

## استفاده از تئوری موجک در تحلیل دینامیکی توامان دیوارهای حائل بتنی و محیط خاک

احمد رضا سیف‌الدین<sup>۱</sup>، هیثم حیدرزاده<sup>۲\*</sup> و حامد رضا ظریف صنایعی<sup>۳</sup>

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

۲\* دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

۳ دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

Email: heidarzadeh@sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۱۲/۰۹]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۰۲/۰۹]

### چکیده

استفاده از تئوری موجک در تحلیل مسائل دینامیکی مرتبط با مهندسی عمران روند رو به رشد دارد. تحقیق پیشرو تلاش دارد تا به بررسی تاثیر استفاده از تئوری موجک در تحلیل دینامیکی دیوار حائل بتنی، بپردازد. برای این منظور یک محیط خاکی به همراه دیوارهای حائل بتنی با ابعاد (ارتفاع) مختلف در نظر گرفته می‌شوند. تحلیل‌های عددی، بر اساس روش عددی المان محدود انجام می‌پذیرد. رکورد زلزله سرپل ذهاب به همراه رکوردهای حاصل از چهار مرحله (گام) فیلتر کردن آن رکورد توسط تئوری موجک، برای تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، در اولین مرحله مدلسازی، رکورد زلزله سرپل ذهاب در چهار مرحله با استفاده از تئوری موجک گسسته فیلتر می‌شود. در واقع با هر بار استفاده از تئوری موجک تعداد داده‌های زلزله تقریباً نصف می‌شود. در مرحله بعد، مدل‌های عددی آماده شده و تحت اثر بارگذاری دینامیکی رکوردهای موجود قرار می‌گیرند. درصد تفاوت در نتایج تحلیل با رکوردهای حاصل از مراحل مختلف فیلتر کردن رکورد زلزله با موجک نسبت به تحلیل با رکورد اصلی، به همراه کاهش زمان محاسبات به طور ویژه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، بهترین هماهنگی نتایج بعد از فیلتر کردن نسبت به نتایج رکورد اصلی، مربوط به فیلتر مرحله اول است. ملاحظه می‌شود که حتی فیلتر مرحله اول باعث می‌شود که زمان تحلیل حدود ۶۰ درصد کاهش یابد. بر اساس نتایج حاصل شده ملاحظه می‌شود که با افزایش ارتفاع دیوار، اختلاف نتایج بدست آمده از رکوردهای فیلتر شده نسبت به رکورد اصلی، کمتر می‌شود. همچنین ملاحظه شده است که تا فیلتر مرحله سه، کماتان نتایج قابل قبولی حاصل می‌شود؛ ضمن اینکه زمان تحلیل تقریباً ۸۰ درصد کاهش می‌یابد.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل دینامیکی، تحلیل توامان خاک و دیوار، دیوار حائل، المان محدود، تئوری موجک.

### ۱- مقدمه

که احتیاج به تکیه‌گاه جانبی باشد استفاده شود. دیوار حائل می‌تواند به صورت‌های وزنی، طره‌ای، پشت‌بنددار طراحی شود.

سازه نگهبان یا دیوار حائل، دیواری است که بتواند به صورت یک سازه نگه‌دارنده و تکیه‌گاهی برای پایداری سازه دیگر یا جلوگیری از ریزش و مهار خاک و به‌طورکلی هر جا

راستای انجام شبیه‌سازی‌های عددی (مطالعات عددی) از روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS بهره برده شده است.

## ۲- استفاده از تئوری موجک

واژه موجک نخستین بار توسط آلفرد هار در سال ۱۹۰۹ استفاده شد. امروزه هم این موجک‌ها به همان نام یعنی موجک‌های هار معروف شده‌اند. موجک هار اولین و ساده‌ترین نوع موجک گسسته است. در آنالیز تابعی، تبدیل موجک گسسته تبدیل موجکی است که توابع موجک آن نمونه‌برداری شده‌اند. در مقایسه با تبدیل فوریه می‌توان گفت که تبدیل موجک دارای ویژگی محلی سازی بسیار خوبی است. برای نمونه تبدیل فوریه یک پیک تیز دارای تعداد زیادی ضریب است، چراکه توابع پایه تبدیل فوریه توابع سینوسی و کسینوسی هستند که دامنه آن‌ها در کل بازه ثابت است. درحالی‌که توابع موجک توابعی هستند که بیشتر انرژی آن‌ها در بازه کوچکی متمرکز شده است و به سرعت میرا می‌شوند. بنابراین با انتخاب مناسب موجک مادر می‌توان فشردگی‌سازی بهتری در مقایسه با تبدیل فوریه انجام داد. در تبدیل موجک، توابع مادر و مقیاس متفاوتی وجود دارند [7].

سلاجقه و حیدری در سال ۲۰۰۵ میلادی تلاش کرده‌اند تا به کمک تئوری موجک، طراحی بهینه ساختمان‌ها در مقابل زلزله را ارائه دهند [8]. در تحقیق آن‌ها ملاحظه شد که زمان تحلیل تا ۱۰ درصد روش‌های متداول کاهش یافت و خطای آن (تفاوت نسبت به زلزله اصلی) حدود ۷ درصد ارزیابی شد [8]. همچنین این مؤلفین در جای دیگر [9] با استفاده از روش ترکیبی ژنتیک و تبدیل گسسته موجکی اقدام به طراحی بهینه ساختمان در مقابل زلزله نمودند. زمان موردنیاز در این حالت ۳۵ درصد زمانی بود که از تبدیل موجکی استفاده نشده بود و خطای حاصل حدود ۱۵ درصد بود.

کامگار و همکاران [10] از تبدیل موجک گسسته در تحلیل غیرخطی لرزه‌ای مسائل اندرکنش خاک و سازه استفاده کردند. شبیه‌سازی آثار اندرکنش خاک-سازه (SSI) فرآیندی زمان‌بر و پرهزینه است و نادیده گرفتن تأثیر SSI بر پاسخ سازه ممکن است منجر به نتایج نادرست، به ویژه در مورد

با توجه به اینکه کار دیوارهای حائل در حفاظت سازه‌های مرتبط با آن‌ها بسیار پراهمیت است، لزوم مطالعه رفتار دینامیکی این نوع سازه‌ها را به دلیل وارد آمدن خسارت مالی و جانی، دوچندان می‌نماید [1]. این‌گونه سازه‌ها باید در برابر نیروهای وارد بر دیوار پایداری داشته باشند. علاوه بر بارهای استاتیکی که همواره جزء جدانشدنی محاسبات این‌گونه دیوارها هستند، نیروهای از قبیل نیروهای سیکلیک ناشی از حرکت ماشین‌آلات و همچنین نیروی دینامیکی ناشی از زمین‌لرزه که در طول دوران بهره‌برداری امکان وارد آمدن بر دیوار وجود دارد، نیز می‌تواند بر این سازه‌ها وارد آید که باید موردبررسی و ارزیابی قرار گیرد.

تلاش برای بررسی و تحلیل رفتار دینامیکی دیوارهای حائل مختلف یکی از موضوعات چالشی، بسیار پرکاربرد و جذاب بین پژوهشگران مختلف است که از گذشته تا حال بسیاری را به خود مشغول کرده است [2-6]. مطالعه روی رفتار دیوارهای حائل را می‌توان در حالت کلی به سه بخش تفکیک کرد: مطالعات آزمایشگاهی، مطالعات تحلیلی و مطالعات عددی (شبیه‌سازی‌های عددی). در اینجا، تاکید روی مطالعه رفتار دینامیکی این سازه‌ها در مطالعات (شبیه‌سازی‌های) عددی است.

تحلیل دینامیکی سازه‌ها با استفاده از رکوردهای ثبت شده زلزله‌ها می‌تواند بسیار زمان‌بر باشد. بنابراین در اینجا تلاش می‌شود تا با استفاده از تئوری موجک تعداد داده‌های مربوط به هر زلزله کاهش داده شود و اثر این کاهش بر تحلیل دینامیکی دیوارهای حائل مورد ارزیابی قرار گیرد. با هر بار استفاده از تئوری موجک می‌توان تعداد داده‌های زلزله را تقریباً نصف و در نتیجه زمان اجرای محاسبات را کوتاه‌تر کرد (سرعت محاسبات را افزایش داد). از این‌رو، تعداد مراحل استفاده از تئوری موجک در یک زلزله و خطای حاصل از این مراحل باید مورد ارزیابی قرار گیرد تا مشخص شود که برای تحلیل دینامیکی دیوار حائل تا چند مرحله می‌توان از تئوری موجک استفاده نمود. همچنین بررسی می‌شود که با هر مرحله اعمال تئوری موجک بر زلزله، با دینامیکی خروجی، چقدر از زلزله اصلی فاصله می‌گیرد. برای این منظور، در این پژوهش در

ویژگی‌های مودال و تشخیص آسیب در سازه‌ها محبوبیت پیدا کرد.

خان‌احمدی و همکاران [13] از تبدیل موجک دوبعدی گسسته در تشخیص آسیب در صفحات فولادی استفاده کردند. در ابتدا صفحه فولادی در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS با شرایط تکیه‌گاهی آزاد مدل‌سازی شد و سپس شکل هشت مود اول سالم و آسیب‌دیده استخراج شد.

