

# بررسی اثر فشرده‌سازی داده‌های شتاب‌نگاشت در مسائل مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌یی

مجید سلیم اسدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امیر بذرافشان مقدم\* (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰  
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۴/۲، ص. ۱۲۱-۱۳۰، (پادداشت نوی)

تحلیل مسائل مختلف در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌یی و مهندسی زلزله همواره کاری زمان‌بر و در نتیجه پرهزینه بوده است. شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده توسط لرزه‌نگارهای امروزی به دلیل دقت بالای دستگاه‌های لرزه‌نگار، حجم داده‌ی بسیار زیادی دارند، که استفاده از آن‌ها در مدل‌های عددی منجر به تشکیل ماتریس‌های با ابعاد بسیار بالا و موجب طولانی شدن روند تحلیل می‌شود. در پژوهش حاضر، برای کاهش زمان تحلیل شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از روش تحلیل چندریزه‌ساز موجکی فشرده شده و تعداد داده‌های آن‌ها کاهش یافته است. شتاب‌نگاشت‌های اولیه و فشرده شده در ۵ مسئله‌ی لرزه‌یی مختلف استفاده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که یک مرحله‌ی فشرده‌سازی، که معادل با کاهش ۵۰ درصدی داده‌های شتاب‌نگاشت است، به‌طور متوسط باعث کاهش ۳۳ درصدی در مدت زمان تحلیل می‌شود و نتایج به دست آمده با بیشینه‌ی ۵٪ با نتایج ناشی از اعمال موج اصلی (فشرده نشده) تفاوت دارد.

**واژگان کلیدی:** فشرده‌سازی داده، تحلیل چندریزه‌ساز موجکی، تاریخچه‌ی زمانی شتاب، شتاب‌نگار زلزله.

majidsalimasadi@gmail.com  
amir.bazrafshan@shahroodut.ac.ir

## ۱. مقدمه

با استفاده از روش تحلیلی اجزاء مستقل اساسی (PICA)<sup>۵</sup>، امواج لرزه‌یی را به‌منظور کاهش نویز فشرده کردند. در کلیه‌ی تلاش‌های اخیر، تأثیر فشرده‌سازی امواج در مسائل ژئوتکنیکی بررسی نشده است تا میزان مؤثر بودن روش‌های ذکر شده مشخص شود. با توجه به اهمیت محتوی بسامدی و شتاب بیشینه‌ی زلزله در رفتار لرزه‌یی خاک،<sup>۵</sup> در پژوهش حاضر سعی شده است با استفاده از روش تحلیل چندریزه‌ساز موجکی (MRA)<sup>۶</sup>، داده‌های شتاب‌نگاشت تا مرحله‌ی فشرده شوند که ضمن کاهش داده‌های آن‌ها، پارامترهای بیشینه‌ی شتاب و بسامد غالب تغییری نکنند و همچنین نتایج تحلیل‌های لرزه‌یی صورت گرفته با شتاب‌نگاشت‌های فشرده شده‌ی اشاره شده با نتایج حاصل از شتاب‌نگاشت‌های اولیه، کمترین خطا را داشته باشند.

## ۲. موجک و انواع آن

موجک، موجی کوتاه با طول مؤثر محدود است، که متوسط مقدارش در آن طول برابر با صفر است (رابطه‌ی ۱):

$$\int \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

حرکت‌های قوی زمین یا زمین‌لرزه‌ها، ماهیت موجی دارند. امواج مذکور در مدت زمانی که منتشر می‌شوند، اطلاعات زیادی را در قالب رشته‌یی بسیار طولانی از اعداد، که توسط شتاب‌نگارها ثبت می‌شوند، با خود حمل می‌کنند. از جمله کاربردهای داده‌های اخیر، در مسائل مدل‌سازی لرزه‌یی است؛ لیکن حجم زیاد اطلاعات موجود در یک موج زلزله در آنالیز یک سازه و بررسی اندرکنش آن با خاک حتی با پیشرفته‌ترین تجهیزات رایانه‌یی زمان بسیاری را می‌طلبد و باعث مصرف حجم زیادی از حافظه و کندی انتقال اطلاعات و افزایش هزینه‌های سخت‌افزاری می‌شود. کاهش تعداد داده‌های موجود در شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از فشرده‌سازی به روش موجکی در جهت کاهش زمان تحلیل‌ها می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ی انجام پروژه‌ها شود. کنجو و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۸۴)،<sup>۱</sup> با استفاده از روش پالس تفاضلی تطبیقی، که برای امواج صوتی به‌کار برده می‌شود، امواج زلزله را تا مقدار  $\frac{1}{2}$  کاهش دادند، اما پژوهش ایشان فاقد هرگونه مدل‌سازی و بررسی اثر فشرده‌سازی در مسائل مختلف لرزه‌یی بوده است. گومز و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۶)،<sup>۲</sup> با استفاده از آنالیز موجکی، فشرده‌سازی امواج زلزله را در جهت کاهش نویزهای موجود در امواج لرزه‌یی استفاده کرده‌اند. تیان و لی<sup>۳</sup> (۲۰۱۷)،<sup>۳</sup> با استفاده از روش آموزش غیرپارامتری دیکشنری بیزی از طریق خوشه‌بندی دست به فشرده‌سازی امواج زلزله زدند. یانگ و ناگاراچیا<sup>۴</sup> (۲۰۱۴)،<sup>۴</sup>

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۹/۲۵، اصلاحیه ۱۴۰۰/۴/۱۹، پذیرش ۱۴۰۰/۵/۱۰.

DOI:10.24200/J30.2021.57108.2879

که در آن،  $\{g_0[k]\}$  فیلتر پایین‌گذر بازسازی و  $\{g_1[k]\}$  فیلتر بالاگذر بازسازی است، که رابطه‌ی بین دو فیلتر مذکور به صورت رابطه‌ی ۷ بیان می‌شود:<sup>[۹]</sup>

$$g_1[k] = (-1)^k g_0[1-k] \quad (7)$$

چنانچه تابع یا سیگنالی مانند  $v_j$  در فضای تقریب ( $V_j$ ) قرار داشته باشد، می‌توان آن را به صورت ترکیب خطی از  $\phi_{j,k}(t)$  مطابق رابطه‌ی ۸ نوشت:

$$v_j(t) = \sum_k a_{j,k} \phi_{j,k}(t) \quad (8)$$

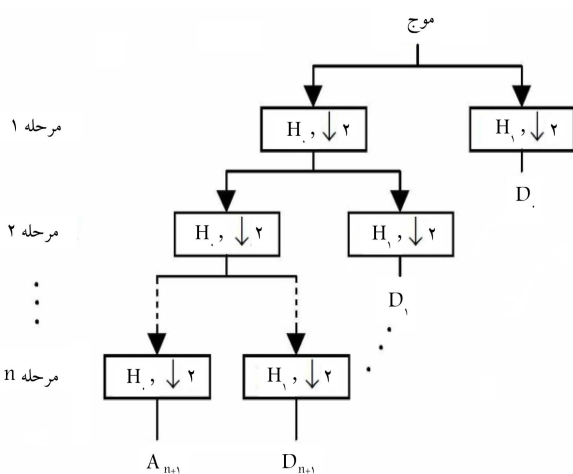
به‌طور مشابه، چنانچه سیگنالی مانند  $w_j$  در فضای جزئیات ( $W_j$ ) قرار داشته باشد، می‌توان آن را به صورت ترکیب خطی از  $\psi_{j,k}(t)$  مطابق رابطه‌ی ۹ نوشت:

$$w_j(t) = \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (9)$$

در روابط اخیر،  $a_{j,k}$  و  $d_{j,k}$  به ترتیب ضرایب مقیاس و ضرایب موجکی هستند. با توجه به رابطه‌ی ۳، هر تابع مانند  $f_J(t) \in V_J$  را می‌توان به صورت جمع دو تابع، که متعلق به فضاهای  $V_{j-1}$  و  $W_{j-1}$  هستند، نوشت. با استفاده از روابط ۸ و ۹، می‌توان رابطه‌ی ۱۰ را نوشت:

$$\begin{aligned} f_J(t) &= \sum_k a_{J,k} \phi_{J,k}(t) \\ &= \sum_k a_{J-1,k} \phi_{J-1,k}(t) + \sum_k d_{J-1,k} \psi_{J-1,k}(t) \\ &= A_1(t) + D_1(t) \\ &= \sum_k a_{J-2,k} \phi_{J-2,k}(t) + \sum_k d_{J-2,k} \psi_{J-2,k}(t) \\ &\quad + \sum_k d_{J-1,k} \psi_{J-1,k}(t) \\ &= A_2(t) + D_2(t) + D_1(t) \\ &= \dots \end{aligned} \quad (10)$$

