تحلیل حساسیت شرایط مختلف مرزی پی بر پاسخ دینامیکی سد Pine Flat

علی‌رضا ترابی[2]، مجتبی فرخ[1]، جواد رستمی[3]

1- دانشجو کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه،ساوه، ایران

alireza8546@yahoo.com

2- استادیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

farrokh@kntu.ac.ir

3- دانشجو کارشناسی ارشد ،گروه مهندسی عمران،دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

Rostami_javad5@yahoo.com

چکیده

در مدلسازی رفتار دینامیکی سدهای بتنی وزنی معمولاً اندرکنش سیستم سد و پی به منظور سهولت در مدلسازی و پیشرفته نبودن نرم‌افزارهای تجاری اجزای محدود قدیمی از تقریب پی بدون جرم استفاده می‌شود. این فرض باعث ایجاد خطاهایی در نحوه مدلسازی می‌گردد. به منظور تدقیق اندرکنش دینامیکی سد و پی باید اثر جرم پی را در محاسبات درنظر گرفت که برای این منظور روشهای مختلفی در ادبیات مهندسی وجود دارد. در این مقاله تاثیر نحوه مدلسازی پی در اندرکنش سدو پی بررسی شده و یک روش درنظر گرفتن میرایی تشعشعی در نرم افزار ANSYS ارائه شده و نتایج آنالیزهای دینامیکی روی مدل ایجاد شده به این روش با مدل‌های دیگر مقایسه شده است و حساسیت مدل به تعدادی پارامتر مدلسازی بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: سدهای وزنی، اندرکنش دینامیکی سدوپی، میرایی تشعشعی

مقدمه:

اندرکنش پی با سازه یکی از پدیده‌هایی است که به طور گسترده‌ای در مقوله مهندسی زلزله در سال‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. تفکری که در پشت تحلیل اندرکنش سازه و پی نهفته است، این است که در سازه های خیلی سخت و سنگین همانند سدهای بتنی، که سختی پی نسبت به سختی سازه کمتر است، جابجایی-های ناشی از بار لرزه‌ای در کف سازه با جابجایی‌های میدان آزاد (بدون حضور سازه) تفاوت زیادی دارد. بنابرین با در نظر گرفتن اثر اندرکنش پی و سازه در چنین سازه‌هایی، در فاصله‌ای محدود از کف سازه، جابجایی‌ها با جابجایی‌های میدان آزاد برابر می‌شود(1).

.

Archive of SID
www.SID.ir

در این مقاله آنالیز دینامیکی سد PINE FLAT به عنوان مورد مطالعاتی برای ارزیابی روش‌های مختلف در نظر گرفتن پی در نرم افزار ANSYS ارائه می‌گردد. بدین منظور ابتدا به معرفی مشخصات هندسی سد و مشخصات مصالح آن پرداخته و سپس نحوه‌ی مش‌بندی و مدلسازی سد با شرایط مختلف در نظر گرفتن پی در نرم افزار ANSYS توضیح داده شده است و نتایج آنالیز دینامیکی این مدلها در محدوده فرکانس مقایسه شده است.

1. معرفی سد

سد Pine Flat یک سد وزنی بتنی است که از 36 مونولیت[1] ساخته شده است. که در مجموع 1840 فوت طول تاج سد می‌باشد. ارتفاع بلندترین قسمت سد 400 فوت بوده، و ارتفاع آب در حالت مخزن پر 381 فوت درنظر گرفته شده است.[2،3]. مشخصات مصالح فرض شده در مدلسازی مطابق جدول (1) می‌باشد [2،3].

جدول(1) : مشخصات فرض شده مصالح در مدلسازی.

بتن	مدول الاستیسیته	3.25 million psi
	ضریب پواسن	0.2
	میرایی ویسکوز	5%
	وزن مخصوص	155 lb/ft
مصالح پی	مدول الاستیسیته	1 million psi
	ضریب پواسن	1/3
	میرایی ویسکوز	5%
	وزن مخصوص	165 lb/ft[3]
آب	وزن مخصوص	62.5 lb/ft[3]
	سرعت موج حجمی در آب	4720 ft/sec

علاوه بر مشخصات ذکر شده در جدول (1) ذکر فرضیات زیر نیز لازم می‌باشد.