ژیو چوین و همکاران [14] به منظور هشدار پایداری در دیوار حائل شمعی آسیب‌دیده از موجک بهره برده‌اند. ایشان یک شاخص هشداردهنده آسیب، ERVC، بر اساس تجزیه و تحلیل طیف انرژی باند فرکانس حاصل از موجک، پیشنهاد دادند. سپس، ارتباط ذاتی بین ERVC، فشار زمین و پایداری دیوارهای حائل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ERVC، پایداری دیوار کاهش می‌یابد و زمانی که ERVC به مقدار آستانه برسد، وارد حالت پایدار بحرانی می‌شود.

همچنین، آقامولایی و همکاران [15] برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای حائل طره‌ای تحت اثر زلزله‌های نزدیک به گسل، از مفهوم تئوری موجک کمک گرفتند. آنها در تحقیق خود از موجک برای استخراج پالس سرعت حرکات استفاده کردند. معماریان سرخابی و همکاران [16] از تجزیه موجک سه بعدی (3WD) برای کاهش نویز، بازسازی و اصلاح فاز در تحلیل شیروانی‌ها و زمین لغزش‌ها استفاده کردند. از موارد دیگری که از تئوری موجک در تحلیل‌های خود استفاده کردند می‌توان به مقاله‌ها و همکاران [17] اشاره نمود. پاسخ دینامیکی دیوارهای حائل طره‌ای به همراه تئوری موجک مورد ارزیابی قرار گرفت. آنها تمرکزشان بر جابه‌جایی‌های دیوار و خاک اطراف قرار داشت. بر این اساس، آنها نتیجه گرفتند که جابه‌جایی‌های نسبی دیوار، بسته به جهت حرکت زمین در برابر حرکت دیوار می‌تواند بسیار موثر و تا حدود ۴۶٪ اثرگذار بودند. همچنین، جاودانیان و گودرزی [18] رفتار دینامیکی خاک مسلح شده با ژئوگرید را با کمک تئوری موجک مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که جابه‌جایی جانبی و بیشترین نیروی کششی ایجاد شده در ژئوگریدها در تحلیل‌های

تحلیل غیرخطی لرزه‌ای، شود. با این توصیف ایشان در پژوهش خود از روش تبدیل موجک برای بررسی پاسخ لرزه‌ای سیستم‌های خاک - سازه استفاده کرده‌اند. برای این منظور، ساختمان‌های طبقه‌بندی متفاوتی که روی دو نوع خاک متفاوت قرار دارند، برای تحلیل SSI در نظر گرفته شدند. برای هر سیستم SSI، چندین رکورد لرزه‌ای، با مقادیر مختلف پیک شتاب زمین (PGA) و بیشترین سرعت زمین (PGV)، ابتدا با استفاده از تبدیل موجک گسسته به سیگنال‌های تقریبی و دقیق تجزیه شده‌اند. سپس پاسخ‌های لرزه‌ای سیستم‌های SSI در معرض سیگنال تقریبی ارزیابی شده‌اند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که برای زلزله‌های با نسبت PGA/PGV پایین، درصد خطای تمامی پارامترها برای سطح اول کمتر از ۵ درصد و برای سطح سوم کمتر از ۱۰ درصد است. با افزایش نسبت PGA/PGV یک زلزله، تطابق نتایج تقریبی با نتایج اصلی کاهش می‌یابد. با این حال، حتی برای زمین‌لرزه‌هایی با نسبت PGA/PGV بالاتر از  $1.2 \text{ g s/m}$ ، می‌توان از تقریب سطح اول برای پیش‌بینی پاسخ‌های لرزه‌ای با دقت حداقل ۹۰ درصد و در عین حال کاهش قابل توجه زمان محاسباتی استفاده کرد.

دادخواه و همکاران [11] از تبدیل موجک گسسته برای کاهش هزینه محاسبات برای تحلیل دینامیکی افزایشی سازه‌های ساختمانی استفاده کردند. در این روش با توجه به اینکه تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) یکی از دقیق‌ترین تحلیل‌های غیرخطی لرزه‌ای است اما روشی زمان‌بر است و هزینه محاسباتی بالایی دارد. همچنین، منحنی IDA باید از تجزیه و تحلیل ساختمان در معرض یک سری زمین‌لرزه به دست آید که باید تمام مناطق پاسخ‌های سازه را پوشش دهد. استفاده از تبدیل موجک گسسته برای حل این مسائل نشان داد که استفاده از رکوردهای فیلتر شده هزینه و زمان محاسباتی را به ترتیب حدود ۸۷.۴٪ و ۷۳٪ کاهش می‌دهد، درحالی‌که بیشترین خطای آن فقط حدود ۷.۶٪ است.

کانکانامگ و همکاران [12] برای پایش سازه از تبدیل موجک استفاده کردند. الگوریتم‌های مختلف تشخیص آسیب مبتنی بر ارتعاش در چند دهه گذشته توسعه یافته‌اند. در میان آنها، تبدیل موجک (WT) به عنوان یک روش کارآمد برای پردازش سیگنال برای ساخت چارچوبی برای شناسایی

تمام مؤلفه‌های فرکانسی آن از ابتدا تا انتهای سیگنال حضور دارند، تعیین می‌شود. در مقابل در تبدیل موجک، موقعیت زمانی هر فرکانس مشخص شده و امکان تحلیل فرکانس‌های غیر پایدار و محل ناپیوستگی در سیگنال فراهم می‌آید [23]. در حالت کلی موجک‌ها به دو دسته، موجک گسسته (DWT) و موجک پیوسته (CWT) تقسیم می‌شوند.

در تبدیل موجک گسسته (DWT) پیاده‌سازی تبدیل موجک با استفاده از مجموعه‌ای گسسته از مقیاس‌های موجک و تبدیل‌هایی است که از برخی قوانین تعریف شده پیروی می‌کنند. به عبارت دیگر، این تبدیل، سیگنال را به مجموعه‌ای متعامد از موجک‌ها تجزیه می‌کند. در مقابل، تبدیل موجک پیوسته (CWT)، پیاده‌سازی تبدیل موجک با استفاده از مقیاس‌های دلخواه و موجک‌های تقریباً دلخواه است. موجک‌های مورد استفاده متعامد نیستند و داده‌های به دست آمده از این تبدیل، همبستگی بالایی دارند. برای سری‌های زمانی گسسته می‌توان از این تبدیل نیز استفاده کرد، با این محدودیت که کوچک‌ترین تبدیل موجک باید برابر با نمونه‌گیری داده باشد. گاهی اوقات به آن تبدیل موجک پیوسته زمان گسسته (DT-CWT) می‌گویند و این پرکاربردترین روش برای محاسبه CWT در کاربردهای واقعی است. در عمل، می‌توان تبدیل‌های موجک پیوسته و گسسته را به کمک ابزارها و توابع موجود در نرم افزار متلب (MATLAB) استخراج نمود. بر این اساس، رکوردهای زلزله را می‌توان وارد نرم‌افزار متلب کرد و با کدنویسی مناسب، رکوردهای خروجی فیلتر شده (با مراحل مختلف فیلتراسیون) بدست آورد. سپس از رکوردهای بدست آمده (فیلتر شده توسط تبدیل موجک) در تحلیل‌های دینامیکی استفاده نمود.

#### ۴- روند مدل‌سازی

هدف این تحقیق مقایسه و ارزیابی رفتار لرزه‌ای دیوار حائل بتنی وزنی با استفاده از تئوری موجک در تحلیل دینامیکی است. دیوارهای حائل مورد استفاده در این پژوهش شامل دیوار حائل به ارتفاع ۵، ۷ و ۹ متر است. عرض دیوار حائل در تاج ۲ متر و در پاشنه دیوار ۵ متر است. هندسه

انجام شده با سطوح ۱ و ۲ فیلتر شده با موجک، انطباق مناسبی را با نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی با زلزله اصلی دارد.

#### ۳- خلاصه‌ای از تئوری موجک

تبدیل فوریه پاسخگوی تمام نیازها در زمینه پردازش فرکانسی نبود؛ و به همین دلیل، تبدیل موجک به وجود آمد. تبدیل موجک توانمندی خود را در بهینه‌سازی دینامیکی و تحلیل‌های دینامیکی به‌خوبی نشان داده است [19-22]. در تبدیل فوریه برای پیدا کردن فرکانس‌های موجود، سیگنال موردنظر روی توابع سینوس-کسینوسی و هارمونیک‌های آن‌ها تصویر می‌شود. در تبدیل موجک، سیگنال روی دسته‌ای از توابع که موجک نامیده شده و با  $g_{b,\tau}(t)$  نشان داده می‌شوند تصویر می‌شود.

