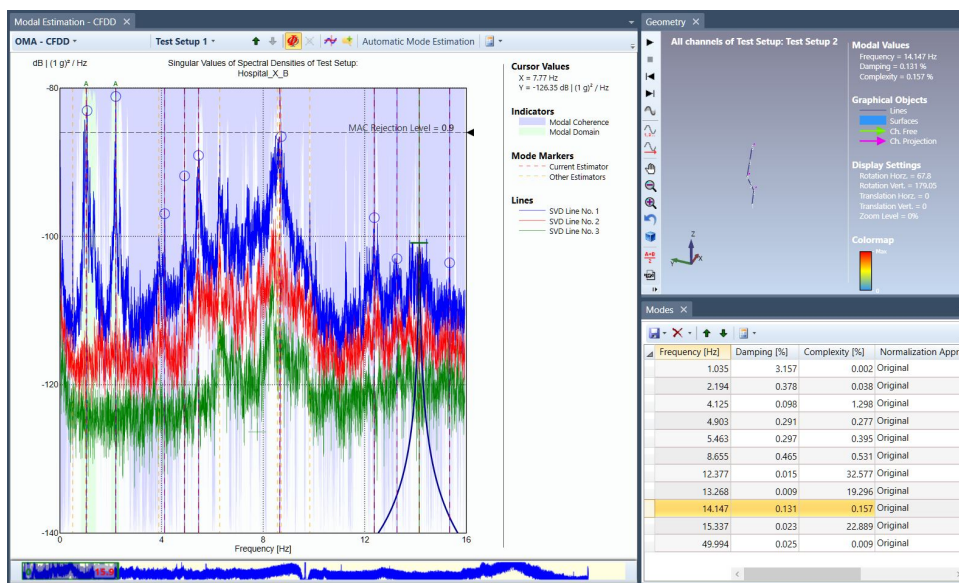
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه سازه‌ی قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



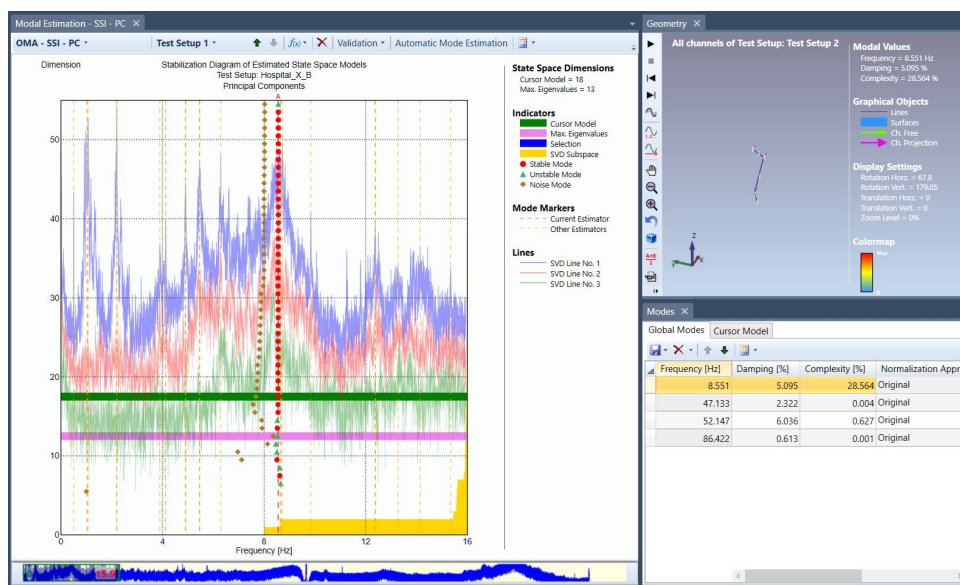
شکل پ.۷۴: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



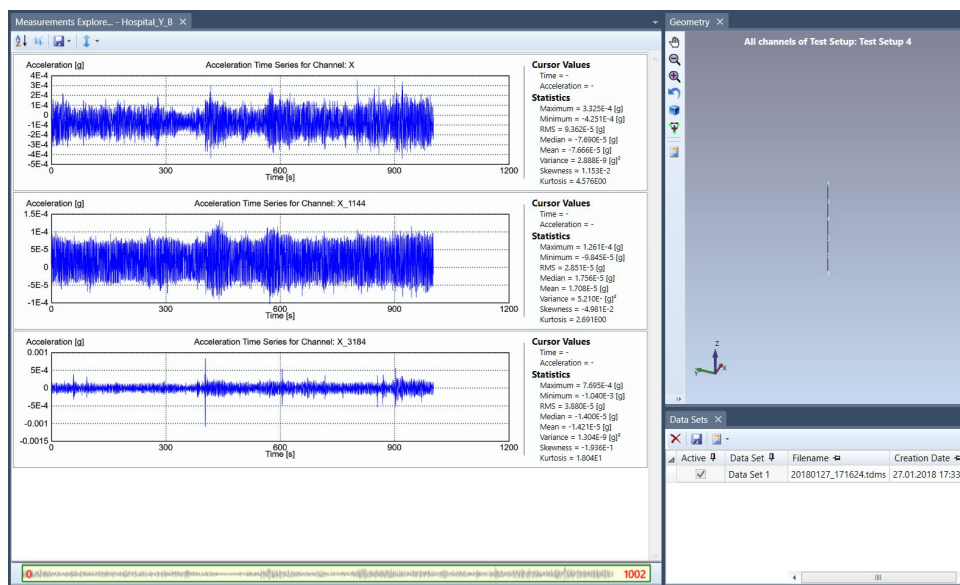
شکل پ. ۷۵: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



