مطالعه دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات طبیعی و مصنوعی در محل سازه‌ها و فونداسیون‌های حساس و مقایسه با حد مجاز

محمد داودی، استادیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
ابراهیم حق‌شناس، استادیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

چکیده

دستگاه‌های با دقت کارکرد بالا که در مراکز پیشرفته صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند از نظر شرایط محیطی دوران بهره‌برداری با محدودیت‌هایی روبرو هستند. با توجه به سرعت و دقت بالای کارکرد دستگاه‌های مذکور، ارتعاشات محیطی منتقل‌شده به فونداسیون آنها که در داخل و یا خارج سایت ایجاد می‌شوند نباید از حد تعریف شده توسط کارخانجات سازنده آنها تجاوز نماید. همچنین در برخی ماشین‌آلات صنعتی مولد ارتعاش، به دلیل جلوگیری از وقوع تشدید در سیستم ماشین- فونداسیون- خاک و درنهایت عدم‌آسیب به اجزای مختلف ماشین و بهره‌برداری ایمن از آن، دامنه ارتعاشات در نقاط مختلف ماشین محدود می‌گردد. در کلیه حالات مذکور، معمولاً حد مجاز ارتعاشات به‌صورت حداکثر دامنه شتاب، سرعت و یا تغییرمکان در محدوده فرکانسی مشخص (و یا به‌صورت طیف) توسط کارخانه سازنده معرفی می‌گردد. به‌منظور ارائه جزئیات بیشتری از مباحث مذکور، در مقاله حاضر ابتدا به حدود مجاز ارتعاشات به اجمال اشاره می‌شود و سپس خلاصه‌ای از نتایج حاصل از دو طرح اندازه‌گیری و مطالعه ارتعاشات محیطی در محل فونداسیون‌های خاص که توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در شهرهای ماهشهر و قزوین انجام شده‌است، ارائه می‌گردد.

کلید واژه‌ها: حدمجاز ارتعاشات، فونداسیون ماشین‌آلات صنعتی، محتوای فرکانسی، دامنه سیگنال

۱- مقدمه

در اکثر کارخانه‌های بزرگ و تأسیسات مهم، ماشین‌آلاتی وجود دارند که در زمان فعالیت خود، بار دینامیکی بر روی فونداسیون وارد می‌کنند. این ماشین‌آلات یا همانند لرزاننده‌ها (shakers)، توربین‌ها، کمپسورها و شتاب‌دهنده‌ها دارای فرکانس‌های بارگذاری مشخصی هستند و یا مانند دستگاه‌های پرس، روبات‌های جوشکار و رادارهای بشقابی شکل، پهنای‌باند فرکانسی وسیعی دارند.

طراحی فونداسیون‌های این ماشین‌آلات ارتعاشی، عموماً بر مبنای کنترل تغییرمکان صورت می‌گیرد. تغییرمکان‌های ایجاد شده در اثر بارهای ارتعاشی را در حالت کلی می‌توان به دو گروه تغییرمکان‌های سیکلی برگشت‌پذیر و تغییرمکان دائم تقسیم‌بندی کرد. درواقع، تغییرمکان نوع اول به دلیل پاسخ الاستیک سیستم خاک - فونداسیون- ماشین به بارگذاری ارتعاشی ایجاد می‌شود و عمدتاً با استفاده از روابط سیستم‌های دینامیکی چند درجه آزاد محاسبه می‌شود درحالیکه تغییرمکان نوع دوم به دلیل متراکم شدن خاک زیر فونداسیون ایجاد می‌شود و برای محاسبه آن لازم است ضمن تعریف مدل‌های رفتاری مناسب برای خاک، عمدتاً از نرم‌افزارهای عددی استفاده گردد. از دید طراحی فونداسیون‌های مذکور، نه تنها باید تغییرمکان دائم زیر فونداسیون کنترل گردد بلکه باید تغییرمکان‌های الاستیک سیستم نیز با حد مجاز آنها مقایسه شود. درواقع به دلیل جلوگیری از وقوع تشدید در سیستم ماشین- فونداسیون- خاک و در نهایت عدم‌آسیب به اجزای مختلف ماشین و بهره‌برداری ایمن از آن، باید دامنه ارتعاشات در نقاط مختلف ماشین محدود گردد. درصورت بالاتر از حد مجاز بودن تغییرمکان‌ها، می‌توان مشخصات دینامیکی سیستم را تغییر

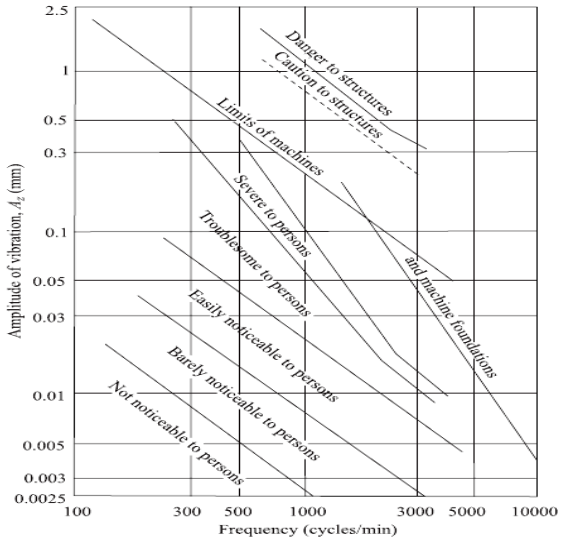
داد و تغییرمکان‌های الاستیک را به زیر حد مجاز کاهش داد.

