# بررسی اندرکنش سد پی در بررسی موردی سد خاکی-سنگریزه‌ای مسجد سلیمان با استفاده از رکوردهای ثبت شده زلزله

مسعود عامل سخی، محمد داودی، محمدکاظم جعفری:
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

**تاریخ:** دریافت ۸۸/۳/۲۶ **پذیرش** ۸۸/۷/۱۴

## چکیده

بررسی رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی یکی از مهم‌ترین موضوع‌های قابل طرح در دانش ژئوتکنیک است. در بررسی رفتار سدها در برابر پدیدهٔ زلزله، بهترین روش، تدقیق مدل‌های عددی و تحلیلی با پاسخ‌های واقعی ثبت شده در بدنهٔ سد است. در دسترس بودن شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده زلزله بر روی سد خاکی-سنگریزه‌ای مسجد سلیمان، زمینهٔ مناسبی را برای نیل به این هدف فراهم کرده است و بر این اساس، سد مذکور برای بررسی موردی انتخاب شده است. در این تحقیق با استفاده از شتاب‌نگاشت ثبت شده در گالری به‌عنوان محرک ورودی، تحلیل‌های عددی بدنهٔ و پی سد مسجد سلیمان در محدودهٔ دو بعدی صورت پذیرفته و مسئلهٔ اندرکنش پی سد خاکی بررسی شده است. لازم به ذکر است شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده زلزله، ضعیف بوده و در نتیجه‌گیری نهایی و تحلیل لرزه‌ای پاسخ سد نیز به این امر توجه شده است. بر این اساس در این تحقیق با در دسترس بودن شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در نقاط مختلف سد مذکور، جرم‌های مختلفی برای پی سد در نظر گرفته شده و تحلیل‌های عددی انجام شده است. پاسخ‌های به‌دست آمده از تحلیل‌های عددی با پاسخ‌های ثبت شده مقایسه شده است و در بارهٔ میزان در نظرگیری جرم پی با استفاده از معیارهای مختلف بحث شده است. بررسی‌ها نشان داده است که یکی از بهترین معیارها در این مقایسه، استفاده از توزیع زمان- فرکانس در تحلیل شتاب‌نگاشت‌های ثبت و محاسبه شده است. نتایج به‌دست

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

آمده حاکی از آن است که صرف‌نظر کردن از جرم پی الزاماً به بهترین پاسخ دینامیکی برای سد خاکی منجر نمی‌گردد. با توجه به معیارهای مختلف در نظر گرفته شده در این تحقیق و با توجه به ضعیف بودن محرک ورودی ثبت شده و فرض رفتار خطی سد، به نظر می‌رسد پی با جرم زیر ۵۰ درصد (در حدود ۲۰-۳۰ درصد) نزدیک‌ترین پاسخ به رفتار ثبت شده سد را به همراه داشته باشد.

## مقدمه

بررسی رفتار سدهای خاکی احداث شده در مناطق لرزه‌خیز نشان می‌دهد که برخی از آن‌ها بر اثر زلزله خسارات و یا گسیختگی‌های موضعی را متحمل شده‌اند. تحلیل دقیق دینامیکی سدهای موجود و یا سدهای جدید در حال احداث، موضوعی پیچیده است که دلیل آن عوامل بسیاری است که بر پاسخ لرزه‌ای سدها اثر می‌گذارد که برخی از این عوامل خواص مصالح از جمله رفتار غیرالاستیک خاک در هنگام حرکات شدید زمین[1]، هندسه سد، شکل دره، بارگذاری دینامیکی و بحث اندرکنش سد- مخزن- پی[2] است. معمولاً در بررسی رفتار لرزه‌ای در سدهای خاکی از روش‌های عددی استفاده می‌شود که بسته به دقت این روش‌ها و همچنین شرایط ساخت و اجرای سد، رفتار پیش‌بینی شده در مقابل زمین لرزه با رفتار واقعی می‌تواند متفاوت باشد. به منظور بررسی درصد انطباق رفتار واقعی سد با مقادیر فرض شده در روند طراحی و تحلیل، می‌توان با بررسی‌های آزمایشگاهی و یا آزمایش‌های ارتعاشی درجا بر روی سدهای خاکی پارامترهای ارتعاشی بدنه سدها را به‌دست آورد و با مقادیر حاصل از تحلیل مقایسه کرد. وجود شبکهٔشتاب‌نگاری بر روی سد مسجد سلیمان و ثبت زلزله‌های به وقوع پیوسته در بدنه سد، ابزاری قدرتمند را در دسترس قرار می‌دهد تا پس از جمع‌آوری همهٔنگاشت‌های ثبت شده انفجار و زلزله به ارزیابی دقیق‌تر مشخصات دینامیکی (شامل فرکانس‌ها، اشکال و میرایی‌های مودی) و نیز رفتار دینامیکی سد مذکور پرداخته شود.

تکیه اصلی تحقیق حاضر بر بررسی محدودیت نرم‌افزارهای موجود مبتنی بر روش اجزای محدود بوده است که به منظور تحلیل مسئلهٔ اندرکنش سد-پی از جرم پی صرف‌نظر می‌کنند.

---

[1] - *Strong Ground Motion*
[2] *Foundation –Reservoir – Dam Interaction*

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

صرف‌نظر کردن از جرم پی باعث تغییر در پاسخ دینامیکی سد خاکی می‌شود و لذا این روش دارای پاسخ دقیق نخواهد بود. از سوی دیگر، در نظر گرفتن جرم کامل پی در تحلیل‌های اجزای محدود، دور شدن از پاسخ‌های صحیح در حل مسئلهٔ اندرکنش سد-پی را به دنبال دارد به نحوی که نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های عددی با پاسخ ثبت شده سد در نقاط مختلف متفاوت خواهد بود.

