نشریه علمی ـ پژوهشی سد و نیروگاه برق‌آبی ایران
سال اول / شماره سوم / زمستان ۱۳۹۳

Iranian Dam and Hydroelectric PowerPlant
First Year / No. 3 / March 2015

بررسی اثر تراکم و سختی پی در رفتار سدهای خاکی تحت بارگذاری لرزه‌ای

*مقداد فاضلی[۱]
چنگیز فولادی نشتا[۲]
فرید اجلالی[۳]

چکیده

پایداری و سلامت سدهای خاکی، موضوعی است که در سال‌های اخیر، پژوهشگران زیادی آن را بررسی کرده‌اند. آنها از روش‌ها و الگوهای گوناگونی برای بررسی پایداری این سدها استفاده کرده‌اند. برای تحلیل سدهای خاکی در برابر زلزله، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که می‌توان از میان آنها به روش گران‌روی ارتجاعی (ویسکوالاستیک) و روش شبه ایستایی (استاتیکی) اشاره کرد. هرچند روش‌های پیش‌گفته، هرکدام در جای خود قابل استفاده هستند، اما هیچ‌گاه نمی‌توانند جایگزین تحلیل پویایی (دینامیکی) برای سدها شوند. بررسی عوامل و مؤلفه‌های مؤثر در تحلیل پویایی سدها یکی از زمینه‌های پژوهشی است که کار بر روی این زمینه می‌تواند پژوهشگران و طراحان را در انتخاب مصالح مناسب و شرایط الگودهی دقیق‌تر یاری دهد. در این پژوهش به بررسی شرایط ساختگاهی (اثر وجود پی) بر رفتار پویایی سدهای خاکی پرداخته شده و از روش پی بدون جرم با شرط مرزی نزدیک و ساده به عنوان متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در زمینه الگوسازی پی استفاده شده است. اثر طیف‌های زلزله مصنوعی با بسامدهای مختلف و دامنه ثابت در بررسی اثر پی، لحاظ شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر سختی پی تأثیر قابل توجهی در پاسخ سازه سد (تغییر مکان و دوره نوسان) دارد که اثر پی باید در رفتار سدهای خاکی لحاظ گردد.

واژه‌های کلیدی

تحلیل پویایی، شرایط ساختگاهی، پی بدون جرم، طیف زلزله مصنوعی، سدهای خاکی.

۱. * دانش‌آموخته کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکز، تهران، ایران. maysam.fazeli57@gmail.com
۲. شرکت پیمانکاری پیماب، سهامی خاص، تهران، ایران.
۳. هیئت علمی دانشگاه پیام نور.
تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۸

مقدمه

سابقه پژوهش‌های انجام‌یافته در زمینه تحلیل پویایی سدهای خاکی ریشه در اواسط قرن بیستم دارد. تاکنون پژوهشگران بسیاری بر روی الگوسازی سد و پی که شامل معادلات و هم‌چندی‌های حاکم، شرایط مرزی و کاربرد آنها در تحلیل‌های پویایی می‌باشد، مطالعه کرده‌اند. این مطالعات، بیشتر به بررسی شرایط مرزی مسئله در اطراف پی و تأثیر آن بر رفتار واقعی سازه‌هایی نظیر سد می‌پردازد. در ابتدا به روش‌های بررسی الگوسازی سد و پی پرداخته می‌شود و اجزای مورد استفاده در این روش‌ها اشاره می‌گردد. این شرایط مرزی شامل اجزای نامحدود، شرایط جذب انرژی و شرایط مرزی لایه‌های میراگر انرژی است. اگرچه در این پژوهش از شیوهٔ شرایط مرزی ساده و پی بدون جرم استفاده شده است، ولی به‌صورت فراگیر به الگوسازی اندرکنش سد، پی و پژوهش‌های جامع در این زمینه پرداخته نشده است. روش عددی[1] مورد استفاده در بیشتر این مطالعات روش جزء محدود[2] می‌باشد. روش جزء محدود به‌طور گسترده‌ای با جزءبندی سازه‌ها برای حل عددی مورد استفاده قرار گرفته است که در این پژوهش، از آن روش استفاده شده است.

تحلیل اندرکنش پی و سدهای خاکی

از میان شرایط مرزی مرسوم در تحلیل‌های اندرکنش، شرایط مرزی ساده، اولین و ساده‌ترین شرط مرزی به‌کار برده شده است. برای اولین بار فین و خانا[3] (۱۹۶۶) یک سد خاکی را در لایه‌ای غیرصلب به‌صورت دوبعدی و با استفاده ازاجزای محدود الگو و تحلیل کردند. رفتار مصالح ارتجاعی، فرض شد و چنین نتیجه‌گیری گردید که اندرکنش سد و تکیه‌گاه، تابعی از نسبت دوره ارتعاش سد و لایه است.

شوپرا و پرومالسامی[4] (۱۹۶۹) یک سد خاکی دو بعدی با ارتفاع ۱۰۰ متر مستقر بر روی محیط گران‌رو را تحلیل کردند.

در این پژوهش، تکیه‌گاه سد به‌صورت محیط نیمه بی‌نهایت ارتجاعی الگو شد و تحلیل به ازای مقادیر مختلف سختی تکیه‌گاه انجام شده است. آنها چنین نتیجه‌گیری کردند که سختی تکیه‌گاه می‌تواند بسامد طبیعی و شکل حالت‌های تغییرشکل سد را تغییر دهد که پاسخ سد نیز تا حد زیادی تابع سختی تکیه‌گاه می‌باشد.

فین و ریمر[5] (۱۹۷۰) یک سد خاکی واقع بر لایه خاک ارتجاعی را تحلیل نمودند و چنین نتیجه‌گیری کردند که تأثیر اندرکنش سد و تکیه‌گاه تابعی از نسبت دوره طبیعی ارتعاش سامانه[6] سد و تکیه‌گاه به دوره تحریک می‌باشد.

شوپرا و پرومالسامی (۱۹۷۱) با بهره‌گیری از الگویی که در سال ۱۹۶۹ میلادی ارائه کرده بودند، تحلیل‌های بیشتری انجام داده و در نهایت چنین نتیجه‌گیری نمودند که در الگوی دو بعدی محیط مورد نظر برای تحلیل در هر طرف سد می‌بایست فاصله‌ای حدود دو برابر عرض قاعده سد تعریف شود تا روشن‌کننده اثرات محیط نیمه بی‌نهایت باشد.

