

الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها در حین وقوع زلزله با استفاده از تولید کننده موج

نگارنده: سینا احمدی

استاد راهنما

دکتر امیر بذرافشان مقدم

دی ۱۳۹۸



انرژی
 تاریخ: ۱۵/۵/۹۸

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سینا احمری با شماره دانشجویی ۹۵۰۱۰۷۴ رشته مهندسی عمران گرایش زلزلونکتیک تحت عنوان کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها در حین وقوع زلزله با استفاده از تولید کننده موج که در تاریخ ۹۸/۱۰/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹
 ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹-۱۶ د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹-۱۴
 ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
 نوع تحقیق: نظری عملی

اعضای	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر امیر بذرافشان مقدم	۱- استاداراهنمای اول
	-----	-----	۲- استاداراهنمای دوم
	-----	-----	۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر مهدی کئی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	دکتر رضا نادری	۵- استاد مسخن اول
	استادیار	دکتر محسن کرامی	۶- استاد مسخن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس هیأت داوران: دکتر رضا نادری



توضیح: در صورتی که کسی سرودن شود حداکثر یکبار دیگر (در سطح کارشناسی) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم اثر

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان

به پاس حافظه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که مرکز فروکش نمی کند این مجموعه را به پدر و مادر و برادر و خواهر عزیزم تقدیم می کنم.

شکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم تا از تلاش بی‌وقفه و بی‌دریغ پدر و مادر عزیزم که با تلاش بی‌شبانه روزی خود مرا تا این مرحله از

زندگی یاری کردند و همچنین مقدمات رفاه و آسایش مراد تمام مدت زندگانیم فراهم کردند، شکر و قدردانی کنم.

همچنین از خواهر عزیزم، استاد سرکار خانم دکتر احمدی و نیز تمام دوستان و آشنایانی که در طول انجام این پژوهش بنده را

یاری نمودن کمال شکر را دارم.

تهیه‌نامه

اینجانب سینا احمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها حین وقوع زلزله با استفاده از تولید کننده موج تحت راهنمایی دکتر امیر بذرافشان مقدم متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

زلزله یکی از پدیده‌های طبیعی مخرب است که سالیانه تعداد زیادی از انسان‌ها را کشته، مصدوم و بی‌خانمان می‌کند. اکثر روش‌های موجود مقاوم سازی خاک و یا سازه در برابر زلزله وابسته به نوع سازه و یا خاک می‌باشند و تا کنون روشی مستقل از نوع سازه و خاک با قابلیت انعطاف بالا در بیشتر شرایط محیطی و نیز روشی با امکان استفاده برای سازه‌های موجود وجود نداشته است. در این تحقیق ایده تولید کننده موج که از طریق پیش‌بینی موج زلزله، موجی خلاف جهت موج زلزله تولید می‌کند، ارائه شده است. در این رویکرد با استفاده از فیلتر تطبیقی کالمن که توانایی تخمین تغییرات موج زلزله را با درصدی خطا داشته، به منظور پیش‌بینی علامت و مقدار موج زلزله، جهت تولید موجی که بتواند دامنه موج زلزله را کاهش دهد، استفاده شده است. در این پژوهش از نرم‌افزار متلب به منظور کدنویسی فیلتر کالمن و محاسبه موج تولیدی مؤثر در کاهش موج زلزله و از نرم‌افزار پلکسیس جهت مدلسازی و بررسی شدت کاهش اثرات زلزله به سازه استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی موجب کاهش بیش از ۵۵ درصد دامنه شتاب، بیش از ۷۰ درصد انرژی زلزله اعمالی به سازه و بیش از ۵۰ درصد جابه‌جایی‌های ناشی از آن شده است. نتایج مثبت روش پیشنهادی می‌تواند جهت استفاده از یک تولید کننده موج به منظور کاهش ارتعاشات زلزله بکار رود.

کلمات کلیدی: تولیدکننده موج، موج زلزله، فیلتر کالمن، کاهش ارتعاش

فهرست مطالب

ک	فهرست جداول
ل	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: کلیات تحقیق
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ تعریف مسئله
۴	۳-۱ اهمیت موضوع
۴	۴-۱ ضرورت انجام تحقیق
۵	۵-۱ اهداف تحقیق
۵	۶-۱ روش تحقیق
۶	۷-۱ ساختار پایان نامه
۷	فصل ۲: روش‌های کاهش اثر زلزله به سازه‌ها
۸	۱-۲ مقدمه
۸	۲-۲ روش‌های نوین کاهش ارتعاشات ناشی از زلزله
۸	۱-۲-۲ استفاده از خرده لاستیک
۱۲	۲-۲-۲ استفاده از خرده پلاستیک
۱۲	۳-۲-۲ استفاده از ترانسه‌های فعال و غیر فعال
۱۵	۴-۲-۲ تزریق فوم
۱۵	۳-۲ اقدامات مشابه در زمینه استفاده از تولید کننده موج
۱۶	۱-۳-۲ اثر تولید کننده موج در کاهش موج معین حاصل از ضربه
۱۸	۲-۳-۲ سیستم حذف نویز از تلفن همراه
۱۹	۳-۳-۲ استفاده از دستگاه تولید موج به منظور کاهش انرژی سونامی

۲۲	..... ۴-۲ تولید کننده موج
۲۳	..... ۱-۴-۲ انواع دستگاه تولید کننده موج
۲۴	..... Vibroseis ۱-۱-۴-۲
۲۶	..... Stress-wave generator ۲-۱-۴-۲
۲۷	..... Inclined-plate wave generator ۳-۱-۴-۲
۲۹	..... ۵-۲ جمع بندی

فصل ۳: فیلتر کالمن

۳۱	
۳۲	..... ۱-۳ مقدمه
۳۳	..... ۲-۳ فیلترهای تطبیقی
۳۴	..... ۳-۳ نام‌گذاری و تاریخچه توسعه فیلتر کالمن
۳۵	..... ۱-۳-۳ شمای کلی فیلتر کالمن
۳۶	..... ۲-۳-۳ فیلتر کالمن خطی
۴۰	..... ۳-۳-۳ مزایای فیلتر کالمن
۴۰	..... ۴-۳-۳ انواع فیلتر کالمن
۴۲	..... ۵-۳-۳ پیشینه استفاده از فیلتر کالمن
۴۲	..... ۱-۵-۳-۳ حذف نویز از سیگنال صوتی
۴۷	..... ۲-۵-۳-۳ حذف نویز از سیگنال قلب
۴۸	..... ۳-۵-۳-۳ ردیابی هدف زیر آب
۵۲	..... ۴-۵-۳-۳ تخمین حرکت در تصاویر متحرک
۵۳	..... ۴-۳ فیلتر کالمن استفاده شده در این پژوهش

فصل ۴: مدلسازی و نتیجه‌گیری

۵۵	
۵۶	..... ۱-۴ مقدمه
۵۶	..... ۲-۴ روش کار
۵۷	..... ۱-۲-۴ الگوریتم فیلتر کالمن با هدف خنثی سازی زلزله
۵۹	..... ۲-۲-۴ مثال عددی

۶۴	..... مسئله مورد بررسی	۳-۴
۶۵	..... Sierra madre زلزله موج بر تولید کننده	۴-۴
۶۷	..... مدلسازی در نرم افزار پلکسیس	۱-۴-۴
۶۷	..... مشخصات خاک و سازه	۲-۴-۴
۶۹	..... Sierra madre زلزله برای پلکسیس	۳-۴-۴
۷۴	..... Northridg زلزله موج بر تولید کننده	۵-۴
۷۶	..... Northridge زلزله در نرم افزار پلکسیس	۶-۴
۸۱	..... Cape mendocino زلزله موج بر تولید کننده	۷-۴
۸۳	..... Cape mendocino زلزله در نرم افزار پلکسیس	۸-۴
۸۹	فصل ۵ : جمع بندی و پیشنهادات	
۹۰	..... مقدمه	۱-۵
۹۰	..... جمع بندی و نتیجه گیری	۲-۵
۹۱	..... پیشنهادات	۳-۵
۹۳	مراجع	
۹۷	پیوست	

فهرست جداول

- جدول ۱-۲. ارتباط بین میزان کاهش دامنه سونامی با پارامتر b [۲۴] ۲۲
- جدول ۲-۲. انواع منابع لرزه‌ای [۲۵] ۲۴
- جدول ۱-۴. مقادیر شتاب زلزله ۶۰
- جدول ۲-۴. مقادیر شتاب پیش بینی شده ۶۲
- جدول ۳-۴. مشخصات خاک مدل شده ۶۷
- جدول ۴-۴. مشخصات تیر و ستون سازه مدل شده ۶۸

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. نمایی از روش مورد تحقیق..... ۳
- شکل ۱-۲. کنترل فعال سازه به وسیله موانع [۱۸]. ۱۳
- شکل ۲-۲. کنترل غیر فعال سازه [۱۸]. ۱۴
- شکل ۳-۲. نحوه قرار گیری دستگاه تولید کننده موج و منبع ایجاد ارتعاش [۲۱]. ۱۶
- شکل ۴-۲. مقادیر نسبت جابه‌جایی خالص در دو حالت وجود و عدم وجود دستگاه تولید کننده موج [۲۱]. ۱۸
- شکل ۵-۲. سیستم نویز گیر تلفن همراه [۲۲]. ۱۹
- شکل ۶-۲. شماتیک زلزله هند سال ۲۰۰۴ [۲۴]. ۲۰
- شکل ۷-۲. سیستم کاهش سونامی [۲۴]. ۲۱
- شکل ۸-۲. کامیون مخصوص ویبراتور لرزه‌های [۲۶]. ۲۴
- شکل ۹-۲. شماتیک دستگاه ویبراتور لرزه‌های [۲۶]. ۲۶
- شکل ۱۰-۲. نمودار نیرو-فرکانس وارده به زمین توسط دستگاه [۲۶]. ۲۶
- شکل ۱۱-۲. دستگاه مولد موج-تنش [۲۷]. ۲۷
- شکل ۱۲-۲. شماتیک ژنراتور صفحه‌ای [۲۸]. ۲۸
- شکل ۱۳-۲. نتایج نظری تولید موج توسط صفحه نوسانی [۲۸]. ۲۹
- شکل ۱-۳. ساختمان فیلتر تطبیقی [۲۹]. ۳۳
- شکل ۲-۳. سیکل تکرار الگوریتم فیلتر کالمن [۳۴]. ۳۶
- شکل ۳-۳. الگوریتم تکرار فیلتر کالمن [۳۴]. ۳۹
- شکل ۴-۳. نمودار بلوکی فیلتر کالمن جهت حذف نویز [۳۷]. ۴۴
- شکل ۵-۳. نمودار سیگنال نویزی [۳۷]. ۴۶

- شکل ۳-۶. نمودار سیگنال مطلوب [۳۷]. ۴۶
- شکل ۳-۷. نمودار حاصل از فیلتر کالمن [۳۷]. ۴۶
- شکل ۳-۸. سیگنال قلب همراه با نویز [۳۸]. ۴۸
- شکل ۳-۹. خروجی فیلتر کالمن [۳۸]. ۴۸
- شکل ۳-۱۰. نمودار خطای تخمین مکان [۳۹]. ۵۱
- شکل ۳-۱۱. نمودار خطای سرعت [۳۹]. ۵۱
- شکل ۳-۱۲. ساختار کلی تخمین حرکت با فیلتر کالمن [۴۰]. ۵۳
- شکل ۳-۱۳. الگوریتم کالمن استفاده شده در این پژوهش. ۵۴
- شکل ۴-۱. نمودار شتاب- زمان زلزله Sierra madre. ۶۵
- شکل ۴-۲. نمودار شتاب - زمان محاسبه شده برای زلزله Sierra madre توسط فیلتر کالمن. ۶۶
- شکل ۴-۳. نمودار شتاب برآیند-زمان زلزله Sierra madre. ۶۶
- شکل ۴-۴. خاک و سازه مدلسازی شده در نرم افزار پلکسیس. ۶۸
- شکل ۴-۵. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Sierra madre در سطح زمین در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۶۹
- شکل ۴-۶. جابه‌جایی افقی سقف طبقه اول ناشی از موج زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۷۰
- شکل ۴-۷. جابه‌جایی افقی سقف طبقه دوم ناشی از موج زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۷۰
- شکل ۴-۸. جابه‌جایی افقی سقف طبقه سوم ناشی از موج زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۷۱
- شکل ۴-۹. جابه‌جایی افقی سقف طبقه چهارم ناشی از موج زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۷۱

- شکل ۴-۱۰. نمودار شتاب-زمان وارده به سطح زمین مربوط به زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۷۲
- شکل ۴-۱۱. نمودار نیرو-زمان ناشی از زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۷۳
- شکل ۴-۱۲. نمودار انرژی-زمان مربوط به زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۷۳
- شکل ۴-۱۳. نمودار زمان-شتاب زلزله افقی Northridge. ۷۴
- شکل ۴-۱۴. نمودار زمان-شتاب محاسبه شده از طریق فیلتر کالمن برای زلزله Northridge. ۷۵
- شکل ۴-۱۵. نمودار زمان-شتاب برآیند برای زلزله Northridge. ۷۵
- شکل ۴-۱۶. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Northridge در سطح زمین در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۷۶
- شکل ۴-۱۷. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Northridge در طبقه اول در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۷۷
- شکل ۴-۱۸. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Northridge در طبقه دوم در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۷۷
- شکل ۴-۱۹. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Northridge در طبقه سوم در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۷۸
- شکل ۴-۲۰. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Northridge در طبقه چهارم در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۷۸
- شکل ۴-۲۱. نمودار شتاب-زمان وارده به سطح زمین ناشی از موج زلزله افقی Northridge در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۷۹

- شکل ۴-۲۲. نمودار نیرو-زمان ناشی از موج زلزله افقی Northridge در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۸۰
- شکل ۴-۲۳. نمودار انرژی-زمان ناشی از موج زلزله افقی Northridge در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۸۱
- شکل ۴-۲۴. نمودار شتاب-زمان زلزله افقی Cape. ۸۲
- شکل ۴-۲۵. معکوس نمودار شتاب-زمان پیش بینی شده توسط فیلتر کالمن برای زلزله Cape ... ۸۲
- شکل ۴-۲۶. نمودار برآیند شتاب-زمان برای زلزله Cape. ۸۳
- شکل ۴-۲۷. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Cape در سطح زمین در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۸۴
- شکل ۴-۲۸. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Cape در طبقه اول در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۸۴
- شکل ۴-۲۹. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Cape در طبقه دوم در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۸۵
- شکل ۴-۳۰. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Cape در طبقه سوم در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۸۵
- شکل ۴-۳۱. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Cape در طبقه چهارم در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۸۶
- شکل ۴-۳۲. نمودار شتاب-زمان وارده به سطح زمین ناشی از موج زلزله افقی Cape در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۸۶
- شکل ۴-۳۳. نمودار نیرو-زمان ناشی از موج زلزله افقی Cape در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج. ۸۷

شکل ۴-۳۴. نمودار انرژی-زمان ناشی از موج زلزله افقی Cape در دو حالت وجود و عدم وجود تولید

کننده موج..... ۸۸

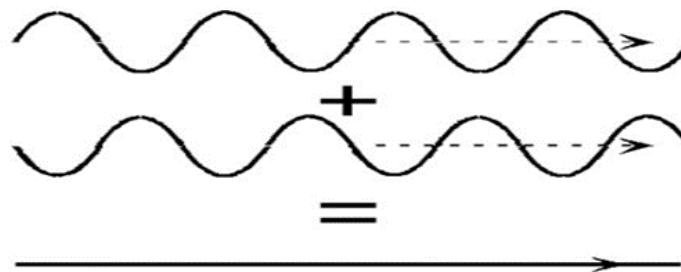
فصل ۱: کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه

زلزله، تکان خوردن زمین در اثر حرکت سریع پوسته سخت خارجی زمین است. زلزله هنگامی رخ می‌دهد که نیروی کششی ذخیره شده در درون زمین و در پوسته سخت و صخره‌ای آن، ناگهان آزاد می‌شود و این انرژی رها شده از طریق امواج زلزله به سطح زمین منتقل می‌شود. میزان تخریب یک زلزله به بزرگا و طول مدت آن و یا میزان تکانه‌های ایجاد شده بستگی دارد. البته طراحی یک ساختمان و مصالح بکار رفته در آن نیز در میزان تخریب ایجادشده مؤثر است. زمین لرزه ممکن است خیلی کوچک و نامحسوس باشد و یا در طول هزاران کیلومتر دورتر باعث ایجاد تکانه شود. در عین حال زلزله می‌تواند باعث تغییر شکل زمین شود و ساختمان‌ها و دیگر ساختارهای روی آن را تخریب کند و نیز ایجاد سونامی (امواج بسیار بزرگ دریا) بنماید. این خرابی‌ها می‌تواند تلفات بسیاری را دربر داشته باشد. در تمام دنیا روزانه چندصد زمین لرزه رخ می‌دهد و شبکه جهانی زلزله نگاری در هر روز در حدود یک میلیون زلزله را ثبت می‌نماید. زلزله‌های بزرگ جهان، مانند زلزله آلاسکا ۱۹۶۴ که میلیون‌ها دلار خرابی به بار آورد، هر چند سال یک بار رخ می‌دهد. زلزله‌هایی با شدت متوسط، مانند زلزله لوماپریتهای کالیفرنیا ۱۹۸۹، و زلزله کوبه ژاپن ۱۹۹۵ تقریباً بیست بار در هر سال رخ می‌دهد. این گونه زلزله‌ها نیز می‌تواند میلیون‌ها دلار خسارت به بار آورد و باعث مرگ یا جراحت بسیاری از مردم شود. در ۵۰۰ سال اخیر، میلیون‌ها نفر در سراسر دنیا در اثر زلزله کشته شده‌اند، از آن جمله می‌توان از زلزله تانگ شان چین در ۱۹۷۶ نام برد، که بیش از ۲۴۰۰۰۰ نفر کشته برجای گذاشت. در سراسر جهان، زلزله خرابی‌های ساختاری و مالی بسیاری ایجاد نموده است. اقدامات احتیاطی مانند مقاوم سازی و انعطاف‌پذیرکردن ساختمان‌ها می‌تواند خسارات مالی و جانی ناشی از زلزله را کاهش دهد [۱].

۲-۱ تعریف مسئله

هرگاه دو موج با دامنه یکسان و فاز مخالف یکدیگر با یکدیگر برخورد نمایند، خنثی می‌شوند. با توجه به این تعریف، رویکرد مورد استفاده در این پژوهش استفاده از تولید کننده موج جهت ایجاد موجی با فاز مخالف موج زلزله شکل ۱-۱ به منظور کاهش دامنه سرعت، شتاب، جابه‌جایی و در کل انرژی زلزله می‌باشد. در این روش با پیش‌بینی موج زلزله با هدف کاهش آن، معکوس موج پیش‌بینی شده تولید شده است. مصادیقی از این روش را می‌توان در نویزگیر تلفن همراه و نیز حذف نویز از سیگنال قلب، ردیابی هدف و ... مشاهده نمود. از جمله پژوهش‌های مرتبط با این ایده، می‌توان به استفاده از دستگاه تولید موج جهت کاهش ارتعاشات ناشی از دستگاه تولید کننده ضربه که شکل معین و قابل پیش‌بینی در طول زمان را دارد و در سال ۲۰۱۷ در دانشگاه راتسواف^۱ مورد بررسی قرار گرفته است، اشاره کرد [۲]. در این پژوهش با استفاده از فیلتر تطبیقی کالمن مقادیر شتاب زلزله تخمین زده می‌شوند و موجی مخالف موج زلزله تولید می‌گردد. در این روش برخلاف اکثر روش‌ها به جای مستحکم سازی خاک و سازه برای داشتن توانایی لازم برای مقابله با زلزله، نیروی زلزله و ارتعاشات آن، قبل از رسیدن به سازه کاهش پیدا می‌کنند. از مزایای این روش می‌توان به استفاده مجدد دستگاه در مناطق دیگر، قابلیت جابه‌جایی، اجرای آسان و سریع نام برد.



شکل ۱-۱. نمایی از روش مورد تحقیق.

^۱ Wroclaw

۱-۳ اهمیت موضوع

ایران از نواحی پرخطر لرزه‌ای دنیا است. بر این اساس، یافتن روش‌های کاهش مخاطرات ناشی از زلزله، از وظایف محققان و جامعه مهندسی کشور است. از مؤثرترین اقدامات در این زمینه، کاهش نیروهای ورودی ناشی از زلزله به سازه‌ها است. به عبارت دیگر با میرا کردن امواج زلزله قبل از ورود به سازه، می‌توان به طرحی سبک‌تر و اقتصادی‌تر برای مقابله با اثرات ناشی از زلزله در ساختمان‌ها دست یافت. جهت کاهش خسارات ناشی از زلزله تاکنون روش‌های متفاوتی مانند: افزایش اتلاف انرژی در سازه، تغییر فرکانس طبیعی سازه نسبت به فرکانسی که زلزله در آن بیشترین انرژی را دارد و جداسازی لرزه ای و انواع روش‌های بهسازی خاک همچون استفاده از ژئوفوم‌ها، انواع روش‌های تراکمی، ترانسه‌های فعال و غیرفعال، خرده لاستیک و ... موجود است. روش‌هایی که تاکنون برای کاهش اثر زلزله و کاهش خسارات ناشی از آن به وجود آمده دارای نواقصی هستند. بطور مثال بعضی از روش‌ها فقط برای یک نوع خاک خاص جواب مناسبی می‌دهند و یا برخی از روش‌ها دارای محدودیت از نظر اجرا می‌باشند و یا امکان استفاده از این روش‌ها برای سازه‌های بنا شده وجود ندارد. از این رو پیدایش روشی بر پایه کاهش موج زلزله قبل از رسیدن به سازه و با امکان استفاده برای سازه‌های بنا شده و اجرای آسان می‌تواند در دنیای مدرن امروز بسیار کارآمد باشد.

۱-۴ ضرورت انجام تحقیق

روش‌های کاهش ارتعاشات ناشی از زلزله که تاکنون به وجود آمده‌اند مانند: استفاده از خرده پلاستیک، خرده لاستیک، تزریق فوم، ترانسه‌های فعال و ... همگی دارای محدودیت‌هایی می‌باشند و تأثیر آنها بر روی خاک‌های مختلف متفاوت است و برای اینکه بتوانیم بهینه‌ترین روش را انتخاب نماییم نیاز به بررسی‌های اولیه می‌باشد، که این بررسی‌ها نیازمند زمان و هزینه می‌باشند. همچنین اجرای اکثر روش‌های موجود، قبل از اجرای سازه اصلی می‌باشد، از اینرو نمی‌توان از آنها جهت حفاظت از سازه‌های

موجود در برابر زلزله استفاده نمود. با توجه به مطالب گفته شده، کمبود روشی مستقل از نوع سازه و خاک و با قابلیت اجرا برای سازه‌های موجود حس می‌شد. با توجه به متغیر بودن تغییرات موج زلزله برای هر زلزله و همچنین عدم وجود اطلاعات کافی از موج وارده به سازه در هنگام زلزله، از فیلتر تطبیقی کالمن که بدون نیاز به اطلاعات و داده‌های قبل از شروع زلزله، و تنها از طریق فرآیندهای پیش‌بینی و اصلاح، قابلیت تخمین موج زلزله را دارا می‌باشد، استفاده شده است. فیلتر کالمن از طریق استفاده از داده‌های زلزله در زمان حال به پیش‌بینی زلزله در زمان آینده می‌پردازد.

۱-۵ اهداف تحقیق

هدف از این پژوهش امکان سنجی روشی برای کاهش موج زلزله قبل از رسیدن به سازه به منظور کاهش خسارات ناشی از زلزله می‌باشد. همچنین معرفی روشی بدون وابستگی به سازه و خاک و با کمترین زمان ممکن برای اجرا و با قابلیت جابه‌جایی و استفاده مجدد در مکان‌های مختلف و همچنین قابلیت استفاده در سازه‌های بنا شده، می‌باشد. از دیگر اهداف این تحقیق می‌توان به:

۱- بدست آوردن روشی به منظور تولید موج در هنگام زلزله که قادر به کاهش شدت موج زلزله باشد.

۲- بررسی تأثیر موج تولید شده، بر روی موج زلزله.

۳- بررسی تأثیر موج تولید شده در تغییر شکل‌ها و جابه‌جایی‌های ناشی از زلزله نسبت به حالتی که

زلزله به تنهایی اعمال می‌گردد.

۱-۶ روش تحقیق

در این پژوهش با استفاده از فیلتر وقتی کالمن خطی که امروزه کاربردهای بسیاری در علم و فناوری مانند استفاده به منظور حذف نویز از سیگنال‌های مختلف به ویژه در پزشکی جهت حذف نویز از سیگنال قلب و همچنین مسیریابی و پایش وسایل نقلیه، ردیابی هدف و ... دارا می‌باشد، استفاده شده است. این

فیلتر با پیش‌بینی مقادیر شتاب زلزله این امکان را برای ما فراهم می‌نماید که بتوان موجی مخالف موج زلزله تولید نمود.

۱-۷ ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه پیش‌رو در پنج فصل تنظیم شده است که خلاصه مطالب ذکر شده در هر فصل به شرح زیر می‌باشد:

فصل اول تحت عنوان مقدمه و کلیات می‌باشد که در آن شرح مختصری از موضوع تحقیق و اهمیت آن و نیز اهداف آن آورده شده است. در انتهای این فصل روش تحقیق شرح داده شده است. فصل دوم به بررسی روش‌های نوین کاهش اثرات زلزله و کاهش ارتعاشات ناشی از آن مانند: استفاده از خرده لاستیک، فوم، ... و بررسی روش‌های مشابه در زمینه استفاده از تولیدکننده موج و نیز توضیحاتی از دستگاه تولید کننده موج، پرداخته شده است.

فصل سوم در زمینه فیلترهای افقی و فیلتر کالمن که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است و نحوه عملکرد فیلتر کالمن و معادلات آن و نیز انواع فیلتر کالمن و همچنین تاریخچه استفاده از آن، توضیحاتی ارائه شده است.

در فصل چهارم به بیان روش انجام این پژوهش و توضیحات گام به گام مراحل انجام شده و همچنین توضیحات کاملی از فیلتر کالمن استفاده شده در این پژوهش و نیز معادلات آن و همچنین به بیان خصوصیات مصالح مصرفی، شرح کامل مدلسازی روش و نتایج بدست آمده از مدلسازی انجام شده در نرم‌افزار پلکسیس پرداخته شده است.

فصل پنجم به بیان نتیجه‌گیری‌های کلی از این پژوهش، جمع‌بندی نتایج بدست آمده و همچنین پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده پرداخته شده است.

فصل ۲: روش های کاهش اثر زلزله به سازه ها

۲-۱ مقدمه

جمعیت کثیری از جهان در مناطق زلزله خیز دنیا از جمله ایران زندگی می‌کنند که در آن نواحی، خطر وقوع زلزله با شدت و فراوانی‌های مختلف وجود دارد. هر ساله وقوع زلزله‌ها موجب تلفات جانی و خسارات مالی فراوان می‌شود. در سالهای اخیر استفاده از مفاهیم انرژی در طراحی سازه‌های مقاوم لرزه‌ای، رایج شده است و دانشمندان مقدار انرژی ورودی را به عنوان یک پارامتر قابل اعتماد برای تعریف پتانسیل خسارت زمین لرزه بیان کرده‌اند. برای آنکه تمام انرژی موج‌های حاصل از زلزله به سازه انتقال نیابد از روش‌های متعددی می‌توان استفاده کرد. به علت اندرکنش موجود بین سازه و خاک، رفتار سازه وابسته به خصوصیات زمینی است که در آن احداث شده است. با توجه به این موضوع، می‌توان با ایجاد تغییراتی در محدوده زمین اطراف و زیر سازه، تغییر شکل‌های سازه را کم کرده و رفتار کلی آن را بهبود بخشید. در این فصل خلاصه‌ای از روش‌های کاهش ارتعاشات وارده به سازه ناشی از زلزله مرتبط با خاک و نیز خلاصه‌ای از پژوهش‌های مشابه با روش مورد استفاده در این پایان نامه بیان شده است.

۲-۲ روش‌های نوین کاهش ارتعاشات ناشی از زلزله

با توجه به تعدد فراوان روش‌های کاهش اثرات ناشی از زلزله، در این بخش تعدادی محدودی از این روش‌ها به منظور امکان مقایسه روش انجام شده در این پژوهش با دیگر روش‌ها، بیان شده است.

۲-۲-۱ استفاده از خرده لاستیک

بازیافت و استفاده مجدد از لاستیک‌های فرسوده یکی از مشکلات زیست محیطی در دوران اخیر است. به عنوان مثال هر سال حدود ۵۰ میلیون تیر استفاده شده در ایالات متحده دور انداخته می‌شود [۳]. بر اساس آمارهای ارائه شده، که تنها بخش کوچکی از کل لاستیک‌های فرسوده است، و با توجه به این که رها کردن آنها در طبیعت باعث بروز فاجعه زیست محیطی می‌گردد، از این رو استفاده مجدد از این

مصالح نظر محققان زیادی را به خود جلب کرده است. ارزیابی زیست محیطی مخلوط‌های سمی موجود در تیرهای مدفون که ممکن است باعث بروز اثرات منفی بر روی کیفیت آب‌های زیرزمینی شود، از مواردی است که بررسی شده است. بر طبق این تحقیقات بر روی کیفیت آب زیرزمینی در طی دوره دو ساله تأثیر مضر چشم‌گیری مشاهده نشده است [۴]. بررسی مخلوط خاک رس چسبنده و خرده لاستیک نشان داده، بهینه‌ترین درصد لاستیک برای رسیدن به حداکثر حد روانی و نشانه خمیری ۳۰ درصد است، همچنین با افزایش درصد لاستیک، نفوذپذیری مخلوط افزایش می‌یابد. علاوه بر این در صورت استفاده از خرده لاستیک ریز، با افزایش درصد لاستیک، درصد رطوبت بهینه افزایش یافته ولی در خرده لاستیک درشت این تغییر ناچیز است. این بررسی‌ها نشان داد افزودن ۴۰ درصد خرده لاستیک باعث دست یافتن به بیش‌ترین چسبندگی و کمترین زاویه اصطکاک داخلی در مخلوط می‌شود. همچنین در صورت افزودن ۲۰ درصد خرده لاستیک به خاک رس بیشترین مقاومت برشی در آن حاصل می‌شود [۵].

آزمایش‌های انجام گرفته برای تعیین رفتار دینامیکی مخلوط ماسه - خرده لاستیک نشان داد با افزایش درصد لاستیک، مدول برشی مخلوط به دلیل خاصیت ارتجاعی بالای لاستیک کاهش چشم‌گیری می‌یابد. همچنین افزایش درصد لاستیک تا حدود ۵۰ درصد تأثیر اندکی بر روی نسبت میرایی مخلوط دارد ولی با رسیدن به ۷۵ درصد نسبت میرایی افزایش چشم‌گیری داشته و به حدود ۵ درصد در کرنش‌های اندک و حدود ۲۰ درصد در کرنش‌های زیاد می‌رسد. این بررسی‌ها نشان داد افزایش تنش نرمال باعث افزایش چشمگیر در مدول برشی می‌شود ولی تأثیری بر روی میرایی مخلوط ندارد [۶].