بتن سد به صورت همگن، ایزوتروپیک، و الاستیک خطی فرض شده و پی به صورت همگن، ایزوتروپیک، و ویسکوالاستیک نیم‌صفحه است. آب پشت سد به صورت سیال ایدآل فرض شده است[2،3].

نکته: مدول یانگ پی در مرجع(2) برابر 10 ملیون psi، فرض شده بود ولی در این گزارش با توجه به اینکه کاهش مدول یانگ پی، باعث انعطاف پذیرتر شدن پی می‌گردد، بنابرین برای پررنگ‌تر شدن تأثیر نحوه‌ی مدلسازی پی در اندرکنش سد و پی ترجیح داده شد از مدول 1 ملیون psi برای پی استفاده گردد. بخش کف مخزن شامل لایه‌های رسوبی است که تاثیر آن در جذب انرژی موثر است. ضریب جذب انرژی(α) باید براساس

[1] monolith

Archive of SID
www.SID.ir

مصالح رسوب کف مخزن انتخاب گردد، که به دلیل نبود اطلاعات دقیق از خصوصیات این مصالح، و بر اساس توصیه مراجع برای طراحی، این ضریب برابر 0.8انتخاب شده. این ضریب در مرحله‌ی صحت سنجی مدل برای تطابق با مرجع(2) برابر 0.5 انتخاب شده، اما در ادامه به 0.8 تغییر داده شده است.

2. مدلسازی

با توجه به اینکه سد مورد مطالعه یک سد وزنی است، می‌توان مدلسازی را به صورت دوبعدی انجام داد، برای مدلسازی دو بعدی باید مقطع عرضی بلندترین مونولیت سد مدل شود. در این مقاله نیز بلندترین مونولیت سد Pine Flat به صورت دو بعدی مدل و مش‌بندی شده است.

2-1- مدلسازی بدنه و مخزن سد

مش‌بندی بدنه سد شامل 162 گره و 136 المان است که المان بندی به صورت 17 ردیف و در هر ردیف 8 المان، ایجاد شده است. برای مدلسازی بدنه سد از المان PLANE182 در حالت تنش مسطح استفاده شده است.

مخزن به صورت پر در نظر گرفته شده است و بنابرین ارتفاع آب 381 فوت می‌باشد. طول مخزن در جهت بالادست سه برابر ارتفاع حالت پر مخزن مدل شده است. و کف مخزن در تمام طول آن افقی بوده و بنابرین ارتفاع آب در کل مخزن ثابت گرفته شده است مش‌بندی مخزن با 16 ردیف المان و در هر ردیف 42 المان مش‌بندی شده که ابعاد المان‌بندی با حرکت از نزدیکی بدنه سد به سمت بالادست بزرگتر شده است. المان انتخاب شده برای مخزن المان سیال آکوستیک (اویلری) انتخاب شده است.[4].

اعمال شرایط مرزی مخزن:

شرایط مرزی مخزن با توجه به فرمولاسیون اویلری و حل وسترگارد [4] اعمال شده است. خلاصه نکات آن در ادامه آورده شده است.

1-مرز تماس سیال با سازه :

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho a_n = \rho \ddot{u}_n \quad (1)$$