آیدریس[7] و همکارانش درسال(۱۹۷۴) الگوی دو بعدی سد خاکی واقع بر لایه ارتجاعی را تحلیل کردند. سد و پی با اجزای محدود، الگو شده و در زیر لایه گران‌رو، تکیه‌گاه صلب قرار داده شد. پاسخ سد به سه عامل زیر، وابسته تشخیص داده شد:

۱. نسبت دوره طبیعی سد به دوره طبیعی لایه؛

۲. نسبت ضخامت لایه به عرض سد؛

۳. نسبت ضریب ارتجاعی و قابل ارتجاعی سد و تکیه‌گاه.

در تحلیل‌های پیش‌گفته، تاکنون صرفاً تأثیر صلب نبودن تکیه‌گاه لحاظ شده است، اما اعمال تحریک غیر یکنواخت و هم‌چنین میرایی هندسی محیط نیمه بی‌نهایت درنظر گرفته نشده است.

اوماچی[8] (۱۹۸۴) روش نظریه ساده‌شده‌ای برمبنای نظریه تیر برشی برای تحلیل سه‌بعدی سدهای خاکی ارائه کرد. وی هم‌چنین جهت تأمین میرایی هندسی پی از مرزهای جذب‌کننده انرژی در مرزهای سد استفاده کرد. در نتیجه این پژوهش، امکان فرض‌نمودن تکیه‌گاه صلب در شرایط سختی تکیه‌گاه بیش از ۱۰۰ برابر سختی سد، مجاز شمرده شد.

پوپوویچ[9] و همکارانش(۱۹۸۶) یک سد خاکی به ارتفاع ۸۵ متر را تحلیل پویایی کردند. اگرچه در این پژوهش، انتشار کامل امواج در محیط نیمه بی‌نهایت درنظر گرفته نشده است،

1. Numerical method.
2. Finite Element method.
3. Finn and Khanna.
4. Chopra and Perumalswami.
5. Finn and Reimer.
6. System.
7. Idriss.
8. Ohmachi.
9. Popovici.

اما سد بر روی یک لایه آبرفت به ضخامت ۳۰ متر الگو شد و چنین نتیجه‌گیری گردید که وجود لایه آبرفتی، نقش چشمگیری در کاهش پاسخ سد دارد.

ابوسیدا و داکولاس[1] (۱۹۹۶) یک سد خاکی را با استفاده از ترکیب روش اجزای محدود و روش اجزای مرزی الگوی دوبعدی، تحلیل کردند. نتیجه این پژوهش، روشن‌کننده آن است که انعطاف‌پذیری ساختگاه تا حد زیادی بیشترین پاسخ سد را کاهش می‌دهد. برای امواجی که با زاویه قائم نسبت به افق، به سد نزدیک می‌شود و برای مقادیر ضریب مقاومت موج،[2] بین ۲ تا ۸، نتایج روش ترکیبی اجزای محدود و مرزی تقریباً مشابه نتایج به‌دست‌آمده از حل تیر برشی بر روی بستر ارتجاعی است. در مورد امواج SV، دامنهٔ پاسخ سد برای برخورد موج کمتر از ۳۰ درجه نسبت به قائم تفاوت محسوسی ندارد، ولی درخصوص موج P با افزایش زاویه برخورد از صفر تا ۴۵ درجه پاسخ سد درخصوص عامل تغییر مکان افقی، افزایش قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهد.

داکولاس و ابوسیدا (۱۹۹۸)، ترکیب روش اجزای محدود و مرزی را برای تحلیل الگوی دوبعدی یک سد خاکی در فضای زمانی به‌کار بردند. این پژوهش، بیشتر بر تأثیر متقابل رفتار غیرخطی و اندرکنش سد و تکیه‌گاه متمرکز می‌باشد که در آن دوباره بر نقش نرمی تکیه‌گاه در کاهش مقادیر پاسخ سد تاکید شده است. هرچه خاصیت‌های غیرخطی (ضریب میرایی) الگو کاهش یابد، بیشترین شتاب تاج سد نسبت به بستر افزایش می‌یابد.

پیپلو و بیلاک[3] (۲۰۰۱)، الگوی سه‌بعدی سد خاکی لاویلیتا[4] را تحت تحریک زلزله مکزیکوسیتی تحلیل کردند. به‌منظور درنظر گرفتن‌کردن اثرهای اندرکنشی محدوده از تکیه‌گاه به شعاع تقریبی معادل ۱/۵ برابر عرض تاج سد الگو گردید. آنها چنین نتیجه‌گیری کردند که درنظرگرفتن نرمی تکیه‌گاه می‌تواند پاسخ سد را به میزان یک‌دوم‌کاهش دهد.

پیپلو و بیلاک (۲۰۰۴) با اضافه کردن رفتار غیر خطی مصالح سد به کار قبلی خود، پژوهش‌هایشان را تکمیل کردند. الگوی غیرخطی بکار برده شده، یک الگوی چند لایهٔ جنبشی[5] بوده است. آنها چنین نتیجه‌گیری کردند که حتی با وجود رفتار غیرخطی مصالح سد، اندرکنش سد و تکیه‌گاه باعث کاهش قابل ملاحظه در پاسخ سد می‌شود. حائری (۱۳۷۰) یک سد خاکی را با جایگذاری شرایط مرزی گذرا در بستر آن، مورد تحلیل پویایی قرار داد. این شرایط مرزی که بر اساس معادلهٔ انتشار موج و سازگاری تغییر شکل‌ها و تنش‌ها در مرز دو محیط، ارائه شده بودند، برای جذب امواج کالبدی با جهت انتشار عمود بر مرز بکار رفته‌اند. نتایج این پژوهش چنین نشان داد که در صورت فرض پی صلب و صرف‌نظر نمودن از استهلاک انرژی از طریق پی ممکن است تشدیدهای غیرواقعی در بدنه سد ظاهر شود.

