

بررسی روش وسترگارد در تعیین نیروهای زلزله وارد بر سدها با استفاده از روش المانهای محدود

مجری: دکتر رامین امینی

دانشگاه صنعتی شاهرود

این طرح با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است و تاریخ های تصویب و خاتمه آن به ترتیب ۱۳۸۶/۲/۲۳ و ۱۳۸۶/۸/۱۳ میباشد.

بررسی روش وسترگارد در تعیین نیروهای زلزله وارد بر سدها با استفاده از روش المانهای محدود

چکیده:

در این مطالعه روش وسترگارد در محاسبه نیروهای دینامیکی وارد بر سدها با نتایج المانهای محدود مقایسه گردیده است. مقایسه در سه حالت مختلف صورت گرفته است. در حالت اول شرایط مسئله مورد حل عینا مثل فرضیات وسترگارد در نظر گرفت شد و تنها تفاوت در آن بود که بجای در نظر گرفتن طول بینهایت برای مخزن، طولی معادل با سه برابر ارتفاع مخزن در نظر گرفته شد. در حالت دوم شرایط مانند حالت اول بود و فقط بجای در نظر گرفتن دیواره صلب برای سد یک دیواره واقعی گیردار به زمین در نظر گرفته شد و مسئله حالت دو بعدی داشت و هدف آن بود که اثر انعطاف پذیری سد در نتایج مشخص گردد. در حالت سوم مسئله به شکل سه بعدی و تا حدود زیادی شبیه به یک سد واقعی در نظر گرفته شد و در آن المانهای آب، سازه، و خاک اطراف سد همگی مدل گردید. در تمام این سه حالت مسئله تحت بارگذاری هارمونیک با پیروی بیش از مود اول سیستم قرار گرفت. نتایج مقایسه نشان میدهد که روش وسترگارد نتایج بسیار خوب و در گاهی اوقات یکسان با روش المان محدود بدست میدهد. با توجه به اینکه پیروی مود اول ارتعاش سد های کوتاه در غالب موارد کمتر از پیروی غالب ارتعاشات زمین لرزه است میتوان با استفاده از این تحقیق نتیجه گرفت که مدل کردن المانهای آب نیاز نمیباشد و براحتی میتوان اثر زلزله را توسط رابطه وسترگارد اعمال نمود. مدل نکردن المانهای آب سبب کاهش قابل ملاحظه ای در ایجاد فایبل ورودی و تحلیل مسئله میگردد. همچنین این تحقیق نشان داد که مهمترین فرض وسترگارد که در نتایج تاثیر قابل ملاحظه ای میگذارد کمتر بودن پیروی مود اول ارتعاش سیستم نسبت به پیروی غالب ارتعاشات زلزله است. سایر فرضیات وسترگارد تاثیر قابل ملاحظه ای در نتایج نمی گذارند.

فهرست مطالب:

۱	مقدمه	۱
۴	معادله دیفرانسیل حاکم بر انتشار امواج فشار هیدرودینامیک در محیط سیال	۲
۴	۱-۲ روش وسترگارد	۱-۲
۷	۱-۱-۲ روش جرم افزوده	۱-۱-۲
۱۱	برنامه کامپیوتری مورد استفاده	۳
۱۱	مقدمه	۱-۳
۱۱	معرفی مختصر نرم افزار Ansys 10 و قابلیت‌های آن	۲-۳
۱۲	اصول کلی برنامه Ansys	۳-۳
۱۳	زبان برنامه نویسی طراحی پارامتریک (APDL)	۴-۳
۱۳	نحوه مدل نمودن مسئله	۵-۳
۱۳	۱-۵-۳ مدل بدنه سد	۱-۵-۳
۱۴	۲-۵-۳ مدل فونداسیون سد	۲-۵-۳
۱۵	۳-۵-۳ مدل مخزن سد	۳-۵-۳
۱۷	۴-۵-۳ تاثیر امواج سطحی	۴-۵-۳
۱۷	۵-۵-۳ شرایط مرزی اعمال شده	۵-۵-۳
۱۸	مقایسه جوابهای وسترگارد و المانهای محدود	۴
۱۸	۱-۴ حالت اول: دورتادور آب کاملا صلب است و فقط آب مدل می‌گردد.	۱-۴

۲۲.....	حالت دوم: شبیه به حالت اول میباشد و فقط دیواره سد نیز بصورت گیردار مدل میگردد.	۲-۴
۲۴.....	حالت سوم: سد و پی های اطراف سد بصورت کامل مدل میگرددند.	۳-۴
۲۷.....	نتیجه گیری:	۴-۴
۲۸.....	پیوست ها	۵
۲۸.....	Westergaard Big Dam - الف	۱-۵
۳۳.....	Westergaard Big dam-T1 (2) - ب	۲-۵
۳۷.....	Big Dam-T (3) - ج	۳-۵
۴۴.....	مراجع:	۶

لیست علائم و اختصارات:

P	فشار هیدرودینامیک
C	سرعت موج آکوستیک در آب
t	زمان
a_g	شتاب زلزله
α	ضریب زلزله
g	شتاب جاذبه زمین
ω	فرکانس زاویه ای حرکات هارمونیک
ρ	جرم مخصوص آب
h	عمق مخزن
ω_n	فرکانس زاویه ای مود n ام
T_n	پریود مود n ام
n	شماره مود ارتعاشی
y	عمق هر نقطه نسبت به کف مخزن
C_n	تابعی از ω و ω_n
k_n	تابعی از C و ω_n
q_n	تابعی از C_n و k_n

۱ مقدمه

طی سالهای اخیر، سدهای بتنی زیادی ساخته شده و انتظار می رود که تعداد زیادتری نیز در مناطق زلزله خیز ساخته شوند. این سدها، دیر یا زود، علاوه بر عوامل زیان آور معمولی در معرض زمین لرزه های مهم نیز قرار خواهند گرفت. بنابراین لازم است که توجه فزاینده ای به ایمنی آنها در مقابل زلزله مبذول شود. پیش بینی رفتار سدهای بتنی قوسی در زمان وقوع زلزله یکی از سخت ترین و پیچیده ترین مسائل در دینامیک سازه است و عوامل زیر هم به این پیچیدگی میافزاید (Jansen, 1988):

- سدها و مخازن شکل‌های پیچیده ای دارند که ناشی از پستی و بلندیهای طبیعی (توپوگرافی) ساختگاه است.
- مدل کردن حرکات آب به صورت کاملا دقیق در هنگام زلزله تقریبا غیر ممکن است.
- مدلسازی پی و دیواره های سنگی اطراف سد که در حکم تکیه گاه سد میباشند، بطور دقیق غیر ممکن میباشد.
- پاسخ سد معمولا بستگی به حرکت آب مخزن در اثر زلزله، تغییر شکل پذیری سنگ کف و تاثیر متقابل حرکات آب، سنگ کف و خود سد بر همدیگر دارد.

حفظ و پایداری و تداوم بهره برداری از یک سازه، نیاز به مطالعه و تحقیق را پیرامون رفتار دینامیکی سازه ها، از جمله سدها، تحت اثر نیروهای به نسبت ناشناخته ولی تعیین کننده زلزله را ضروری می سازد. لذا با داشتن درک صحیح از چگونگی رفتار سد در مقابل نیروهای زلزله میتوان به انتخاب روش مناسب برای تحلیل سد در مقابل این نیروهای جانبی اقدام نمود.

در این تحقیق سعی شده است که مقایسه ای بین روشهای قدیمی محاسبه فشار آب ناشی از زلزله در سدهای بتنی قوسی با روشهای جدید مانند اجزای محدود صورت گیرد تا کارایی روشهای قدیمی مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد.

در روش های قدیمی برای محاسبه نیروهای وارده در اثر زلزله بر روی سدهای بتنی قوسی و دیگر سازه های هیدرولیکی که در تماس مستقیم با توده قابل توجهی از آب یا هر سیال دیگر قرار دارند، اغلب فشار

هیدرودینامیک ناشی از سیال را با نیروهای اینرسی ناشی از شتاب زلزله در سازه مورد نظر جمع می کردند. برای اولین بار محقق مشهوری بنام وسترگارد^۱ در اواخر دهه ۱۹۲۰ میلادی به منظور طراحی یک سد در ایالات متحده آمریکا، عامل فشار هیدرودینامیک به هنگام وقوع زلزله را در محاسبات خود منظور داشت. وی پس از چندین سال تحقیق و بررسی پیرامون این موضوع، عاقبت در سال ۱۹۳۳ میلادی مقاله ای را تحت عنوان (فشار آب بر سدها در هنگام وقوع زلزله) منتشر ساخت (Westergaard, 1933). در این مقاله او برای اولین بار بطور تحلیلی، فشار هیدرودینامیک آب بر روی سدهای بتنی وزنی تحت اثر حرکت هارمونیک افقی زمین را محاسبه کرد.

پس از وی دانشمندان دیگر و همکاران او، کار او را دنبال کردند. از جمله، دو دانشمند دیگر به نامهای زنگار^۲ و هافلی^۳ در سال ۱۹۵۳ میلادی، مقادیر فشار هیدرودینامیکی وارد بر سدهای وزنی را توسط روش شبیه سازی الکتریکی^۴ بدست آوردند (Zangar et al., 1952). در ادامه تحقیقات در این زمینه دانشمند دیگری بنام کوتسابو^۵ در سال ۱۹۶۰ میلادی نشان داد که حل وسترگارد تنها برای ارتعاشاتی با فرکانس کمتر از فرکانس طبیعی مخزن صادق است (Kotsubo, 1960). پس از او یک دانشمند دیگر ژاپنی به نام هاتانو^۶ موفق شد مقدار فشار هیدرودینامیک را با در نظر گرفتن خاصیت تراکم پذیری سیال، در هنگام وقوع زلزله محاسبه نماید (Hatano, 1965).

در نهایت، چوپرا^۷ از دانشگاه برکلی با بررسی تاثیر تراکم پذیری آب بر پاسخ فشار هیدرودینامیک مخزن، نشان داد که در مورد سیال تراکم ناپذیر حل وسترگارد در کلیه فرکانسهای بارگذاری صادق است. لیکن در سدهای بلند، تاثیر تراکم پذیری آب بر پاسخ فشار هیدرودینامیک در فرکانسهای بالا قابل توجه است. وی مقاله خود را در سال ۱۹۶۷ میلادی تحت عنوان (محاسبه فشار هیدرودینامیک وارد بر بدنه سدها در هنگام وقوع زلزله) منتشر ساخت (Chopra, 1967). او در تحقیقات خود موفق شد که اثرات ارتعاش زمین بر بدنه سد و مخزن را به

¹ Westergaard

² Zangar

³ Haefeli

⁴ Analog

⁵ Kotsubo

⁶ Hatano

⁷ Chopra

نحو مناسبی در نظر گرفته و سیستم درگیر سد و مخزن را به نحو مطلوبی مدل‌سازی نموده و راه حل تحلیلی مناسبی برای آن ارائه نماید.

به موازات پیشرفت روشهای تحلیلی، با در دسترس قرار گرفتن کامپیوترها و تکامل سریع آنها، استفاده از روشهای عددی نیز برای تحلیل دینامیکی سیستمهای سد و مخزن بطور گسترده ای متداول گردید. در طی این دو دهه مقالات متعددی در زمینه چگونگی استفاده از روشهایی همچون روش المانهای محدود برای محاسبه فشارهای هیدرودینامیک ناشی از زلزله در سدهای بتنی به نگارش درآمده است. در این زمینه نیز دانشمندان بسیاری به تحقیق و مطالعه پرداختند و تلاش آنها برای حل سیستمهای درگیر توسط روشهای عددی مذکور موفقیت آمیز بوده است. از جمله محققان در این زمینه می توان از زینکوویچ^۱ (۱۹۶۴)، شاران^۲ (۱۹۸۵) و چوپرا (۱۹۶۸) نام برد. به این ترتیب، با وجود کاربرد موفقیت آمیز روشهای عددی در سیستمهای سد و مخزن، هنوز هم مشکلات بسیاری برای محاسبه چنین سیستمهایی توسط اینگونه روشها وجود دارد که از آن جمله میتوان حجم زیاد حافظه مورد نیاز برای محیط سیال و محاسبات زیاد برای حل دستگاه معادلات سیستم را نام برد. محققان متعددی از جمله زینکوویچ (۱۹۶۴) روشهایی برای کاهش حجم محاسبات و حجم حافظه فعال مورد نیاز در روشهای عددی ارائه کرده اند و امروزه نیز دنیا شاهد تلاش مستمر دانشمندان و طراحان سدهای بزرگ در جهت ابداع روشهای کارا تر و دقیقتر می باشد.

