کارایی روش جرم افزوده‌ی وسترگارد در مطالعه‌ی موردی سد بختیاری در ایران

محمد مقدری‌پور
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده‌ی فنی- مهندسی دانشگاه اراک، ایران
Moghadaripoor@gmail.com

علیرضا آذربخت
استادیار گروه مهندسی عمران ، دانشگاه اراک، اراک، ایران
Azarbakht@gmail.com

نیما قاسمی
کارشناس ارشد مهندسی سازه، مهندسین مشاور توسعه، تهران، ایران
Nimaghasemi59@gmail.com

کلید واژه‌ها: *سد بتنی دو قوسی بختیاری، تحلیل تاریخچه زمانی، دوره تناوب سد*

چکیده

در این مقاله رفتار لرزه‌ای سد بتنی دو قوسی بختیاری در ایران با در نظر گرفتن اثرات مخزن سد به دو روش مدلسازی توسط المان‌های آب واقعی و مدلسازی بروش جرم افزوده‌ی وسترگارد مورد بررسی قرار گرفته است. سد بتنی دو قوسی بختیاری با ارتفاع ۳۲۵ متر از تراز پی در زمان بهره‌برداری، به عنوان بلندترین سد بتنی دو قوسی جهان محسوب می‌شود. بدین منظور دو مدل اجزا محدود از مجموعه‌ی سد-فونداسیون-مخزن ساخته شده که در مدل اول، مخزن سد توسط المان‌های آب واقعی و در مدل دوم، توسط المان‌های جرم نقطه‌ای مدلسازی شده و کلیه‌ی شتابنگاشت‌های منتخب براساس نتایج مطالعات غفوری آشتیانی و همکاران به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای سد در تحلیل‌های تاریخچه زمانی مورد استفاده قرار گرفته است. شتابنگاشت‌های منتخب متناسب با دوره تناوب سد در حالت مخزن پر آب و جرم موثر مودی در راستای اعمال شتابنگاشت، انتخاب و نتایج تاریخچه زمانی جابجایی ۶۳ گره در بالادست بدنه‌ی سد در هر دو روش مدلسازی مخزن مقایسه شده‌اند. مقایسه‌ی تاریخچه زمانی جابجایی گره‌ای، دقت پایین روش جرم افزوده‌ی وسترگارد در تحلیل‌های تاریخچه زماتی را نشان می‌دهد که گزارش آن به تفضیل در بخش نتایج ارائه شده است.

مقدمه

سدها سازه‌هایی عظیم هستند که در صورت تخریب می‌توانند خطرات فاجعه باری را برای مناطق پایین‌دست به وجود آورند. تحلیل‌های تاریخچه زمانی یکی از مهم‌ترین تحلیل‌ها برای بررسی رفتار بدنه‌ی سدهاست و از طرفی در نظر گرفتن اثرات آب مخزن سد در تحلیل‌های تاریخچه زمانی اهمیت قابل توجهی دارد.

یکی از روش‌های در نظر گرفتن آب مخزن سد، روش تقریبی جرم افزوده‌ی وسترگارد است. این روش توسط وسترگارد در سال ۱۹۳۳ برای مدل‌سازی تقریبی مخزن تراکم ناپذیر ارائه شده است (Theorical Manual for Analysis of arch dams). درواقع در روش وسترگارد آب مخزن سد بااستفاده از المان‌های جرم افزوده مدل‌سازی شده و دیگر نیازی به مدل‌سازی المان محدود آب واقعی مخزن نیست‌که این‌موضوع تاثیر بسیار زیادی در سرعت تحلیل‌ها و حجم نتایج خروجی دارد. همچنین سدهای بتنی قوسی به دلیل شکل خاص خود که از ناحیه‌ی تکیه‌گاه‌ها و پی گیردار می‌باشند، نسبت به حرارت و تغییرات آن بسیار حساسند و باید تغییرات دمایی در بدنه‌ی سد و تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی مربوطه به عنوان شرایط اولیه در تحلیل ایمنی و پایداری این سدها منظور شود. در مقاله‌ی حاضر رفتار لرزه‌ای بدنه‌ی سد بتنی دو قوسی بخت یاری توسط مدل جرم افزوده‌ی وسترگارد و همچنین توسط مدل‌سازی آب واقعی مخزن سد مورد بررسی قرارگرفته و مقایسه‌ی نتایج این دو روش در بارگذاری‌های مختلف (خصوصا شرایط خاص دمایی) ارائه شده است.