نوع دیگری از طراحی لرزه‌ای پی‌ها به ماشین‌الات حساس به ارتعاش مربوط می‌شود که خود، منبع ایجاد ارتعاش نمی‌باشند، اما به دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات رسیده از محیط اطراف (داخل و خارج از کارگاه) حساس می‌باشند. در این گروه می‌توان به دستگاه تراش دقیق، دستگاه برش لیزری و دستگاه اندازه‌گیر CMM (Cad Measuring Machine) اشاره کرد. در طراحی فونداسیون این نوع ماشین‌آلات، دیگر روش قبل کاربردی نخواهد بود زیرا ضمن متنوع بودن منابع ایجاد ارتعاش و فواصل مختلف آنها از نقطه مورد نظر، تأثیر لایه‌های مختلف خاک در تغییر (تضعیف یا تشدید) ارتعاشات رسیده به محل فونداسیون نیز پیچیدگی مسأله را دوچندان می‌کند. لذا برای حل این مسأله باید تاریخچه زمانی ارتعاشات رسیده از محیط اطراف با استفاده از دستگاه‌های لرزه‌نگار ثبت گردد و سپس با پردازش نگاشت‌های ثبت‌شده، دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات محاسبه و با مقادیر مجاز معرفی‌شده توسط کارخانه سازنده دستگاه مقایسه شود. در این حالت نیز درصورت بالاتر از حد مجاز بودن ارتعاشات، می‌توان علاوه بر تغییر مشخصات دینامیکی سیستم، از روش‌های ایزولاسیون سازه‌ای و ژئوتکنیکی استفاده کرد.

به‌منظور ارائه جزئیات بیشتری از مباحث مذکور، در مقاله حاضر ابتدا به حدود مجاز ارتعاشات به اجمال اشاره می‌شود. سپس به ضوابط برخی از استانداردها و آیین‌نامه‌های مطرح دنیا پیرامون حد مجاز ارتعاشات در سازه‌های مختلف پرداخته می‌شود و در انتها نیز خلاصه‌ای از چندین طرح اندازه‌گیری و مطالعه ارتعاشات در محل فونداسیون‌های خاص که توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در شهرهای تهران، ماهشهر و قزوین انجام شده است ارائه می‌گردد. به‌منظور مشاهده مبانی محاسبات و جزئیات طراحی فونداسیون ماشین‌آلات ارتعاشی می‌توان به کتاب‌ها و مراجع دینامیک خاک (ازجمله مرجع [۱]) مراجعه نمود.

۲- محدوده مجاز ارتعاشات

تأثیر ارتعاشات وارد بر سازه‌های مختلف بسته به مقدار دامنه و فرکانس امواج رسیده به آن می‌تواند متفاوت باشد. در شکل (۱) دامنه مجاز تغییرمکان قائم در فرکانس‌های مختلف ارتعاشات از دید کاربردهای مختلف ارائه شده است. در واقع این شکل نشان می‌دهد درصورتی‌که دامنه و فرکانس ارتعاشی از حد مشخصی کمتر باشد، آن ارتعاش برای انسان قابل حس نیست و با افزایش آن، به ترتیب مرز درک و آسیب به انسان، حد ماشین‌آلات و فونداسیون آنها، حد احتیاط برای سازه‌ها و حد آسیب سازه‌ها را مشخص می‌کند. همچنین در این شکل ملاحظه می‌شود روند کلی حاکم بر دامنه مجاز تغییرمکان، کاهش آن با افزایش فرکانس ارتعاشات است و این کاهش، عموما روند خطی دارد.



شکل (۱): *محدوده مجاز دامنه ارتعاشات قائم [۱].*

با استفاده از نتایج مطالعات مشابه شکل مذکور، می‌توان فونداسیون ماشین‌آلات ارتعاشی را در محدوده مجاز طراحی کرد. به‌عنوان مثال، درصورتی که حداکثر دامنه شتاب قابل اعمال بر روی یک فونداسیون در فرکانس بارگذاری ۳۳ هرتز (حدود ۲۰۰۰ دور در دقیقه) مورد سوأل باشد در این‌صورت از شکل مذکور، دامنه مجاز تغییرمکان برابر ۰/۱۲۷ mm و یا معادل $۰/۱۲۷(۲\pi\times۳۳)^{۲}\times۱۰^{-۴}=۰/۵۵g$ به‌دست می‌آید.

در هر کدام از زمینه‌های کاربردی مورد اشاره در شکل (۱)، مطالعات فراوانی توسط محققین مختلف صورت

گرفته‌است. در این راستا می‌توان به تلاش‌هایی جهت ارتباط پارامترهای ارتعاش (جابه‌جایی، سرعت، شتاب و فرکانس) با مشاهدات ادراک و رنجش انسان و حد آسیب سازه‌ها توسط محققینی چون (۱۹۳۱) Reiher، Meister(۱۹۳۱)، (۱۹۴۹) Crandell،(۱۹۷۷) Medearis، (۱۹۸۰) Siskind etal، (۱۹۹۶) Dowding که در مرجع (۲) بدانها ارجاع شده است، اشاره کرد. در این مطالعات، برای توضیح و بیان ویژگی‌های ارتعاش در سیگنال‌های شتاب و سرعت ثبت‌شده، علاوه‌بر دامنه ارتعاش، کمیت‌های دیگری مانند "سرعت حداکثر ذره‌ای P.P.V" و "پارامتر سطح ارتعاش VDV" در استانداردهای مختلف نیز مورد استناد قرار گرفته است [۲].

تعدادی از محققین از جمله (۱۹۶۲) Duvall و Fogelson و (۱۹۶۸) Wiss و (۱۹۷۱) Nichols et al اعتقاد دارند که آسیب‌های سازه‌ای می‌تواند به خوبی با پارامتر حداکثر سرعت ذره‌ای ارتعاش زمین مرتبط گردد [۲]. همچنین در ارتباط با بررسی حالات انسان پارامترهای متنوعی در استانداردها و مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به پارامتر سطح ارتعاش در استاندارد شماره ۶۴۷۲ انگلیس[۳] و پارامتر سرعت حداکثر ذره‌ای در استاندارد آلمان [۴] اشاره داشت. در زمینه حد مجاز ارتعاشات بدن انسان و ارتباط آن با عکس‌العمل اعضای مختلف بدن نیز در استاندارد جهانی ۳۱/۲۶ [۵] مباحثی ارائه شده است.