^۱ Zienkiewicz

^۲ Sharan

۲ معادله دیفرانسیل حاکم بر انتشار امواج فشار

هیدرودینامیک در محیط سیال

پاسخ دینامیکی سیستم سد و مخزن در گروه مسائلی از اندرکنش سازه و سیال قرار دارد که در آن جابجائیهای سیال کوچک و تحریک دینامیکی، مولفه هایی با فرکانس متوسط را شامل می شود. برای این مسائل تراکم پذیری اهمیت متوسط و لزجت اهمیت کمی دارد. به منظور بررسی رفتار دینامیکی سیستم، آب مخزن محیطی همگن، ایزوتروپ، غیر لزج، غیر چرخشی و با تراکم پذیری خطی در نظر گرفته می شود. با ساده کردن معادلات ناویر-استوکس^۱ برای مایعات غیر لزج، در محدوده جابجائیهای کوچک سیال و استفاده از قوانین تجربی استوکس برای رابطه بین فشار هیدرودینامیک و کرنش حجمی ($\epsilon V = \epsilon X + \epsilon Y + \epsilon Z$) و صرف نظر از تغییرات زمانی و مکانی دانسیته جرمی آب، معادله دیفرانسیل حاکم بر انتشار امواج فشار هیدرودینامیک در محیط مخزن با نام معادله هلمهولتز به شکل زیر حاصل می شود:

$$\nabla^2 P = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad 2-1$$

که در آن، P فشار هیدرودینامیک و C سرعت انتشار صوت در مخزن می باشد.

۲-۱ روش وسترگارد

وسترگارد در سال ۱۹۳۳ میلادی برای نخستین بار بطور تحلیلی فشار هیدرودینامیک آب بر روی سدهای بتنی وزنی را تحت اثر حرکت هارمونیک افقی زمین محاسبه کرد.

فرضیاتی که وی در نظر گرفت، با توجه به شکل ۲-۱ به شرح زیر می باشد.

- ۱- رفتار سیستم دو بعدی است.
- ۲- سد با دیواره قائم و صلب می باشد.
- ۳- کف مخزن افقی و صلب است.
- ۴- طول مخزن در جهت بالادست نامحدود است.

^۱ Navier-Stokes Equations

۵- شتاب زمین افقی و هارمونیک و از رابطه $a_g = \alpha g \cos \frac{2\pi t}{T_s}$ تبعیت میکند. که در آن α ضریب زلزله، g

شتاب ثقل زمین و T_s پریود تحریک می باشند.

۶- فرکانس شتاب زمین کمتر از فرکانس طبیعی مخزن است.

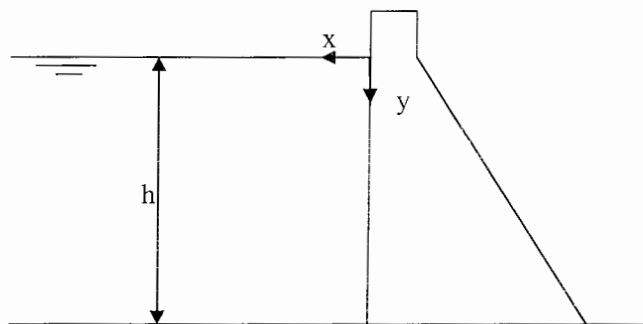
۷- تغییر شکلها کوچک هستند.

۸- سیال محیطی همگن، ایزوتروپ، غیر لزج و غیر چرخشی با تراکم پذیری خطی در نظر گرفته می شود.

۹- اثر امواج سطحی در نظر گرفته نمی شود.

شکل دیگری از رابطه مذکور در بند ۵ بصورت $a_g = \alpha g e^{i\omega t}$ می باشد که در آن ω فرکانس بارگذاری زلزله می باشد.

همانطور که در فصل قبل گفته شد معادله حاکم بر محیط مخزن از نوع هلمهولتز و به شکل $\nabla^2 P = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}$ می باشد:



شکل ۲-۱ مدل سد و مخزن بکار رفته توسط وسترگارد

با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده توسط وسترگارد، شرایط مرزی به شکل زیر قابل بیان هستند.

$$\text{سطح مخزن: } p(x, y = 0, t) = 0 \quad ۲-۲$$

$$\text{کف مخزن: } \frac{\partial p(x, y=h, t)}{\partial y} = 0$$

$$\text{فصل مشترک سد و مخزن: } \frac{\partial p(x=0, y, t)}{\partial x} = -\rho a_g$$

$$\text{بالا دست مخزن: } \lim_{x \rightarrow \infty} p(x, y, t) = 0$$

$$p(x, y, 0) = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial t}(x, y, 0) = 0$$

وسترگارد بر اساس فرضیات فوق الذکر، با حل معادلات دیفرانسیل مربوطه و شرایط مرزی حاکم بر امواج فشار هیدرودینامیک در محیط مخزن، فرمول زیر را برای پاسخ فشار هیدرودینامیک مخزن تحت ارتعاشات هارمونیک زمین ارائه کرد:

$$p = \frac{4\rho\alpha gh}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)q_n} \text{Exp}(-q_n x) \cos(k_n^r y) \text{Exp}(i\bar{\omega}t) \quad 2-3$$

مقادیر مشخصه مخزن عبارتند از:

فرکانس طبیعی ارتعاش مخزن در مود n ام:

$$\omega_n^r = \frac{(2n-1)\pi c}{2h} \quad 2-4$$

پریود طبیعی ارتعاش مخزن در مود n ام:

$$T_n^r = \frac{4h}{(2n-1)c} \quad 2-5$$

مقدار طول موج مربوط به مود n ام:

$$\lambda_n^r = \left(\frac{4h}{2n-1}\right) \quad 2-6$$

در رابطه ۲-۳ q_n و k_n^r به ترتیب برابرند با:

$$q_n = k_n^r c_n \quad 2-7$$

$$k_n^r = \frac{\omega_n^r}{c} \quad 2-8$$

$$C_n = \sqrt{1 - \left(\frac{\bar{\omega}}{\omega_n^r}\right)^2} \quad 2-9$$

در معادله فوق $\bar{\omega}$ فرکانس تحریک زلزله می باشد. با قراردادن $\bar{\omega}$ و ω_n^r در معادله ۲-۹ خواهیم داشت

$$C_n = \sqrt{1 - \left(\frac{4h}{(2n-1)cT}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{4h}{(2n-1)\lambda}\right)^2} \quad 2-10$$

رابطه ۲-۳ بخوبی نشان میدهد که فشار هیدرودینامیک بطور خطی متناسب با جرم حجمی سیال، عمق مخزن و ضریب α است. همچنین ضریب $\text{Exp}(-q_n x)$ در این عبارت حاکی از این مطلب است که هرچه از بدنه سد به سمت بالا دست مخزن دور شویم، فشار هیدرودینامیک کوچکتر شده و مستهلک می گردد و در نهایت توزیع فشار هیدرودینامیک در عمق مخزن به شکل یک تابع کسینوسی می باشد.

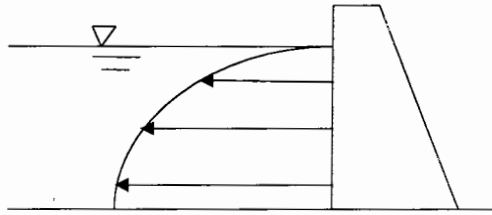
چنانچه پریود بار خارجی وارده که در اینجا نیروی زلزله می باشد، T یا یکی از پریودهای طبیعی مخزن برابر گردد، مقدار C_n در رابطه ۹-۲ صفر گردیده و طبق فرمول وسترگارد، مقدار فشار عملاً به سمت بی نهایت میل خواهد کرد که این موضوع از نظر دینامیکی به صورت ضربی از فرکانس ارتعاش طبیعی سیستم سد و مخزن می باشد.

حالت دیگری که مورد بررسی خواهیم داد، زمانی است که پریود بارگذاری T کوچکتر از پریود طبیعی مخزن یعنی T_n باشد که در این صورت در رابطه ۹-۲ مقدار پارامتر C_n یک عدد موهومی خواهد بود و جواب وسترگارد در این حالت صادق نخواهد بود. لذا شرط وجود جواب آن است که پارامتر C_n یک عدد حقیقی باشد، که این موضوع نیز مستلزم آن است که فرکانس بارگذاری $\bar{\omega}$ همیشه کوچکتر از فرکانس طبیعی مخزن ω_n^r باشد و این مسئله خود یکی از محدودیتهای بزرگ برای روش وسترگارد محسوب می شود. به عنوان مثال چنانچه پریود طبیعی اول مخزن را برابر $T_1^r = \frac{4h}{c}$ در نظر بگیریم، آنگاه به ازای مقادیر $c = 1440m/s$ ، $h = 100m$ مقدار T_1^r برابر با 0.28 ثانیه بدست خواهد آمد و در این حالت پریود بارگذاری T باید همواره از این مقدار بزرگتر باشد. وسترگارد همچنین موفق شد که با حفظ ممان واژگونی در فونداسیون سد، مقدار حداکثر فشار وارده در هر نقطه از سد را به صورت یک سهمی تقریب بزند و آن را به صورت زیر نشان دهد که در آن h و γ برحسب فوت و فشار برحسب تن بر فوت مربع می باشد (Westergaard, 1933).

$$P_{max} = \frac{0.0255\sqrt{hy}}{\sqrt{1-0.72\left(\frac{h}{1000T}\right)^2}} \quad ۲-۱۱$$

۲-۱-۱ روش جرم افزوده

چنانچه در روش وسترگارد، شتاب زمین به صورت $a_g = \alpha g \cos(\bar{\omega}t)$ فرض گردد که یک تابع هارمونیک است، آنگاه می توان میزان فشار ماکزیمم را به ازای $x = 0$ و در زمانهای مشخصی به صورت زیر بدست آورد (Westergaard, 1933):



شکل ۲-۲ اثر شتاب هارمونیک زمین بر روی فشار

$$a_g = \alpha g \cos \frac{2\pi}{T} t \quad 2-12$$

$$P_{max} = P(x = 0, t = 0, T, 2T, \dots) \quad 2-13$$

$$P_{max} = 8 \alpha \frac{\rho h g}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2 C_n} \sin \frac{(2n-1)\pi y}{2h} \quad 2-14$$

وسترگارد همچنین متوجه شد که در همین زمانها یعنی $t = 0, T, 2T, \dots$ به علت هم فاز بودن شتاب زمین با فشار هیدرودینامیک، شتاب زمین نیز ماکزیمم است. لذا او چنین نتیجه گیری کرد که فشار هیدرودینامیک در واقع همان نیروی اینرسی آب است که به بدنه سد وارد می شود. پس می توان فرض نمود که جرم آب در فاصله ای مانند b از بدنه سد، بر روی ارتعاش سد موثر بوده و برای محاسبه حداکثر فشار وارده به سد از طرف مخزن، به جای مخزن می توان جرم آبی به عرض b را به سد متصل کرده و انتظار داشت که همان فشار هیدرودینامیک مخزن شبیه سازی شود. به عبارت دیگر با نوشتن قانون دوم نیوتن برای عرض واحد سد داریم:

$$F = ma \Rightarrow P_{max} = ma_{max} \quad 2-15$$

$$a_{max} = \alpha g, m = \rho b \Rightarrow P_{max} = \rho b \alpha g \Rightarrow b = \frac{P_{max}}{\alpha \rho g} = \frac{P_{max}}{\alpha \gamma_0}$$

در اینجا وسترگارد با تقریب زدن منحنی فشار به صورت سهمی و با فرض $T > \frac{4}{3} sec$ و $h < 150m$ برای یک حالت خاص مقدار P_{max} را به صورت زیر بدست آورد:

$$P_{max} = \frac{7}{8} \alpha \rho g \sqrt{h(h-y)} \quad 2-16$$

$$\Rightarrow b = \frac{7}{8} \sqrt{h(h-y)} \Rightarrow \bar{M} = \rho b \Rightarrow \bar{M} = \frac{7}{8} \rho \sqrt{h(h-y)} \quad 2-17$$

در روابط فوق \bar{M} جرم افزوده است که تابعی از نسبت فرکانس بارگذاری به فرکانس طبیعی مخزن است و h ارتفاع مخزن و y فاصله از کف مخزن می باشد.