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار ANSYS، رفتار سد بتنی دو قوسی بختیاری تحت ورودی زلزله بررسی شده و پاسخ سازه، تحت مدل‌سازی آب واقعی مخزن مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این‌منظور یک مدل کامل المان محدود از مجموعه ی سد – فونداسیون – مخزن در نرم‌افزار ANSYS تهیه شد و تحلیل تاریخچه زمانی این سازه تحت شتابنگاشت‌های منتخب انجام شد. کلیه‌ی شتابنگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل‌های تاریخچه زمانی متناسب با دوره تناوب سد در حالت مخزن پر آب و جرم موثر مودی در راستای اعمال شتابنگاشت وبا استفاده از نتایج تحقیقات غفوری آشتیانی و همکاران در زمینه‌ی "انتخاب شتابنگاشت‌های شدید زلزله برای پیش بینی ایمنی لرزه‌ای سازه‌ها" انتخاب شده‌اند (Ghafoury et al.,2010). برای انجام تحلیل‌های حاضر از روش تحلیل کوپل سازه‌ای- حرارتی استفاده شده که در این روش دمای گره‌ای به وسیله‌ی نتایج تحلیل‌های حرارتی محاسبه شده و مقادیر آن به عنوان بارگذاری‌های حرارتی به مدل اعمال شده و سپس بارگذاری لرزه‌ای توسط تحلیل سازه‌ای بر روی سد انجام می‌شود.

معرفی مدل المان محدود سد–فونداسیون–مخزن

موقعیت جغرافیایی ساختگاه سد بتنی قوسی بختیاری در ۴۸درجه و ۴۶دقیقه و ۵۰ ثانیه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۵۷دقیقه و ۴۱ثانیه عرض شمالی بوده و در مرز بین استان‌های لرستان و خوزستان قرار دارد. این سد در زمان بهره برداری با ارتفاع ۳۲۵ متری از تراز پی و طول تاج ۵۲۰/۲ متری، به عنوان بلندترین سد بتنی دو قوسی جهان محسوب خواهد شد.

به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای سد، مدل المان محدودی مطابق شکل ۱ تهیه شده است. مدل المان محدود سد شامل ۴۶۲۵۱ گره سازه‌ای بوده و در آن از ۲۵۷۶۸ المان ۲۰ گرهی سه بعدی برای مدل‌سازی بدنه استفاده شده است. به منظور مدل‌سازی بدنه‌ی سد از ۱۴۰۴ المان، محدوده نامنظم مخزن از ۲۲۴۶۴ المان، فونداسیون سنگی سد از ۱۷۵۰ المان و برای مدلسازی المان‌های انتقال دهنده‌ی فشار بالابرنده به بدنه‌ی سد از ۱۵۰ المان ۴ گرهی استفاده شده است. مدلسازی بدنه‌ی سد در راستای ضخامت توسط سه لایه المان با دقت بسیار بالا انجام شده که این موضوع تاثیر زیادی بر توزیع یکنواخت تنش‌ها و دقت نتایج دارد. همچنین خصوصیات مکانیکی و حرارتی منظور شده برای بتن بدنه‌ی سد، پی و آب مخزن که در مدل عددی استفاده شده است، به ترتیب در جداول ۱ الی ۳ آمده است.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی و حرارتی منظور شده برای بتن بدنه‌ی سد

