

## 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

پذیرش ۸۸/۷/۱۴

تاریخ: دریافت ۸۸/۳/۲۶

### چکیده

بررسی رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی یکی از مهم‌ترین موضوع‌های قابل طرح در دانش ژئوتکنیک است. در بررسی رفتار سدها در برابر پدیده زلزله، بهترین روش، تدقیق مدل‌های عددی و تحلیلی با پاسخ‌های واقعی ثبت شده در بدنه سد است. در دسترس بودن شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده زلزله بر روی سد خاکی-سنگریزه‌ای مسجد سلیمان، زمینه 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 بدنه و پی سد مسجد سلیمان در محدوده دو بعدی صورت پذیرفته و مسئله 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 باره 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

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<sup>۱</sup>، هندسه سد، شکل دره، بارگذاری دینامیکی و بحث اندرکنش سد- مخزن- پی<sup>۲</sup> 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 شبکه‌شتاب‌نگاری 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 همه‌نگاشت‌های 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 مسئله اندرکنش سد-پی از جرم پی صرف‌نظر می‌کنند.

<sup>1</sup> - Strong Ground Motion

<sup>2</sup> Foundation - Reservoir - Dam Interaction

صرف نظر 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 مسئله اندرکنش سد-پی را به دنبال دارد به نحوی که نتایج به دست 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 بدنه 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<sup>۳</sup> 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 لایه خاکی پی (محیط نزدیک سد) ممکن است به صورت غیرخطی عمل کند؛ حال آن‌که باقیمانده نیم‌فضا (محیط اطراف سد) به صورت الاستیک خطی رفتار می‌کند [۲]. پاپالوف<sup>۴</sup> و بیلاک<sup>۵</sup> 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 بردارنده سد نیز به صورت نیم فضای الاستیک، مدل گردید [۳]. برای بررسی اثر انعطاف‌پذیری دره و نیز زاویه موج مهاجم بر روی پاسخ لرزه‌ای سد، مدلی از سد لاولیتا<sup>۶</sup> تهیه شد. نتایج نشان می‌دهد که اندرکنش سد - پی به طور مشخص بر روی رفتار

<sup>3</sup> Dakoulas

<sup>4</sup> Papalou

<sup>5</sup> Bielak

<sup>6</sup> La Villita

لرزه‌ای سد اثر می‌گذارد به نحوی که در نظر گرفتن اندرکنش سد-پی باعث ایجاد کرنش‌های کوچک‌تری نسبت به حالت فرض دره صلب شده است که دلیل این امر ممکن است بازتابش 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 نشان‌دهنده این مطلب است که اثرات اندرکنش سد-پی در تمام فرکانس‌ها و برای حالات خطی و غیرخطی، رخ می‌دهد [۴]. سارمینتو<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۴ با در نظر گرفتن تغییر محرک ورودی تکیه‌گاهی بر روی 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 حوزه نزدیک<sup>۸</sup> 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 به دست 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

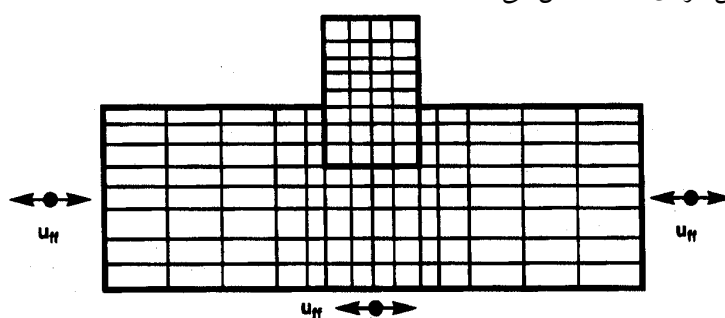
برای حل مسئله اندرکنش خاک-سازه روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های مستقیم<sup>۹</sup>، FE-BE، روش حرکت افزوده<sup>۱</sup>، روش چند گامه<sup>۱۱</sup> اشاره کرد. از آن‌جا