اگر نسبت ماکزیمم فشار هیدرودینامیک را به فشار هیدرواستاتیک در هر مقطع از سد به فاصله y از سطح آب تشکیل دهیم، آنگاه خواهیم داشت:

$$\frac{P_{hyd}}{P_{hys}} = \frac{7}{8} \alpha \frac{\rho g \sqrt{hy}}{\rho g y} = \frac{7}{8} \alpha \sqrt{\frac{h}{y}} \quad 2-18$$

$$y = h \Rightarrow \frac{P_{hyd}}{P_{hys}} = \frac{7}{8} \alpha$$

$$\alpha = 0.1 \Rightarrow \frac{P_{hyd}}{P_{hys}} = \frac{7}{80}$$

با توجه به فرضیات به کار رفته در روش جرم افزوده، مشاهده می شود که این روش چندان دقیق نبوده و از آن فقط می توان برای طراحی سدهای کوتاه و صلب استفاده نمود زیرا در تحلیل دینامیکی سدهای بلند و در بارگذاریهایی با فرکانس بیش از فرکانس طبیعی مخزن، انعطاف پذیری بدنه سد و رفتار دینامیکی مخزن، اثرات خود را آشکار خواهند ساخت.

اصولا وجود آب در پشت سد و ایجاد پدیده اندرکنش، باعث ایجاد تغییراتی عمده در خصوصیات دینامیکی سیستم بدون مخزن می شود و ایجاد همین تغییرات است که پاسخ سیستم سد و مخزن را در برابر تحریکی دلخواه، از پاسخ سیستم بدون مخزن در برابر همان تحریک بسیار متفاوت می سازد.

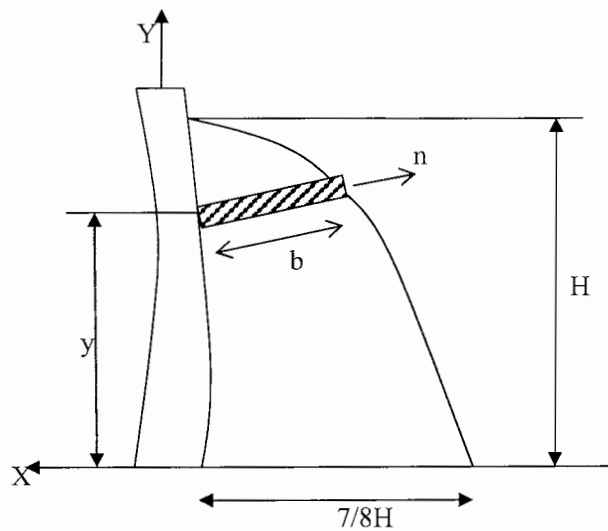
به طور عمده اندرکنش دینامیکی بین سد و مخزن باعث افزایش تنشهای داخلی سد نسبت به وضعیت سد تنها تحت اثر زلزله میگردد و میزان این اندرکنش با افزایش تنش با نسبت فرکانس طبیعی مخزن به فرکانس طبیعی سد در ارتباط است (Chopra, 1968). این نسبت θ_r از معادله زیر به صورت تقریبی قابل محاسبه است:

$$\theta_r = \frac{\omega_l^r}{\omega_l^s} \cong \frac{\frac{\pi c}{2h}}{\frac{2\pi}{T_l}} = \frac{cT_l}{4h} \quad 2-19$$

در معادله فوق T_l پریود طبیعی سد، c سرعت انتشار امواج فشار هیدرودینامیک در محیط مخزن و h عمق مخزن است (Chopra, 1968). برای یک مخزن با عمق معین h ، هرچه θ_r بیشتر باشد، سد انعطاف پذیرتر بوده و اصطلاحا سیستم درگیرتر خواهد بود و برعکس هر چه سد صلب تر باشد، تاثیر اندرکنش بین سد و مخزن بر پاسخ دینامیکی سیستم کمتر بوده و معادلات کمتر درگیر خواهند بود.

یکی از ویژگیهای مهم در بررسی اثر متقابل دینامیکی سیستم سد و مخزن، تراکم پذیری آب مخزن می باشد. طبق تعریف اگر کرنش حجمی ($\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$) در سیال برابر صفر یا سرعت صوت در سیال به سمت بی نهایت میل کند، سیال تراکم ناپذیر محسوب می شود. اهمیت این ویژگی تابعی از نسبت θ_r ، عمق مخزن h و

محتوای فرکانسی بارگذاری می باشد. هنگامی که فرکانس طبیعی مخزن بیش از فرکانسهای حامل عمده انرژی زمین لرزه باشد، یا نسبت θ_r بیش از ۲ باشد، $\theta_r > 2$ (سازه سد به اندازه کافی انعطاف پذیر باشد) میتوانیم سیال را تراکم ناپذیر فرض کنیم (Fok et al., 1987). صرف نظر کردن از اثرات تراکم پذیری سبب می شود اثرات متقابل سد و مخزن معادل با جرم افزوده ثابتی برای ارتعاشات سد در نظر گرفته شود. در مقابل، اگر تراکم ناپذیری در نظر گرفته شود، مقادیر جرم افزوده و استهلاک سازه سد در طول مدت زمان تحریک زلزله تغییر میکند و استفاده از مفهوم تقریبی جرم افزوده در تحلیل مناسب نمی باشد.



شکل ۲-۳ روش جرم افزوده وسترگارد

۳ برنامه کامپیوتری مورد استفاده

۳-۱ مقدمه

بررسی رفتار توده های عظیم بتنی مانند سدهای قوسی، بسیار پیچیده می باشد. لذا انجام چنین بررسی ای لزوم استفاده از برنامه های کامپیوتری جامع با قابلیت های بالا را ایجاب میکند. برنامه کامپیوتری مورد استفاده در این تحقیق برنامه Ansys 10 میباشد.

۳-۲ معرفی مختصر نرم افزار Ansys 10 و قابلیت های آن

برنامه Ansys را میتوان قوی ترین برنامه المان محدود فعلی جهان دانست که در یک محدوده وسیع قادر به تحلیل بسیاری از مسائل شامل مسائل سازه ای، سیالاتی، مکانیکی و الکتریکی میباشد. این برنامه دارای امتیازات ویژه ای نسبت به سایر برنامه های مشابه می باشد (Ansys, 2005).

مهمترین دلیل انتخاب این برنامه در تحقیق حاضر، توانایی بالای آن جهت طراحی مش بندی محیطهایی با هندسه پیچیده و حجیم و نیز قدرت لحاظ کردن مسائل اندرکنش آب و سازه ها است. قابلیت مهم دیگر این برنامه این است که قادر به حل مسائل مقادیر ویژه با ماتریس های ضرایب نامتقارن (مسائل اندرکنش) با در نظر گرفتن تراکم پذیری آب می باشد.

این برنامه قادر به اعمال شرایط مرزی دلخواه در مرزهای مخزن، اعم از جذب کامل، مرز بی نهایت (انعکاس کامل) یا مرز با درصد جذب انرژی معین میباشد. در این برنامه مساله اندرکنش سازه و سیال می تواند هم از طریق دیدگاه لاگرانژی و هم به طریق دیدگاه اویلری در نظر گرفته شود. در این تحقیق، جهت در نظر گرفتن مساله اندرکنش، از دیدگاه اویلری استفاده شده است. بدین ترتیب که مجهول گرهی محیط مخزن، فشار و مجهول گرهی سد و فونداسیون تغییر مکان می باشد و گره هایی که در مرز مشترک سد و مخزن قرار دارند، دارای درجات آزادی فشار و تغییر مکان خواهند بود.

از محاسن دیگر این برنامه سهولت مدلسازی هندسی و بارگذاری در آن می باشد. همچنین به دلیل دارا بودن المان های مختلف در شرایط فیزیکی مختلف مانند سیال، دارای شرایط خوبی برای مدلسازی های خاص می باشد.

از امتیازات ویژه این برنامه می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- توانایی برنامه در آنالیز و طراحی انواع سیستمهای مهندسی از جمله سازه ای، سیالاتی، مکانیکی، حرارتی، الکترومغناطیس و کمانش.
- ۲- انواع آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی (غیر دائمی، مودال، هارمونیک)
- ۳- علاوه بر آنالیز خطی، توانایی بالایی برای انجام آنالیزهای غیر خطی به کمک این برنامه موجود می باشد، بطوریکه می توان هم مصالح و هم هندسه سازه را به صورت خطی یا غیر خطی مدل کرد.
- ۴- وجود انواع مختلف المان در این برنامه شامل المان یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی با درجات آزادی متفاوت.

۳-۳ اصول کلی برنامه Ansys

جامع بودن برنامه Ansys لزوم دستورات زیادی را در برنامه ایجاد میکند. علیرغم وسعت زیاد دستورات، آنالیز در سه مرحله کلی زیر انجام می گیرد:

- ۱- مرحله قبل از پردازش
- ۲- مرحله پردازش
- ۳- مرحله بعد از پردازش

هریک از مراحل فوق برای اهداف خاصی در نظر گرفته شده اند و شامل دستورات و زیر دستورات متعددی میباشند. روند عمومی در این برنامه و مراحل آنالیز در گامهای زیر مشترک هستند:

- ۱- ساخت مدل
- ۲- اعمال نیروها (شامل شرایط تکیه گاهی و شرایط مرزی) و حل سیستم
- ۳- بررسی نتایج

مدلسازی به دو صورت است:

الف) مستقیم (با تعریف گره ها و المانها)

ب) هندسی (با تعریف کل جسم در ابتدا و بعد شبکه بندی آن)
از نظر پردازش و خروجی ها دو نوع پردازشگر در این نرم افزار موجود است:

۱- پردازشگر عمومی

۲- پردازشگر تاریخچه زمانی

که هر دو پردازشگر هم بصورت گرافیکی و هم به صورت عددی قادر به ارائه خروجی می باشند.

