



## اثرات جهت موج زلزله بر پاسخ دینامیکی سدهای خاکی - مطالعه‌ی موردی: سد شهیدا

یزدان شمس ملکی\*

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۹  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

### کلمات کلیدی:

نامنظمی حرکات ورودی  
بارگذاری لرزه‌ای  
سد خاکی  
تحلیل غیرخطی  
مدل رفتاری

**خلاصه:** در این مقاله اثرات نامنظمی در جهات اولیه بارگذاری‌های لرزه‌ای بر پاسخ‌های تاریخچه-زمانی غیرخطی سد شهیدا مطالعه شده است. حداکثر مقطع عرضی سد، در شرایط تراز نرمال دریاچه آن، توسط روش اجزای محدود دو بعدی شبیه‌سازی شده است. رکورد شتاب زلزله نزدیک-گسل طیس به عنوان بارگذاری دینامیکی به مدل‌های عددی اعمال شده است. سه الگوی اصلی بارگذاری جهتی افقی، قائم و مایل برای بررسی اثرات جهات اولیه انتشار حرکات لرزه‌ای در نظر گرفته شده است. در هر مورد پاسخ‌های لرزه‌ای نسبت به مورد مرجع بارگذاری در جهت افقی بالا دست به پایین دست مخزن مقایسه شده است. برای مدل‌سازی مصالح بدنه و پی سد به ترتیب از مدل رفتاری خاک سخت شونده با کرنش کوچک HS-small و مدل ارتجاعی-خمیری کامل مور-کولمب استفاده شده است. اهمیت و ضرورت انجام این تحقیق در تقریب محافظه‌کارانه شبیه‌سازی شرایط بارگذاری سه بعدی در تحلیل‌های عددی دو بعدی است. تا به حال در اغلب مدل‌های دو بعدی، راستای اولیه حرکات لرزه‌ای ورودی فقط در جهات افقی یا قائم بوده است، که در این تحقیق سعی شده که این الگو با حالات ممکن دیگر بارگذاری جهتی، مقایسه شود. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که حالت بارگذاری لرزه‌ای با جهت انتشار اولیه مایل، با زاویه ۴۵ درجه، بیشترین اثر بر پاسخ‌های لرزه‌ای سد نسبت به حالات بارگذاری فقط در جهات افقی و یا قائم بوده است.

### ۱- مقدمه

در مطالعه‌ی عددی سیکا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹) [۱] فروکش سریع مخزن سد کامپولاتارو<sup>۲</sup> در ایتالیا پس از زلزله، توسط روش تفاضل محدود دو بعدی و در نرم‌افزار FLAC<sup>2D</sup> بررسی شده است. برای شبیه‌سازی مصالح سد، قانون جریان خمیری غیرهمراه<sup>۳</sup> با فرض زاویه اتساع صفر در مدل رفتاری مور-کولمب در نظر گرفته شده است. در تحقیق آن‌ها، ضرایب اطمینان پایداری سد بر اساس نسبت و آهنگ فروکش سریع<sup>۴</sup> مخزن رسم شده است. در مقاله جئونگ<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۹) [۲] مدل‌های میز لرزان و اجزای محدود دو بعدی سد خاکی با لاینر رسی ژئوسنتتیک<sup>۶</sup> در نرم‌افزار PLAXIS2D توسط مدل HS-small و مدل مور-کولمب<sup>۷</sup> شبیه‌سازی شده است. همچنین کاستلی و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۶) [۳] مدل اجزای محدود دو بعدی سد خاکی

تحلیل لرزه‌ای سدهای خاکی، یکی از گام‌های مهم و ضروری در مراحل طراحی و کنترل عملکرد این سازه‌های راهبردی است. تا به حال، روش‌های مختلفی همانند روش‌های خطی، معادل-خطی و غیرخطی در چارچوب‌های تنش کل و موثر، برای تحلیل و طراحی لرزه‌ای سدهای خاکی به کار گرفته شده است. روش غیرخطی که بر مبنای فرضیات تنش موثر استوار است، به قسمی دقیق‌ترین روش تحلیل لرزه‌ای سدهای خاکی است. مطالعات گسترده‌ای در چند دهه اخیر برای شناخت بهتر رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی و سنگریزه‌ای انجام شده است. در راستای درک بهتر موضوع مطالعه حاضر، بررسی دو نکته اساسی در این مطالعات، حائز اهمیت فراوانی است، که عبارت است از (۱) نوع مدل رفتاری مورد استفاده برای شبیه‌سازی عددی مصالح بدنه و پی سدهای خاکی و نیز (۲) روش تحلیل دینامیکی انتخابی و چگونگی تعریف شرایط مرزی-اولیه مدل‌های عددی سد خاکی. برای مثال،

- 1 Sica et al.
- 2 Campolattaro
- 3 Non-associated flow rule
- 4 Rapid drawdown (RDD)
- 5 Jeong et al.
- 6 Geosynthetic clay liner (GCL)
- 7 Mohr-Coulomb constitutive model
- 8 Castelli et al.

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: y.shamsmaleki@kut.ac.ir



لرزه‌ای سد خاکی-سنگریزه‌ای لاویلتا<sup>۱۴</sup> با ارتفاع ۶۰ متر، به عنوان یک مطالعه موردی، توسط روش اجزای محدود دو بعدی ارائه شده است. اثر اندرکنش سد با دره و لایه آبرفت زیرین توسط مدل رفتاری مور-کولمب ارزیابی شده است. در تحقیق زروئال و همکاران<sup>۱۵</sup> (۲۰۱۹) [۱۱] پارامترهای مدل رفتاری مور-کولمب منطبق بر قانون جریان ناهمراه، برای تحلیل لرزه‌ای سد خاکی کوچکی به کار گرفته شده است.

به هر حال، مطابق مطالعات انجام شده توسط نویسنده مقاله حاضر [۱۹-۱۲]، تا به حال موضوع اثر جهات اولیه بارگذاری لرزه‌ای در مدل‌های اجزای محدود دو بعدی کرنش-مسطح سدهای خاکی [۲۰]، کمتر بررسی شده است. در اغلب مدل‌سازی‌های عددی دو بعدی، در چارچوب‌های اجزای محدود یا تفاضل محدود یا روش‌های عددی مرکب، جهت اولیه بارگذاری لرزه‌ای در سنگ بستر مدل‌های عددی، فقط در یک راستای افقی (از بالا دست به پایین دست) یا قائم بوده است. حال آن که در واقعیت، بارگذاری و انتشار اولیه امواج و در یک مفهوم عام‌تر حرکات لرزه‌ای در راستاهای دیگر، تاثیر بسیار مهمی در تغییر شکل‌ها و تنش-کرنش‌های لرزه‌ای ایجاد شده در بدنه و پی سدهای خاکی دارد. در تعریف چارچوب این مطالعه، به عنوان یک ضرورت محاسباتی در مدل‌های عددی دو بعدی کرنش-مسطح، به شکل تقریبی محافظه‌کارانه از بارگذاری‌های جهتی سه بعدی واقعی، جهت اولیه خروج حرکات لرزه‌ای سنگ بستر در راستاهای نامنظم مختلفی در نظر گرفته شده است. در واقع، سایر جهات محتمل انتشار بارگذاری لرزه‌ای در مدل دو بعدی، بر خلاف جهت متداول افقی (از بالا دست به سمت پایین دست مخزن)، انتخاب و مدل‌سازی شده است.

## ۲- معرفی سد خاکی شهدا (مطالعه‌ی موردی)

در این بخش، در آغاز به بررسی موقعیت و ویژگی‌های سد خاکی-سنگریزه‌ای مورد مطالعه‌ی شهدا و سپس به مرور مشخصات استاتیکی و لرزه‌ای و نحوه مدل‌سازی عددی آن، پرداخته شده است. سد خاکی-سنگریزه‌ای شهدا در نزدیکی روستای سلیمان‌شاه در شهرستان سنقر، در شمال شرقی استان کرمانشاه در غرب ایران واقع شده است. هسته رسی سد، از نوع قائم و بدنه سنگریزه‌ای است. ساختگاه سد مخزنی شهدا در فاصله ۱۵ کیلومتری شهر سنقر و در مختصات جغرافیایی ۴۷/۵۵۲۵۹۱ درجه طول شرقی و ۳۴/۹۰۲۹۶۴ درجه عرض شمالی، بر روی رودخانه گاورود از شاخه‌های اصلی رودخانه سیروان واقع شده است. سد شهدا، سدی خاکی با

لنتینی<sup>۱</sup> را در PLAXIS ID ایجاد کرده و مصالح بدنه را توسط مدل مور-کولمب غیرخطی مدل‌سازی کرده‌اند. آن‌ها نتایج تحلیل یک بعدی را با نتایج برنامه‌های نرم‌افزاری EERA و MARTA مقایسه کرده‌اند.

در تحقیق پانگ و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۸) [۴] شبیه‌سازی اجزای محدود سد خاکی-سنگریز در برنامه‌ی GEODYNA در فاز استاتیکی توسط مدل Duncan-Chang EB (نوعی مدل با لحاظ سخت شونده‌ی کرنشی) و در فاز دینامیکی مدل هاردین-درینویچ<sup>۳</sup> برای بررسی رفتار نرم شونده‌ی کرنشی مصالح سنگریز، در حین بارگذاری لرزه‌ای به کار گرفته شده است. در تحقیق پانگ و چی<sup>۴</sup> (۲۰۱۴) [۵] تحلیل حدی اجزای محدود (FELA) پایداری لرزه‌ای سدهای خاکی-سنگریزه‌ای توسط مدل مور-کولمب با جریان خمیری همراه<sup>۵</sup> پیگیری شده است. در مطالعه مسینی و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۲۰) [۶] مدل تفاضل محدود دو بعدی سدهای همگن و زون‌بندی شده با ترکیب مدل‌های رفتاری مور-کولمب و فین-بایرن<sup>۷</sup> برای پیش‌بینی کرنش‌های حجمی انحرافی و اضافه فشار آب حفره‌ای، به کار برده شده است. در مطالعه‌ای دیگر (۲۰۱۹) [۷] رفتار لرزه‌ای مدل دو بعدی اجزای محدود دو سد خاکی به کمک روش‌های تحلیل معادل-خطی<sup>۸</sup> (EL) و غیرخطی واقعی<sup>۹</sup> (TNL) ارزیابی شده است. در این مطالعه در گام تحلیل استاتیکی از مدل مور-کولمب و در گام تحلیل دینامیکی از مدل ایوان-امرز<sup>۱۰</sup> و مارتین-فین-سید<sup>۱۱</sup> استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان داده که روش معادل-خطی جواب‌های ناهموار و محافظه‌کارانه‌ای در مقایسه با روش غیرخطی واقعی به دست می‌دهد. در مطالعه ژائو و همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۲۰) [۸] اثر توپوگرافی دره احداث سد خاکی بر پاسخ لرزه‌ای آن، به کمک مدل رفتاری مور-کولمب و در نرم‌افزار تفاضل محدود سه بعدی FLAC<sup>3D</sup> ارزیابی شده است. تحلیل‌های شبه-استاتیکی برای این منظور انجام شده است.

در تحقیق پلکانوس و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۵ و ۲۰۱۸) [۹ و ۱۰] تحلیل

- 1 Lentini
- 2 Pang et al.
- 3 Hardin-Drnevich
- 4 Yang and Chi
- 5 Associated flow rule
- 6 Masini et al.
- 7 Finn-Byrne
- 8 Equivalent-linear method (EL)
- 9 True non-linear method (TNL)
- 10 Iwan-Mroz model
- 11 Martin-Finn-Seed (MFS)
- 12 Gao et al.
- 13 Pelecanos et al.

14 La Villita

15 Zerouall et al.

۳-۱- شرایط مرزی- اولیه و مش‌بندی اجزای محدود مدل دو بعدی سد  
 شرایط مرزی اثر مهمی بر پاسخ‌های لرزه‌ای نهایی مدل عددی سد دارند. در این تحقیق، شرایط مرزی در دو مرحله به مدل عددی اعمال شده است. مرحله اول شامل فاز پیش تحلیل استاتیکی مدل، با تعریف بارگذاری فشار آب در تراز عادی مخزن سد، در بخش بالا دست مدل عددی سد است. در این مرحله، کناره‌های مدل عددی در مقابل نشست آزاد نگه داشته شده‌اند و تکیه‌گاه غلطکی به کار برده شده است (یعنی گیرداری از نوع  $fix\ x$ ). به علاوه، کف مدل در هر دو راستای صفحه دو بعدی مدل‌سازی، توسط ایجاد شرایط مرزی مفصلی، مقید شده است (یعنی  $fix\ xy$ ). در مرحله دوم و در فاز تحلیل دینامیکی مدل عددی، بارگذاری شتاب زلزله مورد نظر به محل سنگ بستر مدل که قبلاً تنش‌های بر جای استاتیکی در آن برقرار و متعادل شده، اعمال شده است. از رکورد زمانی شتاب زلزله نزدیک-گسل طبس، برای ایجاد بارگذاری لرزه‌ای استفاده شده است. در این مرحله برای جلوگیری از اثر منفی امواج لرزه‌ای در مرزها و بازگشت آن‌ها به داخل مدل عددی و بروز خطا، از مرزهای دینامیکی شامل مرزهای جاذب، با تعریف میراگرهای ویسکوز در محل مرزهای مدل عددی استفاده شده است. در این روش، میراگرها در مرزهای مدل به جای گیرداری‌های استاتیکی معمول به کار برده می‌شود. میراگر از افزایش در تنش روی مرز مدل با جهش جلوگیری و تنش‌ها را جذب می‌کند. برای نمونه، مولفه‌های تنش برشی و نرمال جذب شده توسط میراگر ویسکوز در جهت دلخواه محور  $x$ - به شرح روابط زیر هستند:

$$\sigma_n = -c_1 \rho V_p \dot{U}_x \quad (1)$$

$$\tau = -c_2 \rho V_s \dot{U}_y \quad (2)$$

که در این روابط  $\rho$  چگالی جرمی مصالح در مرز مدل عددی و  $V_p$  و  $V_s$  به ترتیب سرعت امواج فشاری و برشی در مصالح خاکی-سنگی در محل مرزهای مدل عددی هستند. مطابق مراجع اجزای محدود [۲۰]، ضرایب  $c_1$  و  $c_2$  به طور معمول به ترتیب برابر  $1/0$  و  $0/25$  در نظر گرفته می‌شوند. برای مش‌بندی اجزای محدود مدل سد، مش‌بندی با تراکم خیلی زیاد به کار برده شده است. به ویژه در نقاط کلیدی و حساسی از مدل سد، شامل محل تاج، هسته و پی سد، تراکم مش‌بندی مقداری بیشتر لحاظ شده است. به طور

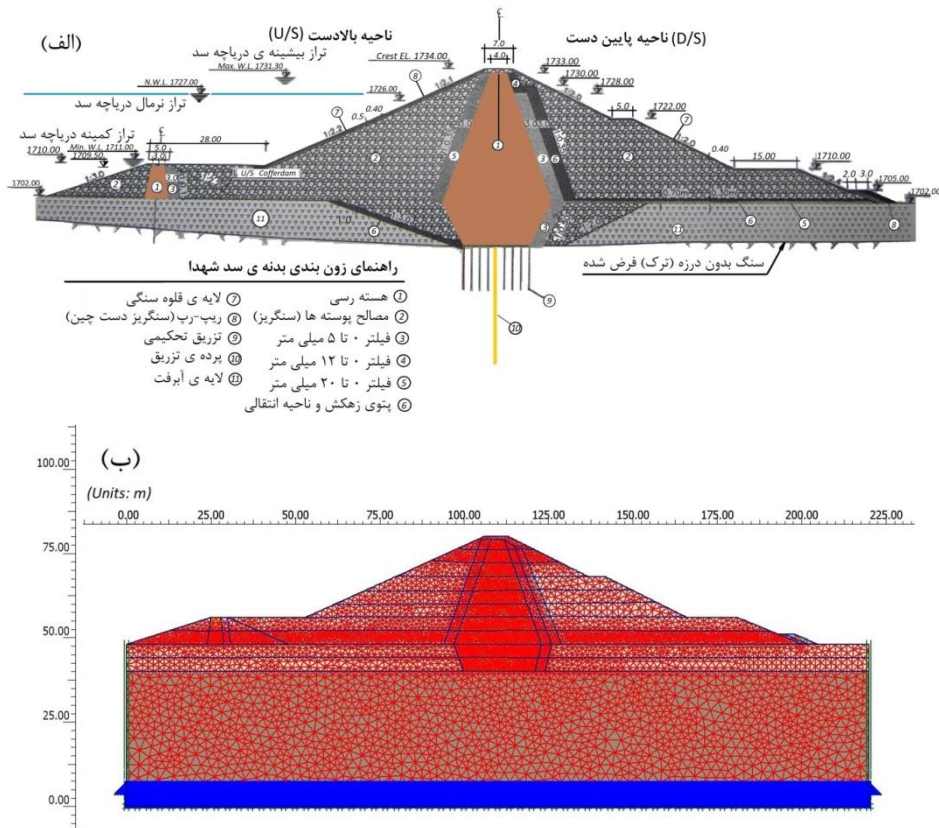
طول تاج ۱۲۷۷ متر و عرض تاج ۷ متر است. حداکثر ارتفاع آن از بستر پی سنگی، حدود ۴۵ متر است. همچنین ارتفاع-آزاد سد ۷ متر فرض شده است (آب نیرو [۲۱]).