$g(t)$  تابع مادر و پارامترهای  $b$  و  $\tau$  مقیاس و انتقال نامیده می‌شوند. رابطه بین موجک مادر و پارامترهای مقیاس و انتقال به صورت زیر است:

$$g_{b,\tau}(t) = \frac{g\left(\frac{t-\tau}{b}\right)}{\sqrt{b}} \quad (1)$$

اگر پارامتر  $b$  افزایش یابد، موجک مادر کشیده شده و بخش بزرگی از سیگنال را پوشش می‌دهد. بنابراین با افزایش پارامتر  $b$  محتوای فرکانسی پایینتر آشکار می‌شود. با کاهش پارامتر  $b$ ، موجک منقبض شده و بخش کوچکی از سیگنال را پوشش می‌دهد. در این حالت نیز مقیاس کوچک متناظر با محتوای فرکانسی بالای سیگنال است. پارامتر  $\tau$  موجک را روی سیگنال اصلی انتقال داده و متناظر با انتقال در حوزه زمان است.

برای محاسبه تبدیل پیوسته سیگنال، ابتدا موجک مادر انتخاب می‌شود. موجک مادر با عامل  $b$  منبسط یا منقبض شده و با عامل  $\tau$  انتقال می‌یابد. سپس سیگنال موردنظر روی  $g_{b,\tau}(t)$  تصویر شده و تبدیل موجک سیگنال محاسبه می‌شود. این عمل به ازای تمامی مقادیر  $\tau$  (انتقال موجک روی کل سیگنال) و تمامی مقادیر  $b$  (جستجو به ازای تمامی فرکانس‌ها) برای به دست آوردن تبدیل موجک انجام می‌شود. با استفاده از تبدیل فوریه، ساختار فرکانسی موجود در سیگنال با این فرض که

## ۴-۱- ویژگی‌های میرایی

به منظور تحلیل دینامیکی خاک - سازه نیاز به ماتریس میرایی است. میرایی در نظر گرفته شده در این روش متناسب با جرم و سختی سیستم بوده و از میرایی رایلی استفاده می شود. ماتریس میرایی در حالت کلی به صورت ذیل تعریف می شود:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4)$$

که در رابطه فوق،  $M$  و  $K$  به ترتیب ماتریس‌های جرم و سختی هستند. ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  در ماتریس میرایی بر اساس روش رایلی محاسبه می شوند. برای استخراج ضرایب میرایی ابتدا توده خاک مورد نظر مورد تحلیل فرکانسی قرار داده شد و بر اساس زمان تناوب استخراجی مقادیر ضرایب میرایی خاک محاسبه شد. در جدول (۳) مقادیر ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  برای مسئله مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول ۳. مقادیر ضرایب میرایی  $\alpha$  و  $\beta$  برای محیط مورد مطالعه

$\beta$	$\alpha$
0.000443	0.0571

Table 3. Values of damping coefficients  $\alpha$  and  $\beta$  for the studied environment

## ۴-۲- مشخصات مش بندی

ابعاد مش در توده خاکی به طور متوسط ۱ متر و برای دیوار حائل وزنی به طور متوسط ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۲). در تحلیل‌های دینامیکی، برای جلوگیری از بازتاب‌های کاذب امواج به داخل محدوده مدل‌سازی، لازم است از مرزهای جاذب (مرزهای ویژه) استفاده شود. روش‌های مختلفی برای اعمال مرز جاذب انرژی وجود دارد که یکی از آن‌ها استفاده از المان‌های نیمه بی‌نهایت است که در این پژوهش نیز از آن بهره برده شده است. بر این اساس، فرض می‌شود که مصالح خاک در جهت مورد نظر تا بی‌نهایت ادامه دارند و امواج حاصل از زلزله بدون انعکاس وقتی به مرزهای اصلی مدل‌سازی عددی می‌رسند از آنها رد می‌شوند (و بی‌جهت، به محیط مدل‌سازی بازتاب نمی‌یابند). بنابراین، برای مش بندی خاک اطراف مدل که دارای المان‌های نیمه بی‌نهایت می‌باشند از المان‌های CPS4R و برای خاک درون مدل و

عمومی مدل‌های ایجاد در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است. در این شکل، بخش دوزنقه‌ای سبز رنگ، نشان دهنده موقعیت دیوار حائل و بخش خاکستری رنگ، محیط اصلی خاک زیر و اطراف دیوار حائل را نشان می‌دهند. دو بخش کناری که به رنگ قرمز تیره نشان داده شده‌اند، معرف بخشی از مش بندی خاک اطراف مدل است که دارای المان‌های نیمه بی‌نهایت از نوع المان‌های CPS4R می‌باشند که برای مدل‌سازی دینامیکی خاک ضروری است. گسترش جانبی محیط مدل‌سازی، شامل ۱۰۰ متر می‌باشد که از هر طرف ۲۵ متر به عنوان مرز بی‌نهایت در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق، سازه دیوار حائل مستقیماً روی خاک قرار داده شده است و تحلیل هم‌زمان خاک و سازه دیوار حائل با روش عددی المان محدود انجام می‌گیرد. بنابراین، اثر توامانی که خاک و سازه به هم اعمال می‌کنند نیز در نتایج تحلیل در نظر گرفته می‌شود.

شکل ۱. تصویر کلی از دیوار حائل و خاک در مدل سازی‌های عددی

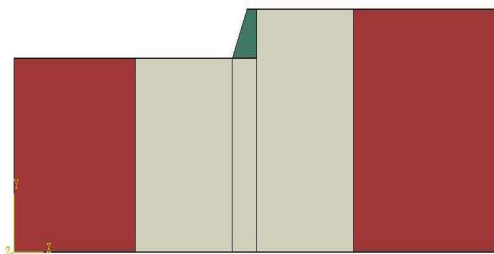


Fig. 1. Schematic view of retaining wall and soil in numerical modeling

مشخصات مصالح مربوط به دیوار حائل وزنی مورد استفاده در جدول (۱) و مشخصات خاک محیط در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح دیوار حائل وزنی

Poisson's ratio	Elastic modulus (Pa)	(Kg/m <sup>3</sup> ) $\gamma$	Constitutive model	Material
0.2	2.35e10	2500	Elastic	Concrete

Table 1. Properties of retaining wall materials

جدول ۲. مشخصات خاک ماسه‌ای

C (Pa)	Poisson's ratio	Elastic modulus (Pa)	$\phi$ (deg)	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	Constitutive model	Soil
1000	0.3	40e6	32	2000	Mohr-columb	sand

Table 2. Sandy soil parameters

مورد نظر انجام شده و ارزیابی‌های مربوط به آن انجام می‌پذیرد. در شکل‌های (۳ تا ۷) شتاب زلزله در ۴ مرحله (گام) فیلتر شده و رکوردهای حاصل از فیلتر تئوری موجک، نشان داده شده است. تعداد نقاط زلزله اصلی ۱۹۸۹۰ نقطه است که در گام اول ۹۹۴۵، گام دوم ۴۹۷۳، گام سوم ۲۴۸۷ و در گام چهارم ۱۲۴۴ نقطه شده است. در هر مرحله تعداد نقاط شتاب‌نگاشت زلزله نصف شده است. تمامی رکوردهای موجود (رکورد اصلی زلزله و رکوردهای حاصل از فیلتر موجک) در شتاب بیشتر به شتاب جاذبه  $g$  مقیاس شده‌اند.

شکل ۳. رکورد اصلی زلزله سرپل ذهاب اسکیل شده به شتاب  $g$

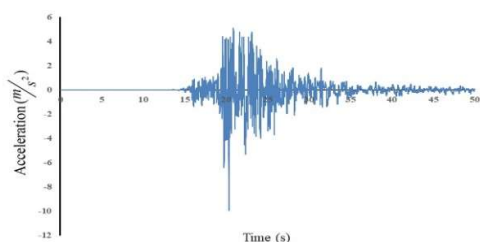


Fig. 3. The main record of the Sarpol Zahab earthquake scaled to the acceleration  $g$

شکل ۴. رکورد حاصل از فیلتر موجک در گام اول از زلزله سرپل ذهاب

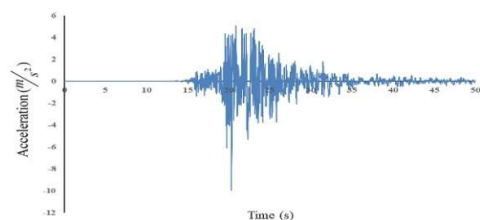


Fig. 4. The record obtained by the first step of the wavelet filter on the Sarpol Zahab earthquake

شکل ۵. رکورد حاصل از فیلتر موجک در گام دوم از زلزله سرپل ذهاب

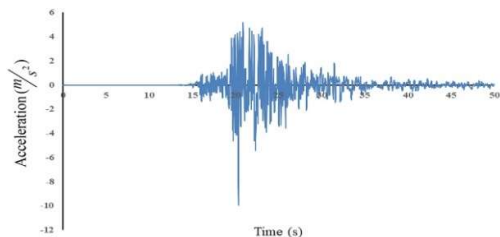


Fig. 5. The record obtained by the second step of the wavelet filter on the Sarpol Zahab earthquake

برای مقایسه رکوردهای موجک و رکورد اصلی زلزله در حوزه فرکانس شکل (۸) ارائه شده است. از آنجا که در هر

دیوار حائل از المان‌های CPE4R در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. همچنین، در محل اتصال سازه به خاک (برای اعمال اندرکنش خاک - سازه) از المان tie استفاده شده است.