۳-۴ زبان برنامه نویسی طراحی پارامتریک (APDL)

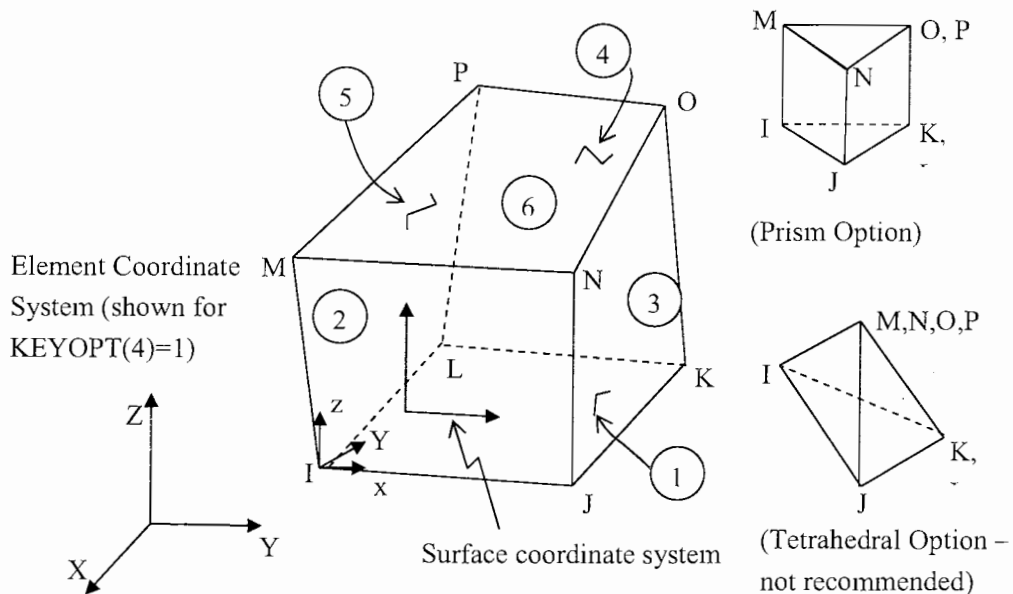
این نرم افزار همچنین شامل یک زبان مخصوص به نام APDL برای برنامه نویسی در حل مدل‌های خاص و وارد کردن تغییرات دلخواه در برخی موارد می باشد (این زبان برنامه نویسی جدا از خود نرم افزار ANSYS است) APDL اجازه میدهد که مدل خود را بصورت پارامتریک (با متغیرها) بسازیم. که این به نوبه خود باعث تغییرات آسان در طراحی و انعطاف بیشتر کار می شود. همچنین شامل ایجاد حلقه های تکرار، ساختار تصمیم گیری و ... میباشد که در تحقیقات در مورد آنالیزهای دینامیکی با رکورد های زلزله بسیار کارآمد بوده و از آن استفاده شده است.

۳-۵ نحوه مدل نمودن مسئله

برای مدل نمودن مسئله لازم است که المانهایی برای آب، سازه و فونداسیون سد در نظر گرفته شود. در قسمت های زیر المانهای بکار رفته برای قسمت های مختلف مسئله بیان شده است.

۳-۵-۱ مدل بدنه سد

جهت مدل کردن محیط سد از المان Solid 45 در برنامه ANSYS استفاده شده است. این المان که توسط ۸ گره مشخص می شود، برای مدل کردن محیطهایی که باید به شکل سه بعدی شبیه سازی شوند، مورد استفاده قرار میگیرد. هر کدام از گره های المان دارای سه درجه آزادی انتقالی در جهات اصلی x , y , و z میباشد. شکل کلی این المان در شکل ۱-۳ دیده میشود. اطلاعات ورودی لازم جهت تعریف این المان عبارت از: مختصات گره ها، خواص مصالح که شامل مدول الاستیسته، جرم واحد حجم (چگالی)، میرایی و ضریب پواسون میباشد.



شکل ۱-۳ شکل کلی المان Solid 45

اندازه المان ها تابعی از مشخصات بدنه سد می باشد و در حد امکان باید از تعداد کافی المان در مدلسازی استفاده نمود. دقت نتایج و زمان مورد نیاز برای تحلیل به روش اجزای محدود، دو پارامتر اصلی حاکم در انتخاب نوع و تعداد المان ها میباشند. بر اساس توصیه کمیته سدهای آمریکا حداقل تعداد المان مورد استفاده در مدلسازی سد نباید از ۵ المان در ارتفاع و بدنه در صورت استفاده از المان های با درجات آزادی بالا کمتر باشد، نسبت ابعاد المان های مجاور نیز نباید از دو برابر بعد کوچکتر تجاوز کند.

۳-۵-۲ مدل فونداسیون سد

اثرات قابل ملاحظه ای که انتشار امواج فشاری در محدوده بستر سنگی سدهای قوسی روی پاسخ سد دارند بررسی و در نظر گرفتن اندرکنش سد و پی سنگی را اجتناب ناپذیر میکنند.

مدل کردن محدوده پی به علت خصوصیات هندسی پیچیده آن و تغییرات زیاد مشخصات مکانیکی سنگ در محدوده پی، کاری پیچیده می باشد و مانند مسائل اندرکنش خاک و سازه، می بایستی تاثیر تولید و انتشار امواج فشاری و استهلاک آنها را با در نظر گرفتن یک محیط نیمه بی نهایت بررسی نمود که این خود پدیده ای است که عمدتاً در آنالیزها در محدوده فرکانس کاربرد دارد. در صورتی که پی بصورت محدود در نظر گرفته شود باید

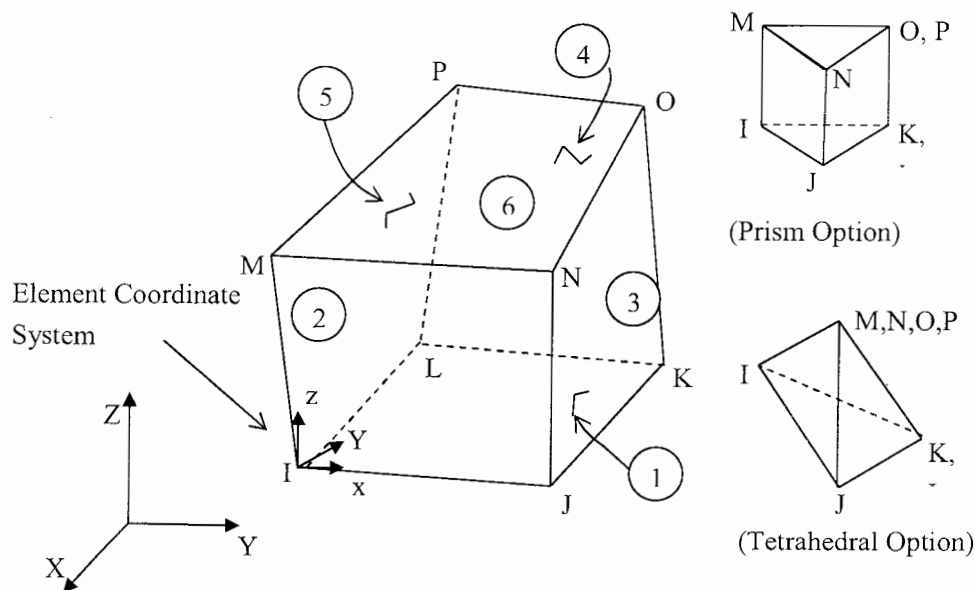
با ایجاد شرایط مرزی مناسب از انعکاس امواج فشاری به داخل سیستم جلوگیری نمود. لذا با توجه به چنین مسأله ای عمدتاً محققین از جرم پی صرف نظر کرده اند.

مدلسازی پی سد با توجه به نسبت مدول الاستیسیته سنگ بستر به مدول الاستیسیته بتن بدنه سد صورت می گیرد. برای مقادیر E_f/E_c برابر یا بیشتر از ۱، شبکه ای به شعاع ارتفاع سد مطابق شکل کفایت میکند. برای مقادیر E_f/E_c بین یک چهارم تا یک دوم، ۲ برابر ارتفاع سد در نظر گرفته می شود. مقادیر فوق الذکر از بررسی نتایج تجربی حاصل شده اند، لیکن هنوز معیار دقیقی برای انتخاب ابعاد مناسب پی ارائه نشده است. برای نسبتهای E_f/E_c با مقدار ۲ و بیشتر و یا به منظور ساده سازی می توان بستر سد را صلب در نظر گرفت و از مدلسازی هندسه پی صرف نظر نمود (FERC, 1999).

۳-۵-۳ مدل مخزن سد

المان مورد استفاده جهت مدل کردن محیط مخزن، المان fluid 30 است. این المان جهت مدل کردن محیط های سیال در مجاورت سازه مورد استفاده قرار می گیرد. کاربرد نمونه این المان در مسائل اندرکنش آب و سازه و نیز برای بررسی سازه های غوطه ور در سیال می باشد. این المان دارای هشت گره می باشد. درجه آزادی انتخابی برای همه گره ها، درجه آزادی فشار می باشد. ضمن اینکه گره های مجاور سازه علاوه بر درجه آزادی فشار، دارای درجات آزادی انتقالی در سه جهت x, y, z نیز میباشند.

این المان، توانایی جذب انرژی امواج فشار هیدرودینامیک رادر مرزهای خود دارد و همین توانایی ما را قادر می سازد تا در مرزهای مخزن شرایط مرزی دلخواه جذب انرژی را اعمال کنیم. شکل کلی این المان در شکل ۲-۳ قابل مشاهده است.



شکل ۲-۳ شکل کلی المان Fluid 30

تمام تحلیل های ارتعاش آزاد، تاریخچه زمانی و هارمونیک قابل استفاده در مورد این المان می باشند. بعد از مش بندی سیال، باید مرز تماس آن با سازه در تمامی گره ها بصورت درگیر تعریف گردد و بدین وسیله معادلات سازه و سیال به شکل درگیر در می آیند.

هندسه، موقعیت های گرهی و سیستم مختصات جهت تعریف این المان در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. اطلاعات ورودی جهت تعریف این المان علاوه بر مختصات گرههای آن، چگالی سیال و سرعت صوت، پارامتری به نام Mu جهت تعیین میزان جذب انرژی میباشد. سرعت صوت در سیال توسط رابطه $\sqrt{\frac{k}{\rho}}$ تعیین می شود که k مدول بالک سیال و ρ جرم حجمی سیال میباشد. مقدار Mu بین صفر و یک میتواند تغییر کند، که مقدار صفر بیانگر عدم جذب انرژی و مقدار ۱ مبین جذب کامل انرژی است.

هرگاه آنالیز دینامیکی در محدوده زمان انجام گیرد، طول معین از مخزن که در بالا دست سد امتداد می یابد، با توجه به هندسه سد و محیط اطراف (دریاچه پشت سد) در نظر گرفته می شود. به منظور ساده سازی و مطابق توصیه های موجود، جهت مدلسازی آب پشت سد، کانالی که در بالا دست سد در محدوده تصویر بدنه سد بر

صفحه قائم قرار میگیرد، با طول مشخص و یا نیمه بی نهایت در نظر گرفته می شود. عوامل موثری که در مدلسازی مخزن، در حالت کلی می توان در نظر گرفت به شرح زیر می باشند:

۱- تراکم پذیری آب

۲- شرایط مرزی مناسب برای جلوگیری از انعکاس امواج در انتهای مخزن

۳- اثرات جذب و انعکاس مرزی مخزن

۳-۵-۴ تاثیر امواج سطحی

با توجه به نوع المان استفاده شده در این طرح پژوهشی جهت شبکه بندی مخزن، به جز اثرات امواج سطحی، بقیه عوامل فوق در مدلسازی منظور شده است.

طولی از مخزن که در مدل ریاضی سیستم سد و مخزن باید مورد استفاده قرار گیرد و از انعکاس امواج فشاری از بالادست مخزن به طرف سد جلوگیری گردد، در حدود سه برابر ارتفاع سد می باشد (FERC, 1999).

۳-۵-۵ شرایط مرزی اعمال شده

شرط مرزی اعمال شده به محیط فونداسیون بدین گونه است که تمامی گره های مرزی فونداسیون در جهات انتقال x , y , و z مقید شده اند.