ساخت خاکریز راه در آمریکا در مقیاس واقعی با استفاده از مخلوط ماسه - خرده لاستیک و ثبت داده‌های دقیق به مدت یک سال نشان داد حداکثر نشست خاکریز که پس از ۲۰۰ روز رخ داد برابر با ۱۲ میلی متر بوده و حداکثر حرکت جانبی خاکریز تنها ۲ میلی‌متر ثبت شد و پس از آن تغییر شکل‌ها ثابت باقی ماند [۶]. مدل سازی عددی عمل کرد خاک و لاستیک فرسوده به عنوان ایزولاسیون لرزه‌ای در زیر پی نشان داد استفاده از این مصالح در خاک ماسه‌ای متراکم باعث کاهش چشم‌گیر در شتاب‌های رسیده به ساختمان می‌شود. همچنین پاسخ دینامیکی مخلوط در اثر تغییرات ابعاد و ارتفاع ساختمان

بررسی شد. مقاسیه دامنه فوریه برای خاک مسلح و غیر مسلح تحت شرایط مذکور نشان دهنده اندکی کاهش دامنه فوریه در خاک مسلح و نیز شیفت فرکانسی در برخی حالتها است [۷]. بررسی‌های انجام گرفته بر پایه آزمون‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در صورت افزودن خرده لاستیک به ماسه متوسط، میزان تغییر شکل گسیختگی متناسب با تنش قائم افزایش می‌یابد [۸]. از سوی دیگر، با افزایش درصد لاستیک، کرنش ماندگار و مدول فشردگی کاهش می‌یابد که با افزایش تنش عمودی مؤثر رابطه عکس دارد [۸]. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که وزن مخصوص مخلوط ماسه - لاستیک فرسوده خشک، به درصد ماسه وابستگی زیادی دارد و از درصد رطوبت اثرپذیری کمتری دارد. از سوی دیگر این مصالح دارای اندرکنش بهتری با ژئوگرید تک محوره نسبت به دیگر انواع ژئوگریدها هستند [۹]. آزمون‌ها نشان می‌دهد که در صورت استفاده از تایرهای فرسوده به صورت شبکه‌ای از سلول‌های به هم پیوسته، و به کار بردن آن‌ها در لایه‌های افقی در زیر پی، ظرفیت باربری خاک افزایش و میزان نشست کاهش می‌یابد [۱۰]. آزمایش‌های گسترده انجام گرفته بر روی بتن آسفالتی مخلوط با لاستیک نشان می‌دهد که اضافه کردن لاستیک باعث کاهش تغییر شکل دائم، محدود کردن سختی و مقاومت زیاد در برابر ترک خوردگی حرارتی می‌شود [۱۱]. بررسی‌های انجام شده بر روی عمل کرد مخلوط ماسه - خرده لاستیک فرسوده نشان می‌دهد که در صورت استفاده از این مصالح به عنوان خاکریز پشت دیوار حائل تحت بارهای لرزه‌ای، تغییر مکان دائم و فشار دینامیکی کاهش محسوسی می‌یابد [۱۲]. بررسی‌های عددی نشان می‌دهد در صورت استفاده از مخلوط ماسه - خرده لاستیک به عنوان مصالح خاک ریز در پشت دیوار حائل مسلح، با افزایش درصد لاستیک، تغییر مکان جانبی دیوار حائل و نیز نیروی وارده به مسلح کننده‌ها افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل تغییر کرنش حجمی از حالت انقباضی به حالت انبساطی با افزایش درصد لاستیک است [۱۳]. آزمون‌ها بر روی خصوصیات مقاومتی مخلوط خرده لاستیک - ماسه سیلتی با نسبت اختلاط ۱۰۰:۰ الی ۷۰:۳۰ نشان داد درصد رطوبت بهینه وابستگی اندکی به درصد لاستیک دارد. همچنین نتایج نشان دهنده کاهش مقاومت برشی مخلوط در صورت یخ زدن است. علاوه بر این با افزایش درصد لاستیک مدول تغییر شکل و مقاومت کششی مخلوط کاهش

یافته و وابستگی آن به دما نیز کاهش می‌یابد. همچنین در صورت افزودن خرده لاستیک به ماسه سیلتی، مخلوط با وجود تحمل تنش کششی کمتر، کرنش‌های بیشتری را تحمل می‌کند [۱۴]. پژوهش‌های صورت گرفته بر روی خصوصیات خاک رس نشان داد در صورت اصلاح خاک، با افزودن ۱ درصد الی ۵ درصد الیاف خرده لاستیک فرسوده به خاک رس، علاوه بر درصد لاستیک، اندازه الیاف لاستیکی نیز نقش مهمی در بهبود مقاومت فشاری محدود نشده مخلوط ایفا می‌کند، درصد لاستیک و اندازه الیاف بهینه به ترتیب ۲ درصد و ۱۰ میلی متر بدست آمد. همچنین با افزودن ۲ درصد الیاف لاستیک به خاک رس بیشترین مدول برشی و نسبت میرایی در مخلوط مشاهده شد [۱۵]. از سوی دیگر از لاستیک‌های فرسوده می‌توان به عنوان مصالح مسلح کننده خاک استفاده کرد. نتایج بررسی‌های محققان مختلف نشان دهنده افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک، یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک است [۱۵]. تحقیقات گذشته مؤلفان نشان می‌دهد که استفاده از این مصالح در زیر ساختمان‌های واقع بر خاک‌های رسی بسیار نرم باعث میرا شدن امواج رسیده به سازه شده است [۱۶].

در پژوهشی که در سال ۱۳۹۰ توسط مسعود عامل سخی در ارومیه انجام شده، مخلوط خاک و خرده لاستیک به عنوان میراگر در زیر پی، مدل شده و تأثیر عمق سنگ بستر بر روی عمل کرد مخلوط، در حوزه زمان و فرکانس بررسی شده است. نتایج نشان داد این مصالح دامنه تشدید، شتاب و انرژی رسیده به سطح زمین را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش عمق سنگ بستر عملکرد این مصالح به عنوان جداساز لرزه‌ای کاهش می‌یابد. مصالح مذکور در زلزله‌های شدید نسبت به زلزله‌های ضعیف، عملکرد بهتری دارد. مزیت این روش نسبت به روش‌های مشابه هزینه پایین، دسترسی آسان به منابع، عدم نیاز به تکنولوژی بالا و رفع همزمان دو مشکل (لرزش‌های زلزله و مسائل زیست محیطی) است [۱۶].

۲-۲-۲ استفاده از خرده پلاستیک

امروزه توسعه جوامع صنعتی و شهرنشینی موجب انباشت روز افزون ضایعات پلاستیکی و پراکندگی آنها در طبیعت شده است. کاهش مشکلات زیست محیطی این پدیده به روش‌های مختلفی امکان پذیر است. در مطالعه صورت گرفته توسط مهدی خداپرست و همکاران در سال ۱۳۹۵، امکان استفاده مجدد از مواد پلاستیکی در ساختار جدیدی از خاک مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، نمونه‌هایی از مخلوط خاک ماسه‌ای با وزن مخصوص خشک ۱/۷ گرم بر سانتیمتر مکعب و خرده ضایعات پلاستیکی (از جنس بطری‌های آب معدنی) به مقدار وزنی ۰/۳ درصد در ابعاد ۱۲*۸ میلی‌متر تهیه شده و بر روی آنها آزمایش‌های برش مستقیم کوچک و بزرگ مقیاس با سرعت‌های تند و کند به ترتیب ۱ و ۰/۳ میلی‌متر بر دقیقه در شرایط اشباع انجام شده است. در مرحله بعد ترکیب حاصل با ۵ درصد وزنی از دوغاب سیمان مخلوط شده و آزمایش‌های مذکور تکرار شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن خرده پلاستیک ضایعاتی به خاک ماسه‌ای موجب افزایش زاویه اصطکاک داخلی و در مجموع افزایش مقاومت برشی می‌شود. همچنین در خاک مسلح به ضایعات پلاستیکی و دوغاب سیمان نسبت به خاک مسلح بدون دوغاب با وجود کاهش زاویه اصطکاک داخلی، به علت افزایش قابل توجه چسبندگی، در مجموع مقاومت برشی بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بیشتر می‌شود [۱۷].

۲-۲-۳ استفاده از ترانسه‌های فعال و غیر فعال

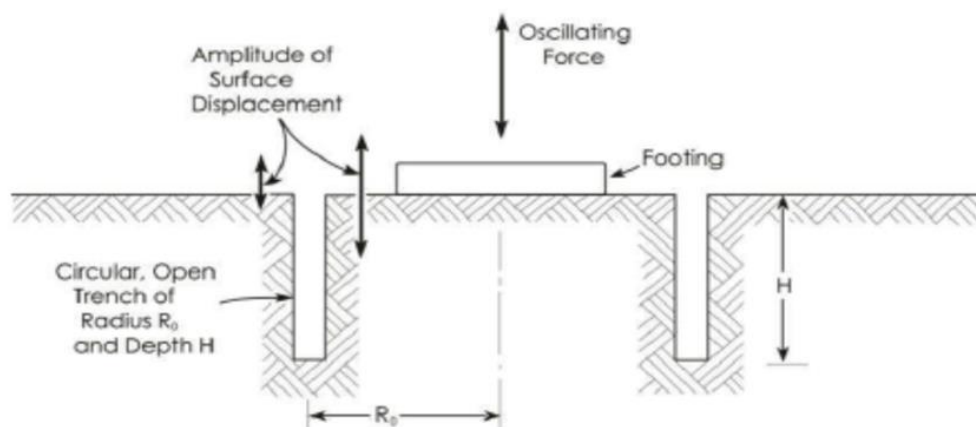
بطور کلی، کنترل ارتعاشات به وسیله موانع موج در زمین را می‌توان به دو دسته کلی زیر تقسیم کرد:

۱- کنترل فعال^۱ (جداسازی در فاصله‌ای نزدیک منبع موج)

در شکل ۱-۲ برای جلوگیری از انتشار امواج ناشی از منبع لرزان روی پی، در نواحی اطراف پی، از دو ترانسه در فاصله R از مرکز پی و به عمق H استفاده شده است. این ترانسه‌ها باید تا عمقی حداقل عمود

^۱ Active Control

بر صفحه امتداد داشته باشند تا کارایی لازم را ایفا نمایند. از آن جایی که این موانع موج در نزدیکی محل انتشار موج قرار داده شده‌اند، تا سبب کاهش ارتعاشات سطح خاک در اطراف پی شوند، کنترل فعال نامیده می‌شوند. جهت پایداری این ترانشه‌ها می‌توان با استفاده از خرده لاستیک یا ژئوفوم داخل ترانشه را پر کرد [۱۸].

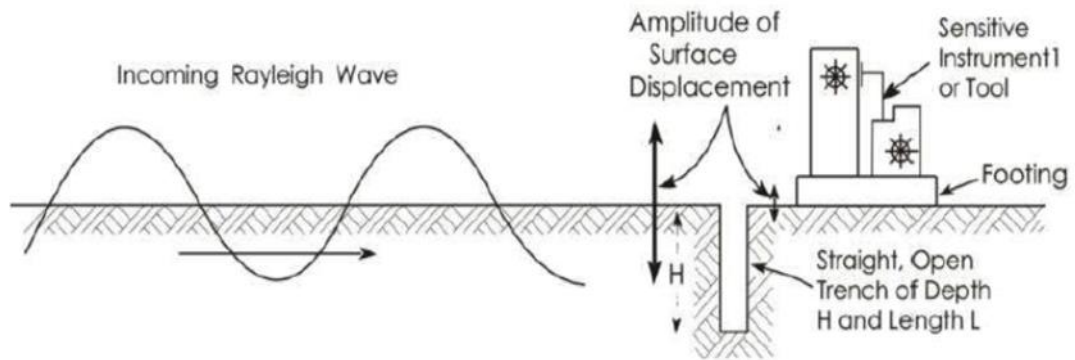


شکل ۱-۲. کنترل فعال سازه به وسیله موانع [۱۸].

۲- کنترل غیرفعال^۱ (جداساز در اطراف سازه مورد نظر)

در شکل ۲-۲ برای جلوگیری از تأثیر مخرب امواج سطحی رایلی (به طور مثال می‌تواند ناشی از حرکت قطار یا زلزله روی سطح شکل گرفته باشد) روی سازه مورد نظر، در فاصله‌ای مشخص از سازه، از ترانشه‌ای با عمقی مشخص استفاده شده است. در این حالت منبع ارتعاش در فاصله‌ای دور از سازه قرار دارد و وجود ترانشه در نزدیکی سازه مهم، مانع عبور این امواج شده و سبب کاهش ارتعاشات می‌شود؛ به همین دلیل این روش، کنترل غیرفعال نامیده می‌شود [۱۸].

^۱ Passive Control



شکل ۲-۲. کنترل غیر فعال سازه [۱۸].

بررسی اثرات روش ترانشه در کاهش ارتعاشات توسط وودز (۱۹۶۸)، لیسمر و واس (۱۹۷۲)، سیگل و همکاران (۱۹۷۸)، یانگ و هانگ (۱۹۹۷)، هانگ (۲۰۰۰) و هانگ و همکاران (۲۰۰۴) صورت گرفته است. در مطالعه انجام گرفته توسط هاشم شریعتمدار در سال ۱۳۹۰، جزئیات رفتار کاهش ارتعاشات شالوده تحت بار هارمونیک که توسط منبع ارتعاش تولید می‌شود، با بکار بردن موانعی بصورت ترانشه مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر تغییر مکان‌های وابسته به زمان در هر دو حالت Active و Passive کاهش یافتند. استفاده از ترانشه‌های باز و یا ترانشه‌های پر شده می‌تواند میزان ارتعاشات سازه و در نتیجه تنش‌های داخلی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. طول موج رایلی λ_R یکی از پارامترهای مهم در تعیین تأثیر موانع در برابر انتشار امواج در لرزش‌های تولید شده است. حداقل عمق ترانشه‌ها در حالت Active باید حدود $0.16 \lambda_R$ و همچنین در حالت Passive حداقل عمق ترانشه‌ها باید حدود $0.133 \lambda_R$ باشد. بر اساس تحقیق دانشمندان مختلف عرض ترانشه نیز باید حدود $0.1 \lambda_R$ تا $0.5 \lambda_R$ اختیار شود. استفاده از ترانشه باز در مواردی که شالوده‌ها کم عمق هستند، بسیار مفید است و در شالوده‌های عمیق استفاده از مواد نرم مانند بنتونیت تأثیر بهتری روی کاهش ارتعاشات دارند. موانع در حالت Passive در مقایسه با حالت Active تأثیر بهتری از خود نشان می‌دهند. پارامترهای دیگری مانند بازگشت موج و انکسار در لایه‌های جداشونده و ماهیت ناهمگن خاک نقش بسزایی در کاهش ارتعاشات دارند. لازم بذکر است با داشتن اطلاعات کامل‌تر از نوع و مشخصات خاک و شرایط صحرائی می‌توان نتایج بهتری را بدست آورد [۱۹]. به علت ماهیت پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی امواج لرزه‌ای، قرار

دادن موانع موج در زمین لزوماً سبب کاهش اثرات مخرب نشده و بعضاً می‌تواند باعث تشدید خرابی شود. بنابراین برای هر مسئله خاص، باید انتخاب مصالح مناسب برای موانع موج و تعیین آرایش قرار گیری بهینه آن‌ها در زمین، مورد توجه قرار گیرد [۱۸].

۲-۲-۴ تزریق فوم

تثبیت شیمیایی با استفاده از مواد افزودنی روشی است که از دیرباز برای بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در سال ۱۳۹۷ توسط مهدی میرزایی و همکاران، پژوهشی در زمینه بررسی تأثیر سیلیکافوم و ترکیب آن با فعال کننده‌های مختلف از جمله آهک و سیمان، در اصلاح خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه رس‌دار انجام شد. بدین منظور مقادیر ۴، ۸ و ۱۲ درصد وزنی خاک سیلیکافوم و همچنین به نسبت ۱ به ۱ آهک و سیمان به منظور فعال کردن سیلیکافوم به خاک اضافه و نمونه‌ها در دوره‌های ۷ و ۲۸ روز عمل آوری قرار گرفتند. برای بررسی تأثیر افزودنی بر خصوصیات مقاومتی خاک اصلاح شده آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده و آزمایش pH برای بررسی شرایط لازم برای انجام واکنش‌ها انجام شد. در این راستا از نتایج آزمایش‌ها مشاهده شد که مقاومت فشاری خاک حاوی ۱۲ درصد سیلیکافیوم و سیمان بعد از ۲۸ روز عمل آوری حدود ۱۱ برابر نسبت به خاک اصلاح نشده افزایش پیدا می‌کند. در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده مشخص گردید که استفاده از سیلیکافوم فعال شده تأثیر چشمگیری در مقاومت خاک داشته و می‌تواند گزینه مناسبی برای تثبیت خاک‌های با مقاومت کم باشد [۲۰].

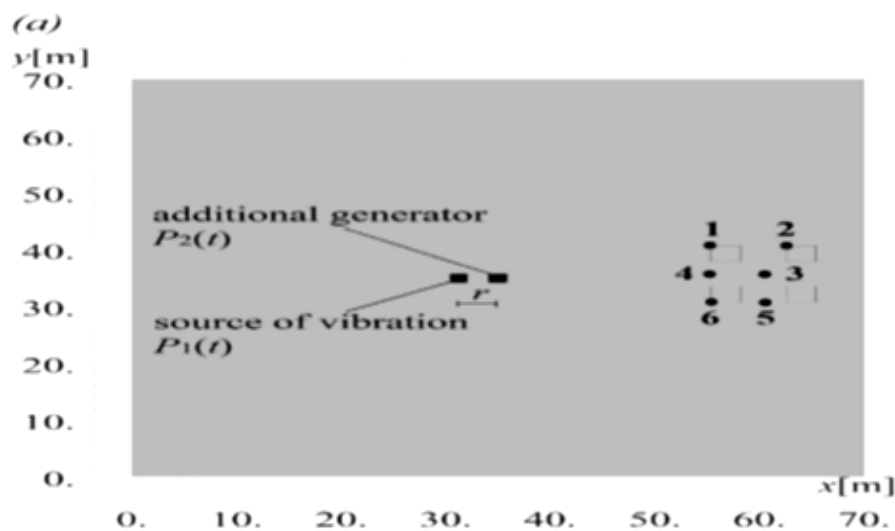
۲-۳ اقدامات مشابه در زمینه استفاده از تولید کننده موج

کاهش نیروهای ورودی ناشی از زلزله به سازه‌ها، یکی از روش‌های مؤثر در زمینه کاهش مخاطرات ناشی از زلزله می‌باشد. به عبارت دیگر در این روش با میرا کردن امواج زلزله قبل از ورود به سازه، با اثرات

ناشی از زلزله در سازه‌ها می‌توان مقابله کرد. با توجه به روش مورد استفاده در این پژوهش، مطالبی در زمینه استفاده از تولید کننده موج با هدف کاهش و یا خنثی سازی موج ورودی بیان شده است.

۲-۳-۱ اثر تولید کننده موج در کاهش موج معین حاصل از ضربه

در سال ۲۰۱۷ تحقیقاتی در زمینه تأثیر دستگاه تولید کننده موج بر روی دامنه نوسان زمین هنگام ایجاد بار ضربه‌ای در دانشگاه راتسواف^۱ انجام شد. برای این منظور یک دستگاه تولید کننده موج و دستگاهی برای ایجاد ضربه در سطح زمین همانند شکل ۲-۳ قرار داده شد [۲۱].



شکل ۲-۳. نحوه قرار گیری دستگاه تولید کننده موج و منبع ایجاد ارتعاش [۲۱].

ایده اصلی این روش، تولید موجی با دامنه و فرکانس لرزش یکسان اما با جهت جابه‌جایی مخالف موج حاصل از ضربه است. در واقع در این پژوهش منبع ضربه با سرعت ثابت و فاصله‌های زمانی معین و ثابت، ضربه‌هایی به سطح زمین وارد می‌نماید که معادله موج حاصل از این ضربه‌ها معلوم می‌باشد. معادله (۱-۲) معادله موج حاصل از ضربه را نشان می‌دهد [۲۱]:

^۱ Wroclaw

$$P_{1,i}(t) = 0.5A(1 - \cos(2\pi(t - t_{b,i})/(t_{e,i} - t_{b,i}))).(H(t - t_{b,i}) - H(t - t_{e,i})),$$

$$P_1(t) = \sum_{i=1}^n P_{1,i}(t), \quad (1-2)$$

که در آن: A = دامنه ضربه، t = زمان، $t_{b,i}$ = زمان شروع ضربه، $t_{e,i}$ = زمان خاتمه ضربه، $H(t)$ تابع هویساید^۱ می باشد. (تابع هویساید تابعی ناپیوسته و چند ضابطه‌ای است که مقدارش برای اعداد منفی صفر و برای اعداد نامنفی یک می باشد).

با توجه به اینکه هدف دستگاه تولید کننده موج، تولید موجی مخالف موج ناشی از ضربه می باشد از اینرو معادله موج تولیدی توسط دستگاه تولید کننده موج معادله (۲-۲) می باشد که در واقع همان معادله (۱-۲) با علامت منفی است.

$$P_{2,i}(t) = -0.5A(1 - \cos(2\pi(t - t_{B,i})/(t_{E,i} - t_{B,i}))).(H(t - t_{B,i}) - H(t - t_{E,i})),$$

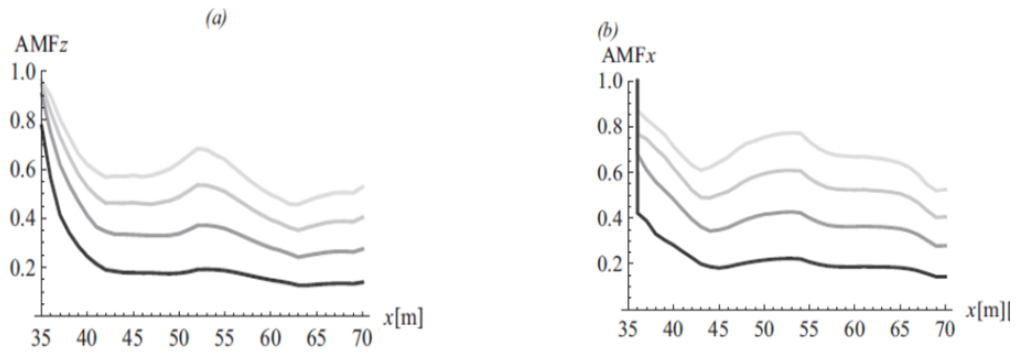
$$P_2(t) = \sum_{i=1}^n P_{2,i}(t), \quad (2-2)$$

نتایج به دست آمده از این پژوهش در قالب ضریب کاهش دامنه (AMF) برای دو جهت افقی و عمودی نشان داده شده است. AMF همان نسبت بین حداکثر مقدار خالص جابجایی عمودی یا افقی پس از استفاده از تولید کننده موج و حداکثر مقدار خالص جابجایی در جهت یکسان بدون تولید کننده موج است.

نتایج این پژوهش در شکل (۴-۲) نمایش داده شده است. در شکل (۴-۲) مقادیر AMF برای فواصل مختلف بین دستگاه تولید کننده موج و منبع ایجاد ضربه نشان داده شده است. ملاحظه می گردد که با افزایش فاصله بین دستگاه تولید کننده موج و منبع ایجاد ضربه مقادیر AMF افزایش یافته است. افزایش مقادیر AMF نشان دهنده کاهش اثر دستگاه تولید کننده موج در خنثی سازی مقادیر جابه جایی

¹ Heaviside

ناشی از منبع ایجاد ضربه می‌باشد. بدین معنی که هرچه دستگاه تولید کننده موج به منبع ضربه نزدیکتر باشد، کارایی این روش بیشتر می‌باشد [۲۱].

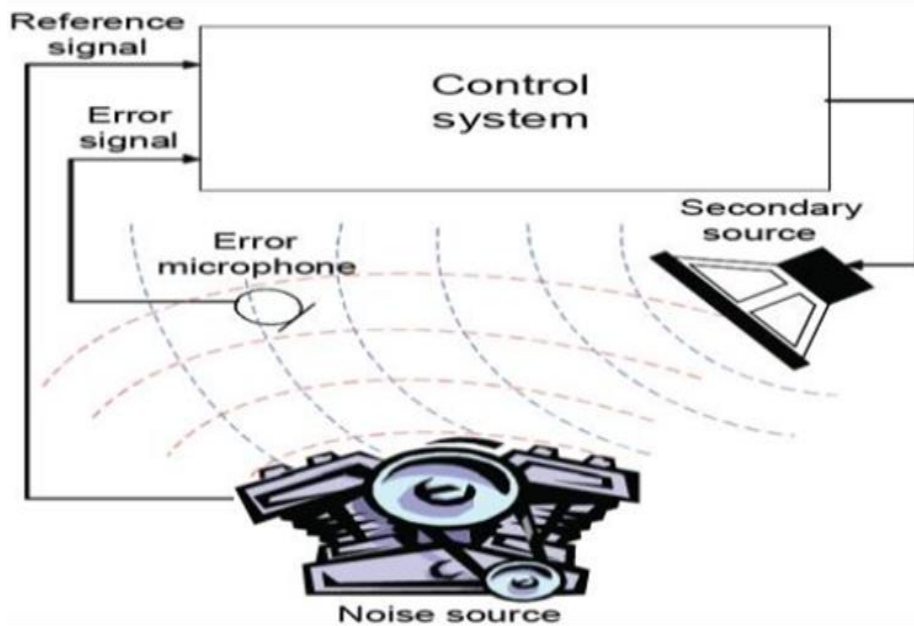


black line: $r = 1 \text{ m}$; dark grey line: $r = 2 \text{ m}$; grey
line: $r = 3 \text{ m}$; light grey line: $r = 4 \text{ m}$

شکل ۲-۴. مقادیر نسبت جابه‌جایی خالص در دو حالت وجود و عدم وجود دستگاه تولید کننده موج [۲۱].

۲-۳-۲ سیستم حذف نویز از تلفن همراه

سیستم نویز گیر تلفن همراه که امروزه در اکثر تلفن‌های هوشمند همراه موجود است. فناوری نویزی است که به منظور افزایش کیفیت مکالمه و حذف صداهای اضافه محیط مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم به این شکل عمل می‌کند که با تولید صوتی با فاز مخالف سیگنال نویز موجب کاهش دامنه سیگنال نویز می‌شود، برای این کار از یک سیستم کنترل استفاده می‌شود که این سیستم با ساختن یک سیگنال نمونه از روی سیگنال نویز جهت ساخت سیگنال ضد نویز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۲]. شکل ۲-۵ شمایی از نحوه عملکرد این سیستم را نشان می‌دهد. در این سیستم در واقع از یک الگوریتم تخمینی تطبیقی استفاده شده است که در فصل بعدی این الگوریتم بصورت کامل شرح داده شده است.



شکل ۲-۵. سیستم نویز گیر تلفن همراه [۲۲].

۳-۳-۲ استفاده از دستگاه تولید موج به منظور کاهش انرژی سونامی

سونامی‌ها امواج آب هستند که به دلیل جابجایی حجم زیادی از آب در اقیانوس‌های عمیق یا دریاچه‌های بزرگ، در اثر وقوع زلزله، رانش زمین، انفجار در زیر آب یا سایر وقایع شدید زمین شناسی ایجاد می‌شوند. در خط ساحلی، این امواج ویرانگر، به ارتفاع ده‌ها متر می‌رسند و باعث تخریب اموال و خسارات جانی زیادی می‌شوند. به عنوان مثال، بیش از ۲۲۵۰۰۰ نفر تنها در سونامی اقیانوس هند در سال ۲۰۰۴ کشته شدند. برای چندین دهه دانشمندان در حال مطالعه سونامی بوده‌اند با این حال، هیچ یک از مطالعات، رویکردی را برای کاهش مستقیم سونامی، به استثنای کاهش با استفاده از موانع زیر دریا، تأیید نمی‌کند [۲۳]. با توجه به این موضوع در سال ۲۰۱۷ تحقیقی در زمینه تولید موج آکوستیک-گرانشی^۱ به منظور کاهش انرژی سونامی توسط اوسامه کادری^۲ انجام شد. امواج گرانشی-آکوستیک، امواج صوتی هستند که با دامنه‌های تعیین کننده توسط نیروی جاذبه، در آب منتشر می‌شوند [۲۴].

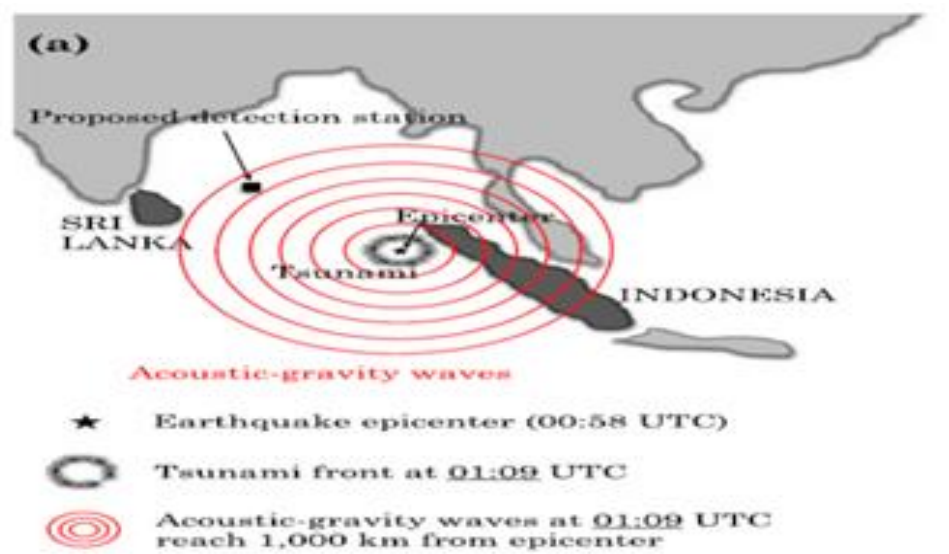
¹ Acoustic-Gravity Waves

² Usama Kadri

امواج گرانشی- آکوستیک که از تداخل بین امواج صوتی و گرانشی صورت می‌گیرند، به طور معمول طول موجی در حدود ده ها یا صدها کیلومتر دارند و با سرعت نزدیک سرعت صوت در آب (۱۵۰۰ متر بر ثانیه) در فرکانس‌های نسبتاً کم از ۰٫۱-۱۰۰ هرتز پخش می‌شوند [۲۴].

برخلاف امواج سطح اقیانوس‌ها، امواج گرانشی- آکوستیک با سونامی شکل می‌گیرند. شکل (۲-۶) تصویر شماتیک سونامی و امواج گرانش آکوستیک تولید شده در طول زلزله اقیانوس هند در سال ۲۰۰۴ را نشان می‌دهد. امواج گرانشی آکوستیک خیلی سریعتر از سونامی به ایستگاه اکتشافی در فاصله ۱۰۰۰ کیلومتری مرکز زلزله رسیده‌اند [۲۴].

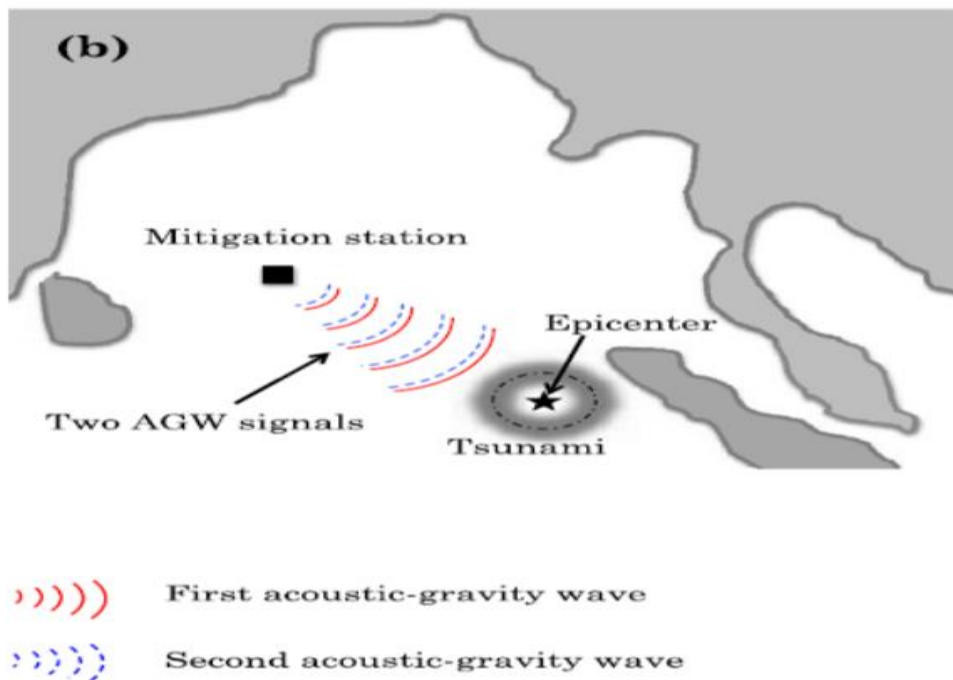
به عنوان نمونه زمین لرزه اقیانوس هند در سال ۲۰۰۴ که در ساعت ۰۰:۵۸ رخ داد، یک سونامی را ایجاد کرد که ۱۴ دقیقه بعد، در ساعت ۰۱:۱۲ در روستاهای ساحلی اندونزی رخ داد و در سریلانکا ۷۱ دقیقه بعد در ساعت ۰۲:۲۳ رخ داد. اما موج گرانشی - آکوستیک تنها در مدت زمان ۱۱ دقیقه رسیده بود. که به بیان دیگر این موج به ترتیب ۳ و ۶۰ دقیقه قبل از حمله سونامی به اندونزی و سریلانکا رسیده بود. یعنی تقریباً بدون توجه به جهت، سونامی می‌توانست در ساعت ۰۱:۰۹ شناسایی شود و می‌توانست جان بسیاری را نجات دهد [۲۴].



شکل ۲-۶. شماتیک زلزله هند سال ۲۰۰۴ [۲۴].