شکل ۲. مش بندی و اعمال شرایط مرزی جاذب برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

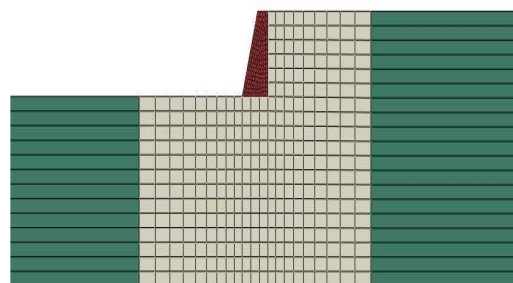


Fig. 2. Mesh and absorbent boundary conditions for dynamic time history analysis

### ۳-۴- رکوردهای زلزله اصلی و فیلتر شده توسط تئوری موجک

در این پژوهش از رکورد زلزله سرپل ذهاب استفاده شده است. به دلیل آن‌که در ثبت رکوردهای زلزله ممکن است خطاهایی به وجود آید، معمولاً باید شتاب‌نگاشت زلزله‌ها اصلاح شوند. برای اصلاح شتاب‌نگاشت زلزله از شیوه‌های گوناگونی استفاده می‌شود. در این پژوهش از روش باند گذر و با استفاده از نرم‌افزار Seismosignal با محدوده فرکانسی صفر تا ۳۰ هرتز اصلاح رکورد انجام گرفته است. بیشینه شتاب در رکورد اصلاح‌نشده ۶۸۴/۴۲ و رکورد اصلاح‌شده ۶۸۱/۴۵ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است که به‌اندازه ۰/۴۳ درصد اصلاح شده است.

جدول ۴. مشخصات زلزله سرپل ذهاب

Max. Dis.	Max. Vel.	Max. Acc. (adjusted)	Max. Acc. (unadjusted)	Value
31.04	45.50	681.45	684.42	$cm/s^2$
cm	cm/s	$cm/s^2$	$cm/s^2$	
25.81	20.34	20.34	20.34	Time (s)

Table 4. Characteristics of Sarpol Zahab earthquake

در ادامه با استفاده از فیلتر موجک گسسته هار زلزله سرپل ذهاب در مراحل مختلف فیلتر شد. با استفاده از رکوردهای بدست آمده از هر مرحله از فیلتر تحلیل‌های دینامیکی مسئله

مشخصات رکوردهای مورد استفاده از نظر پریود غالب، مدت زمان حرکت قوی و شدت اریاس در جدول (۵) ارائه شده است. با توجه به این جدول، از نظر مدت زمان حرکت قوی زلزله و شدت اریاس زلزله اصلی و رکورد تجزیه سطح اول تطابق بسیار زیادی با هم دارند. اما با افزایش سطح تجزیه تفاوت قابل توجهی در شدت اریاس و مدت زمان حرکت قوی زلزله نسبت به زلزله اصلی به وجود می آید. همچنین با مقایسه طیف شتاب رکوردها (شکل ۹) مشخص است که بیشترین تطابق در سطوح تجزیه اول و دوم با زلزله اصلی در تمامی زمان تناوبها وجود دارد. در صورتیکه، با افزایش سطح تجزیه، اختلاف قابل توجهی بین طیف پاسخ شتاب زلزله های با سطح تجزیه ۳ و ۴ و زلزله اصلی به وجود می آید. بر این اساس، زلزله سطح ۲ را شاید بتوان بهترین یا بهینه ترین سطح تجزیه دانست.

جدول ۵. مشخصات مختلف رکوردهای مختلف در مقایسه با زلزله اصلی

Records	Arias intensity (m/sec)	Duration of strong movement (sec)	Dominant period (sec)
Main	6.91	10.36	0.22
Level 1	6.95	10.36	0.22
Level 2	7.17	10.36	0.22
Level 3	7.72	10.96	0.22
Level 4	8.60	11.12	0.22

Table 5. Different features of records compared to the main earthquake

شکل ۹. مقایسه طیف شتاب رکوردها

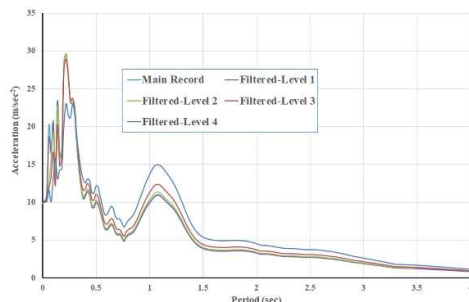


Fig. 9. Comparison between acceleration spectra

۴-۴- تعداد و مشخصات کلی مدل های عددی مورد مطالعه برای رسیدن به اهداف این پژوهش، ۱۵ عدد دیوار حائل بتنی وزنی بررسی شده است. با توجه به تعداد رکوردهای

مرحله از اعمال تئوری موجک با توجه به اینکه مدت زمان زلزله ثابت می ماند و مقدار گام زمانی دو برابر می شود، بنابراین، فرکانس نایکوئیست در هر سطح تجزیه موجک به نصف مقدار سطح قبلی تقلیل پیدا می کند. برای نمونه زلزله اصلی فرکانس نایکوئیست ۱۰۰ هرتز می باشد که در سطح تجزیه اول به ۵۰ هرتز و به ترتیب در سطح های بعدی ۲۵ هرتز، ۱۲/۵ هرتز و ۶/۲۵ هرتز کاهش پیدا می کند. بنابراین با توجه به شکل (۸) تمامی دامنه فوریه برای زلزله اصلی و زلزله های تجزیه شده در سطوح مختلف در بازه زمانی ۶/۲۵ ترسیم می شود. همان گونه که از این شکل مشخص است، تا سطح A3 (مرحله فیلتر سوم) مابین زلزله اصلی و زلزله های فیلتر شده، تطابق بسیار مناسبی برقرار است؛ در صورتی که در سطح ۴ میزان اختلاف با زلزله اصلی قابل توجه می شود.

شکل ۶. رکورد حاصل از فیلتر موجک در گام سوم از زلزله سرپل ذهاب

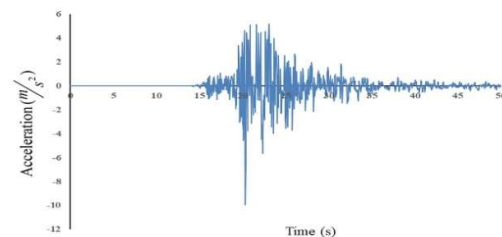


Fig. 6. The record obtained by the third step of the wavelet filter on the Sarpol Zahab earthquake

شکل ۷. رکورد حاصل از فیلتر موجک در گام چهارم از زلزله سرپل ذهاب

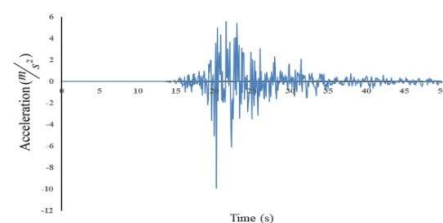


Fig. 7. The record obtained by the fourth step of the wavelet filter on the Sarpol Zahab earthquake

شکل ۸. مقایسه رکوردهای موجک و رکورد اصلی زلزله در حوزه فرکانس

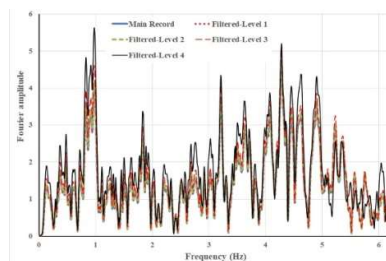


Fig. 8. Comparison between different records in frequency dominance

در این بخش، جابه‌جایی ماندگار افقی در دیوار حائل به همراه شتاب افقی ماکزیمم و تنش‌های انحرافی ایجاد شده در دیوار تحت رکوردهای مختلف (رکورد زلزله اصلی و رکوردهای فیلتر شده آن به کمک تئوری موجک) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در شکل (۱۰) کنتورهای جابه‌جایی ماندگار (نهایی) افقی در دیوار حائل ۵ متری و محیط خاک اطراف به تصویر کشیده شده است. این تحلیل‌ها روی دیوار حائل پنج متری توسط رکوردهای مختلف مورد تکرار شد و تغییر مکان افقی ماکزیمم ماندگار (نهایی) حاصل، برای مقایسه در شکل (۱۱) ارائه شد. همین طور شتاب‌های ماکزیمم حاصل در دیوار حائل ناشی از تحلیل به کمک رکوردهای مختلف در شکل (۱۲) و تنش‌های انحرافی ماکزیمم در شکل (۱۳) ارائه شد. بر اساس مقایسه عملکرد دینامیکی دیوار حائل به ارتفاع ۵ متر، تحت رکورد زلزله اصلی نسبت به رکوردهای فیلتر شده حاصل از تئوری موجک، نتایج ذیل قابل استنباط هستند.