## بررسی رفتار دینامیکی سدهای خاکی در زمان زلزله

بررسی‌های لرزه‌ای سدهای خاکی طیف وسیعی را در بر می‌گیرد که در این بخش سعی می‌شود اختصار به مواردی از آن‌ها اشاره شود. مور و گوان در سال ۱۹۹۷ در پژوهش اثر پی نسبت مدول الاستیسیته نیم‌فضا به مدول الاستیسیته لایه پی زیر بدنهٔ سد بر پاسخ سد خاکی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در مقدار پیک فرکانسی، هرچه نیم‌فضا سخت‌تر باشد، پاسخ سد نیز بزرگ‌تر خواهد بود[۱]. داکولاس[۳] و همکارانش فرمولاسیونی ترکیبی از اجزای محدود-عناصر مرزی برای اندرکنش دینامیکی غیرخطی خاک-سازه ارائه کردند و از آن، برای بررسی رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی استفاده کردند. مدل اندرکنش دینامیکی خاک-سازه فرض می‌کند که سد و لایهٔ خاکی پی (محیط نزدیک سد) ممکن است به صورت غیرخطی عمل کند؛ حال آن‌که باقیماندهٔ نیم‌فضا(محیط اطراف سد) به صورت الاستیک خطی رفتار می‌کند [۲]. پاپالوف[۴] و بیلاک[۵] مدل دوبعدی سد-دره و محیط در بردارنده آن را برای بررسی رفتار لرزه‌ای الاستیک سدهای خاکی و سنگ‌ریزه‌ای شامل اثرات اندرکنش سد-پی در نظر گرفتند. مدل ارائه شده بر اساس شکل دلخواه دره و خواص غیرهمگن سد است. از سوی دیگر فرض شد که سد و دره به صورت الاستیک، تغییر شکل خواهند داد. سد به صورت تیر برشی از مصالح الاستیک غیرهمگن و محیط در بردارندهٔ سد نیز به صورت نیم فضای الاستیک، مدل گردید [۳]. برای بررسی اثر انعطاف‌پذیری دره و نیز زاویهٔ موج مهاجم بر روی پاسخ لرزه‌ای سد، مدلی از سد لاویلیتا[۶] تهیه شد. نتایج نشان می‌دهد که اندرکنش سد - پی به طور مشخص بر روی رفتار

[3] *Dakoulas*
[4] *Papalou*
[5] *Bielak*
[6] *La Villita*

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

لرزه‌ای سد اثر می‌گذارد به نحوی که درنظر گرفتن اندرکنش سد- پی باعث ایجاد کرنش‌های کوچک‌تری نسبت به حالت فرض دره صلب شده است که دلیل این امر ممکن است باز تابش انرژی به پی باشد. به عبارت دیگر، فرض صلب بودن دره باعث ایجاد پاسخ‌های بزرگ‌تر می‌شود که این امر می‌تواند تا ۲ برابر بزرگ‌تر نیز باشد. از سوی دیگر بررسی‌های همین محققان در سال ۲۰۰۴ نشان‌دهندهٔ این مطلب است که اثرات اندرکنش سد-پی در تمام فرکانس‌ها و برای حالات خطی و غیرخطی، رخ می‌دهد [۴]. سارمینتو[7] و همکاران در سال ۲۰۰۴ با در نظر گرفتن تغییر محرک ورودی تکیه‌گاهی برروی پی صلب به تحلیل دینامیکی یک سد CFRD به ارتفاع ۱۵۳ متر و طول تاج ۷۸۰ متر پرداختند. در این تحقیق، تغییرات مکانی حرکات ورودی پی سد و نیز شرایط زمین‌شناسی متفاوتی برای دره در نظر گرفته شده است. فرض شده است که مصالح سد از مدل موهر-کولمب تبعیت می‌کند و پی سنگی نیز به صورت مصالحی با رفتار الاستیک خطی مد نظر قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که حرکات حوزهٔ نزدیک[8] می‌تواند تغییرات مهمی در حرکاتی که در زیر سد عمل می‌کند، ایجاد نماید [۵]. در سال ۱۳۸۶ داودی و جواهری به بررسی پاسخ لرزه‌ای سد خاکی مسجد سلیمان تحت اثر تغییرات مکانی حرکت زمین‌لرزه پرداختند. در این تحقیق از مدل عنصر محدود دوبعدی در حالت پی صلب استفاده شد و تحلیل ارتعاش تصادفی برای برآورد پاسخ احتمالی سد استفاده شد و توزیع تنش‌های مجموع استاتیکی و دینامیکی تنش‌های افقی، قائم و برشی و نیز ضرایب اطمینان سطوح لغزشی مقایسه شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در نظر گرفتن محرک ورودی یک‌نواخت می‌تواند منجر به برآورد نتایج غیر واقعی در ارزیابی پایداری سطوح مستعد لغزش در سدهای خاکی شود [۶].

## مبانی اندرکنش خاک-سازه

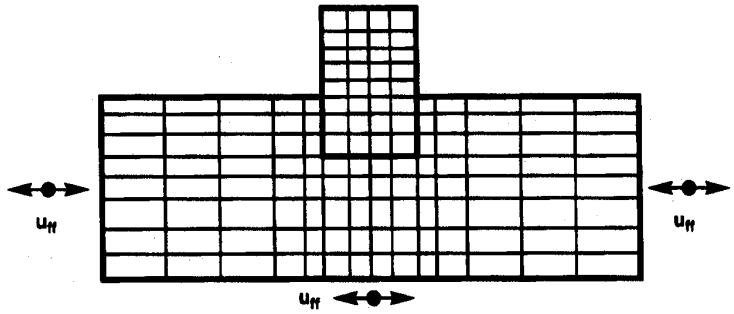
برای حل مسئله اندرکنش خاک-سازه روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های مستقیم[9]، FE-BE، روش حرکت افزوده[10]، روش چند گامه[11] اشاره کرد. از آن‌جا

[7] *Sarmiento*
[8] *Near Field*
[9] *Direct method*

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

آن‌جا که در تحقیق حاضر تحلیل عددی سد مسجد سلیمان بر اساس روش اجزای محدود صورت می‌گیرد، در این قسمت تنها به شرح مختصری از روش‌های مستقیم، چند گامه و حرکت افزوده پرداخته می‌شود. در روش مستقیم، سازه و بخش مهمی از خاک اطراف سازه مدفون شده با اجزای محدود مدل شده و حرکت میدان آزاد در مرزهای سیستم اعمال می‌شود و خاک و سازه در یک گام منفرد تحلیل می‌شود. در این روش مشخصات غیرهمگن خاک یا سنگ در نظر گرفته می‌شود و رفتار غیرخطی خاک نیز می‌تواند لحاظ شود. در این روش، عکس‌العمل‌های سازه و خاک به‌طور هم‌زمان به‌دست می‌آید. در شکل۱ حرکت‌های ورودی میدان آزاد در پایه و کناره‌های مدل نشان داده شده است. در این شکل $\ddot{u}_{ff}$ شتاب میدان آزاد نقاط گرهی مرزی را مشخص می‌کند.