ایده این پژوهش از تئوری تأثیر برخورد دو موج سطحی با دوره تناوب یکسان اما جهت مخالف برداشته شده است. در واقع در این روش به منظور کاهش انرژی سونامی، دو موج آکوستیک - گرانشی به سمت مرکز زلزله منتشر می‌شوند، شکل ۲-۷ [۲۴].

در این پژوهش جنبه‌های فنی تولید موج آکوستیک-گرانشی بررسی نشده است اما می‌دانیم که کاهش سونامی، نیازمند طراحی دقیق فرستنده فرکانس موج آکوستیک - گرانشی دارد که یک مسئله مهندسی نسبتاً چالش برانگیز است. در این پژوهش با استفاده از روابط ریاضی مربوط به معادلات حرکت سطح آزاد آب و وارد کردن معادلات مربوط به پراکندگی و محاسبه روابط انرژی، نتایج بدست آمده از این پژوهش در جدول ۱-۲ ارائه شده است [۲۴].



شکل ۲-۷. سیستم کاهش سونامی [۲۴].

جدول ۲-۱. ارتباط بین میزان کاهش دامنه سونامی با پارامتر b [۲۴].

Standard deviation b	Amplitude reduction ΔS	Relative energy E_A / E_s
۰/۷۷۷	۳۷٪	۲۵
۰/۲۳۳	۸٪	۸
۰/۱۵۸	۵٪	۵
۰/۰۱۱۱	۳٪	۴

در جدول ۲-۱ پارامتر b، انحراف استاندارد مقادیر عرض منحنی پوش ناشی از موج آکوستیک-گرانش، EA انرژی موج آکوستیک-گرانش و ES انرژی سونامی است.

۲-۴ تولید کننده موج

به منظور تولید موجی مخالف موج زلزله نیازمند یک ژنراتور موج می‌باشیم که بتواند موج مورد نظر را تولید نموده و همچنین قابلیت اعمال تغییرات لحظه‌ای به منظور تولید موج مناسب را دارا باشد. مهم‌ترین هدف هر منبع لرزه‌ای، تولید سیگنال به اندازه کافی قوی و حصول اطمینان از عمق نفوذ کافی آن می‌باشد. تعداد بسیار زیادی از منابع متنوع تولید امواج لرزه‌ای وجود دارد. برای هر برداشت بخصوص، انتخاب مناسب‌ترین منبع لرزه‌ای از اهمیت بسزایی برخوردار است. مهم‌ترین عواملی که در انتخاب منبع لرزه‌ای مدنظر قرار می‌گیرد، عمق نفوذ و حداقل رزولوشن می‌باشد. برای دستیابی به عمق نفوذ زیاد، منبع لرزه‌ای با فرکانس کم مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما این منابع، دقت پایینی دارند. در برداشت‌های لرزه‌ای کم عمق با دقت بالا، منابع با فرکانس بالا که متقابلاً عمق نفوذ محدودی دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۵].

یک منبع لرزه‌ای باید خصوصیات اصلی زیر را دارا باشد:

۱- خصوصیات تکنیکی

➤ انرژی کافی برای تولید سیگنال قابل اندازه‌گیری با نسبت سیگنال به نویز مناسب.

➤ ایجاد پالس‌های کوتاه مدت با فرکانس بالا به منظور افزایش دقت.

➤ حداقل ایجاد نویز توسط منبع.

۲- خصوصیات عملیاتی

➤ کارآمد باشد.

➤ بی‌خطر برای کار و هزینه نگهداری کم.

➤ برای راه‌اندازی به تعداد کمی نیروی انسانی نیاز داشته باشد.

➤ قیمت مناسب و معقول برای خرید یا نگهداری

۲-۴-۱ انواع دستگاه تولید کننده موج

بطور کلی سه نوع منبع لرزه‌ای وجود دارد:

۱- ضربه‌ای^۱ ۲- لرزش ساز^۲ ۳- جنبشی^۳

این منابع را می‌توان در برداشته‌های زمینی، دریایی و درون چاهی مورد استفاده قرار داد. در ادامه

جدول ۲-۲ انواع منابع لرزه‌ای را نشان می‌دهد [۲۵].

¹ Impact

² Vibrator

³ Impulsive

جدول ۲-۲. انواع منابع لرزه‌ای [۲۵].

	ON LAND	ON WATER
Impact	Sledge hammer Drop weight Accelerated weight	
Impulsive	Dynamit Airgun Shotgun Borehole sparker	Air gun Gas gun Sleeve gun Water gun Steam gun
Vibrator	Vibroseis Vibrator plate	Multipulse Geochirp

۲-۴-۱-۱ Vibroseis

بررسی لرزه‌ای روشی برای جمع‌آوری اطلاعات در مورد مکان و ویژگی‌های سازه‌های زمین‌شناسی زیر سطح زمین است. از این اطلاعات برای تهیه نقشه از مناطقی را که احتمال دارد ذخایر نفتی بیشتر یافت شوند، استفاده می‌شود. شرکت‌های اکتشافی از وسایل نقلیه مخصوص ویبراتور لرزه‌ای (Vibroseis) استفاده می‌کنند که در زمین، ارتعاش و موج‌های صوتی با فرکانس‌های مختلف تولید می‌کنند [۲۶]. در واقع با استفاده از یک کامیون که دستگاه ویبراتور لرزه‌ای بر روی آن سوار شده است این اقدامات صورت می‌گیرد. شکل ۲-۸ کامیون مجهز به ویبراتور لرزه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸. کامیون مخصوص ویبراتور لرزه‌ای [۲۶]

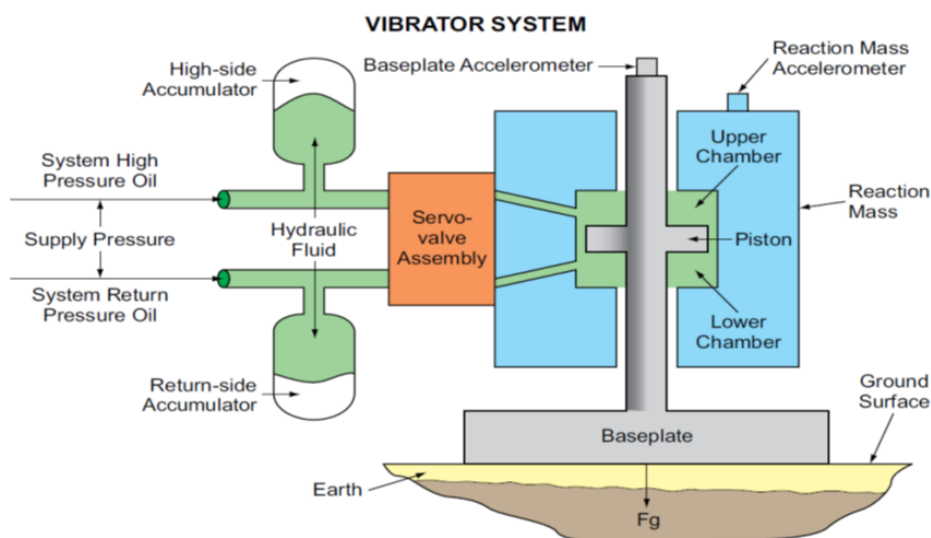
استفاده از این روش در ایالات متحده گسترش پیدا کرده است تا امکان لرزه نگاری در شهرها و سایر محیط‌های حساس بدست آید و نیاز به دینامیت برای تولید سیگنال لرزه‌ای را برطرف سازد. از جمله مزایای دیگر این روش، ایجاد یک لرزش کنترل شده است که به سازه‌ها آسیب نمی‌رساند. ویراتور لرزه‌ای یک سیستم هیدرومکانیکی کنترل شده الکترونیکی است که توسط یک دریچه فرمان پذیر^۱ هدایت می‌شود شکل ۲-۹. ورودی سیستم شامل منبع تغذیه هیدرولیکی است که سیستم ویراتور لرزه‌ای را از طریق پمپاژ روغن به دریچه فرمان پذیر اصلی و سپس از طریق پیستون و بیس پلیت کنترل می‌کند. منبع تغذیه به طور معمول از موتور دیزلی تشکیل شده است که پمپ‌ها، مخزن سیال، تنظیم کننده فشار، شیرهای ایمنی، فیلترهای هیدرولیک، خنک کننده روغن و باتری‌ها را هدایت می‌کند [۲۶].

ویراتور لرزه‌ای انرژی حاصله از موتور دیزلی را به ارتعاش تبدیل می‌نماید. ایجاد ارتعاش توسط یک المان متحرک که به واسطه دستگاه جرم و پیستونی که از طریق شیر الکترو هیدرولیکی کنترل می‌شود، انجام می‌گردد.

پیستون درون محفظه استوانه قرار دارد که بصورت صلب به بیس پلیت متصل شده است. مایع هیدرولیک با فشار بالا وارد مخزن بالا و پایین شده و باعث جابه‌جایی جرم^۲ می‌شود. این امر موجب انتقال نیرو بصورت مساوی و قرینه به بیس پلیت می‌شود و بیس پلیت آنرا به زمین منتقل می‌نماید [۲۶].

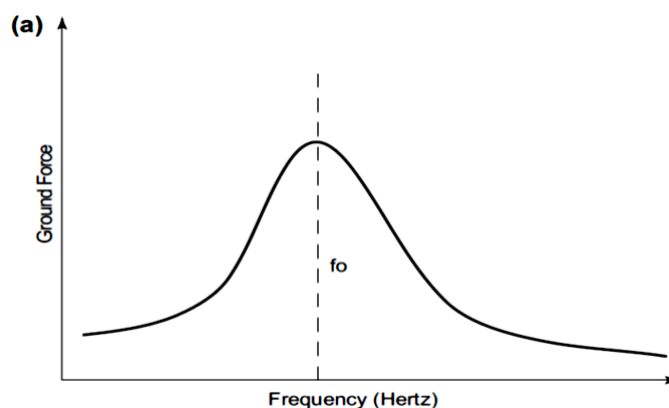
¹ Servo-Valve Assembly

² Reaction Mass



شکل ۲-۹. شماتیک دستگاه ویبراتور لرزه‌ای [۲۶].

شکل ۲-۱۰ نمودار فرکانس - نیروی وارده به سطح زمین، توسط ویبراتور لرزه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۰. نمودار نیرو-فرکانس وارده به زمین توسط دستگاه [۲۶].

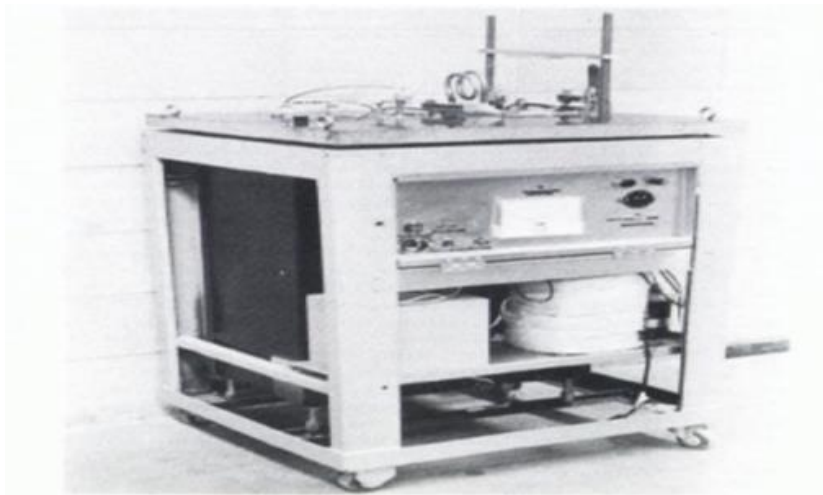
۲-۱-۴-۲ Stress-wave generator

مولد موج - تنش یک سیستم انعطاف پذیر است که برای مطالعه انتشار موج - تنش در برف و یخ استفاده می‌شود. این ژنراتور می‌تواند فشاری از ۵ کیلو پاسکال تا بیش از ۵۰۰۰ کیلو پاسکال را تولید نماید. در واقع این ژنراتور برای ایجاد امواج ضربه‌ای^۱ با هدف بهبود کمیت و کیفیت داده‌های آن ساخته شده‌اند. روش‌های دیگر تولید امواج ضربه‌ای مانند استفاده از دینامیت ممکن است برای ایجاد طیف

¹ Shock Wave

وسیعی از دامنه موج مورد استفاده قرار بگیرد اما کنترل فرکانس موج در این روش بسیار مشکل می باشد. ژنراتور موج-تنش به نظر می رسد ترکیبی بهینه از فشار و فرکانس را فراهم می کند. علاوه بر این استفاده از آن بسیار آسان است [۲۷].

این سیستم بر اساس اصل تولید جریان های الکتریکی بزرگ برای تولید بارهای بسیار زودگذر بر روی نمونه آزمایش کار می کند. در این سیستم وقتی دو جریان الکتریکی با انرژی بالا در جهت مخالف یکدیگر و در امتداد مدارهای موازی مجاور اعمال می شوند، یک نیروی الکترومغناطیسی دافع قوی ایجاد می شود. این نیرو از طریق سیم پیچ کنترل به تسمه بار منتقل می شود و سپس تسمه آن را به زمین منتقل می نماید. شکل ۱۱-۲ دستگاه مولد موج-تنش را نشان می دهد [۲۷].

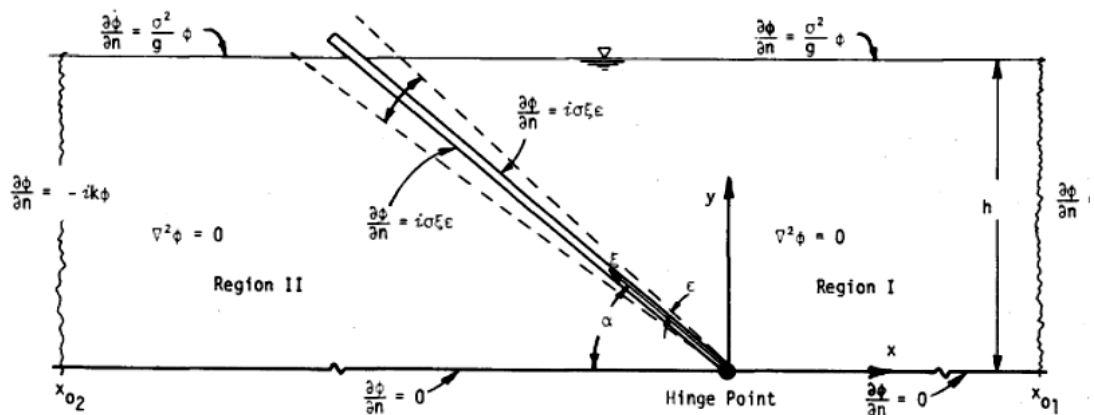


شکل ۱۱-۲. دستگاه مولد موج-تنش [۲۷].

Inclined-plate wave generator ۳-۱-۴-۲

ژنراتور موج صفحه ای شیبدار، از یک صفحه با یک گوشه مفصلی متصل به پایین و یک گوشه آزاد تشکیل شده است که با زاویه ای مشخص و در عمقی ثابت در مخزن موج نصب می شود. صفحه با حرکات تناوبی در موقعیت خودش، حرکت می کند. شکل ۱۲-۲ شماتیک ژنراتور موج صفحه ای شیبدار را نشان می دهد.

قسمت بالای صفحه از دو بازوی افقی در جهت مخالف یکدیگر که توسط پیچ به صفحه متصل شده‌اند تشکیل شده است. هنگامی که بازوها حرکت می‌کنند قسمت تحتانی صفحه که اتصال آن مفصلی است مجبور به حرکت متناوب با زاویه چرخش حداکثر می‌شود [۲۸].

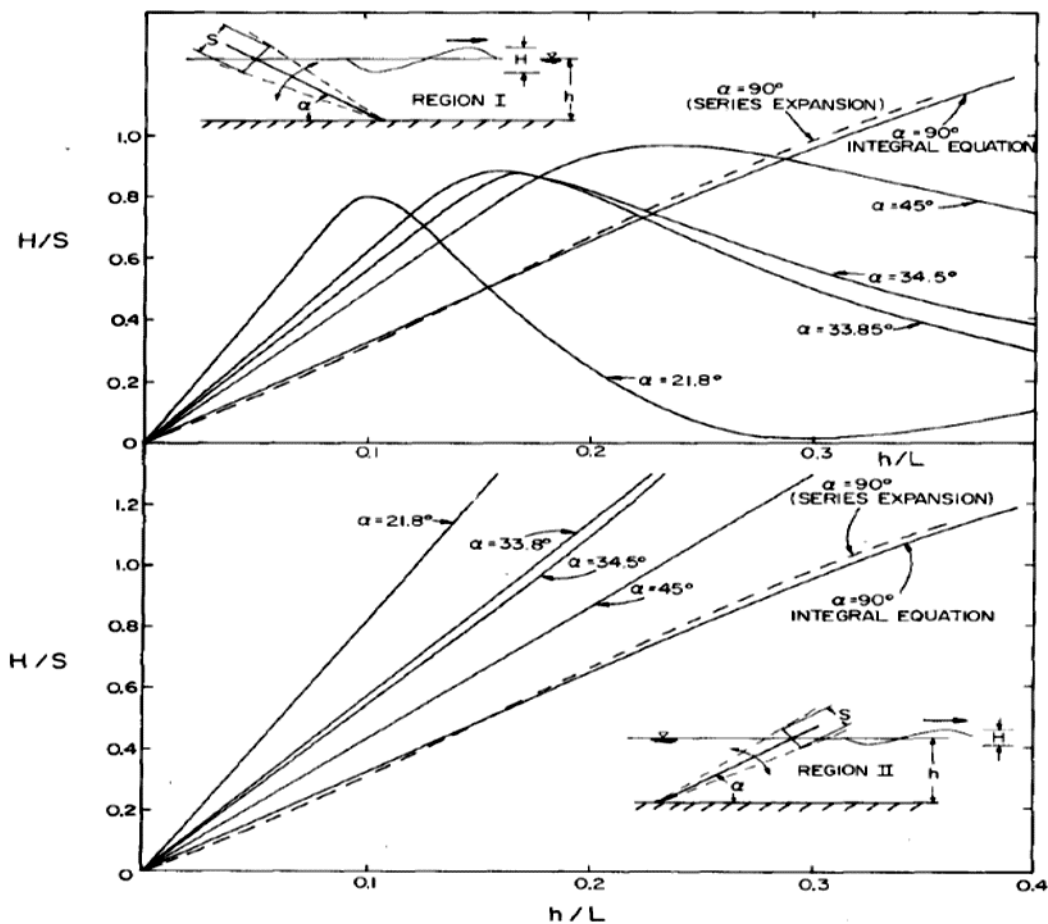


شکل ۲-۱۲. شماتیک ژنراتور صفحه‌ای [۲۸].

صفحه موج از تخته سه لایه با فضای بین لایه‌های بسیار کم (کمتر از ۱ میلی متر) که در پایین اتصال مفصلی و یا لولایی دارد، ساخته شده است. صفحه موج در داخل مخزنی قرار می‌گیرد که فاصله آزاد صفحه با گوشه‌های مخزن تقریباً ۱/۵ میلی متر است [۲۸].

در این روش تنها امواجی که در ناحیه‌ای با زاویه بین صفحه موج و سطح زیرین آن بیش از ۹۰ درجه باشد، اندازه‌گیری و محاسبه می‌شوند. (مانند منطقه ۱ در شکل ۲-۱۲). موج ایجاد شده در دو سمت صفحه (ناحیه ۱ و ناحیه ۲ در شکل ۲-۱۲) کاملاً متفاوت است به جز در مواردی که نسبت عمق به طول موج کم می‌باشد. در ادامه شکل ۴-۷ نتایج نظری برای امواج تولید شده توسط صفحه شیب دار نوسانی نشان داده شده است [۲۸]. در شکل ۲-۱۳ داریم:

$$H = \text{ارتفاع موج}, L = \text{طول موج}, h = \text{عمق}, S = \text{جابه‌جایی صفحه ناشی از ضربه}$$



شکل ۲-۱۳. نتایج نظری تولید موج توسط صفحه نوسانی [۲۸].

۵-۲ جمع بندی

استفاده از تولید کننده موج به منظور تولید موجی مشابه موج زلزله نیازمند انرژی، به مقدار حداقلی معادل انرژی زلزله در سطح زمین می باشد. در این پژوهش جنبه های فنی و آزمایشگاهی تولید موج توسط دستگاه تولید کننده موج بررسی نشده است. اما می دانیم تولید موج توسط دستگاه تولید کننده موج نیازمند طراحی دقیق است. زیرا وجود خطا و اشتباه در دستگاه می تواند حتی دامنه ارتعاشات زلزله را تشدید کرده و آسیب های جدی به سازه وارد نماید.

فصل ۳: فیلتر کالمن

۳-۱ مقدمه

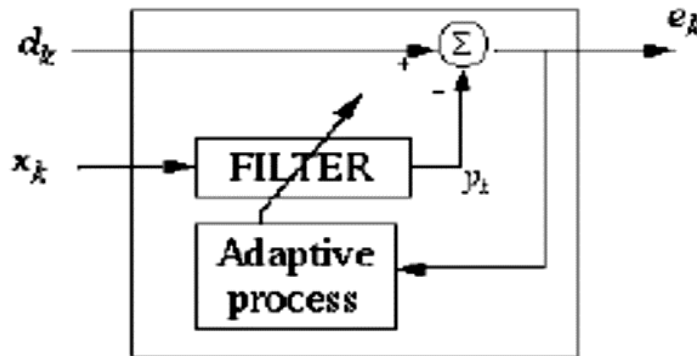
فیلتر کالمن یک فیلتر بهینه خطی است که بر روی فضای حالت سیستم‌های خطی استاتیکی و دینامیکی اثر گذاشته و یک تخمین بهینه از حالت‌های سیستم با استفاده از معادلات برگشت‌پذیر و دینامیکی خود در شرایطی که دسترسی به آنها میسر نباشد ارائه می‌دهد. همچنین این فیلتر می‌تواند تأثیر کلیه اطلاعات گذشته و ابتدایی سیستم را نیز در تخمین هر لحظه خود لحاظ نماید. این فیلتر از نام رودولف ای کالمن، یکی از پایه‌گذاران این تئوری گرفته شده است. فیلتر کالمن کاربردهای بسیاری در علم و فناوری مانند مسیریابی و پایش وسایل نقلیه، به خصوص هواپیما و فضاپیماها، حذف نویز و ... دارد. فیلتر کالمن مفاهیم گسترده‌ای را در زمینه سری‌های زمانی، پردازش سیگنال و اقتصادسنجی مطرح می‌کند. این فیلتر از مفاهیم پایه در زمینه برنامه‌ریزی و پایش ربات‌ها و همچنین مدلسازی سیستم عصبی محسوب می‌شود. این فیلتر از جنبه‌های مختلفی بسیار قدرتمند می‌باشد، زیرا در شرایطی که خاصیت دقیقی از فرآیند مشخص نشده باشد می‌تواند تخمینی از گذشته، حال و حتی آینده فرآیند فراهم کند [۲۹].

در این پژوهش با توجه به تغییرات ناگهانی مقادیر شتاب زلزله در زمان، استفاده از فیلتر کالمن به منظور تخمین مقادیر شتاب زلزله و تغییرات آن در زمان می‌تواند در فرآیند کاهش دامنه مقادیر شتاب زلزله وارده به سازه مؤثر باشد. از این رو در این فصل به بررسی تئوری فیلترهای تطبیقی که فیلتر کالمن بخشی از آن محسوب می‌گردد و تئوری اصلی فیلتر کالمن و نحوه عملکرد و معادلات آن و همچنین پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه استفاده از فیلتر کالمن پرداخته شده است.

۲-۳ فیلترهای تطبیقی

در طی ۳۰ سال گذشته تاکنون پیشرفت‌های زیادی در زمینه‌ی پردازش سیگنال انجام گرفته است. یکی از عملیات‌های مهم پردازش سیگنال، عمل فیلترینگ است. فیلتر وسیله‌ای است که سیگنال ورودی را به سیگنال دیگری تبدیل میکند، به طوریکه امکان استخراج سیگنال مطلوب (اطلاعات مطلوب) از سیگنال ورودی فراهم می‌گردد. یک فیلتر دیجیتال از یک پردازشگر دیجیتالی استفاده می‌کند که محاسبات عددی را بر روی مقادیر نمونه سیگنال صورت می‌دهد. پردازشگر آن می‌تواند یک کامپیوتر عمومی مثل PC و یا یک چیپ پردازشگر خاص مانند DSP باشد [۳۰].

در بسیاری موارد سیگنال‌ها ممکن است ناشناخته و یا متغیر با زمان باشند، باشد. در این موارد فیلتر تطبیقی مشخصات خود را تغییر می‌دهد تا بتواند تغییرات ایجاد شده در سیستم را دنبال کند. فیلترهای تطبیقی کاربردهای وسیعی از جمله: حذف نویز^۱، شناسایی سیستم^۲، پیش بینی^۳ و ... را دارا هستند. شکل ساختمان کلی فیلتر تطبیقی در شکل ۱-۳ نشان داده شده است [۳۰].



شکل ۱-۳. ساختمان فیلتر تطبیقی [۲۹].

در شکل ۱-۳ داریم:

$$(1) \quad x_k = \text{سیگنال ورودی}$$

¹ Noise Cancellation

² Adaptive System Identification

³ Prediction

$$(۲) \quad d_k = \text{سیگنال مطلوب}$$

$$(۳) \quad y_k = \text{سیگنال خروجی}$$

$$(۴) \quad e_k = \text{سیگنال خطا}$$

$$(۵) \quad \text{Adaptive process} = \text{الگوریتم پردازش}$$

هدف فیلتر تطبیقی، فیلتر کردن سیگنال ورودی x_k است تا به نحوی سیگنال فیلتر شده y_k مشابه سیگنال مطلوب d_k گردد. سیگنال خطای e_k معیار مقدار شباهت بین y_k و d_k است. از e_k طبق الگوریتمی استفاده می‌شود تا پارامترهای فیلتر تنظیم گردد. الگوریتم‌های مختلفی جهت این کار موجود می‌باشد مانند الگوریتم کالمن، وینر، LMS، RLS و غیره که در ادامه فیلتر کالمن به تفصیل شرح داده شده است [۳۰].

۳-۳ نام‌گذاری و تاریخچه توسعه فیلتر کالمن

اگرچه نیکولای^۱ و سوئرلینگ^۲ قبلاً الگوریتم مشابهی برای این مسئله ارائه داده بودند، اما این فیلتر به افتخار رادولف کالمن^۳، فیلتر کالمن نام‌گذاری شد. از طرف دیگر اشمیت^۴ عموماً به خاطر توسعه اولین پیاده‌سازی فیلتر کالمن شهرت یافت. این رخداد هنگام ملاقات با کالمن در مرکز تحقیقاتی ناسا^۵ روی داد و وی شاهد کارایی ایده کالمن در برآورد مسیر پرتاب پروژه آپولو بود، که منجر به الحاق آن به رایانه ناوبری آپولو شد. این فیلتر بر روی کاغذ در ۱۹۵۸ توسط سوئرلینگ، در ۱۹۶۰ توسط کالمن و در ۱۹۶۱ توسط کالمن و بوکی^۶ ایجاد و بسط داده شد. این فیلتر بعضی مواقع فیلتر کالمن-بوکی-استراتونویچ^۷ نامیده می‌شود، چرا که یک نمونه خاص از فیلتر بسیار معمولی و غیر خطی است که قبلاً

¹ Thorvald Nicolai Thiele

² Peter Swerling

³ Rudolf E. Kalman

⁴ Stanley F. Schmidt

⁵ Nasa Ames Research Center

⁶ Bucy

⁷ Ruslan L. Stratonovich

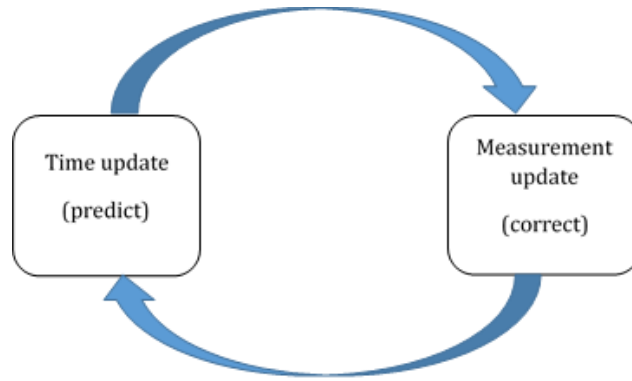
توسط استراتونویج ایجاد شده است. در حقیقت معادله این نمونه خاص فیلتر خطی در اسنادی که از استراتونویج قبل از تابستان ۱۹۶۰، یعنی زمانی که کالمن، استراتونویج را در کنفرانسی در مسکو ملاقات کرد به چاپ رسیده بود. امروزه تنوع گسترده‌ای از فیلتر کالمن به وجود آمده است. از فرمول اصلی کالمن در حال حاضر فیلترهای کالمن ساده، توسعه یافته، اطلاعاتی و فیلترهای گوناگون و بسیاری دیگر به وجود آمده‌اند [۳۱].

۳-۳-۱ شمای کلی فیلتر کالمن

در بسیاری از موارد مدلی از یک شیء را در یک فضای نویزی در اختیار داریم. در این موارد می‌خواهیم X را مدل کنیم در حالیکه Z مشاهده می‌شود. که X و Z بردارهای حالت هستند که ممکن است از نظر ابعاد با هم مساوی نباشند.

فیلتر کالمن یک عملکرد بازخوردی را پیشنهاد می‌کند که با استفاده از آن می‌توانیم Z_k را مشاهده کنیم، X_k را تقریب بزنیم، X_{k+1} را پیش بینی کنیم و سپس Z_{k+1} را مشاهده نماییم. و با استفاده از پیش بینی‌های فوق پیش بینی X_{k+1} را بروز کنیم [۳۲].

فیلتر کالمن توسط یک معادله بیان می‌شود اما معمولاً آن را به دو قسمت پیش‌بینی و به‌روزرسانی تقسیم می‌کنند. در مرحله پیش‌بینی با استفاده از تخمین‌های حالات در بازه‌های زمانی پیشین، تخمین برای حالت فعلی به دست می‌آید. این تخمین در واقع همان دانش پیشینی است، زیرا تنها به تخمین‌های قبلی وابسته است و هیچ مشاهده‌ای در حالت فعلی سیستم را در بر نمی‌گیرد. در مرحله به‌روزرسانی تخمین پیشین با مشاهدات فعلی ترکیب می‌شود تا تخمینی از حالت فعلی سیستم ارائه کند. معمولاً این دو مرحله متناوباً تکرار می‌شوند، به این معنی که پیش‌بینی تا مشاهده بعدی انجام می‌شود و سپس با استفاده از مشاهدات فعلی به‌روزرسانی انجام می‌گردد [۳۳].



شکل ۳-۲. سیکل تکرار در الگوریتم فیلتر کالمن [۳۴].

Time update: گام به‌روز رسانی زمان، رویدادها را در گام بعد پیش‌بینی می‌کند.

Measurement Update: گام به‌روز رسانی اندازه‌گیری، با استفاده از مشاهدات جدید پیش‌بینی‌های انجام شده را اصلاح می‌کند.

۳-۳-۲ فیلتر کالمن خطی

اولین نسخه از فیلتر کالمن همان مدلی است که در سال ۱۹۶۰ معرفی شد. این فیلتر، فیلتر کالمن خطی می‌باشد که در آن دو فرض اساسی وجود داشت [۳۴]:

الف: مشاهدات از طریق توابع خطی مربوط به شرایط مورد بررسی، بدست می‌آیند.

ب: نویز در سیستم و اندازه‌گیری، از نوع نویز سفید و گوسین می‌باشد.

این فیلتر به شکل کلی زیر مدل می‌شود:

پیش‌بینی در گام آینده:

$$X_{k+1} = A_k X_k + W_k \quad (۳-۱)$$

که در آن:

A_k ماتریس انتقال نام دارد. و ماتریسی است که حالت فعلی را به قبلی مرتبط می‌کند.

W_k : نویز روی متغیرهای حالت سیستم می‌باشد که از نوع گوسین با میانگین صفر است.

همچنین فرض می‌کنیم W_k دارای کوواریانس Q_k باشد.

مشاهده در فریم فعلی:

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (2-3)$$

H_k : ماتریس اندازه‌گیری است که نشان دهنده چگونگی مرتبط شدن مشاهدات به مدل می‌باشد.

V_k : نویز روی متغیرهای اندازه‌گیری است. که از نوع گوسین با میانگین صفر و کوواریانس R_k می‌باشد.

حال اگر X_k (یا یک تقریب از آن یعنی X_{k-1}) را در اختیار داشته باشیم، با استفاده از مدل فیلتر کالمن می‌توانیم یک تقریب اولیه برای X_k بدست آوریم.