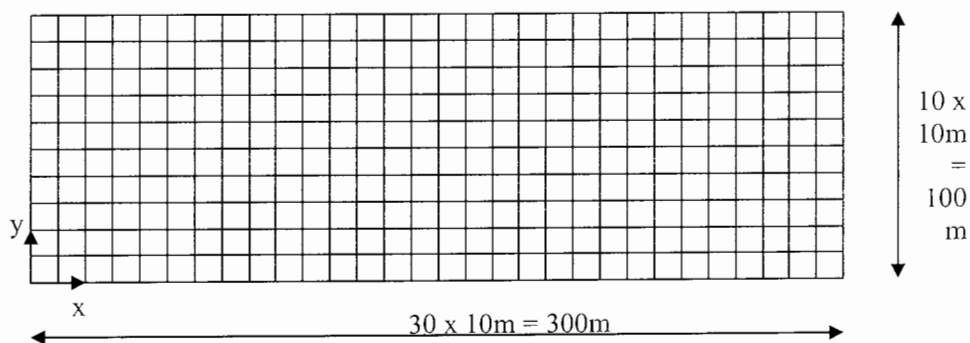
در نرم افزار Ansys، معادلات حاکم بر مخزن از معادله انتشار امواج با مجهول گرهی فشار، استخراج شده است و مبحث شرایط مرزی از عوامل موثر بر مدل مخزن، به خصوص حالت آب تراکم پذیر می باشد. در محیط مخزن دو نوع شرط مرزی اعمال شده است. اولین شرط مرزی در مرز مشترک بین سد و مخزن است که به شکل یک مرز اندرکنش تعریف می شود. شرط مرزی دوم در گره های سطح مخزن است که با توجه به توصیه های موجود مبنی بر مجاز بودن فرض فشار صفر در سطح مخزن (که خطای ناشی از این فرض بسیار اندک و قابل صرف نظر کردن است)، فشار هیدرودینامیک در کلیه گره های سطح مخزن، صفر فرض شده است.

۴ مقایسه جوابهای وسترگارد و المانهای محدود

برای مقایسه جوابهای وسترگارد و المانهای محدود، سه حالت در نظر گرفته شد. در حالت اول یک مخزن آب در نظر گرفته شد که دیواره های اطراف آن کاملاً صلب میباشند. در حالت دوم برای بررسی اثر انعطاف پذیری سدها، المانهای سد نیز به مدل اضافه گردید و یک طرف مخزن که به سد منتهی میشود دیگر حالت صلب نداشت. در حالت سوم یک سد قوسی به همراه دیواره های سنگی بصورت کامل مدل گردید تا جوابهای یک مسئله کاملاً عملی با جوابهای وسترگارد مقایسه گردد. این سه حالت بترتیب در زیر بررسی شده اند.

۴-۱ حالت اول: دورتادور آب کاملاً صلب است و فقط آب مدل میگردد.

این حالت کاملاً شبیه به فرضیات وسترگارد میباشد و شروط ۳ و ۲ ذکر شده در قسمت ۱ را اقلع میکند. سایر شروط ذکر شده نیز در هنگام مدلسازی رعایت میگردد. فقط شرط چهارم که طول مخزن را بینهایت در نظر میگیرد، بصورت طول مخزن معادل ۳ برابر ارتفاع مخزن در نظر گرفته میشود و در عمل هم نشان داده که فرض خوب و قابل قبولی است (FERC, 1999). مدل المان محدود مطابق شکل ۴-۱ در نظر گرفته شد و مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۴-۱- مش بندی مخزن در حالت اول

همانطور که شکل ۴-۱ نشان میدهد، ارتفاع مخزن برابر با ۱۰۰م میباشد که توسط ۱۰ المان ۱۰ متری مش بندی شده است. طول مخزن ۳۰۰م گرفته شده است که سه برابر ارتفاع آن میباشد و باز هم توسط المانهای ۱۰ متری مش بندی شده است. دیواره صلب سد در $y=0$ در نظر گرفته شده است و در تمام اطراف آب دیواره های

صلب قرار گرفته و در سطح آب فشار برابر صفر در نظر گرفته شده است. سرعت امواج برای آب برابر 1440 m/s در نظر گرفته شد.

پریودهای ارتعاش مخزن در جهت x محاسبه گردید و برای ۳ پریود اول مخزن مقادیر بدست آمده از المان محدود با مقادیر در نظر گرفته شده توسط وسترگارد در جدول ۴-۱ مقایسه گردیده است.

Mode Shape	1	2	3
Westergard	0.2778	0.0926	0.0556
Finite Element	0.2775	0.0917	0.0542

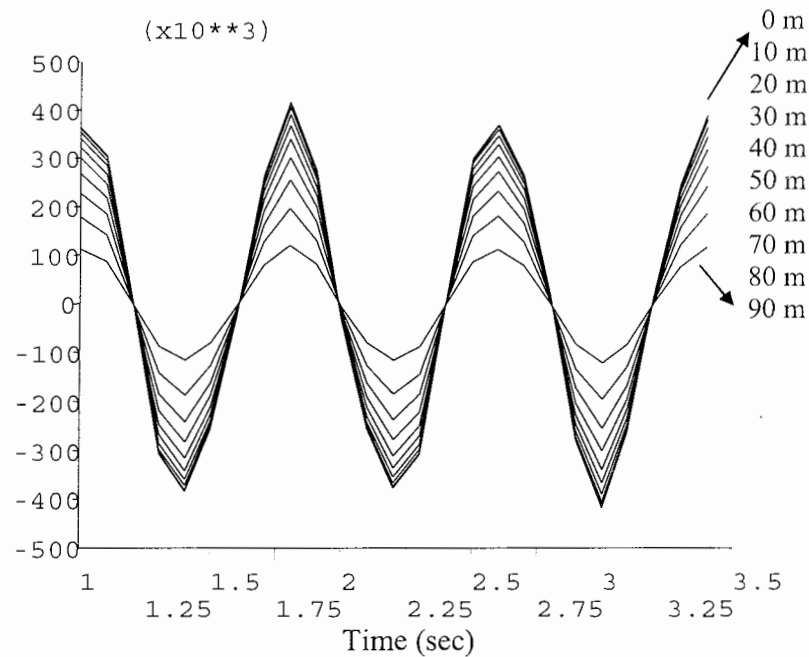
جدول ۴-۱- مقایسه پریودهای ۳ مود اول ارتعاش برحسب ثانیه بین روش وسترگارد و المانهای محدود برای

شکل ۴-۱

برای تعیین پریودها در جدول ۴-۱، در روش وسترگارد از فرمول ساده ۵-۲ و در روش المانهای محدود از آنالیز مودال استفاده گردید. همانطور که این جدول نشان میدهد تشابه قابل توجهی بین نتایج، بویژه در مودهای اصلی اول وجود دارد. تفاوت جزئی بین دو روش میتواند ناشی از محدود بودن طول مخزن در روش المان محدود باشد.

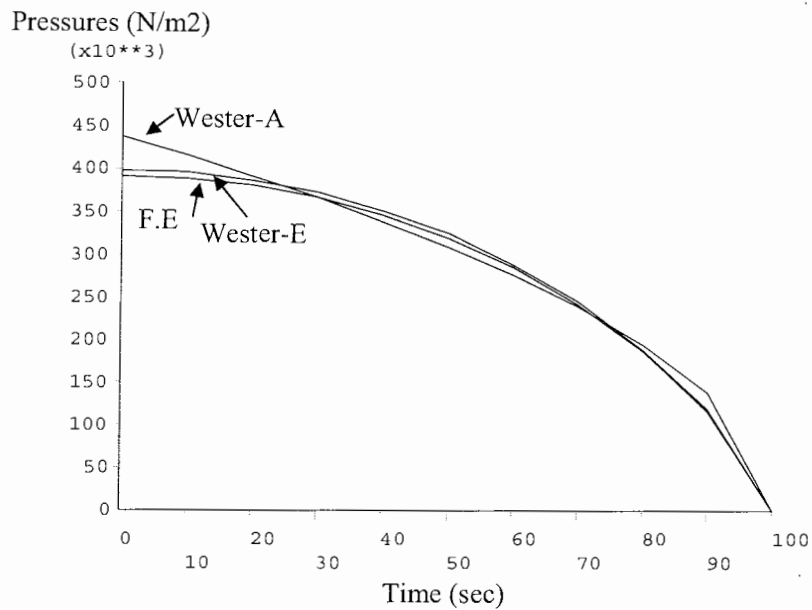
در مرحله بعدی مخزن تحت اثر شتاب هارمونیک در جهت x با پریود 0.8sec قرار گرفت. این پریود ارتعاش از اولین پریود ارتعاش مخزن بزرگتر بوده و بدین ترتیب تقریباً تمام شرایط حل وسترگارد تامین میگردد. شکل ۴-۲ نشان دهنده نحوه تغییرات فشار در ارتفاعات 0,10,20,30,40,50,60,70,80,90m نسبت بزمان در مخزن میباشد. همانطور که این شکل نشان میدهد تغییرات فشار در تمام این نقاط نیز بصورت هارمونیک و با پریود ارتعاشی مساوی با پریود بارگذاری میباشد. لازم بذکر است که در سطح مخزن که درتراز 100m واقع است مقدار فشار در تمام زمانها صفر بوده و بنابراین ترسیم نگردیده است.

Pressures (N/m²)



شکل ۲-۴- تغییرات فشار نسبت به زمان برای گره های با ارتفاعات مختلف در مخزن در حالت اول

همچنین شکل ۳-۴ جواب روش المان محدود را با وسترگارد مقایسه مینماید. رابطه وسترگارد به دو شکل دقیق و تقریبی بررسی گردید. شکل دقیق رابطه وسترگارد با استفاده از معادله ۳-۲ بدست آمده است و در اشکال با علامت Wester-E نشان داده شده است و شکل تقریبی وسترگارد با استفاده از معادله ۱۱-۲ بدست آمده است و در اشکال با علامت Wester-A نشان داده شده است و نتایج المانهای محدود نیز با علامت F.E نشان داده شده اند.



شکل ۳-۴- مقایسه ماگزیمم فشارهای بدست آمده از روش المان محدود و وسترگارد در حالت اول

همانطور که این شکل نشان میدهد آنالیز المانهای محدود تقریباً با رابطه وسترگارد دقیق مطابق است و تفاوت جزئی با وسترگارد تقریبی دارد. تفاوت بسیار ناچیز بین المانهای محدود و وسترگارد دقیق میتواند ناشی از مدل کردن محدود طول مخزن در مدل المان محدود باشد.

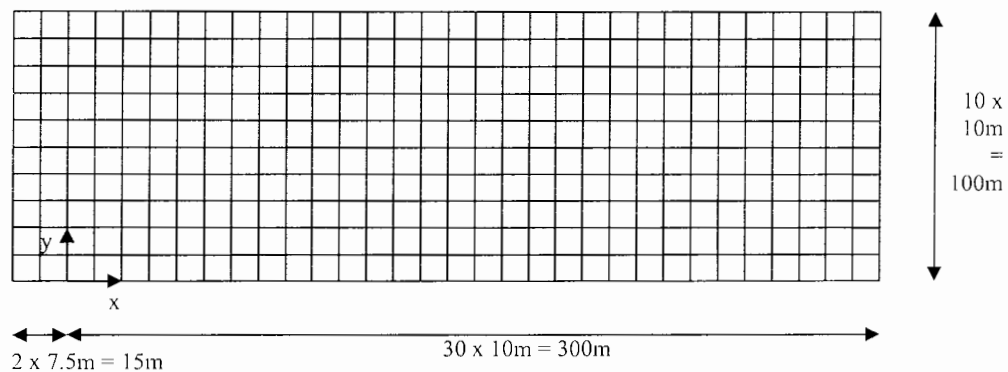
تحلیل مشابه فوق برای مخازن با ارتفاعات 20,40,60,80,120,140m نیز صورت گرفت و در تمام آنها نیز نتایج مشابه با مخزن با ارتفاع 100m بود. برای نشان دادن نتایج این ارتفاعات مخازن نیاز به شکل ۳ برای هر ارتفاع بود که برای خلاصه شدن مطلب آورده نشده اند. در تمام این مخازن پریود ارتعاش 0.8sec بزرگتر از پریود اولین مود ارتعاشی آنها بود. اگر پریود ارتعاشات بتدریج به پریود اولین مود ارتعاشی نزدیک میگشت، جوابها نسبت به زمان تغییر میافت و دیگر حالت هارمونیک نداشت.