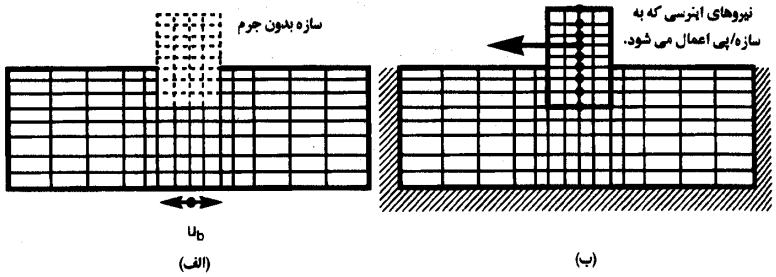

**شکل ۱. مدل روش مستقیم اندرکنش خاک-سازه [۷]**

در روش چند گامه فرض اصلی برقرار بودن اصل جمع آثار قواست که خود متضمن رفتار خطی است؛ به همین سبب این روش به تحلیل سیستم‌های خطی محدود می‌شود. در روش زیرسازه خاک-سازه به مجموعه‌ای از زیر مسئله‌های ساده‌تر تقسیم می‌شود و هر مسئله جداگانه تحلیل و در مرحله نهایی تحلیل، بر پایهٔ اصل جمع آثار قوا، نتایج با هم ترکیب می‌شود. این روش به‌خصوص در مواقعی که یک بخش از سیستم دارای هندسه ساده‌ای است و بخش‌های دیگر دارای هندسه پیچیده‌ای هستند، از کارایی مناسبی برخوردار است. این روش دارای قابلیت تعریف مؤلفه‌های مختلف شامل اندرکنش جنبشی[۱۲] و اندرکنش اینرسی[۱۳] است

[10] *Added motion*
[11] *Multi-step method*
[12] *Kinematic*

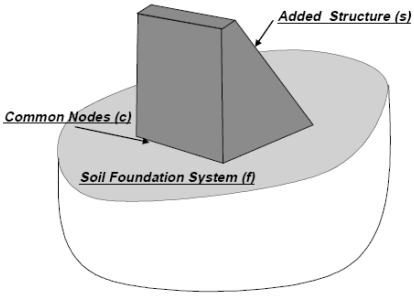
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

[۷]. در شکل۲ روش چندگامه نشان داده شده و مدل‌های مربوط به تحلیل اندرکنش جنبشی و اینرسی ارائه شده است.




**شکل ۲. الف) مدل تحلیل اندرکنش جنبشی، ب- مدل تحلیل اندرکنش اینرسی [۷]**

روش دیگر حل مسئله اندرکنش خاک-سازه مبتنی بر فرض ثابت بودن حرکات میدان آزاد در زیر سازه و استفاده از روش حرکت اضافه شده است. برای توضیح روش حل مسئله اندرکنش سد-پی در شکل ۳ یک سد و پی زیر آن در نظر گرفته می‌شود [۸].




**شکل ۳. سد و پی زیر سد در مدل مسئلهٔ اندرکنش سد – پی**

معادله تعادل دینامیکی زیر را درنظر می‌گیریم. در این معادله در سمت راست آن نیروی زلزله اعمال می‌شود.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = R \qquad (۱)$$

در این معادله، $M$ جرم پی و بدنه سد، $C$ میرایی پی و بدنه سد و $K$ سختی سد و پی و سرانجام $R$ نیروی اعمالی زلزله است. حل مسئلهٔ اندرکنش سد-پی به حل این معادله باز می‌گردد. در شکل۳ گره‌های تشکیل دهنده مدل به سه ناحیه تقسیم شده است: گره‌های موجود در حد فاصل مشترک سد-پی با اندیس c، گره‌های داخل بدنه سد با اندیس s و

[13] *Inertial*

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

باقیماندهٔ گره‌ها که بر روی پی قرار دارند با حرف f نشان داده شده است. بر این اساس معادله کامل تعادل دینامیکی سه بعدی سیستم سد- پی را در حالت وجود میرایی و نیز با استفاده از سیستم جرم متمرکز می‌توان با این رابطه بیان کرد:

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=-[M_{ss}]\left(\{r_x\}\ddot{V}_x(t)+\{r_y\}\ddot{V}_y(t)+\{r_z\}\ddot{V}_z(t)\right) \quad (۲)$$

در این رابطه، ماتریس‌های M، C و K به‌ترتیب عبارت از ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی مدل سد و پی (وابسته به گره‌های تشکیل دهنده عناصر سد، پی و سطح مشترک) و u عبارت از مقادیر تغییر مکان نسبی اضافه شده به سیستم سد – پی است که در مرزهای کناری پی به صفر می‌رسد. همچنین عبارت‌های $\ddot{V}_i(t)$ معرف مؤلفه‌های شتاب گسترهٔ آزاد هستند که در حالت قبل از احداث سد ایجاد می‌شوند و مقادیر بردار $[M_{ss}]\{r_i\}$ نیز فقط به جرم‌های سد (بدون پی) تعلق دارند که در راستای شتاب وارده در نظر گرفته می‌شوند[۸].

معادله (۲) نشان می‌دهد در طرف دوم معادله که بیان‌گر نیروی وارده بر سیستم است، جرم پی حضور ندارد. به عبارت دیگر بر اساس معادله مذکور، حل صحیح یک معادله اندرکنش مشروط به این است که در حل معادله حرکت، مؤلفه‌های شتاب گستره آزاد تنها بر جرم سازه و نه بر جرم پی وارد گردد. اغلب نرم‌افزارهای کامپیوتری موجود تحلیل دینامیکی سازه، بار دینامیکی وارده را بر جرم همهٔ درجات آزادی سیستم (شامل گره‌های غیرمقید سازه و پی) اعمال می‌کنند، بنا بر این در حل مسائل اندرکنش سازه – پی با علامت سوال مواجه هستند.

از آن‌جا که نرم‌افزارهای موجود که بر مبنای روش اجزای محدود، محاسبات را انجام می‌دهند قادر به تحلیل دقیق مسئله اندرکنش نیستند، استفاده از مدل پی بدون جرم در این نرم افزارها پیشنهاد شده است[۹] که در این‌صورت با صرف‌نظر کردن از نیروی اینرسی در مصالح پی، نیروهای لرزه‌ای به درستی بر سازه وارد شوند. البته لازم به ذکر است که با فرض پی بدون جرم، هرچند نیروهای لرزه‌ای به درستی بر سازه وارد می‌شوند ولی تأثیر جرم پی از سمت چپ معادله حرکت حذف می‌شود و از میرایی مصالح و تشعشعی[۱۴] فونداسیون صرف‌نظر می‌شود. بر این اساس به نظر نمی‌رسد که حل دقیق مسئله اندرکنش با صرف‌نظر نمودن از

[14]- radiation damping

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

جرم پی از طرفین معادلهٔ مذکور صورت پذیرد. از سوی دیگر، درنظر گرفتن تمام جرم پی در محاسبات نیز به خودی خود می‌تواند باعث ایجاد خطا در محاسبات و تحلیل نتایج شود.