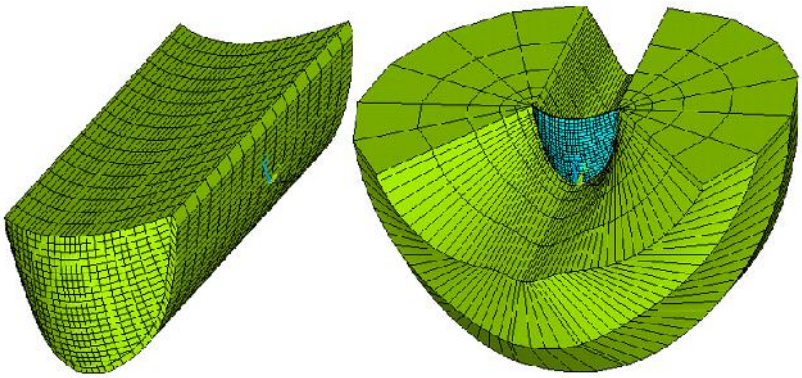
مقدار	خصوصیت
۲۴۰۰	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۰/۱۸	ضریب پوآسون
۳۲/۵	مدول الاستیسیته‌ی دینامیکی (گیگاپاسکال)
۹۱۲	گرمای ویژه (ژول بر کیلوگرم، درجه‌ی کلوین)
۲/۶۲	هدایت حرارتی (وات بر متر، درجه‌ی کلوین)
۶۰	ضریب انتقال حرارت همرفتی (وات بر متر مربع، درجه‌ی کلوین)
۱E-۵	ضریب انبساط حرارتی (یک بر درجه‌ی کلوین)

جدول ۲: مشخصات آب مخزن

مقدار	خصوصیت
۱۰۰۰	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱۴۴۰	سرعت صوت (متر بر ثانیه)

جدول ۳: مشخصات مکانیکی منظور شده برای پی سنگی

مقدار	خصوصیت
۱۵/۶	مدول الاستیسیته‌ی دینامیکی (گیگاپاسکال)
۰/۲۵	ضریب پوآسون



شکل۱: مدل المان محدود سد-مخزن-فونداسیون سد بختیاری

بارگذاری

بارهای وارد بر سدهای بتنی قوسی به طور کلی به دو دسته‌ی بارهای استاتیکی و بارهای دینامیکی تقسیم می‌شوند.به علت مدلسازی واقعی بارگذاری لرزه‌ای، مدت زمان ده ثانیه اول تحلیل به بارگذاری ثقلی اختصاص می‌یابد و برنامه این امکان را می‌دهد که پس از انجام تحلیل استاتیکی، تحلیل دینامیکی انجام شود.

بارهای استاتیکی

بار مرده در سدهای قوسی، شامل وزن بتن سازه به همراه سازه‌های وابسته به سد مانند دریچه‌ها، پل‌ها و تجهیزات مکانیکی است.
بار ناشی از فشار هیدرواستاتیک بر وجه بالادست و پایین دست بدنه‌ی سد اعمال می‌شود. تراز نرمال و حداقل آب مخزن با توجه به خصوصیات و مطالعات هیدرولوژیکی منطقه و موقعیت سرریزها در بدنه‌ی سد تعیین می‌شود.

با توجه به نتایج مطالعات هیدرولوژیکی منطقه در پروژه‌ی سد بتنی قوسی بختیاری، تراز آب حداقل بالادست در ارتفاع ۷۸۵ متری از سطح آب دریا، تراز آب حداقل پایین دست در ارتفاع ۵۳۴/۳ متری از سطح آب دریا و پی سد در ارتفاع ۵۱۵ متری از سطح آب دریا قرار دارد.

بار رسوبات مانند فشار هیدرواستاتیک آب بر بالادست بدنه‌ی سد اعمال می‌شود. مطالعات هیدرولوژیکی منطقه نشان می‌دهد که سطح رسوبات پس از ۵۰ سال از زمان بهره برداری سد به تراز ۶۲۶ متری از سطح دریا (معادل ۱۱۰ متر) خواهد رسید. در واقع اثر رسوبات برای اعمال بر بدنه‌ی سد معادل فشار هیدرواستاتیک مایعی به چگالی ۱۳۶۰۰ نیوتن بر متر مکعب در نظر گرفته می‌شود.