<sup>7</sup> Sarmiento

<sup>8</sup> Near Field

<sup>9</sup> Direct method

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 شکل ۱ 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]

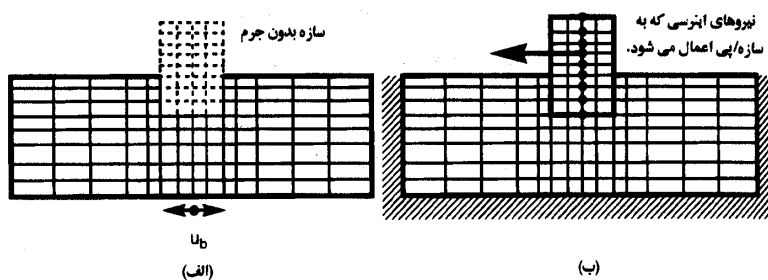
در روش چند گامه فرض اصلی برقرار بودن اصل جمع آثار قواست که خود متضمن رفتار خطی است؛ به همین سبب این روش به تحلیل سیستم‌های خطی محدود می‌شود. در روش زیرسازه خاک-سازه به مجموعه‌ای از زیر مسئله‌های ساده‌تر تقسیم می‌شود و هر مسئله جداگانه تحلیل و در مرحله نهایی تحلیل، بر پایه اصل جمع آثار قوا، نتایج با هم 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<sup>۱۲</sup> و اندرکنش اینرسی<sup>۱۳</sup> است

<sup>10</sup> Added motion

<sup>11</sup> Multi-step method

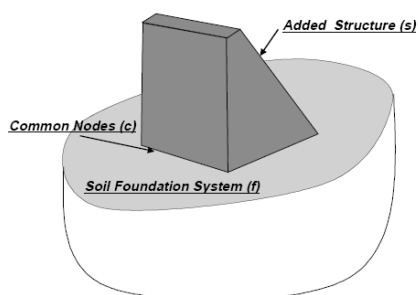
<sup>12</sup> Kinematic

[۷]. در شکل ۲ روش چندگانه 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 مسئله اندرکنش سد - پی

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

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = R \quad (1)$$

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 مسئله اندرکنش سد-پی به حل این معادله باز می‌گردد. در شکل ۳ 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

<sup>13</sup> Inertial

باقیمانده 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:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M_{ss}]\{\ddot{r}_x\} + \{\ddot{r}_y\} + \{\ddot{r}_z\} \quad (2)$$

در این رابطه، ماتریس‌های  $M$ ،  $C$  و  $K$  به ترتیب 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  $\ddot{r}_i(t)$  معرف مؤلفه‌های شتاب گستره 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 همه 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 این صورت با صرف نظر 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 تشعشی<sup>۱۴</sup> فونداسیون صرف نظر می‌شود. بر این اساس به نظر نمی‌رسد که حل دقیق مسئله اندرکنش با صرف نظر نمودن از

<sup>۱۴</sup>- radiation damping

جرم پی از طرفین معادله مذکور صورت پذیرد. از سوی دیگر، در نظر گرفتن تمام جرم پی در محاسبات نیز به خودی خود می‌تواند باعث ایجاد خطا در محاسبات و تحلیل نتایج شود. وجود شبکه شتاب‌نگاری 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 همه نگاهت‌های ثبت شده زلزله به ارزیابی دقیق‌تر مشخصات دینامیکی (شامل فرکانس‌ها، اشکال و میرایی‌های مودی) و نیز رفتار دینامیکی سد مذکور و بررسی مسئله اندرکنش سد-پی پرداخته شود.

### مشخصات سد مسجد سلیمان

سد و نیروگاه مسجد سلیمان در مختصات  $E 49/24$  و  $N 32/02$  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  $2/5$  کیلومتری شمال ساختگاه سد قرار دارد و باعث ایجاد زلزله-های نسبتاً شدیدی در منطقه احداث سد مسجد سلیمان شده است. ساخت بدنه 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 فاصله ۲۵ کیلومتری شمال شرقی شهر مسجد سلیمان و در ۲۶ کیلومتری پایین دست سد شهید عباس‌پور احداث شده است. این سد دارای هسته رسی قائم و پوسته سنگ‌ریزه‌ای و حجم بدنه‌ای در حدود  $13/4$  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 زمینه 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.