وجود شبکهٔ شتاب‌نگاری بر روی سد مسجد سلیمان و ثبت زلزله‌های به وقوع پیوسته در بدنهٔ سد، ابزاری قدرتمند را در دسترس قرار می‌دهد تا پس از جمع‌آوری همهٔ نگاشت‌های ثبت شده زلزله به ارزیابی دقیق‌تر مشخصات دینامیکی (شامل فرکانس‌ها، اشکال و میرایی‌های مودی) و نیز رفتار دینامیکی سد مذکور و بررسی مسئلهٔ اندرکنش سد–پی پرداخته شود.

## مشخصات سد مسجد سلیمان

سد و نیروگاه مسجد سلیمان در مختصات E ۴۹/۲۴ و N ۳۲/۰۲ در منطقه‌ای که چندین گسل فعال در نزدیکی آن وجود دارد احداث شده است؛ برای نمونه گسل اندیکا را می‌توان نام برد که در فاصله تقریبی ۲/۵ کیلومتری شمال ساختگاه سد قرار دارد و باعث ایجاد زلزله-های نسبتاً شدیدی در منطقهٔ احداث سد مسجد سلیمان شده است. ساخت بدنهٔ این سد طی سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۸۰ زیر نظر مهندسان مشاور مشانیر از ایران، نیپون کوئه از کشور ژاپن و لامایر از کشور آلمان انجام شده است.

این سد سنگ‌ریزه‌ای به ارتفاع ۱۷۷ متر از بستر سنگی پی و به طول تاج ۴۹۲ متر بر روی رودخانه کارون و در فاصلهٔ ۲۵ کیلومتری شمال شرقی شهر مسجد سلیمان و در ۲۶ کیلومتری پایین دست سد شهید عباس‌پور احداث شده است. این سد دارای هستهٔ رسی قائم و پوستهٔ سنگ‌ریزه‌ای و حجم بدنه‌ای در حدود ۱۳/۴ میلیون مترمکعب و حجم تقریبی مخزن ۲۳۰ میلیون مترمکعب است. نیروگاه سد مسجد سلیمان از نوع زیرزمینی است و در صورت بهره‌برداری کامل، ۲۰۰۰ مگاوات توان تولید برق دارد. در زمینهٔ ویژگی‌های زمین‌شناختی ساخت‌گاه سد می‌توان به سازند بختیاری موجود در بستر، تکیه‌گاه‌های بدنه و نیز بخش اعظمی از مخزن سد اشاره کرد. سازند مذکور عموماً در واحدهای سنگی بالایی از کنگلومرای سخت با میان لایه‌های بسیار نازک رسی تشکیل شده است.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

**شکل ۴. موقعیت سد مسجد سلیمان بر روی نقشهٔ استان خوزستان**

## مشخصات مصالح سد

در تحلیل‌های استاتیکی، برای مصالح بدنهٔ سد از مدل رفتاری الاستوپلاستیک با معیار موهر-کولمب استفاده شده است و برای در نظرگیری فشار آب حفره‌ای هسته سد، از شرایط پر بودن مخزن بهره گرفته شده است پارامترهای مورد نیاز تحلیل استاتیکی با استفاده از پارامترهای معرفی شدهٔ مشاور[۱۰] و مطابق جدول۱ در معرفی می‌شود. برای انتخاب پارامترهای دینامیکی مدل، از نتایج بررسی‌های قبلی انجام شده در این زمینه که بر اساس نتایج آزمایش‌های صورت گرفته در سد مسجد سلیمان استخراج شده بود [۱۰] استفاده شد.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

**جدول ۱. پارامترهای استفاده شده در مرحلهٔ تحلیل استاتیکی سد مسجدسلیمان [۱۰]**

| مصالح | | ρ (kg/m³) | υ | K (cm/s) | $C'$ (×10⁵ N/m²) | $\phi'$ (درجه) | ψ (درجه) | E (×10⁸ N/m²) عمق (m) ۱۲ | ۳۱ | ۴۳ | ۹۳ | ۱۴۸ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| هسته | اشباع | ۲۲۰۰ | ۰/۳۴ | $۱۰^{-۸}$ | ۰/۴ | ۱۹ | ۰ | — | ۰/۳ | — | ۰/۷ | ۱/۲ |
| پوسته | خشک 3A, 3C | ۲۲۰۰ | ۰/۴ | $۱۰^{-۵}$ | ۰ | ۴۵ | ۲۲ | ۰/۸۶ | — | ۰/۸۶ | ۱/۱۳ | ۱/۴۳ |
| | خشک 3B | ۲۲۰۰ | ۰/۳۸ | $۱۰^{-۵}$ | ۰ | ۳۷ | ۱۸ | — | — | — | ۰/۹۵ | ۱/۲۴ |
| | اشباع | ۲۳۵۰ | ۰/۴ | $۱۰^{-۵}$ | ۰ | ۴۵ | ۲۲ | — | ۰/۶۴ | — | ۱/۰۹ | ۱/۳۳ |
| فیلتر | مرطوب | ۲۲۰۰ | ۰/۳۶ | $۱۰^{-۵}$ | ۰ | ۴۰ | ۰ | — | ۰/۷ | — | ۱/۰۶ | ۱/۵۵ |
| | اشباع | ۲۳۵۰ | ۰/۳۶ | $۱۰^{-۵}$ | ۰ | ۴۰ | ۰ | — | ۰/۴۹ | — | ۰/۹۴ | ۱/۴۴ |