نظریه اندرکنش سد با پی

با توجه به تفاوت ساختار خاک زیر زمین از جائی به جای دیگر، هر سازه که روی زمین ساخته می‌شود، لزوم بررسی خاصیت مهندسی زمین‌شناختی[6] را در مکان‌های ساخت سد، امری اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. یکی از مسائل بسیار مهم در الگوسازی پی و شالودهٔ سازه‌ها، چگونگی عبور امواج از پی و رسیدن به سازه است که متناسب با سختی خاک و نوع موج زلزله به وجودآمده، متفاوت می‌باشند. نظریه اندرکنش خاک و سازه به بررسی هم‌زمان سازه و پی به‌صورت یک سامانه پویای مرکب اطلاق شده که با هم در برابر تحریک زلزله پاسخ می‌دهند. در مقایسه بین سازه بر روی پی صلب با سازه بر روی پی شکل‌پذیر، تغییر شکل‌ها و پیرو آن تنش‌های به وجودآمده ناشی از بارگذاری‌های ایستایی و پویایی مؤثر، تغییر نموده و نیاز به بررسی دقیق دارد.

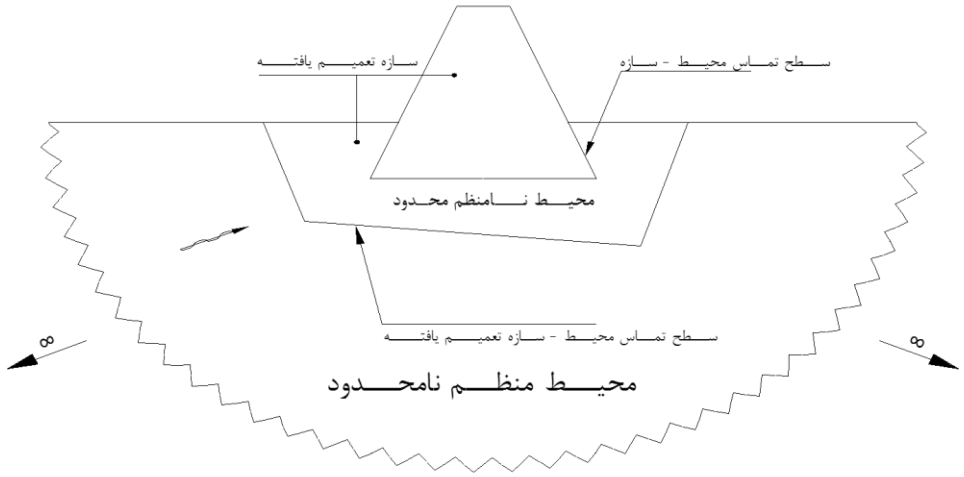
یکی از راه‌های سریع و دقیق بررسی این مهم، الگوسازی رفتار سازه روی پی هدف می‌باشد که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است. الگوهای مختلف در الگوسازی پی (شامل الگوی بدون جرم و با جرم به همراه میرایی چسبنده) بررسی شده است، ولی برای سادگی بیشتر در این مقاله، روش پی بدون جرم با شرط مرزی بدون میرایی (شرط مرزی ساده) برای الگوسازی، مورد استفاده قرارگرفته است. نتایج چنین نشان داده است که تأثیر پی در الگوسازی رفتار سد، بسیار قابل توجه بوده و باید در الگوسازی مورد توجه قرار گیرد.

1. Abouseeda and Dakoulas.
2. Impedance Ratio.
3. Papalou and Bielak.
4. La-villita.
5. Kinematic.
6. Geotechnics.

الف) روش‌های الگوسازی پی در سازه‌ها

محیط خاک همواره، به دو صورت محدود و نامحدود درنظرگرفته می‌شود. محیط محدود درکنار سازه قرارگرفته، اما محیط نامحدود تا بی‌نهایت ادامه دارد. افزون بر اینکه محیط محدود، جزئی از سازه در نظرگرفته می‌شود، رفتار پی و سازه که می‌توانند رفتار غیرخطی داشته باشند با هم درنظر گرفته می‌شوند. در حالت کلی، منظور از سطح تماس سازه با محیط بی‌نهایت با توجه به عدم توانایی در شبکه‌بندی[1] محیط نیمه بی‌نهایت می‌بایست مرزی را مشخص کرد که بالا و روی آن را شبکه‌بندی نمود؛ به این مرز در اصطلاح کران اندرکنش می‌گویند.

در شکل (۱) سازه و شرایط پی نشان داده شده است. برای الگوسازی این کران اندرکنشی دو روش مستقیم[2] (در این حالت سختی خاک اطراف سازه با الگوسازی قسمتی از خاک درنظرگرفته می‌شود و با شرط مرزی مناسب از محیط بیرون مجزا می‌گردد) و روش زیرسازها[3] (کران اندرکنش منطبق بر سطح تماس محیط- سازه) استفاده می‌گردد. هم‌چنین برای الگوسازی انتشار امواج در خاک، از دو روش پی بدون جرم[4] و روش پی جرم‌دار استفاده می‌شود.



شکل (۱): محیط‌ها و مرزهای مورد مطالعه در تحلیل‌های اندرکنشی خاک و سازه

روش مستقیم که بسیار متداول است به دو قسمت عمده تقسیم می‌گردد؛ روش پی بدون جرم و روش پی جرم‌دار. تفاوت این دو روش در الگوسازی انتشار امواج در محیط خاکی است. در حالت پی بدون جرم، از انتشار امواج محیط خاکی جلوگیری می‌شود، اما در حالت پی جرم‌دار با استفاده از میراگرهایی از بازگشت امواج جلوگیری می‌شود.

در این پژوهش از روش مستقیم با پی بدون جرم استفاده شده است.

برای مقایسه در پژوهش حاضر، روش پی با جرم و بدون جرم با شرط مرزی نزدیک، مقایسه شده‌اند، ولی برای درنظر گرفتن اثر سختی پی از روش پی بدون جرم استفاده شده است.

ب) انتشار امواج در محیط خاک و الگوسازی شرایط مرزی برای محیط‌های نیمه بی‌نهایت

به‌طورکلی امواج به دو صورت حجمی و سطحی، درون حجم خاک منتشر می‌شود. انرژی آزادشده در زیر زمین به‌صورت حرکت موجی به سطح زمین می‌رسد.