2-مرز تماس سیال با پی

$$q = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \quad (2)$$

3- سطح آزاد : شرایط مرزی

$$P=0 \quad (3)$$

4- مرز تشعشعی

Archive of SID
www.SID.ir

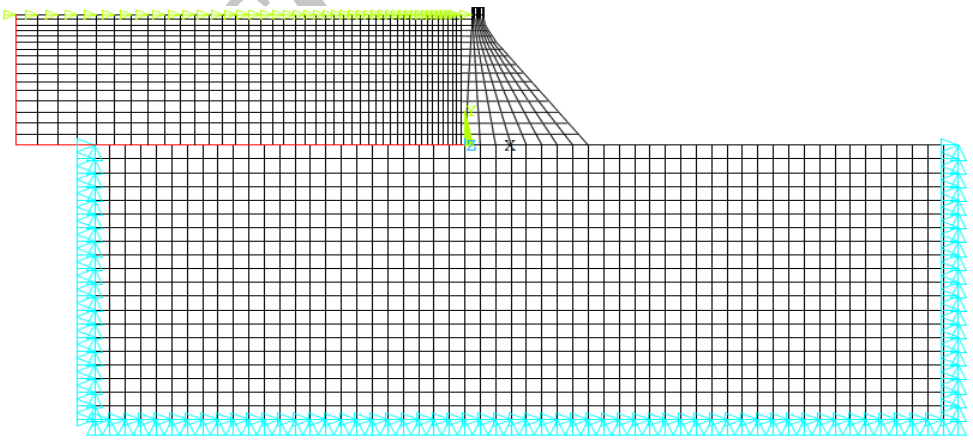
$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{C}\frac{\partial p}{\partial t} \qquad (4)$$

2-2-مدلسازی پی سد

برای ارزیابی تاثیر نحوه‌ی مدلسازی پی بر پاسخ دینامیکی سد، چهار مدل با بدنه و مخزن یکسان و نحوه‌ی مدلسازی پی متفاوت در نرم افزار ANSYS ایجاد شده ونتایج آنالیز دینامیکی آنها با یکدیگر مقایسه گردید. حالات مختلف این مدلسازی در زیر ذکر شده است. قابل ذکر است که در تمام مدل‌ها مخزن به صورت گفته شده مدل شده است.

1- مدل با پی صلب
2- مدل با پی انعطاف پذیر بدون جرم
3- مدل با پی انعطاف پذیر جرم‌دار
4- مدل با پی انعطاف پذیر جرم دار و با اعمال مرز لایزمر (مدل کامل)

در مدل با پی صلب، پی مدل نشده و بدنه سد در پای سد به زمین مقید شده است. در سه مدل دیگر پی با ابعاد نشان داده شده در شکل(1) مدل شده است. در مدل شماره2 وزن مخصوص مصالح پی صفر وارد شده و گره‌های موجود در مرزهای پی (سمت چپ و راست و بخش زیرین پی) در دو راستای افقی و عمودی بسته شده است. در مدل سوم جرم پی لحاظ شده و مرزها نیز مانند مدل شماره2، در دو جهت مقید شده است. در مدل شماره 4، جرم پی درنظر گرفته شده و مرزها به صورت مرز جاذب لایزمر [5] مدل شده است، به این شکل که در گره های انتهایی دو میراگر در دو جهت مدل شده و انتهای میراگرها در راستای افقی و عمودی مقید شده است.



شکل(1) : مش‌بندی و مدلسازی مجموعه سد،مخزن و پی در ANSYS.

Archive of SID
www.SID.ir

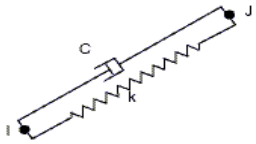
المان مورد استفاده در مدلسازی میراگرها المان COMBIN14 بوده و ضریب میراگرها با توجه به طول المان‌های پی که برابر 40 فوت است، براساس رابطه زیر محاسبه گردید[5].

$C_1 = \rho AV$

V سرعت موج برشی یا حجمی در پی

ρ جرم مخصوص مصالح پی

A سطح اختصاص داده شده به هر المان



برای مدلسازی پی از المان PLANE182 در حالت تنش مسطح استفاده شده است. مش‌بندی پی به صورت 20 ردیف افقی و هر ردیف شامل56 المان و با اندازه‌های یکسان در تمام سطح پی انجام شده است. در شکل(1) مدل کامل بدنه پی مخزن برای مدل شماره2 و 3 نشان داده شده است.

2-4-صحت سنجی مدل ایجاد شده در ANSYS بر اساس مرجع(2).

برای صحت سنجی مدل‌های ایجاد شده، فرکانس غالب به دست آمده از آنالیز مودال چهار مدل به شرح زیر با مقادیر مدل‌های مشابه در مرجع (2) مقایسه شده است که نتایج در جدول(2) ارائه گردیده است.