**جدول ۲. پارامترهای استفاده شده در مرحلهٔ تحلیل دینامیکی سد مسجدسلیمان [۱۰]**

| | | $\rho(kg/m^3)$ | $\nu$ | عمق(m) ۱۲ | ۳۱ | ۴۳ | ۹۳ | ۱۴۸ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| هسته | اشباع | ۲۲۰۰ | ۰/۴۵ | | ۲/۱۵۳ | | ۳/۳ | ۳/۴۶ | $E_0 * 10^9 (N/m^2)$ |
| | | | | | ۰/۷۴ | | ۱/۱۴ | ۱/۱۹۶ | $G_0 * 10^9 (N/m^2)$ |
| | | | | | ۵۸۰ | | ۷۱۹ | ۷۳۶ | $V_s$(m/s) |
| پوسته | خشک | ۲۲۰۰ | ۰/۴ | ۰/۸۵ | | ۳/۷ | ۴/۶۱ | ۴/۷۶ | $E_0 * 10^9 (N/m^2)$ |
| | | | | ۰/۳۰ | | ۱/۳۲۴ | ۱/۶۴ | ۱/۶۹ | $G_0 * 10^9 (N/m^2)$ |
| | | | | ۳۷۲ | | ۷۷۵ | ۸۶۵ | ۸۷۶ | $V_s$(m/s) |
| | اشباع | ۲۳۵۰ | ۰/۴ | | ۲/۲۶۸ | | ۲/۵۷ | ۲/۵۸ | $E_0 * 10^9 (N/m^2)$ |
| | | | | | ۰/۸۱ | | ۰/۹۱۲ | ۰/۹۲ | $G_0 * 10^9 (N/m^2)$ |
| | | | | | ۵۸۷ | | ۶۲۴ | ۶۲۲ | $V_s$(m/s) |
| فیلتر | مرطوب | ۲۲۰۰ | ۰/۴ | | ۱/۷۴۴ | | ۳/۰۷۶ | ۳/۲۹۶ | $E_0 * 10^9 (N/m^2)$ |
| | | | | | ۰/۶۲۳ | | ۱/۰۹۸ | ۱/۱۷۷ | $G_0 * 10^9 (N/m^2)$ |
| | | | | | ۵۳۲ | | ۷۰۶ | ۷۳۰ | $V_s$(m/s) |
| | اشباع | ۲۳۵۰ | ۰/۴ | | ۱/۳۴۴ | | ۱/۷۱۲ | ۱/۸۲۴ | $E_0 * 10^9 (N/m^2)$ |
| | | | | | ۰/۴۸ | | ۰/۶۱۲ | ۰/۶۴ | $G_0 * 10^9 (N/m^2)$ |

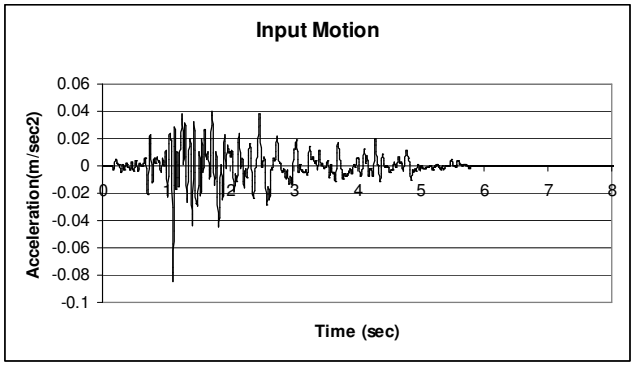
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **$V_s$(m/s)** | ۵۱۴ | ۵۰۹ | | ۴۵۱ | | | | | |
| $E_0 * 10^9 (N/m^2)$ | ۹/۳۶ | | | | | ۰/۳ | ۲۵۰۰ | تکیه‌گاه راست | **فونداسیون و تکیه‌گاه** |
| $G_0 * 10^9 (N/m^2)$ | ۳/۶ | | | | | | | | |
| **$V_s$(m/s)** | ۱۳۲۰ | | | | | | | | |
| $E_0 * 10^9 (N/m^2)$ | ۷/۸ | | | | | | | تکیه گاه چپ | |
| $G_0 * 10^9 (N/m^2)$ | ۳ | | | | | | | | |
| **$V_s$(m/s)** | ۱۲۰۰ | | | | | | | | |
| $E_0 * 10^9 (N/m^2)$ | ۱۰/۹۲ | | | | | | | فونداسیون | |
| $G_0 * 10^9 (N/m^2)$ | ۴/۲ | | | | | | | | |
| **$V_s$(m/s)** | ۱۳۰۰ | | | | | | | | |

## نتایج تحلیل‌های اندرکنش سد-پی

در بخش تحلیل‌های دینامیکی بدنهٔ سد به منظور بررسی اثرات اندرکنش سد- پی و نیز بررسی این نکته که چه جرمی از پی باید درتحلیل‌های دینامیکی سد وارد گردد، حالت‌های مختلف جرم پی به‌صورت صلب، بدون جرم، با ۲۵ درصد، ۵۰ درصد، ۷۵ درصد، ۱۰۰ درصد جرم و نیز با جرم کاهش یابنده در نظر گرفته شده است. در شکل ۵ تاریخچهٔ زمانی شتاب‌نگاشت ورودی ارائه شده است.



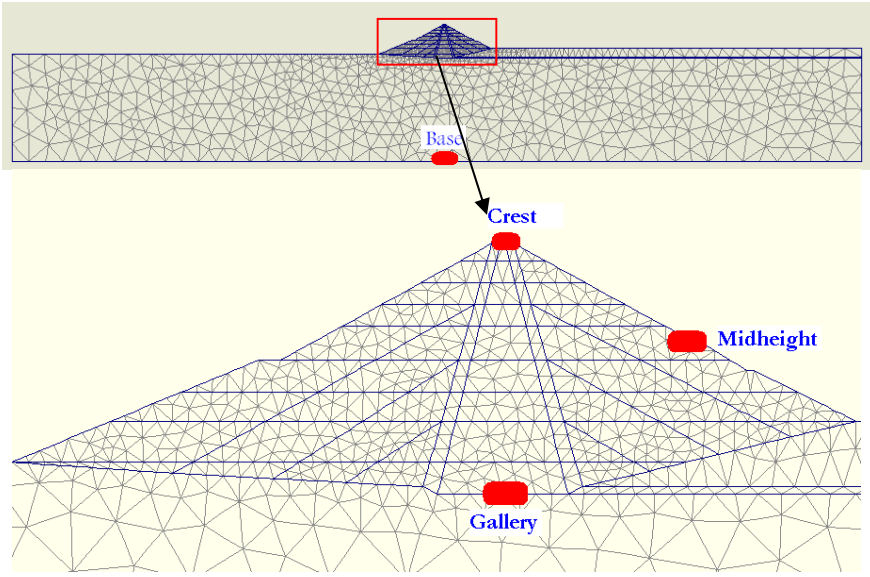

**شکل ۵.. شتاب‌نگاشت محرک ورودی اعمال شده به سد**

در حالات مختلف تحلیل دینامیکی، شتاب‌نگاشت ثبت شده در گالری سد به‌عنوان محرک ورودی به سیستم سد-پی در پایین مدل اعمال شده (شکل۵) و پاسخ‌ها در گالری، میانه و نیـز

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

تاج سد محاسبه شده است. در شکل ۶ مدل استفاده شده در تحلیل‌های عددی و نیز محل ایستگاه‌های ثبت شتاب‌نگاشت در مقطع سد مسجد سلیمان نشان داده شده است.