شکل پ. ۷۶: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط

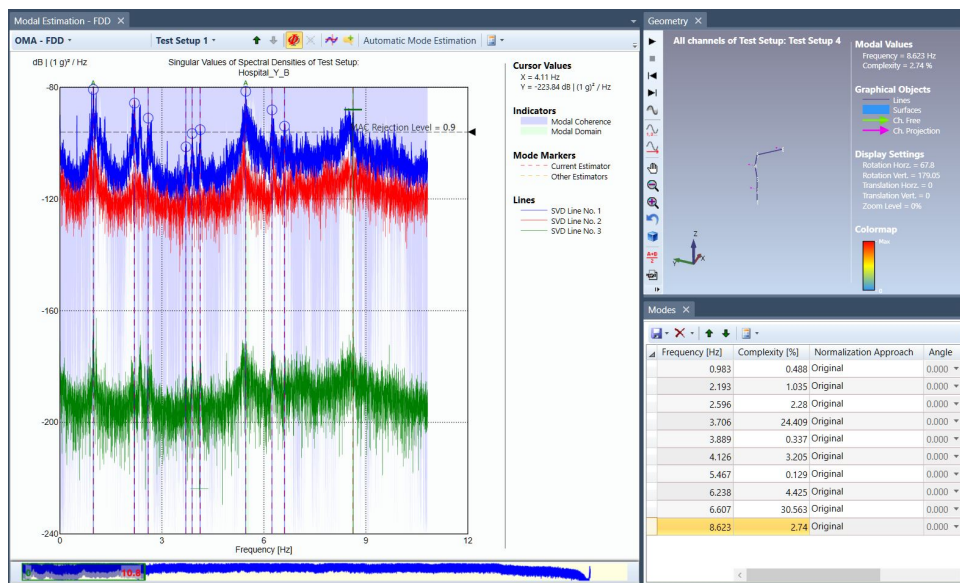


شکل پ.۷۷: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

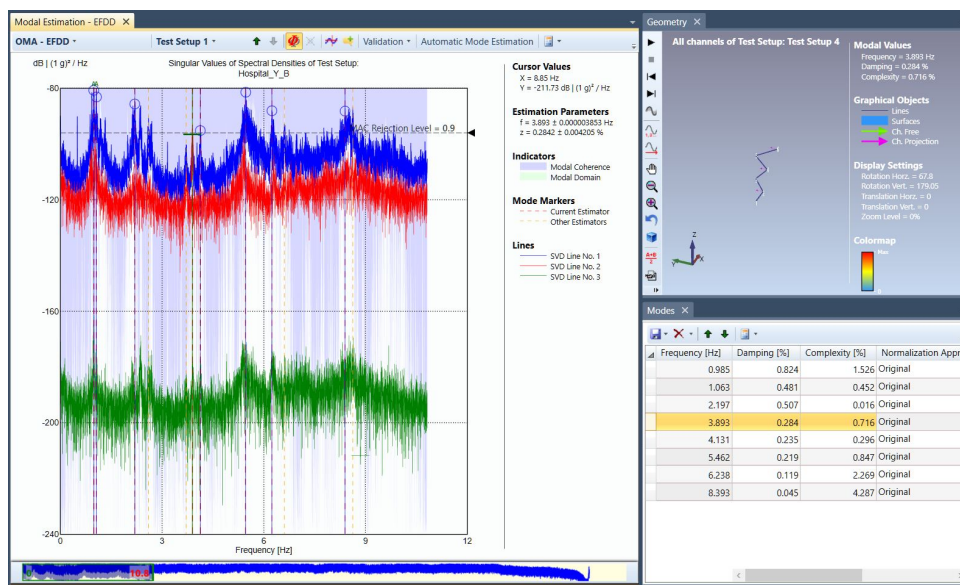


شکل پ.۷۸: سیگنال‌های گرفته شده از بلوک B بیمارستان در راستای عرضی

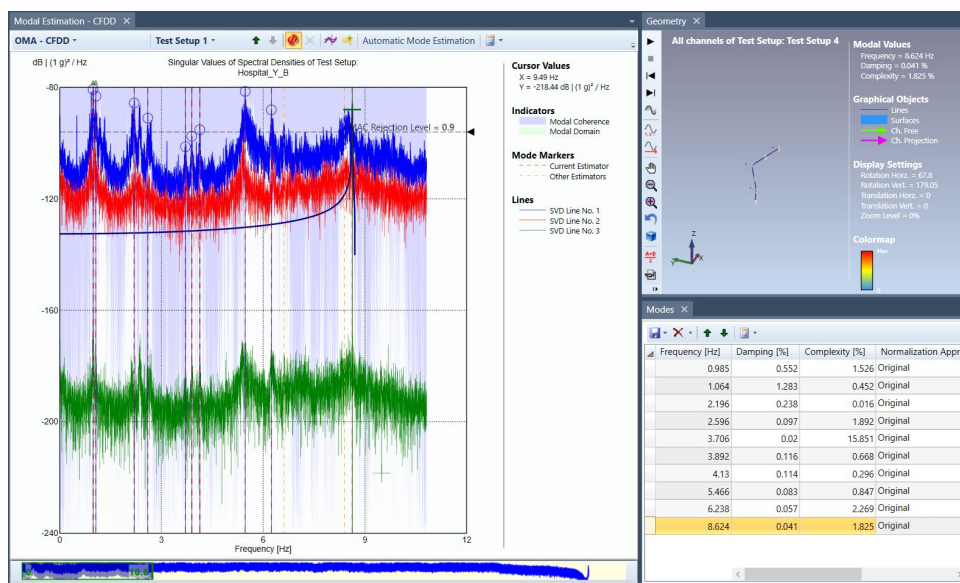
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه مثال سازه‌ای قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