### ۳- روش‌شناسی اجرای مطالعات عددی- پارامتری تحقیق

جهت مطالعه اثر جهت اولیه انتشار امواج لرزه‌ای در مدل‌های کرنش-مسطح و برای اجرای مدل‌سازی‌های اجزای محدود دو بعدی تحقیق حاضر، می‌توان از نرم‌افزار تجاری-تحقیقاتی PLAXIS 2D استفاده کرد [۲۰]. انتخاب مدل رفتاری مناسب برای شبیه‌سازی تنش-کرنش استاتیکی و دینامیکی مصالح بدنه و پی سد، از گام‌های اولیه بسیار مهم در اجرای فرآیند مدل‌سازی عددی است. توانایی مدل‌سازی سخت شونده‌گی و نرم شونده‌گی کرنشی مصالح بدنه سد که به غیر از هسته، عموماً از مصالح دانه‌ای و غیرچسبیده تشکیل شده‌اند، بایستی ویژگی اساسی مدل رفتاری انتخابی باشد. تفاوت بین سختی مصالح خاکی در حین بارگذاری، باربرداری و بارگذاری مجدد در چرخه‌های بارگذاری لرزه‌ای نیز اولویت مهم دیگری است، که باید در مدل‌سازی عددی مدنظر باشد. برای این منظور، در این تحقیق از مدل رفتاری خاک سخت شونده با کرنش کوچک یا HS-small استفاده شده است. در این مطالعه، مدل‌سازی عددی در چارچوب منطق کرنش-مسطح توسط روش اجزای محدود دو بعدی غیرخطی انجام شده است. شکل دره سد و نسبت هندسی طول دهانه‌ی دره به ارتفاع سد، به گونه‌ای است که می‌توان با تقریب نسبتاً مناسبی پاسخ‌های دو بعدی کرنش-مسطح سد شهدا را به حالت سه بعدی واقعی تعمیم داد.

در یک مدل‌سازی عددی اجزای محدود، انتگرال‌گیری زمانی برای حل معادله حرکت دینامیکی، می‌تواند به یکی از روش‌های صریح یا ضمنی<sup>۱</sup>، برای مثال توسط روش ضمنی نیومارک انجام شود. در این صورت نمونه‌های زمانی اعمال بارگذاری لرزه‌ای به هر گره از المان‌های مدل عددی، تابعی از وضعیت پایداری<sup>۲</sup> و همگرایی<sup>۳</sup> الگوریتم عددی انتخابی خواهد بود. که در نهایت پاسخ روش‌های صریح و ضمنی، در حوزه زمان به لحاظ ظاهری مشابه هم، ولی در حوزه فرکانس متفاوت خواهند بود. این مشکل عدم انطباق کامل فرکانسی پاسخ روش‌های تحلیل صریح و ضمنی، در مدل‌سازی‌های لرزه‌ای سه بعدی در چارچوب روش تفاضل محدود صریح نیز وجود دارد [۲۲].

- 1 Explicit or implicit methods
- 2 Stability
- 3 Convergence



شکل ۱. (الف) مدل واقعی مقطع-عرضی حداکثر سد شهیدا شامل نمایش زون های مختلف بدنه و پی [۲۱]. (ب) مدل اجزای محدود مش بندی بدنه و بستر سد توسط المان های مثلثی ۱۵ گره ای (مورد بارگذاری رو به بالا).

Fig. 1. (a) The real model of the maximum cross-section of Shohada dam, (b) 2D finite element model of the dam (Upward loading case).

در شکل ۱ حداکثر مقطع عرضی سد شهیدا (شکل ۱-الف) و مدل اجزای محدود دو بعدی نظیر آن (شکل ۱-ب)، نمایش داده شده است. ابعاد هندسی دقیق زون های مختلف سد، با کیفیت خوبی در این شکل، قابل مشاهده است.

### ۳-۲- صحت سنجی نتایج، برنامه ی نرم افزاری و روش تحقیق

برای صحت سنجی روش و برنامه نرم افزاری مورد استفاده در این مطالعه، از نتایج واقعی یک مدل آزمایشگاهی معتبر و جدید میز لرزان استفاده شده است. خوشبختانه بارگذاری لرزه ای مدل مرجع انتخابی از نوع بار قابل بازتولید (زمانی-فرکانسی) موج سینوسی با فرکانس غالب ۵ هرتز است، که به راحتی می توان به الگوی زمانی اصلی آن دست یافت. همچنین در مدل صحت سنجی مقاله مرجع، مشخصات سختی و مقاومتی مصالح بدنه سدهای مدل، دقیقاً مشابه مطالعه ی حاضر توسط پارامترهای مدل HS-small تعریف شده (جدول ۱) و حتی توسط نرم افزار PLAXIS 2D نیز

کلی، مدل عددی سد و بستر آن از تعداد ۱۲۹۴۵ مش مثلثی ۱۵ گره ای تشکیل شده است. این تعداد بسیار زیاد مش، باعث افزایش زمان محاسبات و اجرای تحلیل های عددی و نیز تضمین تقریبی کیفیت جواب های دینامیکی حاصله می شود. علاوه بر این، طبق روابط ارائه شده توسط کوهلیمیر و لیسمر<sup>۱</sup> (۱۹۷۳) [۲۳] برای عبور مناسب امواج لرزه ای با مولفه های فرکانسی مختلف از داخل مدل عددی اجزای محدود، بایستی حداکثر ابعاد اضلاع مش بندی ۱ کوچک تر از یک هشتم تا یک دهم طول موج لرزه ای ورودی  $\lambda$  باشند، در این شرایط، مطابق رابطه زیر می توان اطمینان حاصل کرد که تمامی فرکانس های اعمالی، امکان عبور از داخل مش بندی اجزای محدود را خواهند داشت:

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \sim \frac{\lambda}{8} \quad (3)$$

1 Kuhlemeyer and Lysmer

جدول ۱. مشخصات مصالح به کار رفته در تحلیل مدل‌های صحت‌سنجی مقاله مرجع جئونگ و همکاران (۲۰۲۰) [۲].

Table 1. Material properties used for analysis of the verification models of Jeong et al. (2020) [2].

خاک بدنه سدهای مدل	زون هسته در مدل SCZ	لایه GCL در مدل GCL	نماد پارامتر (یکا)	مدل‌های رفتاری و زون‌های مختلف سدهای مدل جهت صحت‌سنجی مطالعه حاضر
HS-small	HS-small	Mohr-Coulomb		مدل‌های رفتاری در بخش‌های مختلف سدها
۲۰/۰۴	۲۰/۸۶	۱۶/۰	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	چگالی غیراشباع خاک
۲۱/۳۴	۲۱/۲۴	۱۵۰۰۰	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) E (kN/m <sup>2</sup> )	چگالی اشباع و مدول ارتجاعی
۱۱۰۰۰	۱۱۰۰۰	۰/۳۵	$E_{50}$ (kN/m <sup>2</sup> ) $\nu$	سختی سکانت* و نسبت پواسون
۳۳۰۰۰	۳۳۰۰۰	۱۵	$E_{ur}$ (kN/m <sup>2</sup> ) c (kN/m <sup>2</sup> )	سختی باربرداری-بارگذاری مجدد* و چسبندگی
۰/۲	۰/۲	۲۸	$\nu_{ur}$ $\phi$ (°)	نسبت پواسون در باربرداری-بارگذاری مجدد و زاویه اصطکاک داخلی خاک
۴۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	-	$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	مدول برشی مرجع
۰/۲E-۳	۰/۲E-۳	-	$\gamma_{0.7}$	کرنش برشی آستانه‌ای که $G_s = 0.722G_0$
۶/۱	۳۸/۴	-	c' (kN/m <sup>2</sup> )	چسبندگی موثر
۳۵/۵	۳۳/۲	-	$\phi'$ (°)	زاویه اصطکاک داخلی موثر

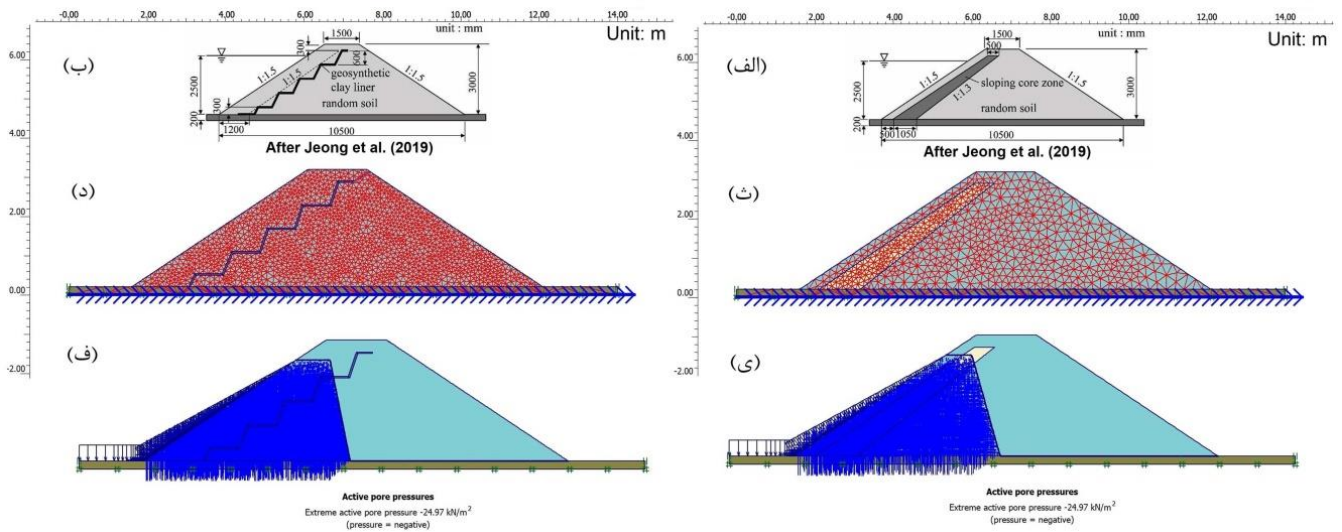
\* در آزمایش سه محوری زهکشی شده استاندارد به عنوان شیب نمودارها، خروجی نمودارهای تنش-کرنش هستند.

مرجع [۲] شامل دو مدل متفاوت SCZ و GCL را نشان می‌دهد. در این شکل، مش‌بندی‌های اجزای محدود و توزیع فشار آب حفره‌ای استاتیکی اولیه مدل‌ها هم ارائه شده است.

در شکل ۳ نمونه اطلاعات نموداری شتاب امواج سینوسی ورودی بازسازی شده در این مطالعه، که برای بارگذاری مدل‌های عددی صحت‌سنجی به کار رفته‌اند، ترسیم شده است. فرکانس غالب این بارگذاری‌ها ۵ هرتز و زمان کلی آن‌ها حدود ۱۲ ثانیه است.

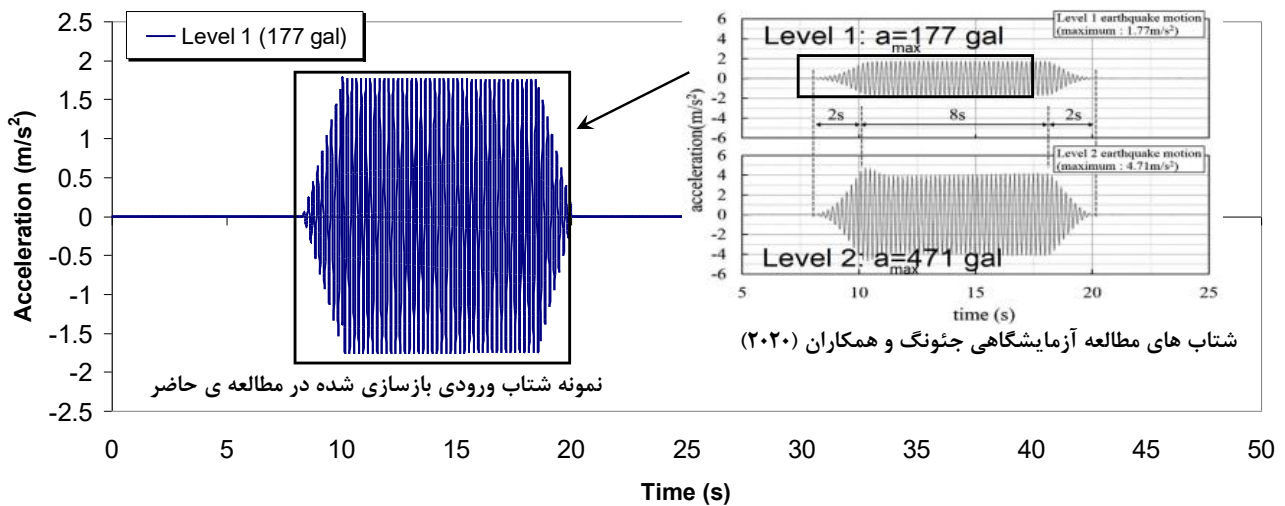
در شکل ۴ مقایسه نتایج جابه‌جایی‌های قائم (نشست) تاج سدها در مدل‌های دوگانه مجزای SCZ و GCL به ترتیب در level 1 و نیز level 2 شتاب بارگذاری میز ارزان، جهت تدقیق و واسنجی نتایج عددی حاصل از این مطالعه (در قسمت‌های بعدی مقاله) ترسیم شده است. آنچنان که در شکل ۴ مشخص است، توافق خوبی مابین نتایج عددی این مقاله و تجمیع نتایج میز لرزان-عددی مقاله مرجع انتخابی [۲] برقرار است.