همچنین بنظر میرسید فرض فشار برابر صفر در کل سطح در تراز $y=100m$ صحیح نباشد و باید به آب اجازه حرکت کردن قائم در سطح داده شود. برای کنترل این مسئله فشار در سطح مخزن فقط در نقطه وسط مخزن برابر صفر داده شد و به سطح مخزن اجازه داده شد که در جهت ارتفاع تغییر مکان داشته باشد. جوابهای بدست آمده از روش المان محدود دقیقاً مشابه شکلهای ۲-۴ و ۳-۴ بدست آمد که بدین ترتیب میتوان دریافت که هردو شکل دارای جوابهای یکسان میباشند. به این معنی که روش اول که سطح آب را در مقابل حرکات عمودی

میبندد و فشار را در کل سطح برابر صفر میگیرد با روش دوم که فقط فشار را در سطح مخزن در نقطه وسط برابر صفر میگیرد و اجازه حرکت به سطح از لحاظ عمودی را میدهد با هم مشابه اند و هر دو یک جواب میدهند.

۴-۲ حالت دوم: شبیه به حالت اول میباشد و فقط دیواره سد نیز بصورت گیردار مدل میگردد.

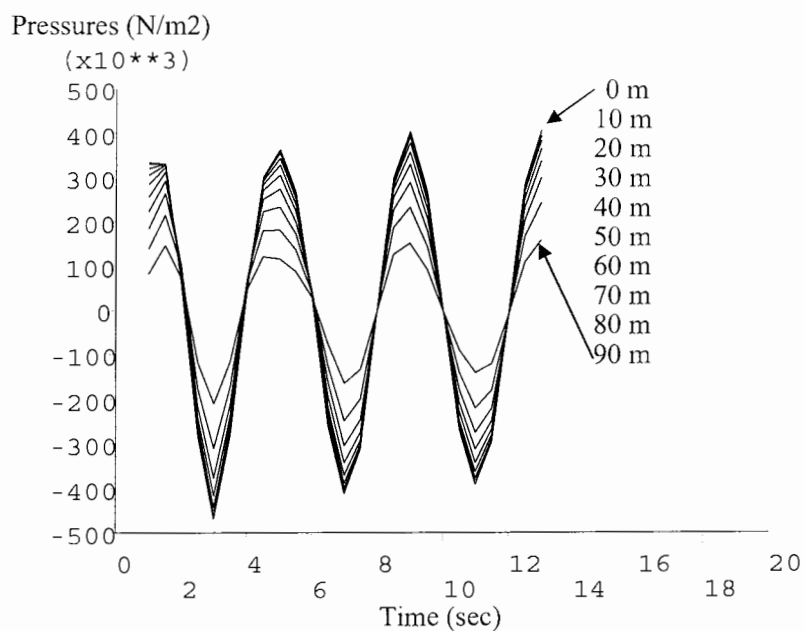
در حالت دوم، کمی نسبت به شرایط وسترگارد تغییر ایجاد میشود، به این شکل که دیواره سد نیز مدل میگردد و دیگر دیواره بصورت صلب نمیباشد. شکل ۴-۴ نشان دهنده مدل مخزن و دیواره سد میباشد.



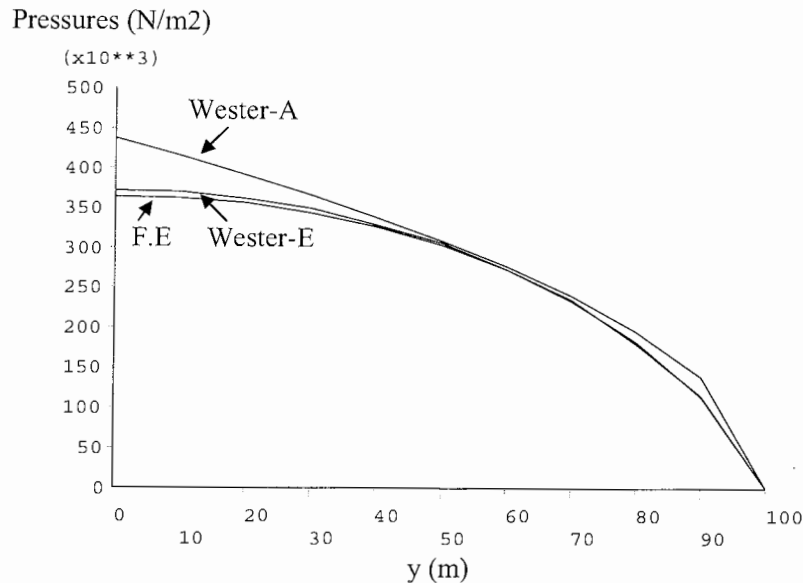
شکل ۴-۴- مش بندی مخزن و سد در حالت دوم

همانطور که شکل ۴-۴ نشان میدهد، مش بندی مخزن سد عینا مانند حالت قبل است و فقط از دو مش بعرض 7.5m در هر لایه برای مدلسازی سد استفاده گردیده است که به این ترتیب کل ضخامت بدنه سد 15m در نظر گرفته شده است. سد در این مدل بصورت گیر دار شده به زمین در نظر گرفته شد تا حالت انعطاف پذیری سد بیشتر گردد و بهتر بتوان آن را با حالت سد صلب قیاس کرد. در عمل در سدهای قوسی دیواره های سد نیز در کناره ها تکیه گاه دارند و سد بصورت صلبتر عمل مینماید. این مدل مورد آنالیز مودال قرار گرفت و مشخص گردید که مود اول ارتعاشی مخزن دارای پریود 1.8sec میباشد بنابراین مدل تحت تاثیر پریود تحركات 4sec قرار گرفت تا بدین ترتیب پریود تحریکات از پریود مود اول بیشتر باشد. شکل ۴-۵ نشان دهنده نحوه تغییرات فشار در ارتفاعات مختلف پشت سد نسبت به زمان میباشد.

همانطور که شکل ۴-۵ نشان میدهد باز هم تغییرات فشار در نقاط مختلف به صورت هارمونیک و با همان پریود ارتعاش تحریکات تغییر مینماید. همچنین شکل ۴-۶ مقایسه بین روش وسترگارد و المان محدود را به نمایش میگذارد، که در اینجا نیز تطابق خوبی بین رابطه وسترگارد دقیق و المانهای محدود موجود است. این اشکال نشان میدهند که حتی اگر دیواره سد صلب نباشد، با قرار گرفتن مدل تحت اثر پریود ارتعاشی بیش از مود اول، باز همان جوابهای وسترگارد به جوابهای اصلی نزدیک میباشند.



شکل ۴-۵ - تغییرات فشار نسبت به زمان برای گره های با ارتفاعات مختلف در مخزن در حالت دوم

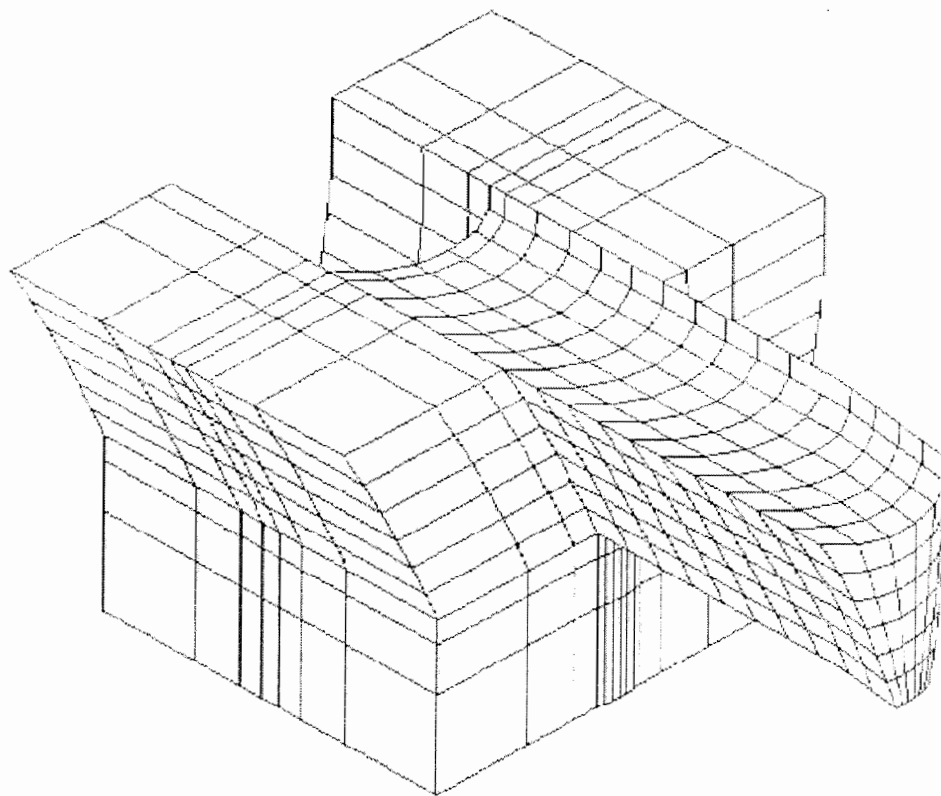


شکل ۴-۶- مقایسه ماگزیمم فشارهای بدست آمده از روش المان محدود و وسترگارد برای حالت دوم

۳-۴ حالت سوم: سد و پی های اطراف سد بصورت کامل مدل میگردند.

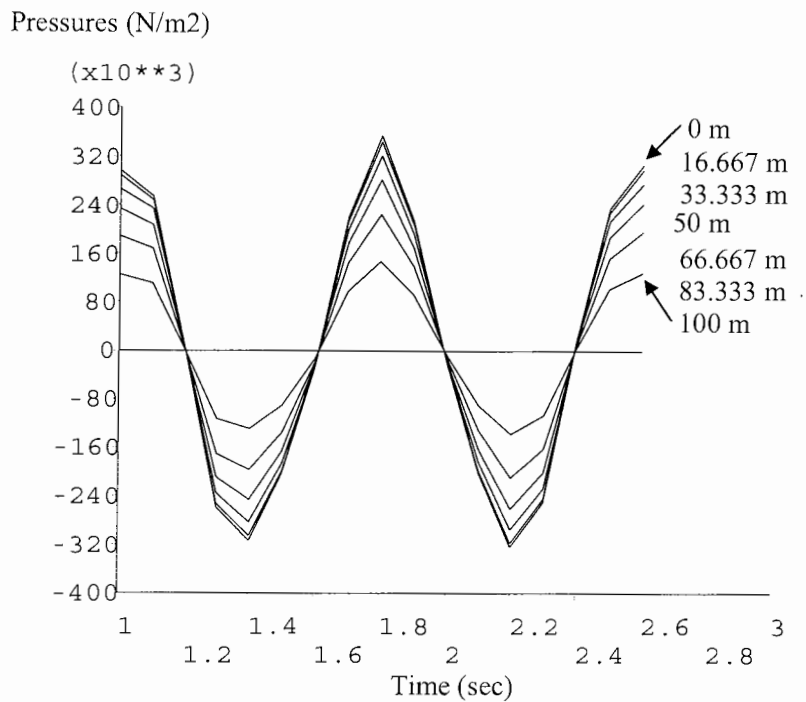
این حالت میتواند نشان دهنده یک سد واقعی با شرایط عملی باشد. در این مدل از یک سد قوسی استفاده شده است و باز هم میخواهیم مقایسه ای بین جوابهای وسترگارد و مدل المان محدود بعمل آوریم. شکل ۴-۷ نشان دهنده مدل المان محدود مورد استفاده برای یک سد قوسی با ارتفاع 100m میباشد و دیواره های سنگی اطراف سد نیز در مدل داده شده اند تا شرایط تا حد ممکن به واقعیت نزدیک گردد.