در اغلب آیین‌نامه‌های معتبر، حد مجاز برای ارتعاشات گذرا و ممتد به تفکیک آورده شده است. در آیین‌نامه‌های مذکور با تقسیم بندی سازه‌ها، محدوده‌هایی جهت پرهیز از وقوع آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای در فرکانس‌های مختلف ارتعاش ارائه شده است. از جمله آیین‌نامه‌ها و استانداردهای موجود در این زمینه می‌توان به استاندارد شماره ۷۳۸۵ انگلیس [۶]، استاندارد انجمن سازه‌ها و تاسیسات زیرزمینی فرانسه [۷]، استاندارد بین‌المللی شماره ۴۸۶۶ [۸] و استاندارد انجمن معدن آمریکا [۹] اشاره کرد. جهت مشاهده ضوابط آیین‌نامه‌های دیگر کشورها می‌توان به مرجع [۲] مراجعه نمود.

۳- مثال‌هایی از چند مورد مطالعه سطح ارتعاشات در محل پی‌های خاص در ایران

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به دلیل دراختیار داشتن توان بالای تجهیزات دقیق لرزه‌نگاری و کارشناسان آشنا به مباحث پردازش سیگنال، تاکنون به عنوان یک مرجع قوی برای حل معضلات صنعت کشور در زمینه اندازه‌گیری و پردازش ارتعاشات عمل کرده است در این رابطه چندین طرح حائز اهمیت توسط این پژوهشگاه صورت گرفته است:

- بررسی سطح ارتعاشات به‌منظور استقرار یک دستگاه برش لیزری پیشرفته در قسمتی از مسیر خط تولید شرکت سایپا در سال ۱۳۷۹ [۱۰].
- بررسی سطح ازتعاشات در محل دستگاه‌های حساس CMM و دستگاه تراش دقیق پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی در سال ۱۳۸۳ [۱۱].
- اندازه‌گیری و مطالعه ارتعاشات در محل فونداسیون دستگاه کمپرسور پتروشیمی لاله در سال ۱۳۸۶ [۱۲].
- مطالعات نوفه‌سنجی محل احداث طرح چشمه نور ایران در شمال شهر قزوین در سال ۱۳۹۱ [۱۳].
- در این بخش، دو نمونه آخر به‌منظور ارائه تجارب کسب‌شده در این مطالعات و آشنایی با روند بررسی‌ها در این‌گونه موارد تشریح می‌گردند.

۳-۱- اندازه‌گیری و مطالعه ارتعاشات در محل فونداسیون دستگاه کمپرسور پتروشیمی لاله [۱۲]

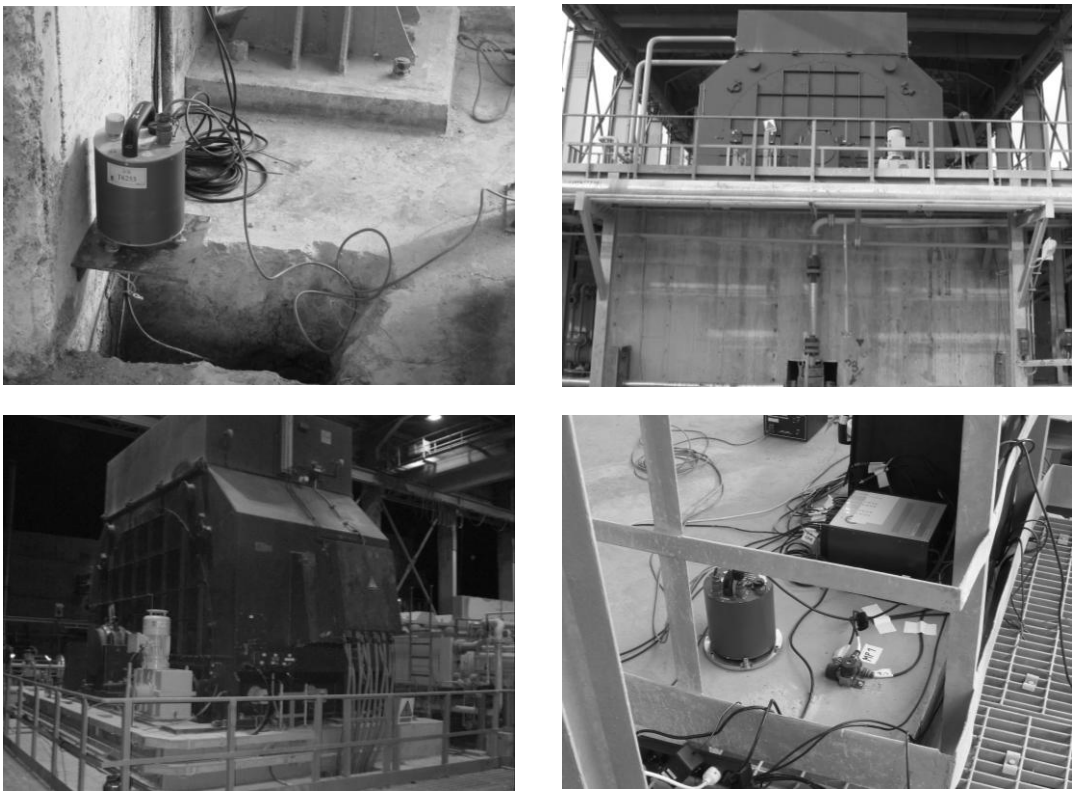
در اواخر سال ۱۳۸۴ و در مراحل انتهایی ساخت مجتمع پتروشیمی لاله واقع در بندر ماهشهر، نصب و بهره‌برداری از یک دستگاه کمپرسور با مشکلاتی مواجه گشت. این دستگاه کمپرسور که در نوع خود، از قویترین کمپرسورهای موجود بود در مسیر خروجی مجتمع مذکور قرار گرفته بود و هرگونه تأخیر در بهره‌برداری آن، باعث تحمیل خسارت‌های بسیار سنگین (روزانه در حدود یک میلیون دلار بر اساس اظهار کارشناسان مجتمع) به کشور می‌شد.