مدل‌سازی شده است. برای این منظور، پاسخ‌های لرزه‌ای جابه‌جایی عمودی (نشست) حاصل از آزمایش‌های میز لرزان بزرگ-مقیاس برای دو نوع سد مدل GCL (یعنی سد خاکی با لاینر ژئوسنتتیکی رسی) و SCZ (یعنی سد خاکی با زون هسته‌ای شیب‌دار) به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. در واقع به صورت همزمان، نتایج آزمایش میز لرزان بزرگ-مقیاس مقاله مرجع با نتایج شبیه‌سازی‌های عددی مجدد این مقاله مقایسه شده است. در آزمایش‌های مرجع جئونگ و همکاران (۲۰۲۰) [۲] دو نوع موج سینوسی (با فرکانس غالب ۵ هرتز) در دو سطح ۱ (level 1) و ۲ (level 2) با مقادیر شتاب بیشینه به ترتیب معادل  $1/77 \text{ m/s}^2$  و  $4/71 \text{ m/s}^2$  به بستر مدل‌های میز لرزان اعمال شده است. همچنین جزئیات دقیق آزمایش‌های میز لرزان در مرجع [۲] آورده شده است. مطابق جدول ۱ پارامترهای خاک و زون هسته شیب‌دار توسط مدل HS-small و لایه‌ی GCL، توسط مدل مور-کولمب ایجاد شده است [۲]. شکل ۲ مدل‌های واقعی و نیز عددی ایجاد شده در این مطالعه، برای صحت‌سنجی نتایج میز لرزان مدل‌های فیزیکی مقاله



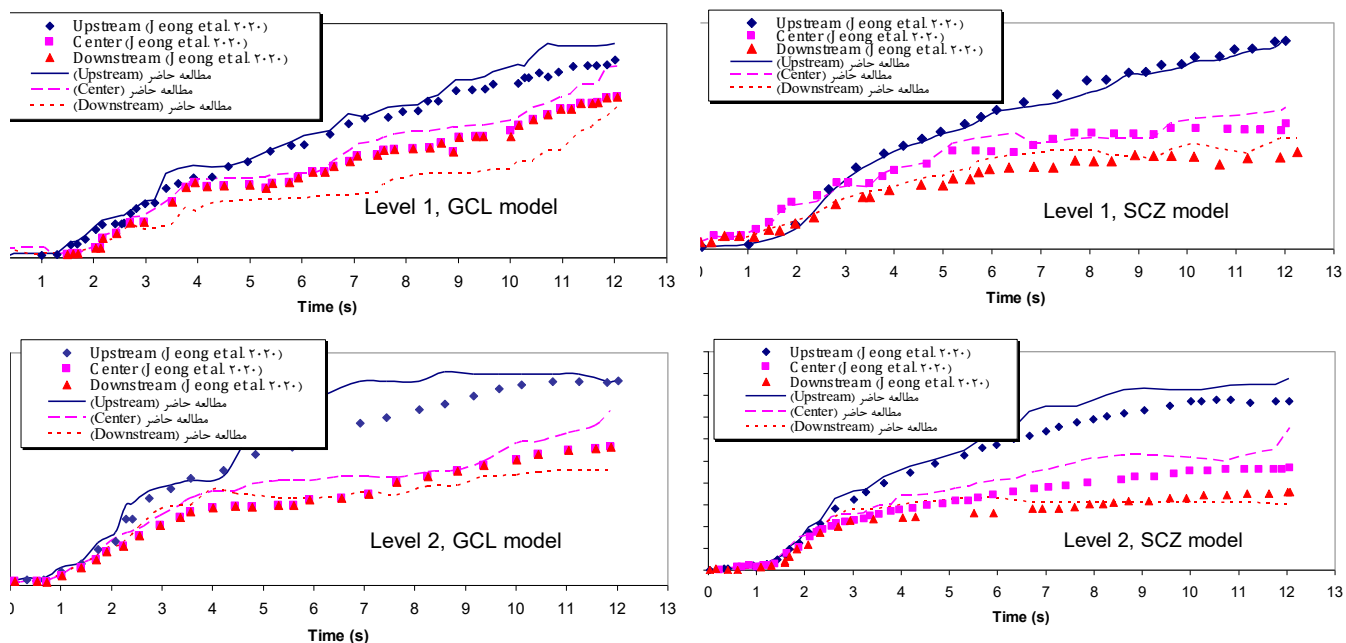
شکل ۲. مدل‌های عددی انتخاب شده برای صحت‌سنجی مطالعه‌ی حاضر: (الف و ب) مدل‌های SCZ و GCL [۲]، (ث و د) مدل‌های اجزای محدود شبیه‌سازی شده، (ای و اف) فشار آب حفره‌ای اولیه.

Fig. 2. Numerical models selected for verification of the present study: (a,b) SCZ and GCL models [2]; (c,d) the simulated FE models, (e,f) the initial pore water pressures.



شکل ۳. اطلاعات شتاب امواج سینوسی ورودی بازسازی شده برای بارگذاری مدل‌های صحت‌سنجی [۲].

Fig. 3. Reconstituted input sine waves acceleration data for verification model loading (Jeong et al. 2020 [2]).



شکل ۴. مقایسه نتایج جابه‌جایی‌های قائم (نشست) تاج سدها در: (الف) مدل SCZ و level 1، (ب) مدل GCL و level 1، (ث) مدل SCZ و level 2 و (د) مدل GCL و level 2

Fig. 4. Comparisons of vertical displacement results of dam's crest for: (a) level 1, SCZ model, (b) level 1, GCL model, (c) level 2, SCZ model, (d) level 2, GCL model.

رابطه تفاضلی زیر تعریف می‌شود:

$$f = \bar{f} - \gamma^p \quad (۴)$$

$$\bar{f} = \frac{2}{E_i} \frac{q}{1 - q/q_a} - \frac{2q}{E_{ur}} \quad (۵)$$

$$\gamma^p = -(2\varepsilon_1^p - \varepsilon_v^p) \approx -2\varepsilon_1^p \quad (۶)$$

$$\varepsilon_1^p \approx \frac{1}{2} \bar{f} = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - q/q_a} - \frac{q}{E_{ur}} \quad (۷)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (۸)$$

۳-۳- تعیین پارامترهای مدل خاک سخت شونده با کرنش کوچک HS-small

در این مطالعه برای مدل‌سازی رفتار لرزه‌ای مصالح مختلف بدنه‌ی سد خاکی، از مدل خاک سخت شونده با کرنش کوچک یا HS-small استفاده شده است. این مدل تعمیمی از مدل‌های ارتجاعی-خمیری کامل مور-کولمب و مدل خاک سخت شونده<sup>۱</sup> HSM است. در مقایسه با مدل استاندارد خاک سخت شونده، مدل خاک سخت شونده با سختی کرنشی کوچک، به دو پارامتر سختی اضافی به عنوان ورودی نیاز دارد، که عبارتند از  $G_0^{ref}$  و  $\gamma_{0.7}$ . پارامتر  $G_0^{ref}$  مدول برشی را در کرنش‌های بسیار کوچک  $\varepsilon > 10^{-4}$  به عنوان مثال در یک تنش مرجع اصلی کوچک‌تر تعریف می‌کند. برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص میرایی پسماند در مدل HS-small می‌توان به مرجع برینگرو و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۷) [۲۴] مراجعه کرد. رابطه هذلولوی بین تنش انحرافی-کرنش قائم مصالح مختلف خاکی، بنیان این مدل رفتاری را تشکیل می‌دهد. تابع تسلیم  $f$  سخت شونده‌ی برشی در این معیار، مطابق

- 1 Hardening soil model (HSM)
- 2 Brinkgreve, Kappert & Bonnier (2007)

۳-۳-۲- نمودارهای تعیین مدول برشی کرنش کوچک برای مصالح بدنه و پی سد

در شکل ۶ نمودارهای تغییرات مقادیر مدول برشی دینامیکی پیشینه‌ی  $G_0$  برحسب عمق  $Z$  برای هر یک از انواع مصالح بدنه‌ی سد، بر اساس روابط پیشنهادی مراجع معتبر [۲۶] ترسیم شده است. در هر نمودار، مقادیر میانگین برای انواع رس‌ها (شکل ۶-الف)، ماسه‌ها (شکل ۶-ب) و شن‌ها (شکل ۶-ج) رسم شده و یک تابع چند جمله‌ای درجه سوم با دقت خوبی بر آن‌ها برازش داده شده است (یعنی با ضریب تعیین  $R^2=1.0$ ). از این نمودار میانگین، که در هر شکل به رنگ قرمز است، برای تعیین مقادیر مورد نیاز  $G_0$  برای هر عمق و هر یک از مصالح بدنه سد استفاده شده است.

۳-۴- انتخاب میرایی تابع فرکانس رایلی برای مدل‌سازی عددی سد خاکی شهیدا

در این مطالعه، معادله حرکت دینامیکی که توسط برنامه عددی اجزای محدود به روش صریح یا ضمنی در دامنه زمان  $t$ ، حل می‌شود، به شکل رابطه‌ی (۹) است، که اگر طرفین رابطه بر ماتریس جرم  $[M]$  تقسیم شوند و رابطه در دامنه فرکانس-زمان بازنویسی شود، به صورت معادله‌ی (۱۱) در خواهد آمد. به طوری که در معادله‌ی (۱۱) هر دو مولفه زمانی و فرکانسی با هم دیده می‌شود [۲۸ و ۲۷]:

$$\ddot{U}(t)[M] + \dot{U}(t)[C] + U(t)[K] = -\ddot{u}_g(\text{time, direction})[M] \quad (9)$$

$$[C] = \frac{2\xi_i}{\omega} [K], (\omega^2 = \frac{k}{m}, \xi_i = \frac{c}{c_{crit}} \text{ and } : c_{crit} = 2k / \omega_n) \quad (10)$$

$$\ddot{U}(t) + 2\xi_i \omega \dot{U}(t) + \omega^2 U(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (11)$$

$$[C] = \alpha_R [M] + \beta_R [K] \quad (12)$$

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha_R}{\omega_i} + \beta_R \omega_i \right), \omega_i = 2\pi f_i = 2\pi / T_i \quad (13)$$

که در رابطه فوق  $\sigma_1$  تنش اصلی بزرگ‌تر،  $\sigma_3$  تنش اصلی کوچک‌تر،  $\varepsilon_p$  کرنش محوری خمیری،  $\varepsilon_p^p$  کرنش حجمی خمیری،  $q$  تنش برشی تفاضلی،  $E_{irr}$  مدول ارتجاعی باربرداری-بارگذاری مجدد و  $E_i$  مدول ارتجاعی بخش اولیه منحنی تنش-کرنش است. همچنین در این معیار، مدول‌های ارتجاعی اذئومتر، سکانت و باربرداری-بارگذاری مجدد، نیز تعریف می‌شوند. سانتوز و کوریا<sup>۱</sup> (۲۰۰۱) [۲۵] پیشنهاد کرده‌اند که از کرنش برشی  $\gamma = 0.7$  استفاده شود، که در آن مدول برشی سکانت  $G_s$  به حدود ۷۰٪ مقدار اولیه آن کاهش یافته است.

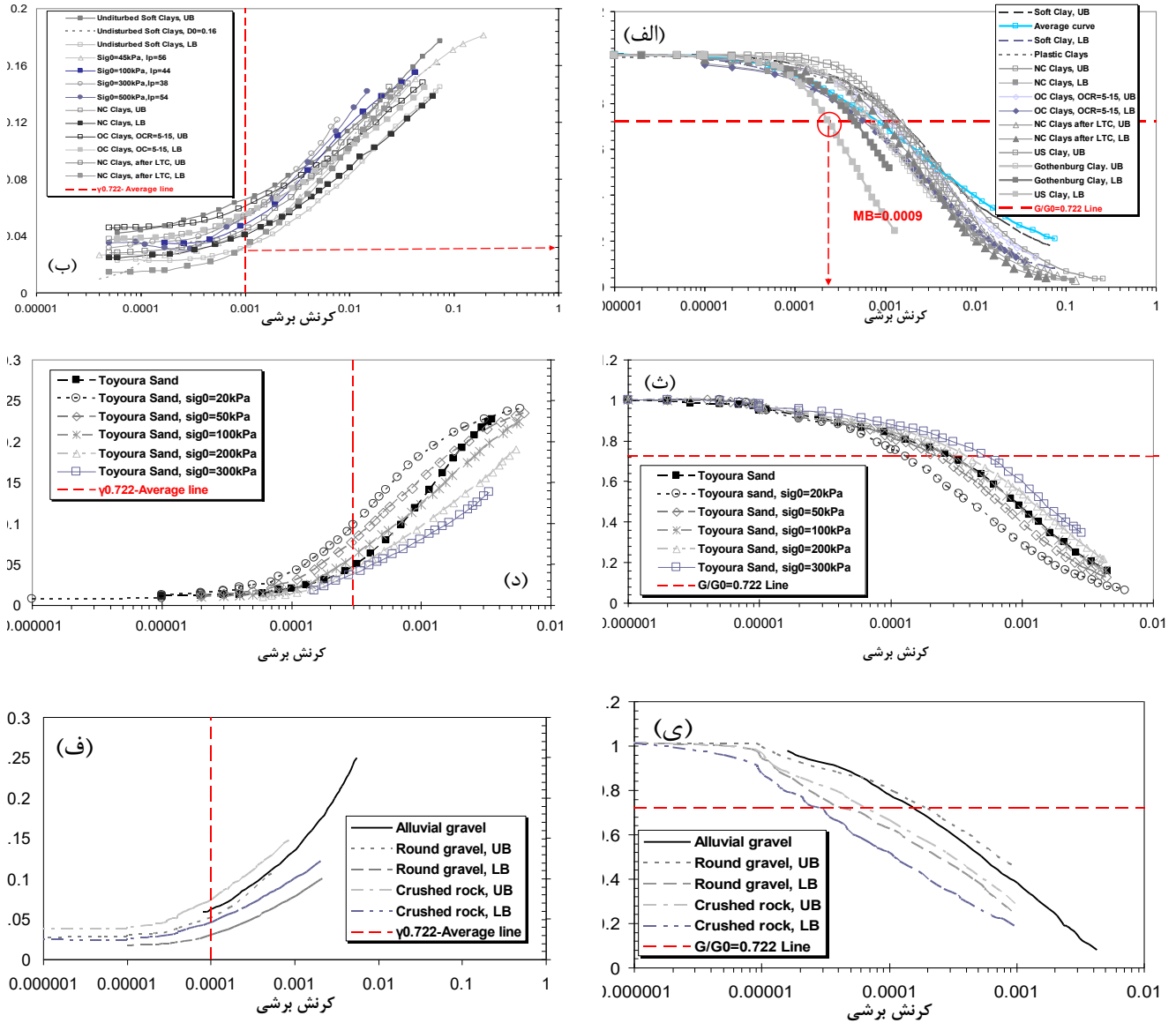
در این مطالعه، هر چند از المان کرنش-مسطح دو بعدی استفاده شده است، ولی با توجه به اعمال جهات نامنظم بارگذاری لرزه‌ای، نوع تنش در این المان دیگر دو بعدی نبوده بلکه سه بعدی می‌باشد.

۳-۳-۱- تعیین منحنی‌های کاهش مدول برشی و میرایی مصالح مختلف سد

در این مطالعه برای تعیین مقادیر دو پارامتر مدل رفتاری HS-small یعنی کرنش برشی آستانه‌ای  $\gamma_{0.7}$  و مدول برشی مرجع در کرنش‌های خیلی کوچک  $G_0$  نیاز به استفاده از مقادیر واقعی است. این مقادیر، برای کرنش  $\gamma_{0.7}$  با توجه به نسبت آستانه‌ای  $0.7/22$  برای  $G/G_0$  می‌تواند به طور دقیقی از منحنی‌های آزمایشگاهی موجود در شکل ۵ به دست آید [۲۶]. در شکل ۵-الف و ب منحنی‌های کاهش مدول برشی و نسبت میرایی برای مصالح هسته رسی، در شکل ۵-ج و د برای مصالح دانه‌ای ریزدانه فیلترهای سد و در شکل ۵-ی و ف برای مصالح درشت‌دانه زهکش‌ها و پوسته‌های سنگریز سد، آورده شده است. از این منحنی‌ها، سه مقدار کران‌های بالا  $UB$ ، میانگین  $MB$  و پایین  $LB$  برای هر کدام از انواع مصالح قابل تعیین است، که برای هر مصالح مقدار کران میانگین، در مدل‌سازی‌های عددی، منظور شده است. علاوه بر مقدار کرنش  $\gamma_{0.7}$  سه مقدار کرانی مشابه برای نسبت میرایی هر نوع مصالح، بر اساس مقدار کرنش آستانه‌ای قابل تعریف است، که تقریباً میانگین همه آن‌ها ( $MB$ ) برابر نسبت میرایی ۵٪ حاصل شده، که برای تعریف میرایی رایلی از این نسبت میرایی استفاده شده است.