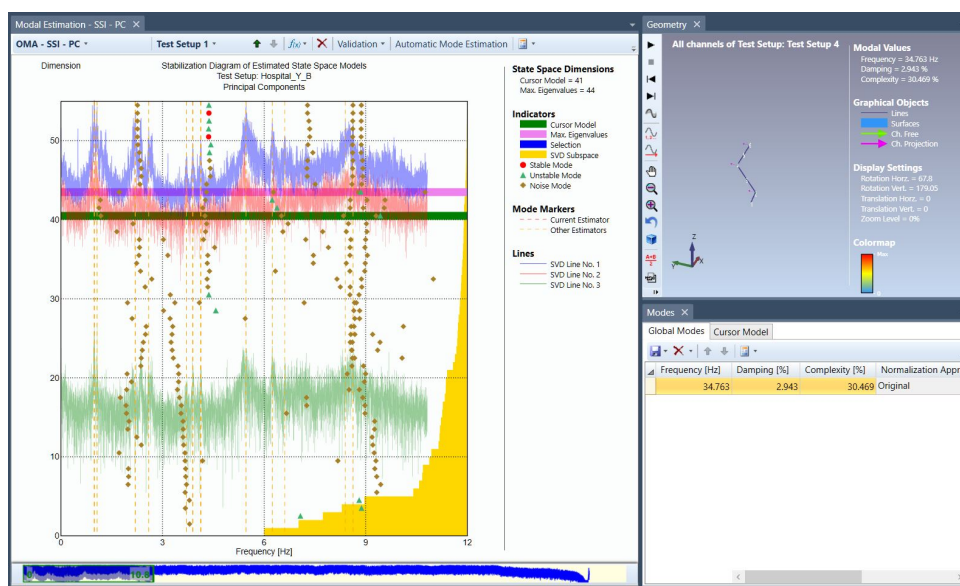
شکل پ. ۷۹: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ. ۸۰: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



شکل پ. ۸۱: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



شکل پ. ۸۲: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

الگوریتم‌های موجود پایش سلامت سازه در مقالات را می‌توان در دو گروه اصلی دسته‌بندی کرد: روشهای پارامتری و غیر پارامتری. در پایش سلامت سازه پارامتری، مدل ریاضی حاکم بر رفتار سازه‌ای شناخته شده است و برای شناسایی تغییرات محتمل در پارامترهای سازه‌ای نسبت به مدل مرجع، برای یافتن و موقعیت عیب راهگشاست.

در مقابل، روشهای غیرپارامتری ورودیهای سازه را به خروجیها بدون هیچگونه اطلاعاتی در مورد مدل داخلی سازه نگاشت می‌کند. خسارت بوسیله شناسایی تغییرات در پارامترهای ذاتی یا مدل غیر-فیزیکی ساخته شده، بدست می‌آید. با این وجود، مدل‌های غیر پارامتری نمی‌توانند موقعیت خسارت را بدون اطلاعات قبلی مشخص کنند. تمامی حالت‌های محتمل خسارت و پاسخ‌های متناسب سازه‌ای در دسترس است. اما، امتیاز بارز روشهای پایش سلامت سازه غیرپارامتری نسبت به نگرشهای پارامتری، توانایی آنها در لحاظ کردن دینامیک کامل سازه شامل دینامیک ساده شده یا مدل سازی نشده می‌باشد. [۳۱]

روشهای زیاد دیگری در حوزه‌های زمان یا فرکانس در سایه تئوری تحلیل سیستم توسعه داده شده‌اند. ساده‌ترین آنها تفکیک حوزه فرکانس (FDD) نامگذاری شده و شامل تفکیک ماتریس‌های توان (قدرت) چگالی طیفی (تراکم توان طیفی) به سیستم‌های یک درجه آزادی به کمک مقدار تکین است. ماتریس‌های تراکم توان طیفی (PSD) تبدیل‌های فوریه‌ای از ماتریس‌های همبستگی بین تمامی سیگنال‌های ثبت شده همزمان هستند، به نحوی که هیچ مدلی ارجحیت نداشته باشد. ماتریس‌های چگالی توان طیفی، سیگنال‌های ورودی (نامشخص) و خروجی (ثبت شده)، توابعی از فرکانس زاویه‌ای ω را می‌توان به ترتیب به صورت $[X](\omega)$ و $[Y](\omega)$ ذکر کرد. [۳۶]

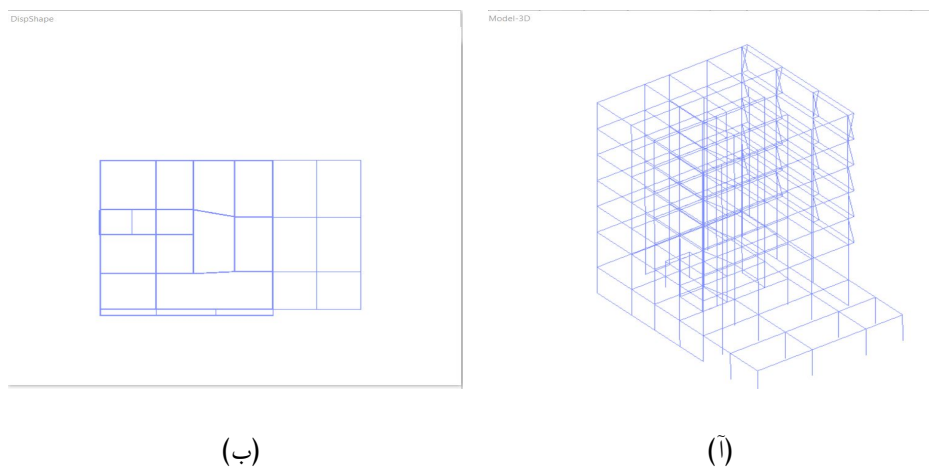
جدول پ.۱۰: *

فرکانس‌ها و میرایی بدست آمده با روش‌های مختلف تجزیه حوزه فرکانس با نرم افزار ARTeMIS