در روی شکل اولین لایه مش در محل سد مربوط به بدنه سد میباشد و سایر مش ها مربوط به مدلسازی مخزن میباشد. در محیط بیرونی پی، تغییر مکانها در هر سه جهت بسته شده اند. در روی سطح آب فشار برابر صفر در نظر گرفته شده است. طول مخزن آب سه برابر ارتفاع سد یعنی برابر با 300m در نظر گرفته شده است. طول تاج سد 100m و ضخامت آن 10m در نظر گرفته شده است. ضخامتی از دیواره های سنگی معادل با ارتفاع سد از هر طرف از سد مدل گردیده است که به توصیه FERC (1999) میباشد. این سد با شرایط ذکر شده تحت آنالیز مودال قرار گرفت و مشخص شد که اولین مود ارتعاش آن در جهت عمود بر سد برابر 0.235sec میباشد. بنابراین باز هم مدل تحت اثر تحریکات با پریود 0.8sec قرار گرفت که از پریود مود اول بزرگتر است.

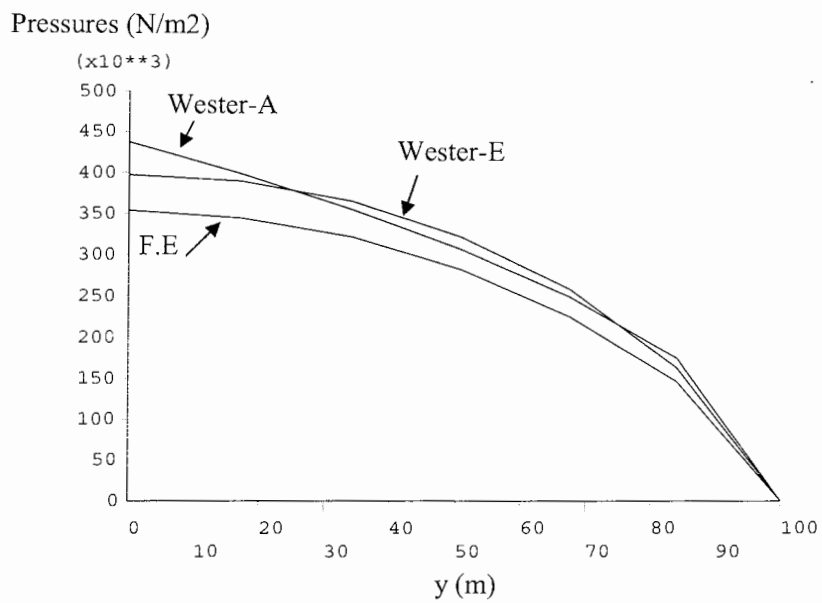


شکل ۷-۴- مش بندی مخزن، سد و دیواره های سنگی اطراف در حالت سوم

شکل ۸-۴ نشان دهنده نحوه تغییرات فشار پشت سد در ارتفاعات مختلف نسبت به زمان میباشد. باز هم در اینجا تغییرات به صورت هارمونیک و برابر با پرپود تحریکات میباشد. همچنین شکل ۹-۴ نشان دهنده مقایسه بین روش وسترگارد با روش المانهای محدود میباشد، که در این شکل نیز تطابق نسبتاً خوبی بین روش وسترگارد و المان محدود دیده میشود.



شکل ۴-۸- تغییرات فشار نسبت به زمان برای گره های با ارتفاعات مختلف در پشت سد برای حالت سوم



شکل ۴-۹- مقایسه ماکزیمم فشارهای بدست آمده از روش المان محدود و وسترگارد برای حالت سوم

۴-۴ نتیجه گیری:

نتایج مقایسه در حالت اول تشابه بسیار زیادی را نشان می‌دهد و میتوان گفت که نتایج وسترگارد با نتایج المان محدود برای پریود تحریکات بیش از مود اول یکسان میباشد. نتایج تقریباً یکسان است و اگر تفاوت بسیار جزئی وجود دارد ناشی از بینهایت نبودن طول مخزن در مدل المان محدود میباشد. در حالت دوم نتایج تشابه خوبی نشان می‌دهد، و باز هم اثبات میکند مهمترین عامل در نزدیکی نتایج بیشتر بودن پریود تحریکات از پریود مود اول است. بنابر این فرض صلب بودن دیواره سد در مدل وسترگارد مقید کننده بزرگی نیست و حتی برای یک سد که به صورت گیردار به زمین متصل شده و انعطاف پذیری زیادی در ارتفاع دارد نتایج به هم نزدیک است. در حالت سوم نیز تشابه بین نتایج قابل توجه میباشد و مجدداً نشان دهنده اهمیت پریود تحریکات در مقابل مود اول سازه میباشد و نشان می‌دهد شروط اول تا چهارم وسترگارد اگرچه در نتایج تاثیر میگذارند ولی تاثیر آنها در مقابل مسئله پریود بسیار ناچیز میباشد. بنابراین برای سدهای کوتاه که پریود ارتعاش مود اول آنها از پریود ارتعاشات زلزله کمتر است، نتایج وسترگارد بسیار مشابه نتایج المانهای محدود میباشد و نیازی به صرف وقت و سعی زیاد برای مدل کردن آب و تاثیر آن بر سد نمیشود.

۵ پیوست ها

۵-۱ پیوست الف - Westergaard Big Dam

```
! Only water sample. To compare Ansys results with simple and
! exact form of Westergard formulations - Transient Analysis
Finish
/clear,nostart
/PREP7
/TITLE, 2D Big dam with westergard assumptions - Transient analyses

HD=100          !Height of the dam
C=1440          !Speed of waves in water
ES=10          !Elements Size
TP=0.8          !Period of Harmonic accelerations(sec(
DT=0.1          !Number of divisions for each Period
Pi=4*ATAN(1)    ! Pi=3.1415...

ET,1,FLUID30      ! FLUID ELEMENTS INTERFACING WITH STRUCTURE
MP,DENS,1,1000
MP,SONC,1,C      ! SPEED OF SOUND IN WATER
! Making the water
BLC4,0,0,3*HD,HD,1
ESIZE,ES
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,1

DA,4,PRES,0
SFA,1, ,FSI
SFA,2, ,FSI
SFA,3, ,FSI
SFA,5, ,FSI
SFA,6, ,FSI
```



```

/axlab,x,Time (sec)      ! x axis lable
/axlab,y,Pressures (N/m2) ! y axis lable
/plopts,title,off      !Dont show the title on the graph
/plopts,frame,off      !Dont show the frame around the graph
/udoc,,date,off       !Dont show date and ansys logo on the plot
/udoc,,type,off       !Dont show type of the graph
!      /color,curve,whit      !color of the curves 1,3 increment 1 is white
/grid,0                !No grid lines in x and y directions
/gthk,curve,0         !Thickness of curves
/gropt,dig1,3         !Number of digits used in axis is 3 multiply by 10**
/gropt,axnsc,1.6      !Font size of the axis numbers is in size 2
/gropt,view,1         !Make it possible to change the graph size
/dev,font,1,Times*New*Roman,400,0,-37
/udoc,,typ2,right     !Dont show legend of the graphs

```

```
PLVAR,2,3,4,5,6,8,9,10,11,12
```

```
/ui,copy,save,EMF,FULL,MONO,REVERSE,LANDSCAPE
```

```
*ask,ans,"Do you want to see next results?(1 / anything else"
```

```
*if,ans,EQ,1,;gohere
```

```
!      Post Processor
```

```
/post1
```

```
set,25,1
```

```
*DIM,Pr,table,nc,3
```

```
*DIM,Yp,array,nc
```

```
cof = 8*5000*HD/Pi**2
```

```
w=2*Pi/TP
```

```
*DO,i,1,nc
```

```
    y=ny(nl(i((
```

```
    Yp(i)=y
```

```

Pr(i,1)=PRES(nl(i)((
Pr(i,2)=43750*(100-y)**0.5
pr1=0
*DO,n,1,10
      wn=(2*n-1)*Pi*C/(2*HD(
      cn=SQRT(1-(w/wn)**2(
      pr1=pr1+1/(2*n-1)**2/cn*Sin(Pi*(2*n-1)*(HD-y)/2/ HD(
*ENDDO
Pr(i, 3)=pr1*cof
*ENDDO
!
!                               Graph Settings
/axlab,x,y (m)           ! x axis lable
/axlab,y,Pressures (N/m2) ! y axis lable
/gcolumn,1,F.E           !Lable of curve 1
/gcolumn,2,Wester-A     !Lable of curve 2
/gcolumn,3,Wester-E     !Lable of curve 3
!   /gmarker,1,1,1      !Shows curve 1,with triangle,for each 1 points
!   /gmarker,2,2,1      !Shows curve 2, with rectangle, for each 1 points
!   /gmarker,3,4,1      !Shows curve 3, with cross, for each 1 points

*vplot,Yp,Pr(1,1),2,3
/ui,copy,save,EMF,FULL,MONO,REVERSE,LANDSCAPE
/out,WesRes,txt
*vwrite,Yp(1),Pr(1,1),Pr(1,2),Pr(1,3(
)F5.0,F10.2,F10.2,F10.2(
/out

!           Plot elements
/device,vector,on
eplot
/pbc,all,,0
/plopts,wp,0
/type,,zbuf

```

/color,elem,whit

/replot

! /device,bbox,0

! /device,dither,0

/ui,copy,save,EMF,FULL,MONO,REVERSE,LANDSCAPE

Westergaard Big dam-T1 (2) – پیوست ب ۲-۵

```
finish
/clear,nostart
/PREP7
/TITLE, Water and Solid, 2D Big dam with westergard assumptions - transient analyses

HD=100          ! Height of the dam
C=1440          ! Speed of waves in water
ES=10          ! Size of Elements
TP=4           ! Period of Harmonic accelerations(sec)
DT=0.5         ! Number of divisions for each Period
Pi=4*ATAN(1)   ! Pi=3.1415...

ET,1,SOLID45
ET,2,FLUID30    ! FLUID ELEMENTS INTERFACING WITH STRUCTURE
MP,EX,1,21e9
MP,PRXY,1,0.2
MP,DENS,1,2400
MP,DAMP,1,0.05
MP,DENS,2,1000
MP,SONC,2,C     ! SPEED OF SOUND IN WATER
!              Making the solid
BLC4,-0.15*HD,0,0.15*HD,HD,1
ESIZE,ES
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,1

DA,3,UX,0
DA,3,UY,0
DA,3,UZ,0
!              Making the water
TYPE,2
MAT,2
BLC4,0,0,3*HD,HD,1
VMESH,2
CPINTF,UX,0.0001,
```

```
asel,s,,,11
nsla,s,1
cm,N_WATER_BESIDE_DAM,NODE
d,all,uy,0,,,,uz
alls
```

```
SFA,7, ,FSI
SFA,8, ,FSI
SFA,9, ,FSI
SFA,10, ,FSI
SFA,11, ,FSI
SFA,12, ,FSI
```

```
da,10,pres,0
nsl,u,loc,x,-HD,0.01
d,all,ux,0,,,,uy,uz
```

```
nsl,all
FINISH
!           Solution
/SOLU
ANTYPE,TRANS
TRNOPT,FULL
*DO,i,0,3*TP,DT
    TIME,i+1
    ACEL,5*COS(6.283*i/TP)
    SOLVE
*ENDDO
FINISH
!           Time Histroy
/POST26
NUMVAR,200
cmset,S,N_WATER_BESIDE_DAM
nsl,r,loc,z,0
*get,nc,NODE,0,count
*dim,nl,array,nc
```

```

*do,i,1,nc,1
    y=ES*(i-1)
    nl(i)=node(0,y,0)
    nsol,i+1,nl(i),PRES,,strcat(chrval(y),' m ')
*enddo
nset,all

!                               Graph Settings
/axlab,x,Time (sec)             ! x axis lable
/axlab,y,Pressures (N/m2)      ! y axis lable
/plopts,title,off              ! Dont show the title on the graph
/plopts,frame,off              ! Dont show the frame around the graph
/udoc,,date,off                ! Dont show date and ansys logo on the plot
/udoc,,type,off                ! Dont show type of the graph
!                               /color,curve,whit          ! color of the curves 1,3 increment 1 is white
/grid,0                         ! No grid lines in x and y directions
/gthk,curve,0                  ! Thickness of curves
/gropt,dig1,3                  ! Number of digits used in axis is 3 multiply by 10**
/gropt,axnsc,1.6               ! Font size of the axis numbers is in size 2
/gropt,view,1                  ! Make it possible to change the graph size
/dev,font,1,Times*New*Roman,400,0,-37
/udoc,,typ2,right              ! Dont show legend of the graphs

PLVAR,2,3,4,5,6,8,9,10,11,12
/ui,copy,save,EMF,FULL,MONO,REVERSE,LANDSCAPE

*ask,ans,"Do you want to see next results?(1 / anything else)"
*if,ans,EQ,1,:gohere

!                               Post Processor
/post1
set,9,1
*DIM,Pr,table,nc,3
*DIM,Yp,array,nc
cof = 8*5000*HD/Pi**2
w=2*Pi/TP