شکل ۴. موقعیت سد مسجد سلیمان بر روی نقشه استان خوزستان

### مشخصات مصالح سد

در تحلیل‌های استاتیکی، برای مصالح بدنه 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 شده مشاور [۱۰] و مطابق جدول ۱ 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.

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

$E (\times 10^8 N/m^2)$					$\psi$ (درجه)	$\phi'$ (درجه)	$C'$ ( $\times 10^5$ $N/m^2$ )	$K$ (cm/s)	$\nu$	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	مصالح	کسته
عمق (m)												
۱۴۸	۹۳	۴۳	۳۱	۱۲								
۱/۲	۰/۷	—	۰/۳	—	۰	۱۹	۰/۴	$10^{-8}$	۰/۳۴	۲۲۰۰	اشباع	پوسته
۱/۴۳	۱/۱۳	۰/۸۶	—	۰/۸۶	۲۲	۴۵	۰	$10^{-5}$	۰/۴	۲۲۰۰	خشک 3A, 3C	
۱/۲۴	۰/۹۵	۰/۶۷	—	—	۱۸	۳۷	۰	$10^{-5}$	۰/۳۸	۲۲۰۰	خشک 3B	
۱/۳۳	۱/۰۹	—	۰/۶۴	—	۲۲	۴۵	۰	$10^{-5}$	۰/۴	۲۳۵۰	اشباع	فیلتر
۱/۵۵	۱/۰۶	—	۰/۷	—	۰	۴۰	۰	$10^{-5}$	۰/۳۶	۲۲۰۰	مرطوب	
۱/۴۴	۰/۹۴	—	۰/۴۹	—	۰	۴۰	۰	$10^{-5}$	۰/۳۶	۲۳۵۰	اشباع	

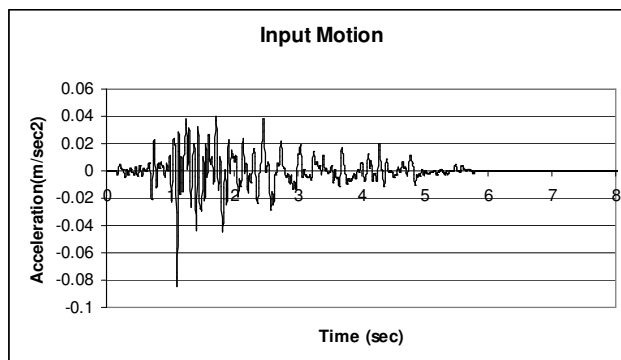
جدول ۲. پارامترهای استفاده شده در مرحله تحلیل دینامیکی سد مسجدسلیمان [۱۰]

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

$V_s(m/s)$	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				۰/۳	۲۵۰۰	تکیه‌گاه چپ	فونداسیون	
$G_0 * 10^9 (N/m^2)$	۳								
$V_s(m/s)$	۱۲۰۰								
$E_0 * 10^9 (N/m^2)$	۱۰/۹۲				۰/۳	۲۵۰۰	فونداسیون	فونداسیون	
$G_0 * 10^9 (N/m^2)$	۴/۲								
$V_s(m/s)$	۱۳۰۰								