در اوائل نصب کمپرسور توسط شرکت سازنده خارجی و بر اساس آزمایش‌های مقدماتی توسط یک شرکت خارجی، دامنه ارتعاشات در نقاط مختلف فونداسیون در حالت کارکرد بدون بارگیری کمپرسور، بیش از حد مجاز تشخیص داده شد. مطالعات بعدی، علت اصلی وقوع این پدیده را به ساختار نرم لایه‌های زیرسطحی نسبت داد و شرکت سازنده تابرطرف شدن مشکل، از بهره‌برداری دستگاه خودداری کرد.

از آنجا که فونداسیون بر روی ۲۱۰ شمع قائم و مایل با عمق ۲۵ متر احداث شده بود، مدل عددی اولیه‌ای در نرم‌افزار PLAXIS برای سیستم شمع -فونداسیون تهیه شد و نتایج تحلیل نشان داد با اصلاح سختی خاک در لایه‌های زیرسطحی می‌توان دامنه ارتعاشات را در ترازهای بالای فونداسیون کاهش داد. لذا عملیات تزریق در لایه‌های زیرسطحی در چهارگوشی به ابعاد ۳۰ متر و عمق ۱۶ متر و همچنین تقویت فونداسیون دو طبقه در دستور کار قرار گرفت. لیکن به‌دلیل اختلاف پیش‌آمده بین کارفرما و شرکت سازنده کمپرسور در مورد دقت دستگاه‌های اندازه‌گیر و روش پردازش داده‌ها، عملیات بهره‌برداری از آن به اندازه‌گیری مجدد و پردازش دقیق ارتعاشات و مقایسه با حد مجاز موکول شد. در اواخر پاییز سال ۱۳۸۵، از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله جهت ثبت و پردازش ارتعاشات در ۱۷ نقطه مختلف دعوت به عمل آمد.

۳-۱-۱- تجهیزات مورد استفاده در آزمایش

در مدت زمان انجام آزمایش، از ۶ دستگاه لرزه‌نگار پرتابل سه مولفه‌ای CMG-6TD و ۴ دستگاه شتابنگار پرتابل سه مولفه‌ای CMG-5TD جهت ثبت ارتعاشات محیطی و اجباری در نقاط مورد نظر استفاده شد. دستگاه‌های مذکور با امکان اتصال به GPS، قابلیت تعیین دقیق موقعیت مکانی دستگاه و همچنین ثبت ارتعاشات بدون اختلاف زمانی را فراهم می‌آورد. در شکل (۲) تصاویری از مراحل ثبت ارتعاشات میکروترمور در برخی ایستگاه‌های اندازه‌گیری قابل مشاهده است.



شکل (۲): *تصاویری از فونداسیون کمپرسور و مراحل ثبت ارتعاشات [۱۲].*

۳-۱-۲- ماهیت امواج در شرایط بارگذاری محل

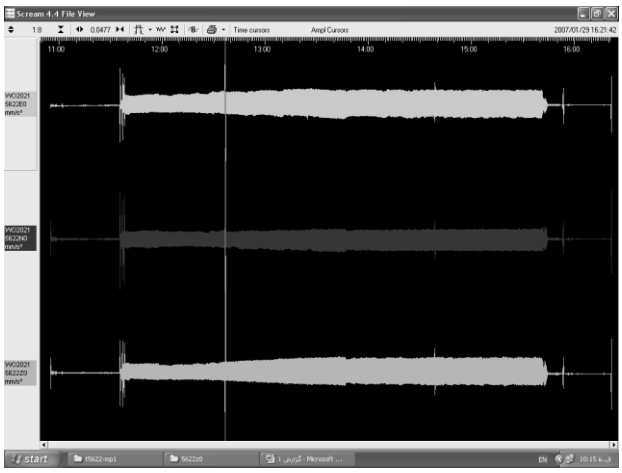
آزمایش ثبت ارتعاشات در نقاط مورد نظر در دو شرایط ارتعاش اجباری و محیطی انجام شد. در آزمایش ارتعاش اجباری، کمپرسور در مدار قرار گرفت و پس از اعمال بارگذاری گذرا، بار سینوسی ثابتی را بر روی فونداسیون و محیط اطراف کمپرسور اعمال کرد. در حالت ثبت ارتعاشات محیطی، ارتعاش نقاط مختلف فونداسیون به امواج خردلرزه با دامنه‌هایی در حد ۰/۱ تا ۱ میکرون و پریود ۰/۳ تا ۱۰ ثانیه اندازه‌گیری شد.

ثبت ارتعاشات با استفاده از دستگاه‌های سه مؤلفه‌ای لرزه‌نگار و شتابنگار در پنجره‌های زمانی متفاوت و با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ نمونه در ثانیه انجام گرفت. به منظور کمک به تفسیر نتایج نگاشت‌های ثبت شده، کلیه عوامل مؤثر بر ارتعاشات محل استقرار دستگاه لرزه‌نگار مورد توجه قرار گرفت و به دقت در چک‌لیست‌هایی که بدین منظور درنظر گرفته شده بود، وارد شد.