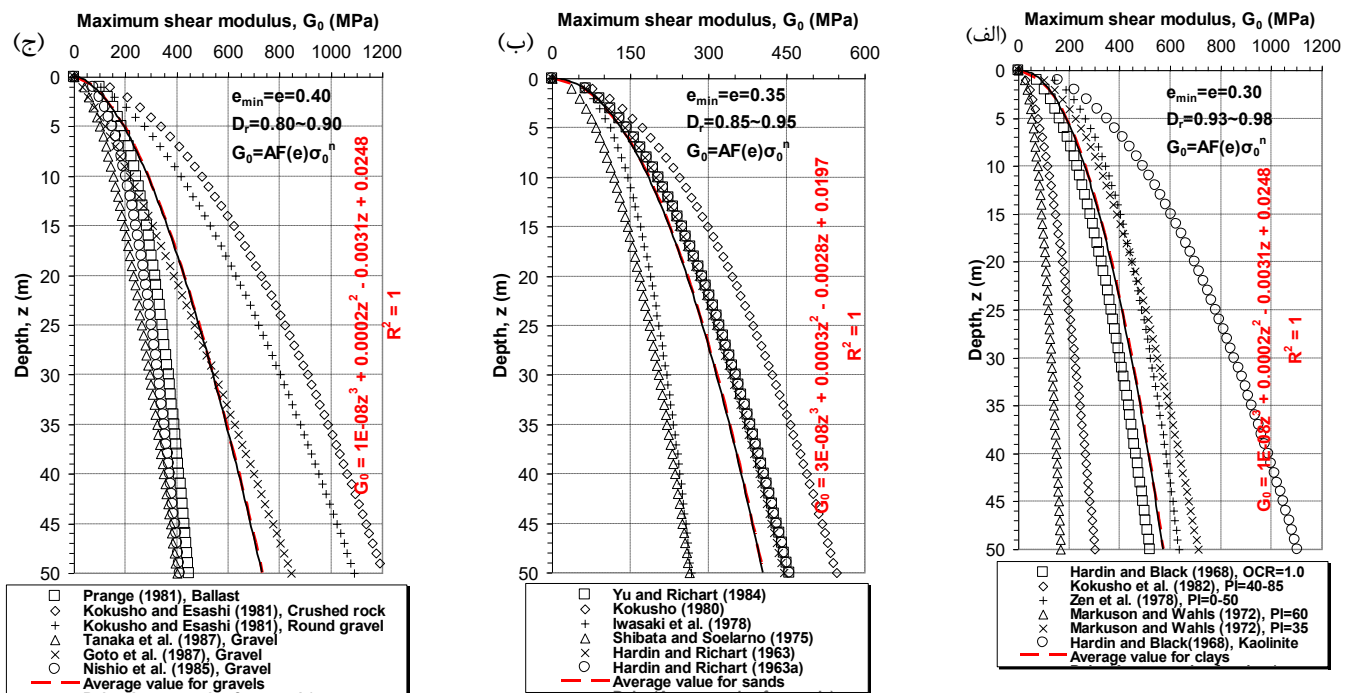
1 Santos and Correia (2001)





شکل ۵. تعریف کرنش آستانه‌ای  $\gamma_{0.7}$  و نسبت میرایی از منحنی‌های کاهش مدول برشی  $G/G_0$  و میرایی تابع کرنش برای مصالح: (الف) و (ب) هسته رسی، (ج و د) فیلترهای ماسه‌ای و (ی و ف) زهکش‌های شنی و پوسته‌ها.

Fig. 5. Defining of the  $0.7 \gamma$  and damping ratio from  $G/G_0$  and shear strain-dependent damping curves for: (a,b) clay core, (c,d) sandy filters, (e,f) gravelly drain and shell materials.



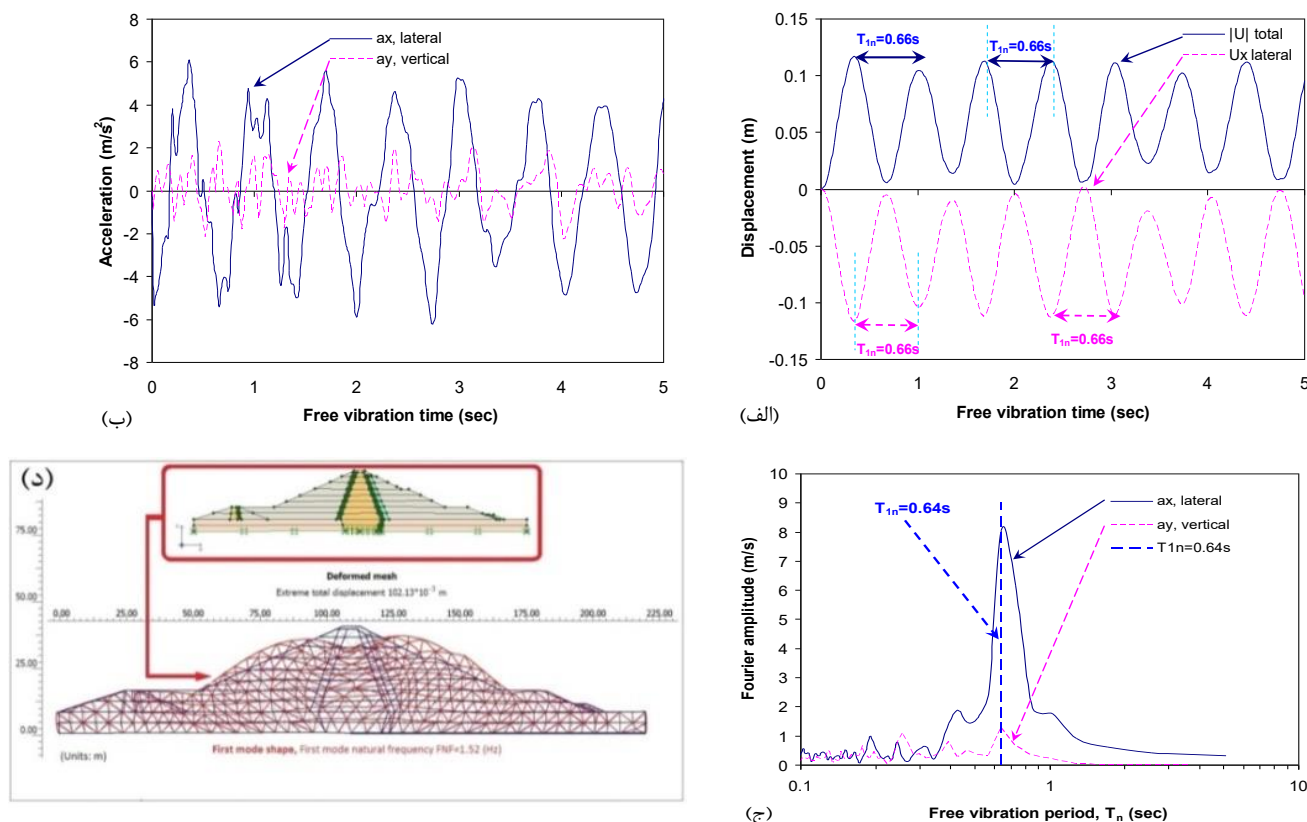
شکل ۶. تغییرات مدول برشی بیشینه  $G_0$  در مقابل عمق برای مصالح بدنه سد شهدا شامل: (الف) هسته رسی، (ب) فیلترها، (ج) زهکش‌ها و پوسته‌ها.

Fig. 6. Variation of maximum shear modulus,  $G_0$ , versus depth for Shohada earthdam's body materials including: (a) clayey core, (b) filters, (c) drains and shells.

و شتاب یک نقطه مشخص در پوسته که بخش اعظم بدنه سد را نیز تشکیل می‌دهد، برای ۵ ثانیه ارتعاش آزاد ثبت شده است. از تحلیل نتایج، مطابق شکل ۷-الف فرکانس طبیعی مود اول ارتعاش سد برحسب پاسخ جابه‌جایی افقی  $U_x$  و کل  $IUI$  برابر  $0.66 \text{ Hz}$  و برحسب پاسخ شتاب در هر دو جهت افقی  $ax$  و قائم  $ay$  برابر  $0.64 \text{ Hz}$  به دست آمده است، که حدود  $0.02$  هرگز اختلاف دارند، که مقداری ناچیز است. تغییر شکل مودال سد برای انتهای ارتعاش - آزاد در مود اول نوسان، در شکل ۷-د ترسیم شده است.

در جدول ۲ مشخصات مصالح قسمت‌های مختلف بدنه سد شهدا و لایه‌های بستر سنگی آن ارائه شده است. مطابق این جدول، برای مصالح بدنه‌ی سد از مدل خاک سخت شونده با کرنش کوچک HS-small و برای لایه‌های دوگانه سنگ بستر، از مدل ارتجاعی-خمیری کامل مور-کولمب (MC) با قانون جریان خمیری ناهمراه استفاده شده است [۲۱].

در روابط فوق  $k$  سختی،  $m$  جرم،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $c_{crit}$  میرایی بحرانی،  $U$  جابه‌جایی،  $\omega_n$  فرکانس زاویه‌ای طبیعی،  $f_i$  فرکانس دایره‌ای  $i$  ام،  $T_i$  پرپود نام،  $\xi_i$  نسبت میرایی و  $u_p$  جابه‌جایی زمین است. مطابق روابط فوق، از ماتریس میرایی تابع فرکانس رایلی [C] در این تحقیق استفاده شده است. برای تعریف میرایی رایلی، نیاز به تعریف دو پارامتر  $\alpha_R$  و  $\beta_R$  است. برای این منظور، قبل از هر کاری باید حداقل مقدار فرکانس طبیعی بدنه سد (فرکانس طبیعی اول) مشخص باشد. بنابراین، یک تحلیل اجزای محدود دینامیکی مودال (ارتعاش - آزاد) تحت نیروی وزن خود سد و بدون اعمال ارتعاش خارجی انجام شده است. در این تحلیل، رفتار مصالح بدنه سد ارتجاعی خطی فرض شده است. میرایی و نیز نسبت میرایی در این حالت برای تمامی مصالح سد معادل صفر است. لایه سنگ بستر ضخیم، در این تحلیل منظور نشده چرا که هدف صرفاً تعیین دقیق فرکانس طبیعی مود اول ارتعاش آزاد بدنه سد بوده است. مطابق شکل ۷ پاسخ‌های تغییر مکان



شکل ۷. تحلیل ارتعاش-آزاد برای تعیین فرکانس طبیعی اول سد شهیدا: (الف) پاسخ‌های جابه‌جایی، (ب) پاسخ‌های شتاب، (ج) طیف‌های پاسخ فوریه، (د) تغییر شکل مودی.

Fig.7. Free-vibration analysis to find the first natural frequency of Shohada dam: (a) displacement responses, (b) acceleration responses, (c) Fourier response spectra, (d) modal deformation.

۳-۵- معرفی مدل‌های بارگذاری لرزه‌ای سد شهیدا با جهات اولیه نامنظم در این مطالعه برای به حساب آوردن اثر تغییر راستای اولیه خروج امواج لرزه‌ای و حرکات ناشی از آن‌ها، در بستر سد خاکی، سه دسته مختلف بارگذاری لرزه‌ای با جهات نامنظم، در نظر گرفته شده است که عبارتند از گروه‌های بارگذاری در راستای (۱) افقی، (۲) قائم و (۳) مایل. همچنین در هر گروه نیز ۲ حالت محتمل بارگذاری جهتی مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو، در این تحقیق فقط حالات بارگذاری نامنظم اصلی که ممکن است در واقعیت رخ دهند، بررسی شده‌اند. در جدول ۳ حالات بارگذاری‌های نامنظم ۶ گانه به کار رفته در مطالعات عددی پارامتری این مطالعه، معرفی شده است. مطابق آن، مورد بارگذاری اول، یعنی H1 همان بارگذاری متداول (مرجع) در راستای نرمال<sup>۱</sup> ND است، که در جهت افقی از بالا دست به سمت پایین دست سد و مخزن آن، در حال حاضر به صورت مرسوم در مدل‌سازی‌های لرزه‌ای کاربرد دارد.

۳-۵- قانون اسنل و شرایط عبور موج از لایه‌های مختلف خاک و سنگ طبق اصل حداقل زمان فرمات<sup>۲</sup> در یک قانون به شرح زیر، اسنل<sup>۳</sup> نشان داد که نسبت بین سینوس زاویه انتشار پرتوها (امواج) در مرز بین دو لایه، به سرعت موج، همواره یک نسبت ثابت است [۲۸]:

$$\frac{\sin i}{v} = \text{Const.} \quad (14)$$

$$\frac{\sin i_2}{\sin i_1} = \frac{v_{s2}}{v_{s1}} = \frac{v_{p2}}{v_{p1}} = \frac{n_1}{n_2} \quad (15)$$

2 Fermat  
3 Snell

1 Normal direction or (ND) seismic loading case

جدول ۲. پارامترهای مدل خاک سخت شونده با کرنش کوچک HS-small برای بدنه سد و مشخصات بستر سنگی.

Table 2. Adapted small-strain hardening soil (HSS) constitutive model parameters.

هسته رسی	فیلترها	زهکش‌ها	پوسته‌ها	سنگ		زون‌های مختلف سد	
				بستر I	بستر II	پارامترهای مدل رفتاری	
۵۴۰	۳۸۰	۶۸۸	۷۰۰	۷۰۰	۱۱۰۰	$G_0^{ref}$ (MPa)	بیشینه مدول برشی
۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	-	-	$\gamma_{0.722}$ (N.D. <sup>*</sup> )	کرنش برشی در آستانه نسبت ( $G_s/G_0=0.722$ )
۳۰	۵/۰	۳/۰	۰/۰	۱/۰	۱/۰	C (kPa)	چسبندگی
۲۲	۳۲	۳۷	۳۸	۳۲	۳۸	$\phi$ (deg)	زاویه اصطکاک داخلی
۶	۷	۵	۰	۰	۰	$\psi$ (deg)	زاویه انبساط ( $\phi_p-\phi_{ev}$ )
۱۵	۳۵	۴۰	۱۲۰	۷۵	۲۰۰۰	E (MPa)	مدول ارتجاعی خطی
۷۱/۰۶	۸۱/۸۱	۸۰/۰۰	۲۰۲/۵۰	-	-	$E_{50}^{ref}$ (MPa)	مدول ارتجاعی سکانت
۵۶/۸۵	۶۵/۴۵	۶۴/۰۰	۱۶۲/۰۰	-	-	$E_{oed}^{ref}$ (MPa)	مدول ارتجاعی تانژانت
۱۷۰/۵۵	۱۹۶/۳۵	۱۹۲/۰۰	۴۸۶/۰۰	-	-	$E_{ur}^{ref}$ (MPa)	مدول ارتجاعی باربرداری-بارگذاری مجدد
0.2	0.2	0.2	0.2	-	-	$v_{ur}$ (N.D.)	نسبت پواسون در باربرداری-بارگذاری مجدد (بی بعد)
۰/۴۵	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۲۶	$v$ (N.D.)	نسبت پواسون (بی بعد)
۲۰/۰	۲۲/۵	۲۲/۵	۲۱/۰	۱۹/۰	۲۱/۰	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	چگالی اشباع
۱۹/۰	۱۹/۵	۲۱/۰	۲۰/۰	۲۰/۰	۱۹/۵	$\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	چگالی غیراشباع
۰/۹۰	۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۵۰	-	-	m (N.D.)	توان وابستگی سختی به تنش
۰/۶۱	۰/۴۷	۰/۴۰	۰/۳۸	-	-	$K_0^{NC}$ (N.D.)	ضریب حالت-سکون
۲/۳e-۱۳	۱/۰e-۹	۲/۳۱e-۷	۱/۱e-۸	۱/۱۵e-۱۱	۱/۱۵e-۱۱	$K_x$ (m/day)	نفوذپذیری افقی
۰/۱	۱/۰	۱/۰	۱/۰	-	-	r (N.D.)	نسبت نفوذپذیری $r=K_y/K_x$
۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹	-	-	$R_f$ (N.D.)	نسبت تنش برشی گسیختگی

جدول ۳. جزئیات نامنظمی جهت اولیه‌ی بارگذاری لرزه‌ای به کار برده شده در مطالعه‌ی حاضر.

Table 3. Seismic loading initial direction irregularity details used in the present study.

ردیف	نماد خلاصه نوع بارگذاری	توصیف بارگذاری جهتی	توضیحات موردی در خصوص جهات اولیه بارگذاری لرزه‌ای
<b>(۱) معرفی موارد بارگذاری‌های لرزه‌ای نامنظم با انتشار اولیه در راستای افقی</b>			
۱	ND=H1	در جهت نرمال و معمول (صفر درجه)	بارگذاری در جهت نرمال افقی از بالا دست به پایین دست
۲	H2	در خلاف جهت نرمال (۱۸۰ درجه)	بارگذاری در خلاف جهت نرمال افقی از پایین دست به بالا دست
<b>(۲) معرفی موارد بارگذاری‌های لرزه‌ای نامنظم با انتشار اولیه در راستای قائم</b>			
۳	V1	در جهت قائم رو به بالا (۹۰ درجه)	بارگذاری در جهت قائم و در ارتفاع سد رو به بالا از کف سنگ بستر
۴	V2	در جهت قائم رو به پایین (۹۰- درجه)	بارگذاری در جهت قائم رو به پایین از محل کف سنگ بستر
<b>(۳) معرفی موارد بارگذاری‌های لرزه‌ای نامنظم با انتشار اولیه در راستای مایل</b>			
۵	I1	در جهت مایل (۴۵ درجه)	بارگذاری در جهت مایل با زاویه ۴۵ درجه رو به پایین دست
۶	I2	در جهت مایل مخالف (۱۳۵ درجه)	بارگذاری در جهت مایل با زاویه ۱۳۵ درجه رو به بالا دست

تصویری فرضیات مدل‌های دو بعدی کرنش-مسطح (۶ مدل) شرح داده شده در جدول (۳) در قبل، برای بررسی اثرات نامنظمی در جهات اولیه انتشار حرکات لرزه‌ای، نمایش داده شده است.