در سدهای بتنی دو قوسی، فشاری که در جهت پایین به بالا اثر می‌نماید به علت آنکه وزن سد را کاهش داده و در جهت ناپایداری آن عمل می‌کند، با اهمیت است. از طرفی در سد بختیاری به علت بزرگ بودن سطح فونداسیون سد، این موضوع اثرات قابل توجهی خواهد داشت. براساس گالری زهکش در نظر گرفته شده برای سد بختیاری در نزدیکی پاشنه‌ی سد، طرح فشار بالابرنده در محل اتصال سد به فونداسیون در حالت زهکشی شده و مقدار آن به صورت خطی از ۰/۳۳ بیشترین فشار بالادست به بیشترین فشار پایین دست کاهش می‌یابد.

در مطالعه‌ی حاضر اثرات بارگذاری حرارتی عملیاتی در سردترین و گرم‌ترین روزهای سال در نظر گرفته شده است. برای انجام بارگذاری حرارتی در تحلیل سد بتنی قوسی بختیاری از روش اشتوکی-درون استفاده شده است (Stucky and derron 1957).براساس جدول ۴ که میانگین دمای هوا در محل سد بختیاری را نشان می‌دهد، می توان یک تابع سینوسی هارمونیک را میان‌یابی کرد. معادله‌ی این تابع می تواند به شکل زیر باشد و می تواند دمای هوای محیط در زمان دلخواهی از سال را نمایش دهد.

جدول ۴: میانگین دمای هوای در محل سد بختیاری بر حسب درجه‌ی سانتی گراد

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
۸/۱	۹/۱	۱۲/۸	۱۸/۲	۲۴/۵	۳۱/۳	۳۴/۲	۳۳/۸	۳۰/۲	۲۴/۱	۱۹/۶	۱۰/۹	۲۱/۲

$$T^{Air} = T^{Air}_{avg} - T^{Air}_{Amp}\cos(\omega t - \phi)$$

T^{Air}:دمای هوای محیط در زمان t از سال

T^{Air}_{Avg} :دمای متوسط سالانه ، بر پایه‌ی برازش منحنی سینوسی. در محل سد بختیاری این مقدار برابر ۲۱/۲ درجه سانتی گراد است.

T^{Air}_{Amp}:دامنه‌ی تغییرات دمای هوای محیط بر پایه‌ی برازش منحنی سینوسی. این مقدار مساوی با ۱۳/۲۴ درجه سانتی گراد است.

ω: فرکانس تغییرات درجه حرارت بر حسب رادیان بر روز. این مقدار مساوی ۲π/۳۶۵ است.

$\emptyset$: اختلاف فاز، از زمان شروع سال تا زمان وقوع دمای حداقل برابر با ۲۸/۴۶ روز یا ۰/۴۹ رادیان است.

به منظور استفاده از روش اشتوکی-درون برای تعریف توزیع دما در بدنه‌ی سد لازم است که گستره ی تغییرات دما در وجوهه بالادست و پایین دست سد تعریف شود. دمای درون مخزن سد به کمک تابع زیر تعریف می شود:

$$T_w(z,t) = \begin{cases} T_{w1} - \left(\frac{T_{w1} - T_{w0}}{50}\right)_{T_{w0}} z & 0<Z<50 \\ 50<Z \end{cases}$$

Z: عمق هر نقطه در مخزن

T_{w1}: دمای سطح مخزن که از رابطه‌ی $T_{W1}=3.48+.76\ T^{Surf}_{(t)}$ محاسبه می‌شود.

T_{Amp}: دمای عمق مخزن که از رابطه‌ی $T_{w_0}=4.04+.37T^{Air}_{Avg}$ محاسبه می‌شود.

تمام مقادیر فوق بر حسب سانتی‌گراد اندازه گیری می‌شوند.