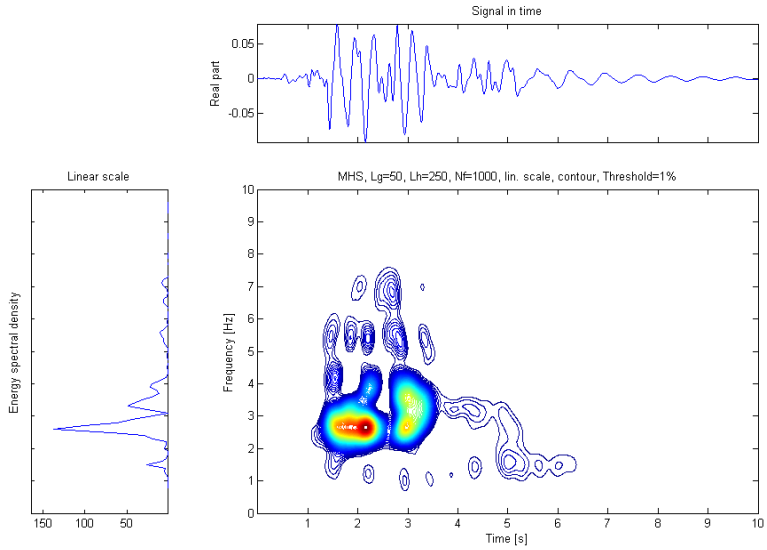

**شکل ۶. شکل بالا: مدل سد-پی درنظر گرفته شده در تحلیل‌های دینامیکی به همراه محل اعمال محرک ورودی در Base – شکل پایین: مقطع بزرگ‌نمایی شده سد به همراه ایستگاه‌های ثبت شتاب‌نگاشت در تاج، میانهٔ ارتفاع و گالری**

علاوه بر پردازش سیگنال‌ها در حوزهٔ زمان (مقایسهٔ تاریخچهٔ زمانی نگاشت‌های محاسباتی و ثبت شده و محاسبه نسبت PGA تاج و میانه سد به گالری) و نیز حوزهٔ فرکانس (تبدیل فوریه، منحنی بزرگ‌نمایی در ارتفاع با در نظر گرفتن دو حالت: دامنه طیف فوریه نگاشت‌ها و سطح زیر منحنی طیف فوریه)، نگاشت‌های به‌دست آمده از تحلیل و نیز نگاشت‌های ثبت شده در حوزهٔ زمان – فرکانس پردازش و تحلیل شدند.

در زمینهٔ توزیع‌های زمان-فرکانس اشاره به این نکات الزامی است که پدیده‌هایی از جمله انفجار و زمین‌لرزه، پدیده‌های نامانایی هستند که دامنهٔ ارتعاش و محتوای فرکانسی سیگنال با زمان تغییر می‌کند. در مواقعی نیاز به تشریح کامل پدیدهٔ نامانایی رکورد وجود دارد و نیز پاسخ‌گو نبودن تحلیل در حوزهٔ زمان و یا فرکانس، باعث روی‌کرد به استفاده از روش مرکب

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

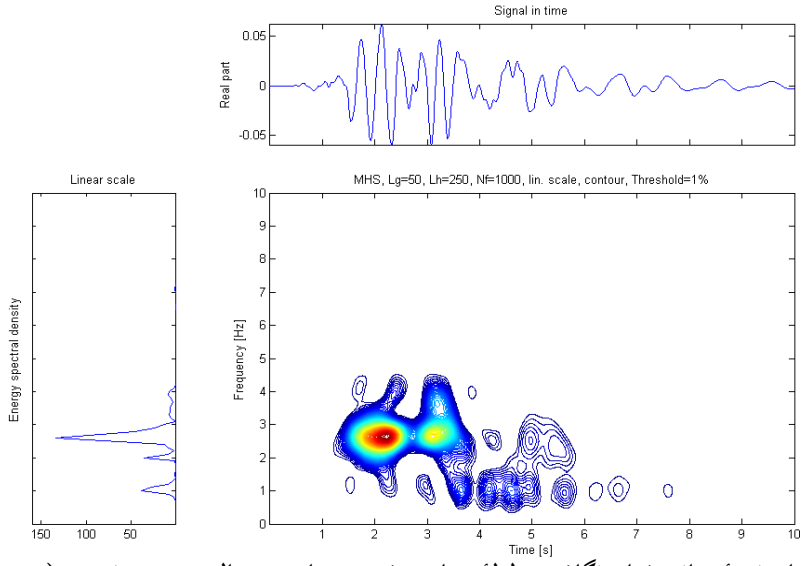
تحلیل در حوزهٔ زمان- فرکانس می‌شود. با چنین تحلیل‌هایی می‌توان اطلاعاتی از نحوهٔ تغییرات محتوای فرکانسی سیگنال با زمان به‌دست آورد و رکوردهای نامانا را تجزیه و تحلیل کرد. از سوی دیگر، در برخی از بررسی‌های پردازش سیگنال به منظور استخراج پارامترهای مودی سیستم، هنگامی که تابع چگالی طیفی دارای قله‌های نزدیک به هم و یا روی هم افتاده باشد، مشخص کردن فرکانس‌های تشدید و اشکال مودی با مشکلاتی مواجه می‌شود که به منظورگریز از این مشکلات، از توزیع حوزهٔ زمان-فرکانس و یا تبدیل موجک استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر صرفاً به ارائه نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌ها در حوزهٔ زمان-فرکانس پرداخته می‌شود. در شکل‌های ۷ الی ۱۳ نتایج تحلیل‌های حوزهٔ زمان-فرکانس شتاب‌نگاشت‌های محاسبه شده در تاج سد ارائه شده است. معیار در نظر گرفته شده، وضوح اولین فرکانس سد یعنی فرکانس یک هرتز بوده است. لازم به ذکر است فرکانس مزبور بر اساس پردازش نگاشت‌های زلزله و انفجار ثبت شده در سد مسجد سلیمان به‌دست آمده است [۱۱].