1. Mesh.
2. Direct Method.
3. Under Structure Method.
4. Massless Foundation.

موج حجمی ایجادشده به‌صورت طولی (اولیه)[1] و عرضی یا برشی (ثانویه)[2] قادر به عبور از پوسته زمین می‌باشد. هنگامی که جهت انتشار موج منطبق بر جهت حرکت ذرات باشد به آن موج طولی و زمانی که جهت انتشار موج، عمود بر جهت حرکت ذرات باشد به آن موج عرضی می‌گویند. با استفاده نظریه ارتجاعی، سرعت انتشار موج طولی، V_P، و عرضی، V_S، از رابطه‌های زیر پیروی می‌کند:

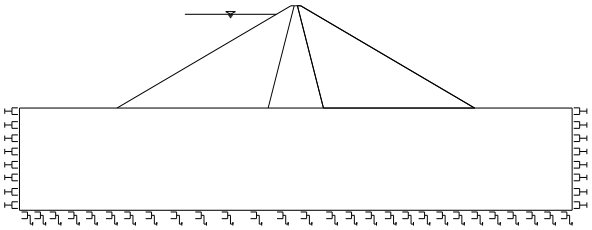
$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \qquad (۱)$$

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

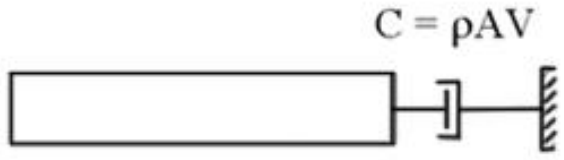
که در رابطه بالا: G مقیاس برشی خاک؛ E مقیاس ارتجاعی خاک؛ ρ چگالی توده خاک و ν ضریب پواسون[3] می‌باشد. اگر به‌طور متوسط ضریب پواسون برای پوسته زمین ۰/۲۵ درنظر گرفته شود، نسبت سرعت موج طولی به سرعت موج عرضی برابر ۱/۷۳ می باشد. روش‌های گوناگونی برای الگوسازی شرایط مرزی برای محیط‌های نیمه بی‌نهایت ارائه شده است؛ منظور از شرایط مرزی، رابطه بین تغییر مکان و نیروی اندرکنشی در مرزهاست. یکی از روش‌های مورد استفاده برای نبودن انعکاس امواج در مرزها، معادله‌سازی شرط مرزی گران‌رو[4] (الگوی لیزمر) ارائه می‌گردد. این الگو اولین بار توسط لیزمر[5] (۱۹۶۹) ارائه گردید که بر مبنای انتشار یک‌بعدی موج می‌باشد. در این روش، میرایی به‌صورت رابطه $C = \rho VA$ قرار داده شده تا موج ایجادشده را میرا نماید. بدین صورت، محیط بی‌نهایت به‌صورت محیطی محدود الگو می‌شود. در الگوسازی دو بعدی و سه بعدی اگر تقریب انتشار یک بعدی امواج را بپذیریم، می‌توان از این شرط استفاده کرد. در این صورت مقدار V در حالت موج طولی V_p و در حالت موج عرضی V_s می‌باشد. البته اگر درحالت دو بعدی و سه بعدی امواج مسطح باشند؛ یعنی به اندازه کافی از سطح تماس سازه و خاک دور شده باشیم، می‌توان تقریب انتشار یک بعدی را پذیرفت. بدین منظور باید تغییر مکان‌ها در مرزها چک شود که مشابه هم حرکت کنند.

1. Primary.
2. Secondry.
3. Poisson's Ratio.
4.Viscose.
5. Lysmer.

هم‌چنین اگر بسامد امواج، بالا باشد(در راستای یک خط مستقیم بودن انتشار امواج) می‌توان تقریب انتشار یک‌بعدی را پذیرفت. از ضعف‌های این روش آن است که تنها، امواجی را که عمود بر مرزها خارج می‌شوند، کامل جذب می‌کنند. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که با قرار دادن میراگرهایی با میرایی معادل C می‌توان انتشار امواج در جهت‌های مختلف را میرا نمود. متناسب با جهت انتشار امواج، نوع میراگرها تعیین می‌شود. برای میرا کردن امواج طولی میراگری عمود بر مرز استفاده شده و برای میراکردن امواج برشی میراگری موازی مرز استفاده می‌شود. در شکل(۲) شکل الگویی و طرحوار[6] از محل قرارگیری میراگرها و نحوه الگوسازی میراگر گران‌رو، نشان داده شده است. با توجه به شکل مورد نظر، در مرزهای مجاور، میرایی مورد استفاده باید موج طولی عبوری از پی را میرا نموده و میرایی‌های مرز پایین باید توانایی میرا کردن موج عبوری عرض (برشی) از پی را داشته باشند.



شکل (۲): a) شکل طرحوار از محل قرار گیری میرایی‌هایی طولی و عرضی



شکل(۲): b) شیوه تعریف میرایی لیزمر

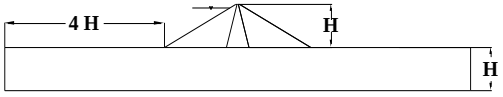
الگوسازی سد و پی

در این قسمت به بررسی اثر پی بر رفتار سدهای خاکی پرداخته می‌شود. هدف این قسمت، بررسی الگوهای مختلف رفتاری پی می‌باشد. برای فراگیر کردن الگوهای مختلف، تلاش شده است از طیف‌های زلزله با دوره و دامنه مشخص سینوسی استفاده شود که بتوان بین نتایج به‌دست‌آمده مقایسه‌ای انجام داد. دو نوع پی به‌صورت فاصله

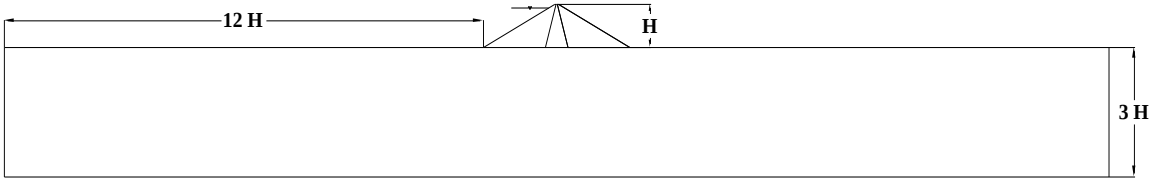
6. Schematic.