شکل ۱۰. جابه‌جایی افقی دیوار حائل وزنی بتنی به ارتفاع ۵ متر تحت اثر رکورد اصلی زلزله

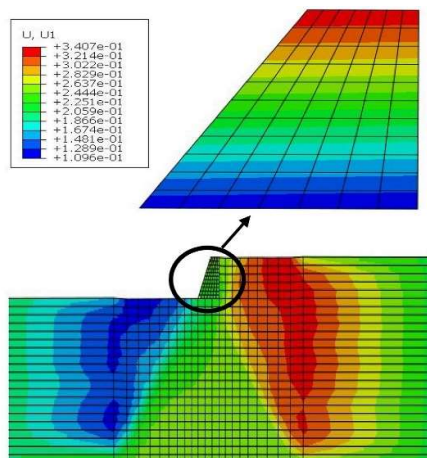


Fig. 10. The horizontal displacement of the 5-meter-high retaining wall under the main earthquake record

اختلاف جابه‌جایی افقی، شتاب افقی و تنش دیوار حائل تحت اثر رکورد زلزله اصلی با رکورد زلزله فیلتر شده در مرحله (گام) ۱ از تئوری موجک، به ترتیب  $7/8$ ،  $3/0.2$  و  $2/7.1$  درصد می‌باشد. اختلاف جابه‌جایی افقی، شتاب افقی و تنش

زلزله موجود (رکورد اصلی و رکوردهای حاصل از فیلتر موجک) تعداد مدل‌های عددی که تحت تحلیل دینامیکی قرار گرفتند شامل ۷۵ مدل دینامیکی می‌شود. شایان ذکر است که تعداد مدل‌سازی به گونه‌ای اختیار شده است که اثر ابعاد دیوار حائل و رکوردهای زلزله قابل بررسی باشد. ابعاد محیط مدل‌سازی ۱۰۰ متر طول که از هر طرف ۲۵ متر به‌عنوان مرز بی‌نهایت در نظر گرفته شده است. ارتفاع توده خاک ۲۵، ۲۷ و ۲۹ متر که بر اساس ارتفاع دیوار حائل مورد نظر (یعنی برای دیوارهای حائل ۵، ۷ و ۹ متر) در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی سازه موردنظر برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی شتاب، در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS2017 انجام شده است.

#### ۵- نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های عددی

رفتار لرزه‌ای دیوارهای حائل موردنظر (تنش، جابه‌جایی افقی و شتاب افقی) در نرم‌افزار آباکوس به روش تحلیل غیرخطی دینامیکی تاریخچه زمانی شتاب تحت اثر رکورد اصلی زلزله به همراه رکوردهای فیلتر شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این ارزیابی‌ها مربوط به دیوارهای حائل به ارتفاع ۵، ۷ و ۹ متر می‌باشد که در ادامه ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که در ارزیابی نتایج تحلیل‌های عددی، برخی از کنتورهای جابه‌جایی ماندگار (نهایی) به تصویر کشیده شده‌اند و مقادیر حداکثر آنها (جابه‌جایی حداکثر ماندگار) نیز در نمودارهای میله‌ای برای مقایسه بکار رفته‌اند.

#### ۵-۱- ارزیابی رفتار لرزه‌ای دیوار حائل وزنی به ارتفاع ۵ متر

روابط با استفاده از Equation نرم‌افزار MS Word نسخه ۲۰۱۳ یا ۲۰۱۶ تهیه و به ترتیب شماره‌گذاری شوند. شماره رابطه در داخل پرانتز و مماس بر حاشیه راست و خود رابطه مماس بر حاشیه چپ باشد. اندازه فونت روابط ۹ pt باشد. برای حفظ ویژگی Display در ظاهر رابطه، باید رابطه مورد نظر مانند نمونه زیر در داخل یک جدول فاقد مرز (با استفاده از گزینه No Border) تایپ شود. قبل و بعد از هر رابطه، ۶ pt فاصله لازم است.



شکل ۱۳. مقایسه تنش انحرافی حداکثر تحت رکوردهای مختلف فیلتر شده - دیوار حائل وزنی بتنی به ارتفاع ۵ متر

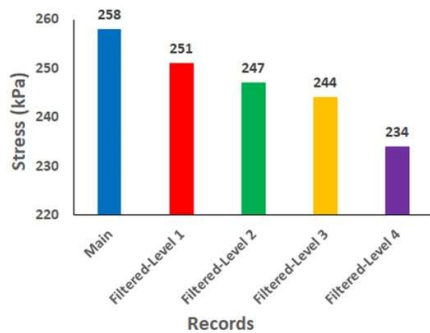


Fig. 13. Comparison diagram of the maximum deviatoric stress under different records: 5-meter-high retaining wall

## ۲-۵- ارزیابی رفتار لرزه‌ای دیوار حائل وزنی به ارتفاع ۷ متر

پس از پایان تحلیل دینامیکی دیوار حائل وزنی ۷ متری بر اساس رکورد زلزله اصلی، تغییر مکان های دائمی ایجاد شده در شکل (۱۴) به تصویر کشیده شده است. با تکرار تحلیل‌ها روی این محیط و دیوار به کمک رکوردهای زلزله فیلتر شده با موجک، نتایج حاصل برای مقایسه جابه‌جایی افقی ماندگار در تراز تاج دیوار در شکل (۱۵) ارائه شده است. همچنین در شکل (۱۶) و شکل (۱۷) به ترتیب شتاب‌های افقی ماکزیمم و تنش‌های انحرافی برای مقایسه عملکرد رکوردهای فیلتر شده مختلف روی دیوار حائل ۷ متری، ارائه شده است.

با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل زلزله اصلی در مقابل رکوردهای فیلتر شده با موجک، نتایج ذیل حاصل در مورد دیوار حائل به ارتفاع ۷ متر، به دست می‌آید. اختلاف جابه‌جایی افقی، شتاب افقی و تنش دیوار حائل وزنی تحت اثر رکورد زلزله اصلی با رکورد زلزله فیلتر شده مرحله (گام) ۱ به ترتیب ۱، ۶/۹۸ و ۲/۲ درصد می‌باشد. اختلاف جابه‌جایی افقی، شتاب افقی و تنش دیوار حائل وزنی تحت اثر رکورد زلزله اصلی با رکورد زلزله فیلتر شده مرحله (گام) ۲ به ترتیب ۲/۹۵، ۱۱/۷ و ۴/۷ درصد شده است. اختلاف جابه‌جایی افقی، شتاب افقی و تنش دیوار حائل وزنی تحت اثر رکورد زلزله اصلی با رکورد زلزله فیلتر شده مرحله (گام) ۳ به ترتیب ۶/۱۲، ۱۵/۴ و ۶/۶۸ درصد شده است و در نهایت اختلاف جابه‌جایی افقی، شتاب افقی و تنش دیوار حائل وزنی تحت اثر رکورد

دیوار حائل وزنی تحت اثر رکورد زلزله اصلی با رکورد زلزله فیلتر شده مرحله (گام) ۲ به ترتیب ۱۳/۸، ۶/۹۴ و ۴/۲۶ درصد شده است. اختلاف جابه‌جایی افقی، شتاب افقی و تنش دیوار حائل وزنی تحت اثر رکورد زلزله اصلی با رکورد زلزله فیلتر شده مرحله (گام) ۳ به ترتیب ۱۷/۸، ۱۴/۱۹ و ۵/۴ درصد شده است و در نهایت اختلاف جابه‌جایی افقی، شتاب و تنش دیوار حائل وزنی تحت اثر رکورد زلزله اصلی با رکورد زلزله فیلتر شده مرحله (گام) ۴ به ترتیب ۲۰/۵۴ و ۲۵/۹۸ و ۹/۳ درصد می‌باشد.

شکل ۱۱. نمودار مقایسه جابه‌جایی افقی دیوار حائل به ارتفاع ۵ متر تحت اثر رکوردهای مختلف

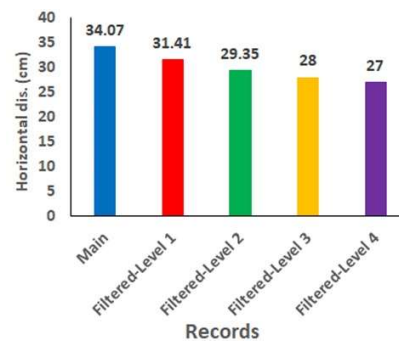


Fig. 11. Comparison diagram of the horizontal displacement of the 5-meter-high retaining wall under different records

شکل ۱۲. مقایسه شتاب افقی حداکثر تحت رکوردهای مختلف فیلتر شده - دیوار حائل وزنی بتنی به ارتفاع ۵ متر

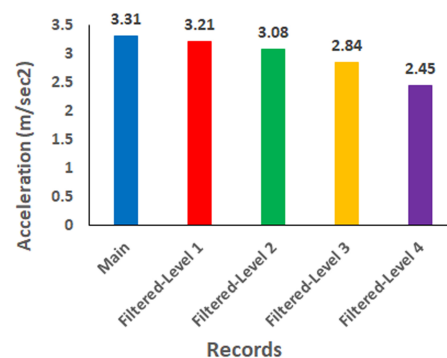


Fig. 12. Comparison diagram of the maximum horizontal acceleration under different records: 5-meter-high retaining wall