در شکل ۹ ترسیم روندنا برای توصیف کلی مراحل مختلف مدل‌سازی‌های عددی مطالعه حاضر ارائه شده است. مطابق این شکل، جهات اولیه اعمال بارگذاری‌های لرزه‌ای با تنظیم بردارهای بیکه تعریف راستای حرکات لرزه‌ای، در جهت مثبت زوایای مثلثاتی، از صفر تا ۳۶۰ درجه به طور کامل لحاظ شده است.

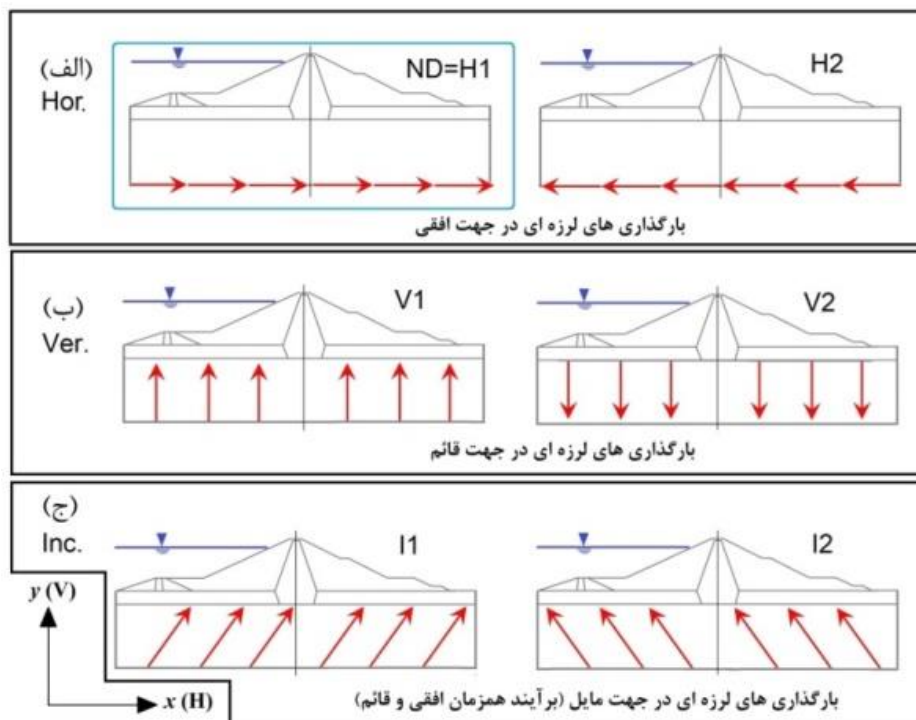
۳-۵-۲- حرکت لرزه‌ای ورودی انتخاب شده برای بارگذاری لرزه‌ای سد شهدا

در این تحقیق برای بارگذاری مدل‌های اجزای محدود دو بعدی کرنش-مسطح از رکورد نزدیک-گسل زلزله طبس (۱۹۷۸) با بزرگای گشتاوری  $M_w = 7.35$  استفاده شده است (پی یر<sup>۳</sup> (۲۰۲۱) [۲۹]). اثرات پالس نزدیک-گسل و جهت‌پذیری به خوبی در رکورد سرعت این زلزله مشهود است [۲۰]، چرا که به طور تصادفی فاصله ایستگاه ثبت آن تا کانون زلزله  $R_{jb} = 1.79$  km بوده است و به خوبی اثرات واقعی نزدیک-گسل را آشکار می‌سازد

که در رابطه فوق  $i$  زاویه‌ی انتشار موج (پرتو) نسبت به عمود بر فصل مشترک دو لایه ۱ و ۲ و  $v$  می‌تواند سرعت موج منتشره برشی ( $v_p$ ) یا فشاری ( $v_p$ ) در دو لایه باشد. همچنین  $n$  برابر اندیس انعکاسی<sup>۱</sup> محیط خاک است، که یک پارامتر بدون بعد است. کاربرد این قانون در لایه‌های خاک بدان مفهوم است، که اگر یک موج با راستای افقی خارج از-صفحه<sup>۲</sup> مدل (موج برشی افقی SH) در پایین یک لایه منتشر شود، با انتشار رو به بالا در آن، جهت انتشار آن به تدریج از افقی به قائم تغییر می‌کند، که در اثر تغییر مقدار سرعت امواج (برشی یا فشاری) در حین طی لایه‌ها به سمت بالا است [۲۸].

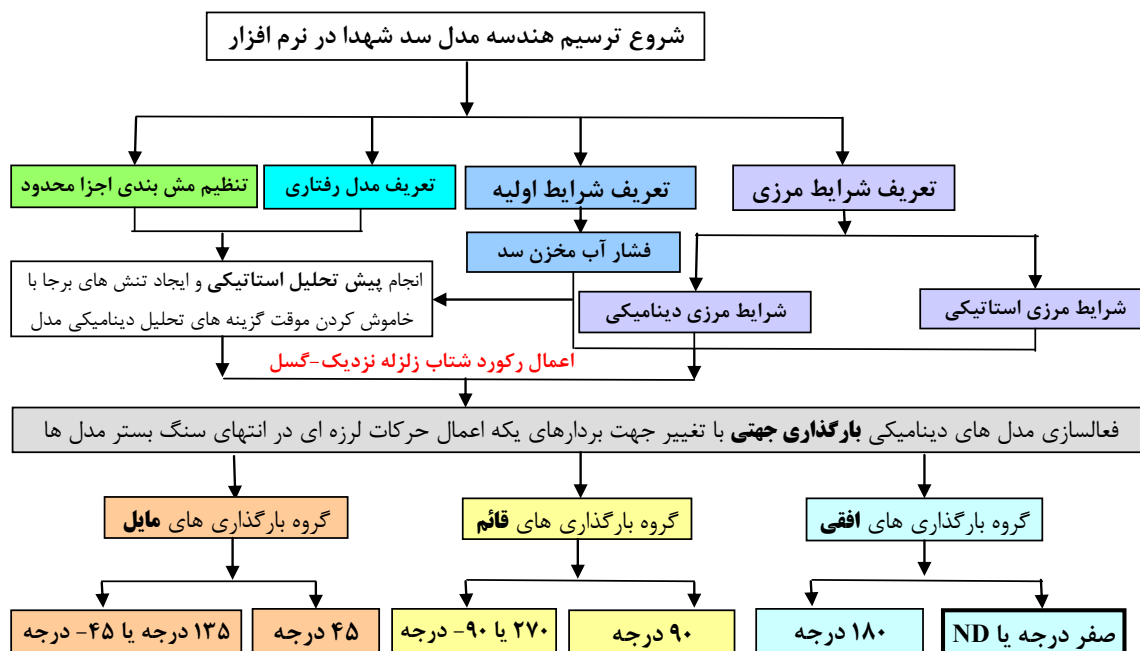
چرا که در محیط‌های خاکی و سنگی، به طور معمول سرعت امواج وابسته به مشخصه‌های چگالی و سختی لایه‌ها است و یک لایه هر چه به سطح زمین نزدیک‌تر باشد، به علت شرایط تراکمی ضعیف‌تر و تنش‌های سربار کمتر، سرعت انتشار امواج در آن کمتر است. تفسیر بارگذاری‌های لرزه‌ای نامنظم در این مطالعه، نیز بدین صورت است که جنس و ضخامت لایه‌های بستر سد می‌تواند جهت انتشار اولیه امواج را به صورت تدریجی یا ناگهانی تغییر دهد و این تغییر جهت به شرایط هندسی پیچیده لایه‌بندی و ناهمسانگردی سختی خاک و سنگ وابسته است. در شکل ۸ نمایش

1 Refractive index  
2 Out-of-plane



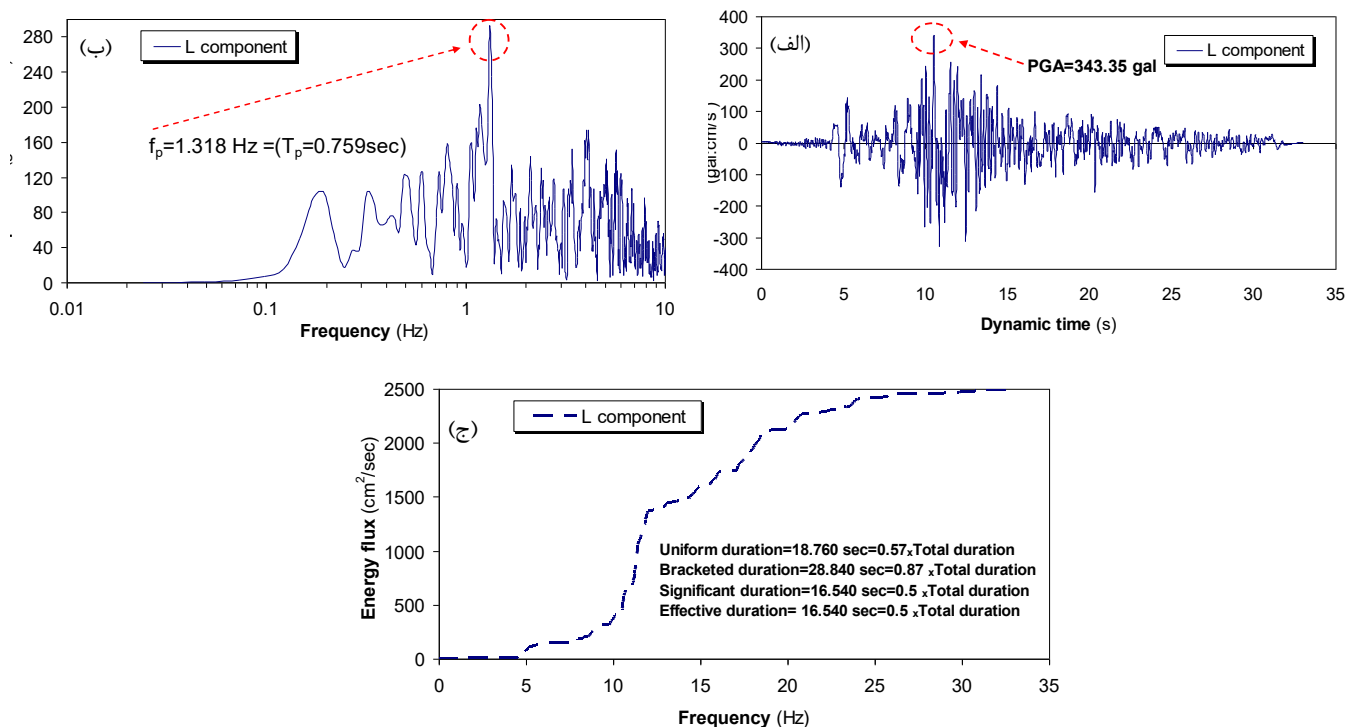
شکل ۸. مدل‌های دو بعدی کرنش-مسطح فرض شده (۶ مدل) برای بررسی اثرات نامنظمی در جهت انتشار حرکات لرزه‌ای: (الف) افقی، (ب) قائم و (ج) مایل.

Fig. 8. Assumed 2D plane-strain models (6 models) to investigate the irregularity effects in the direction of seismic motions propagation: (a) horizontal, (b) vertical, (c) oblique.



شکل ۹. ترسیم روند نما برای توصیف کامل مراحل مختلف مدل سازی های عددی مطالعه حاضر.

Fig.9. Drawing a flowchart to fully describe the various stages of numerical modeling in the present study.



شکل ۱۰. رکورد زلزله‌ی طبرس مقیاس شده به عنوان بارگذاری ورودی مدل‌های عددی: (الف) توزیع زمانی شتاب، (ب) طیف فوریه و توزیع فرکانسی، (ج) شار انرژی رکورد در طول زمان.

Fig. 10. Scaled Tabas earthquake record as input motion of the numerical models: (a) acceleration time- distribution, (b) Fourier spectrum and frequency distribution, (c) record energy flux over time.

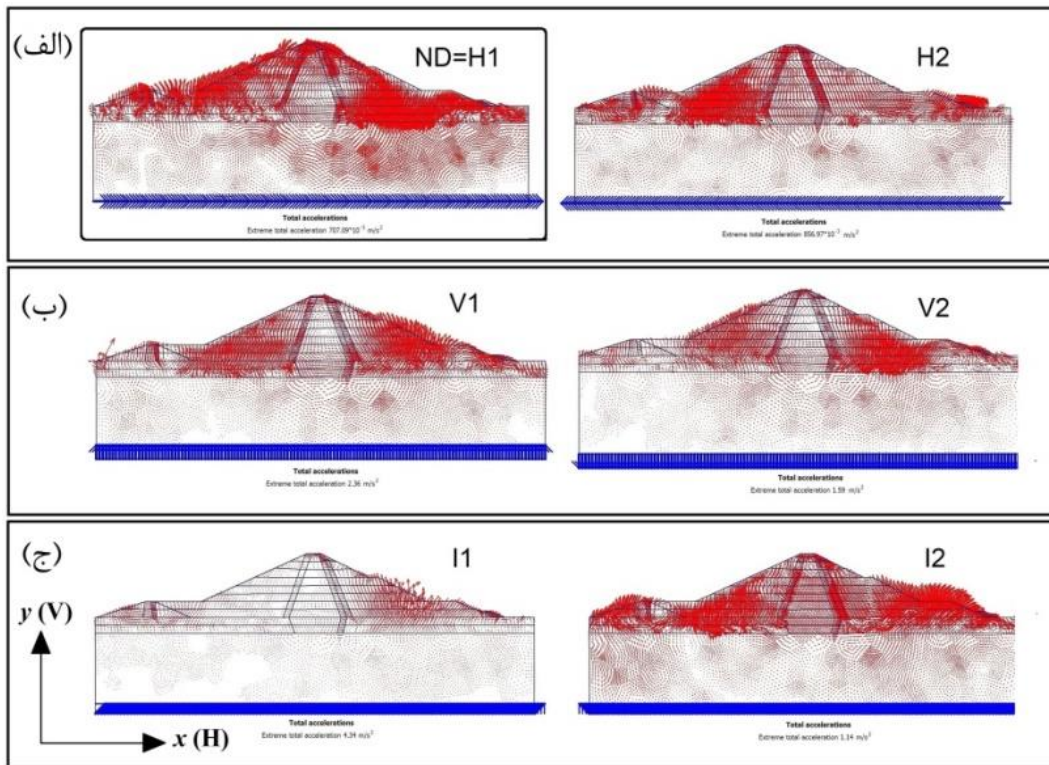
ارائه می‌شود. در هر یک از گروه‌های سه گانه، ابتدا وضعیت نتایج کانتوری و سپس پاسخ‌های نموداری تاریخچه- زمانی با هم مقایسه شده است.

۴-۱- مرور دستاوردهای گرافیکی حاصل از بارگذاری‌های لرزه‌ای نامنظم در این قسمت نتایج شبیه‌سازی‌های عددی مطالعه حاضر، که به صورت گرافیکی و توزیع کانتوری ارائه شده‌اند، مورد بحث قرار می‌گیرد. در شکل ۱۱ نمونه‌ی الگوهای بردار شتاب برآیند در بستر و بدنه سد در تحریکات نامنظم لرزه‌ای مختلف ارائه شده است. اندرکنش لرزه‌ای اینرسی<sup>۲</sup> ناشی از برآیند شتاب در بخش‌های بالا دست و پایین دست بدنه سد و نیز در لایه‌های سنگ بستر قابل مشاهده است. در ۲ شکل بالایی در بخش (الف)، در بارگذاری جهت معکوس H2 تمرکز بردارهای شتاب برآیند، بیشتر در پوسته بالا دست و در پشت هسته بوده، که این نکته بارز در حین زلزله است. برخلاف این، در مدل معیار (ND=H1) بردارهای شتاب در پوسته های بالا دست و پایین دست و هم در لایه‌های بستر توزیع شده‌اند. وجود هرگونه تمرکز بردارهای شتاب در پوسته بالا دست (نزدیک مخزن)، شرایط

[۲۹]. مولفه طولی مقیاس شده شتاب این زلزله (شکل ۱۰-الف)، به کار برده شده است. همچنین، طیف فوریه (در شکل ۱۰-ب) و توزیع فرکانسی آن و فلاکس انرژی این رکورد در طول زمان تداوم آن (در شکل ۱۰-ج) ارائه شده است. به علت شدت و بزرگای بالای این زلزله و فاصله‌ی بسیار کم ایستگاه ثبت آن تا محل کانون زلزله ( $R_{jb}$  خیلی کوچک)، این رکورد ویژگی‌های بسیار منحصر به فردی پیدا کرده است. از جمله شار انرژی بسیار بالای آن، تداوم‌های یکنواخت، براکت، مهم و موثر نزدیک به تداوم زمانی کلی رکورد، شدت‌های آریاس، هازنر و مشخصه بالا، همگی آن‌ها این رکورد را به یک رکورد منحصر به فرد مبدل ساخته است [۲۲ و ۷].