پیش‌بینی برای مدل در لحظه فعلی:

$$X_k = A_{k-1} X_{k-1} \quad (3-3)$$

این تقریب اولیه معمولاً در مقالات مربوطه به صورت $\hat{X}_k^- = A_{k-1} X_{k-1}$ نشان داده می‌شود که در آن:

\hat{X}_k^- نشان دهنده تقریب و - نشان دهنده زمان قبل از مشاهده است.

به این ترتیب \hat{X}_k^+ یعنی تقریب به روز شده که بعد از مشاهده محاسبه شده است.

همچنین خطاهایی که به همراه هر پیش‌بینی وجود دارد به صورت خطا قبل از مشاهده و خطای بعد از مشاهده تعریف می‌شوند:

$$e_k^+ = X_k - \hat{X}_k^+ \quad (4-3)$$

$$e_k^- = X_k - \hat{X}_k^- \quad (5-3)$$

اکنون p_k^- و p_k^+ را به عنوان کوواریانس این دو خطا در نظر می‌گیریم.

یادآوری می‌شود که این خطاها توسط نویز W_k در رابطه $X_{k+1} = A_k X_k + W_k$ و خطای ناشی از پیش‌بینی ایجاد شده‌اند.

فیلتر کالمن با اندازه‌گیری مقدار $Z_k + H \hat{X}_k^-$ (مشاهده در زمان K) محاسبات را انجام می‌دهد.

در این مرحله هدف این است که یک ماتریس K_k به نام ماتریس بهره کالمن¹ بدست آوریم تا بتوانیم \hat{X}_k^- را به روز نماییم.

تقریب بعد از مشاهده:

$$\hat{X}_k^+ = \hat{X}_k^- + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_k^-) \quad (6-3)$$

ماتریس K_k این خاصیت را خواهد داشت که p_k^+ (کوواریانس e_k^+) را حداقل نماید. که در این صورت به یک فیلتر خطی بهینه دست خواهیم یافت.

برای بدست آوردن K_k داریم:

$$e_k^+ = X_k - \hat{X}_k^+ = X_k - (\hat{X}_k^- + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_k^-)) \quad (7-3)$$

که اگر p_k^+ (کوواریانس e_k^+) را حساب کرده و نسب به K_k دیفرانسیل گرفته و حاصل را برابر صفر قرار دهیم، به رابطه زیر میرسیم.

¹ Kalman Gain Matrix

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (۸-۳)$$

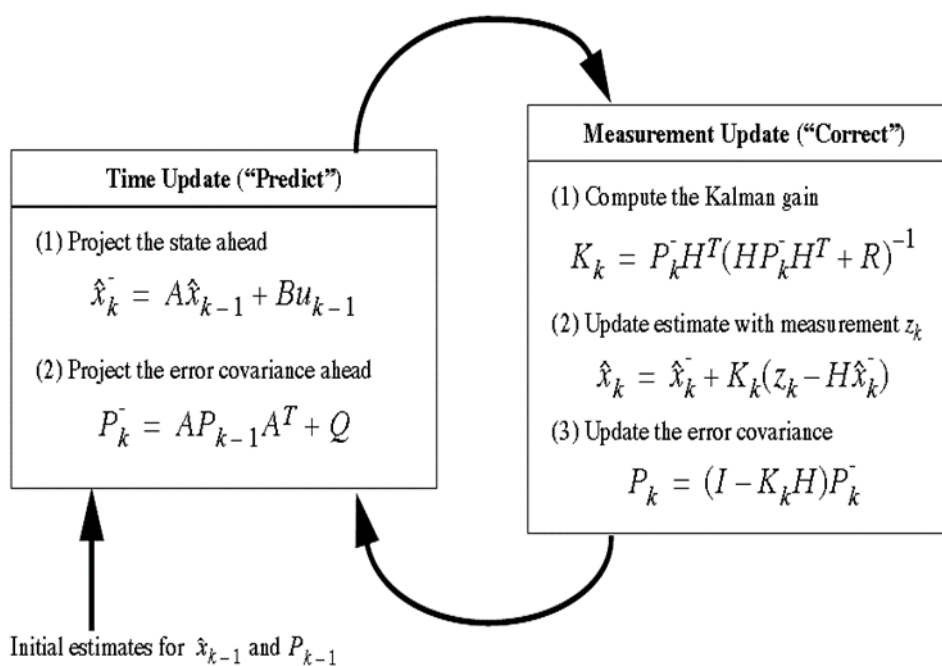
به طوریکه:

$$P_k^- = A_k P_{k-1}^+ A_k^T + Q_{k-1} \quad (۹-۳)$$

و می‌توان نشان داد که کوواریانس خطا بعد از مشاهده برابر است با:

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (۱۰-۳)$$

بنابراین به طور خلاصه الگوریتم تکرار فیلتر کالمن در یک نگاه به شکل زیر خواهد بود.



شکل ۳-۳. الگوریتم تکرار فیلتر کالمن [۳۴].

۳-۳-۳ مزایای فیلتر کالمن

۱- اندازه‌گیری مداوم میزان دقت محل پیش‌بینی شده، که به ما این امکان را می‌دهد بتوانیم مبدا حرکت موشک‌ها و توپ‌های شلیک شده را بدست آورده در صورت لزوم جنگ افزارهای دشمن را از بین ببریم؛ بعلاوه می‌توان نقطه برخورد را نیز پیش‌بینی نمود [۳۴].

۲- در یک سیستم رهگیری اندازه‌گیری‌ها عموماً به ازای هر اسکن دریافت می‌شوند اما گروهی از آنها معتبر نیستند. فیلتر کالمن در عملکرد خود امکان چنین شرایطی را می‌دهد و به هنگام سازی را می‌تواند در صورت از دست دادن اندازه‌گیری‌ها و در نتیجه نابرابر بودن زمان بین دریافت اندازه‌گیری‌های معتبر متوالی به خوبی انجام دهد [۳۴].

۳- امکان استفاده بهینه از اطلاعات پیشین را اگر در دسترس باشند، به ما می‌دهد [۳۴].

۴- اجازه می‌دهد که دینامیک‌های هدف به طور مستقیم برای بهینه کردن پارامترهای فیلتر مورد استفاده قرار گیرند [۳۴].

۳-۳-۴ انواع فیلتر کالمن

۱- فیلتر کالمن توسعه یافته^۱:

یک مشکل عمده در اواسط سال ۱۹۷۵ دانشمندان را به فکر انداخت تا به فکر توسعه فیلتر کالمن باشند. مشکل عمده فیلتر کالمن این بود که محدود به سیستم‌های خطی می‌شد و قابلیت تخمین حالت‌های سیستم‌های غیر خطی را نداشت. حال آنکه در واقعیت اکثر سیستم‌ها دارای ماهیت غیر خطی می‌باشند. لذا با ایجاد تغییراتی در فیلتر کالمن، فیلتری به نام فیلتر کالمن توسعه یافته معرفی شد که قابلیت

¹ Extended Kalman Filter

تخمین حالت‌های سیستم‌های غیر خطی را نیز دارا بود. در واقع این فیلتر مدل غیر خطی را با عنوان مدل خطی تغییر پذیر با زمان تخمین می‌زد [۳۵].

۲- فیلتر کالمن درک نشده^۱

اما یک مشکل دیگر باعث شد تا دانشمندان به فکر بهبود این فیلتر نیز باشند. آن مشکل این بود که در فیلتر کالمن توسعه یافته به دلیل خطی سازی معادلات سیستم غیر خطی که از درجه ۱ می‌باشد، آنها در محاسبه خطای میانگین و کوواریانس دارای انحراف می‌شدند و همین انحراف در معادلات بازگشتی به تدریج موجبات واگرایی تخمین را فراهم می‌نمود. لذا فیلتری جدید در سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۷ توسط دکتر جولیر و دکتر آلمن در کنفرانس‌های کنترل آمریکا معرفی شد. که البته دارای نواقص تئوری و عملی بود که در سال ۲۰۰۰ توسط پروفسور اریک ون و پروفسور ون در مورو از دانشگاه MIT آمریکا، اصلاح گردید و بصورت مقاله‌ای در کنفرانس پردازش سیگنال‌های مخابراتی و کنترل کانادا در سال ۲۰۰۰ ارائه گردید. نام این فیلتر کالمن درک نشده (UKF) بود که علت این نام به دلیل جدید و ناشناس بودن این فیلتر به آن اطلاق شد که مبنای تئوری این فیلتر بر خطی سازی درجه ۲ تیلور استوار بود. که در واقع تخمین‌هایی به مراتب دقیق‌تر از فیلتر کالمن توسعه یافته که دارای خطی سازی درجه ۱ بود از خود نشان می‌داد [۳۶].

۳- فیلتر کالمن توسعه یافته دوگانه

در سال ۱۹۹۷ پروفسور اریک ون و پروفسور الکس نلسون از دانشگاه MIT آمریکا با ارائه ۲ مقاله راه‌گشا، فیلتری بنام فیلتر کالمن توسعه یافته دوگانه (DEKF) را معرفی نمودند. این فیلتر دوگانه، متشکل از یک فیلتر وزن و یک فیلتر حالت بود. بدین ترتیب که فیلتر حالت تخمین‌های سیگنال را با فرض معلوم بودن مدل تهیه می‌کرد و فیلتر وزن، تخمین‌های پارامترها را با فرض معلوم بودن سیگنال بدست می‌داد.

¹ Unscented Kalman Filter

همچنین این فیلتر با مینیمم کردن یک سری توابع معیار قادر به تخمین واریانس نویزهای مشاهده و پروسه نیز بود. که البته این نظریه تا سال ۱۹۹۹ بصورت اجرا در نیامد تا بالاخره در سال ۲۰۰۰ با ارائه نتایج کامل شبیه سازی‌های آزمایشگاهی و واقعی که در لابراتوار موسسه پردازش سیگنال آمریکا (CSLU) صورت گرفته بود، اثبات نمودند که این روش بسیار کارآمد و کاربردی جهت بهبود سیگنال-های صوتی در محیط‌های نویزی واقعی می‌باشد [۳۶].

بدیهی است که با مطالعات روز افزون انجام شده در این زمینه و انجام تغییراتی در نحوه عملکرد فیلتر کالمن انواع دیگری از این فیلتر معرفی شده‌اند که در اینجا از بررسی آنها صرف نظر شده است.

۳-۳-۵ پیشینه استفاده از فیلتر کالمن

فیلترهای کالمن کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف همانند: استفاده به منظور حذف نویز از سیگنال صوتی، ردیابی هدف، در ناوبری، حذف نویز از سیگنال قلب به منظور تشخیص بهتر نوع بیماری و ... دارند که در ادامه بصورت مختصر شرح داده شده است.

۳-۳-۵-۱ حذف نویز از سیگنال صوتی

در سال‌های اخیر با پیشرفت‌های فراوانی که در زمینه علوم مهندسی بدست آمده، ارتباطات جزء مهمترین مباحث مورد بررسی علوم مهندسی و مخابرات قرار گرفته است. با پیشرفت علم، کیفیت و دقت مورد نظر نیز افزایش چشمگیری داشته است. اساس کار این سیستم‌های دیجیتال، دریافت امواج مانند صوت به صورت آنالوگ و تبدیل آن به سیگنال‌های دیجیتال است. سپس بر روی این سیگنال‌های دیجیتال، پردازش اصلی صورت می‌گیرد. در این مرحله این امواج که هم حاوی اطلاعات مفید و هم اطلاعات زاید مانند نویز است، پردازش شده و بسته به نوع نتیجه‌ای که از آن می‌خواهیم اطلاعات فیلتر می‌شوند. حذف نویز از سیگنال‌های صوتی و شفاف سازی آن امروزه بسیار پر کاربرد می‌باشد. نظیر استفاده در تلفن‌های همراه جهت افزایش کیفیت مکالمه و برای این منظور در سال ۲۰۱۵ توسط

Niedzwiecki پژوهشی در این زمینه انجام شد. در این پژوهش به یک سیگنال بدون نویز Autoregressive یک نویز کاملاً تصادفی اضافه گردید و سپس از طریق فیلتر کالمن، سیگنال مطلوب پیش‌بینی گردید. در ادامه روش کار و نتایج آن شرح داده شده است [۳۷].

فرمول بندی فیلتر کالمن جهت حذف نویز و اعوجاج بر مبنای فضای حالت می‌باشد. از بردار $x(m)$ به منظور معرفی سیگنال نویزی و جهت معرفی سیگنال مطلوب خروجی، از بردار $y(m)$ استفاده می‌شود که به صورت زیر از این بردارها جهت معادل سازی فضای حالت فیلتر و خروجی آن بهره می‌بریم [۳۷].

$$X_m = AX_{m-1} + BU_m + e_m \quad (۱۱-۳)$$

$$y_m = HX_m + n_m \quad (۱۲-۳)$$

که در اینجا:

$x(m)$: بردار پارامترهای حالت در زمان m با بعد P

A : ماتریس انتقال حالت با بعد $P * P$ که در واقع بیانگر رابطه‌ی حالت‌های فرآیند سیستم در زمان m و $m-1$ می‌باشد.

B : ماتریس کنترل با ابعاد $P * P$ در مدل سازی کنترل فرآیندها

$U(m)$: ورودی کنترل با بعد p

$e(m)$: بردار ورودی ناهمبسته تحریک معادلات حالت، $e(m)$ دارای توزیع نرمال گوسی می‌باشد.

$N(m)$: بردار نویز با بعد M با توزیع نرمال گوسی

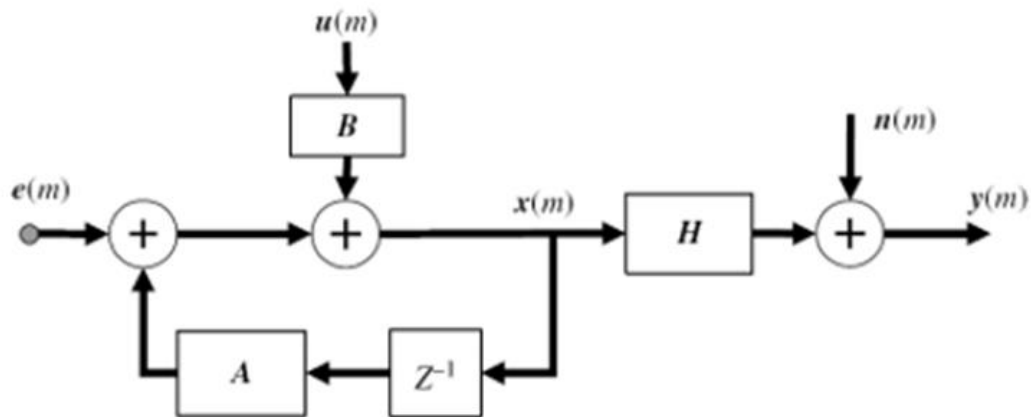
Q : ماتریس کواریانس $E(m)$ با ابعاد $P * P$

$Y(m)$: بردار خروجی اعوجاج دار و نویزی

H : ماتریس اعوجاج کانال با ابعاد $M * R$

R : ماتریس کواریانس (m) با ابعاد $M \times M$

شکل ۳-۴ نمودار بلوکی فیلتر کالمن می باشد. در این شکل محل بردارهای $x(m)$ و $y(m)$ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴. نمودار بلوکی فیلتر کالمن جهت حذف نویز [۳۷].

البته باید گفت ورودی $u(m)$ بیشتر در مواردی مثل رهگیری و ردیابی مورد استفاده قرار می گیرد و در زمینه هایی مانند پردازش سیگنال های مخابراتی و پردازش صوت می توان از آن صرف نظر کرد. در نتیجه معادلات مربوط به فیلتر کالمن به صورت معادلات زیر خلاصه می شود.

$$X_m = AX_{m-1} + e_m \quad (۳-۱۳)$$

$$y_m = HX_m + n_m \quad (۳-۱۴)$$

حال نوبت به کارگیری این معادلات می باشد. جهت استفاده از این معادلات می بایست طبق الگوریتمی که در ادامه خواهد آمد عمل کرد. خروجی مشاهده شده که نویزی و اعوجاج دار می باشد را به عنوان ورودی فیلتر کالمن قرار می دهیم. با استفاده از الگوریتم زیر می توان یک تخمین از سیگنال اصلی و مطلوب که فاقد نویز و اعوجاج می باشد، به دست آورد [۳۷].

الگوریتم فیلتر کالمن برای حذف نویز از صدا

شرایط اولیه

ماتریس کواریانس پیش بینی خطا از معادله (۱۵-۳) بدست می آید.

$$P(0| - 1) = \delta I \quad (15-3)$$

پیش بینی خروجی به صورت معادله (۱۶-۳) نشان داده شده است.

$$\hat{x}(0| - 1) = 0 \quad (16-3)$$

الگوریتم برای m هایی به صورت $m = 1, 0, \dots$ توسط معادلات زیر ادامه پیدا می کند.

معادلات به روز شده ی پیش بینی فرآیند

معادله ی پیش بینی حالت به صورت کلی به فرم معادله (۱۷-۳) می باشد.

$$\hat{x}(m|m - 1) = A\hat{x}(m - 1) \quad (17-3)$$

ماتریس کواریانس پیش بینی خطا در حالت کلی مطابق معادله ۱۸-۳ است.

$$P(m|m - 1) = AP(m - 1)A^T + Q \quad (18-3)$$

معادلات مربوط به تخمین سیگنال

بردار گین کالمن از معادله (۱۹-۳) بدست می آید.

$$K(m) = P(m|m - 1)H^T(HP(m|m - 1)H^T + R)^{-1} \quad (19-3)$$

حالت (تخمین) به روز شده کلی توسط معادله (۲۰-۳) تعیین می شود.

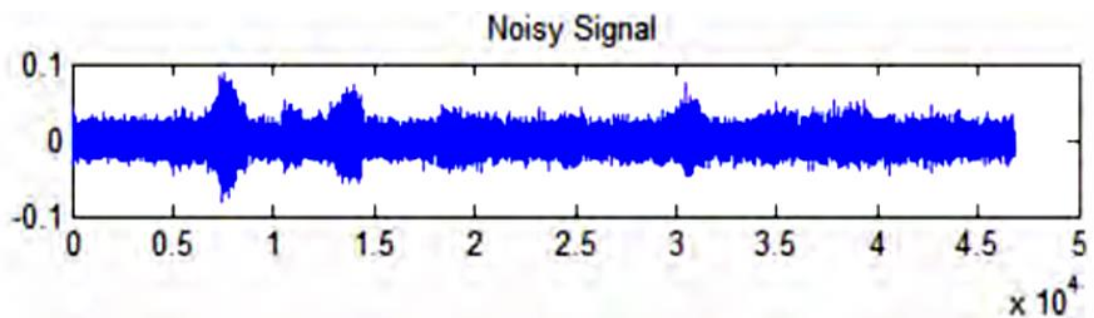
$$\hat{x}(m) = \hat{x}(m|m - 1) + K(m)(y(m) - H\hat{x}(m|m - 1)) \quad (20-3)$$

ماتریس کواریانس تخمین خطا نیز در معادله (۳-۲۱) نشان داده شده است.

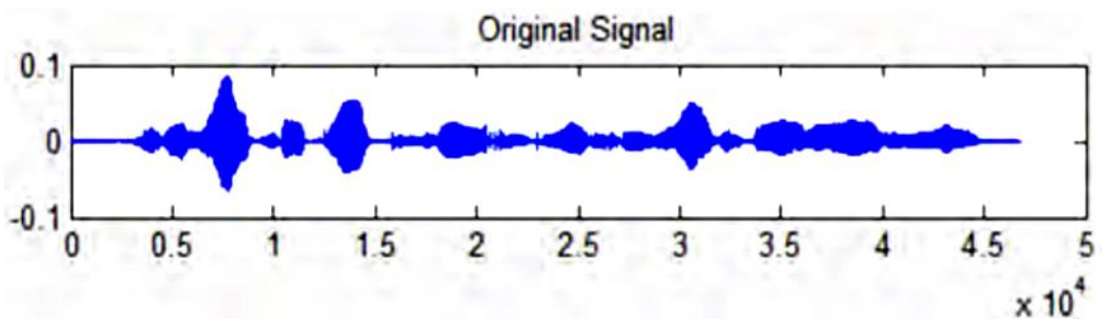
$$P(m) = [I - KH]P(m|m - 1) \quad (۳-۲۱)$$

در اشکال ۳-۵، ۳-۶ و ۳-۷ به ترتیب نمودارهای سیگنالی نویزی و سیگنال مطلوب و سیگنال

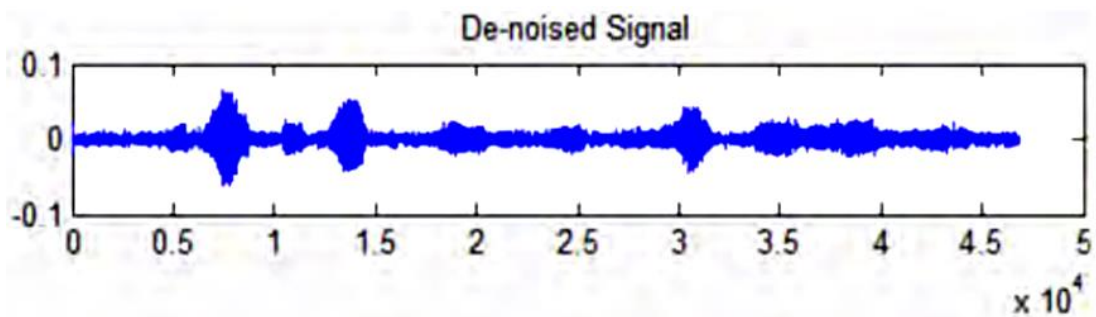
بدون نویز تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن نمایش داده شده است [۳۷].



شکل ۳-۵. نمودار سیگنال نویزی [۳۷].



شکل ۳-۶. نمودار سیگنال مطلوب [۳۷].



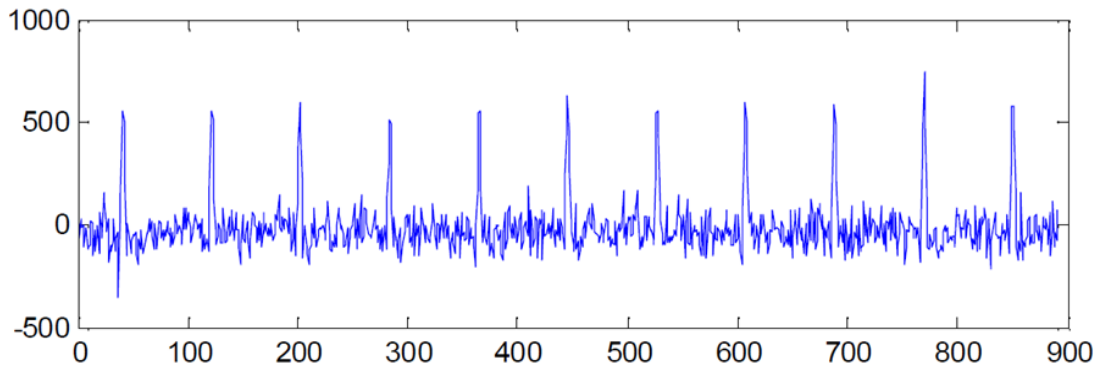
شکل ۳-۷. نمودار حاصل از فیلتر کالمن [۳۷].

کیفیت عملکرد فیلتر طراحی شده را با مقایسه سیگنال ورودی و خروجی می‌توان دریافت که البته با مقایسه این دو می‌توانیم به این نتیجه برسیم که فیلتر کالمن طراحی شده به نحو مناسب و مطلوبی نویزهای اضافه شده به سیگنال صوتی را حذف نموده است.

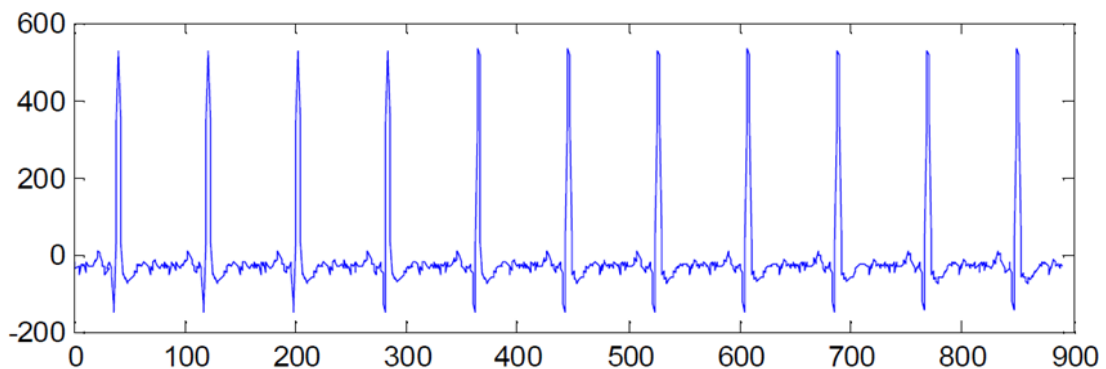
۳-۳-۵ حذف نویز از سیگنال قلب

سیگنال الکتروکاردیوگرام (ECG) یک نمایش گرافیکی از فعالیت قلبی است و یک سری اندازه‌گیری‌های اولیه را برای شناسایی بیماری‌ها و ناهنجاری‌های مختلف قلبی ارائه می‌دهد. به طور کلی، سیگنال‌های ECG مشخصات مورفولوژیکی یکسانی دارند و نسبت به سایر سیگنال‌های بیولوژیکی اهمیت بیشتری دارند. با پردازش و تحلیل این تغییرات مورفولوژیکی می‌توان بسیاری از بیماری‌های قلبی را به صورت بصری تشخیص داد. اما وجود انواع نویز و اغتشاشات در سیگنال ECG، تشخیص بصری و استخراج ویژگی برای بسیاری از کاربردهای متفاوت مانند اندازه‌گیری استرس، تخمین هیجان و واسطه انسان و کامپیوتر را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. به منظور حذف نویز و استخراج سیگنال ECG از طریق مورفولوژی کارا روش‌های پیش پردازش متنوعی در چند دهه گذشته ارائه شده است. استخراج سیگنال ECG با رزولوشن بالا از رکوردهای آغشته به نویزهای زمینه، موضوع مهمی بوده که مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. هدف از بهبود سیگنال ECG جداسازی مولفه‌های مهم و معتبر سیگنال از آرتیفکت‌های نامطلوب است، به گونه‌ای که یک سیگنال ECG حاصل شود که بتوان به راحتی و به صورت صحیح آن را تفسیر نمود. روش‌های متعددی به منظور استخراج مولفه‌های سیگنال ECG آغشته به نویز زمینه ارائه شده که اندازه‌گیری مشخصه‌های دقیق و جزئی در سیگنال ECG را امکان‌پذیر کرده است. یکی از متداول‌ترین روش‌های ارائه شده ساختار فیلترهای تطبیقی است که به منظور حذف نویز از سیگنال آغشته به نویز انحراف از خط مبنا، نویز سیگنال ماهیچه‌ای (EMG) و آرتیفکت‌های حرکتی مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور در سال ۱۳۹۴ پژوهشی در زمینه حذف نویز از سیگنال ECG توسط معصومه آشوری راد انجام گردید. در این پژوهش از فیلتر

کالمن که قادر است تغییرات دینامیکی سیگنال ECG را با استفاده از تخمین و به روز رسانی ماتریس کوواریانس نویز به ازای هر داده جدید مدل سازی کند، استفاده شده است. در ادامه اشکال ۳-۸ و ۳-۹ به ترتیب سیگنال قلب همراه با نویز و خروجی بدست آمده از فیلتر کالمن را نشان می دهند [۳۸].



شکل ۳-۸. سیگنال قلب همراه با نویز [۳۸].



شکل ۳-۹. خروجی فیلتر کالمن [۳۸].

با توجه به خروجی فیلتر کالمن، مشخص است که فیلتر کالمن تا حد قابل قبولی نویز سیگنال را حذف کرده است.

۳-۳-۳-۵-۳ ردیابی هدف زیر آب

شبکه های حسگر، شبکه های سنسوری بی سیمی هستند که از تعداد زیادی نودهای کوچک، ارزان قیمت، با مصرف انرژی پایین تشکیل شده اند. شبکه های حسگر بی سیم زیر آب گونه ای از شبکه های حسگر هستند که در محیط زیر آب قرار می گیرند و توسط امواج صوتی با یکدیگر ارتباط دارند. با توجه به

اینکه نزدیک به ۷۰ درصد سطح کره زمین پوشیده از آب است، بنابراین نقاط زیادی وجود دارند که تاکنون مورد اکتشاف قرار نگرفته‌اند. شبکه‌های حسگر بی‌سیم زیر آب دارای قابلیت‌هایی هستند که توانایی انسان را در مشاهده و پیش‌بینی کاربردهای اکتشاف نشده مرتبط با دریاها و اقیانوس‌ها افزایش می‌دهند. امروزه از شبکه‌های حسگر بی‌سیم زیر آب جهت بررسی آلودگی‌های اقیانوس‌ها، بررسی مناطقی که در آنها احتمال وجود نفت و گاز وجود دارد، بررسی زمین لرزه‌های زیر آب، بررسی وجود ماهی‌ها و نظارت و مراقبت بر عبور زیردریایی‌ها و شناورها استفاده می‌شود. گره حسگر زیر آب گونه‌ای حسگر است که قادر است امواج صوتی را دریافت، پردازش و ارسال نماید. این گره‌ها برای دریافت امواج صوتی از هیدروفن (میکروفن زیر آب) و برای ارسال امواج صوتی از بلندگوی زیر آبی استفاده می‌کنند. درون این نوع حسگرها از مودم صوتی زیر آب استفاده می‌شود. این مودم عمل تبدیل سیگنال را انجام می‌دهد یعنی سیگنال صوتی را دریافت و آن را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کنند و بالعکس. در سال‌های اخیر برای هوشمند کردن و بدست آوردن اطلاعات دقیق از دریاها و اقیانوس‌ها، استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم زیر آبی مورد توجه قرار گرفته است و ردیابی یکی از کاربردهای اصلی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم زیر آب می‌باشد. به گونه‌ای که دومین رده مطالعات و تحقیقات انجام شده بر شبکه‌های حسگر بی‌سیم در حوزه ردیابی هدف صورت گرفته است. به منظور ردیابی در زیر آب از ربات زیردریایی (AUV) استفاده می‌شود. AUV‌ها در زیر آب متحرکند و ما بین گره‌های حسگر حرکت می‌کنند تا داده‌های آنها را جمع‌آوری نمایند. شبکه‌هایی از گره‌های حسگر بی‌سیم و AUV‌ها می‌توانند نمونه برداری مفید، خلاصه و جامعی از محیط سه بعدی ساحل اقیانوس‌ها فراهم آورند. از وجود AUV‌ها به منظور جمع‌آوری دقیق‌تر و ساده‌تر و مطمئن‌تر داده‌ها بهره می‌گیرد. از AUV‌ها نیز استفاده می‌شود تا مصرف انرژی در گره‌های حسگر کمتر شود و داده‌های بیشتر و جامع‌تری بدست آید. با استفاده از AUV‌ها قابلیت اعتماد این نوع شبکه‌ها افزایش می‌یابد. آنها از راه دور برای حرکت کنترل می‌شوند و می‌توان آنها را به مکان‌هایی که تراکم داده بیشتری وجود دارد هدایت کرد. می‌توان با استفاده

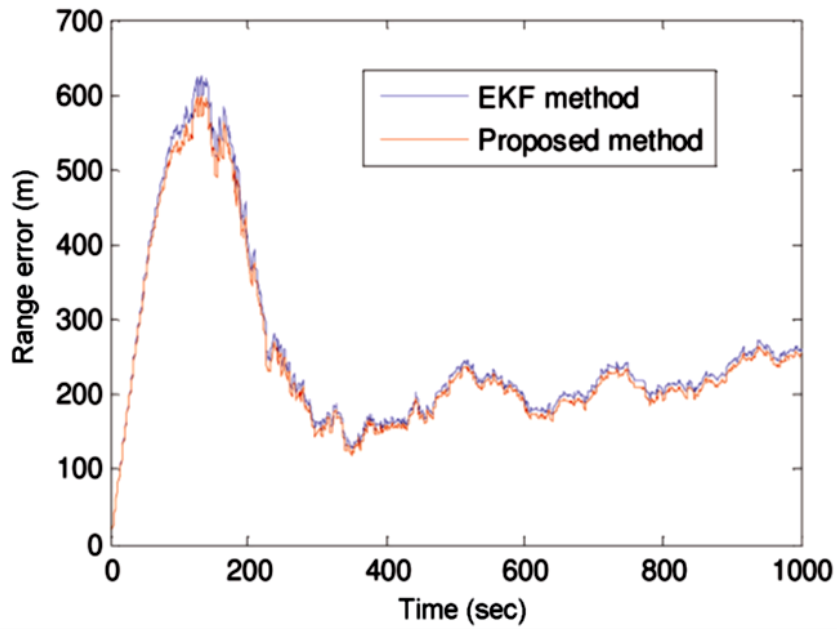
از تکنیک‌های هوش مصنوعی حرکت AUV ها را هوشمند نمود تا بدون نیاز به دخالت و کنترل انسان به کار خود ادامه دهد [۳۹].