شکل ۱۶. مقایسه شتاب افقی حداکثر تحت رکوردهای مختلف فیلتر شده - دیوار حائل وزنی بتنی به ارتفاع ۷ متر

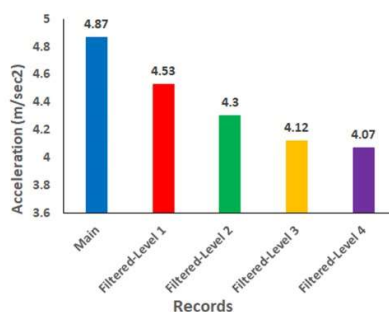


Fig.16. Comparison diagram of the Max horizontal acc. under different records: 7-meter-high retaining wall

شکل ۱۷. مقایسه تنش انحرافی حداکثر تحت رکوردهای مختلف فیلتر شده - دیوار حائل وزنی بتنی به ارتفاع ۷ متر

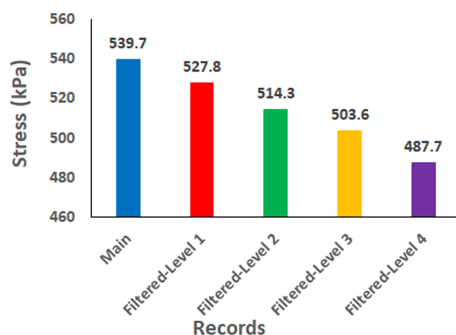


Fig.17. Comparison diagram of the maximum deviatoric stress under different records: 7-meter-high retaining wall

همچنین، در شکل (۲۰) کنتور شتاب ماکزیمم در بدنه دیوار حائل تحت بارگذاری زلزله اصلی و مقایسه شتاب‌های ماکزیمم در بدنه تحت بارگذاری رکوردهای فیلتر شده مختلف ارائه شده است. کنتور تنش انحرافی در دیوار حائل و مقایسه مقادیر حداکثر ناشی از تحلیل به کمک رکوردهای مختلف بارگذاری نیز در شکل (۲۱) به نمایش گذاشته شده است.

بر اساس مقایسه صورت گرفته، ملاحظه می‌شود که اختلاف جابه‌جایی افقی، شتاب افقی و تنش دیوار حائل وزنی به ارتفاع ۹ متر تحت اثر رکورد زلزله اصلی با رکورد زلزله فیلتر شده مرحله (گام) ۱ به ترتیب ۱/۵۱، ۱/۴۵ و ۳/۱۷ درصد می‌باشد. اختلاف جابه‌جایی افقی، شتاب افقی و تنش دیوار حائل وزنی تحت اثر رکورد زلزله اصلی با رکورد زلزله فیلتر شده مرحله (گام) ۲ به ترتیب ۲/۶۵، ۷/۸۳ و ۶/۱۶ درصد شده است. اختلاف جابه‌جایی افقی، شتاب افقی و تنش دیوار حائل وزنی تحت اثر رکورد زلزله

زلزله اصلی با رکورد زلزله فیلتر شده مرحله (گام) ۴ به ترتیب ۱۸/۹۹، ۱۶/۲۴ و ۹/۶۳ درصد می‌باشد.

شکل ۱۴. جابه‌جایی افقی دیوار حائل وزنی بتنی به ارتفاع ۷ متر تحت اثر رکورد اصلی زلزله

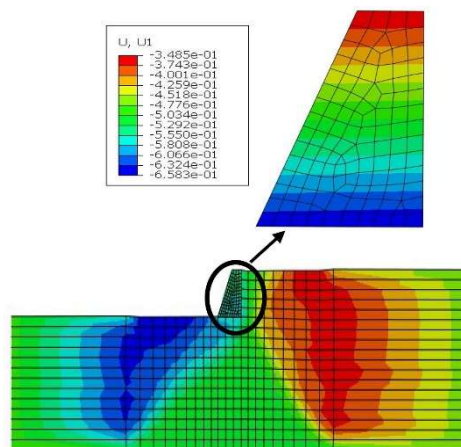


Fig.14. The horizontal displacement of the 7-meter-high retaining wall under the main earthquake record

شکل ۱۵. نمودار مقایسه جابه‌جایی افقی دیوار حائل به ارتفاع ۷ متر تحت اثر رکوردهای مختلف

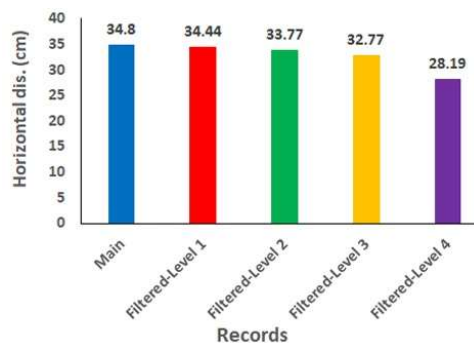


Fig.15. Comparison diagram of the horizontal displacement of the 7-meter-high retaining wall under different records

۳-۵- ارزیابی رفتار لرزه‌ای دیوار حائل وزنی به ارتفاع ۹ متر

برای ارزیابی عملکرد دیوار حائل وزنی به ارتفاع ۹ متر در بارگذاری زلزله اصلی در مقایسه با بارگذاری رکوردهای فیلتر شده با موجک، ابتدا کنتور تغییرشکل‌های افقی ماندگار در کل محیط در شکل (۱۸) ارائه شد و سپس تغییرشکل‌های ماکزیمم افقی ماندگار حاصل از تحلیل با رکوردهای فیلتر شده در شکل (۱۹) ارائه شد.

شکل ۲۱. مقایسه تنش انحرافی حداکثر تحت رکوردهای مختلف فیلتر شده - دیوار حائل وزنی بتنی به ارتفاع ۹ متر

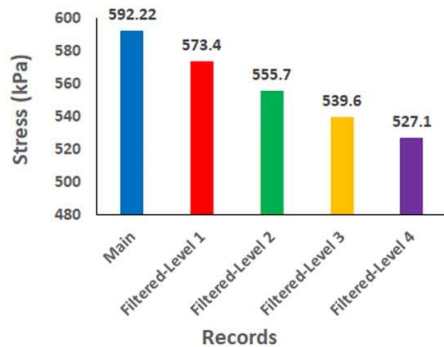


Fig. 21. Comparison diagram of the maximum deviatoric stress under different records: 9-meter-high retaining wall

۴-۵- مقایسه کلی نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های عددی

مقایسه میزان و درصد جابه‌جایی افقی، شتاب افقی، تنش و مدت‌زمان تحلیل دیوارهای حائل وزنی تحت اثر رکورد زلزله اصلی در مقایسه با رکوردهای زلزله فیلتر شده توسط موجک در جداول (۶ تا ۹) ارائه شده است. با توجه به این جداول، موارد ذیل قابل ذکر است:

با توجه به جدول (۶) که مدت زمان تحلیل هر مسئله تحت زلزله اصلی و رکوردهای حاصل از فیلتر موجک را نشان می‌دهد، ملاحظه می‌شود که استفاده از تئوری موجک در کاهش زمان محاسبه بسیار موثر است. بطوریکه حتی در گام (مرحله) اول از فیلتر کردن رکورد زلزله، به طور قابل توجهی زمانی تحلیل کاهش یافته است (کاهش حدود ۴۰ درصدی در گام اول فیلتر موجک).

اختلاف جابه‌جایی افقی جدول (۷) دیوارهای حائل ۵، ۷ و ۹ متری تحت اثر رکورد اصلی زلزله در مقایسه با رکورد فیلتر شده گام اول بسیار ناچیز است. همچنین با افزایش ارتفاع دیوار ملاحظه می‌شود که در حالت کلی این اختلاف نیز کاهش می‌یابد. حتی در رکوردهای فیلتر شده گام‌های بزرگتر از یک (گام دوم و سوم) نیز نتایج بسیار به نتایج حاصل از تحلیل با رکورد اصلی زلزله نزدیک است (به ویژه وقتی ارتفاع دیوار افزایش می‌یابد).

بر اساس جدول (۸) که اختلاف شتاب افقی دیوارهای حائل ۵، ۷ و ۹ متری تحت اثر رکورد اصلی زلزله در مقایسه با

اصلی با رکورد زلزله فیلتر شده مرحله (گام) ۳ به ترتیب ۵/۵، ۱۱/۴۷ و ۸/۸۸ درصد شده است و در نهایت اختلاف جابه‌جایی افقی، شتاب افقی و تنش دیوار حائل وزنی تحت اثر رکورد زلزله اصلی با رکورد زلزله فیلتر شده مرحله (گام) ۴ به ترتیب ۸/۷۲ و ۱۱ درصد می‌باشد.