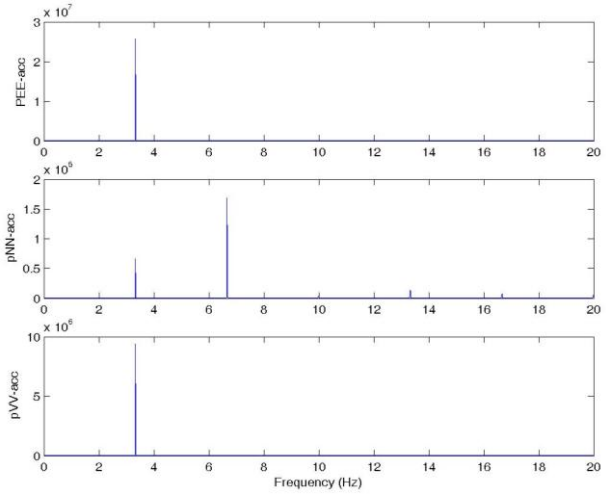
۳-۱-۳- پردازش رکوردهای ثبت‌شده

پس از اندازه‌گیری امواج، نگاشت‌های ثبت شده برای حذف DC و خطای فاصله از خط مبدأ و همچنین برای حذف فرکانس‌های مزاحم موجود در سیگنال، توسط فیلتر میان‌گذر باتروورث مورد تصحیح و پردازش قرار گرفتند. به منظور اطمینان یافتن از صحت فیلتر انتخاب شده در محاسبات و عدم حذف مولفه‌های اصلی سیگنال، پردازش نگاشت‌ها با محدوده‌های مختلف فیلتر میان‌گذر (شامل: ۰/۱-۵۰ Hz، ۰/۲-۵۰ Hz، ۰/۲-۲۰ Hz، ۰/۲-۱۰ Hz، ۰/۵-۱۰ Hz، ۱-۵ Hz) و با درجه‌های مختلف فیلتر تکرار شد و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. بر اساس نتایج تحلیل، محدوده فرکانسی ۰/۲ الی ۲۰ هرتز محدوده مناسب فیلتر میان‌گذر برای رکوردهای مذکور تشخیص داده شد. در شکل ۳، نمونه‌ای از تاریخچه زمانی شتاب-نگاشت سه مؤلفه‌ای ثبت‌شده در نقطه‌ای از فونداسیون قبل از اعمال اصلاحات مذکور مشاهده می‌شود.

با توجه به اینکه برآورد محتوای فرکانسی ارتعاشات ثبت‌شده در نقاط مختلف فونداسیون و محاسبه دامنه طیف حاصله و مقایسه با حد مجاز ارتعاشات، یکی از اهداف اصلی پروژه حاضر تعریف شده‌بود، لذا با استفاده از روش انتگرال‌گیری و بر اساس برنامه نوشته شده در محیط MATLAB، ابتدا تاریخچه زمانی شتاب به سرعت و سپس به تغییر مکان تبدیل و در انتها نیز طیف‌های مربوطه محاسبه شد. در شکل ۴ نمونه‌ای از نتایج محاسبات طیفی صورت‌گرفته ارائه شده است.



شکل (۳): *تاریخچه زمانی شتاب ثبت شده در موقعیتی از فونداسیون کمپرسور پتروشیمی لاله. از بالا به پایین به ترتیب جهت: شرقی- غربی (Y)، شمالی- جنوبی (X) و قائم (Z) [۱۲].*



شکل (۴): *طیف PSD شتاب ثبت شده در موقعیتی از فونداسیون کمپرسور پتروشیمی لاله در حالت استفاده از فیلتر میان گذر ۲۰-۰/۲ هرتز. از بالا به پایین به ترتیب جهت: شرقی- غربی (Y)، شمالی-جنوبی (X) و قائم (Z) [۱۲].*

لازم به ذکر است در حالت ثبت نگاشت‌های ارتعاشی

نامانا، امکان دارد روش پردازش سیگنال فوق پاسخگوی نیاز طرح نبوده و به روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال مانند پردازش سیگنال با روش TFD در حوزه زمان - فرکانس (Time Frequency Distribution) احساس نیاز شود. برای مشاهده جزئیات روش فوق به مرجع [۱۳] مراجعه شود.

۳-۲- بررسی سطح نویز در محل احداث طرح چشمه نور ایران (شمال قزوین)

طرح چشمه نور ایران (Iran Light Source Facility, ILSF)، اولین تسهیلات آزمایشگاهی مقیاس بزرگ برای تحقیقات و مطالعات بین رشته‌ای در کشور، طرحی بزرگ در جهت تحقیقات بین رشته‌ای و بسیار متنوع از نظر کاربرد است که توسط پژوهشگاه دانش‌های بنیادی پیگیری می‌شود. هدف اصلی این طرح تأسیس آزمایشگاه ملی سینکروترون ایران است که کاربری تسهیلات بسیار عظیمی شامل شتابگر سینکروترون الکترون با انرژی ۳ GeV و محیط تقریبی ۳۰۰ متر با کیفیت باریکه و فوتونی بسیار مطلوب را در بر خواهد داشت. در احداث طرح‌های شتابگر لازم است تا سطح نوفه محیطی (ambient noise) تا حد امکان پایین باشد یا درصورت بالا بودن تمهیدات خاصی برای کاهش سطح نوفه بکار گرفته شود. برای رسیدن به این مهم ضرورت دارد تا مطالعات لرزه‌نگاری شامل نوفه‌سنجی منطقه در نظر گرفته شده برای ساخت شتابگر و بعد از ساخت آن انجام گیرد. به این منظور قطعه زمینی از زمین‌های دانشگاه بین‌المللی امام خمینی در شمال شهر قزوین برای اجرای این پروژه در نظر گرفته شده است.