در شکل ۱، روند تجزیه‌سازی یک سیگنال توسط تحلیل چندریزه ساز مشاهده می‌شود، که در آن  $H$  فیلتر پایین‌گذر تجزیه‌ساز و  $H_1$  فیلتر بالاگذر تجزیه‌ساز است.  $A_i(t)$  و  $D_i(t)$  به ترتیب توابع تقریب و جزئیات هستند، که چنانچه  $f(t)$  شتاب‌نگاشت یک زلزله باشد،  $A_i(t)$  زیرشتاب‌های تقریب و  $D_i(t)$  زیرشتاب‌های جزئیات هستند. چنانچه مرحله‌ی اول تجزیه‌سازی، مرحله‌ی صفر در نظر گرفته شود



شکل ۱. شماتیک روند تجزیه‌سازی موج.<sup>[۱۱]</sup>

که در آن،  $\psi(t)$  موجک مادر است و خانواده‌ی موجکی حاصل از آن با  $\psi_{a,b}(t)$  نمایش داده می‌شود، که از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

که در آن،  $a$  پارامتر مقیاس است و با بسامد نسبت عکس دارد و  $b$  پارامتر تغییرمکان و از جنس زمان است. مقیاس به معنی فشردگی و یا کشیدگی و تغییرمکان یا انتقال به معنی تأخیر و یا جلوانداختن موجک است.<sup>[۶]</sup> انتخاب موجک استفاده شده به عملکرد آن و نیازهای محاسباتی پروژه بستگی دارد، که معروف‌ترین آن‌ها: هار، دایبچیز،<sup>۸</sup> سیملت،<sup>۹</sup> کوپلت<sup>۱۰</sup> و میر<sup>۱۱</sup> است.

در پژوهش حاضر از موجک دایبچیز (db۲) جهت فشرده‌سازی امواج زلزله استفاده شده است. حفظ ویژگی‌های موج زلزله پس از تجزیه‌ی موجکی، به‌خصوص در مراحل دوم و سوم به بعد، که راجعاً به راجاسکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۰۶)،<sup>[۷]</sup> در نوشتار خود به آن اشاره کرده است و تشابه موج اصلی زلزله با موج تجزیه شده که شی و لو<sup>۱۳</sup> (۲۰۰۳)،<sup>[۸]</sup> برای آنالیز تاریخی‌چهی زمانی توسط موجک db۲ از آن استفاده کرده‌اند و همچنین شباهت ظاهری بین موجک مادر و سیگنال اصلی از مهم‌ترین دلایل برای انتخاب موجک در پژوهش حاضر بوده است.

### ۳. تحلیل چندریزه‌ساز موجکی (MRA)<sup>۱۴</sup>

روش استفاده شده در پژوهش حاضر، تحلیل چندریزه‌ساز موجکی با استفاده از موجک db۲ بوده است، که روشی کارآمد جهت تجزیه‌ی سیگنال‌هاست. در روش MRA، یک موج به چندین زیرموج تقریبی، که هر کدام متناسب با یک سطح تفکیک است، تجزیه می‌شود و با افزایش مرتبه‌ی تجزیه‌سازی، شکل زیرموج‌ها ساده‌تر و شامل تعداد نقاط داده‌ی کمتری می‌شوند.

در روش MRA، می‌توان هر تابع دو بار انتگرال‌پذیر را به صورت جمع دو تابع عمود بر هم در زیرفضاهای  $V_j$  و  $W_j$  به صورت رابطه‌ی ۳ نوشت:<sup>[۹]</sup>

$$V_j = V_{j-1} \oplus W_{j-1} \quad (3)$$

که در آن، عملگر  $\oplus$  جمع مستقیم است. فضای  $V_j$ ، فضای مؤلفه‌های تقریب است و خانواده‌ی تابع مقیاس  $\phi_{j,k}$  مطابق رابطه‌ی ۴ مشخص می‌شود:

$$\{\phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - k), j, k \in \mathbb{Z}\} \quad (4)$$

که در آن،  $\phi$  تابع مقیاس مادر،  $\phi_{j,k}$  تابع مقیاس شده و جابه‌جا شده‌ی تابع مقیاس مادر و  $j$  و  $k$  به ترتیب مرتبه‌ی تفکیک و جابه‌جایی هستند. فضای  $w_j$ ، فضای مؤلفه‌های جزئیات نامیده می‌شود و خانواده‌ی توابع موجک مطابق رابطه‌ی ۵ مشخص می‌شود:

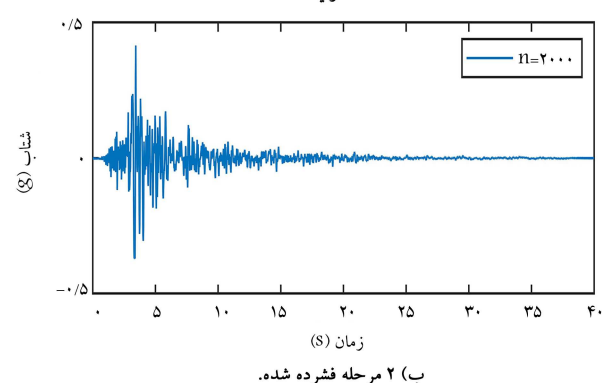
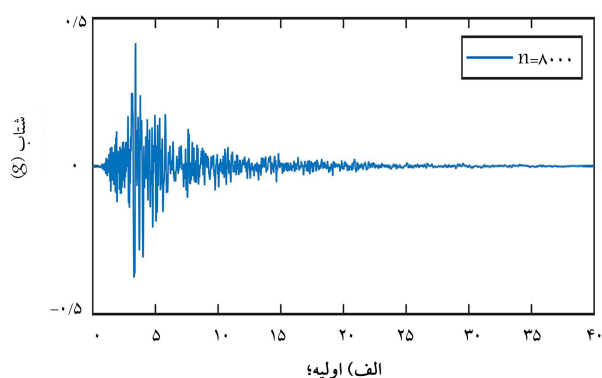
$$\{\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k), j, k \in \mathbb{Z}\} \quad (5)$$

رابطه‌ی  $\phi(t)$  و  $\psi(t)$  با یکدیگر توسط معادله‌ی دومقیاسی به صورت رابطه‌ی ۶ بیان می‌شود:<sup>[۹]</sup>

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \sum_k g_0[k] \phi(2t - k) \\ \psi(t) &= \sum_k g_1[k] \phi(2t - k) \end{aligned} \quad (6)$$

جدول ۱. مقایسه‌ی مشخصات موج اولیه و فشرده شده‌ی شتاب‌نگاشت‌ها.

شتاب‌نگاشت	مراحل فشرده‌سازی مناسب	اختلاف در بسامد غالب (%)	اختلاف در PGA (%)	درصد کاهش داده
Central Italy ۲۰۱۶	۵	۲	۱	۹۷
Izmit Turkey ۱۹۹۹	۵	۲	۳	۹۷
Gulf of Corinth Greece ۱۹۸۱	۵	۱	۲	۹۷
ChiChi Taiwan ۱۹۹۹ CHY ۰۸۰	۶	۳	۱	۹۸
Coyote Lake ۱۹۷۹ Array #۲	۴	۲	۳	۹۴
Imperial Valley ۱۹۷۹ array #۸	۴	۳	۲	۹۴
Imperial Valley ۱۹۷۹ array #۹	۵	۲	۲	۹۷
Imperial Valley ۱۹۷۹ array #۱۱	۴	۲	۱	۹۴
Loma Prieta ۱۹۸۱ Gilroy #۱	۵	۵	۴	۹۷
Mammoth Lakes ۱۹۸۰ Convict Creek	۲	۳	۲	۷۵
Morgan Hill ۱۹۸۴ Array #۱	۲	۲	۳	۷۵
Northridge — ۱۹۹۴ Newhall	۵	۳	۵	۹۷
Westmorland ۱۹۸۱ Fire Station	۶	۴	۲	۹۸
Whittier Narrows Obregon Park	۴	۲	۱	۹۴



شکل ۲. شتاب‌نگاشت لوماپریتا.

زمانی و بسامدی موج پس از فشرده‌سازی، دستخوش تغییرات محسوسی نشده و همان‌گونه که در جدول ۱ نیز ارائه شده است، اختلاف دو موج با یکدیگر بسیار کم بوده است.