1- مدل با پی صلب بدون مخزن
2- مدل با پی صلب با مخزن
3- مدل با پی انعطاف‌پذیر جرمدار بدون مخزن
4- مدل با پی انعطاف‌پذیر جرمدار با مخزن

جدول(2): صحت سنجی مدل ایجاد شده در گزارش حاضر.

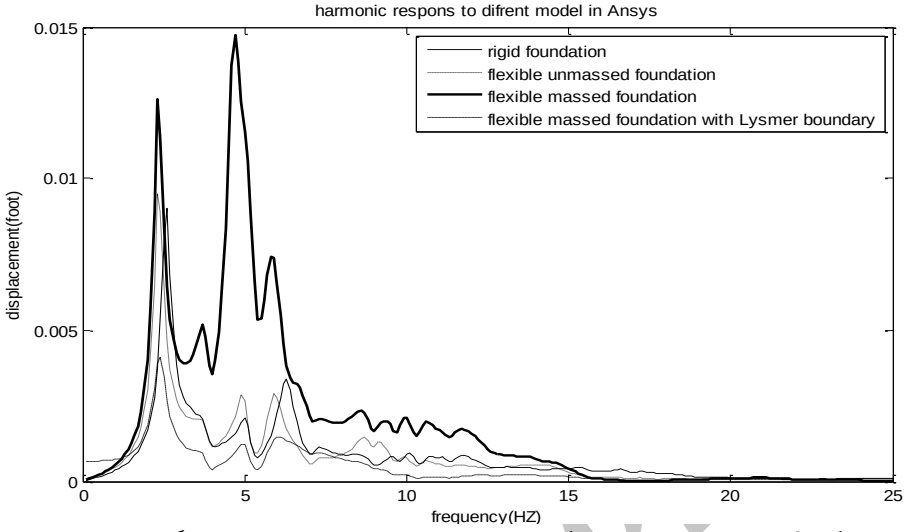
شماره مدل	مدل پی	مخزن	پریود غالب در گزارش حاضر	پریود غالب در مرجع((2))	خطا
1	صلب	مدل نشده	0.313	0.317	1.2٪
2	صلب	مدل شده	0.389	0.397	2٪
3	انعطاف پذیر جرمدار	مدل نشده	0.347	0.341	1.7٪
4	انعطاف پذیر جرمدار	مدل شده	0.432	0.429	0.7٪

3. ارائه نتایج

3-1- مقایسه تاثیر نحوه مدلسازی پی بر پاسخ دینامیکی سد

Archive of SID
www.SID.ir

مدل‌های ایجاد شده با شرایط مختلف در نظر گرفتن پی، در نرم افزار ANSYS تحت شتاب هارمونیکی واحد در راستای افقی تحلیل دینامیکی شده و نتایج آن در ادامه آورده شده است. شکل(2) نمودار پاسخ هارمونیکی چهار نوع مدل ذکر شده ارائه گردیده است.



شکل(2)-الف :مقایسه پاسخ هارمونیکی مدل های ایجاد شده با شرایط مختلف در نظر گرفتن پی.

با توجه به نتایج آنالیز هارمونیکی که برای هر چهار مدل در یک شکل رسم شده است، می‌توان چند نکته ذکر کرد.

- با در نظر گرفتن پی به صورت پی بدون جرم، تغییر مکان ماکزیمم مقداری افزایش یافته و از طرفی محتوای فرکانسی مدل نیز تغییرات جزئی می‌دهد.
- با در نظر گرفتن جرم پی، و در صورتی که مرزهای جاذب انرژی درنظر گرفته نشود، نه‌تنها پاسخ دینامیکی افزایش یافته است بلکه محتوای فرکانسی نیز تغییرات اساسی داشته است.
- با درنظر گرفتن جرم پی و با استفاده از روش مرزهای جاذب (لایزمر)، پاسخ‌ها به طور قابل توجهی،کاهش یافته است.