جهت ردیابی هدف در شبکه‌های حسگر بی‌سیم زیر آب از فیلتر کالمن استفاده می‌شود، فیلتر کالمن یک مکانیزم ریاضی است که برای تخمین حالت‌های سیستم بکار می‌رود. فیلتر کالمن حالت‌های یک سیستم را از طریق اندازه‌گیری‌های همراه با خطا برآورد می‌کند. فیلتر کالمن از پویایی هدف بهره می‌گیرد تا تأثیرهای پارازیت را از بین ببرد و یک برآورد خوب از موقعیت هدف را ارائه دهد. با توجه به اینکه ردیابی هدف یکی از اهداف مهم در شبکه حسگر بی‌سیم زیر آب می‌باشد. در سال ۲۰۱۵ پژوهشی در زمینه بررسی دقت ردیابی با استفاده از فیلتر کالمن گسترش یافته^۱ و روش ابداعی BEOT توسط ناگامی و همکاران^۲ انجام گردید. هدف انجام این پژوهش مقایسه بین روش ابداعی و فیلتر کالمن در تشخیص هدف و میزان خطای بین این دو روش بود. در این پژوهش با استفاده از معادلات فیلتر کالمن گسترش یافته و نیز معادلات ابداعی که همان معادلات فیلتر کالمن بودند که در آنها یکسری تغییراتی اعمال شده بود، دقت تخمین مکان و سرعت هدف در زیر آب بین این دو روش مقایسه گردید [۳۹].

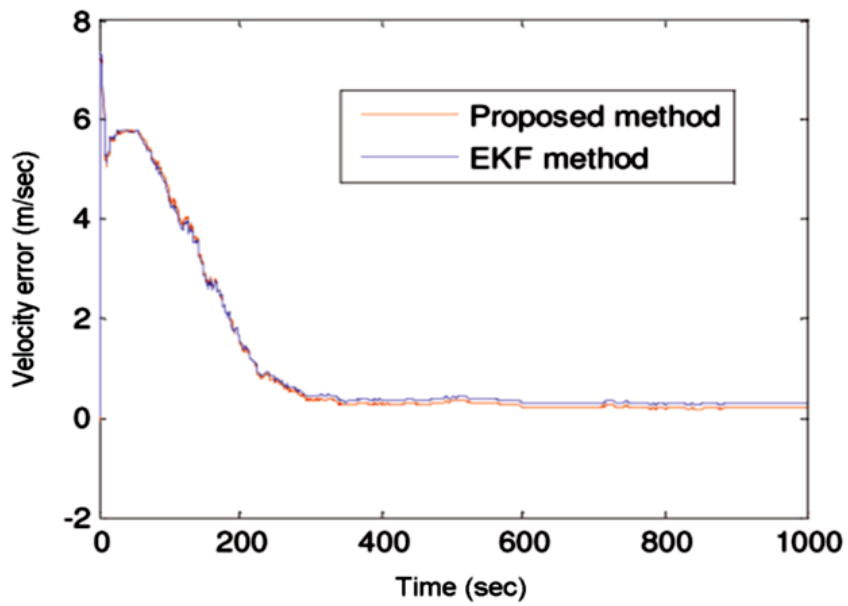
شکل ۳-۱۰ و ۳-۱۱ به ترتیب خطای تخمین مکان و سرعت برای فیلتر کالمن گسترش یافته و روش BEOT نشان می‌دهد.

¹ EKF

² Nagamani Modalavalasa, G. Sasibhushana Rao, K.Satya Prasad, L. Ganesh, M.N.V.S.S. Kumar



شکل ۳-۱۰. نمودار خطای تخمین مکان [۳۹].



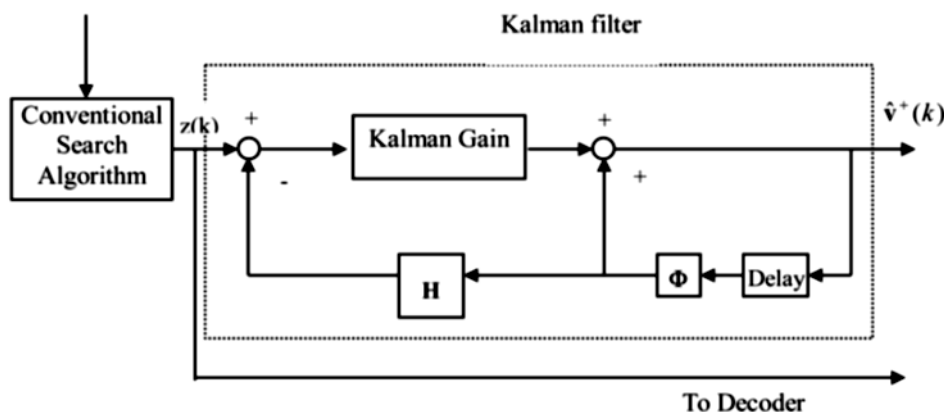
شکل ۳-۱۱. نمودار خطای سرعت [۳۹].

۳-۳-۵-۴ تخمین حرکت در تصاویر متحرک

در سال ۲۰۰۳ Nathan Funk برای تخمین حرکت از فیلتر کالمن استفاده نمود، همان طور که قبلاً نیز ذکر شد، فیلتر کالمن ابتدا اقدام به ارائه یک پیش‌بینی از سیستم می‌کند و سپس با استفاده از نتیجه‌ای که از سیستم اندازه‌گیری دریافت می‌کند، عملیات تصحیح پارامتر مورد نظر را انجام می‌دهد. به عنوان مثال، در مبحث ردیابی اشیا متحرک، این فیلتر ابتدا پیش‌بینی اولیه‌ای از مکان جسم انجام داده و سپس آن را تصحیح می‌کند. در مورد بحث تخمین حرکت در تصاویر متحرک، این پیش‌بینی اولیه باید بر روی بردار حرکت اولیه برای بلوک تحت بررسی انجام پذیرد [۴۰].

می‌دانیم معمولاً در تصاویر متحرک بلوک‌های مجاور تا حدودی دارای حرکت شبیه به هم هستند. میزان این شباهت از بلوکی به بلوک دیگر متفاوت می‌باشد. اما در اکثر موارد شباهت کافی برای ایجاد امکان استخراج بردار حرکت اولیه مناسب با استفاده از بلوک‌های مجاور وجود دارد. فیلتر کالمن نیز از همین شباهت‌ها برای استخراج بردار حرکت اولیه مناسب برای استفاده در گام پیش‌بینی‌اش بهره می‌گیرد [۴۰]. در واقع این فیلتر ابتدا با ترکیب بردارهای حرکت بلوک‌های همسایه، گام پیش‌بینی خود را انجام داده و سپس با استفاده از مقدار اندازه‌گیری شده توسط سیستم اندازه‌گیر (این سیستم می‌تواند هر یک از الگوریتم‌های متداول تطبیق بلوکی باشد)، اقدام به اجرای گام تصحیح خود می‌کند. این روند دارای مزایای بسیاری است. شاید مهمترین این مزایای ارائه دقت کسری (زیر پیکسل) آن هم بدون اضافه کردن نرخ بیت باشد. همانطور که می‌دانیم، خروجی تصحیح شده فیلتر کالمن مقداری کسری دارد که به خودی خود منجر به ارتقاء کیفیت الگوریتم تخمین حرکت می‌گردد. اما مشکلی که معمولاً الگوریتم‌های مولد دقت زیر پیکسلی به وجود می‌آورند این است که برای ارسال این بردارهای حرکت اعشاری به سیستم گیرنده نیاز به افزایش نرخ بیت ارسالی دارند. ولی فیلتر کالمن بدون کمترین افزایشی در این نرخ، اقدام به تولید دقت زیر پیکسلی می‌نماید. دلیل این امر بدین صورت قابل توضیح است که اساساً هیچ نیازی به ارسال بردارهای حرکت اعشاری از سیستم فرستنده به سیستم گیرنده وجود ندارد و بخش فرستنده فقط اقدام به ارسال بردارهای حرکت به دست آمده از سیستم اندازه‌گیر

که مقادیری صحیح دارند، خواهد کرد. در بخش گیرنده، فیلتر کالمنی مانند فیلتر بخش فرستنده پیاده سازی می‌شود. مقادیر زیر پیکسل بردارهای حرکت، با استفاده از جایگذاری مجدد بردارهای حرکت بلوک‌های همسایه (که قبلاً ارسال شده است) و مقدار بردار حرکت اندازه گیری شده ارسالی برای بلوک تحت بررسی (که عددی صحیح می‌باشد) استخراج خواهد شد. پس هیچ نیازی به افزایش نرخ بیت ارسالی نمی‌باشد. در مورد نحوه استفاده از دقت زیر پیکسل، همانطور که می‌دانیم پس از محاسبه مکان دقیق با دقت کسری باید از یک روش درون‌یاب استفاده کنیم. روش‌های متعددی برای این منظور موجودند، لیکن اغلب از روش درون‌یابی دوسویه استفاده می‌گردد. شکل ۳-۱۲ ساختار کلی الگوریتم مطرح شده را نشان می‌دهد [۴۰].



شکل ۳-۱۲. ساختار کلی تخمین حرکت با فیلتر کالمن [۴۰].

۳-۴ فیلتر کالمن استفاده شده در این پژوهش

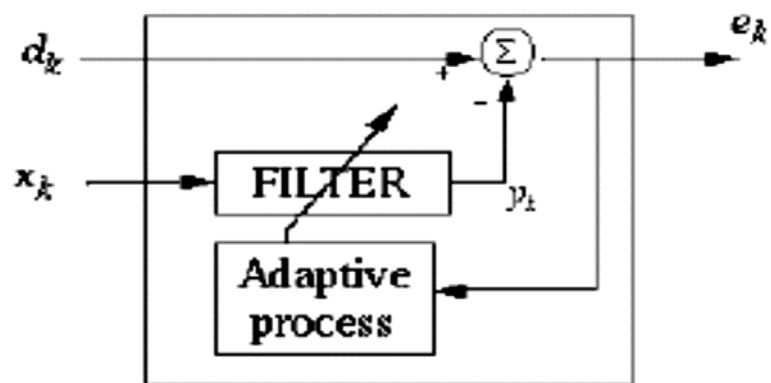
یکی از مسائل مهم در طراحی فیلترهای کالمن، تعیین نوع سیستم موجود است. نوع سیستم نقش مهمی در تعیین معادلات فیلتر کالمن و نوع آن داراست. البته سنجش اعتبار تخمین نیز از شرایط مهم در تعیین نوع فیلتر کالمن می‌باشد.

سیستم در واقع ارتباط بین ورودی و خروجی مورد نظر را بیان می‌کند. نوع سیستم می‌تواند خطی یا غیر خطی و گسسته یا پیوسته باشد.

سنجش اعتبار تخمین در واقع میزان خطا بین سیگنال خروجی و سیگنال مطلوب را نشان می-

دهد.

در این پژوهش از فیلتر کالمن خطی استفاده شده است و نوع سیستم خطی فرض شده است. با توجه به توضیحاتی که در بخش‌های قبلی از فیلتر کالمن داده شده است، در این پژوهش سیگنال ورودی در واقع مقادیر شتاب دریافتی ناشی از زلزله توسط سنسور و سیگنال مطلوب، سیگنال صفر است، شکل ۳-۱۳. بدین معنی که هدف خنثی سازی موج زلزله می‌باشد.



شکل ۳-۱۳. الگوریتم کالمن استفاده شده در این پژوهش

✓ مقادیر شتاب زلزله = x_k

✓ سیگنال صفر = d_k

✓ عکس مقادیر تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن = y_k

✓ اختلاف بین مقادیر تخمینی و مقادیر دریافتی شتاب = e_k

✓ الگوریتم کالمن = Adaptive process

فصل ۴: مدل سازی و نتیجه گیری

۴-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا توضیحاتی در زمینه روش کار و نحوه عملکرد فیلتر کالمن در این پژوهش، همراه با مثالی عددی ارائه شده است. سپس تأثیر وجود تولید کننده موج نسبت به حالتی که وجود ندارد، بر روی میزان جابه‌جایی، دامنه شتاب، سرعت و انرژی زلزله بررسی شده است. بررسی‌ها در دو مرحله که شامل طراحی الگوریتم فیلتر کالمن در نرم‌افزار متلب و مدلسازی در نرم‌افزار پلکسیس هستند، انجام شده است. در مرحله طراحی الگوریتم فیلتر کالمن در نرم‌افزار متلب، موج پیش بینی شده توسط فیلتر کالمن محاسبه شده است. در مرحله مدلسازی در پلکسیس به تأثیر تولید کننده موج بر روی پارامترهای جابه‌جایی، شتاب و نیروی ناشی از زلزله در سطح خاک و همچنین در سازه مدل شده پرداخته شده است. این تحلیل و بررسی برای سه زلزله Sierra madre سال ۱۹۹۱، Northridge سال ۱۹۹۴، Cape Mendocino سال ۱۹۹۲ انجام گردیده است.

۴-۲ روش کار

ایده این پژوهش در واقع استفاده از یک ژنراتور موج در زیر سازه و متصل به پی می‌باشد، که این ژنراتور موج دارای یک سنسور شتاب سنج زلزله است. همچنین این ژنراتور دارای یک چیپ پردازشگر دیجیتالی است که محاسبات عددی مربوط به الگوریتم فیلتر کالمن نوشته شده بر روی این چیپ پردازشگر را انجام می‌دهد. هنگام وقوع زلزله سنسور شتاب سنج با دریافت اولین مقدار شتاب زلزله، شروع به کار می‌نماید و با استفاده از الگوریتم فیلتر کالمن نوشته شده شروع به نوسان می‌کند. در ادامه الگوریتم فیلتر کالمن که بصورت اختصاصی برای این پژوهش طراحی شده، بیان شده است.

۴-۲-۱ الگوریتم فیلتر کالمن با هدف خنثی سازی زلزله

گام اول = مقداردهی اولیه

۱- در این گام با توجه به نوع فیلتر کالمن انتخابی (فیلتر کالمن خطی)، ضرایب مدل (A و H) در نظر گرفته می‌شوند که برای این پژوهش این ضرایب ۱ فرض شده‌اند.

A و H ماتریس‌های ضرایب هستند، که ماتریس A ارتباط بین حالت فرآیند در مرحله K-1 با حالت فرآیند در مرحله K را مشخص می‌کند و ماتریس H ارتباط بین مقدار واقعی فرآیند در مرحله K با مقدار مشاهده شده فرآیند در مرحله K را مشخص می‌کند. این ماتریس‌ها در حالت کلی می‌توانند در هر مرحله اندازه‌گیری تغییر کنند اما معمولاً در تمام مراحل اندازه‌گیری ثابت فرض می‌شوند. با توجه به اینکه ارتباط بین مقادیر شتاب در هر مرحله تغییر می‌نماید و ثابت نیست، بدین معنی که در هر مرحله مقادیر شتاب نسبت به مرحله قبلی امکان افزایش و یا کاهش را دارد، از اینرو ضریب A که واحدی ندارد ۱ فرض شده است. بدین معنی که تخمین حالت فرآیند در هر مرحله متناسب با مرحله قبل است. با توجه به اینکه در این پژوهش هدف تولید مقدار شتابی به اندازه شتاب دریافتی توسط سنسور می‌باشد و هدف ما حذف نویز نیست، از اینرو ضریب بدون واحد H نیز ۱ فرض شده است. بدین معنی که مقدار واقعی فرآیند برای این پژوهش همان مقدار مشاهده شده است. ($H=1$ ، $A=1$)

۲- برای اولین مقدار تخمینی شتاب (\hat{x}_1)، مقداری در نظر گرفته می‌شود.

در این پژوهش مقدار صفر برای \hat{x}_1 فرض شده است و می‌توان هر مقدار دیگری را فرض نمود. در واقع این مقدار اولین مقدار تولیدی دستگاه تولید کننده موج و شروع کننده الگوریتم فیلتر کالمن می‌باشد.

۳- برای پارامتر کواریانس خطای تخمین اولیه (P_1)، مقداری در نظر گرفته می‌شود.

در این پژوهش مقدار P_1 ، ۱ در نظر گرفته شده است.

۴- برای Q و R که به ترتیب کواریانس خطای فرآیند و کواریانس خطای اندازه‌گیری هستند، مقدار ثابتی در نظر گرفته می‌شود. این مقادیر ممکن است در هر لحظه تغییر نمایند اما فرض می‌کنیم که آنها مقداری ثابت هستند.

ماتریس R عکس میزان دقت اندازه‌گیری سنسور ثبت شتاب را نشان می‌دهد. هرچه این مقدار کمتر باشد تأثیر داده‌های اندازه‌گیری بر روی بروز کردن حالت فرآیند بیشتر می‌شود. ماتریس Q عکس میزان دقت مدل را نشان می‌دهد. هرچه مقدار Q بیشتر باشد بدین معنی است که اعتماد به مدل سیستم کم است و تأثیر داده‌های اندازه‌گیری شده توسط سنسور در بروز کردن حالت فرآیند بیشتر می‌شود. در اصل به منظور محاسبه مقدار Q باید از روش‌های تطبیقی نظیر دنباله ابداع [۴۱] استفاده شود، که در این روش درایه‌های ماتریس Q بروز رسانی می‌شوند.

با توجه به اینکه در این پژوهش تمامی مقادیر حقیقی در نظر گرفته شده‌اند و خروجی فیلتر نیز باید مقادیر حقیقی باشد از اینرو در این پژوهش مقداری برای پارامتر Q فرض شده است. اما نکته مهم در مقدار پارامتر Q این است، که اگر مقدار Q نسبت به مقدار واقعی خودش کمتر فرض شود، مشکلی در روند فیلتر کالمن ایجاد نمی‌شود. همچنین اگر مقدار R نسبت به مقدار واقعی خودش بیشتر فرض شود مشکلی در فرآیند فیلتر کالمن ایجاد نمی‌شود [۴۱].

با توجه به تعاریف بالا مقدار R برای سنسور شتاب سنج برابر $0.05g$ فرض شده است. و مقدار Q نیز برابر $0.05g$ فرض شده است.

گام دوم = اندازه‌گیری مقدار شتاب توسط سنسور

در این مرحله با استفاده از سنسورهای موجود، شتاب وارده زلزله در هر Δt (فاصله زمانی ثبت شتاب توسط سنسور) اندازه‌گیری می‌شود. یعنی در این مرحله مقادیر \hat{Z}_{k-1} اندازه‌گیری می‌شوند.

گام سوم = اصلاح تخمین و تولید خروجی

۱- در این مرحله با استفاده از مقادیر تخمینی برای شتاب و کواریانس خطای تخمین، با استفاده از فرمول تعریف شده، مقادیر کواریانس خطای تخمین و شتاب تخمینی اولیه بروز رسانی می‌شوند.

$$\hat{X}_k^- = A\hat{x}_{k-1} \quad (1-4)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (2-4)$$

۲- محاسبه ضریب فیلتر کالمن (K_k)

$$K_k = P_k^-(P_k^- + R)^{-1} \quad (3-4)$$

۳- با استفاده از شتاب اولیه اصلاح شده و از طریق رابطه تعریف شده، خروجی فیلتر کالمن که همان شتاب پیش‌بینی شده است، محاسبه می‌شود.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k(\hat{Z}_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) \quad (4-4)$$

۴- کواریانس خطای تخمین طبق معادله تعریف شده بروز رسانی می‌شود.

$$P_k = (1 - K_k)P_k^- \quad (5-4)$$

۵- مقادیر محاسبه شده از بخش ۲ و ۳ گام سوم به عنوان ورودی برای تخمین شتاب برای مرحله بعدی یا Δt ثانیه بعدی در نظر گرفته می‌شود. و دوباره مراحل ذکر شده تکرار می‌گردد.

(Δt) = فاصله زمانی ثبت مقادیر شتاب توسط سنسور و یا فاصله زمانی بین مرحله k با مرحله k-1

می‌باشد.

۴-۲-۲ مثال عددی

فرض کنید برای تخمین مقادیر شتاب زلزله Northridge از یک فیلتر کالمن خطی استفاده شده

است. جدول ۴-۱ مقادیر شتاب دریافتی زلزله و فاصله‌های زمانی ثبت آن را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱. مقادير شتاب زلزله

مرحله (k)	زمان (ثانيه)	شتاب (متر مربع / ثانيه)
۱	۰	۰/۰۵۱۹۳
۲	۰/۰۲	۰/۰۲۰۲۸۵
۳	۰/۰۴	۰/۰۰۱۳۳۸
۴	۰/۰۶	-۰/۰۰۳۷۸
۵	۰/۰۸	-۰,۰۱۰۴۹
۶	۰/۱	-۰/۰۱۲۱۸
۷	۰/۱۲	-۰/۰۱۷۱۴
۸	۰/۱۴	-۰/۰۳۲۹۳
۹	۰/۱۶	-۰/۰۲۹۱۹
۱۰	۰/۱۸	۰/۰۰۰۶۲۷
۱۱	۰/۲	-۰/۰۲۴۳
۱۲	۰/۲۲	۰/۰۰۳۶۴۶
۱۳	۰/۲۴	۰/۱۰۵۹۱
۱۴	۰/۲۶	۰/۱۰۴۳۰
۱۵	۰/۲۸	-۰/۰۱۵۷۶
۱۶	۰/۳	-۰/۱۸۳۱۰

جدول ۴-۱. مقادیر شتاب زلزله

مرحله (k)	زمان (ثانیه)	شتاب (متر مربع / ثانیه)
۱	۰/۸۲	۰/۱۲۰۸۳
۲	۰/۸۴	-۰/۱۸۳۸۱
۳	۰/۸۶	-۰/۱۶۰۰۵
۴	۰/۸۸	۰/۲۱۴۴۴
۵	۰/۹	۰/۰۶۱۲۸

گام اول:

۱- حدس اولیه: در این مرحله برای ماتریس‌های A ، H ، P_1 و \hat{x}_1 مقادیری فرض می‌شود. ($K=2, \dots, N$)

$$\hat{x}_1 = 0 \text{ و } P_1 = 1.01, A=1, H=1$$

۲- برای ماتریس‌های Q و R نیز مقادیری فرض می‌شود. (Q و R) کواریانس نویز اندازه‌گیری و فرآیند

است، که می‌تواند در هر مرحله اندازه‌گیری تغییر کند، اما معمولاً ثابت فرض می‌شود.

در این مثال برای Q و R مقادیر 0.05 در نظر گرفته شده است. بدین معنی که واریانس خطای

سنسور اندازه‌گیری و واریانس خطای پیش‌بینی برابر 0.05 در نظر گرفته شده است.

گام دوم= با استفاده از حدس اولیه P_1 و \hat{x}_1 (از مرحله $k-1$) مقادیر رو به جلو \hat{x}_k^- و P_k^- در مرحله k

ام محاسبه می‌شود، ($K=2$).

$$\hat{X}_2^- = A\hat{x}_{k-1} = A\hat{x}_1 = 1 * 0 = 0$$

$$P_2^- = AP_{k-1} + Q = AP_1 + Q = (1 * 1.01) + 0.05 = 1.06$$

گام سوم: محاسبه K_k :

$$K_2 = (R + P_k^-)^{-1} * P_k^- = (R + P_2^-)^{-1} * P_2^- = (0.05 + 1.06)^{-1} * 1.06 = 0.9549$$

گام چهارم: محاسبه خروجی تخمینی

$$\hat{x}_2 = \hat{x}_{k-1} + K_K(\hat{Z}_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) = \hat{x}_1 + K_2(\hat{Z}_1 - \hat{x}_1) = 0 + 0.9549(0.05193 - 0) = 0.04959$$

گام پنجم: بروزرسانی کواریانس خطای تخمین

$$P_2 = (1 - K_2)P_2^- = (1 - 0.9549) * 1.06 = 0.048$$

مجدد این گامها از ابتدا برای پیش‌بینی مقدار شتاب در مرحله بعدی یا همان مقدار شتاب در Δt

بعدی محاسبه می‌شود.

جدول ۲-۴ مقادیر پیش‌بینی شده توسط فیلتر کالمن برای مقادیر شتاب ناشی از زلزله نشان می‌دهد.

دهد.

جدول ۲-۴. مقادیر شتاب پیش‌بینی شده.

مرحله (k)	زمان (ثانیه)	شتاب پیش‌بینی شده (متر مربع/ثانیه)	شتاب زلزله (متر مربع/ثانیه)
۱	۰	۰	۰/۰۵۱۹۳
۲	۰/۰۲	۰/۰۴۹۵۹	۰/۰۲۰۲۹
۳	۰/۰۴	۰/۰۳۰۲۰	۰/۰۰۱۳۴
۴	۰/۰۶	۰/۰۱۲۱۸	-۰/۰۰۳۷۸
۵	۰/۰۸	۰/۰۰۲۳۰	-۰/۰۱۰۴۹
۶	۰/۱	-۰/۰۰۵۶۱	-۰/۰۱۲۱۸
۷	۰/۱۲	-۰/۰۰۹۶۷	-۰/۰۱۷۱۴
۸	۰/۱۴	-۰/۰۱۴۲۹	-۰/۰۳۲۹۳
۹	۰/۱۶	-۰/۰۲۵۸۱	-۰/۰۲۹۱۹
۱۰	۰/۱۸	-۰/۰۲۷۹۰	۰/۰۰۰۶۳

جدول ۴-۲. مقادیر شتاب پیش‌بینی شده.

مرحله (k)	زمان (ثانیه)	شتاب پیش‌بینی شده (متر مربع / ثانیه)	شتاب زلزله (متر مربع / ثانیه)
۱۱	۰/۲	-۰/۰۱۰۲۷	-۰/۰۲۴۳۷
۱۲	۰/۲۲	-۰/۰۱۸۹۹	۰/۰۰۳۶۵
۱۳	۰/۲۴	-۰/۰۰۵۰۰	۰/۱۰۵۹۲
۱۴	۰/۲۶	۰/۰۶۳۵۵	۰/۱۰۴۳۰
۱۵	۰/۲۸	۰/۰۸۸۷۴	-۰/۰۱۵۷۶
۱۶	۰/۳	۰/۰۲۴۱۶	-۰/۱۸۳۱۰
۱۷	۰/۳۲	-۰/۱۰۳۹۴	-۰/۱۳۷۶۶
۱۸	۰/۳۴	-۰/۱۲۴۷۸	-۰/۰۴۵۶۵
۱۹	۰/۳۶	-۰/۰۷۵۸۷	-۰/۱۳۴۷۰
۲۰	۰/۳۸	-۰/۱۱۲۲۳	-۰/۰۸۲۳۲
۲۱	۰/۴	-۰/۰۹۳۷۴	۰/۰۵۳۵۵
۲۲	۰/۴۲	-۰/۰۰۲۷۱	۰/۰۱۲۱۳
۲۳	۰/۴۴	۰/۰۰۶۴۶	-۰/۰۷۱۴۷
۲۴	۰/۴۶	-۰/۰۴۱۷۰	۰/۰۸۷۷۲
۲۵	۰/۴۸	۰/۰۳۸۲۹	۰/۳۲۳۷۴
۲۶	۰/۵	۰/۲۱۴۷۱	۰/۲۲۷۹۹
۲۷	۰/۵۲	۰/۲۲۲۹۲	-۰/۱۷۰۴۹
۲۸	۰/۵۴	-۰/۰۲۰۲۲	-۰/۱۶۵۵۸
۲۹	۰/۵۶	-۰/۱۱۰۰۵	۰/۰۷۷۴۹
۳۰	۰/۵۸	۰/۰۰۵۸۶	۰/۰۲۷۳۸
۳۱	۰/۶	۰/۰۱۹۱۶	-۰/۱۶۳۰۱
۳۲	۰/۶۲	-۰/۰۹۳۴۳	-۰/۱۳۴۲۸

جدول ۴-۲. مقادیر شتاب پیش بینی شده.

مرحله (k)	زمان (ثانیه)	شتاب پیش بینی شده (متر مربع/ثانیه)	شتاب زلزله (متر مربع/ثانیه)
۳۳	۰/۶۴	-۰/۱۱۸۶۷	۰/۰۱۹۰۴
۳۴	۰/۶۶	-۰/۰۳۳۵۶	-۰/۰۱۸۱۶
۳۵	۰/۶۸	-۰/۰۲۴۰۴	-۰/۲۴۶۹۲
۳۶	۰/۷	-۰/۱۶۱۷۹	-۰/۲۴۰۱۸
۳۷	۰/۷۲	-۰/۲۱۰۲۴	-۰/۰۳۹۵۲
۳۸	۰/۷۴	-۰/۱۰۴۷۳	۰/۱۳۹۴۶
۳۹	۰/۷۶	۰/۰۴۶۱۹	۰/۳۰۰۹۶
۴۰	۰/۷۸	۰/۲۰۳۶۵	۰/۳۹۰۱۵
۴۱	۰/۸	۰/۳۱۸۹۱	۰/۳۶۷۱۰
۴۲	۰/۸۲	۰/۳۴۸۶۹	۰/۱۲۰۸۳
۴۳	۰/۸۴	۰/۲۰۷۸۶	-۰/۱۸۳۸۱
۴۴	۰/۸۶	-۰/۰۳۴۲۰	-۰/۱۶۰۰۵
۴۵	۰/۸۸	-۰/۱۱۱۹۸	۰/۲۱۴۴۴
۴۶	۰/۹	۰/۰۸۹۷۶	۰/۰۶۱۲۸

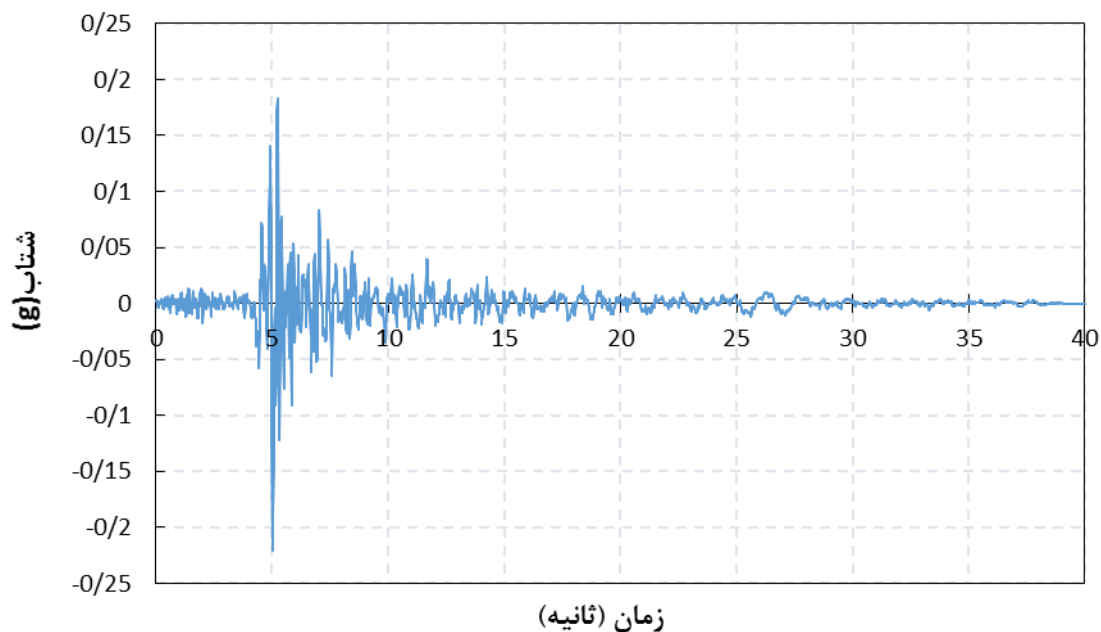
۴-۳ مسئله مورد بررسی

با توجه به توضیحاتی که در مورد نحوه عملکرد فیلتر کالمن، به منظور محاسبه موجی که توانایی خنثی سازی موج زلزله را دارا باشد، در فصل سوم داده شده است، در این فصل تأثیر تولید موج محاسبه شده از این روش بر روی زلزله‌های Sierra madre سال ۱۹۹۱ به بزرگی ۵/۶۱ ریشتر، زلزله Northridge سال ۱۹۹۴ به بزرگی ۶/۷ ریشتر و زلزله Cape mendocino سال ۱۹۹۲ به بزرگی ۷/۱ ریشتر مورد

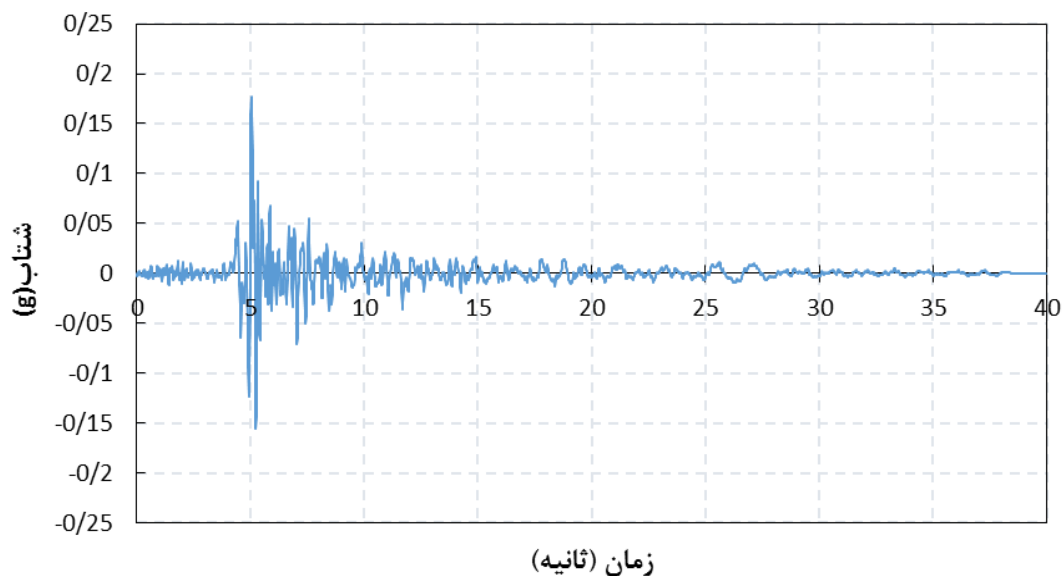
بررسی قرار گرفته است. همچنین نتایج بدست آمده از فیلتر کالمن و نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی مدل خاک-سازه ارائه شده است.