در شکل ۳، طیف پاسخ شتاب و در شکل ۴، طیف فوری برای زلزله مشاهده می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، محتوای زمانی و بسامدی شتاب‌نگاشت

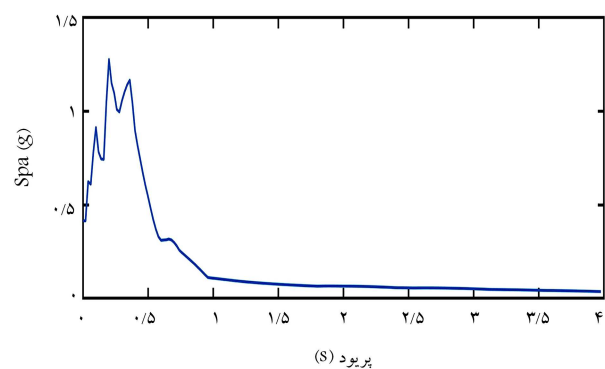
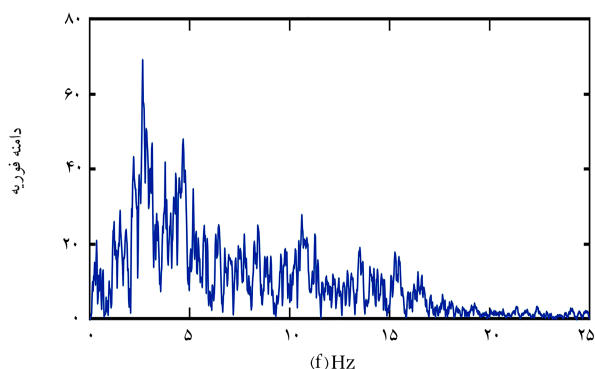
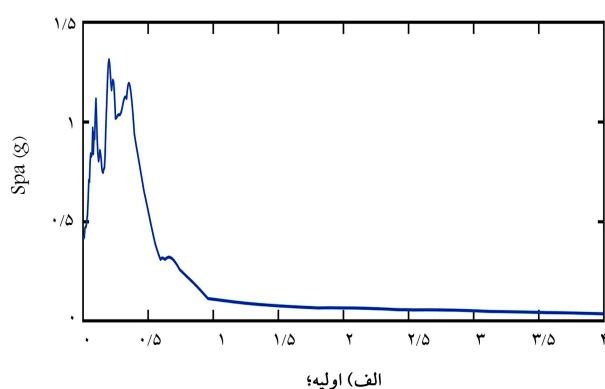
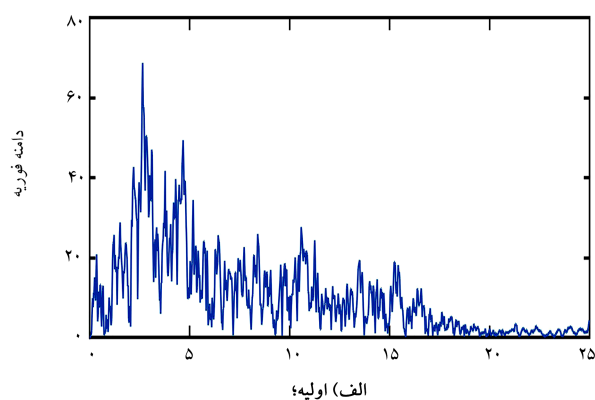
و روند تجزیه تا مرحله‌ی  $j$  ادامه یابد، تابع اولیه را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی ۱۱ نوشت:

$$f(t) = A_j(t) = A_j(t) + \sum_{i=1}^j D_j(t) \quad (11)$$

مطابق شکل ۱، در اولین مرحله ( $L_1$ ) موج پس از عبور از فیلترها به دو زیرموج  $A_1$  و  $D_1$  تبدیل می‌شود، که تعداد داده‌های هر یک از دو زیرموج مذکور برابر با نصف تعداد داده‌های موج اولیه است. با تکرار روند تجزیه در هر مرحله‌ی فشرده‌سازی ( $L$ ) می‌توان تعداد داده‌ها را به نسبت  $2^L$  کاهش داد. مالات ۱۵ نشان داد چنانچه با استفاده از نظریه‌ی کاهش نمونه‌ها، تعداد داده‌های زیرموج‌ها کاهش یابد، در مشخصات و خاصیت آن‌ها تغییری ایجاد نمی‌شود.<sup>[۱۰]</sup>

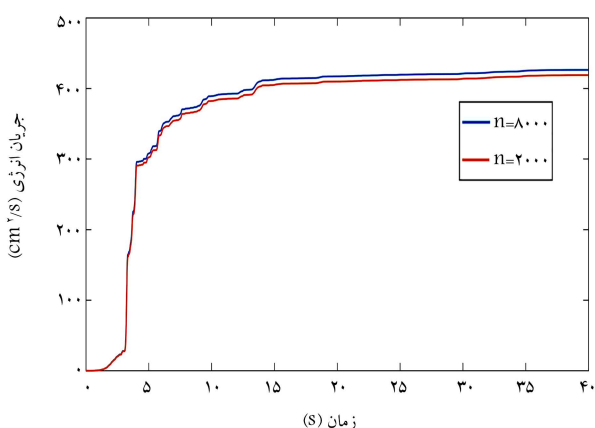
#### ۴. فشرده‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها

در پژوهش حاضر، عملیات فشرده‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها به روش تحلیل چندریزه ساز موجکی انجام شده است، که صحت الگوریتم اخیر در نوشتار بذرافشان و باقری‌پور (۲۰۱۲)،<sup>[۱۲]</sup> بررسی شده است. هر یک از شتاب‌نگاشت‌های مورد مطالعه، ابتدا با استفاده از موجک  $db2$  فشرده شده و سپس با توجه به مقدار خطای ایجاد شده در بیشینه‌ی شتاب زلزله (PGA) و بسامد غالب زلزله تا بیشینه‌ی ۵٪، در چند مرحله، فشرده‌سازی انجام شده است. مقایسه‌ی مشخصات موج اولیه و فشرده شده‌ی شتاب‌نگاشت‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. چنانچه تعداد مراحل فشرده‌سازی، که در جدول ۱ ارائه شده است، یک مرحله بیشتر شود، اختلاف در بسامد غالب و PGA بین شتاب‌نگاشت اولیه و فشرده شده بیش از مقدار ۵٪ خواهد شد. در شکل ۲، شتاب‌نگاشت زلزله‌ی لوماپریتا<sup>۱۶</sup> قبل و پس از ۲ مرحله‌ی فشرده‌سازی مشاهده می‌شود. تعداد داده‌های شتاب‌نگاشت اولیه، ۸۰۰۰ و شتاب‌نگاشت فشرده شده، ۲۰۰۰ است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، محتوی



شکل ۴. طیف فوریه‌ی زلزله‌ی لوما پریتا. (ب) ۲ مرحله فشرده شده.

شکل ۳. طیف پاسخ شتاب زلزله‌ی لوما پریتا. (ب) ۲ مرحله فشرده شده.



شکل ۵. نمودار انرژی موج اولیه و موج ۲ مرحله‌ی فشرده شده.

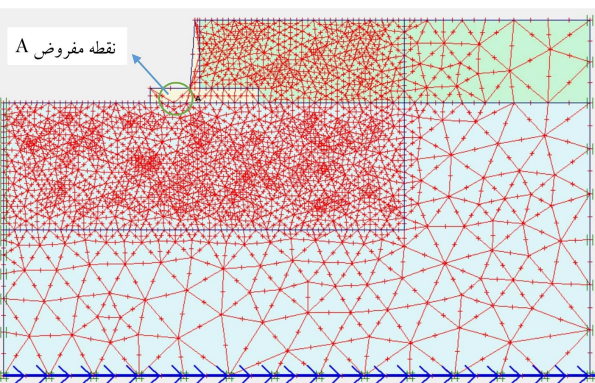
فشرده شده با وجود کاهش ۷۵ درصدی در تعداد داده‌ها، نسبت به شتاب‌نگاشت اولیه تغییری نکرده است. همچنین انرژی موج نیز پس از فشرده سازی تا ۲ مرحله فوق، تغییر زیادی نکرده است (شکل ۵).