نزدیک مرزها با شرط مرزی ساده بدون جرم و شرط مرزی نزدیک با میرایی مرتجع (الگوی لیزمر) بررسی می‌شوند. در شکل (۳) تعریف فاصله نزدیک و دور متناسب با ارتفاع سد نشان داده شده است که مطابق مطالعات دیگر پژوهشگران می‌باشد. شکل سد مورد بررسی به فرم عمومی شکل سدهای خاکی با ارتفاع نزدیک به ۶۰ متر و شیب بالادست و پایین‌دست آن 1V:1.8H می‌باشد. در تحلیل‌های پی از الگوی رفتاری خطی مرتجع استفاده شده که مؤلفه‌های خطی و غیر خطی آن نظیر مقیاس ارتجاعی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب پواسون و وزن مخصوص مصالح در جدول(۱) نشان داده شده است.

زلزله مورد استفاده در تحلیل‌های پویایی و بررسی اثر پی، از نوع سینوسی می‌باشد. با توجه به اینکه هدف مقایسه روش‌های گوناگون الگوسازی پی می‌باشد، بهتر این است که زلزله‌ها دارای بسامد و دامنه مشخصی باشند. دوره‌های غالب حالت‌های مختلف نوسانی سد، بسته به جرم و سختی آن قابل تعیین است. مقادیر بسامد برای سد با حالت شرایط مرزی نزدیک بین ۰/۳ تا ۰/۵ ثانیه و به‌عبارتی دارای دوره‌ای حدود ۲ تا ۳ ثانیه می‌باشد. بنابراین بسامد طیف‌های زلزله مورد استفاده برابر ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۱ هرتز[1] بوده و مقادیر شتاب بیشینه نیز، ۰/۲g (شتاب متعارف زلزله در ایران) درنظر گرفته شده است. در شکل(۴)، طیف زلزله مورد استفاده برای بسامدهای مختلف و شتاب بیشینه ۰/۱g نشان داده شده است. از آنجا که محاسبات به‌صورت نسبی انجام می‌شود (گره‌های پایینی بسته، شده و زلزله به مرکز جرم اجزا وارد می‌شود) نیازی به اصلاح طیف‌های زلزله نیست. در صورتی‌که زلزله به تراز پایین پی وارد شود، برای صفر شدن تغییر مکان‌ها در انتهای زلزله، اصلاحاتی در آن انجام می‌گیرد.



شرایط مرزی نزدیک



شرایط مرزی دور

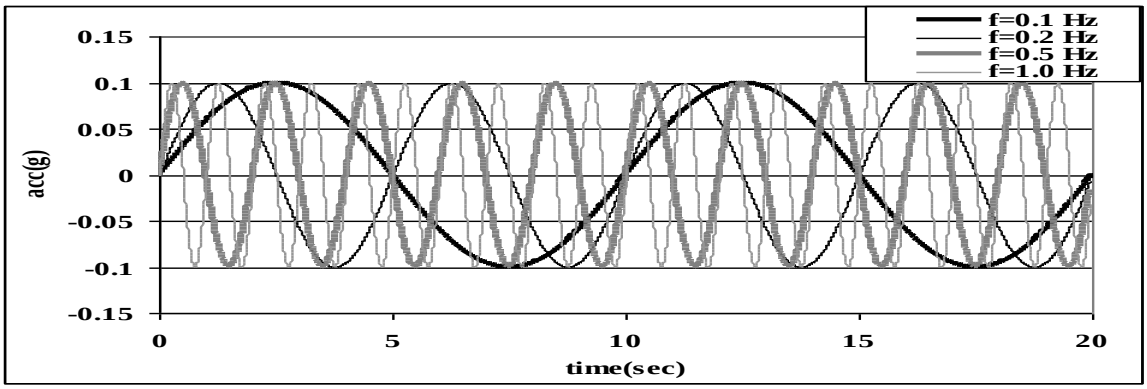
شکل (۳): اندازه پی در الگوسازی شرایط مرزی نزدیک[2] و دور[3]

مقدار میرایی توسط روش رایلی[4] محاسبه و در نرم‌افزار ژئو استدیو[5] مورد استفاده قرار می‌گیرد که در این حالت برابر $[D]=\alpha[M]+\beta[K]$ درنظر گرفته شده است. مقادیر ضرایب α و β با استفاده از حالت‌های مختلف نوسان و میرایی مصالح به‌دست می‌آید. مقدار میرایی مصالح در تحلیل‌های پی برای تمام مصالح ثابت ۱۰ درصد درنظر گرفته شده است.

1. Hertz.
2. Near.
3. Far.
4. Rayleigh's Method.
5. Geo-Studio.

جدول (۱): عوامل و مؤلفه‌های خطی و غیر خطی مصالح الگوسازی سد خاکی

ضریب پواسون	وزن مخصوص (KN/m^3)	زاویه شکست (درجه)	چسبندگی (KN/m^2)	PI	واحد ارتجاعی (MN/m^2)	طبقه بندی	مورد استفاده
۰/۳	۲۱/۵	۴۵	۰	–	۱۰۰	GW	پوسته
۰/۳۲	۲۲/۵	۲۸	۱۲	۱۰	۶۰	Gc	هسته
۰/۳	۲۱/۵	۳۶	۰	۴	۸۰	خاک متراکم	پی

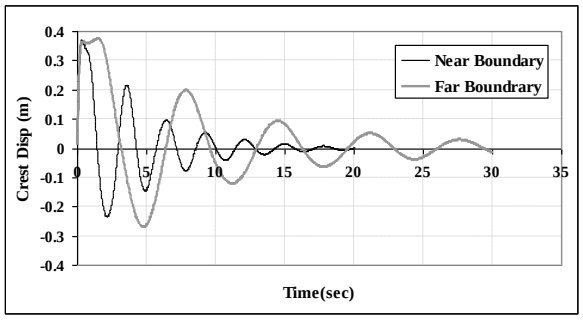


شکل (۴): طیف زلزله مورد استفاده برای بسامدهای مختلف و شتاب بیشینه ۰/۱g

برای محاسبه دوره غالب سد در راستای افقی، از یک روش ساده نیز استفاده شده است. بدین منظور، نیرویی به تک‌تک گره‌های سد اعمال شده و تغییر مکان ابتدایی ایجاد گردیده است. سپس نیرویی از روی سامانه برداشته شده و اجازه داده می‌شود سامانه نوسان آزاد انجام دهد.