Modes	Method	Frequency(Hz)	Period(Sec)	Damping(%)
First	FDD	0.877	1.14	-
	EFDD	0.878	1.139	0.231
	CFDD	0.878	1.139	0.278
Second	FDD	0.923	1.083	-
	EFDD	0.926	1.08	0.369
	CFDD	0.926	1.08	1.181
Third	FDD	2.487	0.402	-
	EFDD	2.496	0.4	0.592
	CFDD	2.493	0.401	0.257
Fourth	FDD	4.146	0.241	-
	EFDD	4.146	0.241	0.095
	CFDD	4.165	0.24	0.048

* مقادیر بدست آمده در دو راستای طولی و عرضی ساختمان بیمارستان

پ.۳ نتایج خروجی‌های ساختمان محمدیه ۵



شکل پ.۸۳: (ا) مدل سه بعدی ساختمان مسکونی محمدیه ۵، (ب) مدل پلان سازه

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe

Start of Program
Start the Modeling
End of Define Nodes
End of Define Sections
End of Define Elements
*****
T = 1.085631302971505 sec

w = 5.787586716412982 rad/sec
*****
T = 0.5733864453739812 sec

w = 10.958029019855715 rad/sec
*****
T = 0.4022698928116958 sec

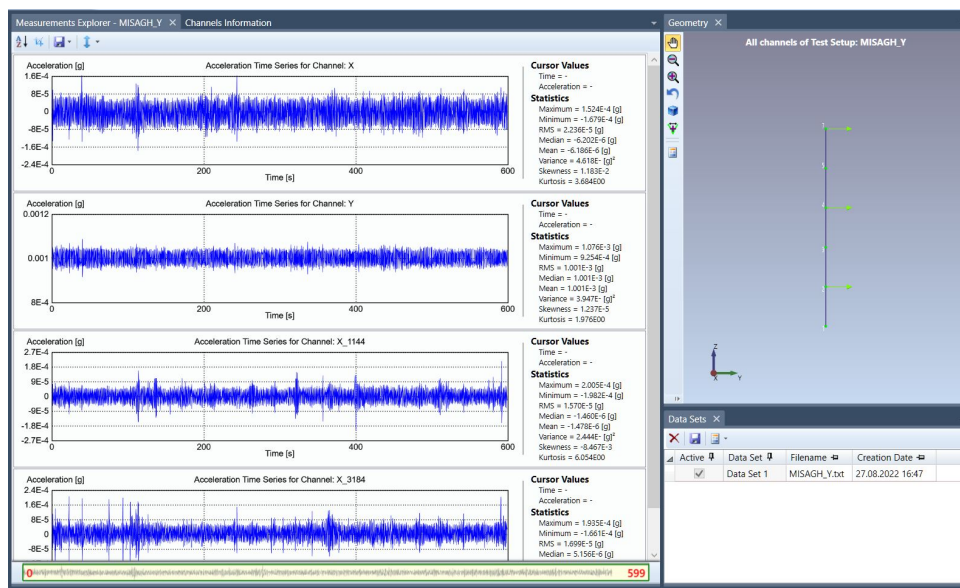
w = 15.619327770425974 rad/sec

OpenGLRenderer::setClippingPlanes() - invalid planes0 150
End of Static Analysis

*****
*****Frame Model Have Been Built Succesfully*****
*****

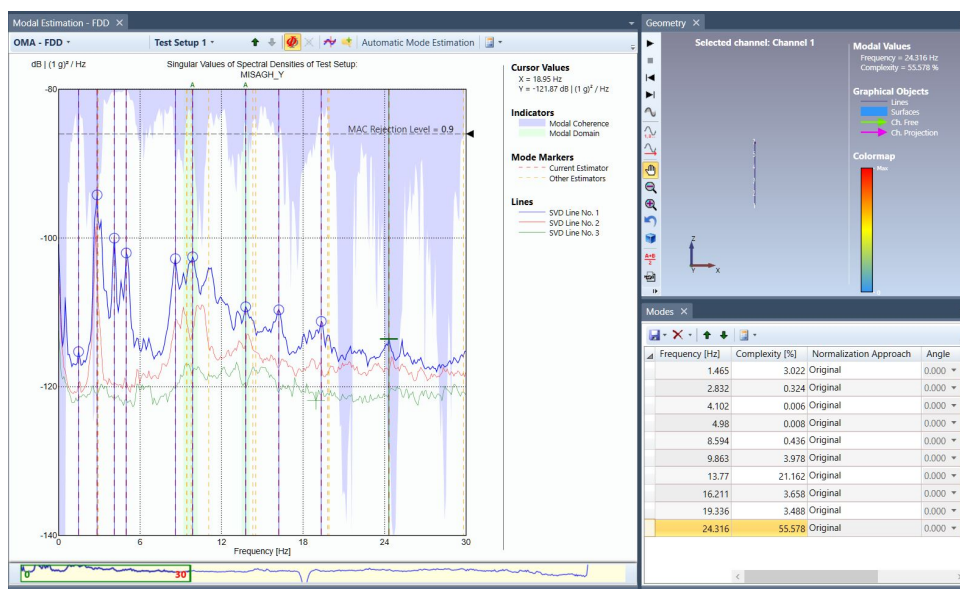
```

شکل پ.۸۴: نتایج خروجی نرم افزار اپنسیس برای مدل محمدیه ۵

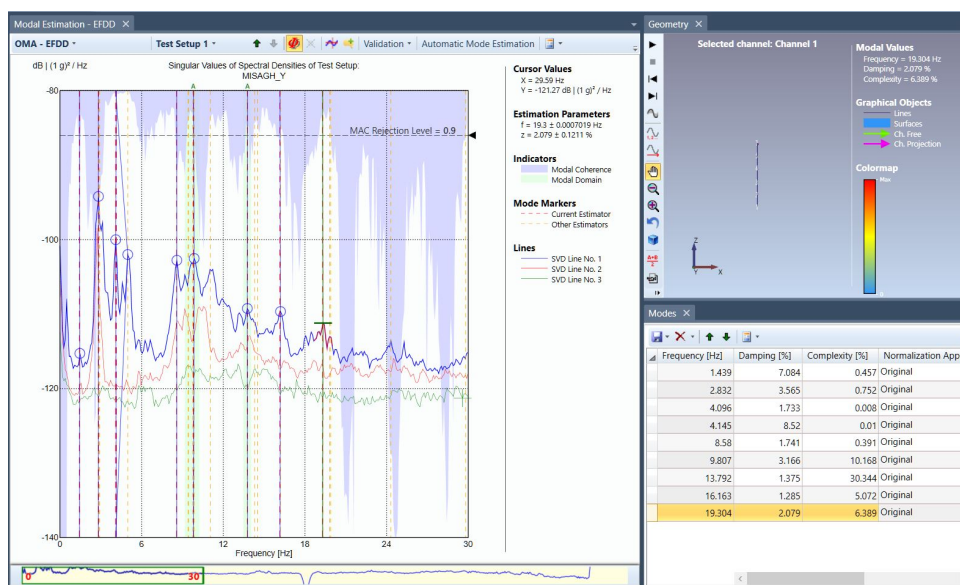


شکل پ.۸۵: سیگنال‌های گرفته شده از ساختمان مسکونی محمدیه ۵ در راستای عرضی

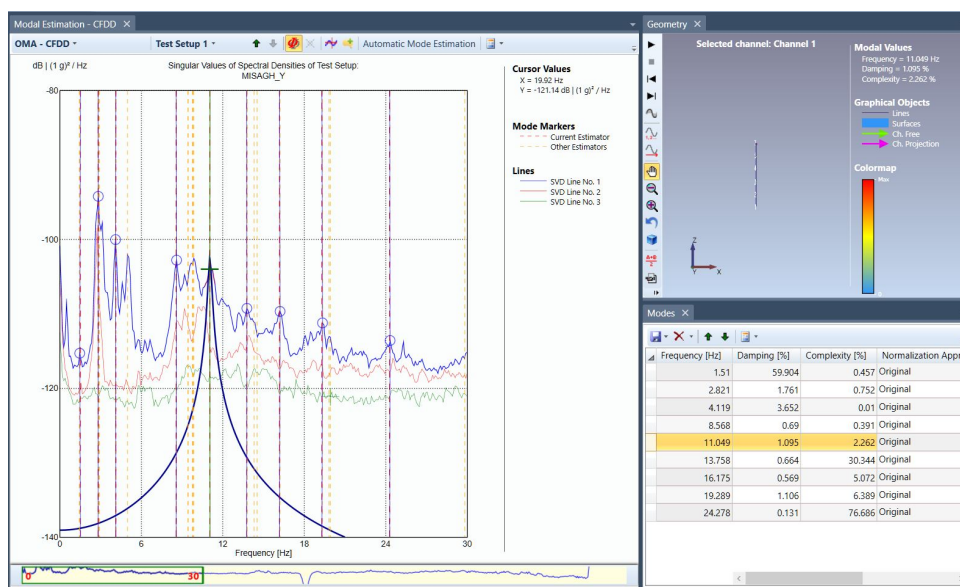
روش‌های حوزه فرکانس را مشابه سازه‌ی قبل برای سیگنال‌های گرفته شده بکار گرفته و نتایج حاصل از آن در اشکال جداگانه نمایش داده شده است.



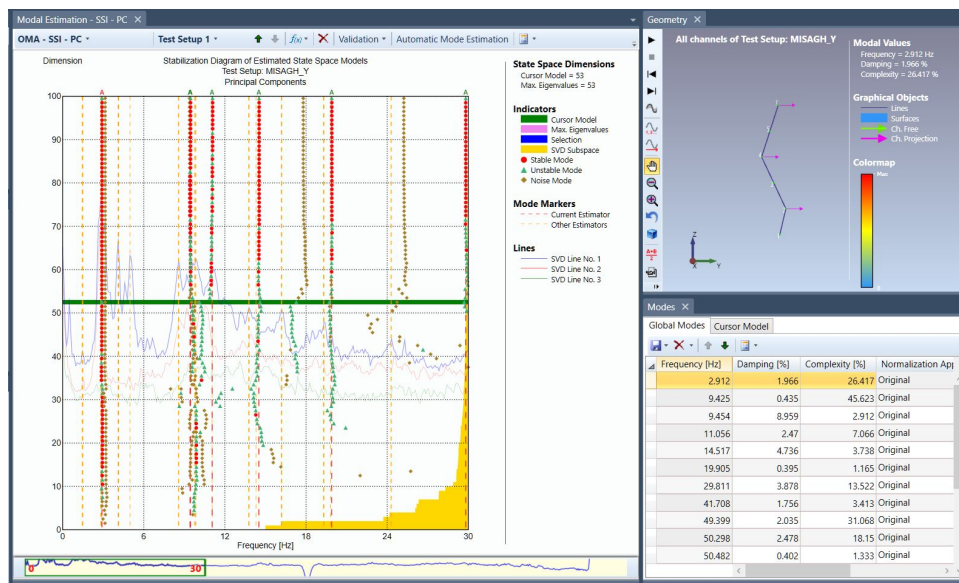
شکل پ.۸۶: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس



شکل پ. ۸۷: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مؤثر



شکل پ. ۸۸: نتایج بدست آمده از روش تجزیه حوزه فرکانس مختلط



شکل پ. ۸۹: نتایج بدست آمده از روش شناسایی تصادفی زیرفضا

کتاب نامه

- [1] F. Magalhães, A. Cunha, and E. Caetano, "Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: from automated oma to damage detection," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol.28, pp.212–228, 2012.
- [2] S. Baker and T. Kanade, "Limits on super-resolution and how to break them," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol.24, no.9, pp.1167–1183, 2002.
- [3] A. P. Ojeda, MATLAB implementation of an operational modal analysis technique for vibration-based structural health monitoring. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2012
- [4] A. Cabboi, Automatic operational modal analysis: challenges and applications to historic structures and infrastructures. Ph.D. thesis, Università degli Studi di Cagliari, 2014.
- [5] M. Nayyerloo, J. Chase, G. MacRae, and X. Chen, "Lms-based approach to structural health monitoring of nonlinear hysteretic structures," *Structural Health Monitoring*, vol.10, no.4, pp.429-444, 2011.
- [6] M. Tanaka, "An industrial and applied review of new mems devices features," *Microelectronic engineering*, vol.84, no.5-8, pp.1341-1344, 2007

-
- [7] C. Steinem and A. Janshoff. Piezoelectric sensors, vol.5. Springer Science & Business Media, 2007.
- [8] V. Giurgiutiu. Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors: with Piezoelectric Wafer Active Sensors. Elsevier, 2007.
- [9] Y. ZOU, L. TONG, and G. STEVEN, “Vibration-based model-dependent DAMAGE (deilamination) IDENTIFICATION AND HEALTH MONITORING FOR COMPOSITE STRUCTURES - a REVIEW,” *Journal of Sound and Vibration*, vol.230, no.2, pp.357 - 378, 2000.