3-2- حساسیت سنجی مدل پیشنهادی (پی جرم‌دار با مرزهای لایزمر) به پارامترهای مختلف

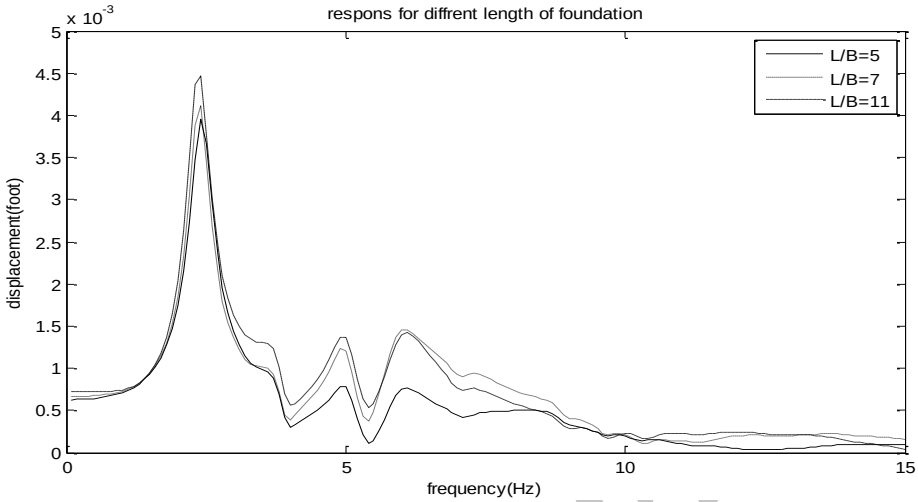
در این بخش از گزارش حاضر قصد داریم حساسیت مدل پی جرم‌دار با مرزهای لایزمر را به پارامترهای زیر بسنجیم.(حساسیت سنجی روی مدل پی جرمدار با مرزهای لایزمر انجام شده است.)

- ابعاد پی
- تاثیر تغییر ضریب جذب انرژی کف مخزن (α)
- تاثیر درنظر گرفتن تحریک زلزله از کف مخزن

Archive of SID
www.SID.ir

3-2-1-تاثیر ابعاد پی مدل شده

شکل (3) تغییر نتایج پاسخ هارمونیکی مدل با تغییر طول پی از 7B به 5B و 11B را نشان میدهد.



شکل(3) : بررسی تاثیر طول پی مدل شده بر رفتار مدل.

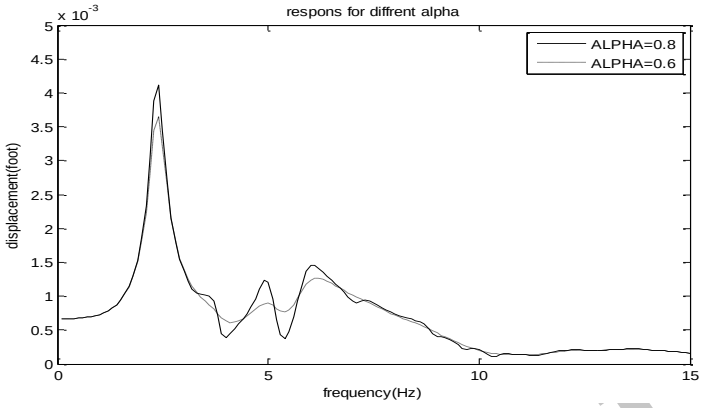
با توجه به شکل (3) با افزایش طول پی مدل شده جواب‌ها در چند مود اصلی نمودار افزایش داشته است، به خصوص در چند مود بالاتر از مود اول این افزایش قابل توجه می‌باشد. مقادیر حداکثر پاسخ برای مدل با طول پی متفاوت در جدول (3) آمده است.

جدول(3): بررسی تاثیر طول پی مدل شده بر پاسخ دینامیکی حداکثر.

طول پی	پاسخ حداکثر	درصد تغییرات نسبت به مدل مرجع
5B	0.0040	-2.4%
7B	0.0041	مرجع
11B	0.0045	9.7%

3-2-2- تاثیر تغییر ضریب جذب انرژی کف مخزن (α)

Archive
www.SID.ir



شکل(4): بررسی تاثیر ضریب جذب انژی بر پاسخ دینامیکی مدل.