## ۵. اعمال شتاب‌نگاشت‌ها در مسائل لرزه‌یی

در بخش کنونی از شتاب‌نگاشت‌های جدول ۱ به همراه فشرده شده‌ی آن‌ها، در تحلیل ۵ مسئله‌ی لرزه‌یی مختلف استفاده شده است. مقدار جابه‌جایی‌های به وجود آمده (به عنوان یک معیار بسیار مهم در تحلیل و طراحی) و همچنین مدت زمان انجام تحلیل دینامیکی مدل‌ها بررسی شده است، تا براساس آن بتوان معیاری جهت تعداد مراحل کافی برای فشرده‌سازی ارائه داد. هر مدل ابتدا با زلزله‌ی اصلی تحلیل شده و نتایج به دست آمده است و سپس مدل به طور جداگانه تحت اثر موج‌های فشرده شده‌ی مراحل اول، دوم، ... تحلیل شده است. تحلیل‌ها تا مرحله‌ی پیش می‌رود که اختلاف نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از اعمال زلزله‌ی اصلی، بیشتر از ۵٪ شود.

### ۱.۵. تحلیل دینامیکی دیوار حائل

در شکل ۶، مدل ساخته شده در نرم‌افزار PLAXIS مشاهده می‌شود. هندسه‌ی مدل از نوع کرنش مسطح انتخاب و مدل رفتاری خاک، مور - کولمب در نظر گرفته شده و مشخصات لایه‌های خاکی در جدول ۲ ارائه شده است. پس از ایجاد هندسه‌ی مدل و سایر شرایط مدل‌سازی، شتاب‌نگاشت‌های چپی‌چی<sup>۱۷</sup> و ایبزمیت<sup>۱۸</sup> ترکیه و فشرده شده‌ی آن‌ها به سازه اعمال و نتایج آن بررسی و مقایسه شده است. در شکل‌های ۷ و ۸، نمودار جابه‌جایی‌های به دست آمده در دیوار و در



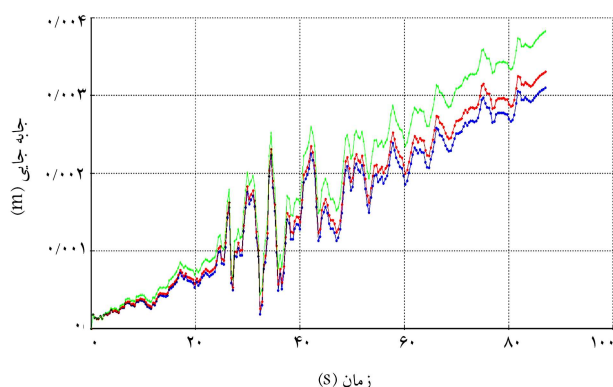
شکل ۶. دیوار حائل مدل شده در PLAXIS.

جدول ۲. پارامترهای ورودی برای مدل.

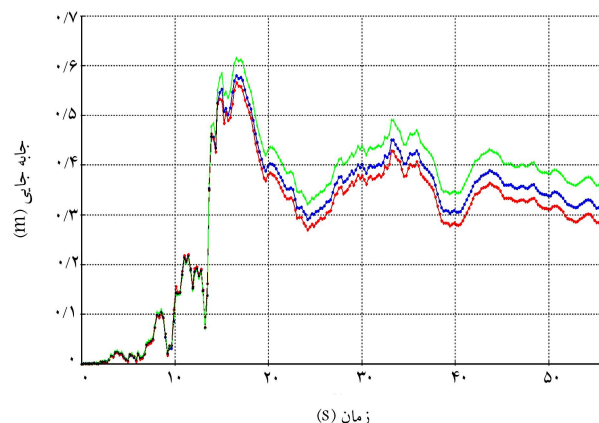
نوع مصالح	چگالی ( $kN/m^3$ )	مدول کشسانی ( $MPa$ )	$V$	چسبندگی ( $kPa$ )	$\phi$ ( $^{\circ}$ )	$\psi$ ( $^{\circ}$ )
خاک بستر	۱۸	۲۰	۰/۲۵	۰	۳۶	۶
خاکریز پشت دیوار	۱۹	۲۰	۰/۲	۰	۳۵	۵
بتن	۲۴	۲۰۰۰۰	۰/۲۵	-	-	-

جدول ۳. مشخصات موج ها و نتایج به دست آمده ی دیوار حائل (تحت زلزله ی چی چی تایوان).

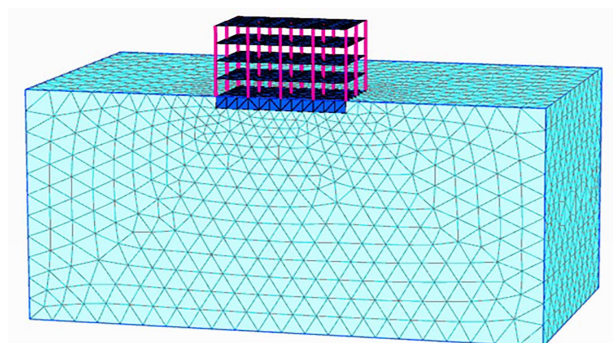
تعداد داده	شتاب نگاشت اصلی		فشرده شده ی مرحله ی اول		فشرده شده ی مرحله ی دوم	
	و نتایج	مشخصات	و نتایج	مشخصات	و نتایج	مشخصات
۱۱۲۰۱	۵۶۰۲	۵۰	۲۸۰۲	۷۵	۰	۰
$(m/s^2)$ PGA	۸/۸۵	۸/۸۵	۰	۸/۸۵	۰	۰
بسامد غالب ( $Hz$ )	۱/۲۱	۱/۲۱	۰	۱/۱۸	۰	۰
بیشترین جابه جایی ( $cm$ )	۵۶/۶	۵۸	۲/۵	۶۱/۵	۸	۸
زمان تحلیل (دقیقه)	۹۶/۵۵	۸۶/۲۸	-۱۰/۶	۷۹/۱۵	-۱۸	-۱۸



شکل ۸. جابه جایی های نقطه ی A در دیوار حائل (تحت زلزله ی ایزمیت): (آبی): اولیه؛ (قرمز): فشرده شده ی مرحله ی یک؛ (سبز): فشرده شده ی مرحله ی دو.



شکل ۷. جابه جایی های نقطه ی A در دیوار حائل (تحت زلزله ی چی چی): (قرمز): اولیه؛ (آبی): فشرده شده ی مرحله ی یک؛ (سبز): فشرده شده ی مرحله ی دو.



شکل ۹. مدل سازی ۴ طبقه.

چهارم در طول مدت اعمال زلزله برای زلزله ی اصلی و فشرده شده ی مرحله های اول و دوم مشاهده می شود، که مطابق آن نتایج حاصل از فشرده سازی، اختلاف چندانی با موج اولیه ندارد. در جدول ۷، نیز مقادیر بیشترین اختلاف در شکل ۱۰ به همراه مدت زمان تحلیل مدل ارائه شده است. ملاحظه می شود که در مسئله ی اخیر برای زلزله ی نورتریج، مرحله ی فشرده سازی

جدول های ۳ و ۴ مشخصات زلزله های اعمالی مشاهده می شود. از بررسی دو جدول اخیر ملاحظه می شود که زلزله ی فشرده شده ی مرحله ی اول، اختلاف جابه جایی به اندازه ی بیشینه ۴/۸٪ است و برای زلزله ی فشرده شده ی مرحله ی دوم، اختلاف اخیر به ۱۸/۴٪ افزایش یافته است. لذا بهترین حالت برای مسئله ی حاضر، موج فشرده شده ی مرحله ی اول با ۵۰٪ داده ی کمتر و ۱۰٪ زمان تحلیل کمتر است.

## ۲.۵. تحلیل دینامیکی سه بعدی یک ساختمان ۴ طبقه

در مسئله ی کنونی مطابق شکل ۹، یک ساختمان ۴ طبقه به ابعاد کلی مدل برابر  $80 \times 40 \times 80$  متر، که بر روی خاک قرار گرفته است، تحت بار لرزه یی به صورت سه بعدی توسط نرم افزار PLAXIS مدل سازی و تحلیل شده و جابه جایی طبقه ی چهارم آن بررسی شده است. مدل رفتاری خاک، مور-کولمب انتخاب شده است، که مشخصات آن در جدول ۵ ارائه شده است. دهانه ی ستون ها ۵ متر و ارتفاع طبقات ۳/۵ متر در نظر گرفته شده و مشخصات مصالح مذکور در جدول ۶ ارائه شده است. زلزله ی اعمالی، نورتریج (۱۹۹۴) بوده است. در شکل ۱۰، جابه جایی های طبقه ی

جدول ۴. مشخصات موج‌ها و نتایج به دست آمده‌ی دیوار حائل (تحت زلزله‌ی ایزمیت ترکیه).