- [10] “Front-matter,” in *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors (Second Edition)* (V. Giurgiutiu, ed.), pp.i - iii, Oxford: Academic Press, second edition ed. , 2014.
- [11] J. Karhunen, “Neural approaches to independent component analysis and source separation.,” in *ESANN*, vol.96, pp.249–266, Citeseer, 1996.
- [12] M. L. F. de Castro Mota, “Structural health monitoring: A machine learning approach,” 2021.
- [13] R. Ordóñez and K. Passino, “11 - stable multi-input multi-output adaptive fuzzy/neural control,” in *Adaptive Control Systems* (G. F. Lozano, ed.), pp.287 – 307, Oxford: Newnes, 1999.
- [14] J. Zhao and I. Kanellakopoulos, “7 - active identification for control of discrete-time uncertain nonlinear systems,” in *Adaptive Control Systems* (G. F. Lozano, ed.), pp.159 – 183, Oxford: Newnes, 1999.
- [15] D. Liu, Z. Tang, Y. Bao, and H. Li, “Machine-learning-based methods for output only structural modal identification,” 2020.

-
- [16] D. Liu, Z. Tang, Y. Bao, and H. Li, "Machine-learning-based methods for output only structural modal identification," arXiv preprint arXiv:200
 - [17] G. Feng, Y. Jiang, and R. Zmood, "2 - an algorithm for robust adaptive control with less prior knowledge," in Adaptive Control Systems (G. F. Lozano, ed.), pp.23 – 40, Oxford: Newnes, 1999.
 - [18] H. Shariatmadar and A. Entezami, "Structural damage detection by sensitivity analysis of vibrational response in civil and architectural buildings," in International Conference on Adaptation and Movement in Architecture, 2013.
 - [19] G. S. Jr. and H. Adeli, "System identification in structural engineering," Scientia Iranica, vol.19, no.6, pp.1355 – 1364, 2012.
 - [20] S. N. Pakzad, G. L. Fenves, S. Kim, and D. E. Culler, "Design and implementation of scalable wireless sensor network for structural monitoring," Journal of Infrastructure Systems, 2008.
 - [21] K.-V. Yuen and L. S. Katafygiotis, "Bayesian time-domain approach for modal updating using ambient data," Probabilistic Engineering Mechanics, vol.16, no.3, pp.219–231, 2001.
 - [22] H. Sohn, C. R. Farrar, and F. M. Hemez. A review of structural health monitoring literature: 1996-2001.
 - [23] E. P. Carden and P. Fanning, "Vibration based condition monitoring: a review," Structural health monitoring, vol.3, no.4, pp.355–377, 2004.
 - [24] R. de Medeiros, H. M. Lopes, R. M. Guedes, M. A. Vaz, D. Vandepitte, and V. Tita, "A new methodology for structural health monitoring applications," Procedia

- Engineering, vol.114, pp.54 - 61, 2015. ICSI 2015 The 1st International Conference on Structural Integrity Funchal, Madeira, Portugal 1st to 4th September, 2015.
- [25] V. Giurgiutiu, "Chapter 10 - high-frequency vibration SHM with PWAS modal sensors – the electromechanical impedance method," in *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors (Second Edition)* (V. Giurgiutiu, ed.), pp.509 – 572, Oxford: Academic Press, second edition ed. , 2014.
- [26] V. Giurgiutiu, "Chapter 11 - wave tuning with piezoelectric wafer active sensors," in *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors (Second Edition)* (V. Giurgiutiu, ed.), pp.573 – 637, Oxford: Academic Press, second edition ed. , 2014.
- [27] G. Maymon, "Chapter 3 - dynamic response of a structure to random excitation," in *Strucitural Dynamics and Probabilistic Analyses for Engineers* (G. Maymon, ed.), pp.70 – 145, Burlington: Butterworth-Heinemann, 2008.