### نتایج تحلیل‌های اندرکنش سد-پی

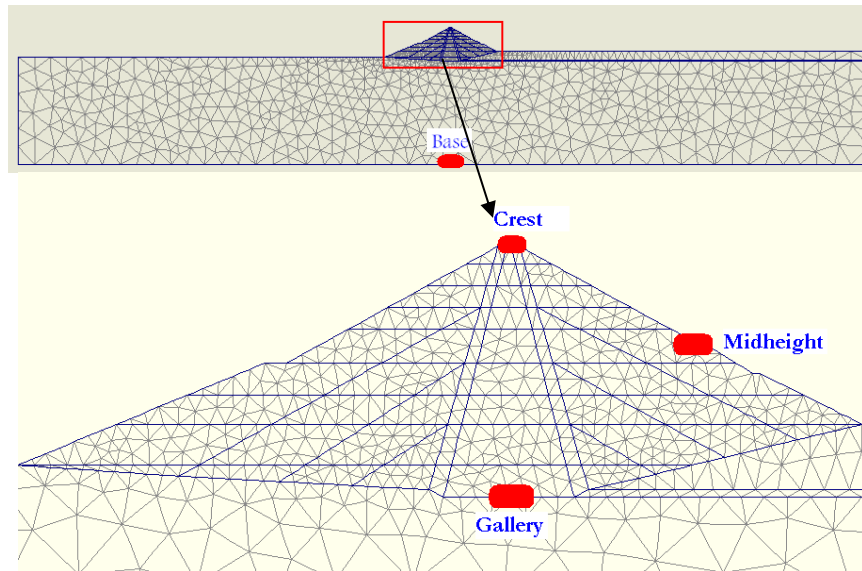
در بخش تحلیل‌های دینامیکی بدنه سد به منظور بررسی اثرات اندرکنش سد-پی و نیز بررسی این نکته که چه جرمی از پی باید در تحلیل‌های دینامیکی سد وارد گردد، حالت‌های مختلف جرم پی به صورت صلب، بدون جرم، با ۲۵ درصد، ۵۰ درصد، ۷۵ درصد، ۱۰۰ درصد جرم و نیز با جرم کاهش یابنده در نظر گرفته شده است. در شکل ۵ تاریخچه زمانی 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 به عنوان محرک ورودی به سیستم سد-پی در پایین مدل اعمال شده (شکل ۵) و پاسخ‌ها در گالری، میانه و نیز

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.

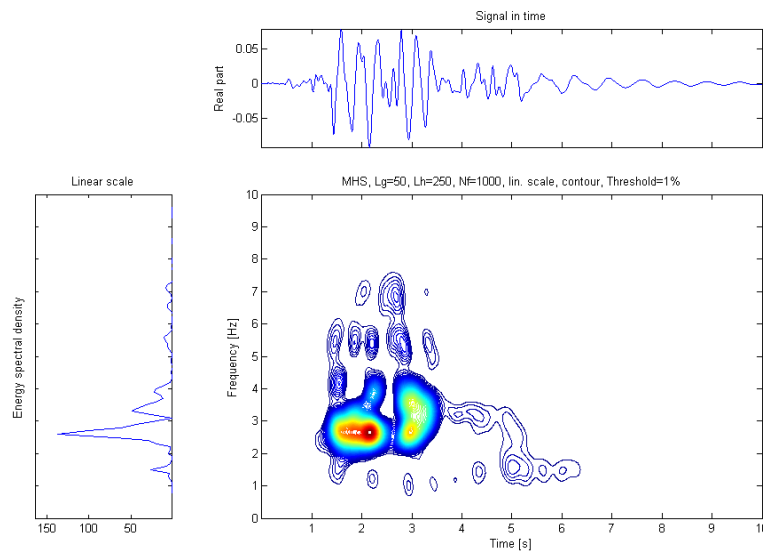


شکل ۶. شکل بالا: مدل سد-پی در نظر گرفته شده در تحلیل‌های دینامیکی به همراه محل اعمال محرک ورودی در **Base** - شکل پایین: مقطع بزرگ‌نمایی شده سد به همراه ایستگاه‌های ثبت شتاب‌نگاشت در تاج، میانه ارتفاع و گالری