۴-۴ ارزیابی تأثیر تولید کننده موج بر زلزله Sierra madre

شکل ۴-۱ نمودار شتاب زلزله Sierra madre را نشان می‌دهد. فیلتر کالمن به منظور محاسبه موج تولیدی مؤثر بر خنثی سازی زلزله Sierra madre ابتدا مقداری را به عنوان اولین مقدار شتاب موج زلزله پیش‌بینی می‌نماید. سپس با دریافت اولین مقدار شتاب زلزله توسط سنسور، مقدار شتاب پیش‌بینی شده، اصلاح گردیده و به عنوان مقدار شتاب برای Δt ثانیه بعدی در نظر گرفته می‌شود. این چرخه به همین صورت تا پایان زمان زلزله ادامه پیدا می‌کند. با توجه به این توضیحات شکل ۴-۲ موج پیش‌بینی شده توسط فیلتر کالمن را نشان می‌دهد.

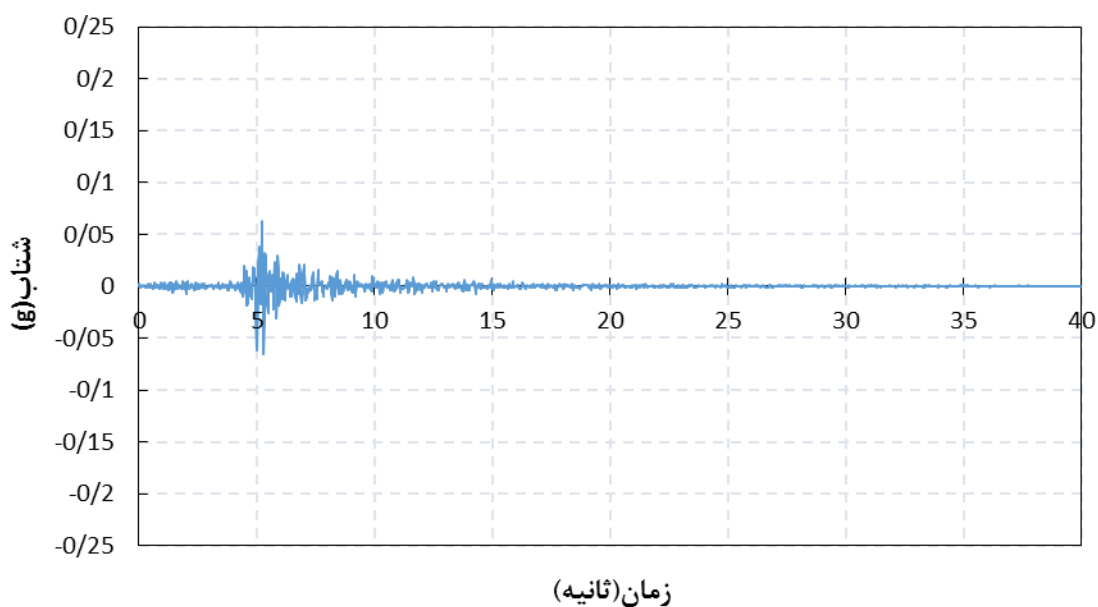


شکل ۴-۱. نمودار شتاب - زمان زلزله افقی Sierra madre.



شکل ۴-۲. نمودار شتاب - زمان محاسبه شده برای زلزله Sierra madre توسط فیلتر کالمن.

شکل ۴-۳ نمودار شتاب برآیند-زمان را برای زلزله sierra madre نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار دیده می‌شود، دامنه‌های ماکزیمم شتاب از $0.22g$ به $0.06g$ کاهش پیدا کرده است.



شکل ۴-۳. نمودار شتاب برآیند-زمان زلزله Sierra madre.

هدف استفاده از فیلتر کالمن در این پژوهش محاسبه موج معکوس زلزله در حین وقوع زلزله می باشد. شکل ۳-۴ به خوبی نشان دهنده موفقیت آمیز بودن این روش در محاسبه موج معکوس زلزله در حین وقوع زلزله از طریق پیش بینی آن با استفاده از فیلتر کالمن می باشد.

۱-۴-۴ مدلسازی در نرم افزار پلکسیس

به منظور بررسی تأثیر موج تولید شده در کاهش نوسانات و جابه جایی های وارد شده به سازه ناشی از زلزله، از نرم افزار اجزای محدودی پلکسیس استفاده شده است. از اینرو یک خاک به ابعاد $100 * 20$ متر با مشخصاتی طبق جدول ۳-۴ و یک سازه چهار طبقه با مشخصاتی طبق جدول ۴-۴ مدل شده است. موج زلزله در کف مدل و دستگاه تولید کننده موج در زیر سازه و متصل به فندانسیون سازه مدل شده است.

۲-۴-۴ مشخصات خاک و سازه

جدول ۳-۴ مشخصات خاک مدل شده در نرم افزار پلکسیس و جدول ۴-۴ مشخصات سازه مدل شده را نشان می دهند. در این پژوهش از آب زیر زمینی موجود صرف نظر کرده و در نظر گرفته نشده است. برای مدلسازی سازه یک سازه چهار طبقه فولادی با سه دهانه به طول هر کدام ۵ متر و ارتفاع ستون $3/5$ متر در نظر گرفته شده است. برای هر طبقه باری به اندازه ۱۰ کیلونیوتن در متر مربع در نظر گرفته شده است.

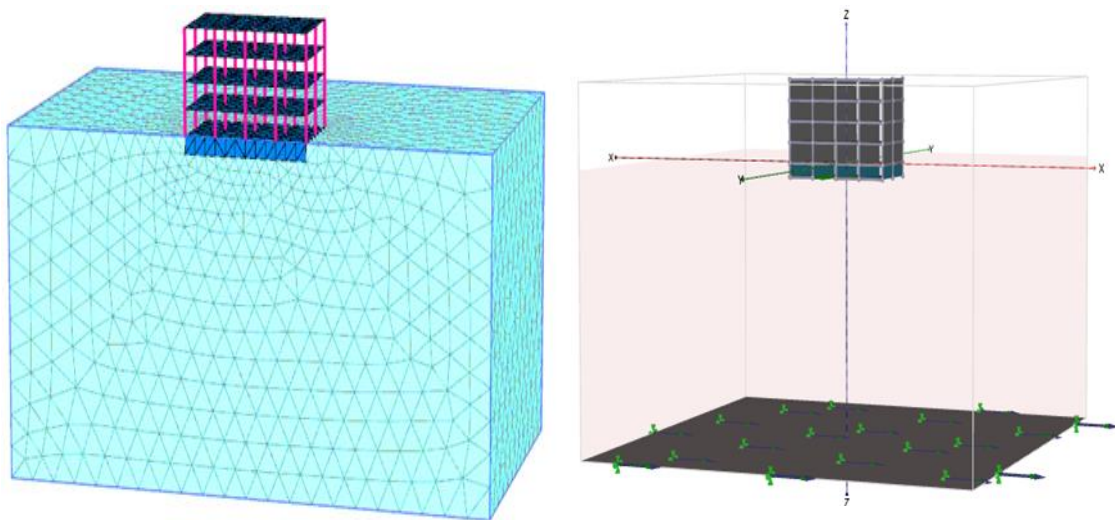
جدول ۳-۴. مشخصات خاک مدل شده

وزن مخصوص ($\frac{kN}{m^3}$)	مدول الاستیسیته (MPa)	چسبندگی (KPa)	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی
۲۱	۴۰	۱۵	۰/۳	۲۸

جدول ۴-۴. مشخصات سازه مدل شده

ستون دابل IPE14			تیر IPE16			پی بتنی		
E (GPa)	EI ($\frac{kNm^2}{m}$)	EA ($\frac{kN}{m}$)	E (GPa)	EI ($\frac{kNm^2}{m}$)	EA ($\frac{kN}{m}$)	γ ($\frac{kN}{m^3}$)	E (MPa)	ρ
۲۱۰	۲۳۰۰	۶۹۰۰۰۰	۲۱۰	۱۸۲۵	۴۲۰۰۰۰	۲۴	۲۰۰۰۰	۰/۱۵

به منظور تولید موج، همزمان با موج زلزله در جهت کاهش نوسانات وارده به سازه، تولید کننده موجی در زیر سازه و متصل به فندانسیون قرار داده شده است. شکل ۴-۴ خاک و سازه مدل شده و نیز نحوه قرار گیری تولید کننده موج و سازه را در نرم افزار پلکسیس نشان می دهد.



شکل ۴-۴. خاک و سازه مدل سازی شده در نرم افزار پلکسیس.

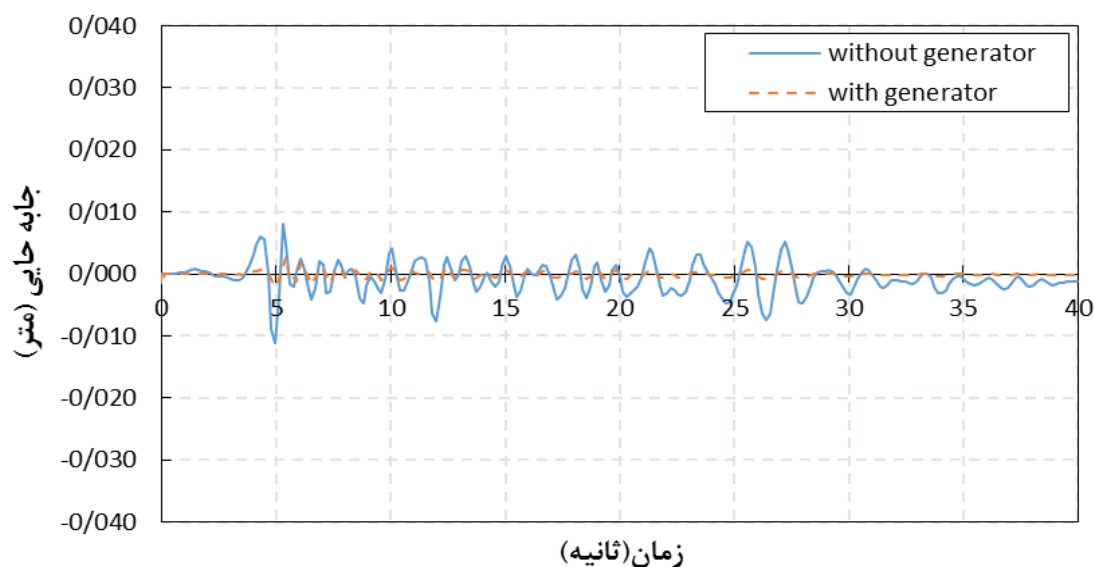
۳-۴-۴ نتایج بدست آمده از مدلسازی در نرم افزار پلکسیس برای

زلزله Sierra madre

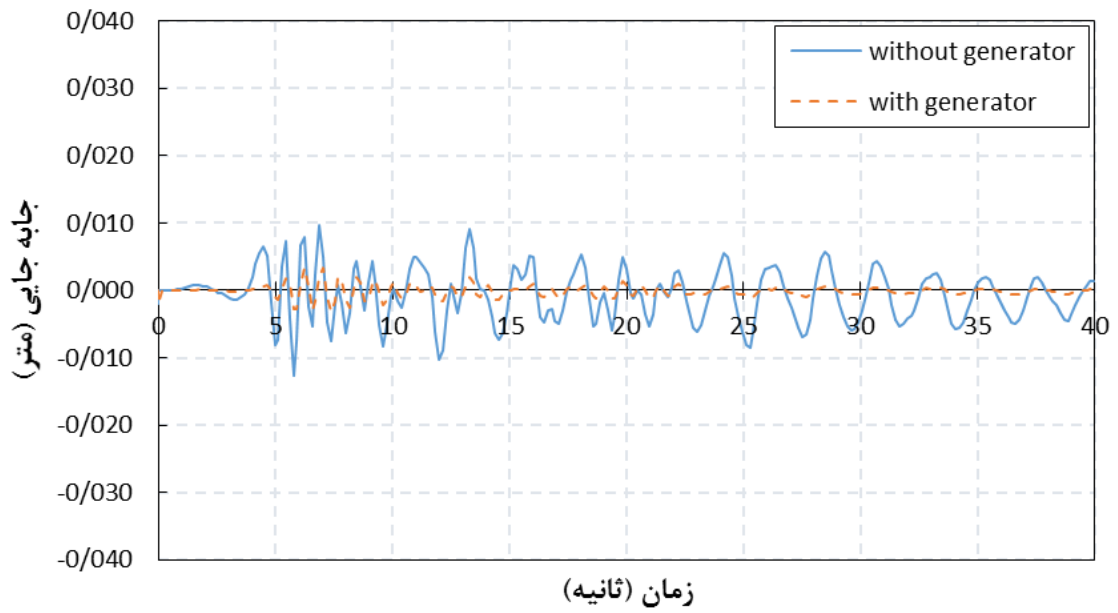
به منظور بررسی تأثیر استفاده از تولید کننده موج بر نوسانات وارده به سازه، مدلسازی در نرم افزار پلکسیس برای دو حالت وجود تولید کننده موج و عدم وجود آن، انجام گردیده است. در ادامه نمودارهای جابه جایی، شتاب، تنش و نیروی وارده به سازه برای دو حالت مطرح شده ترسیم شده است.

الف- تأثیر تولید کننده موج بر جابه جایی

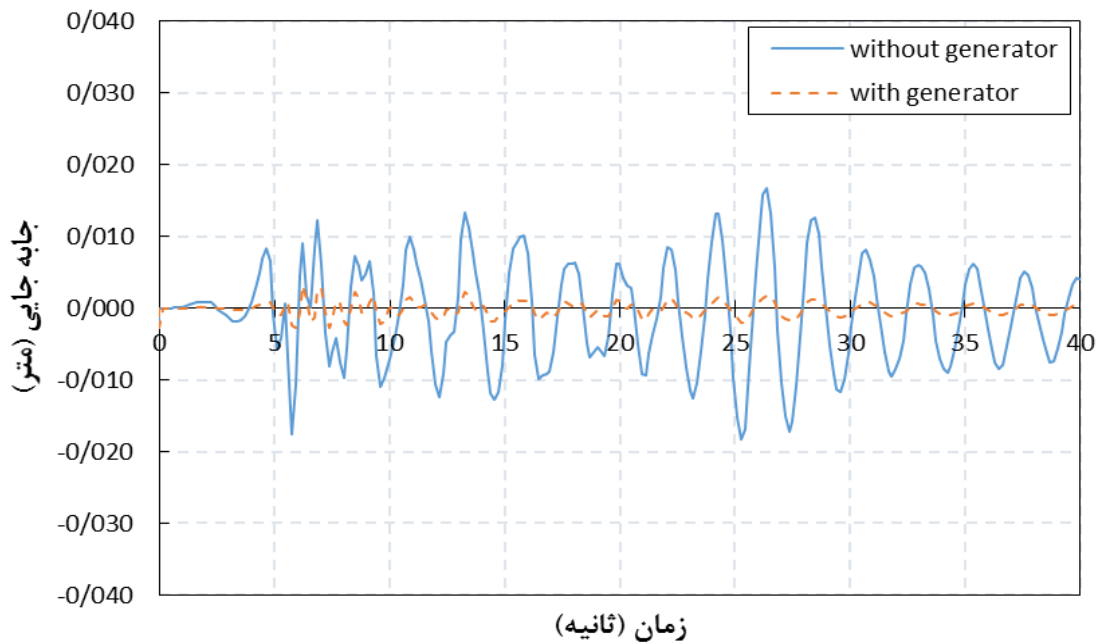
اشکال ۴-۵ الی ۴-۹ به ترتیب نمودار جابه جایی سطح زمین و طبقات اول تا چهارم سازه مدل شده، در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج را نشان می دهند. همانطور که در این اشکال دیده می شود وجود تولید کننده موج توانسته بطور قابل قبولی جابه جایی های ناشی از زلزله در سازه را کاهش دهد.



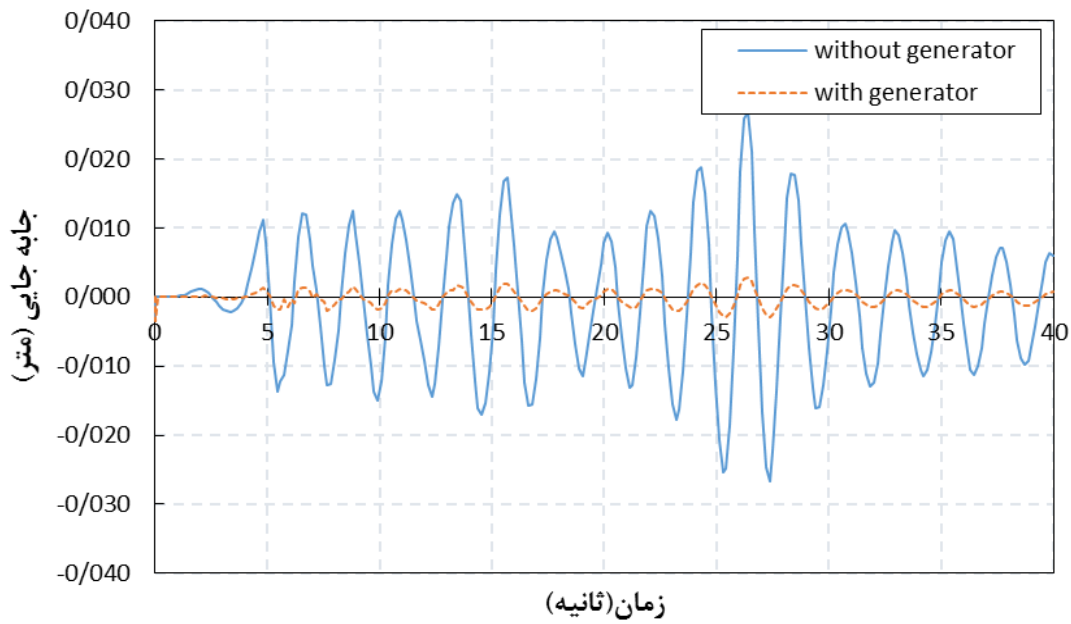
شکل ۴-۵. نمودار جابه جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Sierra madre در سطح زمین در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.



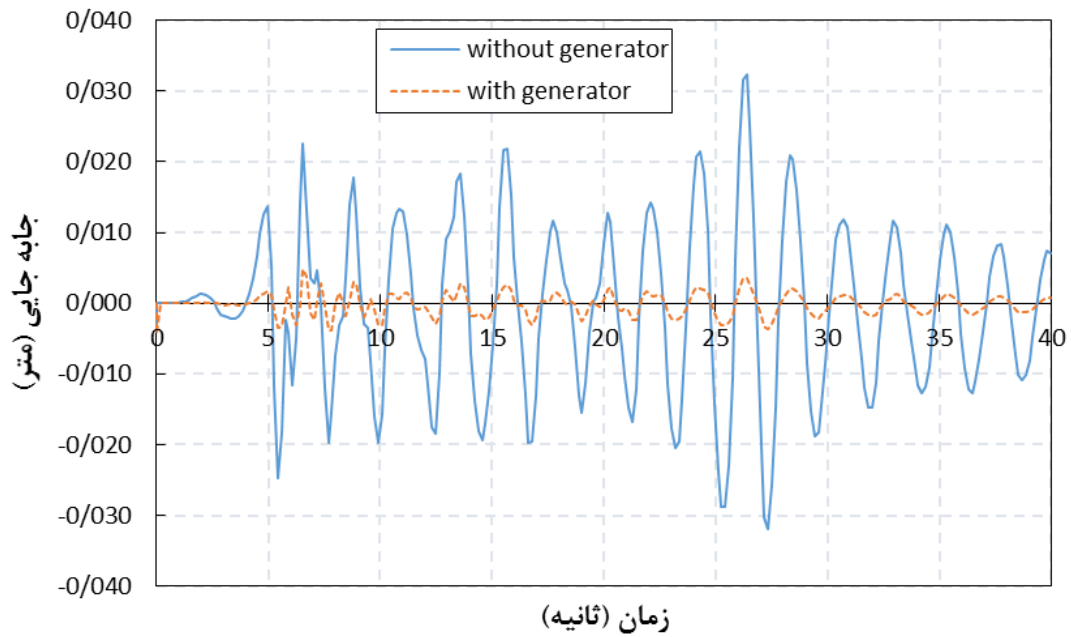
شکل ۴-۶. جابہ جایی افقی سقف طبقه اول ناشی از موج زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.



شکل ۴-۷. جابہ جایی افقی سقف طبقه دوم ناشی از موج زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.



شکل ۴-۸. جابہ جایی افقی سقف طبقه سوم ناشی از موج زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.



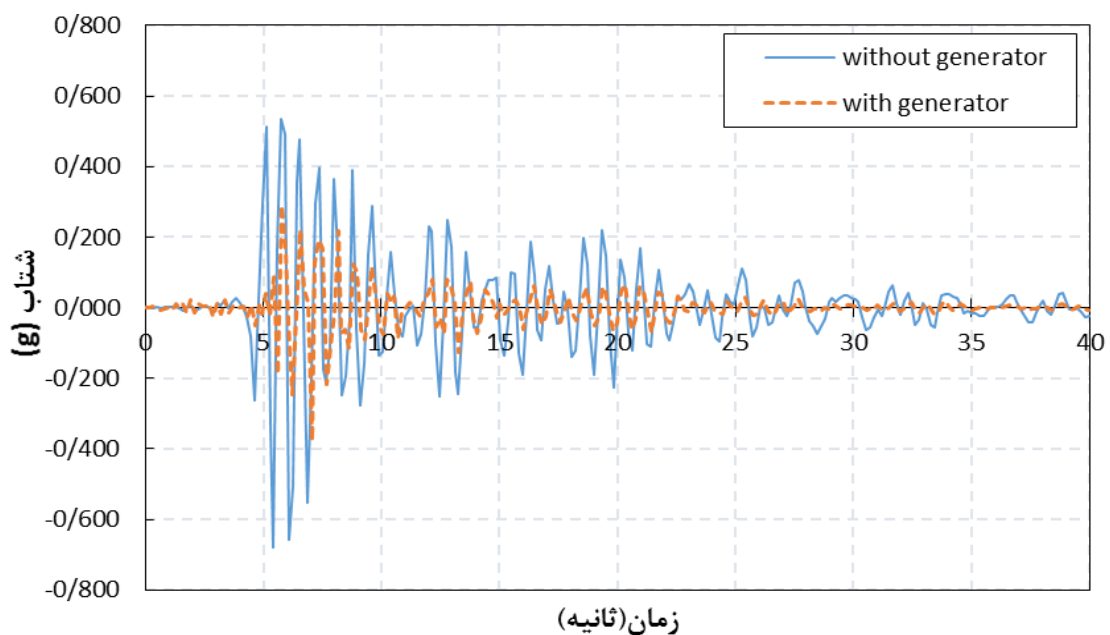
شکل ۴-۹. جابہ جایی افقی سقف طبقه چهارم ناشی از موج زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.

ب: تأثیر موج تولید شده بر شتاب وارده به سازه

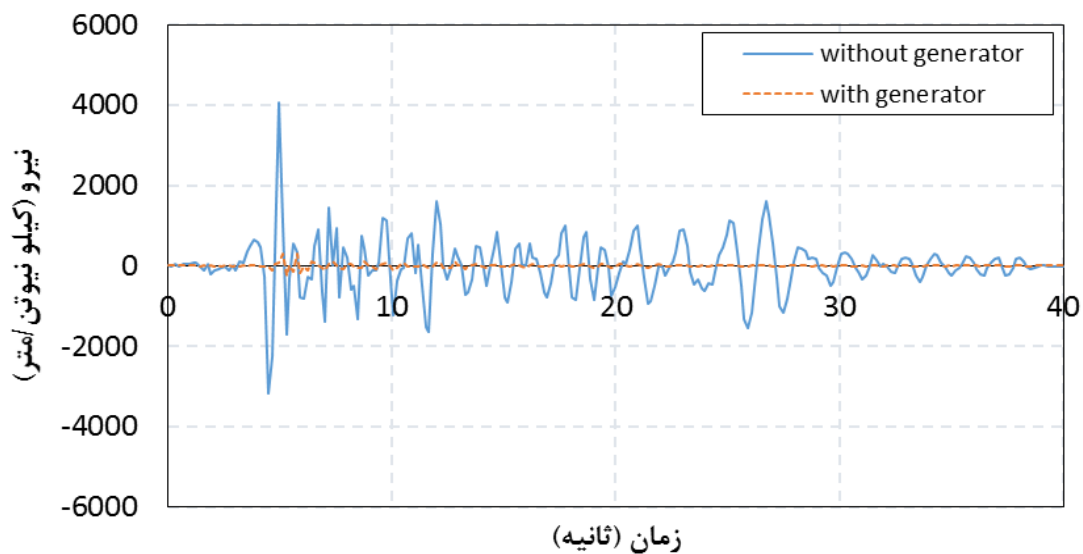
شکل ۴-۱۰ نمودار شتاب-زمان وارده به سطح زمین را در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج نشان می‌دهد. دیده می‌شود که وجود تولید کننده موج تأثیر بسزایی در کاهش شتاب‌های وارده به سطح زمین و سازه، در طول مدت زلزله داشته است.

ج: تأثیر تولید کننده موج بر نیروی وارده به سازه

شکل ۴-۱۱ نمودار نیرو-زمان ناشی از زلزله Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج نشان می‌دهد. در واقع این شکل نمودار برش پایه ناشی از زلزله Sierra madre است. شکل ۴-۱۱ به خوبی تأثیر وجود تولید کننده موج بر سرعت ناشی از موج زلزله را نشان می‌دهد.



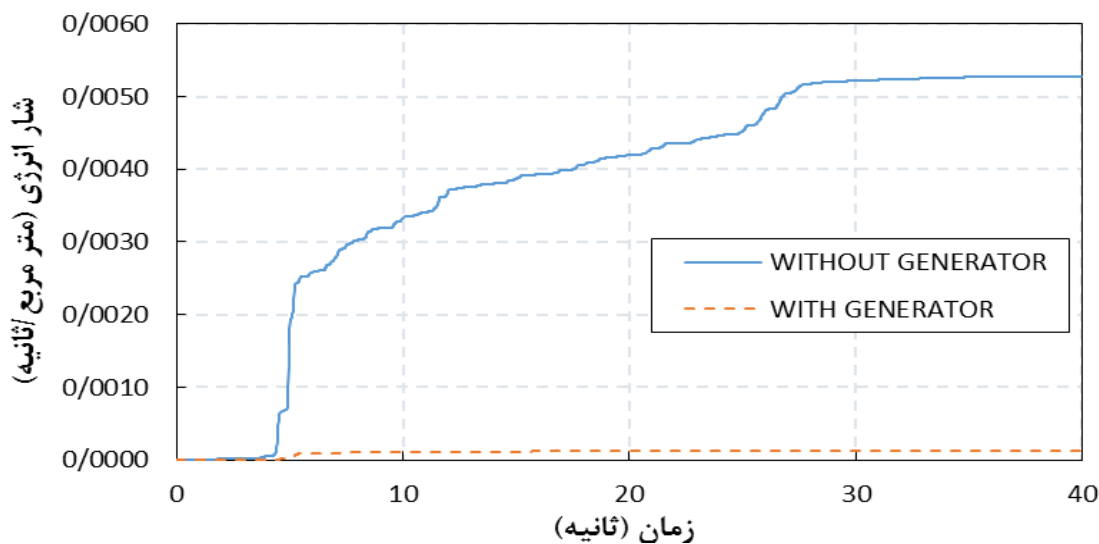
شکل ۴-۱۰. نمودار شتاب-زمان وارده به سطح زمین مربوط به زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.



شکل ۴-۱۱. نمودار نیرو-زمان مربوط به زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید

د: تأثیر تولید کننده موج بر انرژی زلزله

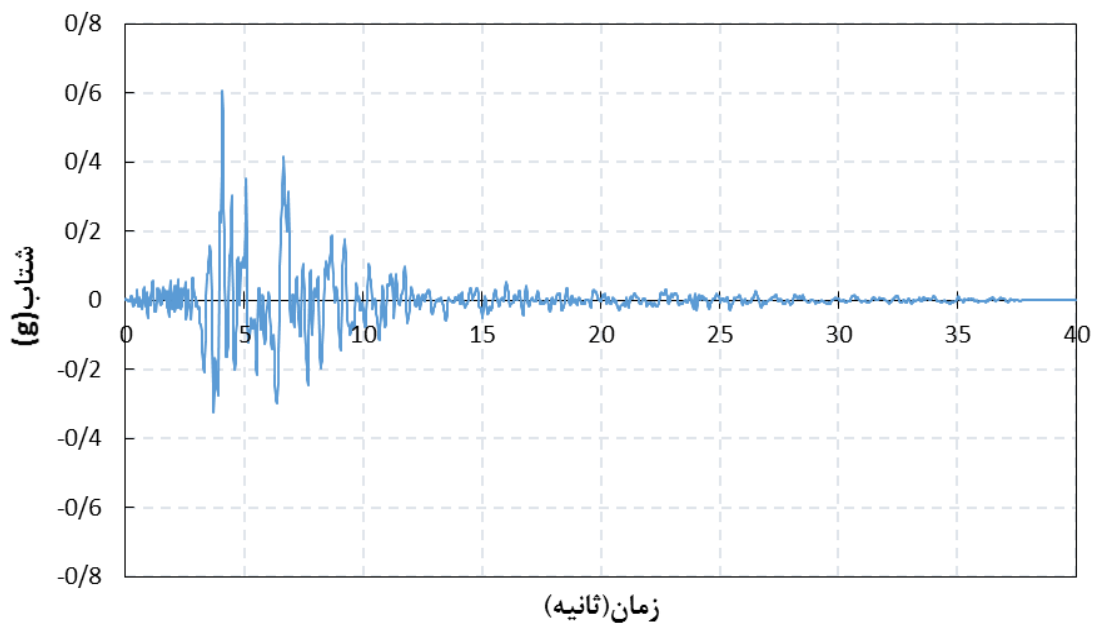
شکل ۴-۱۲ نمودار انرژی مربوط به زلزله Sierra madre در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج نشان می‌دهد. با استناد به شکل ۴-۱۲ می‌توان بیان نمود که، تولید کننده موج توانسته بصورت قابل قبولی انرژی زلزله را کاهش دهد.