- [28] J. A. Lozano-Galant, M. Nogal, E. Castillo, and J. Turmo, "Application of observability techniques to structural system identification," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engilneering*, vol.28, no.6, pp.434–450, 2013.
- [29] O. El-Khoury and H. Adeli, "Recent advances on vibration control of structures under dynamic loading," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol.20, no.4, pp.353– 360, 2013.
- [30] W. Su, C. Huang, C. Chen, C. Liu, H. Huang, and Q. Le, "Identifying the modal parameters of a structure from ambient vibration data via the stationary wavelet packet," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol.29, no.10, pp.738–757, 2014.

-
- [31] L. R. Pinto and A. R. Zambrano, "Unsupervised neural network approach to frame analysis of conventional buildings," *Int'l J. of Communications, Network and System Sciences*, vol.2014, 2014.
- [32] H. Qarib and H. Adeli, "A new adaptive algorithm for automated feature extraction in exponentially damped signals for health monitoring of smart structures," *Smart Materials and Structures*, vol.24, no.12, p.125040, 2015.
- [33] H. Qarib and H. Adeli, "Recent advances in health monitoring of civil structures,"
- [34] L. Liu, Y. Lei, and M. He, "A two-stage parametric identification of strong nonlinear structural systems with incomplete response measurements," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, p.1640022, 2015.
- [35] Y. Pan and Y. Wang, "Iterative method for exponential damping identification," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol.30, no.3, pp.229-243, 2015.
- [36] J. Shan, W. Shi, and X. Lu, "Model-reference health monitoring of hysteretic building structure using acceleration measurement with test validation," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2015.
- [37] C. Perez-Ramirez, J. Amezcua-Sanchez, M. Valtierra-Rodriguez, A. Mejia-Barron, A. Dominguez-Gonzalez, R. Osornio-Rios, and R. Romero-Troncoso, "Dynamic behavior modeling of civil structures using wavelets and neural networks: A comparative study," in *Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)*, 2014 International Conference on, pp.54-59, Nov 2014

- [38] C. Xu, J. G. Chase, and G. W. Rodgers, "Physical parameter identification of non-linear baselisolated buildings using seismic response data," *Computers & Structures*, vol.145, pp.47-57, 2014.
- [39] M. Nayyerloo, "Real-time structural health monitoring of nonlinear hysteretic structures," 2011.
- [40] J. L. Zapico-Valle, M. García-Diéguez, and R. Alonso-Cambor, "Nonlinear modal identifiication of a steel frame," *Engineering Structures*, vol.56, pp.246–259, 2013.
- [41] M. Prandina, Spatial damping identification. Ph.D. thesis, University of Liverpool, 2010.
- [42] S. H. Crandall, "The role of damping in vibration theory," *Journal of sound and vibration*, vol.11, no.1, pp.3IN1-18, 1970.
- [43] S. Adhikari and J. Woodhouse, "Identification of damping: part 1, viscous damping," *Journal of Sound and Vibration*, vol.243, no.1, pp.43-61, 2001.
- [44] J. Woodhouse, "Linear damping models for structural vibration," *Journal of Sound and Vilbration*, vol.215, no.3, pp.547-569, 1998.
- [45] A. S. Phani and J. Woodhouse, "Viscous damping identification in linear vibration," *Journal of Sound and Vibration*, vol.303, no.3, pp.475-500, 2007.