فشرده شده‌ی مرحله‌ی اول		فشرده شده‌ی مرحله‌ی دوم		شتاب‌نگاشت اصلی	
مشخصات	اختلاف با شتاب‌نگاشت اصلی (درصد)	مشخصات	اختلاف با شتاب‌نگاشت اصلی (درصد)	مشخصات	اختلاف با شتاب‌نگاشت اصلی (درصد)
و نتایج	۸۶۸۹	و نتایج	۴۳۴۶	و نتایج	۱۷۳۷۶
۰/۰۴۴	۵۰	۰/۰۴۴	۷۵	۰/۰۴۴	۷۵
۱/۸۴	۰	۱/۸۴	۰	۱/۸۴	۰
۳/۲۷	۴/۸	۳/۸	۱۸/۴	۳/۱	۱۸/۴
۱۵۰	۷/۷	۱۳۸/۵	۱۴/۸	۱۶۲/۵	۱۴/۸

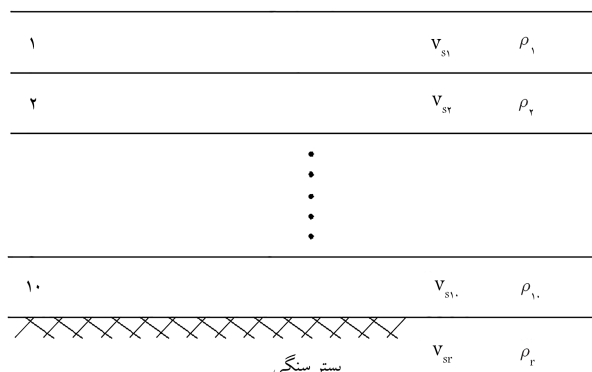
جدول ۵. مشخصات لایه‌های خاکی.

$\gamma(kN/m^3)$	$E(MPa)$	$v$	$C(kPa)$	$\phi(degree)$
۲۰	۴۰	۰/۳	۱۵	۲۸

جدول ۶. مشخصات سازه و فونداسیون مدل.

ستون دویل IPE۱۴		
$E(GPa)$	$EI(kN.m^2/m)$	$EA(MN/m)$
۲۱۰	۲۳۰۰	۶۹۰
تیر IPE۱۶		
$E(GPa)$	$EI(kN.m^2/m)$	$EA(MN/m)$
۲۱۰	۱۸۲۵	۴۲۰
پی بتنی		
$\gamma(kN/m^3)$	$E(GPa)$	$v$
۲۴	۲۰	۰/۱۵

سطح زمین



شکل ۱۱. هندسه‌ی مدل مسئله‌ی آنالیز پاسخ زمین.

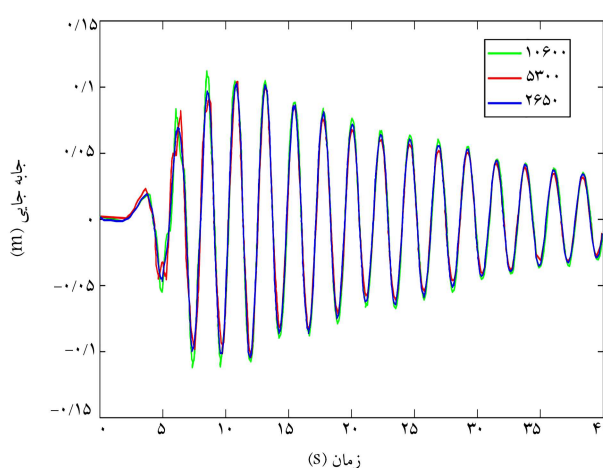
### ۳.۵. آنالیز پاسخ زمین

در مسئله‌ی حاضر با استفاده از نرم‌افزار Deepsoil و به روش خطی معادل به بررسی تأثیر شتاب‌نگاشت‌ها در جابه‌جایی سطح زمین واقع بر پروفیل خاک چندلایه به ضخامت ۳۰ متر واقع بر روی یک سنگ بسترکشنان پرداخته شده است. در شکل ۱۱، هندسه‌ی مدل مشاهده می‌شود. همچنین مقادیر چگالی، سرعت موج برشی، مدول برشی و ضریب میرایی در هر لایه مطابق جدول ۸ در نظر گرفته شده است. همچنین در مسئله‌ی حاضر، شتاب‌نگاشت‌های چپ‌چی و ایزمیت به مدل اعمال شده است. تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی به دست آمده در سطح زمین برای زلزله‌های اخیر در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و تفاوت در زمان‌های تحلیل و بیشینه‌ی جابه‌جایی‌های سطح زمین در جدول‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود. با بررسی نتایج ملاحظه می‌شود که برای هر دو زلزله‌ی چپ‌چی و ایزمیت، یک مرحله‌ی فشرده‌سازی خطای کمتر از ۵٪ را به دست داده و زمان تحلیل تا ۷۰٪ کاهش یافته است.

### ۴.۵. تحلیل دینامیکی سد خاکی با استفاده از GeoStudio

سازه‌ی مورد بررسی در مسئله‌ی کنونی، یک سد خاکی است (شکل ۱۴). ارتفاع سد ۴۳ متر، عرض قاعده‌ی سد ۲۳۵ متر، شیب بالادست ۱:۲/۲، شیب پایین دست ۱:۱/۷ بوده است. مدل رفتاری مصالح سد، مدل مور - کولمب در نظر گرفته شده و مشخصات قسمت‌های مختلف سد در جدول ۱۱ ارائه شده است.

مدل اخیر شامل ۴۵۴ گره و ۴۱۶ المان بوده است، که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. مدل در ابتدا، تحلیل استاتیکی قبل از اعمال نیروی زلزله شده است. ضریب

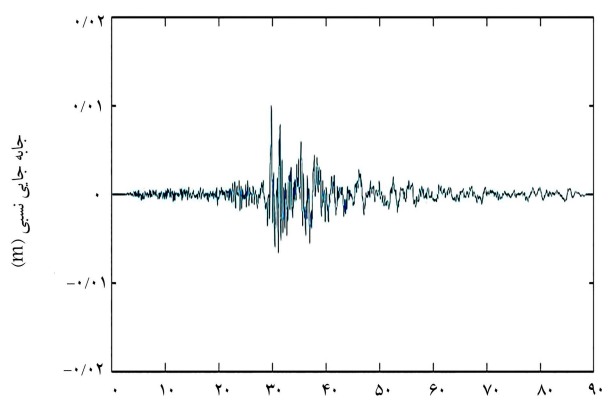


شکل ۱۰. جابه‌جایی طبقه‌ی چهارم سازه تحت زلزله‌های اصلی و فشرده شده‌ی مرحله‌های اول و دوم.

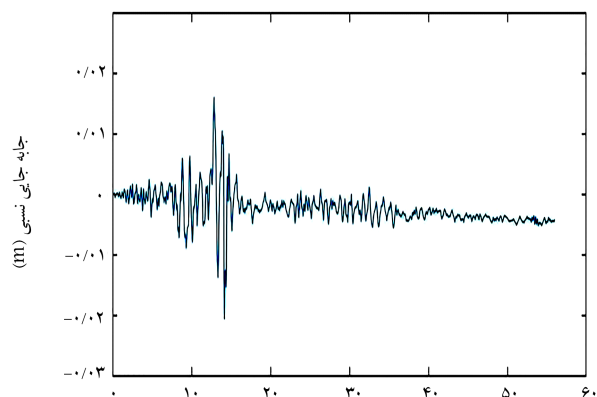
اول با ۵۰٪ کاهش در تعداد داده‌ها، خطای بیشینه‌ی ۵٪ را به دست آورده و برای فشرده‌سازی مرحله‌ی دوم، مقدار اختلاف با داده‌های اصلی بیش از ۷٪ شده است. لذا می‌توان گفت که یک مرحله‌ی فشرده‌سازی (معادل با ۵۰٪ کاهش در تعداد داده‌های شتاب‌نگاشت)، خطای کمتر از ۵٪ به همراه کمینه‌ی ۱۹٪ کاهش در زمان تحلیل به دست می‌دهد.

جدول ۷. سازه‌ی ۴ طبقه (تحت زلزله‌ی نورثریج (۱۹۹۴)).