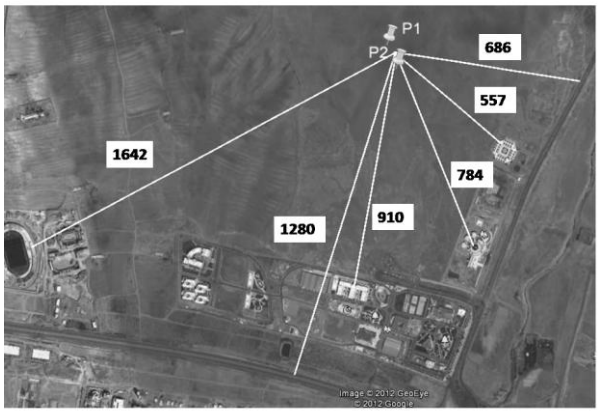
در اسفند ۱۳۹۰، مطالعات لرزه‌نگاری و نوفه‌سنجی اولیه به‌منظور تشخیص مناسب بودن محل مربوطه با درخواست مجری طرح، توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام شد که نتایج آن در این بخش ارائه می‌گردد.

۳-۲-۱- معرفی ساختگاه طرح و داده‌های مورد استفاده

ساختگاه مورد نظر در شمال شهر قزوین در زمینی مجاور با ضلع غربی پارک علم و فناوری استان قزوین و ضلع شمالی دانشگاه آزاد اسلامی قزوین شکل (۵) قرار دارد.

با توجه به موقعیت محل طرح سرچشمه‌های عمده مورد انتظار نوفه محیطی به شرح زیر قابل ذکر هستند:

- منابع ایجاد نوفه در پیرامون خود محل: مهمترین آنها با ذکر فاصله آنها از محل طرح (۵۵۰ تا ۱۳۶۰ متر از محل طرح) در شکل (۱-۴) آورده شده‌اند. این نوفه‌ها که در ادبیات فنی مطالعات نوفه به‌عنوان نوفه‌های شهری شناخته می‌شوند معمولاً فرکانسی بالاتر از ۱ هرتز، دارند.
- نوفه‌های شهری دورتر و نوفه‌های بلند دوره: منظور از نوفه‌های دورتر نوفه‌های شهری با فاصله دورتر از محل طرح از جمله ترددهای داخل شهر قزوین و کارخانه‌ها و کارگاه‌های موجود در مناطق صنعتی آن است که مشابه با مورد قبلی در فرکانس‌های بالاتر از ۱ هرتز اما با دامنه ضعیفتر قابل‌انتظار هستند. نوفه‌های بلند دوره که معمولاً به نوفه‌های دارای فرکانس زیر ۱ هرتز اطلاق می‌گردند دارای منشاءهای طبیعی مانند شرایط آب و هوایی محلی (فرکانس‌های ۰/۵ تا ۱ هرتز) و شرایط آب و هوایی ناحیه‌ای و امواج دریاها و اقیانوس‌ها (کمتر از ۰/۵ هرتز) هستند.



شکل (۵): *موقعیت منابع عمده ایجاد نوفه در نزدیکی محل در نظر گرفته شده برای احداث طرح چشمه نور ایران. اعداد نشان داده شده فاصله نقاط مورد اندازه‌گیری تا مستحدثات به متر می‌باشد [۱۳].*

عملیات میدانی اندازه‌گیری سطح نوفه طبیعی در دو نقطه به فاصله ۱۰۰ متر از هم، از تاریخ سه‌شنبه ۹۰/۱۲/۱۶ لغایت شنبه ۹۰/۱۲/۲۰ توسط دو دستگاه لرزه‌نگاری باند پهن از نوع گورالپ CMG3T انجام گردید. علاوه بر این دو

دستگاه باندپهن در یکی از نقاط به‌طور همزمان یک دستگاه باند متوسط از نوع CMG6TD نیز نصب گردید. گیرنده‌ها در عمق ۵۰ سانتیمتری زمین و استفاده از جعبه‌های مخصوص طراحی شده برای عایق‌بندی حرارتی مدفون گردیدند.

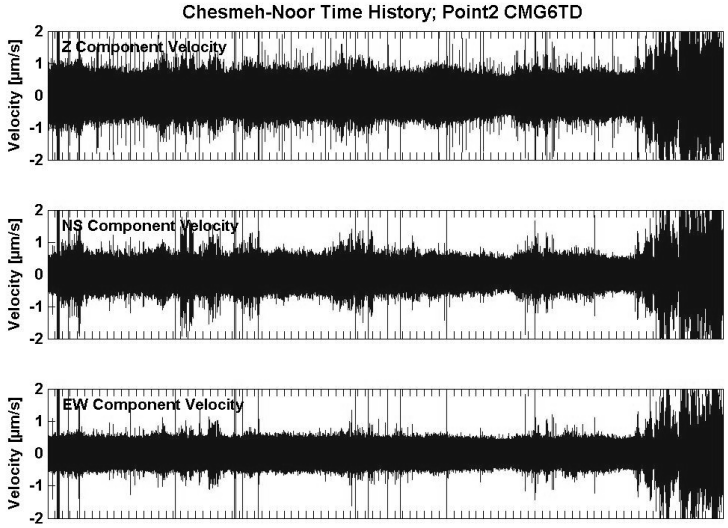
به‌منظور بررسی بهتر تأثیر نوفه‌های حاصل از تردد در جاده‌های اطراف در انتهای اندازه‌گیری از تردد چند ساعته یک کامیون ۱۰ تن با بار کامل در مجاورت محدوده مورد بررسی استفاده شد.