- [46] S. Adhikari and B. Pascual, "Eigenvalues of linear viscoelastic systems," *Journal of Sound and Vibration*, vol.325, no.4, pp.1000-1011, 2009.
- [47] J. Davis. *Foundations of deterministic and stochastic control*. Springer Science & Business Media, 2002.

-
- [48] S. Adhikari. Structural Dynamic Analysis with Generalized Damping Models: Analysis. John Wiley & Sons, 2013.
- [49] T. Muha, Structural Health Monitoring of high-rise building structures. Ph.D. thesis, Worcesiter Polytechnic Institute.
- [50] J. Grosel, W. Sawicki, and W. Pakos, "Application of classical and operational modal analysis for examination of engineering structures," *Procedia Engineering*, vol.91, pp.136-141, 2014.
- [51] F. Magalhães, Á. Cunha, E. Caetano, and R. Brincker, "Damping estimation using free decays and ambient vibration tests," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol.24, no.5, pp.1274-1290, 2010.
- [52] E. Reynders, "System identification methods for (operational) modal analysis: review and comparison," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol.19, no.1, pp.51-124, 2012.
- [53] @articleyao2018blind, title=Blind modal identification in frequency domain using independent component analysis for high damping structures with classical damping, author=Yao, Xiao-Jun and Yi, Ting-Hua and Qu, Chunxu and Li, Hong-Nan, journal=Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, volume=33, number=1, pages=35–50, year=2018, publisher=Wiley Online Library
- [54] @articlechang2016improved, title=Improved independent component analysis based modal identification of higher damping structures, author=Chang, Jun and Liu, Wenbo and Hu, Hao and Nagaraj aiah, Satish, journal=Measurement, volume=88, pages=402–416, year=2016, publisher=Elsevier

-
- [55] @articlefarzampour2018unsupervised, title=Unsupervised Identification of Arbitrarily-damped Structures using Time-Scale ICA: Experimental Investigations, author=Farzampour, Alireza and Kamali-Asl, Arash and Hu, Jong Wan, year=2018
- [56] @articleliu2021machine, title=Machine-learning-based methods for output-only structural modal identification, author=Liu, Dawei and Tang, Zhiyi and Bao, Yuequan and Li, Hui, journal=Structural Control and Health Monitoring, volume=28, number=12, pages=e2843, year=2021, publisher=Wiley Online Library
- [57] @articlenanda2014crack, title=Crack assessment in frame structures using modal data and unified particle swarm optimization technique, author=Nanda, Bharadwaj and Maity, Damodar and Maiti, Dipak, journal=Advances in Structural Engineering, volume=17, number=5, pages=747–768, year=2014, publisher=Multi Science Publishing
- [58] @bookde2007vibration, title=Vibration damping, control, and design, author=De Silva, Clarence W, year=2007, publisher=CRC Press
- [59] @incollectionZhao1999159, title = "7 - Active identification for control of discrete-time uncertain nonlinear systems ", editor = "Lozano, Gang FengRogelio ", booktitle = "Adaptive Control Systems ", publisher = "Newnes", edition = "", address = "Oxford", year = "1999", pages = "159 - 183", isbn = "978-0-7506-3996-5", doi = "http://dx.doi.org/10.1016/B978-075063996-5/50008-7", url = "http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750639965500087", author = "J. Zhao and I. Kanellakopoulos"