شکل(4) تاثیر تغییر ضریب جذب انرژی کف مخزن بر رفتار دینامیکی سد در حوزه‌ی فرکانس را نشان می‌دهد.طبیعتاً کاهش مقدار α که معادل جذب انرژی بیشتر می‌باشد باعث کاهش پاسخ دینامیکی می گردد که میزان آن برای حداثر پاسخ مدل در جدول(4) نشان داده شده است.

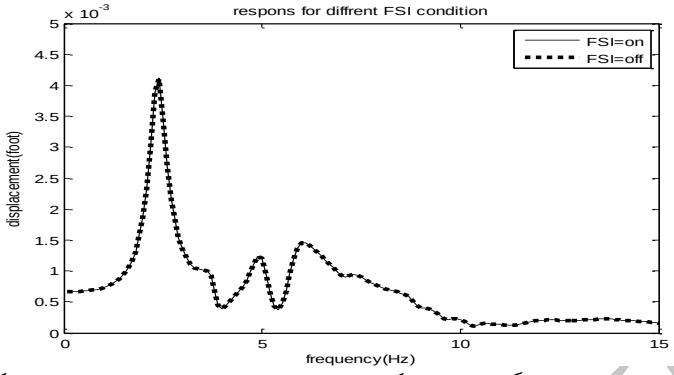
جدول(4): بررسی تاثیر ضریب جذب انرژی بر پاسخ حداکثر مدل.

مقدار α	ماکزیمم پاسخ(foot)	درصد تغییر نسبت به مدل مرجع
0.8	0.0041	مدل مرجع
0.6	.0036	-12.2%

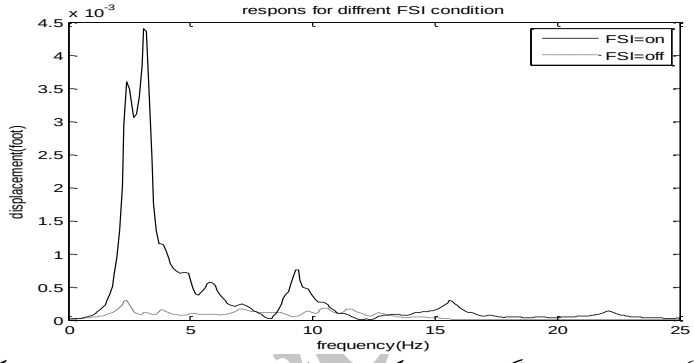
3-2-3-تاثیر درنظر گرفتن تحریک زلزله از کف مخزن

در مدل مرجع تحریک زلزله از کف مخزن در نظر گرفته شده است، بنابرین در این قسمت این اثر را از مدل حذف کرده و یک بار تاثیر آن بر پاسخ دینامیکی مدل در برابر اعمال شتاب افقی و بار دیگر در برابر شتاب عمودی بررسی شده است. نمودار شکل(5) تاثیر حذف این اثر در حالت تحریک شتاب افقی را نشان می‌دهد و نمودار شکل(6) تاثیر حذف این اثر در حالت تحریک شتاب عمودی نشان میدهد.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل(5): بررسی تاثر درنظر گرفتن اثر تحریک زلزله از کف مخزن بر رفتار مدل، در برابر تحریک افقی زلزله.



شکل(6): بررسی تاثر درنظر گرفتن اثر تحریک زلزله از کف مخزن بر رفتار مدل، در برابر تحریک قائم زلزله.

همانطور که در شکل(5) و شکل(6) دیده می‌شود، پاسخ دینامیکی ناشی از تحریک زلزله از کف مخزن در حالت مؤلفه قائم شتاب، بسیار تعیین کننده بوده و در مقابل مؤلفه افقی شتاب قابل صرف نظر کردن می‌باشد. بنابرین این اثر در زلزله‌هایی که مؤلفه قائم شتاب، شتاب قابل توجهی به سیستم اعمال می‌کند این اثر در پاسخ حداکثر سازه تأثیر زیادی دارد. در جدول(5) و جدول(6)، حداکثر پاسخ‌ها برای حالات گفته شده ارائه شده است.