۳-۲-۲- بررسی اولیه تاریخچه زمانی داده‌های برداشت شده و تغییرات طیفی آن

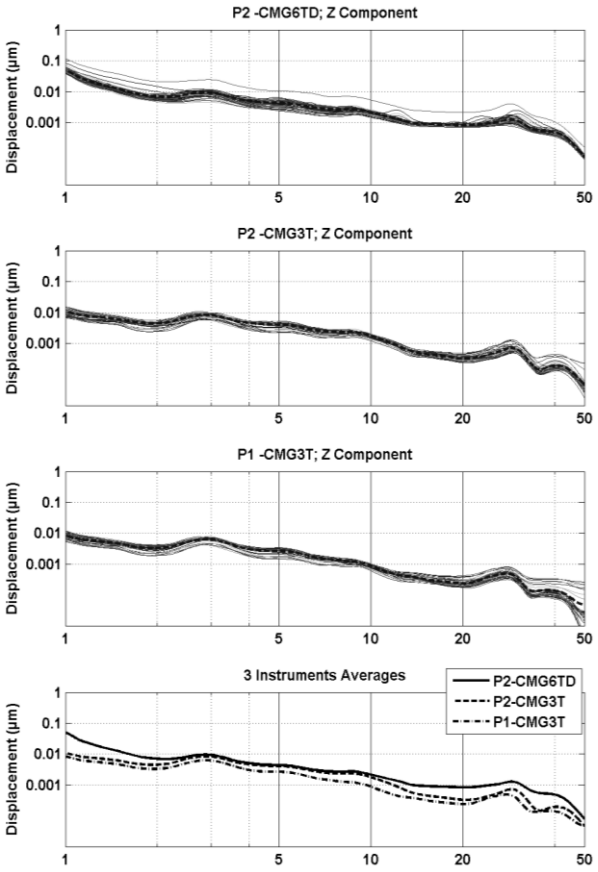
در اولین گام از بررسی وضعیت نوفه‌های محیطی بررسی تاریخچه زمانی نوفه و محاسبه طیف دامنه سرعت و جابجایی و تغییرات آن بر حسب زمان و آزیموت مد نظر قرار گرفت. جدول (۱) مقادیر متوسط دامنه ثبت شده در طول مدت زمان اندازه‌گیری را بر حسب سرعت و جابه‌جایی برای هر سه دستگاه را نشان می‌دهند. تاریخچه زمانی سرعت نوفه برای دستگاه CMG6TD که با توجه به عدم قطعی، بیشترین طول رکوردگیری را داشته در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود سطح کلی نوفه در طول مدت اندازه‌گیری تا روز آخر اندازه‌گیری تقریباً ثابت است، اما در روز آخر با توجه به کارکرد ماشین‌های راهسازی در جاده باراجین و نیز اجاره کامیون برای تردد در نزدیکی محل طرح افزایش قابل‌توجهی دارد. در عین حال حتی با توجه به این مسأله سطح نویز در تاریخچه زمانی سرعت زیر ۲ میکرومتر بر ثانیه باقی می‌ماند. با توجه به محتوی فرکانسی بالای نوفه‌های حاصل از تردد کامیون و ادوات راهسازی تأثیر این نوفه‌ها در جابه‌جایی بسیار ناچیز است و عملاً دیده نمی‌شود. داده‌های برداشت شده به قطعات یک ساعتی اندازه‌گیری شکسته شده و برای هر یک ساعت با انتخاب پنجره‌های ۱ دقیقه‌ای طیف دامنه میانگین محاسبه شده است و در نهایت میانگین کل در طول دوره اندازه‌گیری به‌دست آمده‌است. شکل (۷) به‌عنوان نمونه نتایج این محاسبات را برای مؤلفه قائم هر سه دستگاه نشان می‌دهد.

جدول (۱): *مقادیر متوسط سطح نوفه ثبت‌شده در مؤلفه‌های سه‌گانه برای لرزه‌نگارهای نصب شده [۱۳].*

		Zcomp	Ncomp	Ecomp
Velocity (μm/s)	p1-CMG3T	۰/۱۰	۰/۱۴	۰/۱۲
	p2-CMG3T	۰/۷۱	۰/۸۶	۰/۷۷
	p2-CMG6TD	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۲
Displacement (μm)	p1-CMG3T	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۹
	p2-CMG3T	۰/۷۳	۱/۳۴	۰/۸۳
	p2-CMG6TD	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱



شکل (۶): *تاریخچه زمانی سرعت نوفه ثبت شده با دستگاه لرزه‌نگار [۱۳].*

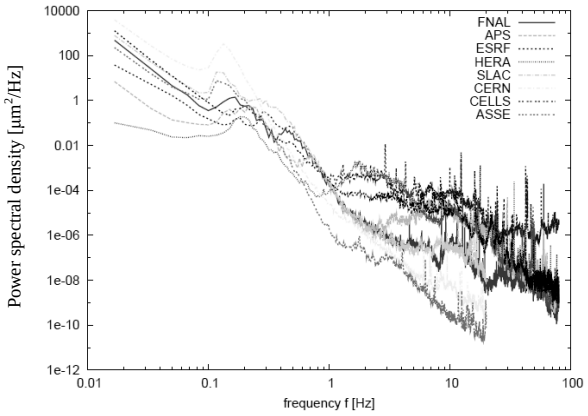


شکل (۷): *مقایسه طیف دامنه مؤلفه قائم برای سه دستگاه نصب شده در محدوده مورد مطالعه. منحنی‌های رنگی نشان دهنده طیف دامنه برای قطعات یک ساعته نوفه هستند و میانگین با منحنی‌های ضخیم‌تر خط چین نشان داده شده است. در شکل پایین مقادیر میانگین مقایسه شده‌اند [۱۳].*

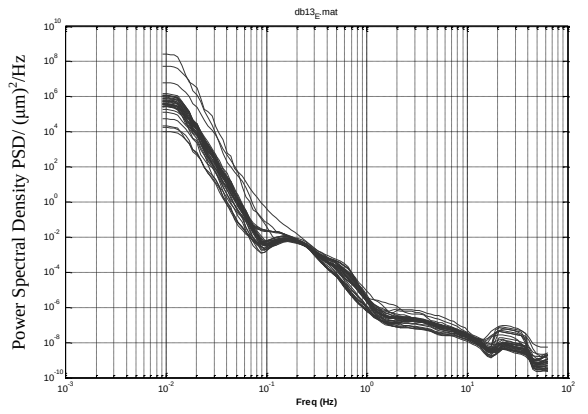
همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص است، مقادیر میانگین طیفی برای سه دستگاه در محدوده فرکانسی ۱ تا ۵۰ هرتز بسیار به هم نزدیک هستند و برای ساعت‌های مختلف نیز تغییر چندانی ندارند. این مسأله حاکی از پایداری میدان موج نوفه در مکان و زمان در منطقه است.