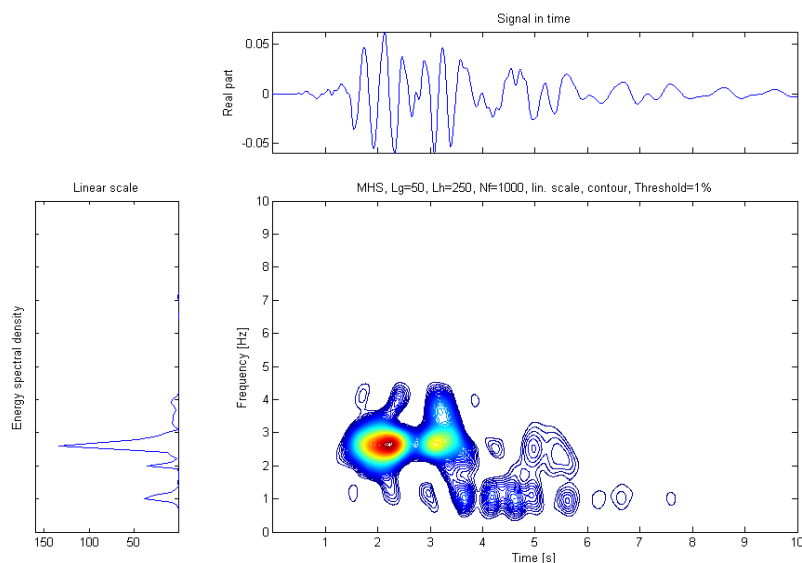
علاوه بر پردازش سیگنال‌ها در حوزه زمان (مقایسه تاریخیچه زمانی نگاشت‌های محاسباتی و ثبت شده و محاسبه نسبت  $PGA$  تاج و میانه سد به گالری) و نیز حوزه فرکانس (تبدیل فوریه، منحنی بزرگ‌نمایی در ارتفاع با در نظر گرفتن دو حالت: دامنه طیف فوریه نگاشت‌ها و سطح زیر منحنی طیف فوریه)، نگاشت‌های به دست آمده از تحلیل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

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

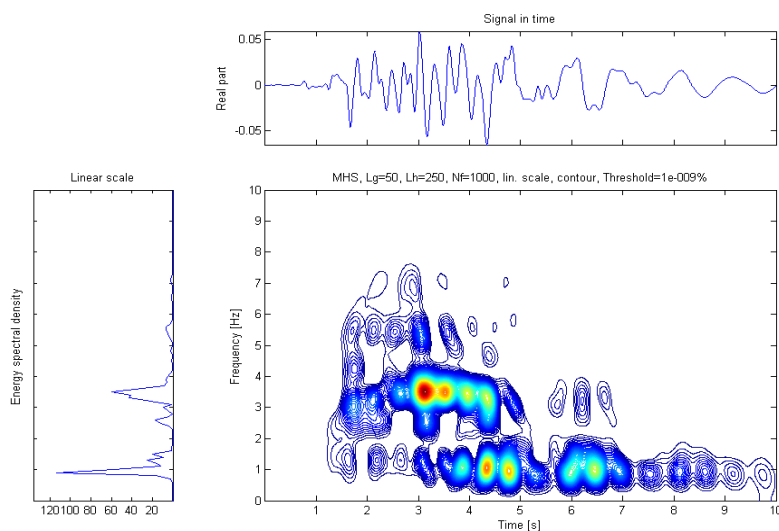
تحلیل در حوزه زمان-فرکانس می‌شود. با چنین تحلیل‌هایی می‌توان اطلاعاتی از نحوه تغییرات محتوای فرکانسی سیگنال با زمان به دست آورد و رکوردهای نامان را تجزیه و تحلیل کرد. از سوی دیگر، در برخی از بررسی‌های پردازش سیگنال به منظور استخراج پارامترهای مودی سیستم، هنگامی که تابع چگالی طیفی دارای قله‌های نزدیک به هم و یا روی هم افتاده باشد، مشخص کردن فرکانس‌های تشدید و اشکال مودی با مشکلاتی مواجه می‌شود که به منظور گریز از این مشکلات، از توزیع حوزه زمان-فرکانس و یا تبدیل موجک استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر صرفاً به ارائه نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها در حوزه زمان-فرکانس پرداخته می‌شود. در شکل‌های ۷ الی ۱۳ نتایج تحلیل‌های حوزه 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 نگاهت‌های زلزله و انفجار ثبت شده در سد مسجد سلیمان به دست آمده است [۱۱].