شکل ۱۸. جابه‌جایی افقی دیوار حائل وزنی بتنی به ارتفاع ۹ متر تحت اثر رکورد اصلی زلزله

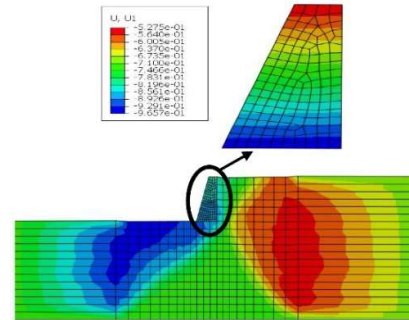


Fig. 18. The horizontal displacement of the 9-meter-high retaining wall under the main earthquake record

شکل ۱۹. نمودار مقایسه جابه‌جایی افقی دیوار حائل به ارتفاع ۹ متر تحت اثر رکوردهای مختلف

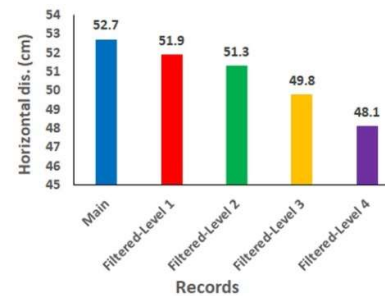


Fig. 19. Comparison diagram of the horizontal displacement of the 9-meter-high retaining wall under different records

شکل ۲۰. مقایسه شتاب افقی حداکثر تحت رکوردهای مختلف فیلتر شده - دیوار حائل وزنی بتنی به ارتفاع ۹ متر

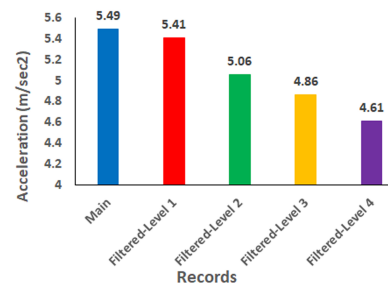


Fig. 20. Comparison diagram of the maximum horizontal acceleration under different records: 9-meter-high retaining wall

از یک طرف، با توجه به اینکه زمان تحلیل دینامیکی با افزایش گام (مرحله) فیلتر کردن توسط موجک به شدت کاهش می یابد، از طرف دیگر، با مقایسه درصد اختلاف نتایج حاصل از تئوری موجک نسبت رکورد اصلی زلزله، ملاحظه می شود که در تحلیل دینامیکی دیوار حائل، حتی می توان از مراحل بالای فیلتر کردن (مرحله ۳) نیز نتایج قابل قبول و نزدیک به تحلیل با رکورد اصلی زلزله را کسب نمود.

جدول ۸ شتاب افقی دیوار حائل و درصد اختلاف رکوردهای فیلتر شده در مقایسه با زلزله اصلی

Filtered- Level 4	Filtered- Level 3	Filtered- Level 2	Filtered- Level 1	Main record	Wall height	Horizontal Acc. (m2/s)
2.45	2.84	3.08	3.21	3.1	5 m	
4.07	4.12	4.3	4.53	4.87	7 m	
4.61	4.86	5.06	5.41	5.49	9 m	
25.98	14.19	6.94	3.02	-	5 m	Deviation percentage (%)
16.24	15.40	11.7	6.98	-	7 m	
16	11.47	7.83	1.45	-	9 m	

**Table 8.** Horizontal acceleration of the retaining wall and its difference percentage in the filtered records compared with the main earthquake

جدول ۹. تنش انحرافی در دیوار حائل و درصد اختلاف آن در رکوردهای فیلتر شده در مقایسه با زلزله اصلی

Filtered- Level 4	Filtered- Level 3	Filtered- Level 2	Filtered- Level 1	Main record	Wall height	Deviatoric stress (kPa)
234	244	247	251	258	5 m	
487.7	503.6	514.3	527.8	539.7	7 m	
527.1	539.6	555.7	573.4	592.22	9 m	
9.3	5.4	4.26	2.71	-	5 m	Deviation percentage
9.63	6.68	4.7	2.2	-	7 m	
11	8.88	6.16	3.17	-	9 m	

**Table 9.** Deviatoric stress in the retaining wall and its difference percentage in the filtered records compared with the main earthquake

### ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، تلاش شده است تا امکان بکارگیری از تئوری موجک در تحلیل دینامیکی دیوار حائل مورد بررسی

رکورد فیلتر شده را نشان می دهد، ملاحظه می شود که کماکان نتایج حاصل از گام اول در حد قابل قبولی به نتایج حاصل از تحلیل با رکورد اصلی زلزله نزدیک است. اختلاف تنش های ثبت شده در دیوارهای حائل ۵، ۷ و ۹ متری تحت اثر رکورد اصلی زلزله با رکورد فیلتر شده با موجک در جدول (۹) ارائه شده است. با توجه به این نتایج، ملاحظه می شود که درصد خطای رخ داده در تحلیل رکوردهای فیلتر شده توسط موجک در مقایسه با رکوردهای زلزله اصلی چندان زیاد نیست.

جدول ۶. مدت زمان تحلیل دیوار حائل و درصد اختلاف آن در

رکوردهای فیلتر شده در مقایسه با زلزله اصلی- کامپیوتر مورد استفاده: dell N5110 Intel(R) Core(TM) i7-2670QM CPU @ 2.20GHz 2.20 GHz

Filtered- Level 4	Filtered- Level 3	Filtered- Level 2	Filtered- Level 1	Main record	Wall height	Analysis duration
25	65	126	255	350	5 m	
25	46	91	157	250	7 m	
24	47	91	152	255	9 m	
92	81	63	36	-	5 m	Deviation percentage (%)
90	82	64	37	-	7 m	
90	82	65	40	-	9 m	

**Table 6.** Analysis duration of the retaining wall and its difference percentage in the filtered records compared with the main earthquake by computer:

جدول ۷. تغییر مکان افقی دیوار حائل و درصد اختلاف آن در رکوردهای فیلتر شده در مقایسه با زلزله اصلی

Filtered- Level 4	Filtered- Level 3	Filtered- Level 2	Filtered- Level 1	Main record	Wall height	Horizontal Displacement (mm)
27	28	29.35	31.41	34.07	5 m	
28.19	32.77	33.77	34.44	34.8	7 m	
48.1	49.8	51.3	51.9	52.7	9 m	
50.54	17.8	13.8	7.8	-	5 m	Deviation percentage (%)
18.99	6.12	2.95	1	-	7 m	
8.72	5.5	2.95	1.51	-	9 m	

**Table 7.** Horizontal displacement of the retaining wall and its difference percentage in the filtered records compared with the main earthquake

قبول از تئوری موجک برای فیلتر کردن زلزله، استفاده نمود. این کار باعث کاهش کاهش قابل توجه در زمان محاسبات (تا حدود ۸۰ درصد کاهش زمان محاسبات) می‌شود؛ ضمن اینکه اختلاف نتایج نسبت به حالتی که تحلیل ها با رکورد اصلی زلزله انجام می‌شود، خیلی چشمگیر نیست. این نتیجه زمانی که ارتفاع دیوار بلندتر است، به مراتب قویتر می‌شود.

در انتها باید اشاره داشت که در تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق، از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. این مدل رفتاری به طور ذاتی توانایی مدل کردن رفتار میرایی هیستریزس در کرنش‌های پایین را ندارد. بنابراین، باید توجه داشت که این نکته می‌تواند روی نتایج تغییرشکل‌ها و تنش‌های بدست آمده از تحلیل‌های دینامیکی تاثیر داشته باشد. در هر صورت، از آنجا که هدف از این پژوهش ارزیابی عملکرد موجک در تحلیل دینامیکی دیوار حائل می‌باشد؛ و در کلیه تحلیل‌ها (چه تحلیل انجام شده با زلزله اصلی و چه تحلیل‌های انجام شده با رکوردهای فیلتر شده با موجک) از یک ساختار و روند استفاده شده است، می‌توان چنین برداشت نمود که اثر استفاده از موجک در مقایسه با زلزله اصلی می‌تواند دید کلی و کیفی قابل قبولی بدهد. بنابراین، هر چند با توجه به هندسه، لایه‌های مختلف خاک و استفاده از مدل‌های رفتاری متفاوت، ممکن است باعث تغییر در مقادیر عددی تغییرشکل‌ها و تنش‌ها شود، اما تاثیر نسبی استفاده از تئوری موجک را می‌توان کماکان صادق دانست.

#### اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

#### مراجع

1. Fagher, A., Principles of Advanced Foundation Engineering. 2010, Tehran: University of Tehran.
2. Abdul-Hussain, N., M. Fall, and M. Saatcioglu, Blast response of cantilever retaining wall: Modes of wall movement. Transportation Geotechnics, 2023. 40: p. 100950.
3. Singh, P., et al., Numerical investigation and estimation of active earth thrust on gravity retaining walls under seismic excitation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023. 167: p. 107798.
4. Kamalzadeh, A. and M.J. Pender, Dynamic response of Mechanically Stabilised Earth (MSE) structures: A

قرار گیرد. استفاده از تئوری موجک می‌تواند زمان تحلیل و به نتیجه رسیدن را کاهش دهد. تحلیل‌های عددی مورد نظر بر اساس روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام پذیرفت. تحلیل المان محدود دیوار و خاک محیط اطراف به طور همزمان در نرم افزار طرح ریزی و مورد تحلیل قرار گرفت تا اثر متقابل خاک و دیوار بر هم نیز در نتایج وارد شده باشد. هندسه‌های مختلف از محیط و دیوارها با ارتفاع‌های مختلف در نظر گرفته شد. برای تحلیل دینامیکی از رکورد شتاب زلزله سر پل ذهاب استفاده شد. این رکورد در چهار مرحله (گام) به کمک تئوری موجک فیلتر شد و رکوردهای جدید (فیلتر شده توسط تئوری موجک) حاصل شد. تحلیل دینامیکی غیرخطی از مدل‌های عددی به کمک رکورد اصلی و رکوردهای فیلتر شده توسط موجک انجام شد و نتایج وارد بر دیوار حائل ثبت و مورد بررسی قرار گرفت.