۳-۲-۳- محاسبه چگالی طیف توان و مقایسه آن با محل چند شتابگر در جهان

هدف از محاسبه چگالی طیف توان در این مطالعه مقایسه آن با مطالعات قبلی انجام شده برای شتابگرهای احداث شده یا در حال احداث در دیگر نقاط دنیا می‌باشد. نمونه‌ای از میانگین چگالی طیف توان برای چند شتابگر در شکل (۸) نشان داده شده است. نمونه چگالی طیف توان برای یکی از ایستگاه‌های باندپهن نصب شده در این مطالعه در شکل (۹) برای پارامتر جابه‌جایی نشان داده شده است. از مقایسه این شکل با شکل (۸) می‌توان دریافت مقادیر چگالی طیف توان جابه‌جایی نوفه در محل مورد بررسی برای محدوده فرکانس بالای ۰/۰۵ هرتز در حدود مقادیر در طرح‌های مشابه و حتی کمتر از آن است، اما برای فرکانس‌های کمتر از ۰/۰۵ مقادیر طیفی بیشتری از خود نشان می‌دهد.



شکل (۸): *چگالی طیف توان تغییرمکان ارتعاشات محیطی در پروژه‌های مشابه [۱۳].*



شکل (۹): *نمودارهای چگالی طیف توان انرژی تغییرمکان نوفه اندازه‌گیری شده در نقطه ۱ برای مؤلفه قائم [۱۳].*

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مفاهیم پایه و مبانی حد مجاز ارتعاشات مورد نیاز در احداث طرح‌های مهندسی معرفی شد و نحوه انجام بررسی‌های لازم در این زمینه با ذکر دو مثال متفاوت مورد اشاره قرار گرفت. تجزیه و تحلیل داده‌ها دراین‌گونه مطالعات طیفی از پردازش سیگنال و محاسبات طیفی

کلاسیک تا پردازش‌های پیچیده مانند زمان- فرکانس را شامل می‌گردد. در برخی از مطالعات، ماشین‌آلات حساس به ارتعاش، خود منبع ایجاد ارتعاش بوده‌اند و در برخی دیگر، ارتعاشات رسیده از محیط داخل و خارج از کارگاه در موقعیت‌های مورد نظر اهمیت داشته و اندازه‌گیری شده‌اند. در هردو مورد، به دلیل جلوگیری از وقوع تشدید در سیستم ماشین- فونداسیون- خاک و درنهایت عدم‌آسیب به اجزای مختلف ماشین و بهره‌برداری ایمن از آن، دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات باید اندازه گرفته و پردازش گردد و درصورت بالاتر از حد مجاز بودن تغییرمکان‌ها، مشخصات دینامیکی سیستم تغییر یابد تا تغییرمکان‌های الاستیک به زیر حد مجاز کاهش یابد.

۵- مراجع

1. Das, B.M. and Ramana, G.V. (2011). Principles of soil dynamic, Second Edition.

۲. میرجلیلی، مصطفی (۱۳۸۵). مطالعاتی پیرامون حد مجاز ارتعاشات در سازه‌ها و آستانه ادراک ورنجش انسان در ارتعاشات در استانداردهای مختلف، سمینار کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،

3. British Standard BS (1992). 6472:1992 Guide to evaluation of human exposure to vibration in building (1Hz to 80 Hz), British Standard Institute.

4. DEUTSCHE NORM (1986). (DIN 4150). Structural vibration in buildings - effects on structures.

5. International Organization for Standardization (1974c). Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration, ISO, 2631-1974.

6. British Standard BS 7385 (1990). Evaluation and measurement for vibration in buildings, Part 1, Guide for measurement of vibration and evaluation of their effects on building, British Standard Institute.

7. A.F.T.E.S. GROUPE DE TRAVAIL (1974). Racommandations concernant l'étude des effets sismiques de l'explosif, Tunnels et Ouvrages Souterrains, (2), 89-93.

8. International Organization for Standardization (1975). Evaluation and measurement of vibration in building, Drafts Proposal DP, 4866-1975.

9. Duvall, W.I. and Fogelgon (1962). Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibration, U.S. Bureau of Mines, RI5868. 5868.

۱۰. داودی، محمد و جعفری، محمدکاظم (۱۳۷۹). اندازه‌گیری دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات کف سالن محل نصب دستگاه برش لیزری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تهران.

۱۱. داودی، محمد و جعفری، محمدکاظم (۱۳۸۳). اندازه‌گیری و مطالعه ارتعاشات در محل استقرار دستگاه‌های اندازه‌گیر CMG و تراش دقیق در ساختمان جدیدالاحداث پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تهران، ایران.

۱۲. داودی، محمد و جعفری، محمدکاظم (۱۳۸۶). آزمایش‌های ارتعاشی در محل فونداسیون دستگاه کمپرسور پتروشیمی لاله و پردازش نتایج حاصله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

۱۳. حق‌شناس، ابراهیم و انصاری، انوشیروان (۱۳۹۱). مطالعات لرزه‌نگاری طرح چشمه نور ایران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

۱۴. داودی، محمد و جعفری، محمدکاظم (۱۳۸۹). مطالعه رفتار لرزه‌ای سازه‌ای ژئوتکنیکی با استفاده از روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال در حوزه زمان- فرکانس. گزارش طرح پژوهشی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.