#### ۴- یافته‌های مدل‌سازی‌های کرنش- مسطح تحت اثر بارگذاری‌های لرزه‌ای نامنظم

در این بخش یافته‌های حاصل از مدل‌سازی‌های اجزای محدود دو بعدی ارائه می‌شود. نتایج سه گروه مختلف بارگذاری لرزه‌ای، شامل گروه‌های بارگذاری لرزه‌ای در جهت (۱) افقی، (۲) قائم و (۳) مایل، در این قسمت



شکل ۱۱. نمونه‌ی الگوهای بردارهای شتاب برآیند در بستر و بدنه سد شهیدا در تحریکات نامنظم لرزه‌ای با جهات مختلف: (الف) افقی، (ب) قائم و (ج) مایل.

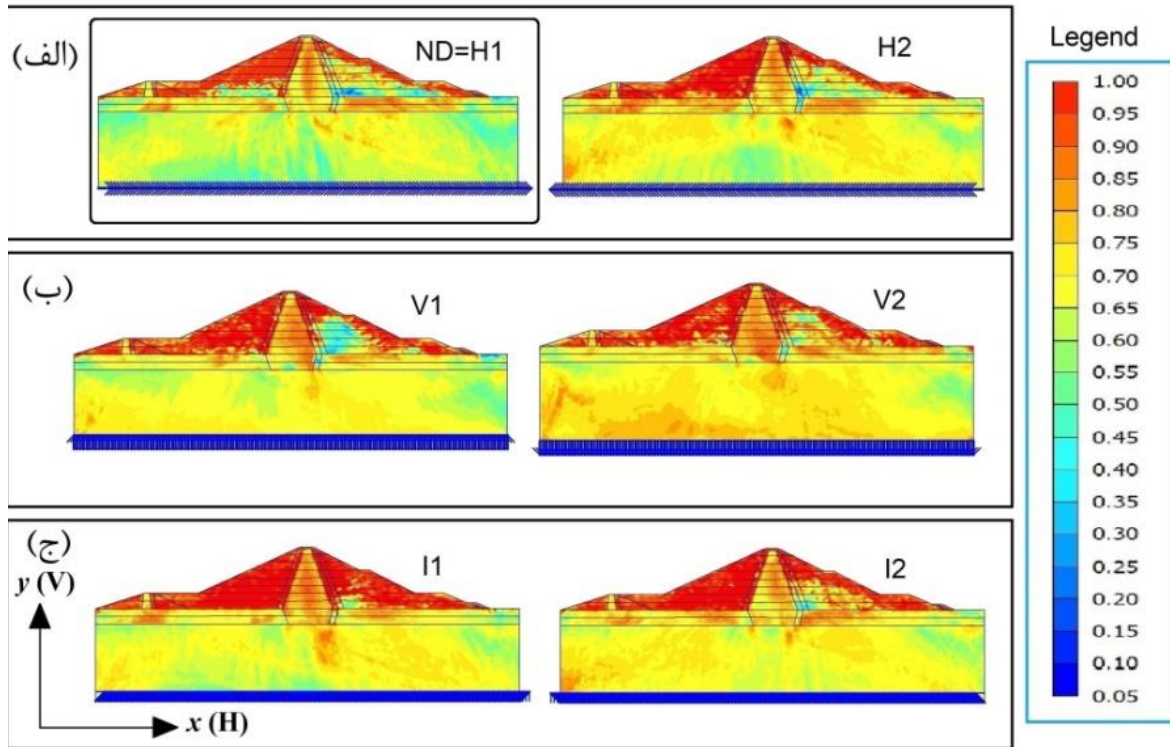
Fig. 11. Example of patterns of resultant acceleration vectors in the bed and body of the dam in different seismic excitations: (a) horizontal, (b) vertical, (c) oblique.

H2 بیشترین تمرکز تنش‌های برشی نسبی در پوسته بالا دست را ایجاد کرده است. علت این موضوع نیز به دلیل جهت حرکات لرزه‌ای اولیه است، که رو به سوی مخزن است. همچنین در گروه بارگذاری‌های قائم، بارگذاری V1 (شرایط ایمن‌تری برای تنش‌های برشی در پوسته پایین دست ایجاد کرده است. علت این موضوع تغییر غیرمعمول راستای بارگذاری لرزه‌ای قائم نهایی در محل زیر هسته و در طول لایه‌های سنگ بستر است. در گروه بارگذاری‌های مایل نیز بارگذاری II، بیشترین توزیع تنش‌های برشی را در هر دو پوسته ایجاد کرده است. از سوی دیگر در این مورد بارگذاری، کمترین تمرکز تنش برشی در لایه بستر سد تولید شده است. در این گروه نیز تغییر جهت انتشار اولیه حرکات لرزه‌ای مایل، موجب ایجاد تمرکز تنش برشی در لایه سنگ بستر تحتانی شده است. البته تمرکز تنش‌های برشی در بخش بالا دست سنگ بستر تحتانی، در بارگذاری مایل ۴۵ درجه بیشتر و علت اصلی آن تداخل اثر اغتشاشی جهت بارگذاری لرزه‌ای و فشار هیدرودینامیکی مخزن است.

زهکشی اضافه فشارهای آب حفره‌ای تولید شده در حین زلزله را بغرنج‌تر می‌کند. در مورد شکل ۱۱-ب و بارگذاری‌های قائم نیز در حالت بارگذاری V1، تمرکز بردارهای شتاب در پوسته‌ها بوده و محدوده فرازبند کمتر از توزیع شتاب‌های برآیند متاثر شده است (بارگذاری V2). در هر دو حالت بارگذاری V1 و V2، تمرکز بردارهای شتاب در بخش پوسته بالا دست و نزدیک مخزن مشهود است. در شکل ۱۱-ج و در بارگذاری‌های مایل، بارگذاری II کمترین بردارهای شتاب برآیند را ایجاد کرده و راستای آن‌ها به سوی پوسته پایین دست است. علت این موضوع نیز راستای رو به پایین دست حرکت لرزه‌ای ورودی در این مورد بارگذاری است.

در شکل ۱۲ توزیع تنش‌های برشی نسبی در بارگذاری‌های لرزه‌ای مختلف با جهات حرکات لرزه‌ای نامنظم، داده شده است. در اینجا هم همانند شکل قبلی (۱۱)، تمرکز تنش‌های برشی نسبی لرزه‌ای در پوسته بالا دست، بیانگر یک حالت کاملاً بحرانی است. علت آن هم وقوع کرنش‌های سریع و عدم تعادل کرنش‌های حجمی و برشی دینامیکی در زمان‌های بارگذاری بسیار کوتاه است (تکانه‌های لرزه‌ای). در گروه بارگذاری‌های افقی، بارگذاری





شکل ۱۲. توزیع تنش‌های برشی نسبی در بارگذاری‌های لرزه‌ای مختلف با جهات حرکات لرزه‌ای نامنظم: (الف) افقی، (ب) قائم، (ج) مایل.

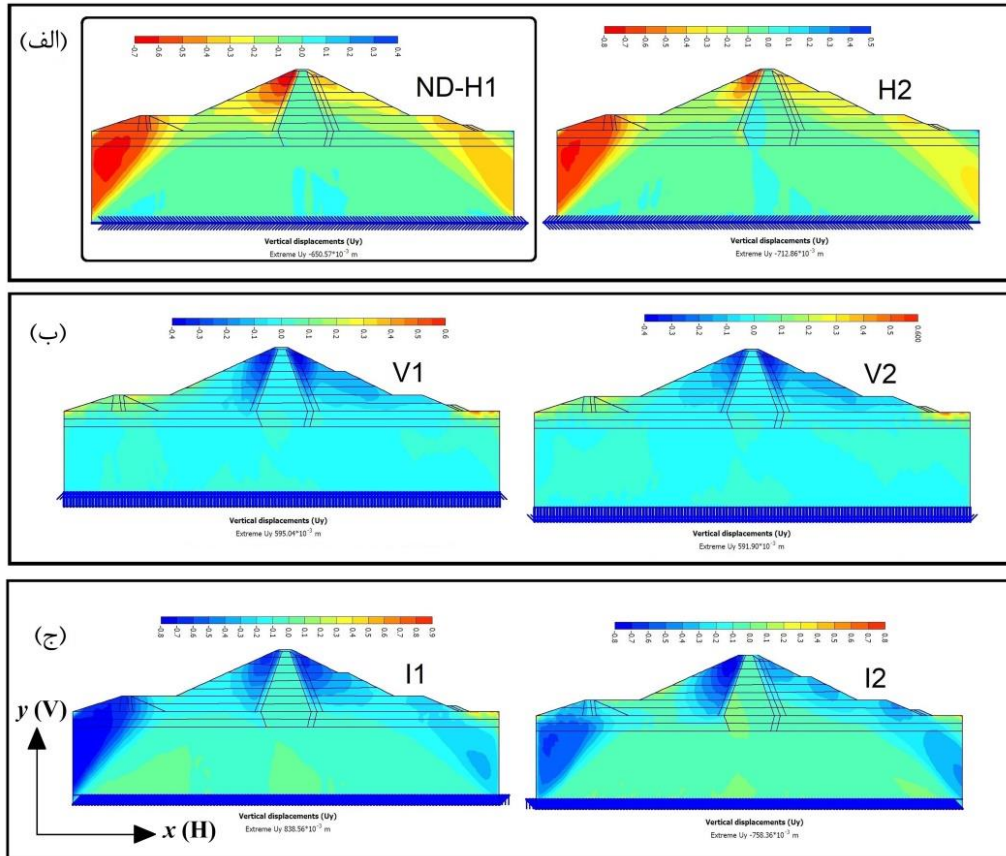
Fig. 12. Distribution of relative shear stresses in different seismic loadings with respect to the directions of irregular seismic motions: (a) horizontal, (b) vertical, (c) oblique

تحت بارگذاری مرسوم H1 بوده و اثر آن را تقویت کرده است. در گروه بارگذاری‌های مایل، بارگذاری از نوع I1 اثر بیشتری نسبت به بارگذاری I2 در ایجاد نشست‌ها داشته و در اثر آن، نشست به صورت متقارن و در هر دو بخش تاج در پوسته‌های بالا دست و پایین دست در مقایسه با مورد بارگذاری I2 اتفاق افتاده است. علت آن است که جهت حاکم در بارگذاری I1 و مولفه‌های افقی و قائم آن طوری است که برآیند آن‌ها با برآیند فشارهای آب مخزن (رو به پایین دست) برهم نهی تقویت‌کننده‌ای دارند. به همین دلیل بارگذاری I1 برخلاف بارگذاری I2 باعث بروز مقایر مشخصی نشست در بخش تاج در پوسته‌ی پایین دست شده است (شکل ۱۳-ج).

در شکل ۱۴ دو نمودار مختلف توزیع اضافه فشارهای آب حفره‌ای در هسته شکل ۱۴-الف و نیز نقاط تسلیم یا ترک خوردگی (منطبق بر مدل‌های MC و HS-small در شکل ۱۴-ب) در بارگذاری‌های جهتی مختلف ارائه شده است. مطابق شکل ۱۴-الف هم از نظر موقعیت بحرانی و هم مقادیر اضافه فشارهای آب حفره‌ای در مدل‌های با جهات بارگذاری مختلف، پاسخ‌ها متفاوت هستند. همچنین الگوی گسترش نقاط تسلیم یا خمیری

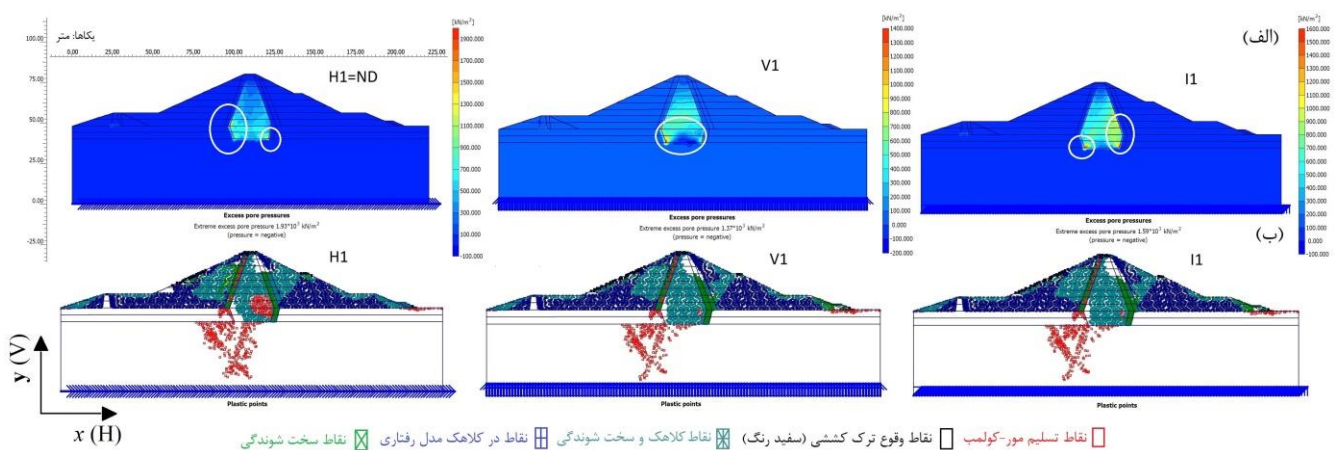
در شکل ۱۳ کانتورهای نشست لرزه‌ای سد تحت تاثیر بارگذاری‌های لرزه‌ای نامنظم، در گروه‌های بارگذاری در جهات افقی، قائم و مایل نشان داده شده است. مطابق آن، فقط بارگذاری‌هایی که حداقل شامل یک مولفه افقی باشند، تمرکز نشست در بخش هسته، تاج و زیر هسته در سنگ بستر ایجاد خواهند کرد. در زمینه نشست، شرایطی بحرانی‌تر است که نشست بیشتری در بخش تاج ایجاد کند. در دسته‌ی بارگذاری‌های افقی، بارگذاری افقی در جهت غیرمعمول H2 مقادیر نشست بیشتری را به ویژه در تاج ایجاد کرده است (شکل ۱۳-الف). علت عمده آن نیز آشفتگی ایجاد شده در مرکز سد و مجاورت تاج و هسته آن، به علت تداخل حرکات لرزه‌ای اولیه و برآیند بارگذاری هیدرودینامیکی- هیدرواستاتیکی فشار آب مخزن است. در بارگذاری‌های قائم نیز بارگذاری V2 تقریباً با اختلاف بسیار اندکی نسبت به بارگذاری V1 بیشترین اثر را بر نشست تاج، به طور همزمان در بالا دست و پایین دست داشته است (شکل ۱۳-ب).

دلیل این موضوع نیز آن است که راستای حرکات لرزه‌ای اولیه در مورد V2 کاملاً برخلاف راستای معمول بروز نشست‌های لرزه‌ای در تاج



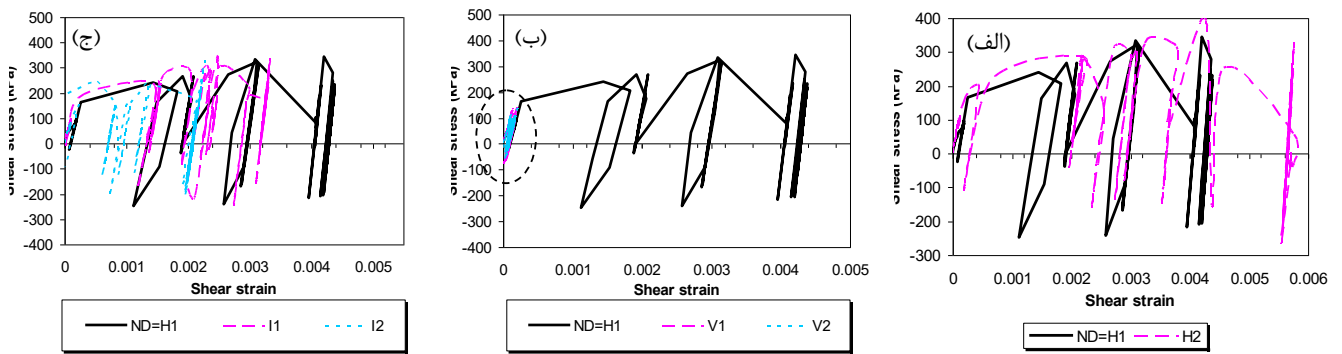
شکل ۱۳. نشست‌های لرزه‌ای تحت تاثیر بارگذاری‌های لرزه‌ای نامنظم در جهات (الف) افقی، (ب) قائم و (ج) مایل.