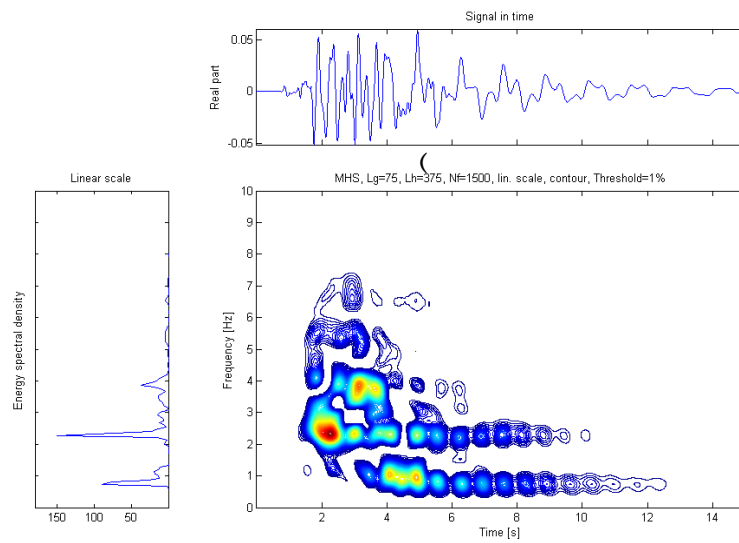
شکل ۷. تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت زلزله محاسبه شده در تاج در حالت پی صلب (تصویر بالا)، چگالی طیفی انرژی (تصویر سمت چپ) و تبدیل حوزه زمان - فرکانس نگاهت مذکور (تصویر سمت راست)



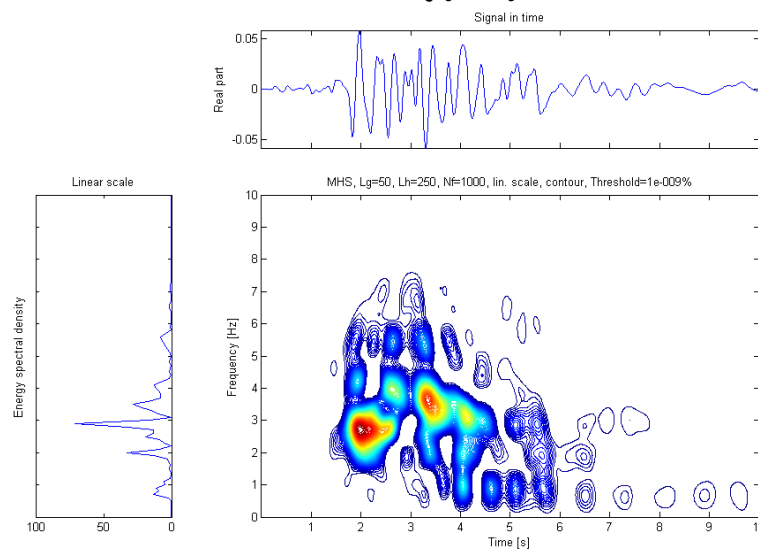
شکل ۸. تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت زلزله محاسبه شده در تاج در حالت پی بدون جرم (تصویر بالا)، چگالی طیفی انرژی (تصویر سمت چپ) و تبدیل حوزه زمان-فرکانس نگاشت مذکور (تصویر سمت راست)