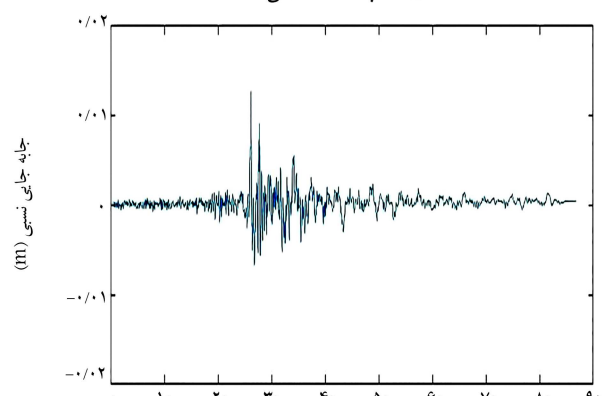
شتاب‌نگاشت اصلی		فشرده شده‌ی مرحله‌ی دوم		فشرده شده‌ی مرحله‌ی سوم	
مشخصات	اختلاف با شتاب‌نگاشت	مشخصات	اختلاف با شتاب‌نگاشت	مشخصات	اختلاف با شتاب‌نگاشت
و نتایج	اصلی (درصد)	و نتایج	اصلی (درصد)	و نتایج	اصلی (درصد)
تعداد داده	۱۰۶۰۰	۵۳۰۰	-۵۰	۲۶۵۰	-۷۵
بیشترین جابه‌جایی ( $m$ )	۰/۱۱۲	۰/۱۰۶	۵/۰	۰/۱۰۴	۷/۱
زمان تحلیل (دقیقه)	۳۴۵	۲۷۸	-۱۹/۴	۲۲۴	-۳۵



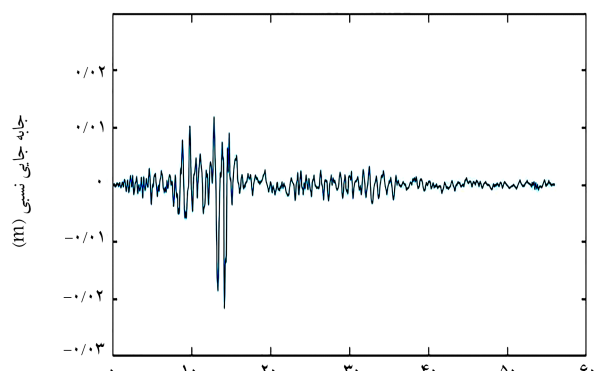
الف) شتاب‌نگاشت اصلی؛



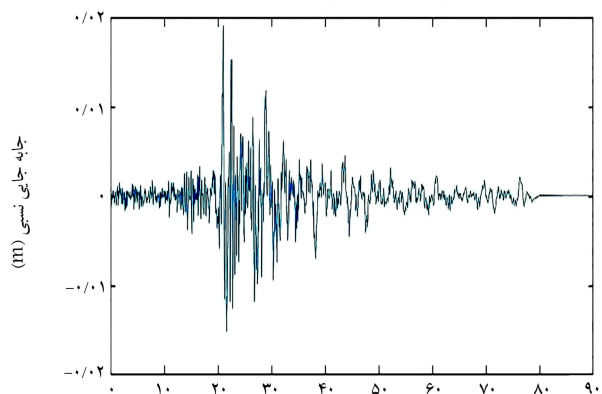
ب) فشرده شده مرحله دوم؛



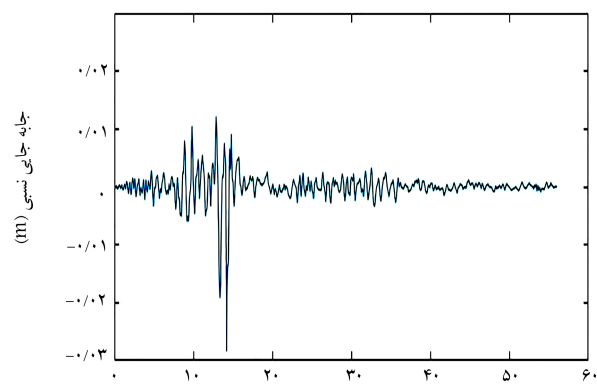
ج) فشرده شده مرحله اول؛



ب) فشرده شده مرحله دوم؛



ج) فشرده شده مرحله دوم.



ج) فشرده شده مرحله سوم.

شکل ۱۳. تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی‌های سطح زمین (تحت زلزله‌ی ایزمیت).

شکل ۱۲. تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی‌های سطح زمین (تحت زلزله‌ی چی‌چی).

جدول ۸. سرعت موج در هر لایه.

چگالی ( $kN/m^3$ )	ضریب میرایی (%)	مدول برشی ( $MPa$ )	$Vs(m/s)$	ضخامت لایه ( $m$ )
۱۸	۵	۲۰۸	۳۳۷	۰-۳
۱۸٫۱	۵	۳۸۹	۴۶۱	۳-۶
۱۸٫۲	۵	۵۲۰	۵۳۳	۶-۹
۱۸٫۳	۵	۶۳۰	۵۸۶	۹-۱۲
۱۸٫۴	۵	۷۲۸	۶۳۰	۱۲-۱۵
۱۸٫۵	۵	۸۱۶	۶۶۷	۱۵-۱۸
۱۸٫۶	۵	۸۹۷	۶۹۹	۱۸-۲۱
۱۸٫۷	۵	۹۷۴	۷۲۹	۲۱-۲۴
۱۸٫۸	۵	۱۰۴۶	۷۵۵	۲۴-۲۷
۱۹	۵	۱۱۱۴	۷۷۹	۲۷-۳۰
۲۲	۲	۸۹۷۰	۲۰۰۰	بستر سنگی

جدول ۹. مشخصات موج‌ها و نتایج به دست آمده‌ی آنالیز پاسخ زمین (تحت زلزله‌ی چی‌چی).

شتاب‌نگاشت اصلی		فشرده شده‌ی مرحله‌ی دوم		فشرده شده‌ی مرحله‌ی سوم	
مشخصات	و نتایج	مشخصات	و نتایج	مشخصات	و نتایج
تعداد داده	۱۱۲۰۱	تعداد داده	۲۸۰۲	تعداد داده	۱۴۰۲
بیشترین جابه‌جایی ( $mm$ )	۲۰	بیشترین جابه‌جایی ( $mm$ )	۲۱	بیشترین جابه‌جایی ( $mm$ )	۲۸
زمان تحلیل (دقیقه)	۶٫۲۴	زمان تحلیل (دقیقه)	۱٫۸۴	زمان تحلیل (دقیقه)	۰٫۹۳

جدول ۱۰. مشخصات موج‌ها و نتایج به دست آمده‌ی آنالیز پاسخ زمین (تحت زلزله‌ی ایزمیت).

شتاب‌نگاشت اصلی		فشرده شده‌ی مرحله‌ی اول		فشرده شده‌ی مرحله‌ی دوم	
مشخصات	و نتایج	مشخصات	و نتایج	مشخصات	و نتایج
تعداد داده	۱۷۳۷۶	تعداد داده	۸۶۸۹	تعداد داده	۴۳۴۶
بیشترین جابه‌جایی ( $mm$ )	۱۲	بیشترین جابه‌جایی ( $mm$ )	۱۲٫۵	بیشترین جابه‌جایی ( $mm$ )	۱۹٫۵
زمان تحلیل (دقیقه)	۶٫۹۶	زمان تحلیل (دقیقه)	۳٫۸۶	زمان تحلیل (دقیقه)	۲٫۰۹

جدول ۱۱. مشخصات مصالح سد خاکی.

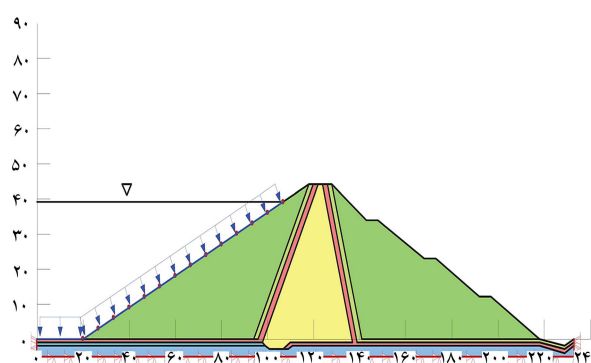
مصالح	$\gamma(kN/m^3)$	$C'(kPa)$	$\phi'$
هسته	۱۹	۱۹	۲۶
لایه‌ی نیمه نفوذناپذیر	۱۹	۱۵	۲۶
فیلتر	۲۲	۰	۳۸
لایه‌ی سنگی	۲۲	۰	۳۸
پرده‌ی رسی	۱۹	۱۸	۲۶
پی رسوبی	۱۷٫۵	۳۵	۳۱

پایین‌دست به دست آمده است (جدول ۱۲).

ملاحظه می‌شود که با فشرده‌سازی تا ۲ مرحله، خطای مربوط به ضرایب اطمینان کمتر از ۲٪ بوده است، اما زمان انجام تحلیل تا ۶۹٪ کاهش یافته است.