دوره نوسان آزاد در راستای افق برابر است با دوره حالت اول نوسان. در شکل (۵) تغییر مکان تاج سد تحت اثر سازوکاری[1] نشان داده شده است. دوره به دست‌آمده در حالت شرط مرزی نزدیک و دور به ترتیب برابر است با ۲/۸ و ۶/۶ ثانیه که بسامد به دست‌آمده به ترتیب: برابر ۰/۳۵ و ۰/۱۶ هرتز می باشد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که مقادیر درنظر گرفته‌شده به‌عنوان دوره‌های زلزله (بین ۰/۱ تا ۱ هرتز) مناسب می‌باشند. تغییر مکان نسبی تاج نسبت به تراز بالای پی (حاصل تفاضل تغییر مکان تاج از تغییر مکان تراز بالای پی) به‌عنوان تغییر مکان مبنا درنظر گرفته شده است.

بسامد نوسان f(Hz)	حالت‌های مختلف
۰/۴۲	شرط مرزی نزدیک و پی بدون جرم
۰/۳۲	شرط مرزی دور و پی بدون جرم
۰/۳۵	شرط مرزی نزدیک و پی جرم‌دار
۰/۱۶	شرط مرزی دور و پی جرم‌دار
۰/۷۱	بدون پی



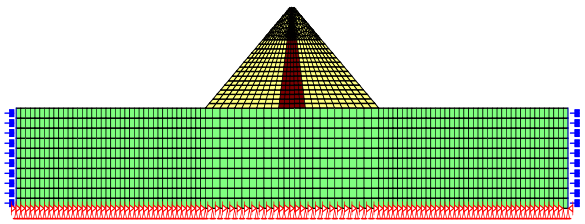
شکل (۵) ب: نوسان آزاد سد در حالت شرط مرزی دور و نزدیک و بسامد حالت اول نوسان برای حالت‌های مختلف

1. Mechanism.

در حالت استفاده از تکیه‌گاه ساده به‌عنوان شرایط مرزی، از جرم پی صرف‌نظر شده است. در تکیه‌گاه پایین تغییر مکان در راستای افق و قائم بسته شده است و شرط مرزی دیواره نزدیک در حالت ساده به گونه‌ای است که به‌صورت غلتکی عمل نموده و فقط تغییر مکان در راستای افقی آن آزاد می‌باشد. در شرط مرزی گران‌رو و چسبنده، در تکیه‌گاه پایین تغییر مکان در راستای افق و قائم بسته شده است و شرط مرزی دیواره نزدیک به‌صورت استفاده از میرایی به‌صورت رابطه $C = \rho VA$ می باشد.

با توجه به اینکه زلزله مورد استفاده به‌صورت افقی بوده و تکیه‌گاه پایین بسته شده است، بنابراین جهت انتشار امواج به‌صورت اولیه و طولی و عمود بر مرزهای کناری باشد. در جدول (۲)، سرعت موج اولیه، V_p، و موج برشی V_s نیز نشان داده شده است. برای الگوسازی سد و پی تحت تحلیل پویایی از الگوی ژئوآفیس[1] و زیر برنامه کویک دابلیو[2] استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی رفتار مصالح در سدهای خاکی استفاده از الگوهای عددی پویایی، گامی بزرگ در بررسی رفتار سدها می‌باشد. بنابراین روش‌های پویایی می‌تواند بسیار سودمند و مناسب باشند.

طبیعی است که مشخصات پویایی مصالح سد بسیار پیچیده بوده و آزمایش‌های گوناگون نشان از رفتار کاملا غیر خطی این مصالح را دارند. در این پژوهش از روش تحلیل خطی با میرایی استفاده شده است. در شکل(۶)، الگوی جزء محدود سد و پی نشان داده شده است.



شکل (۶): الگوسازی سد و پی در حالت مرزهای نزدیک با شرایط مرزی ارتجاعی و گران‌رو (ویسکوز)

بحث و نتایج

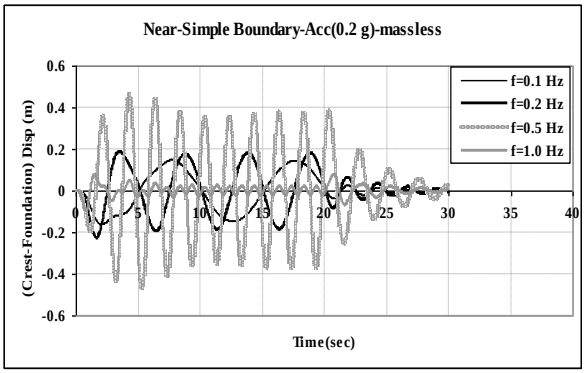
در این قسمت تغییر مکان نسبی تعریف‌شده بین تاج و تراز بالای پی زیر هسته برای حالت‌های مختلف به‌دست آمده و با هم مقایسه می‌شوند. نتایج شامل دو بخش است:

۱. تأثیر ثبت وقوع زلزله؛

۲. تأثیر عوامل و مؤلفه‌های مصالح پی.

برای مقایسه نتایج قسمت ۱، ابتدا برای یک حالت خاص، شرط مرزی نزدیک با شرایط مرزی ساده و پی بدون جرم برای حالت شتاب ثابت و بسامدهای مختلف، بررسی شده است.

در شکل (۷) نمودار مربوط به حالت مورد بررسی، نشان داده شده است. نتایج گویای این است که در حالت شتاب ثابت و بسامدهای مختلف، بیشترین تغییر مکان مربوط به حالت بسامد ۰/۵ هرتز می باشد که علت این مسئله نزدیک بودن این بسامد به بسامد طبیعی حالت اول ارتعاش (در شکل۵، بسامد حالت اول ارتعاش برای حالت‌های مختلف نشان داده شده است) در این حالت که برابر ۰/۴۲ می باشد، باعث ایجاد شرایطی نزدیک به تشدید[3] شده است.