- [60] @articleadhikari2000damping, title=Damping Models for Structural Vibration, author=Adhikari, Sondipon, year=2000

- [61] @incollectionZhivoglyadov199980, title = "5 - Adaptive stabilization of uncertain discrete-time systems via switching control: The method of localization ", editor = "Lozano, Gang FengRogelio ", booktitle = "Adaptive Control Systems ", publisher = "Newnes", edition = "", address = "Oxford", year = "1999", pages = "80 - 118", isbn = "978-0-7506-3996-5", doi = "http://dx.doi.org/10.1016/B978-075063996-5/50006-3", url = "http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750639965500063", author = "P.V. Zhivoglyadov and R.H. Middleton and M. Fu"
- [62] @incollectiontagkey2008420, title = "References ", editor = "Maymon, Giora ", booktitle = "Structural Dynamics and Probabilistic Analyses for Engineers ", publisher = "Butterworth-Heinemann", edition = "", address = "Burlington", year = "2008", pages = "420 - 426", isbn = "978-0-7506-8765-2", doi = "http://dx.doi.org/10.1016/B978-075068765-2.50016-8", url = "http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750687652500168", key = "tagkey2008420"



In the name of God
Graduate StudiesDissertation Information
Ferdowsi University of Mashhad

Damping Identification with Ambient Vibration Test and Unsupervised Deep Neural Network for Strucural Health Monitoring

Author: HAMED SARMAST

Supervisor: Prof. HASAN HAJIKAZEMI

Advisor: DR. ABBAS KARAMODDIN

Faculty: Faculty of Civil Engineering Department: Engineering Specializa-
tion: Structural Engineering

Approval Date:

Defence Date: 18-May-2023

Ph.D.

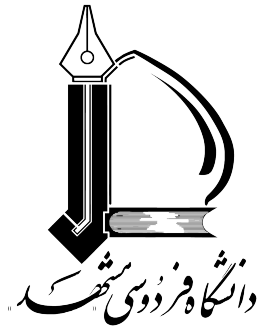
Number of Pages: ??

Abstract Dissertation : The most important part in the discussion of seismic improvement is the evaluation of the vulnerability of the existing structures. These structures can be buildings that did not collapse after any kind of event such as earthquake, fire, explosion, impact, etc., but need to be re-evaluated for its exploitation, or structures which has been aged out due to the passage of time and according to the last regulation which need to be re-evaluated. In all the above cases, not much effort is made to obtain and update the damping characteristic as in the design time, and damping ratios of 5 percent or proportional damping are used. In order to reach the values of modal damping from the Python programming language and existing libraries for deep learning including *Sickit – learn*, the independent component analysis method was implemented and the dynamic characteristics of the structures were obtained from the records as input to the unsupervised deep learning network. Using this method to improve structures before and after the improvement, as well as evaluating the vulnerability of structures after an earthquake can be effective.

Key Words: Ambient Vibration Test; Unsupervised Deep Neural Network; Modal Analysis

Signature of Supervisor:

Date:



Ferdowsi University of Mashhad

Faculty of Civil Engineering

Doctoral Thesis Submitted in Partial

Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Doctor of Science in
Engineering

**Damping Identification with Ambient
Vibration Test and Unsupervised Deep
Neural Network for Strucural Health
Monitoring**

Supervisor

Prof. HASAN HAJIKAZEMI

Advisor

DR. ABBAS KARAMODDIN

by

HAMED SARMAST

2023