### ۵.۵. رفتار شمع در لایه‌ی روان‌گرا

در بخش کنونی به تأثیر فشرده‌سازی موج زلزله در تحلیل یک شمع تک در یک خاک چندلایه شامل لایه‌ی روان‌گرا پرداخته شده است. مدل‌سازی به‌صورت



شکل ۱۴. مدل سد خاکی در نرم‌افزار Geostudio.

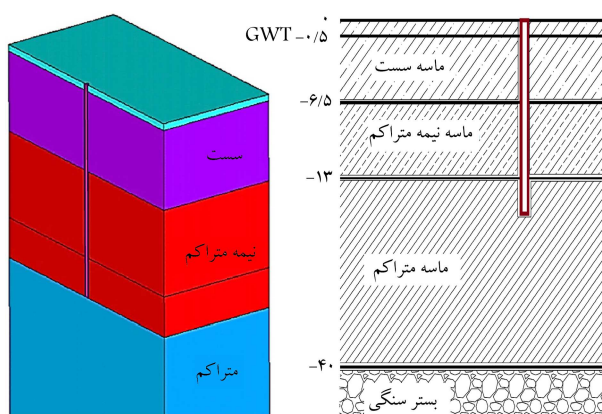
اطمینان در برابر لغزش برای بالادست برابر ۱٫۷۴ (شکل ۱۶) و برای پایین‌دست برابر با ۱٫۷۱ (شکل ۱۷) شده است، که با توجه به آیین‌نامه‌های [۱۳ و ۱۴] که مقدار کمینه‌ی ضریب اطمینان در برابر لغزش باید ۱٫۵ باشد، قابل قبول است.

سپس زلزله‌ی نورتریج (۱۹۹۴) و فشرده شده‌ی آن به مدل اعمال شده و ضرایب اطمینان در برابر لغزش پس از اعمال بار زلزله برای شیب‌های بالادست و



جدول ۱۲. نتایج تحلیل دینامیکی سد خاکی (Geostudio).

فشرده شده‌ی مرحله‌ی دوم		فشرده شده‌ی مرحله‌ی اول		شتاب‌نگاشت اصلی	
مشخصات	و نتایج	مشخصات	و نتایج	مشخصات	و نتایج
اختلاف با شتاب‌نگاشت اصلی (درصد)	نتایج	اختلاف با شتاب‌نگاشت اصلی (درصد)	نتایج	تعداد داده	
-۷۵	۲۶۵۰	-۵۰	۵۳۰۰	۱۰۶۰۰	
۰	۶٫۸۷	۰	۶٫۸۷	۶٫۸۷	$(m/s^2)$ PGA
۱٫۸	۱٫۶۰۶	۰٫۳	۱٫۵۸۲	۱٫۵۷۷	بسامد غالب (Hz)
۰٫۵	۰٫۸۹۴	۰٫۲	۰٫۸۹۱	۰٫۸۸۹	ضریب اطمینان بالادست
۱٫۳	۱٫۲۱۱	۰٫۶	۱٫۲۰۳	۱٫۱۹۵	ضریب اطمینان پایین دست
۶۹	۳٫۹۱	۳۸	۷٫۸۳	۱۲٫۷	زمان تحلیل (دقیق)



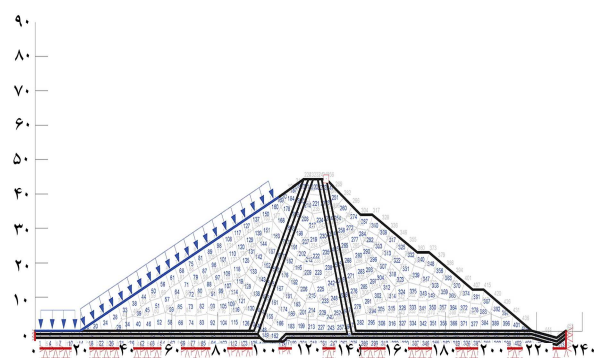
شکل ۱۸. مدل سه‌بعدی شمع در خاک روان‌گرا.

سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است (شکل ۱۸). المان‌های ۸ گره‌یی C3D۸R جهت مدل‌سازی استفاده شده‌اند. مدل رفتاری خاک، مدل الاستو - خمیری کامل مور - کولمب انتخاب شده و مدل رفتاری شمع به صورت کشسان در نظر گرفته شده است. از المان‌های کانتکت اسلیو - مستر جهت اتصال شمع به خاک استفاده شده است. مشخصات مصالح در جدول ۱۳ ارائه شده است. زلزله‌ی اعمالی ال‌سنتر (۱۹۴۰) بوده است، که به صورت غیرفشرده و نیز فشرده شده تا ۲ مرحله به مدل جهت مقایسه اعمال شده است. نیروی زلزله با استفاده از روش ارائه شده‌ی سید و ادریس (۱۹۷۵)،<sup>[۱۵]</sup> به تاریخچه‌ی زمانی تنش برشی تبدیل شده است. مقدار دامنه‌ی تنش برشی از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید:<sup>[۱۵]</sup>

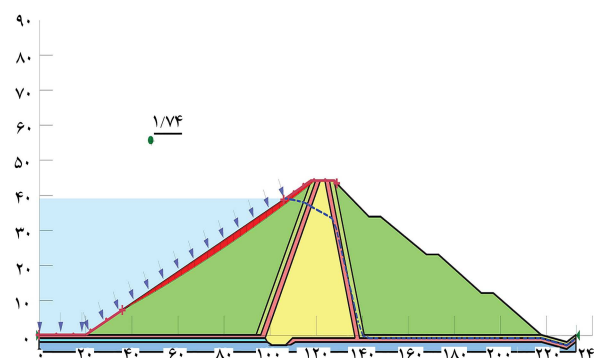
$$\tau_{cyc} = 0.65 C_D \sigma_v \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \quad (12)$$

که در آن،  $C_D$  ضریب کاهش تنش با توجه به غیرصلب بودن ستون خاک است. بر این اساس مقدار دامنه‌ی تنش برشی برابر  $\tau_{cyc} = 84.78 kPa$  و تعداد سیکل‌های معادل نیز با توجه به بزرگای ۷/۱ ریشتر برای زلزله‌ی ال‌سنتر برابر  $N = 1176$  به دست آمده است، که در شکل ۱۹ برای زلزله‌ی اصلی مشاهده می‌شود.

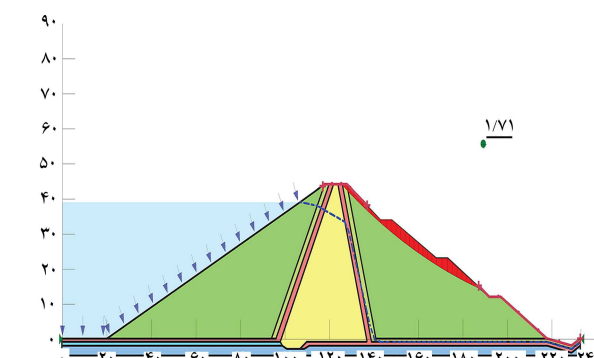
همان‌گونه که در شکل ۲۰ ملاحظه می‌شود، لایه‌ی ماسه‌یی سست در سیکل آخر به روان‌گرایی رسیده است. در شکل ۲۱، نیز جابه‌جایی افقی شمع برای



شکل ۱۵. المان‌بندی مدل سد خاکی.



شکل ۱۶. ضریب اطمینان در برابر لغزش بالادست (استاتیکی).



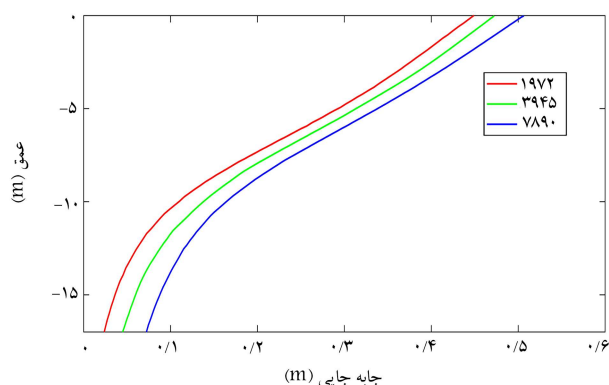
شکل ۱۷. ضریب اطمینان در برابر لغزش پایین دست (استاتیکی).

جدول ۱۳. مشخصات مصالح.