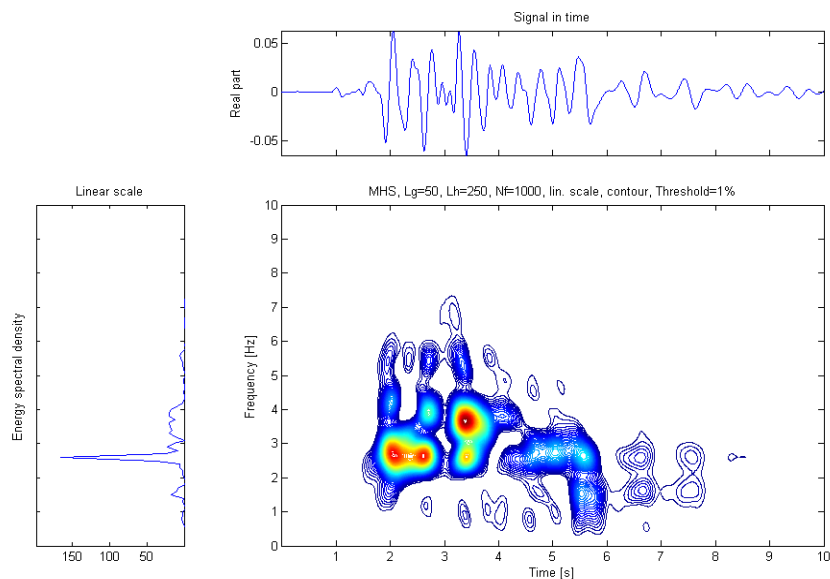
شکل ۹. تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت زلزله محاسبه شده در تاج پی با ۲۵ درصد جرم (تصویر بالا)، چگالی طیفی انرژی (تصویر سمت چپ) و تبدیل حوزه زمان-فرکانس نگاشت مذکور (تصویر سمت راست)



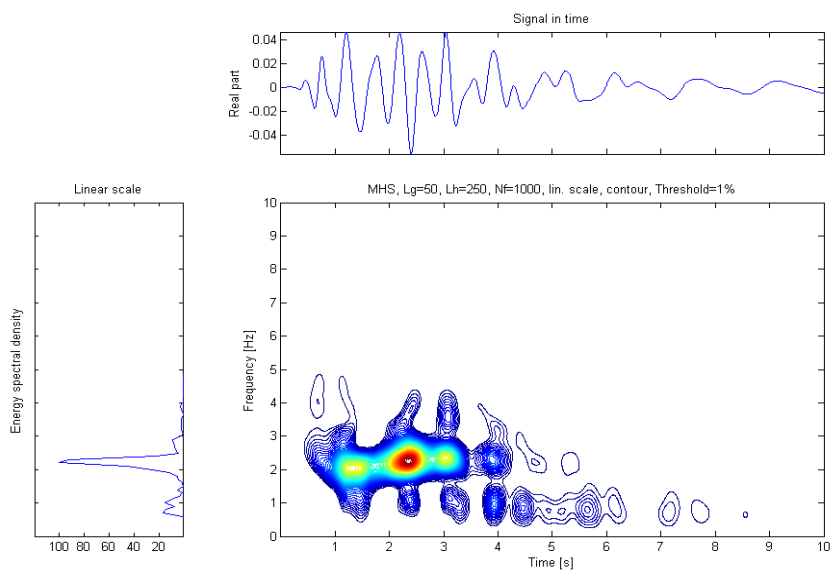
شکل ۱۰. تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت زلزله محاسبه شده در تاج در حالت پی با ۵۰ درصد جرم (تصویر بالا)، چگالی طیفی انرژی (تصویر سمت چپ) و تبدیل حوزه زمان - فرکانس نگاشت مذکور (تصویر سمت راست)



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



شکل ۱۲. تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت زلزله محاسبه شده در تاج در حالت پی با جرم کامل (تصویر بالا)، چگالی طیفی انرژی (تصویر سمت چپ) و تبدیل حوزه زمان - فرکانس نگاشت مذکور (تصویر سمت راست)



شکل ۱۳. تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت زلزله محاسبه شده در تاج در حالت پی با جرم کاهش یافته (تصویر بالا)، چگالی طیفی انرژی (تصویر سمت چپ) و تبدیل حوزه زمان - فرکانس نگاشت مذکور (تصویر سمت راست)

### 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 در نظر گرفته شده، بهترین پاسخ‌ها در مقایسه با پاسخ‌های ثبت شده در بدنه سد، مربوط به پی با ۲۵ درصد و ۵۰ درصد جرم بوده است و همچنین کشیدگی مقادیر فرکانس‌ها در محدوده به خصوص اولین فرکانس مودی سد در طول تاریخچه 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 لحظه 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.

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", 13<sup>th</sup> 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).