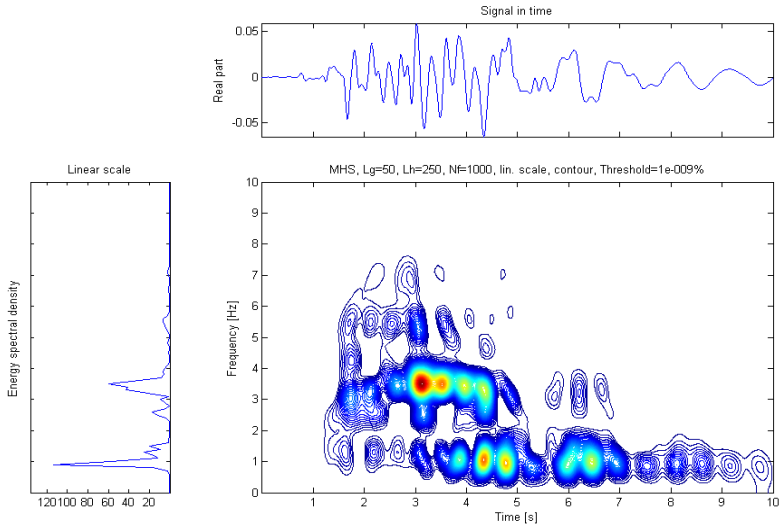

**شکل ۷. تاریخچهٔ زمانی شتاب‌نگاشت زلزلهٔ محاسبه شده در تاج در حالت پی صلب (تصویر بالا)، چگالی طیفی انرژی (تصویر سمت چپ) و تبدیل حوزهٔ زمان – فرکانس نگاشت مذکور(تصویر سمت راست)**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]



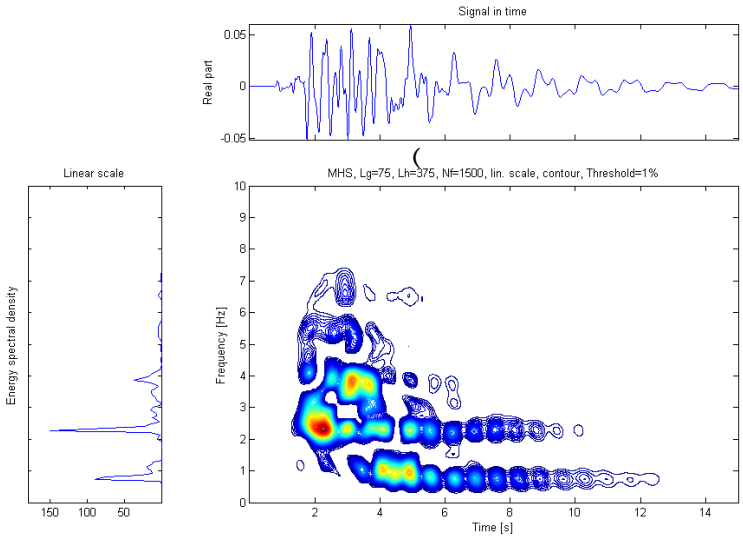

**شکل ۸. تاریخچهٔ زمانی شتاب‌نگاشت زلزلهٔ محاسبه شده در تاج در حالت پی بدون جرم (تصویر بالا)، چگالی طیفی انرژی (تصویر سمت چپ) و تبدیل حوزهٔ زمان- فرکانس نگاشت مذکور(تصویر سمت راست)**



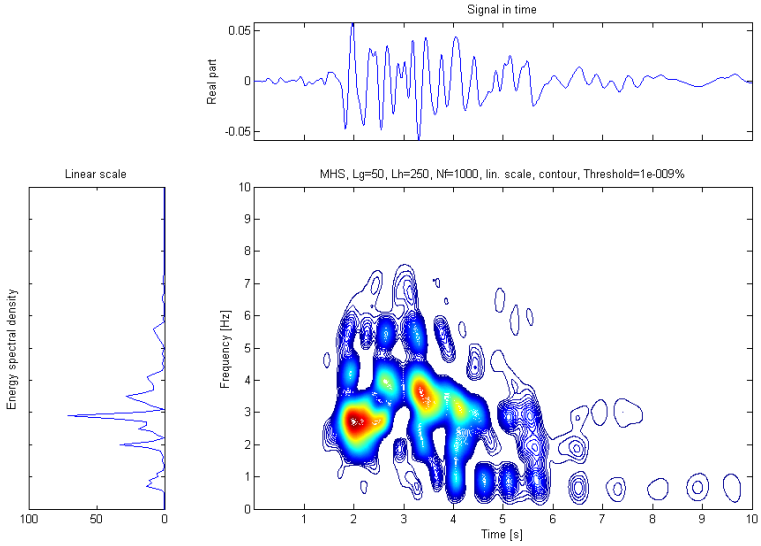

**شکل ۹. تاریخچهٔ زمانی شتاب‌نگاشت زلزلهٔ محاسبه شده در تاج در حالت پی با ۲۵ درصد جرم (تصویر بالا)، چگالی طیفی انرژی (تصویر سمت چپ) و تبدیل حوزهٔ زمان- فرکانس نگاشت مذکور(تصویر سمت راست)**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]



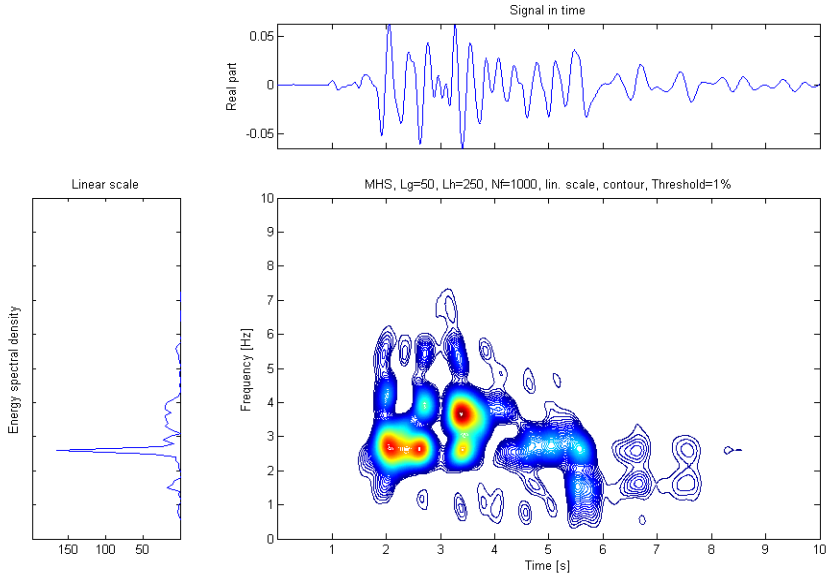

**شکل ۱۰. تاریخچهٔ زمانی شتاب‌نگاشت زلزلهٔ محاسبه شده در تاج در حالت پی با ۵۰ درصد جرم (تصویر بالا)، چگالی طیفی انرژی (تصویر سمت چپ) و تبدیل حوزهٔ زمان - فرکانس نگاشت مذکور(تصویر سمت راست)**