شکل(۷) : تغییر مکان تاج سد نسبت به تراز پی زیر هسته سد برای شتاب ثابت و بسامدهای مختلف

1. Geo office.
2. Quake/w.
3. Resonance.

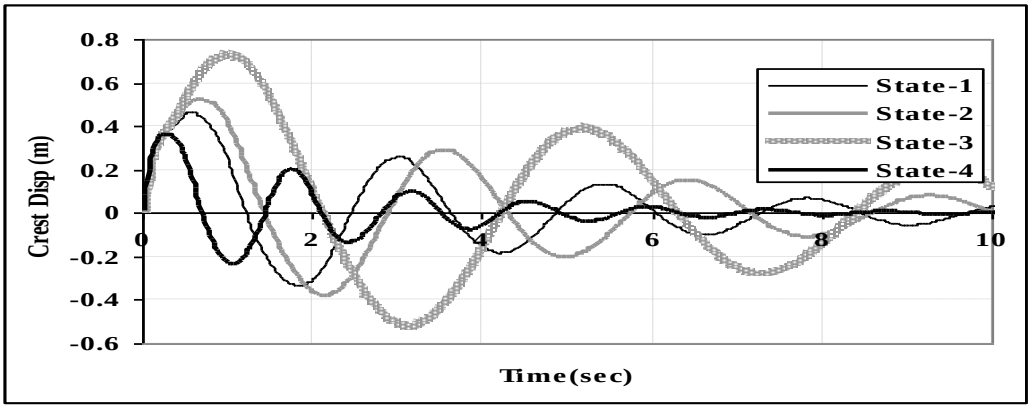
جدول (۲): مشخصات فیزیکی مصالح پی برای حالت متراکم، نیمه‌متراکم و کم‌تراکم

مورد استفاده	طبقه‌بندی	ضریب ارتجاعی (MN/m^2)	وزن مخصوص (KN/m^3)	ضریب پواسون	Vp (m/s)	Vs (m/s)
پی	متراکم	۸۰	۲۱/۵	۰/۳	۲۲۲	۱۱۸
پی	نیمه متراکم	۵۰	۲۰	۰/۳	۱۷۵	۹۳
پی	کم تراکم	۲۰	۱۸	۰/۳	۱۱۰	۵۹

در ادامه اثرخواص فیزیکی مصالح بر روی رفتار پی مورد بررسی قرار می گیرد. با توجه به تحلیل خطی ایستایی سد، مؤلفه مورد تغییر مقیاس ارتجاعی با فرض کم‌بودن تغییر در ضریب پواسون می‌باشد. در جدول(۲) مشخصات فیزیکی مصالح پی در سه حالت متراکم،[1] نیمه‌متراکم[2] وکم‌تراکم[3] نشان داده شده است. برای مقایسه این سه حالت از حالت پی بدون جرم با شرط مرزی نزدیک و شرایط مرزی ساده استفاده شده است. بیشینه شتاب زلزله ۰/۲g و بسامدهای مختلف از ۰/۱ تا ۱ هرتز مورد استفاده قرار گرفته است.

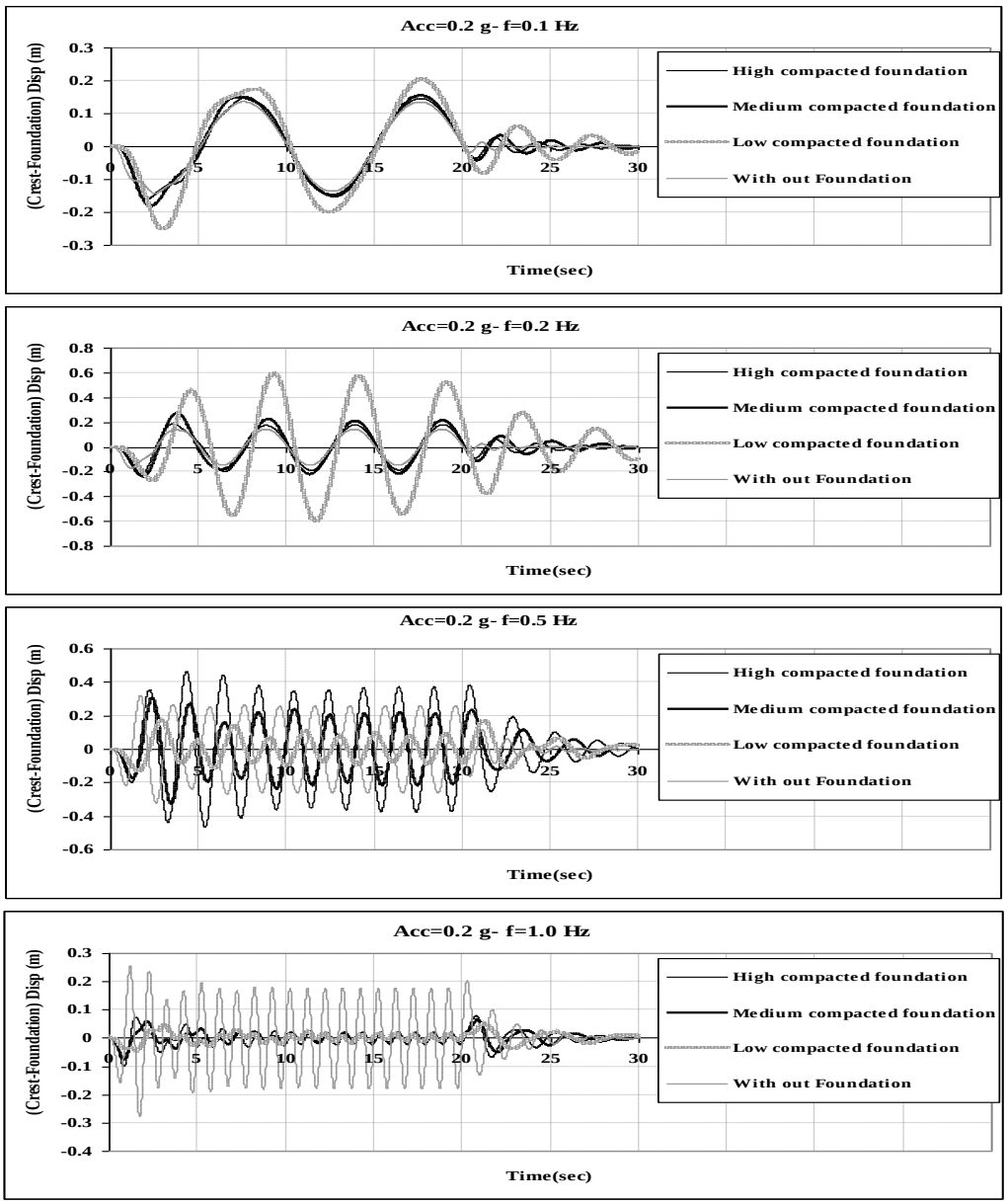
برای حالت پی بدون جرم با شرط مرزی نزدیک و شرایط مرزی ساده و حالات مختلف پی، دوره حالت اول نوسان، محاسبه شده و در شکل(۸) نشان داده شده است. در شکل(۹) نیز مقایسه نتایج برای انواع مختلف پی ارائه شده است. با توجه به شکل (۸) با کم شدن مقدار مقیاس ارتجاعی پی، مقدار سختی سامانه کم شده و درپی آن، بسامد سازه کاهش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود در بسامدهای پایین تحریک، پاسخ بیشتری از سازه دریافت شود. با افزایش بسامد تحریک، طبیعی است خاک متراکم‌تر با داشتن بسامد حالت اول بیشتر، پاسخ قوی‌تری به سامانه نشان دهد که در شکل(۹) نشان داده شده است.