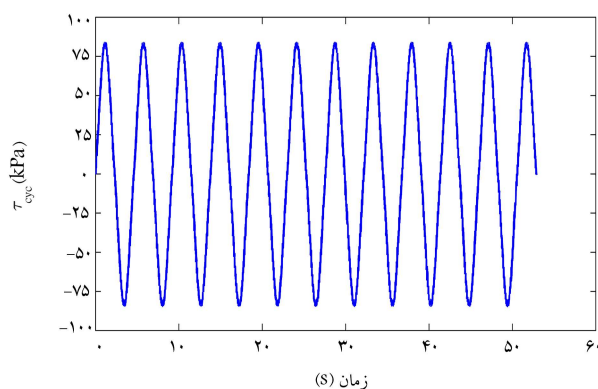
نوع خاک	$\gamma(kN/m^3)$	$E(MPa)$	$Dr(\%)$	$\phi^\circ$
ماسه‌ی سست خشک	۱۷	۳۰	۳۵	۳۲
ماسه‌ی سست اشباع	۱۸	۲۵	۳۵	۳۵
ماسه‌ی نیمه متراکم	۱۹	۱۰۰	۶۰	۳۵
ماسه‌ی متراکم	۲۰	۲۰۰	۸۵	۴۰

جدول ۱۴. نتایج تحلیل شمع در خاک روان‌گرا (تحت زلزله‌ی ال‌سنترو).

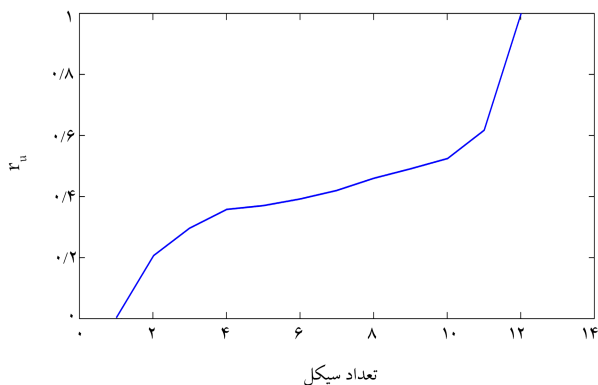
شتاب‌نگاشت اصلی		فشرده شده‌ی مرحله‌ی اول		فشرده شده‌ی مرحله‌ی دوم	
مشخصات	و نتایج	مشخصات	و نتایج	مشخصات	و نتایج
اختلاف با شتاب‌نگاشت اصلی (درصد)	نتایج	اختلاف با شتاب‌نگاشت اصلی (درصد)	نتایج	اختلاف با شتاب‌نگاشت اصلی (درصد)	نتایج
تعداد داده	۷۸۹۰	۳۹۴۵	-۵۰	۱۹۷۲	-۷۵
بیشترین جابه‌جایی (m)	۰٫۵۰۶	۰٫۴۸۱	-۴٫۸	۰٫۴۴۹	-۱۱٫۲
زمان تحلیل (دقیقه)	۴۷۳	۲۹۶	-۳۷	۱۸۵	-۶۱



شکل ۲۱. جابه‌جایی افقی شمع تحت اثر بار زلزله.



شکل ۱۹. تاریخچه‌ی زمانی تنش برشی معادل زلزله‌ی ال‌سنترو.



شکل ۲۰. نسبت اضافه فشار آب حفره‌یی در سیکل‌های معادل.

## ۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، فشرده‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از آنالیز چندریزه‌ساز موجکی تا مرحله‌یی که شکل ظاهری موج‌ها و مقدار بسامد غالب و PGA آن‌ها ثابت بماند، انجام شده است. سپس در ۵ مسئله‌ی مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌یی مختلف، تحلیل‌های لرزه‌یی با استفاده از امواج زلزله اصلی و فشرده شده انجام شده است. همان‌گونه که مشاهده شد، فشرده‌سازی و کاهش داده‌های زلزله باعث کاهش زمان تحلیل شده است، که قطعاً در مدل‌های مهندسی پیچیده و پرالمان، عامل بسیار مهمی خواهد بود. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که یک مرحله‌ی فشرده‌سازی، که معادل با کاهش ۵۰ درصدی تعداد داده‌های شتاب‌نگاشت است، اختلاف نتایج بیشینه‌ی ۵ درصدی با نتایج ناشی از اعمال موج اصلی (فشرده نشده) در مسائل مختلف خواهد داشت. میزان متوسط کاهش در زمان تحلیل در ۵ مسئله‌ی مختلف ژئوتکنیکی با ۴ نرم‌افزار تخصصی مختلف برابر با ۳۳٪ شده است، که به‌خصوص برای نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، که عمدتاً زمان تحلیل مدل‌ها بسیار طولانی است، کاهش زمان مذکور، بسیار قابل توجه و کمک‌کننده به پژوهش‌گران است و می‌تواند عامل مؤثری در تسریع و تکمیل پژوهش‌های انجام شده با نرم‌افزار اجزاء محدود شود.

زلزله‌ی اصلی و نیز فشرده شده‌ی مرحله‌های اول و دوم مشاهده می‌شود. همچنین در جدول ۱۴، مقادیر بیشینه‌ی جابه‌جایی در تراز سطح زمین و نیز مدت زمان تحلیل در نرم‌افزار آباکوس برای هر کدام از رکوردهای زلزله ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که زلزله‌ی فشرده شده‌ی مرحله‌ی اول، میزان خطایی در حدود ۴٫۸٪ داشته است، اما مدت زمان کاهش تحلیل به‌طور چشم‌گیری کاهش یافته است.

## پانویسها

1. Kanjo et al
2. Gomes et al.
3. Tian & Li
4. Yang & Nagarajaiah
5. principled independent component analysis
6. multi resolution analysis
7. Haar
8. Daubechies
9. Symlet
10. Coiflet
11. Meyer
12. Rajasekaran
13. Shi & Luo
14. multi resolutrion analysis
15. Mallat
16. loma prieta
17. Chi Chi
18. Izmit

## منابع (References)

1. Kanjo, K., Kasahara, J. and Takahashi, M. "An application of the adaptive differential PCM (ADPCM) method to the seismic wave signal compression", *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **58**(3), pp. 647-654 (1984).
2. Gomes, V.M., Santos, M.A.C. and Burgos, R.B. "Analysis of seismic data compression using SPIHT in seismic inversion", *VII Simpósio Brasileiro de Geofísica*, pp.1-6 (2016).
3. Tian, X. and Li, S. "Seismic signal compression using nonparametric bayesian dictionary learning via clustering", *Algorithms*, **10**(2), p. 65 (2017).
4. Yang, Y. and Nagarajaiah, S. "Data compression of structural seismic responses via principled independent component analysis", *Journal of Structural Engineering*, **140**(7), pp.1-10 (2014).
5. Kausel, E. and Assimaki, D. "Seismic simulation of inelastic soils via frequency-dependent moduli and damping", *Journal of Engineering Mechanics*, **128**(1), pp. 34-47 (2002).
6. Tuzandejani, A., Langari, S. and Jafari, A. "Image compression using a combination of blocking, SVD and WD methods", *2<sup>nd</sup> National Conference on Science and Technology of Electrical, Computer and Mechanical Engineering of Iran*, Tehran, Iran (2018).
7. Rajasekaran, S., Latha, V. and Lee, S. "Generation of artificial earthquake motion records using wavelets and principal component analysis", *Journal of Earthquake Engineering*, **10**(05), pp. 665-691 (2006).
8. Shi, C.-X. and Luo, Q.-F. "Hilbert-huang transform and wavelet analysis of time history signal", *Acta Seismologica Sinica*, **16**(4), pp. 422-429 (2003).
9. Boggess, A. and Narcowich, F.J. "A first course in wavelets with Fourier analysis", *John Wiley & Sons* (2015).
10. Mallat, S.G. "Multiresolution approximation and wavelet orthonormal bases of L<sup>2</sup>", *Trans. Amer. Math. Soc.*, **315**, pp. 69-87 (1989).
11. Bazrafshan M.A. and Bagheripour, M.H. "Optimization of ground response analysis using wavelet-based transfer function technique", *Geomechanics and Engineering*, **7**(2), pp. 149-164 (2014).
12. Bazrafshan M.A. and Bagheripour, M.H. "Earthquake time-frequency analysis using a new compatible wavelet function family", *Earthquakes and Structures*, **3**(6), pp. 839-852 (2012).
13. USBR. "US bureau of reclamation, embankment dam's static stability analysis", *Design Standards*, **13**, Chapter 4(2011).
14. US Corps of Engineers., *Engineering and Design Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures*, Engr. Manual EM1110-2-6051, Dept. of the Army, Corp of Engrs, Office of the Chief of Engineers (2003).
15. Seed, H., Idriss, I., Makdisi, F. and et al. "Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses. EERC 75-29", *Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley* (1975).