Fig. 13. Seismic settlements under the influence of irregular seismic loadings in directions of: (a) horizontal, (b) vertical and (c) oblique.



شکل ۱۴. توزیع اضافه فشارهای آب حفره‌ای در هسته، (ب) نقاط تسلیم یا ترک خوردگی در بارگذاری‌های جهتی مختلف.

Fig. 14. Excess pore water pressure distributions in core, (b) yield or cracking points in different directional loadings.



شکل ۱۵. پاسخ لرزه‌ای تنش- کرنش برشی در کف هسته سد شهدا تحت اثر بارگذاری‌های: (الف) افقی، (ب) قائم و (ث) مایل.

Fig. 15. Seismic response of shear stress-strain in the core's base of Shohada dam under the effect of: (a) horizontal, (b) vertical and (c) oblique loadings

با توجه به کاهش شیب منحنی‌ها، نسبت به شیب‌های اولیه نقطه شروع نمودارها، با افزایش مقادیر کرنش‌های برشی، کاهش یافته‌اند (شکل ۱۵). همچنین رفتار بارگذاری-باربرداری مجدد<sup>۱</sup> یا چرخه کامل LUR در شکل ۱۵ نمایان شده است.

در شکل ۱۶ پاسخ‌های اضافه فشار آب حفره‌ای<sup>۲</sup> (EPWP) در نقطه کف هسته برای سه گروه بارگذاری لرزه‌ای افقی، قائم و مایل ارائه شده است. مطابق شکل ۱۶-الف بزرگ‌ترین پاسخ زمانی اضافه فشار آب حفره‌ای مربوط به بارگذاری H2 است. علت اصلی رخداد آن ایجاد عدم تعادل شدید هیدرودینامیکی در فشار آب حفره‌ای داخل هسته و مخزن به علت راستای بحرانی این نوع بارگذاری افقی به سمت مخزن است. همچنین مطابق شکل ۱۶-ب در گروه بارگذاری‌های قائم پاسخ تمامی موارد به طور معمول کمتر از بارگذاری مبنای ND=H1 است و بارگذاری مورد V1 (رو به بالا) پاسخ بزرگ‌تری به دست داده است.

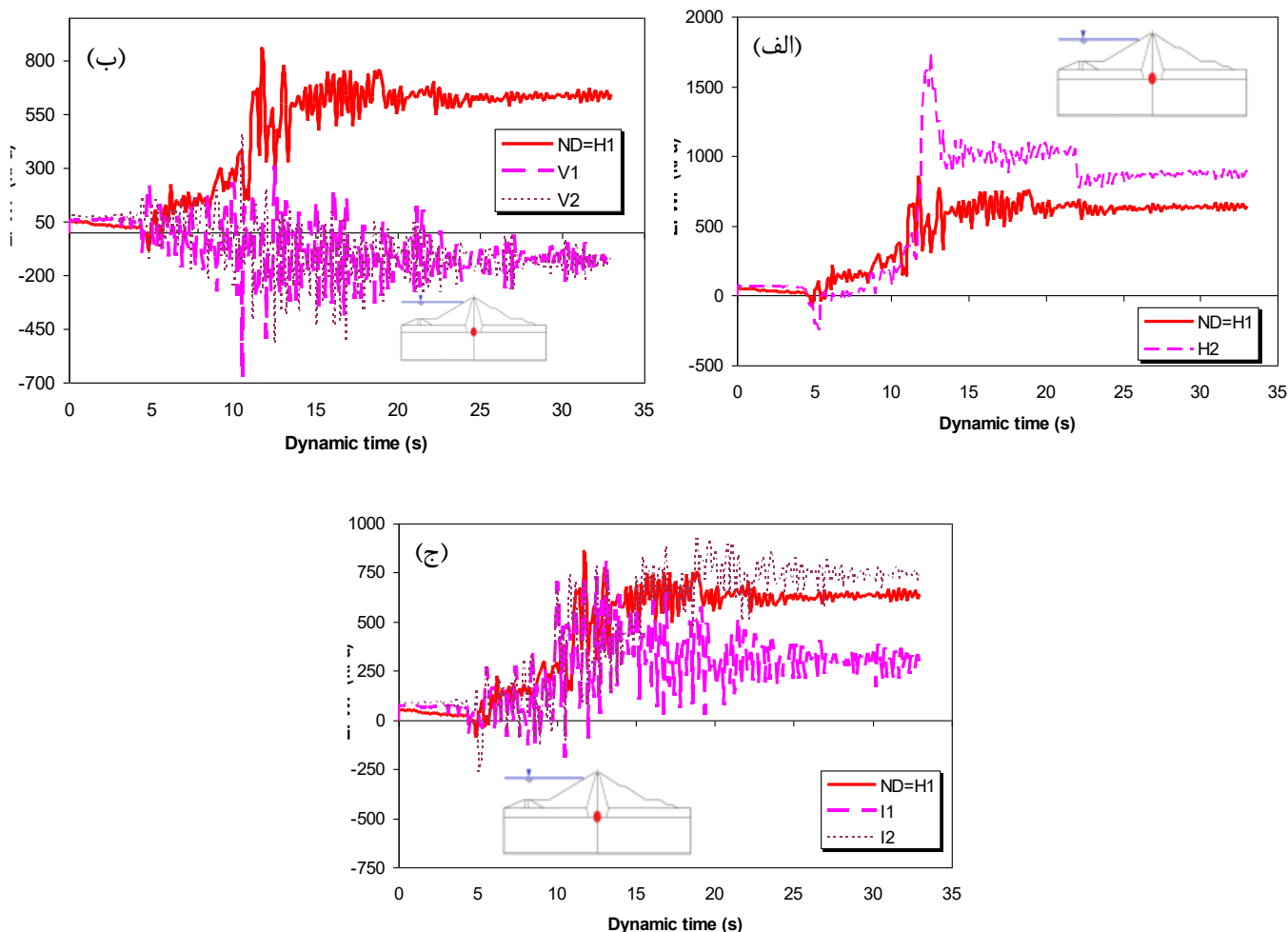
دلیل این موضوع، ضریب نفوذپذیری قائم ( $K_v$ ) بسیار کمتر مصالح تشکیل دهنده هسته در راستای قائم نسبت به راستای افقی (یعنی  $K_v \ll K_x$ ) و کندی حرکت و زهکشی آب در راستای قائم است. همچنین مطابق شکل ۱۶-ج پاسخ بارگذاری‌های مایل I2 نیز بزرگ‌تر است، زیرا در جهت بارگذاری مایل رو به سوی مخزن (با هد فشار بیشتر) و مولفه‌ی افقی بارگذاری مایل I2 رو به بالا دست و مخزن و باعث آشفته‌گی در فشار آب حفره‌ای و افزایش آن شده است.

شکل ۱۴-ب در لحظات آنی پایان تحلیل لرزه‌ای عددی نیز بر اساس نوع بارگذاری جهتی متفاوت است. وضعیت نقاط با ترک کششی در شکل ۱۴-ب با مربع‌های به رنگ سفید به ویژه در پاشنه شیب بالا دست و تاج هسته در پایین دست سد مشخص شده است. نقاط تسلیم معیار مور-کولمب در سنگ بستر و در کف هسته مشهود است.

#### ۴-۲- مرور نتایج تاریخچه- زمانی بارگذاری‌های نامنظم

در این بخش دستاوردهای تاریخچه-زمانی که حاصل تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی است، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور در شکل ۱۵ پاسخ لرزه‌ای تنش و کرنش برشی در کف هسته تحت اثر هر یک از گروه‌های بارگذاری افقی، قائم و مایل ارائه شده است. نکته متمایز کننده این نمودارها، توسعه کرنش‌های برشی در هر مورد از بارگذاری‌ها است. مورد مرجع H1 نیز، در هر شکل برای مقایسه بهتر اختلاف نتایج کسب شده رسم شده است. در شکل ۱۵-الف بارگذاری H2، در شکل ۱۵-ب بارگذاری V1 و در شکل ۱۵-ج بارگذاری I1، بیشترین پاسخ سیکلی را در کف هسته به دست داده‌اند. در مقایسه همه موارد ۶ گانه، بیشترین کرنش برشی سیکلی را بارگذاری افقی در جهت افقی معکوس (مورد H2) ایجاد کرده است. این کرنش‌های قابل توجه، به علت برهم نهدی ویرانگر اثر جهت غالب بارگذاری لرزه‌ای به سوی مخزن و اثرات متقابل نیروهای هیدرودینامیکی مخزن به سمت پایین دست است. بروز نوعی نرم شونده‌گی کرنشی نیز در نتایج تمامی این نمودارها در بخش کف هسته قابل مشاهده است. چرا که هر دوی مدول‌های برشی تاژانث و سکانت (یعنی  $G_t$  و  $G_s$ )

1 Loading-unloading-reloading cycle (LUR-cycle)  
2 Excess pore water pressure (EPWP)



شکل ۱۶. پاسخ تاریخیچه-زمانی اضافه فشار آب حفره‌ای در کف هسته برای ترکیبات بارگذاری نامنظم: (الف) افقی، (ب) قائم و (ث) مایل.

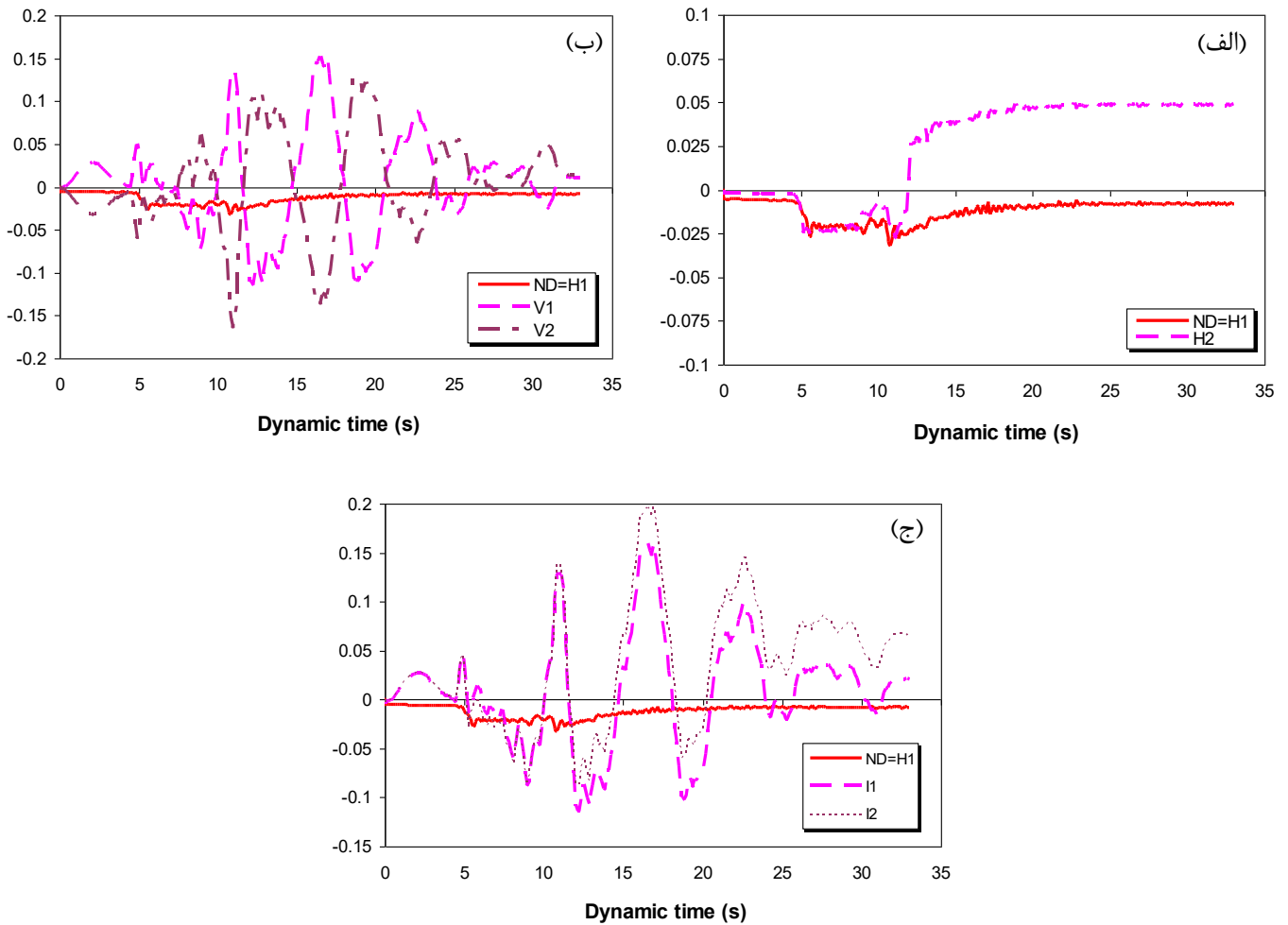
**Fig. 16. Time -history response of excess pore water pressure in the bottom of core for different irregular loadings combinations including: (a) horizontal, (b) vertical and (e) inclined cases.**

در شکل ۱۷-ب نکته حائز اهمیت آن است که هر دو بارگذاری V1 و V2 که راستای قائم اعمال کاملاً مخالف یکدیگر دارند، پاسخ‌هایی تقریباً هم اندازه دارند. فقط از نظر فاز پاسخ‌ها، هر یک در فاز مقابل‌اند و غیرهمزمانی<sup>۴</sup> در این دو پاسخ دیده می‌شود. در شکل ۱۷-ج در گروه بارگذاری‌های مایل، بارگذاری‌های I1 و I2 به ترتیب بیشترین پاسخ نشست ماندگار را ایجاد کرده‌اند. به علت ایجاد همگرایی و یا واگرایی در مولفه‌های افقی هر یک از این دو بارگذاری مایل، نسبت به محل مخزن، اغتشاش و ناهماهنگی ویرانگری در جهت افزایش نشست‌های تاج به وجود آمده است. البته پاسخ‌های I1 و I2 کاملاً هم فازند و اوج‌ها و قعرهای پاسخ آن‌ها همزمانی دارد. در برخی نمودارهای شکل ۱۷ غیرهمزمانی مشهودی

در شکل ۱۷ پاسخ تاریخیچه-زمانی نشست تاج تحت بارگذاری‌های راستاهای افقی، قائم و مایل رسم شده است. در شکل ۱۷-الف بیشترین نشست در بارگذاری H2 رخ داده است. علت آن است که طبق قانون اسنل، راستای حرکت امواج بارگذاری‌های افقی، در حین خروج از سطح زمین، نزدیک به راستای قائم و یا حداقل مایل است و از طرفی بارگذاری‌ها حداقل یک مولفه به سمت مخزن (جهت ایجاد اغتشاش در آن) دارند. نکته جالب توجه در شکل ۱۷-ب آن است که بارگذاری‌های این گروه، نشست و تغییر مکان قائم ماندگاری<sup>۱</sup> در تاج ایجاد نکرده‌اند و پاسخ‌های آن‌ها ماهیتی چرخه‌ای<sup>۲</sup> و غیرتک‌آهنگ<sup>۳</sup> دارد.

- 1 Permanent displacement
- 2 Cyclic
- 3 Monotonic

4 Asynchronism



شکل ۱۷. پاسخ تاریخیچه - زمانی نشست تاج تحت بارگذاری‌های نامنظم لرزه‌ای در راستای: (الف) افقی، (ب) قائم، (ث) مایل.

Fig. 17. Time- history response of the crest settlement under irregular seismic loadings in the direction of: (a) horizontal, (b) vertical, (e) inclined.