با مقایسه نتایج تحلیل انجام شده توسط رکورد اصلی زلزله و نتایج تحلیل انجام شده توسط رکوردهای فیلتر شده با تئوری موجک، ملاحظه می‌شود، در دید کلی، استفاده از تئوری موجک در فیلتر کردن رکورد باعث شده است ضمن کاهش قابل توجه در زمان محاسبات، دقت قابل قبولی نیز حاصل شود. به عبارت دیگر، فیلتر کردن زلزله توسط تئوری موجک باعث شده است، زمان محاسبات به طور چشم‌گیری کاهش پیدا کند. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، بیشترین سازگاری نتایج تحلیل با رکوردهای فیلتر شده با نتایج حاصل از رکورد اصلی زلزله، مربوط به فیلتر مرحله (گام) اول است. با افزایش گام‌های فیلتر، ضمن کاهش زمان تحلیل، درصد اختلاف نتایج تحلیل نسبت به رکورد اصلی، بیشتر می‌شود.

با افزایش ارتفاع دیوار، نتایج تحلیل مربوط به مراحل بالاتر فیلتر کردن به نتایج تحلیل با رکورد اصلی زلزله نزدیکتر می‌شود. به عبارت دیگر، درصد اختلاف نتایج پس از فیلتر کردن زلزله نسبت به رکورد اصلی زلزله، با افزایش ارتفاع دیوار کاهش می‌یابد (تحلیل‌ها با دقت بیشتری انجام می‌شود).

رویه‌م رفته، می‌توان چنین برداشت کرد که در تحلیل دینامیکی دیوار حائل با رکوردهای فیلتر شده توسط تئوری موجک، می‌توان تا گام سوم فیلتر به راحتی و با دقت قابل

- Decomposed Earthquake Records. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2023. 47(4): p. 2365-2377.
19. Segaline, H., E. Sáez, and J. Ubilla, Evaluation of dynamic soil-structure interaction effects in buildings with underground stories using 1 g physical experimentation in a transparent shear laminar box. Engineering Structures, 2022. 266: p. 114645.
  20. Lin, J., et al., Application of wavelet transforms to the simulation of corrosion fields on buried pipelines. Computers & Structures, 2023. 276: p. 106957.
  21. Kamgar, R., M. Dadkhah, and H. Naderpour, Seismic response evaluation of structures using discrete wavelet transform through linear analysis. Structures, 2021. 29: p. 863-882.
  22. Majidi, N., et al., Estimation of earthquake frequency content and its effect on dynamic analysis using continuous and discrete wavelet transform. Scientia Iranica, 2022. 29(6): p. 2773-2788.
  23. Sarkar, K., V.K. Gupta, and R.C. George, Wavelet-based generation of spatially correlated accelerograms. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016. 87: p. 116-124.
- numerical study. Geotextiles and Geomembranes, 2023. 51(1): p. 73-87.
  5. Hung, W.-Y., et al., Centrifuge modeling on the effect of mechanical connection on the dynamic performance of narrow geosynthetic reinforced soil wall. Geotextiles and Geomembranes, 2023.
  6. Guan, X. and G.S.P. Madabhushi, Dynamic response of a retaining wall with a structure on the dry backfill. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022. 157: p. 107259.
  7. Salajegheh, E. and A. Heidari, Time history dynamic analysis of structures using filter banks and wavelet transforms. Computers & Structures, 2005. 83(1): p. 53-68.
  8. Salajegheh, E. and A. Heidari, Optimum design of structures against earthquake by wavelet neural network and filter banks. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005. 34(1): p. 67-82.
  9. Salajegheh, E., A. Heidari, and S. Saryazdi, Optimum design of structures against earthquake by discrete wavelet transform. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005. 62(15): p. 2178-2192.
  10. Kamgar, R., et al., Application of discrete wavelet transform in seismic nonlinear analysis of soil-structure interaction problems. Earthquake Spectra, 2021. 37: p. 1980 - 2012.
  11. Dadkhah, M., R. Kamgar, and H. Heidarzadeh, Reducing the Cost of Calculations for Incremental Dynamic Analysis of Building Structures Using the Discrete Wavelet Transform. Journal of Earthquake Engineering, 2022. 26(7): p. 3317-3342.
  12. Kankanamge, Y., Y. Hu, and X. Shao, Application of wavelet transform in structural health monitoring. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020. 19(2): p. 515-532.
  13. Khanahmadi, M., O. Rezaifar, and M. Gholhaki, Damage Detection in Steel Plates Based on Comparing Analytical Results of the Discrete 2-D Wavelet Transform of Primary and Secondary Modes Shape. Journal of Structural and Construction Engineering, 2021. 8(5): p. 198-214.
  14. XU Qian, Y.C., GUO Hong, GUO Guangling, Stability alarming for a pile plate retaining wall with damage. China Safety Science Journal, 2020. 30(2): p. 47-53.
  15. Aghamolaei, M., et al., Performance-based analysis of cantilever retaining walls subjected to near-fault ground shakings. Computers and Geotechnics, 2021. 130: p. 103924.
  16. Memarian Sorkhabi, O., M. Khajehzadeh, and S. Keawsawasvong, Landslides monitoring with SBAS-InSAR and 3D wavelet phase filtering. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2023: p. 103486.
  17. Ha, S.J., H. Seo, and B. Kim, Effects of pulse-like ground motions and wavelet asymmetry on responses of cantilever retaining wall. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023. 166: p. 107724.
  18. Javdanian, H. and N. Goudarzi, Seismic Analysis of Geogrid-Reinforced Soil Retaining Walls Under

## Using wavelet theory in the dynamic analyses of retaining walls coupled with soil medium

AhmadReza Seifoddin<sup>1</sup>, Heisam Heidarzadeh<sup>2\*</sup>, HamedReza Zarif<sup>3</sup>

1- MSc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2\*- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: Heidarzadeh@sku.ac.ir.

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

### Abstract:

Retaining structure or retaining wall is a wall that acts as supporting structure and the stability of another structure. This wall is used for preventing collapse of soil and generally wherever lateral support is needed. The retaining wall can be designed as gravity, cantilever and supported. Considering that the retaining walls are essential in protecting the related structures to them, therefore, studying the dynamic behavior of these structures is very important due to the financial and human damages. Such structures should be stable against the forces acting on the wall. In addition to static loads, which are always an inseparable part of the calculations of such walls, forces such as cyclic forces caused by the movement of machinery and also dynamic forces caused by earthquake occur on the wall during the period of operation. These forces can be effected on retaining walls and should be investigated and evaluated. Trying to investigate and analyze the dynamic behavior of different retaining walls is one of the most challenging for different researchers.

The wavelet theory in the dynamic analysis of the issues related to civil engineering is going to be widespread. This research aims to investigate the effect of using wavelet theory in the dynamic analyses of concrete retaining walls. For this purpose, a soil medium along with concrete retaining walls with different dimensions (heights) are considered. Dynamic analyses are performed based on the finite element method. In the first stage of modeling, the Sarpol-e Zahab earthquake record is filtered during four steps using the discrete wavelet theory. The numerical models are prepared and subjected to the available records. The percentage of the difference in the results of the analyses done with the records obtained from the different steps of filtering record with wavelet compared to the analyses done with the main record, along with the reduction of the time consumption, is evaluated. As expected, the best match of the post-filtering results to the main earthquake results is for the first-step filter. It can be seen that even the first step filter reduces the analysis time by about 60%. Based on the obtained results, the difference between the results obtained with the filtered records becomes less compared to the main earthquake with the increase in the height of the wall. It has also been observed that acceptable results are still obtained, and the analysis time is reduced by almost 80% until the third step filter.

It should be noted that the Mohr-Coulomb behavioral model is used in the conducted analyzes in this research. This behavioral model is not inherently able to model hysteresis damping behavior at low strains. Therefore, this issue can affect the results of deformations and stresses obtained from dynamic analysis. However, the purpose of this research is to evaluate the performance of the wavelet in the dynamic analysis of the retaining wall. Considering that in all the analyses (both the performed analysis with the main earthquake and the performed analyzes with the wavelet filtered records) the same structure and trend are used, it can be concluded that the effect of using the wavelet compared to the main earthquake gives an acceptable overview and quality.

**Keywords:** Dynamic analysis, Retaining wall, Soil, Finite element, Wavelet theory.