حالت‌های مختلف	بسامد نوسان f(Hz)
پی متراکم	۰/۴۲
پی نیمه‌متراکم	۰/۳۵
پی کم‌تراکم	۰/۲۴
بدون پی	۰/۷۱



شکل (۸): تغییر مکان تاج سد نسبت به تراز پی زیر هسته سد برای حالات مختلف پی

1. High Compacted.
2. Medium Compacted.
3. Low Compacted.



شکل (۹): تغییر مکان تاج سد نسبت به تراز پی زیر هسته سد برای حالات مختلف پی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر تراکم پی در رفتار سدهای خاکی پرداخته شده است. در بررسی تأثیر ثبت‌های وقوع زلزله بر رفتار پی، نتایج نشان می‌دهد که در حالت شتاب ثابت و بسامدهای مختلف، بیشترین تغییر مکان مربوط به حالت بسامد ۰/۵ هرتز می باشد. علت این مسئله نزدیکی این بسامد به بسامد طبیعی حالت اول ارتعاش در این حالت که برابر ۰/۴۲ می‌باشد باعث ایجاد شرایطی نزدیک به تشدید، شده است. می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش شتاب، فقط دامنه طیف‌ها زیاد می‌شود و تغییری در شکل آنها ایجاد نمی‌شود. بسامد سازه با کم‌شدن مقدار ضریب ارتجاعی پی، به تبع کم‌شدن مقدار سختی سامانه، کاهش می‌یابد که در چنین حالتی در بسامدهای پایین تحریک، انتظار می‌رود پاسخ بیشتری از سازه دریافت شود. با افزایش بسامد تحریک، طبیعی است خاک متراکم‌تر با داشتن بسامد حالت اول بیشتر، پاسخ قوی‌تری به سامانه نشان دهد. این مسئله نشان می‌دهدکه برای الگوسازی سازه‌های قرارگرفته روی پی، الگوسازی پی، امری ضروری بوده و در راستای کامل‌کردن داده‌ها، دریافت اطلاعات بیشتر از مصالح پی، امری اجتناب‌ناپذیر است.

مراجع

۱. حائری، س. م. ۱۳۷۰، «تأثیر متقابل سد خاکی و پی مربوط در برابر بارهای دینامیکی و میرایی انرژی لرزشی از طریق پی»، اولین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

۲. فاضلی، م. ۱۳۷۰، «اندر کنش سد، دریاچه و پی در سدهای خاکی تحت اثر بارهای لرزه‌ای»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز.

3. Abouseeda, M. and P. Dakulas, 1998, “Nonlinear dynamic earth dam-foundation interaction using a BE-FE method”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, pp. 117-936.
4. Akiyoshi , T., X. Sun and K. Fuchida, 1998, “General absorbing boundary conditions for dynamic analysis of fluid-saturated porous media”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 17, pp. 397-406.
5. Chopra, H. and P. Permulasvami, 1971, “Dynamics of earth dams with foundation interaction”, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 97, pp. 181-191.
6. Chopra, H. and P. Permulasvami, 1969, “Dam foundation interaction during earthquake”, In: Proceedings of 4t h World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, chi le.
7. Finn, W. and J. Kh anna, 1966, “Dynamic response of earth dams”, In : Proceeding of 3rd Symposium on Earthquake Engineering, University of Roorkkee, India.
8. Finn, W. and R. Remier, 1970, “Effect of soil structure interaction on seismic response”, In: Proceeding of the Conference on Earthquake Analysis of Structure, Jassy, Roumania.
9. ldriss, I. M., J. M. Mathur and H. Seed, 1974, “Earth dam-foundation interaction during earthquake”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 2, pp. 313-323.
10. Lysmer, J., and Kuhlemeyer, R. L., 1969, “Finite Dynamic Model for Infinite Media”,. Journal of the... Elasticity, John Wiley and Sons Publishing Co., Inc., New York, N.Y.
11. Ohrnachi. T. and S. Soga, 1984, “Practical method for dynamic interaction analysis of three dimensional dam-foundation system”, In: Proceeding of 8th World Conference on Earthquake Engineering.
12. Papalou, A. and J. Bielak, 2004, “Nonlinear seismic response of earth dams with canyon interaction”, Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 130, No.1 , pp. 103-110.
13. Papalou, A. and J. Bielak, 2001, “Seismic elastic response of earth dams with canyon interaction”, Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 127, No.5, pp. 446-453.
14. Popovici, A., I. Corda and V. Criatidis, 1986, “Soil structure interaction effects on seismic response of earth dam”, In: Proceeding of 8t h EAEE, pp. 65-72.