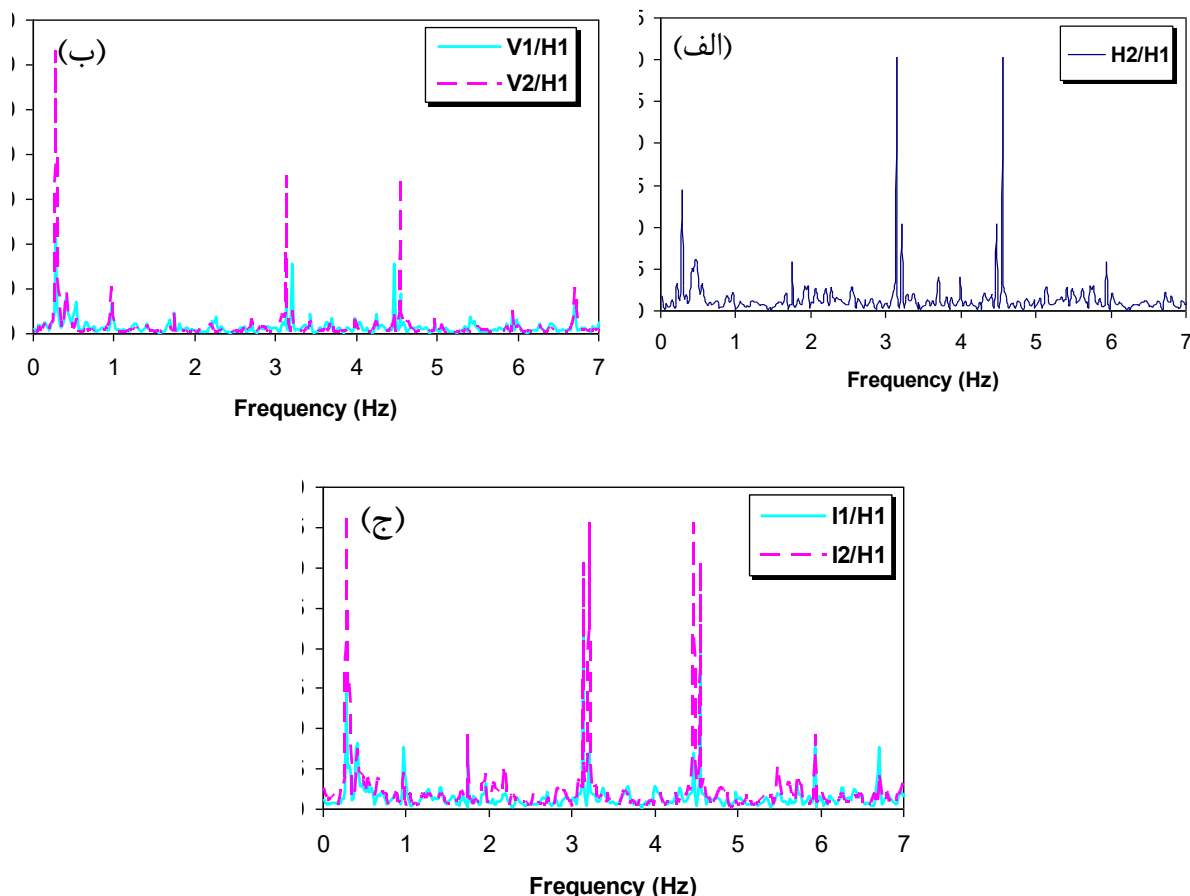
فرکانس مشخص به دست داده‌اند. نکته جالب توجه آن است که هیچ یک از بزرگ‌نمایی‌های تابع RFRS نزدیک به فرکانس طبیعی اول سد (یعنی  $f_{n1}=1.515\text{Hz}$ ) نشده است.

این یعنی، از دیدگاه عددی پدیده تشدید در هیچ یک از بارگذاری‌های لرزه‌ای نامنظم به وقوع نپیوسته است. در شکل ۱۸-الف بارگذاری H2 نسبت به بارگذاری H1 بزرگ‌نمایی‌های شاخصی را در فرکانس‌های قبل از یک هرتز و بین ۳ تا ۵ هرتز از خود نشان می‌دهد، که به دلیل راستای انتشار افقی مخالف جهت این بارگذاری است. همچنین مطابق شکل ۱۸-ب بارگذاری V2 دامنه پاسخ فرکانسی بزرگ‌تری نسبت به بارگذاری V1 از خود نشان می‌دهد. علت آن هم به دلیل راستای قائم غیرمتعارف انتشار اولیه این بارگذاری و اثرات آن در حین انتشار در ارتفاع سد و به ویژه در

در برخی پاسخ‌های نشست سیکنی بارگذاری‌هایی که در خلاف جهت هم بوده‌اند، (V2 و V1) مشاهده می‌گردد [۷]. همچنین پاسخ‌های ماندگار نیز غیرهمزمانی ضعیف‌تری از خود نشان داده‌اند (همانند H1 و H2).

در شکل ۱۸ تابع نسبت طیف پاسخ فوریه<sup>۱</sup> RFRS [۷ و ۱۴] پاسخ شتاب بارگذاری‌های مختلف نسبت به پاسخ شتاب بارگذاری مرجع ND=H1 برای نقطه تاریخیچه-زمانی تاج رسم شده است. در واقع تابع RFRS همان تابع انتقال<sup>۲</sup> TF پاسخ‌های دو تحلیل (یا دو نقطه مختلف مدل عددی) نسبت به یکدیگر است. همانگونه که مشخص است، تمامی بارگذاری‌های نامنظم، پاسخ‌های شتاب بزرگ‌تری در مقایسه با بارگذاری ND حداقل در دو یا چند

1 Ratio of Fourier response spectrum (RFRS)  
2 Transfer function (TF)



شکل ۱۸. نسبت‌های پاسخ طیفی فوریه RFRS با توجه به پاسخ بارگذاری جهت افقی معمول ( $ND=H1$ ) برای موارد بارگذاری‌های جهتی: (الف) افقی، (ب) قائم و (ج) مایل.

Fig. 18. Ratios of Fourier response spectrum (RFRS) with respect to the normal horizontal direction loading response ( $ND=H1$ ) for directional loading cases including: (a) horizontal, (b) vertical and (c) inclined.

در جهت نرمال افقی از بالا دست به پایین دست مخزن) و ۵ مدل دیگر است، در چارچوب روش اجزای محدود دو بعدی غیرخطی و در منطق مدل‌سازی کرنش-مسطح، شبیه‌سازی شده است. بارگذاری‌های لرزه‌ای جهت‌دار با تغییر راستاهای اولیه در هر یک از جهات، در سه گروه بارگذاری‌های افقی، قائم و مایل به پایین‌ترین نقطه بستر سنگی مدل دو بعدی سد اعمال شده است. از تحلیل‌های تاریخچه-زمانی با لحاظ میرایی مصالح تابع فرکانس رایلی و روش انتگرال‌گیری زمانی صریح استفاده شده است و پاسخ‌های گرافیکی و نموداری حاصله با هم مقایسه شده‌اند. مدل رفتاری خاک سخت شونده با کرنش کوچک HS-small برای مصالح زون‌های مختلف بدنه سد به کار گرفته شده است. نتایج حاصل از تحقیق حاضر به شرح موارد زیر قابل خلاصه‌سازی هستند:

۱- مطابق الگوهای بارگذاری اجرا شده در این مطالعه و جهت انطباق

نقطه بحرانی تاج است. در شکل ۱۸-ج بارگذاری I2 دامنه پاسخ بزرگ‌تری نسبت به بارگذاری I1 دارد. علت آن اثرات اغتشاشی ناشی از جهت انتشار اولیه نامعمول این نوع بارگذاری در مدل عددی سد است. البته تکرار بزرگ‌نمایی‌های پاسخ فرکانسی RFRS برای بارگذاری‌های جهتی مختلف، تا حدود زیادی تابع شرایط فرکانس‌های طبیعی بدنه سد در مودهای مختلف نوسان آن با درصدهای مشارکت مودی مختلف است و تنها نمی‌توان آن را تابع جهات اولیه بارگذاری دانست.

## ۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثرات نامنظمی در جهات اولیه خروج بارگذاری لرزه‌ای بر پاسخ سد خاکی-سنگریزه‌ای شهیدا مورد مطالعه قرار گرفته است. تعداد ۶ مدل پارامتری مختلف، که شامل مدل بارگذاری لرزه‌ای معمول ND

- of earth dams: the example of the Lentini site, *Procedia Engineering*, 158 (2016) 356-361.
- [4] R. Pang, B. Xua, X. Kong, D. Zoua, Y. Zhou, Seismic reliability assessment of earth-rockfill dam slopes considering strain-softening of rockfill based on generalized probability density evolution method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107 (2018) 96-107.
- [5] X. Yang, S. Chi, Seismic stability of earth-rock dams using finite element limit analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 64(2014) 1-10.
- [6] L. Masini, S. Rampello, R. Donatelli, Seismic performance of two classes of earth dams, *Earthquake Engng Struct Dyn*, 2020.
- [7] H. Sharafi, Y. Shams Maleki, Evaluation of hazardous effects of near-fault earthquakes on earth dams by using EL and TNL numerical methods (case studies: Gheshlagh Oleya and Jamishan dams), *Natural Hazards*, 2019.
- [8] Y. Gao, L. Wang, D. Lib, Y. Gao, Evaluation of valley topography effects on the seismic stability of earth rockfill dams via a modified valley topography coefficient, *Computers and Geotechnics*, 128 (2020) 103814.
- [9] L. Pelecanos, S. Kontoe, and L. Zdravkovic, A case study on the seismic performance of earth dams, *Géotechnique*, 65(11) (2015) 923-935.
- [10] L. Pelecanos, S. Kontoe, and L. Zdravković, The Effects of Dam-Reservoir Interaction on the Nonlinear Seismic Response of Earth Dams, *Journal of Earthquake Engineering*, 2018.
- [11] A. Zeroual, A. Fourar, and M. Djeddou, Predictive modeling of static and seismic stability of small homogeneous earth dams using artificial neural network, *Arabian Journal of Geosciences*, 12(16) (2019).
- [12] Y. Sawada, H. Nakazawa, W. Andy Take, T. Kawabata, Effect of installation geometry on dynamic stability of small earth dams retrofitted with a geosynthetic clay liner, *Soils Found*, 59 (2019) 1830-1844.
- [13] Y. Sawada, H. Nakazawa, T. Oda, S. Kobayashi, S. Shibuya, T. Kawabata, Seismic performance of small
- با واقعیت وقوع یک زلزله، می‌توان هم جهت و هم راستای هر یک از بارگذاری‌های افقی و قائم را در مدل‌های اجزای محدود دو بعدی، به سمت‌های دلخواه دیگر تغییر داد و نتایج نهایی آن‌ها را با هم مقایسه کرد.
- ۲- با یک تقریب محافظه‌کارانه در مدل‌های عددی دو بعدی کرنش-مسطح سدهای خاکی، قابلیت اعمال بارگذاری‌های لرزه‌ای در جهات مختلف با تغییر راستا وجود دارد و این موضوع فقط مختص مدل‌های عددی سه بعدی نیست.
- ۳- بارگذاری‌های لرزه‌ای جهتی دارای یک مولفه افقی (یا حتی قائم) خروجی اولیه رو به سوی مخزن سد، ایجاد تلاطمی ناگهانی در فشارهای هیدرواستاتیکی مخزن کرده و پاسخ‌های دینامیکی سد، در مقایسه با بارگذاری معمول لرزه‌ای (با جهت افقی از بالا دست به پایین دست) را تشدید می‌کنند.
- ۴- مطابق یافته‌های این تحقیق بارگذاری‌های لرزه‌ای در جهات اولیه مختلف، هر کدام به طور مشخص نوع خاصی از پاسخ‌های دینامیکی سد را دچار تغییر می‌کنند. مثلاً پاسخ شتاب، جابه‌جایی، فشار آب حفره‌ای و ... بنابراین در پروژه‌های تحلیل و طراحی لرزه‌ای دو بعدی سدهای خاکی، بهتر است جهت تدقیق نتایج، محافظه‌کاری و بهینه‌سازی مهندسی بیشتر طرح، اثرات سایر انواع بارگذاری‌های لرزه‌ای جهتی البته با تغییر راستاهای اولیه افقی و قائم نیز مدل‌سازی و کنترل شود.
- ۵- بر اساس یافته‌های این تحقیق، بارگذاری لرزه‌ای با جهت اولیه مایل با زاویه‌ی انتشار ۴۵ درجه، بزرگ‌ترین پاسخ‌های جابه‌جایی را در تاج سد ایجاد کرده است، که احتمال رخداد آن در یک زلزله نزدیک گسل واقعی، به هیچ وجه موضوعی دور از ذهن نیست.
- ۶- هدف عمده این مطالعه، به حساب آوردن اثر بارگذاری‌های لرزه‌ای سه بعدی واقعی بر سدهای خاکی در قالب اجرای مدل‌های عددی دو بعدی است.

## منابع

- [1] S. Sica, L. Pagano, F. Rotili, Rapid drawdown on earth dam stability after a strong earthquake, *Computers and Geotechnics*, 116 (2019) 103187.
- [2] K. Jeong, S. Shibuya, T. Kawabata, Y. Sawada, H. Nakazawa, Seismic performance and numerical simulation of earth-fill dam with geosynthetic clay liner in shaking table test, *Geotextiles and Geomembranes*, (2) (2020) 190-197.
- [3] F. Castelli, V. Lentini, C.A. Trifarò, 1D seismic analysis

- [21] Ab Niroo, Consulting Engineers Company, Soleimshah dam's foundation and body design 917 report, final modified report, 2001.
- [22] H. Sharafi, Y. Shams Maleki, Evaluation of the lateral displacements of a sandy slope reinforced by a row of floating piles: A numerical-experimental approach, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 122(2019) 148-170.
- [23] R.L. Kuhlemeyer, J. Lysmer, Finite element method accuracy for wave propagation problems, *J Soil Mech Found Div*, 99(SM5) (1973) 421-7.
- [24] R.B.J. Brinkgreve, M.H. Kappert, and P.G. Bonnier, Hysteretic damping in a small-strain stiffness model, *Proc. NUMOG X.*, (2007) 737-742.
- [25] J.A. Santos, A.G. Correia, Reference threshold shear strain of soil. Its application to obtain a unique strain-dependent shear modulus curve for soil, In *Proceedings 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Istanbul, Turkey, volume 1 (2001) 267-270.
- [26] K. Ishihara, *Soil behavior in earthquake geotechnics*, Clarendon Press, Oxford, 2005.
- [27] J.P. Wolf, *Dynamic soil-structure interaction*, Prentice-Hall, New Jersey, 1985.
- [28] S.L. Kramer, *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice-Hall: New Jersey, 1996.
- [29] PEER, Strong ground motion database, NGA-West2, 2021, <http://peer.berkeley.edu>.
- earth dams with sloping core zones and geosynthetic clay liners using full-scale shaking table tests, *Soils Found*, 58(3) (2018) 519-533.
- [14] J.H. Hwang, C.P. Wu, S.C. Wang, Seismic record analysis of the Liyutan earth dam, *Can Geotech J*, 44 (2007) 1351-1377.
- [15] K. Wei, S. Chen, G. Li, & H. Han, Application of a generalised plasticity model in high earth core dam static and dynamic analysis, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2018 979-1012.
- [16] Y. Li, W. Tang, L. Wen, & J. Wang, Study on seismic failure probability of high earth-rock dam considering dam body deformation and slope stability, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020.
- [17] K.I. Andrianopoulos, A.G. Papadimitriou, G.D. Bouckovalas, D.K. Karamitros, Insight into the seismic response of earth dams with an emphasis on seismic coefficient estimation, *Computers and Geotechnics*, 55 (2014) 195-210.
- [18] M.S. Rahman, and S.K. Pal, Pore pressure response of earth dams in random seismic environment, *Mechanics of Materials*, 3(1) (1984) 19-34, North-Holland.
- [19] S.H. Bian, B. Wu, Y.Z. Ma, & G.Y. Li, Development of an interface model based on hyperbolic hardening rule and contact effect analysis of earth rockfill dam, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020.
- [20] R.B.J. Brinkgreve, W.M. Swolfs, E. Engin, *PLAXIS 2D reference manual*, Delft University of Technology and PLAXIS BV, Netherlands, 2011.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Y. Shams Maleki, *Effects of Earthquake Wave Direction on Dynamic Response of Earth Dams - Case Study: Shohada Dam, Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(10) (2023) 3879-3902.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20460.7432