در مطالعه‌ی حاضر دمای لایه‌ی بالادست و پایین‌دست سد برای بحرانی‌ترین روزهای سال محاسبه شده و به عنوان ورودی برای محاسبه‌ی گرادیان‌های حرارتی و دماهای گره‌ای در تحلیل‌های حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بارهای دینامیکی

برای انجام تحلیل لرزه‌ای در نرم‌افزار ANSYS از فرضیات رایلی برای تعریف ماتریس میرایی استفاده شده‌است. برای محاسبه‌ی ضرایب میرایی رایلی (ضرایب α و β) در سدها به‌طور معمول از فرکانس‌های مود اول (یا دوم) و مودی که ضریب تاثیر مودی سد در آن مود به مرز ۹۰٪ می‌رسد استفاده می‌شود. برای این منظور تحلیل مودال مدل سد - فونداسیون- مخزن انجام شده و با توجه به فرکانس‌های طبیعی سیستم، جرم موثر مودی، ضرایب تاثیر مودی و میرایی ۰/۰۵، پارامترهای آلفا و بتا محاسبه شده‌اند.

همچنین رکوردهای مورد استفاده برای انجام تحلیل‌های لرزه‌ای از نتایج مطالعات غفوری آشتیانی و همکاران در زمینه‌ی " انتخاب شتابنگاشت های شدید زلزله برای پیش بینی ایمنی لرزه ای سازه‌ها " و باتوجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های مودال سیستم سد-فونداسیون-مخزن و راستای مورد نظر جهت اعمال شتابنگاشت زلزله انتخاب شده‌اند. در مطالعه‌ی انجام شده توسط غفوری آشتیانی و همکاران، سازه‌ها با توجه به فرکانس طبیعی به ۶ دسته تقسیم شده و تعداد ۸ شتابنگاشت برای انجام تحلیل‌های لرزه‌ای برای هر گروه سازه معرفی شده است. در جدول ۵ نتایج حاصل از تحلیل‌های مودال برای ۲ مود اول سازه آورده شده است. در این جدول دورهتناوب سیستم سد- فونداسیون وسیستم سد- فونداسیون- مخزن و ضریب تاثیر مودی برای هر مود در راستای محور Y (راستای اعمال شتابنگاشت در تحلیل‌های سازه‌ای) گزارش شده است.

جدول ۵: دوره‌ی تناوب و ضریب تاثیر مودی

شماره مود	دوره تناوب سیستم سد-فونداسیون (ثانیه)	دوره تناوب سیستم سد-فونداسیون- مخزن واقعی (ثانیه)	ضریب تاثیر مودی در راستای Y
۱	/۸۶	۱/۵۶	۰/۰۰۰۲
۲	۰/۶۲	۱/۴۹	۰/۲۲

با توجه به دوره‌ی تناوب و ضرایب موثر مودی در راستای Y، سیستم سد- فونداسیون- مخزن بختیاری در مطالعه‌ی حاضر در دسته‌ی ششم از گروه سازه‌های مطالعات غفوری آشتیانی و همکاران قرار می‌گیرد که در جدول ۶ شتابنگاشت‌های این گروه معرفی شده‌اند. با توجه به موقعیت سد بتنی دوقوسی بختیاری، شتاب مبنای طرح ساختگاه سد از آیین نامه‌ی ۲۸۰۰ استخراج شده و هر شتابنگاشت با توجه به مقدار شتاب مبنای طرح و مقدار PGA، مقیاس شده‌است. مقدار شتاب مبنای طرح در ساختگاه سد بختیاری ۰/۳ در نظرگرفته شده‌است.