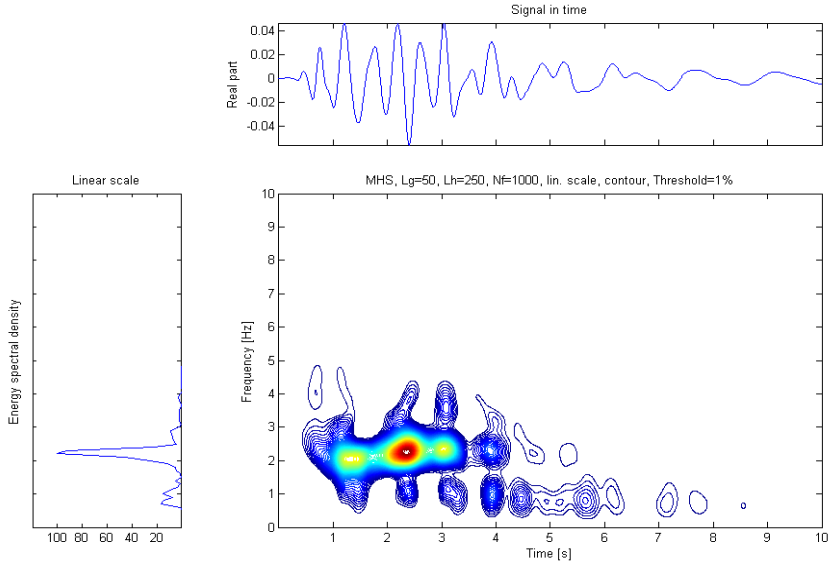

**شکل ۱۱. تاریخچهٔ زمانی شتاب‌نگاشت زلزلهٔ محاسبه شده در تاج در حالت پی با ۷۵ درصد جرم (تصویر بالا)، چگالی طیفی انرژی (تصویر سمت چپ) و تبدیل حوزهٔ زمان- فرکانس نگاشت مذکور(تصویر سمت راست)**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]




**شکل ۱۲. تاریخچهٔ زمانی شتاب‌نگاشت زلزلهٔ محاسبه شده در تاج در حالت پی با جرم کامل (تصویر بالا)، چگالی طیفی انرژی (تصویر سمت چپ) و تبدیل حوزهٔ زمان – فرکانس نگاشت مذکور(تصویر سمت راست)**




**شکل ۱۳. تاریخچهٔ زمانی شتاب‌نگاشت زلزلهٔ محاسبه شده در تاج در حالت پی با جرم کاهش یابنده (تصویر بالا)، چگالی طیفی انرژی (تصویر سمت چپ) و تبدیل حوزهٔ زمان – فرکانس نگاشت مذکور(تصویر سمت راست)**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

## بحث و نتیجه‌گیری

در نتیجه‌گیری نهایی و تأثیرگذار این بخش از قدرت فراوان روش توزیع زمان-فرکانس به طور مؤثری در پردازش رکوردهای ضعیف زلزله ثبت شده و محاسبه شده استفاده شده است و فرکانس مودی اول سد (به‌دست آمده بر اساس پژوهش‌های جامع پیشین) به‌عنوان معیاری برای برآورد نزدیک‌ترین پاسخ سد به پاسخ ثبت شده در حین زلزله در نظر گرفته شده است. با استفاده از نتایج توزیع‌های زمان-فرکانس در حالت‌های مختلف جرم پی درنظر گرفته شده، بهترین پاسخ‌ها در مقایسه با پاسخ‌های ثبت شده در بدنهٔ سد، مربوط به پی با ۲۵ درصد و ۵۰ درصد جرم بوده است و هم‌چنین کشیدگی مقادیر فرکانس‌ها در محدودهٔ به خصوص اولین فرکانس مودی سد در طول تاریخچهٔ زمانی شتاب‌نگاشت، به خوبی در نتایج مربوط به پی با ۲۵ درصد جرم مشاهده می‌شود. لازم است به این نکته اشاره شود که نتایج بر اساس رکوردهای زلزله ضعیف، استخراج گردیده و در استفاده از نتایج به‌دست آمده در رکوردهای قوی، بررسی‌های تکمیلی لازم خواهد بود. نقطه قوت توزیع‌های زمان-فرکانس در تحلیل رکوردهای نامانای زلزله، در آشکار شدن یک فرکانس مشخص در طول زمان یک نگاشت و نیز ظهور فرکانس‌های معین در یک لحظهٔ به‌خصوص از نگاشت، قابل تشخیص است.

نتیجه بررسی موردی انجام گرفته در این تحقیق با ابعاد فرض شده پی و رکوردهای ضعیف ثبت شده زلزله، مناسب‌ترین حالت، در نظر گرفتن جرمی زیر ۵۰ درصد در تحلیل‌های اجزای محدود است و بنا بر این می‌توان گفت که هر دو فرض پی بدون جرم و پی با جرم کامل دارای تقریب زیادی هستند.

## منابع

1. Guan, F. Moore, I.D, New Techniques for Modeling Reservoir-Dam and Foundation-Dam Interaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 16 No .4 (1997) 285-293.
2. Dakoulas P., Abouseeda H., Response of Earth Dams to Rayleigh Waves Using Coupled FE-BE Formulation, J. Engng. Mech. ASCE 23 (1997) 1311-1320.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]

3. Papalou, A., Bielak, J., Seismic Elastic Response of Earth Dams with Canyon Interaction, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , Vol. 127, No.5 (2001) 446-453.
4. Papalou, A. Bielak, J. Nonlinear Seismic Response of Earth Dams with Canyon Interaction, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No.1 (2004) 103-110.
5. Sarmiento, N., Romo, M. Marinez, S., Marengo, H. "Seismic Behavior of Concrete-faced Rockfill Dams, Considering a Spatial Variation of Motions along the Rigid Base", 13th world Conference on Earthquake Engineering, Paper No.85, 2004
۶. داودی، محمد و جواهری، علی؛ "ارزیابی پایداری سطوح مستعد لغزش در سد خاکی مسجد سلیمان در حالات تحریک لرزه‌ای ورودی یک‌نواخت و غیریک‌نواخت"، مجله علمی-پژوهشی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (JSEE) سال ۹، شماره ۴،(۱۳۸۶) صفحات ۲۲۹-۲۳۹.
7. Kramer, Steven, Geotechnical Earthquake Engineering (2007).
8. Csiberkeley, "Soil-Structure Interaction", http://www.csiberkeley.com/Tech-info/16.pdf (2002).
9. Clough, R W., Penzein, J., "Dynamics of Structures", McGraw-Hill (1975).
۱۰. داودی، محمد؛ ***ارزیابی مشخصات دینامیکی سدهای خاکی با استفاده از آزمایش‌های ارتعاش محیطی و اجباری***، رساله دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۲).
۱۱. عامل‌سخی، ***ارزیابی مشخصات و رفتار دینامیکی سدهای خاکی-سنگریزه‌ای با استفاده از نگاشت‌های ثبت شده و تحلیل‌های عددی (بررسی موردی سد مسجد سلیمان)***، رساله دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۷).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.5.8 ]