```



```

*DO,i,1,nc
  y=ny(nl(i))
  Yp(i)=y
  Pr(i,1)=PRES(nl(i))
  Pr(i,2)=43750*(100-y)**0.5
  pr1=0
  *DO,n,1,10
    wn=(2*n-1)*Pi*C/(2*HD)
    cn=SQRT(1-(w/wn)**2)
    pr1=pr1+1/(2*n-1)**2/cn*Sin(Pi*(2*n-1)*(HD-y)/2/ HD)
  *ENDDO
  Pr(i, 3)=pr1*cof
*ENDDO
!
!                               Graph Settings
/axlab,x,y (m)                ! x axis lable
/axlab,y,Pressures (N/m2)    ! y axis lable
/gcolumn,1,F.E
/gcolumn,2,Wester-A
/gcolumn,3,Wester-E
*vplot,Yp,Pr(1,1),2,3
/ui,copy,save,EMF,FULL,MONO,REVERSE,LANDSCAPE

!
!                               Plot elements
/device,vector,on
eplot
/psc,all,,0
/plopts,wp,0
/type,,zbuf
/color,elem,whit
/replot
/ui,copy,save,EMF,FULL,MONO,REVERSE,LANDSCAPE

```

Big Dam-T (3) – ۳-۵ پیوست ج

```
!      Transient analyses of a big dam
/PREP7
HD=100      ! Height of the dam
WD=100      ! Width of the dam at top
TD=10       ! Thickness of the dam
NM=5        ! Number of mesh
DENT=HD/4   ! Dent of the dam, shows how much dam is curved
TP=0.199    ! Period of Harmonic accelerations(sec)
DT=0.0249   ! Number of divisions for each Period
```

```
!      Element Types
```

```
ET,1,FLUID30
ET,2,SOLID45
ET,3,FLUID30,,1
```

```
!      Material Properties
```

```
MP,DENS,1,1000
MP,SONC,1,1440
MP,DENS,2,1000
MP,SONC,2,1440
MP,MU,2,1
MP,DENS,3,1000
MP,SONC,3,1440
MP,MU,3, 0.8
MP,EX,4,30e9
MP,PRXY,4,.2
MP,DENS,4,2400
MP,DAMP,4,0.05
MP,EX,5,30e9
MP,PRXY,5,.2
MP,DENS,5,0
MP,DAMP,5,0.05
```

```
!      Dam and water volume building
```

K,1,0,0,0,
K,2,-DENT,0,-WD/2
K,3,-DENT,0,WD/2
LARC,2,3,1
LGEN,2,1, , , -TD
LSTR,2, 4
LSTR,3,5
AL,1,3,2,4
LGEN,2,1
LGEN,2,1, , , 3*HD
LSTR,6, 8
LSTR,7,9
AL,5,7,6,8
VEXT,1,2,1,0,HD
KWPAVE,13
WPRO,,-20
RECTING,0,4*HD,-1.5*HD,0
KWPAVE,12
WPRO,,40
RECTING,0,4*HD,-1.5*HD,0
ASEL,S,AREA,,13,14,1
VSBA,ALL,ALL
ASEL,ALL
VDELE,3,6,1,1

! Dam Mesh

TYPE,2
MAT,4
ESIZE,HD/NM
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,7

! Water Mesh

```
TYPE,1
MAT,1
VMESH,8
LSEL,ALL
```

```
!           Foundation Building
```

```
TYPE,2
MAT,5
EXTOPT,ESIZE,3,4,
EXTOPT,ACLEAR,1
EXTOPT,ATTR,0,0,0
```

```
!           - Arround arch dam foundation is buit
```

```
VEXT,18, , ,0,0,HD,,,,
VEXT,22, , ,0,0,-HD,,,,
VEXT,33, , ,0,-HD,0,,,,
VEXT,17, , ,0,-HD,,,,
VEXT,15, , ,0,0,HD,,,,
```

```
!           - Wing of foundation forward is built here
```

```
VEXT,4, , ,HD,0,0,,,,
VEXT,37, , ,HD,0,0,,,,
VEXT,14, , ,HD,0,0,,,,
VEXT,21, , ,HD,0,0,,,,
VEXT,10, , ,HD,0,0,,,,
```

```
!           - Wing of foundation backward is built here
```

```
VEXT,6, , , -HD,0,0,,,,
VEXT,28, , , -HD,0,0,,,,
VEXT,16, , , -HD,0,0,,,,
VEXT,24, , , -HD,0,0,,,,
VEXT,12, , , -HD,0,0,,,,
```

```
!           DEFINITIONS
```

```
VSEL,S,,,8
ASLV,S
NSLA,S
ESLN,S
```

CM,E_WATER_EXTERIOR,ELEM

ASEL,U,,8

CM,A_FSI_SURFACES,AREA

ESLV,S

ESEL,U,,,E_WATER_EXTERIOR

CM,E_WATER_INTERIOR,ELEM

NSLV,S,1

ASEL,S,,,34

NSLA,U,1

CM,N_WATER_FAR_DAM,NODE

NSLA,S,1

CM,N_WATER_BESIDE_DAM,NODE

ASEL,S,,,35

NSLA,S

ESLN,S

CM,E_WATER_END,ELEM

ASEL,S,,,26,34,4

ASEL,A,,,36

NSLA,S

ESLN,S

CM,E_WATER_WALLS,ELEM

ASEL,S,,,1,19,6

ASEL,A,,,23,25,2

ASEL,A,,,29,41,12

ASEL,A,,,47,55,4

ASEL,A,,,56,66,5

ASEL,A,,,46,70,24

ASEL,A,,,71,81,5

ASEL,A,,,82,86,4

CM,A_FOUNDATIONS_CONS_ALL,AREA

```
ASEL,S,,,38,83,5
CM,A_FOUNDATIONS_CONS_X,AREA
```

```
ESEL,S,MAT,,5
CM,E_FOUNDATIONS,ELEM
```

```
NSLE,S
CM,N_FOUNDATIONS,NODE
```

```
ESEL,S,MAT,,4
CM,E_DAM,ELEM
```

```
NSLE,S
CM,N_DAM,NODE
```

```
ALLSEL,ALL
```

```
!           Define type and mat for different parts of water
```

```
EMODIF,E_WATER_INTERIOR,TYPE,3
EMODIF,E_WATER_WALLS,MAT,3
EMODIF,E_WATER_END,MAT,2
```

```
!           Water constraints
```

```
DA,8,PRES,0
SFA,A_FSI_SURFACES,,FSI
D,N_WATER_FAR_DAM,UX,0,, ,UY,UZ
D,N_WATER_BESIDE_DAM,UY,0,, ,UZ
NSEL,S,,,N_DAM
NSEL,A,,,N_WATER_BESIDE_DAM
CPINTF,UX,0.0001,
ALLSEL,ALL
```

```
!           Constraints on Foundations
```

```
DA,A_FOUNDATIONS_CONS_ALL,UX
DA,A_FOUNDATIONS_CONS_ALL,UY
DA,A_FOUNDATIONS_CONS_ALL,UZ
DA,A_FOUNDATIONS_CONS_X,UX
NSEL,S,,,N_FOUNDATIONS
CPINTF,UX,0.0001
CPINTF,UY,0.0001
CPINTF,UZ,0.0001
NSEL,ALL
FINISH
```

! Solution

```
/SOLU
ANTYPE,TRANS
TRNOPT,FULL
*DO,i,0,TP*4,DT
    TIME,i+1
    ACEL,5*SIN(6.283*i/TP)
    SOLVE
*ENDDO
FINISH
```

```
/POST1
SET,5,1
CMSEL,S,N_WATER_BESIDE_DAM
NSEL,R,LOC,Z,0
/OUT,Pressures.txt
PRNSOL,PRES
/OUT
NSEL,ALL
FINISH
```

! Time Histroy

```
/POST26
NUMVAR,200
NSOL,2,435,PRES, ,D-0m-Pr
```

NSOL,3,452,PRES, ,D-16.67m-Pr
NSOL,4,451,PRES, ,D-33.33m-Pr
NSOL,5,450,PRES, ,D-50m-Pr
NSOL,6,449,PRES, ,D-66.67m-Pr
NSOL,7,448,PRES, ,D-83.33m-Pr
NSOL,8,256,PRES, ,D-100m-Pr
NSOL,9,435,U,X,D-0m-UX
NSOL,10,452,U,X,D-16.67m-UX
NSOL,11,451,U,X,D-33.33m-UX
NSOL,12,450,U,X,D-50m-UX
NSOL,13,449,U,X,D-66.67m-UX
NSOL,14,448,U,X,D-83.33m-UX
NSOL,15,256,U,X,D-100m-UX
PLVAR,2,3,4,5,6,7,8
/OUT,SDRES,TXT
PRVAR,2,3,4,5
/OUT

۶ مراجع:

جاهد مطلق، ح. ر. و نوبان، م. ر. و اشراقی، م. ا.، ۱۳۸۲، اجزاء محدود Ansys، چاپ اول، دانشگاه تهران، تهران
فرنو، م.، ۱۳۷۸، روشهای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر سدهای بتنی در هنگام وقوع زلزله، پایان نامه کارشناسی ارشد،
دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران

Ansys inc., 2005, "Ansys users manual Revision 10"

Chopra, A.K., 1967, "Hydrodynamic pressures on dams during earthquakes", Journal of the engineering mechanics division, ASCE, Vol.93, PP. 205-223

Chopra, A.K., 1968, "Earthquake behavior of reservoir – dam systems", Journal of the engineering mechanics division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.94

FERC, 1999, "Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects, Chapter 11. Arch Dams", Federal Energy Regulatory Commission Division of Dam Safety and Inspections, Washington, PP.174

Fok, K.L. and Chopra, A.K. 1987, "Water compressibility in earthquake response of arch dams", Journal of structural Engineering, ASCE, Vol.113, pp.958-975

Hatano, T., 1965, "An examination of the resonance of hydrodynamic pressure during earthquakes due to compressibility of water", Technical report C-65001, central research institute of electric power industry, Tokyo, Japan

Hausman, B., 1983, "Dam earthquake analysis considerations", ICOLD, Bulletin 46, Paris, France

Jansen, R.B., 1988, "Advanced dam engineering for design, construction and rehabilitation", Van Nostrand Reinhold, New York

Kotsubo, S., 1960, "Dynamic water pressure on dam due to irregular earthquakes", Memoirs Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol.18, Fukuoka, Japan

Sharan, S.K., 1985, "Finite element modeling of infinite reservoirs", Journal of Engineering Mechanics, Vol.111

Westergaard, H.M., 1933, "Water pressures on dams during earthquakes", Transactions, ASCE, Vol.98, PP. 418-433

Zienkiewicz, O., 1964, "Hydrodynamic pressure due to earthquakes", Water Power, Vol.6, PP.382-388

Znagar, C.N. and Haefeli, R.J., 1952, "Electric analog indicates effect of horizontal earthquake shocks on dams", Journal of the engineering mechanics division, Vol.22, No.4