جدول(5): بررسی تاثیر درنظر گرفتن تحریک زلزله از کف مخزن بر پاسخ حداکثر دینامیکی مدل در برابر تحریک شتاب افقی

درصد تغییر نسبت به مدل مرجع	ماکزیمم پاسخ(ft)	شرایط
مدل مرجع	0.004113	FSI فعال
-0.2%	0.004105	FSI غیر فعال

جدول(6): بررسی تاثیر درنظر گرفتن تحریک زلزله از کف مخزن بر پاسخ حداکثر دینامیکی مدل در برابر تحریک شتاب قائم

درصد تغییر نسبت به مدل مرجع	ماکزیمم پاسخ(ft)	شرایط

Archive of SID
www.SID.ir

FSI فعال	0.0044	مدل مرجع
FSI غیر فعال	0.00029	-93.4%

4. خلاصه و نتیجه گیری

با توجه به مطالعات انجام شده و نتایج ارائه شده در فصل قبل، خلاصه نتایج به شرح زیر می‌باشد.

- با توجه به آنالیز هارمونیکی انجام شده، با در نظر گرفتن پی به صورت پی بدون جرم، تغییر مکان ماکزیمم مقداری افزایش یافته و از طرفی محتوای فرکانسی مدل نیز تغییرات جزئی می‌دهد.
- با توجه با آنالیز هارمونیکی انجام شده، با در نظر گرفتن جرم پی، و در صورتی که مرزهای جاذب انرژی درنظر گرفته نشود، نه‌تنها پاسخ دینامیکی افزایش یافته است بلکه محتوای فرکانسی نیز تغییرات اساسی داشته است.
- با درنظر گرفتن جرم پی و درنظر گرفتن میرایی تشعشعی با استفاده از روش مرزهای جاذب (لایزمر)، پاسخ‌ها به طور قابل توجهی،کاهش یافته است.
- در مدلسازی سد با پی جرمدار با مرز لایزمر با افزایش طول پی مدل شده از 7B به 11B حدود 10٪ پاسخ حداکثر مود اول در مقایسه هارمونیکی افزایش می‌یابد اما در مودهای بعدی نمودارها به یکدیگر نزدیک شده است.
- با در نظر گرفتن طول پی مدل شده برابر 7B جوابهای مودهای بالاتر نسبت به 11B تفاوت چندانی نداشته اما طول پی برابر 5B جواب‌ها را کاهش می‌دهد، بنابرین به نظر می‌رسد درنظر گرفتن طول پی برابر 7B مناسب می‌باشد.
- مقدار ضریب جذب انرژی کف مخزن(α) در جوابها تاثیر نسبتاً زیادی دارد.
- در نظر گرفتن اثر تحریک زلزله از کف در برابر تحریک مؤلفه افقی زلزله بدون تاثیر می‌باشد، اما در برابر مؤلفه تحریک قائم زلزله بسیار مؤثر بوده (حدود93٪)، و باید این اثر لحاظ گردد.

5. مراجع

[1] Wilson, E.L."Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures", Third-Edition, Computers and Structures, Inc .2002.

[2] Chopra, A. K., Chakrabarti, P., and Gupta, S. 1980. "Earthquake Response of Concrete Gravity Dams Including Hydrodynamic and Foundation Interaction Effects", EERC 80-01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley ADA 087297.

[3] Fenves, G., Chopra, A.K. "EAGD-84: A Computer Program for Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams", Report No. UCB/EERC 84-11, University of California, Berkeley, 1984.

Archive of SID
www.SID.ir

[4] Westergaard, H. M. (1933). "Water pressure on dams during earthquakes." ASCE.
[5] Lysmer, J. and Kuhlemyer, R.L. "Finite Dynamic Model for Infinite Media", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 95, pp. 859-877, 1969.

Archive of SID

www.SID.ir