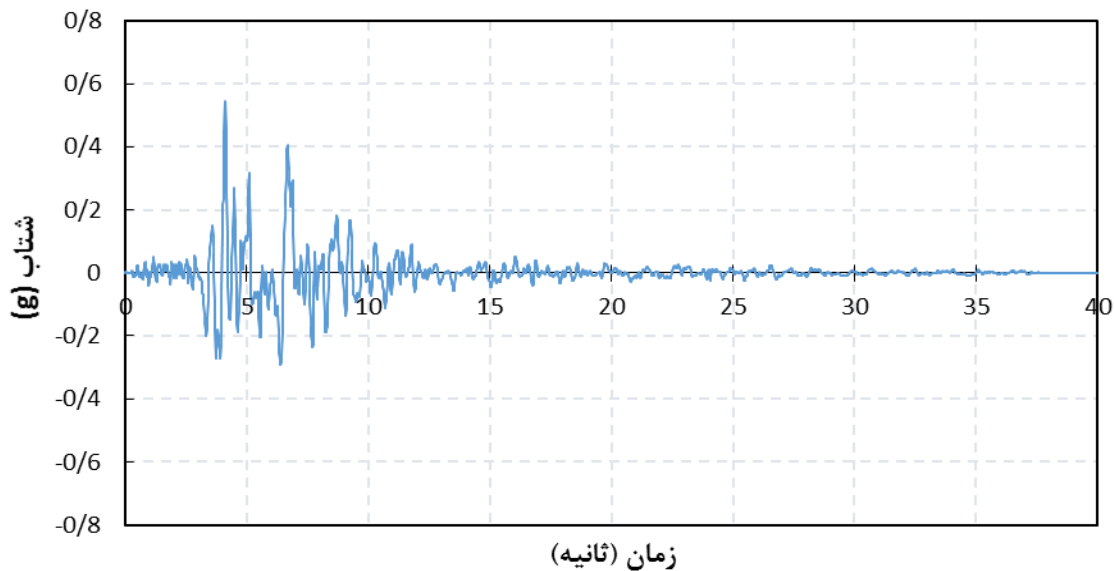
شکل ۴-۱۲. نمودار انرژی-زمان مربوط به زلزله افقی Sierra madre در دو حالت وجود و عدم

۴-۵ ارزیابی تأثیر تولید کننده موج بر زلزله Northridge

در این بخش تأثیر موج محاسبه شده از طریق فیلتر کالمن بر روی مقادیر شتاب، سرعت، نیرو و جابه‌جایی ناشی از موج زلزله Northridge، وارده به سازه و خاک مورد بررسی قرار گرفته شده است. شکل ۴-۱۳ نمودار شتاب زلزله Northridge را نشان می‌دهد. با توجه به نحوه عملکرد فیلتر کالمن به منظور پیش‌بینی مقادیر شتاب زلزله و استفاده از این مقادیر پیش‌بینی شده (با فاز مخالف) به منظور خنثی سازی زلزله، شکل ۴-۱۴ نمودار شتاب پیش‌بینی شده توسط فیلتر کالمن را نشان می‌دهد.

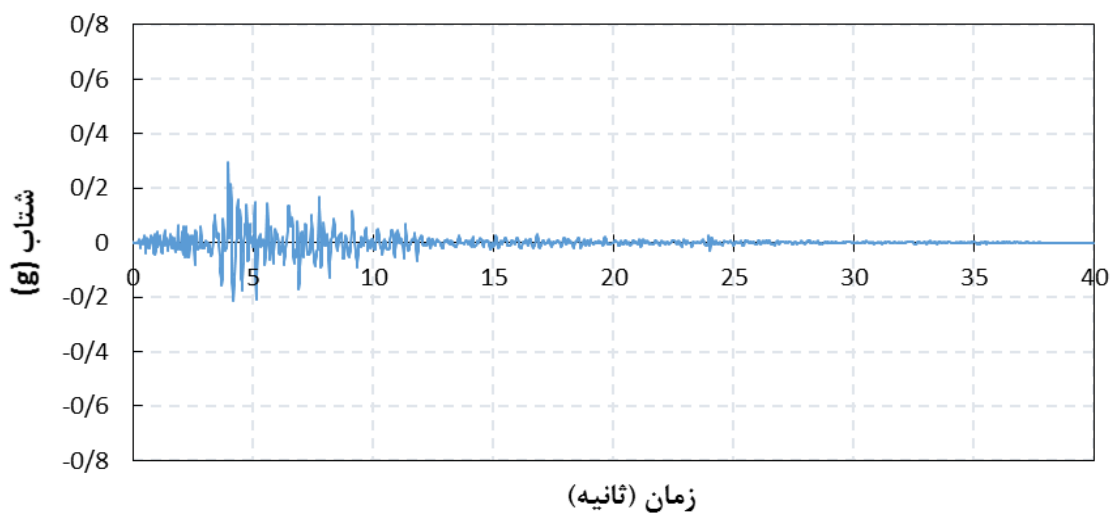


شکل ۴-۱۳. نمودار زمان-شتاب زلزله افقی Northridge.



شکل ۴-۱۴. نمودار زمان-شتاب محاسبه شده از طریق فیلتر کالمن برای زلزله Northridge.

شکل (۴-۱۵) نمودار شتاب برآیند را برای زلزله Northridge نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل (۴-۱۵) دیده می‌شود، نمودار شتاب برآیند نسبت به نمودار شتاب زلزله نزدیک به ۵۰ درصد کاهش یافته و این امر نشان می‌دهد که فیلتر کالمن در تشخیص علامت شتاب زلزله و پیش بینی مقادیر شتاب زلزله توانسته موفق عمل نماید.



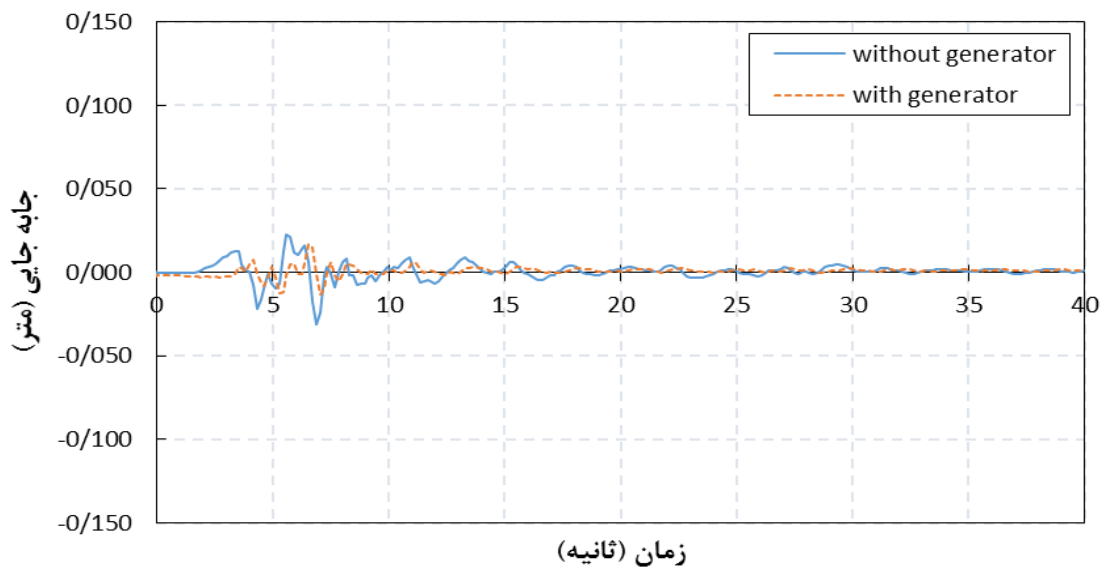
شکل ۴-۱۵. نمودار زمان-شتاب برآیند برای زلزله Northridge.

۴-۶ تحلیل زلزله Northridge در نرم افزار پلکسیس

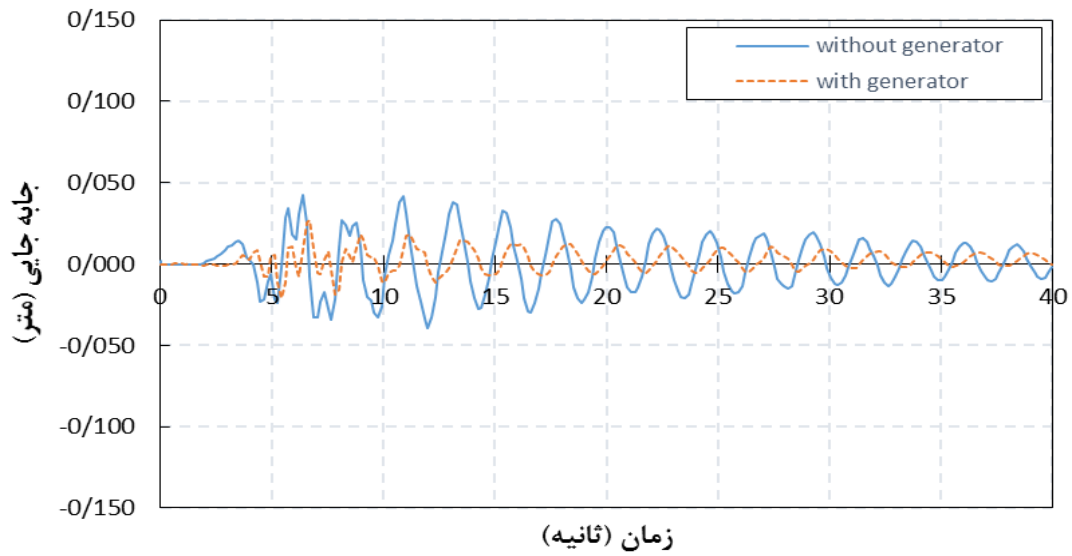
برای زلزله Northridge نیز همانند زلزله Sierra madre، مشخصات خاک و سازه طبق جداول ۴-۳ و ۴-۴ اعمال گردیده است. نتایج بدست آمده از تولید همزمان موج محاسبه شده توسط فیلتر کالمن و موج زلزله در قالب نمودارهای جابه‌جایی، شتاب، سرعت و نیرو وارده به سازه و خاک در ادامه ترسیم شده است.

الف- تأثیر تولید کننده موج بر جابه‌جایی

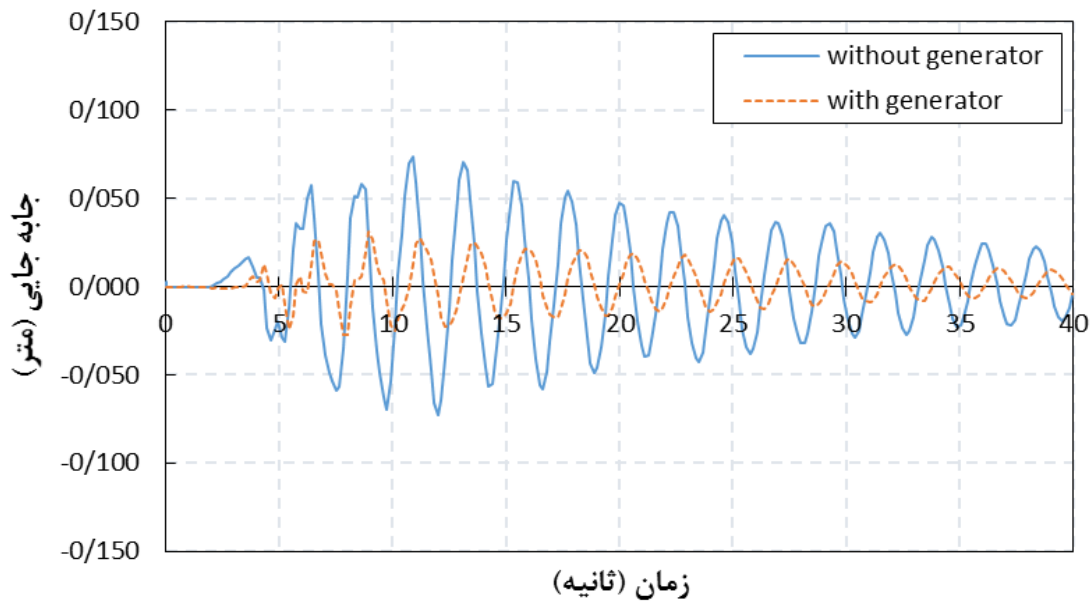
اشکال ۴-۱۶ الی ۴-۲۰ نمودار جابه‌جایی طبقات سازه و همچنین سطح زمین را در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود تولید کننده موج توانسته بطور مناسبی جابه‌جایی‌ها را کاهش داده و این امر موجب کاهش بسیاری از خسارات وارده به سازه و همچنین خسارات جانبی ناشی از زلزله می‌گردد.



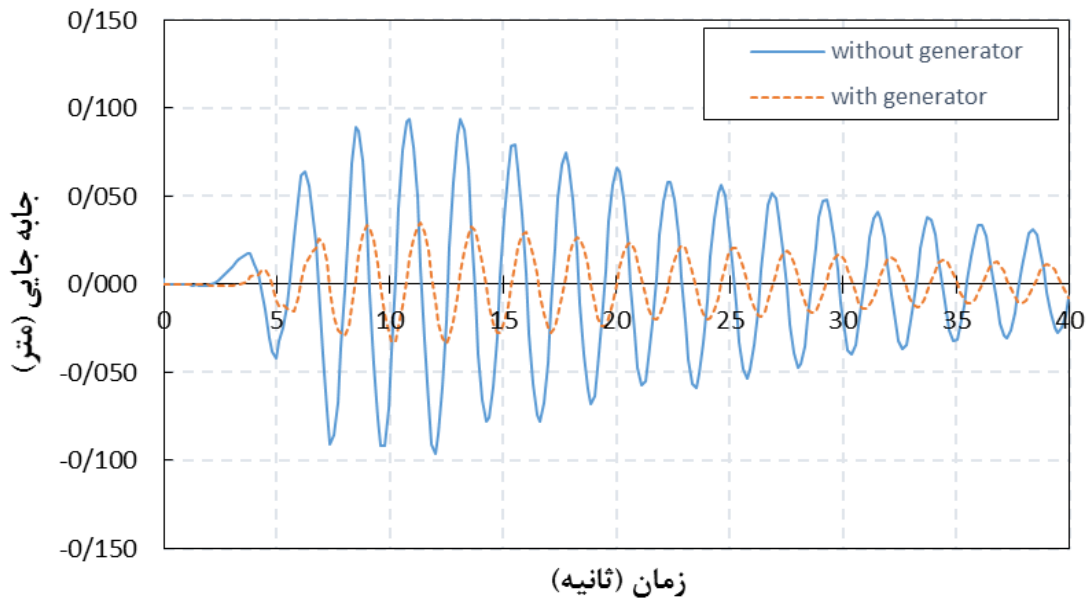
شکل ۴-۱۶. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Northridge در سطح زمین در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.



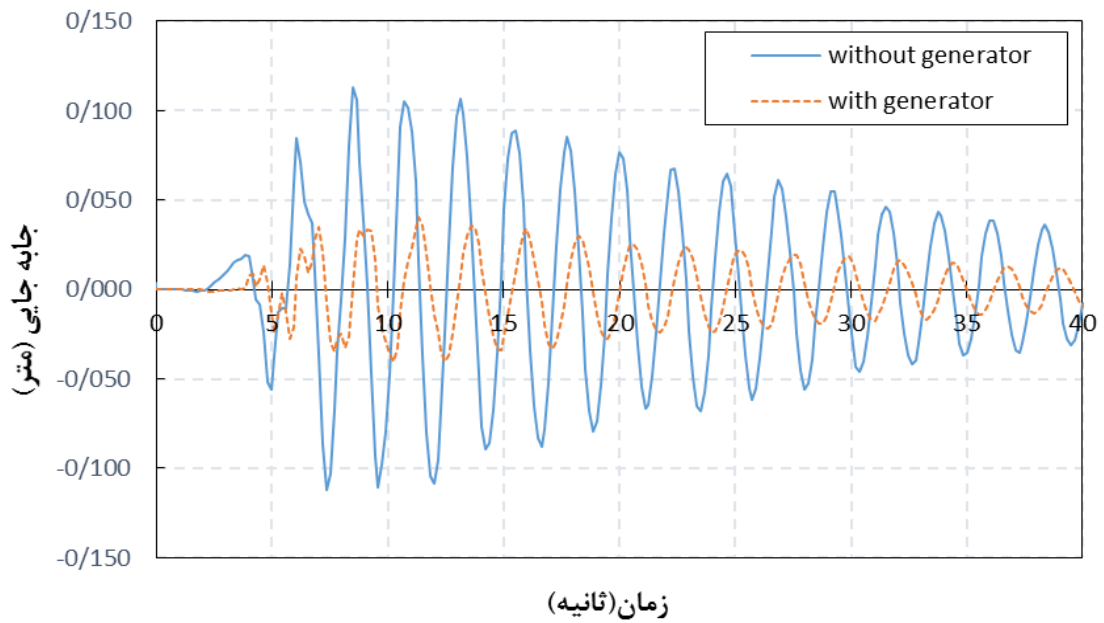
شکل ۴-۱۷. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Northridge در طبقه اول در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.



شکل ۴-۱۸. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Northridge در طبقه دوم در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.



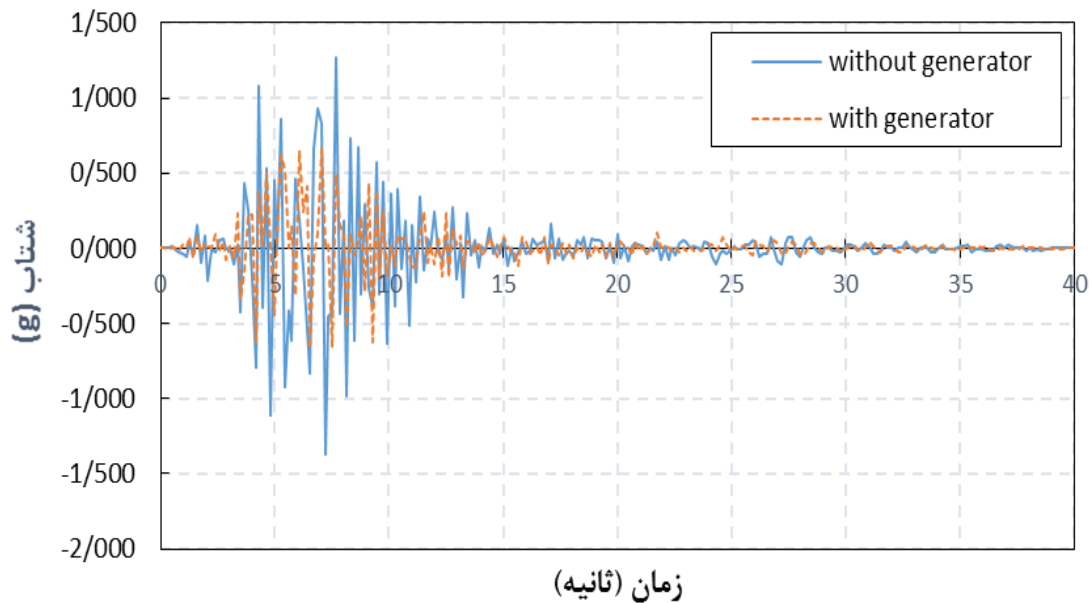
شکل ۴-۱۹. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Northridge در طبقه سوم در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج



شکل ۴-۲۰. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Northridge در طبقه چهارم در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.

ب: تأثیر تولید کننده موج بر شتاب وارده به سازه

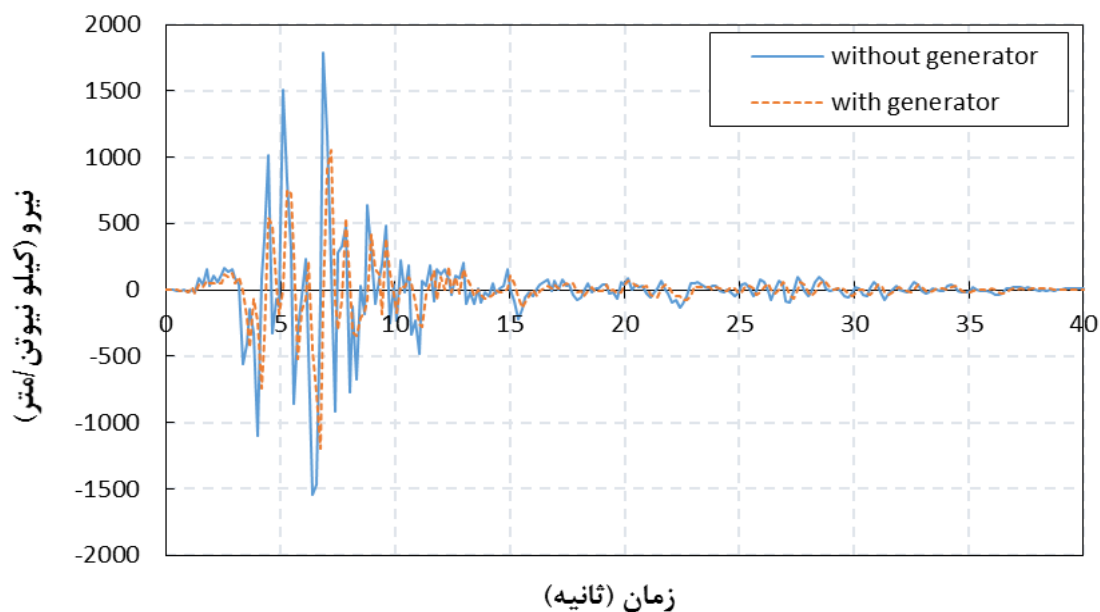
شکل ۴-۲۱ نمودار شتاب-زمان وارده به سطح زمین را برای زلزله Northridge در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج نشان می‌دهد. دیده می‌شود که وجود تولید کننده موج تأثیر بسزایی در کاهش شتاب‌های وارده به سطح زمین و سازه، در طول مدت زلزله داشته است. در واقع تولید کننده موج توانسته مقادیر ماکزیمم شتاب را به میزان ۵۰ درصد کاهش دهد.



شکل ۴-۲۱. نمودار شتاب-زمان وارده به سطح زمین ناشی از موج زلزله افقی Northridge در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.

ج: تأثیر تولید کننده موج بر نیرو وارده به سازه

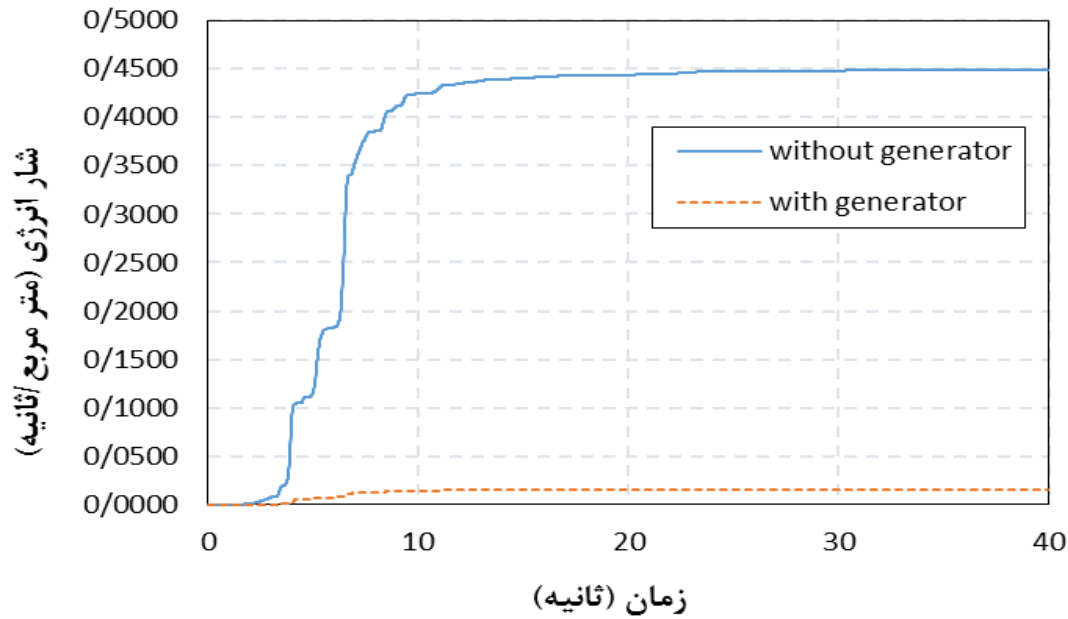
شکل ۴-۲۲ نمودار نیرو-زمان (برش پایه) را برای زلزله Northridge در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج نشان می‌دهد. با توجه به تأثیر مناسب تولید کننده موج بر کاهش شتاب‌های وارده به سطح زمین می‌توان کاهش چشمگیر نیرو ناشی از موج زلزله وارده به سطح زمین را پیش بینی نمود.



شکل ۴-۲۲. نمودار نیرو-زمان ناشی از موج زلزله افقی Northridge در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.

د: تأثیر تولید کننده موج بر انرژی زلزله

شکل ۴-۲۳ نمودار انرژی مربوط به زلزله Northridge در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج را نشان می‌دهد. تولید کننده موج در زلزله Northridge توانسته سبب کاهش مناسب نیروی افقی ناشی از زلزله گردد. که به دنبال آن کاهش خسارات شدید جانی و مالی ناشی از زلزله‌های بزرگ دنیا همانند زلزله Northridge را دربر دارد.

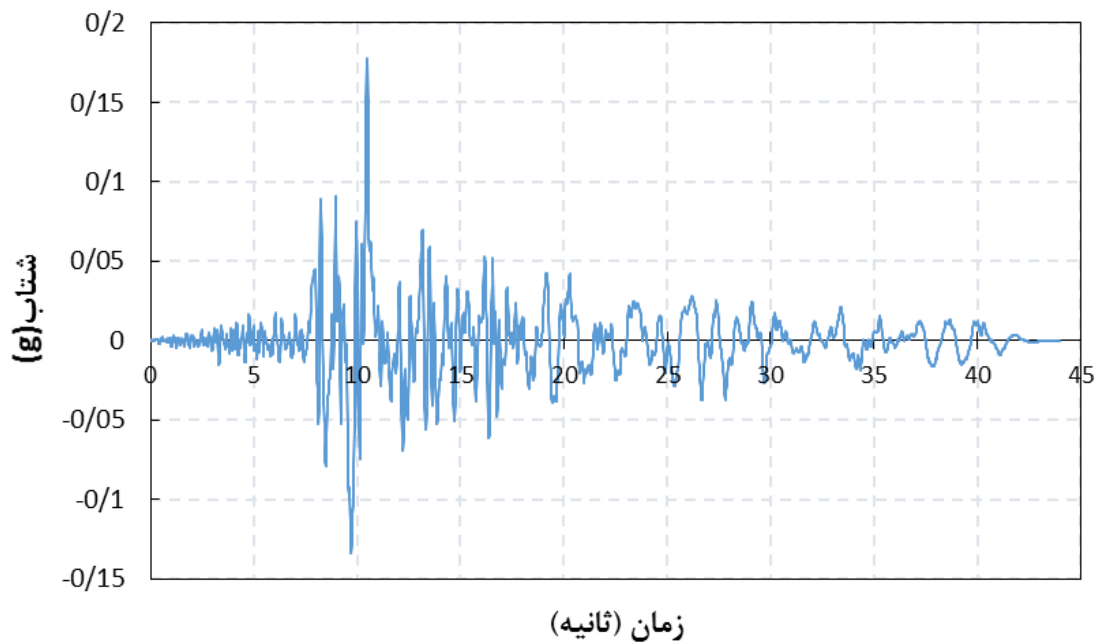


شکل ۴-۲۳. نمودار انرژی-زمان ناشی از موج زلزله افقی Northridge در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.

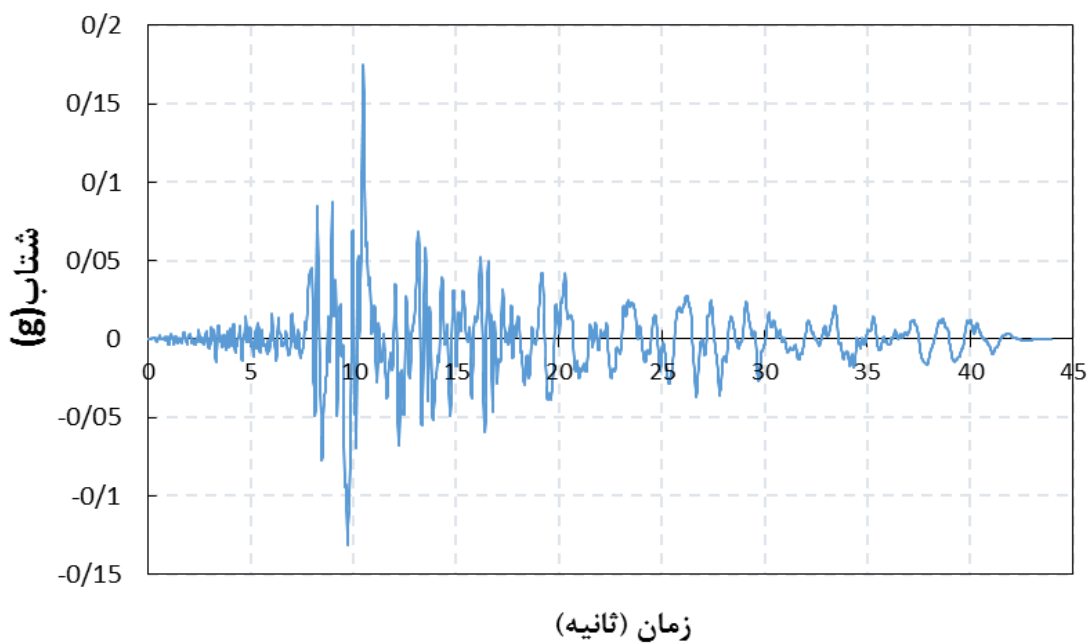
۷-۴ ارزیابی تأثیر تولید کننده موج بر زلزله Cape mendocino

در این بخش نیز مجدد همانند بخش ۴-۵، تأثیر موج محاسبه شده از طریق فیلتر کالمن بر روی مقادیر شتاب، سرعت، نیرو و جابه‌جایی ناشی از موج زلزله Cape، وارده به سازه و خاک مورد بررسی قرار گرفته شده است.

شکل ۴-۲۴ نمودار شتاب زلزله Cape را نشان می‌دهد. با توجه به نحوه عملکرد فیلتر کالمن به منظور پیش‌بینی مقادیر شتاب زلزله و استفاده از این مقادیر پیش‌بینی شده (با فاز مخالف) به منظور خنثی سازی زلزله، شکل ۴-۲۵ نمودار شتاب پیش‌بینی شده توسط فیلتر کالمن را نشان می‌دهد.

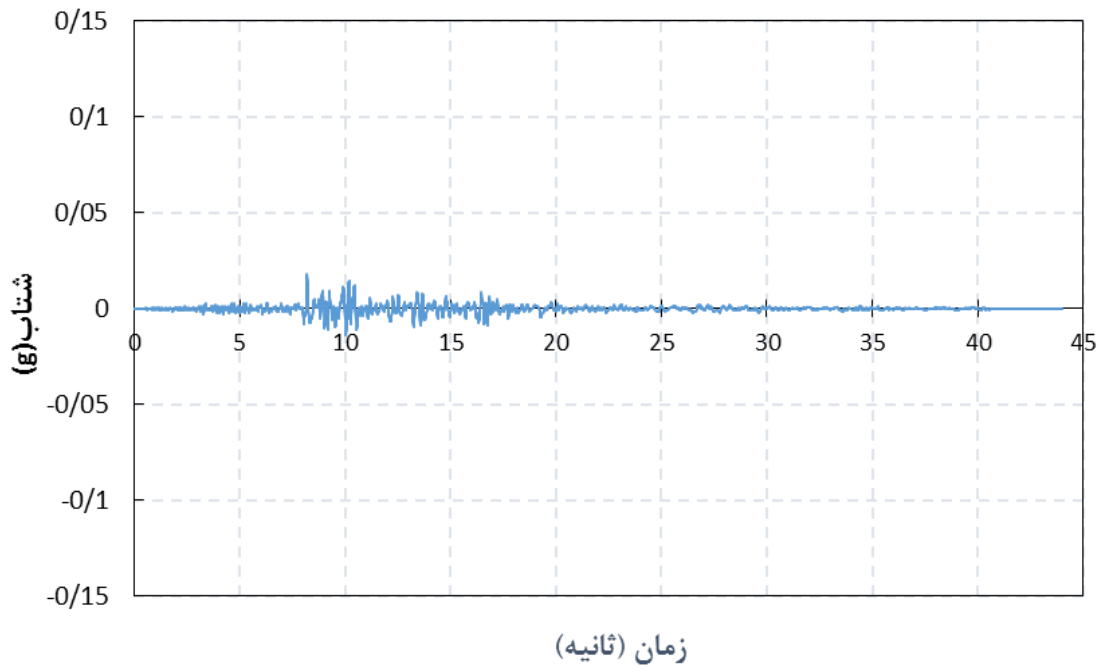


شکل ۴-۲۴. نمودار شتاب-زمان زلزله افقی Cape.



شکل ۴-۲۵. نمودار شتاب-زمان پیش بینی شده توسط فیلتر کالمن برای زلزله Cape.

شکل ۴-۲۶ برآیند نمودار شتاب نگاشت زلزله Cape و معکوس پیش‌بینی شده برای آن را نشان می‌دهد. کاهش یافتن دامنه تغییرات نمودار برآیند نسبت به نمودار شتاب نگاشت زلزله Cape نشان دهنده پیش‌بینی مناسب فیلتر کالمن می‌باشد.



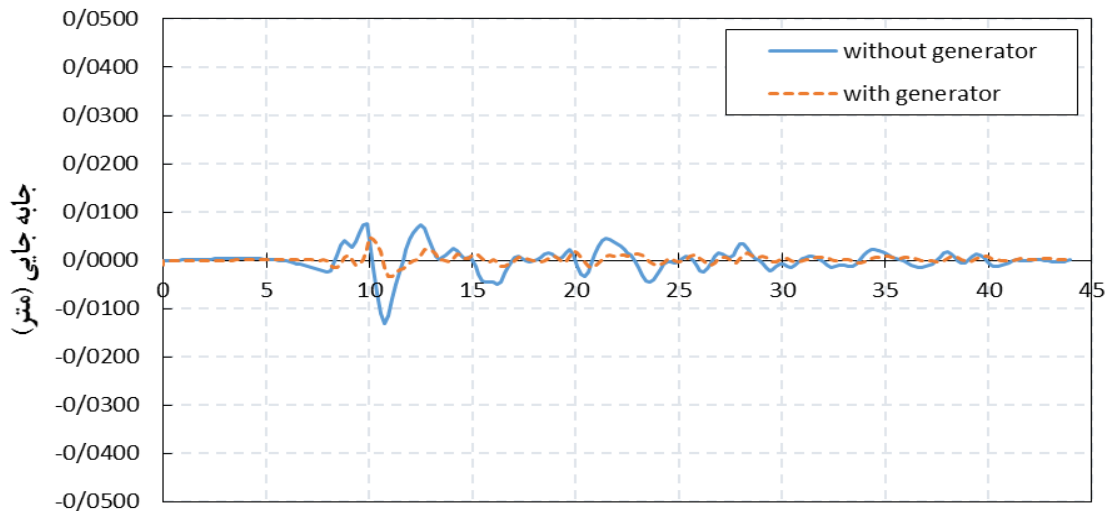
شکل ۴-۲۶. نمودار برآیند شتاب-زمان برای زلزله Cape.

۴-۸ تحلیل زلزله Cape mendocino در نرم‌افزار پلکسیس

برای زلزله Cape نیز همانند زلزله Sierra madre و Northridge مشخصات خاک و سازه طبق جداول ۴-۳ و ۴-۴ اعمال گردیده است. نتایج بدست آمده از تولید همزمان موج محاسبه شده توسط فیلتر کالمن و موج زلزله در قالب نمودارهای جابه‌جایی، شتاب، سرعت و نیرو وارد به سازه و خاک در ادامه ترسیم شده است.

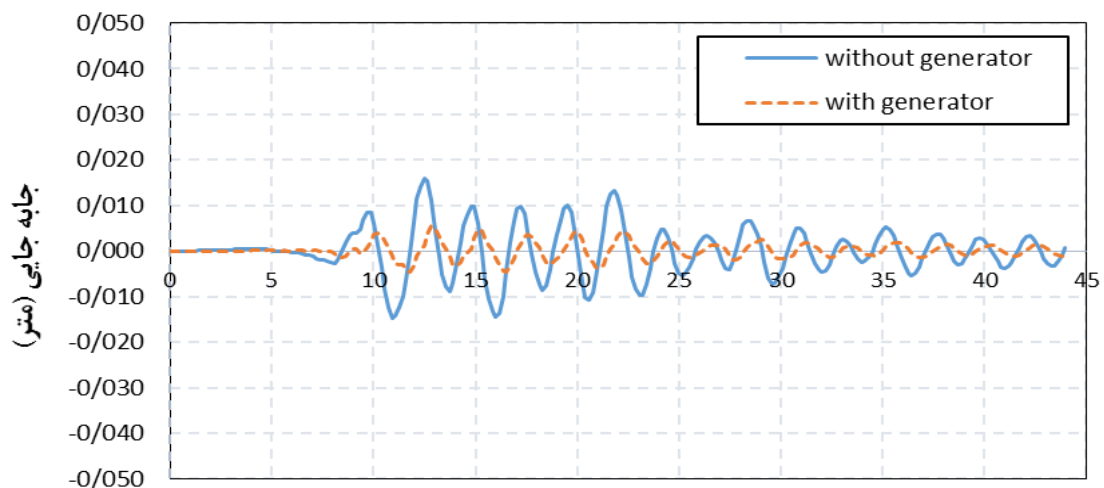
الف- تأثیر تولید کننده موج بر جابه‌جایی

اشکال ۴-۲۷ الی ۴-۳۱ نمودار جابه‌جایی طبقات سازه و همچنین سطح زمین را در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، تولید کننده موج توانسته بطور مناسبی جابه‌جایی‌ها را کاهش داده و این امر موجب کاهش بسیاری از خسارات وارده به سازه و همچنین خسارات جانبی ناشی از زلزله می‌گردد.



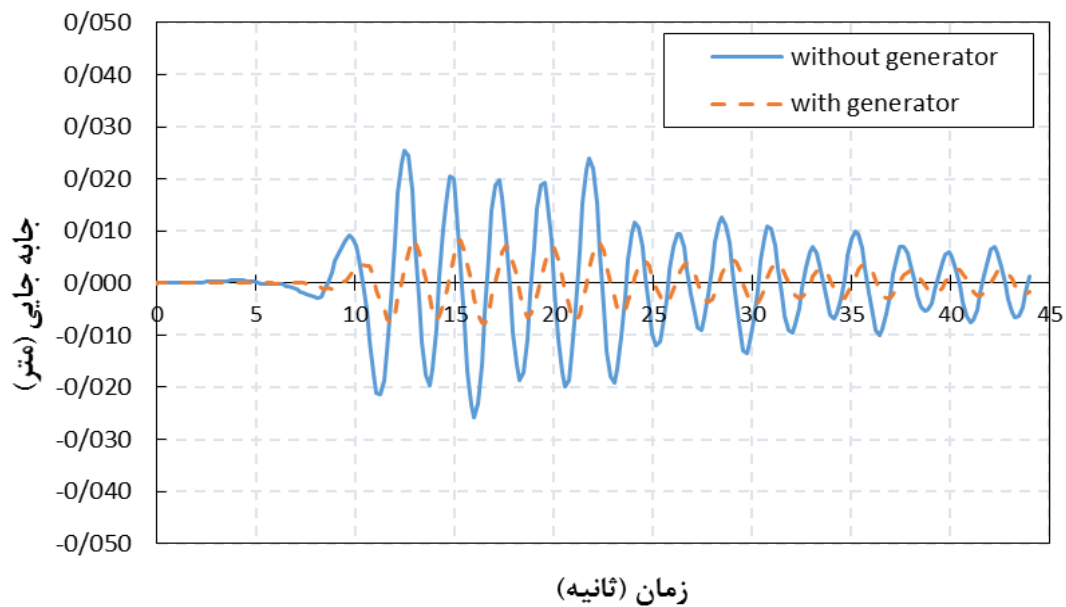
زمان (ثانیه)

شکل ۴-۲۷. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Cape در سطح زمین در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.

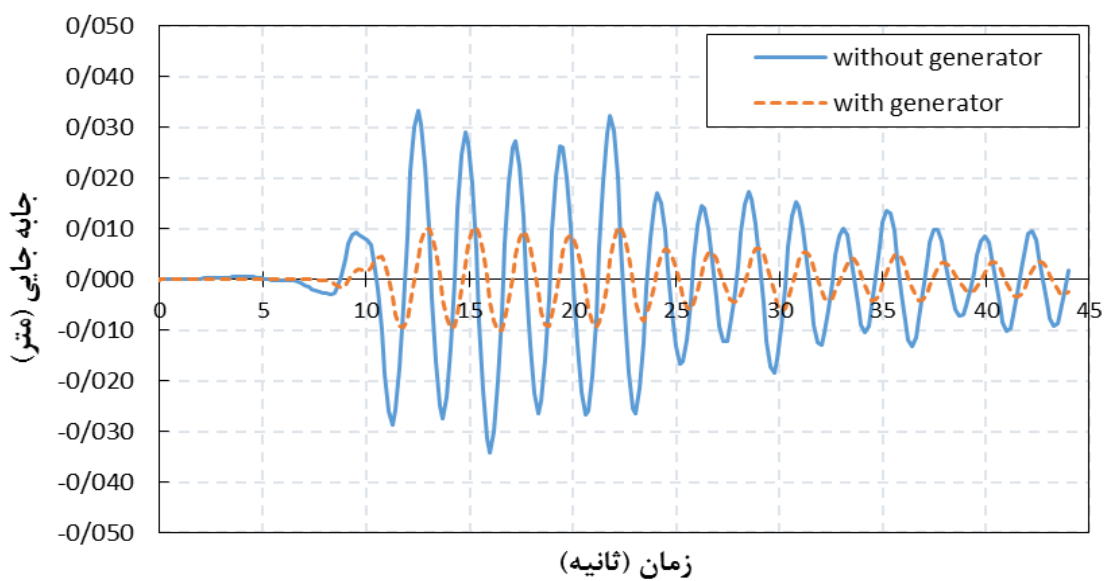


زمان (ثانیه)

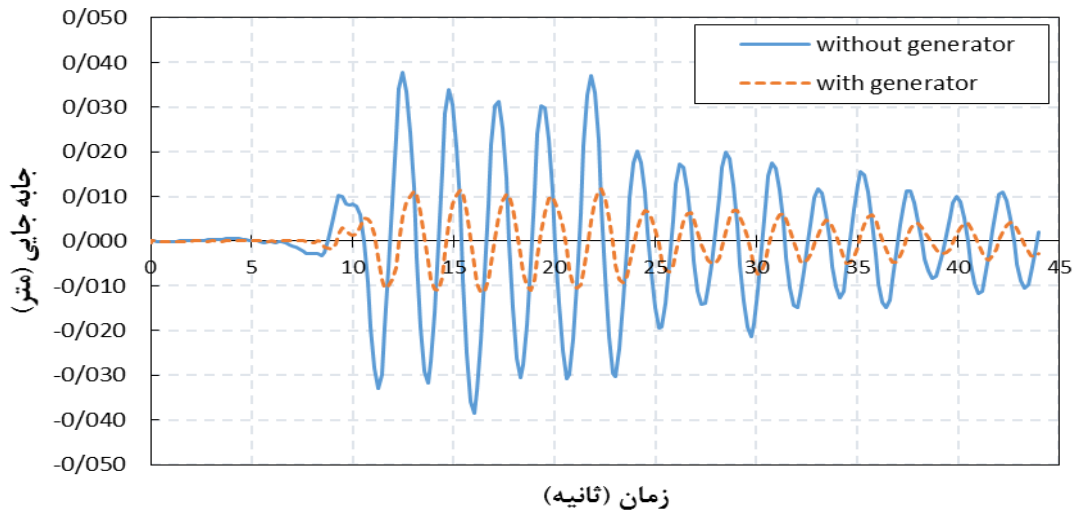
شکل ۴-۲۸. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Cape در طبقه اول در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.



شکل ۴-۲۹. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Cape در طبقه دوم در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.



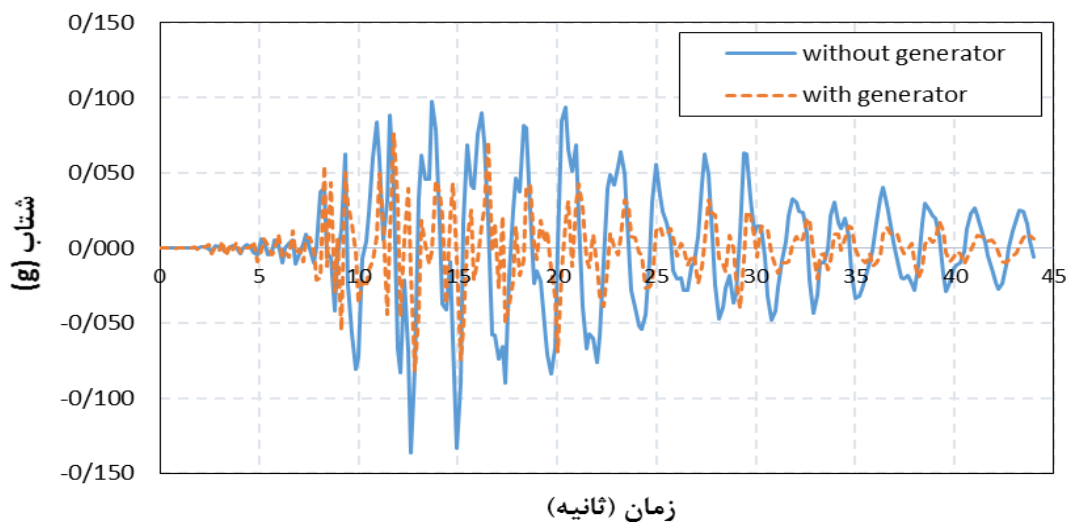
شکل ۴-۳۰. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Cape در طبقه سوم در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.



شکل ۴-۳۱. نمودار جابه‌جایی افقی ناشی از موج زلزله افقی Cape در طبقه چهارم در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج

ب: تأثیر تولید کننده موج بر شتاب وارده به سازه

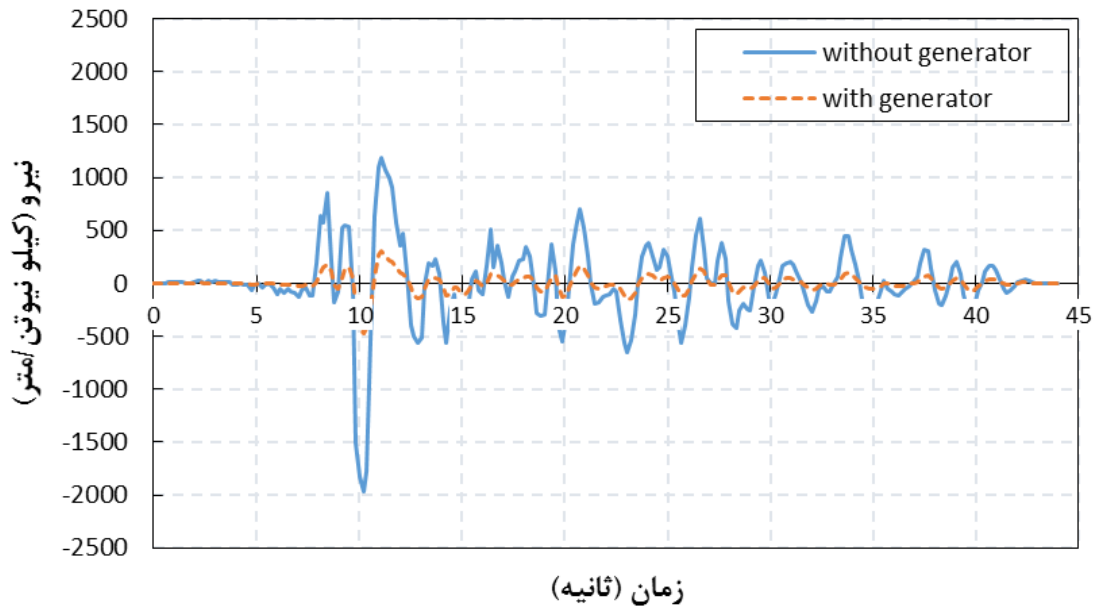
شکل ۴-۳۲ نمودار شتاب-زمان وارده به سطح زمین را برای زلزله افقی Cape در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج نشان می‌دهد. دیده می‌شود که وجود تولید کننده موج تأثیر بسزایی در کاهش شتاب‌های وارده به سطح زمین و سازه، در طول مدت زلزله داشته است.



شکل ۴-۳۲ نمودار شتاب-زمان وارده به سطح زمین ناشی از موج زلزله افقی Cape در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.

ج: تأثیر تولید کننده موج بر نیرو وارده به سازه

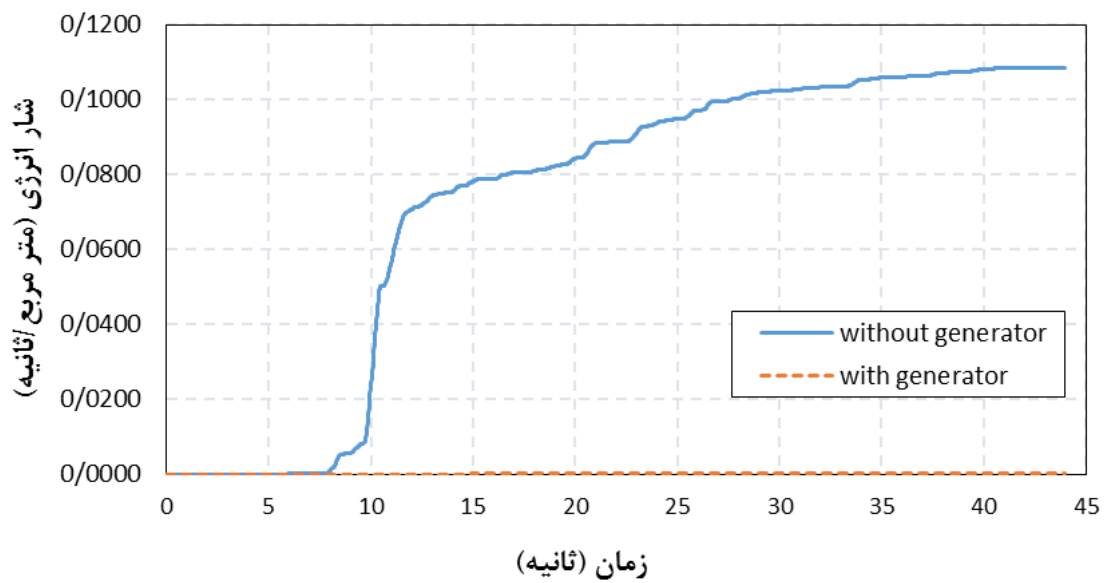
شکل ۴-۳۳ نمودار نیرو-زمان (برش پایه) را در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج برای زلزله Cape را نشان می‌دهد. با توجه به تأثیر مناسب تولید کننده موج بر کاهش شتاب‌های وارده به سطح زمین می‌توان کاهش چشمگیر نیرو ناشی از موج زلزله وارده به سطح زمین را پیش‌بینی نمود.



شکل ۴-۳۳. نمودار نیرو-زمان ناشی از موج زلزله افقی Cape در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.

د: تأثیر تولید کننده موج بر نیرو زلزله

شکل ۴-۳۴ نمودار انرژی مربوط به زلزله Cape در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج را نشان می‌دهد. تولید کننده موج در زلزله Cape توانسته سبب کاهش مناسب نیروی افقی ناشی از زلزله گردد.



شکل ۴-۳۴. نمودار انرژی-زمان ناشی از موج زلزله افقی Cape در دو حالت وجود و عدم وجود تولید کننده موج.

فصل ۵: جمع بندی و پیشنهادات

۵-۱ مقدمه

تاکنون روش‌های بسیاری در زمینه کاهش ارتعاشات ناشی از زلزله به‌وجود آمده است مانند: ایجاد ترانسه‌های فعال و غیر فعال، انواع روش‌های تراکمی، استفاده از نانو مواد، استفاده از ژئوفوم و ... که هرکدام یک از این روش‌ها نسبت به یکدیگر مزایا و معایبی را دارا می‌باشند. نکته قابل توجهی که در همه روش‌ها قابل رویت است، اجرای آن‌ها قبل از اجرای سازه و همچنین عدم امکان استفاده مجدد از این روش‌ها در مناطق دیگر می‌باشد. از اینرو برای محافظت سازه‌های موجود در برابر زلزله روش‌های اندکی موجود است. در این پژوهش تلاش گردیده است تا روشی برای کاهش اثرات زلزله بیان گردد که قابلیت‌هایی همچون: استفاده مجدد از دستگاه برای مناطق دیگر جهت کاهش هزینه‌ها، اجرای آسان و بدون نیاز به دانش و مهارت خاص جهت اجرا را دارا است. در ادامه جمع‌بندی نتایج بدست آمده از مدلسازی در نرم‌افزار پلکسیس و پیشنهادات به اختصار آورده شده است.

۵-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

استفاده از فیلتر کالمن به منظور تولید موج جهت کاهش اثرات زلزله، روشی نوین می‌باشد که می‌توان مثال‌هایی از این روش را در نویزگیر تلفن‌های همراه هوشمند، ردیابی هدف و ... دید. فیلتر کالمن از طریق پیش‌بینی و اصلاحاتی که در پیش‌بینی انجام شده، اعمال می‌نماید، تأثیر مثبتی در کاهش مقادیر شتاب زلزله داشته است.

در این پژوهش جنبه‌های فنی تولید موج توسط دستگاه تولید کننده موج بررسی نشده است. اما می‌دانیم تولید موج توسط دستگاه تولید کننده موج نیازمند طراحی دقیق می‌باشد. در واقع این پژوهش امکان سنجی استفاده از متدی جدید به منظور خنثی سازی موج رندوم زلزله را بررسی می‌نماید. و جنبه‌های آزمایشگاهی و میدانی دستگاه تولید کننده موج و نحوه قرار گیری دستگاه بررسی نشده است.

نتایج بدست آمده از این پژوهش حاصل تحلیل نرم افزارهای متلب و پلکسیس می باشد. نتایج بدست آمده در زیر آورده شده است.

- فیلتر کالمن با یک خطای ناچیز توانسته در پیش بینی مقادیر شتاب زلزله موفق عمل نماید. این فیلتر در واقع دستگاه تولید کننده موج را یک گام زمانی نسبت به زلزله پیش می اندازد.
- بررسی نمودار انرژی موج زلزله در حالت بدون وجود تولید کننده موج نسبت به حالت وجود تولید کننده موج، نشان می دهد که این روش توانسته بیش از ۷۰ درصد انرژی موج زلزله را خنثی نماید.
- نتایج بدست آمده از تحلیل در نرم افزار مدلسازی پلکسیس نشان داد که تولید کننده موج می تواند سبب کاهش ۵۰ درصدی جابه جایی ها گردد. این امر موجب کاهش بسیاری از خسارات ناشی از جابه جایی های سازه در اثر زلزله می گردد.
- استفاده از تولید کننده موج موجب کاهش حدود ۴۰ درصدی نیروی ناشی از زلزله می شود که همان برش پایه ناشی از زلزله است.
- استفاده از این ایده می تواند در طراحی سبکتر و اقتصادی تر سازه ها مؤثر واقع شود.

۳-۵ پیشنهادات

- عناوین و موضوعات پیشنهادی برای تحقیقات آتی در زمینه استفاده از دستگاه تولید کننده موج به منظور کاهش پاسخ لرزه ای سازه ها را می توان بصورت موارد ذیل مطرح نمود:
- استفاده از حالت های دیگر فیلتر کالمن به منظور پیش بینی مقادیر شتاب و اعتبار سنجی روش.
 - استفاده از فیلترهای نوین دیگر به منظور پیش بینی موج وارده.

• ساخت نمونه آزمایشگاهی تولید کننده موج و بررسی عملکرد آن بر اساس نتایج بدست آمده

از این پژوهش

مراجع

- [۱] پورحیدری، غ.، ایوبیان، ز.، موسوی، س. (۱۳۸۶). ماهیت زلزله (اقدامات قبل، حین و بعد از وقوع آن). جلد اول، چاپ چهارم، انتشارات موسسه آموزش عالی علمی کاربردی هلال ایران، تهران، ص ۲-۵.
- [2] Herbut, A. (2017). A proposal for vibration isolation of structures by using a wave generator. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 573-585.
- [3] Blumenthal, M. (1998). Scrap tire market development: the impact of state programs. *Resource Recycling*, 17, 15-19.
- [4] O'Shaughnessy, V., & Garga, V. K. (2000). Tire-reinforced earthfill. Part 3: Environmental assessment. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(1), 117-131.
- [5] Cetin, H., Fener, M., & Gunaydin, O. (2006). Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material. *Engineering geology*, 88(1-2), 110-120.
- [6] Feng, Z. Y., & Sutter, K. G. (2000). Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, 23(3), 338-344.
- [7] Tsang, H. H. (2008). Seismic isolation by rubber-soil mixtures for developing countries. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 37(2), 283-303.
- [8] Edinçliler, A., Baykal, G., & Dengili, K. (2004). Determination of static and dynamic behavior of recycled materials for highways. *Resources, conservation and Recycling*, 42(3), 223-237.
- [9] Tanchaisawat, T., Bergado, D. T., Voottipruex, P., & Shehzad, K. (2010). Interaction between geogrid reinforcement and tire chip-sand lightweight backfill. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(1), 119-127.

- [10] Yoon, Y. W., Heo, S. B., & Kim, K. S. (2008). Geotechnical performance of waste tires for soil reinforcement from chamber tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(1), 100-107.
- [11] Pasquini, E., Canestrari, F., Cardone, F., & Santagata, F. A. (2011). Performance evaluation of gap graded asphalt rubber mixtures. *Construction and Building Materials*, 25(4), 2014-2022.
- [12] Rahmani Firoozjani, Y., Marandi, S. M., & Kermani, S. S. (2011). Effect of Granulated Rubber-Soil Mixture on Reducing Retaining Walls Displacement Under Earthquake Forces. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 94, pp. 3-17). Trans Tech Publications.
- [13] Youwai, S., & Bergado, D. T. (2004). Numerical analysis of reinforced wall using rubber tire chips-sand mixtures as backfill material. *Computers and Geotechnics*, 31(2), 103-114.
- [14] Christ, M., & Park, J. B. (2010). Laboratory determination of strength properties of frozen rubber-sand mixtures. *Cold Regions Science and Technology*, 60(2), 169-175.
- [15] Akbulut, S., Arasan, S., & Kalkan, E. (2007). Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. *Applied Clay Science*, 38(1-2), 23-32.
- [۱۶] زائری، ف. و عامل سخی، م. (۱۳۹۰). "استفاده از مخلوط خاک-لاستیک فرسوده به عنوان میراگر در زیر پی ساختمان‌های واقع بر خاک رس"، اولین کنفرانس ملی مدیریت بحران، تهران، ایران ۱۵۶.
- [17] Khodaparast, M., Rajabi, A. (2015). "The study of strength behavior of sandy soil mixed with plastic waste and cement slurry", *Journal of Enviromental Science and Technology and civil*, Vol. 2, No. 2.
- [۱۸] رضائی، ا. (۱۳۹۶). پایان نامه ارشد: "کاهش ارتعاشات لرزه‌ای در سازه‌ها با استفاده از موانع موج در زمین، با درنظر گرفتن اثرات اندرکش خاک و سازه"، دانشکده عمران، دانشگاه تهران.

[۱۹] شریعتمداری، ه.، دهستانی و منصوره کدخدای بلقور، (۱۳۹۰). "بررسی و کاربرد اثر ترانسه ها به عنوان عایق در برابر لرزش و انتشار امواج"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان.

[۲۰] میرزایی، م. و روزبهانی، م.، (۱۳۹۷). "بررسی آزمایشگاهی تثبیت خاک ماسه رس دار با استفاده از سیلیکافوم و فعال کننده های مختلف"، کنفرانس بین المللی عمران و شهرسازی، تهران، ایران.

[21] Herbut, A. (2016). A study of the reduction of ground vibrations by an active generator. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 328-344.

[22] Feher, K. (1997). *Advanced digital communications: systems and signal processing techniques*. Noble Publishing Corporation.

[23] Fridman, A. M., Alperovich, L. S., Shemer, L., Pustilnik, L., Shtivelman, D., Marchuk, A. G. E., & Liberzon, D. (2010). Tsunami wave suppression using submarine barriers. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 180(8), 843-850.

[24] Kadri, U. (2017). Tsunami mitigation by resonant triad interaction with acoustic-gravity waves. *Heliyon*, 3(1), e00234.

[۲۵] حجت، آ. (۱۳۹۲). "روش های لرزه نگاری". ژئوفیزیک اکتشافی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

[26] Wei, Z. (2008). Design of a P-wave seismic vibrator with advanced performance. *GeoArabia*, 13(2), 123-136.

[27] Bowles, D., & Brown, R. L. (1981). A stress-wave generator for snow and ice studies. *Journal of Glaciology*, 27(97), 470-475.

[28] Raichlen, F., & Lee, J. J. (1978). An inclined-plate wave generator. In *Coastal Engineering 1978* (pp. 388-399).

[29] Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature neuroscience*, 3(11s), 1212.

[۳۰] شمس اسفندآبادی، محمد، (۱۳۹۵). "اصول فیلترهای تطبیقی الگوریتم ها و تحلیل عملکرد" جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران.

- [31] Grewal M.S., Andrews A.P. (2001) "Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB", Vol.1, Second Edition, John Wiley & Sons, USA.
- [32] Kalman, R. E. (1960) "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," Transaction of the ASME-Journal of Basic Engineering, pp. 35-45
- [33] Elgamel S.A., Soraghan J.(2009) "Target Tracking Enhancement Using a Kalman Filter in the Presence of Interference" IGARSS, 3, ppIII-681.
- [34] Welch G., Bishop G.,(2001) "An Introduction to the Kalman Filter", University Of North Carolina.
- [35] Reif K., Gunther S., Yaz E., Unbehauen R. (1999) "Stochastic Stability of the Discrete-Time Extended Kalman Filter". IEEE Trans.Automatic Control.
- [36] Jazwinski A. H.,(1970) "Stochastic Processes and Filtering Theory", Academic Press, New York.
- [37] Niedzwiecki, M., Ciolek, M. And Cisowski, K. (0218). Elimination of Impulsive Disturbances from Stereo Audio Recordings Using Vector Autoregressive Modeling and Variable-order Kalman Filtering. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. Vol. 03. No. 6. 222 – 251.
- [38] Ashoorirad, M., & Khezerloo, R. B. (2015). Enhancement and Denoising of ECG Signals using Adaptive Kalman Filter. *Arak Medical University Journal*.
- [39] Kumar, M. N. V. S. S., Modalavalasa, N., Ganesh, L., Prasad, K. S., & Rao, G. S. (2016). A new approach for tracking moving objects in underwater environment. *Current Science*, 110(7), 1315-1323.
- [40] Funk, N. (2003). A study of the Kalman filter applied to visual tracking. University of Alberta, Project for CMPUT, 652(6).
- [41] Jiang, Z., Song, Q., He, Y., & Han, J. (2007, December). A novel adaptive unscented Kalman filter for nonlinear estimation. In *2007 46th IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 4293-4298). IEEE.

پوست

```

Clear all
Clc
Close all
% meghdar dahie avvalie be parametr haye sarasari (global)
t=xlsread ('northridge.xlsx');
x=t (:, 2);
t=t (:,1);
n=length (t);
Q=0.05;
[y,k,p]=KalmanUniDim(x,Q);

yy=y %% yy=signal hasel jam signal vorodi va manfi signal toilidi az tariq kalman
for i=1:n ;
    yy(i)=x(i)-y(i) ;
end

function [Y,KK,P]= KalmanUniDim( X,Q )

N=length(X);
% Filter parameters
A = 1.00; % matrix enteghal
P = zeros(1,N); %matrix variance
P(1) = 1.0; % meghdar dahi avvalie
R = 0.05; % andaze giri variance noise
Y = zeros(1,N); % bordare takhmin
Y(1) = 0.00 ; % meghdar dahi avvalie
KK = zeros(1,N); % bordare bahre kalman
for i=2:N
    X_temp =A*Y(i-1);
    P_temp =(A*P(i-1)*A')+Q;
    K = P_temp./(P_temp + R);
    Y(i) = X_temp + (K*(X(i-1)-X_temp));
    P(i) = (1-K) * P_temp;
    KK(i) = K ;
end

```

Abstract

Earthquake is one of the most destructive natural phenomena that annually kills, injures and destroys many people. Most existing methods of soil strengthening or structure against earthquakes are dependent on the type of structure or soil and so far there is not an independent method of the kind of structure and soil with high flexibility in most environmental conditions and a method with the possibility of using existing structures. In this research, the idea of a wave generator that produces a wave with opposite of earthquake wave by prediction of earthquake wave is presented. In this approach, using the adaptive kalman filter which has the ability to estimate the earthquake wave changes with a percentage error, is used to predict the sign and magnitude of the earthquake, to generate a wave that can reduce the amplitude of the earthquake. In this study, MATLAB software was used to code the Kalman filter and calculate the effective generation wave in earthquake wave reduction and Plexis software was used to model and evaluate the severity of earthquake impact reduction. The results show that the proposed method reduces over 55% of acceleration amplitude, over 70% of earthquake energy applied to structures and more than 50% of displacements caused by it. The positive results of the proposed method can be applied to a wave generator to reduce earthquake vibrations.

Keywords: Wave Generator, Earthquake Wave, Kalman Filter, Vibration Reduction



Shahrood University of technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc Thesis in Geotechnical Engineering

Reduction of Seismic Response of Structures during earthquake using wave generator

By: Sina Ahmari

Supervisor:

Dr. Amir bazrafshan moghadam

January, 2020