جدول ۶: شتابنگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل‌های لرزه‌ای

نماد	زلزله	بزرگا(Mw)	نام ایستگاه	PGA (g)
A	Imperial Valley	۶/۵	Delta	۰/۳۵
B	Imperial Valley	۶/۵	El Centro Array	۰/۳۸
C	Landers	۷/۳	Yermo Fire Station	۰/۲۴
D	Landers	۷/۳	Coolwater	۰/۲۸
E	Loma Prieta	۶/۹	Gilroy Array	۰/۵۶
F	Superstition Hills	۶/۵	Poe Road (temp)	۰/۳
G	Chi-Chi	۷/۶	TCU045	۰/۵۱
H	Friuli	۶/۵	Tolmezzo	۰/۳۵

ترکیبات بارگذاری

از آنجایی که نیروهای مختلف اثرات متفاوتی بر روی سد دارند و امکان تاثیر همه‌ی نیروها در یک زمان بر سد وجود ندارد، آیین نامه‌ها توصیه‌هایی برای در نظر گرفتن اثرات همزمان بارهای اعمال شده ارائه می‌کنند.آیین نامه‌ی USBR توصیه می‌کند که بارگذاری سدها بایستی براساس خطرناک‌ترین و پیچیده‌ترین ترکیب بارها صورت گیرد، اما در هر حال این ترکیب بار بایستی به گونه‌ای باشد که امکان تاثیر همزمان بارهای انتخاب شده وجود داشته باشد و یک احتمال منطقی در تاثیر همزمان بارهای انتخابی وجود داشته باشد (ابریشمیو وهاب،۱۳۸۶). به علت انجام تحلیل محافظه‌کارانه در مطالعه‌ی اخیر، بارگذاری سد بتنی دو قوسی بختیاری تحت شتابنگاشت‌های انتخابی در دو حالت بارگذاری غیرعادی و فوق‌العاده انجام می‌شود:

الف) بارگذاری غیرعادی: در این نوع بارگذاری ترکیبی از بارهای مرده، رسوبات، نیروهای بالابرنده در حالت زهکشی‌شده، فشار هیدرواستاتیکی بالادست در تراز نرمال، فشار هیدرواستاتیکی پایین دست و شتاب زلزله‌ی مورد نظر بر بدنه‌ی سد اعمال می‌شود.

ب) بارگذاری فوق‌العاده: در این نوع بارگذاری ترکیبی از بارهای مرده، رسوبات، نیروهای بالابرندهدرحالتزهکشی‌شده، فشار هیدرواستاتیکی بالادست در تراز نرمال، فشار هیدرواستاتیکی پایین دست، بارگذاری حرارتی در سردترین و گرم‌ترین روزهای سال و شتاب زلزله‌ی مورد نظر بر بدنه‌ی سد اعمال می‌شود. در واقع فرق این حالت با بارگذاری غیر عادی، اضافه شدن اثرات تنش‌های حرارتی در بحرانی‌ترین روزهای سال است.

شرایط مرزی مخزن در روش مدلسازی آب واقعی

برای حل معادله‌ی حاکم بر مخزن باید چهار شرط مرزی برای آن در نظر گرفته شود که عبارتند از: مرز بین سد و مخزن، مرز بین سیال و پی (کف مخزن) ، مرز انتهای دور مخزن و سطح آزاد مخزن.

بدنه‌ی سد از جنس بتن بوده و می‌توان سطح آن را نفوذ ناپذیر فرض کرد. در واقع می‌توان فرض کرد در جهت عمود بر سطح مرز مشترک، سرعت حرکت ذرات سیال و بدنه سد برابر خواهند بود.

مرز مشترک پی و مخزن شامل مرز بسته‌ی سنگی و دیواره‌های کناری با مخزن می‌باشد. این شرط مرزی فشار هیدرودینامیک را به مجموع شتاب نرمال و شتاب بوجود آمده در اثر اندرکنش مخزن مصالح کف مخزن و دیواره‌ها ارتباط می‌دهد. معمولا در سدها مقداری رسوب در کف مخزن وجود دارد و این لایه‌ی رسوب باعث جذب بخشی از موج‌های رسیده به آن می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر با توجه به خواص مصالح فونداسیون سنگی، ضریب انعکاس موج آب کف مخزن معادل ۸/. در نظر گرفته شده است.

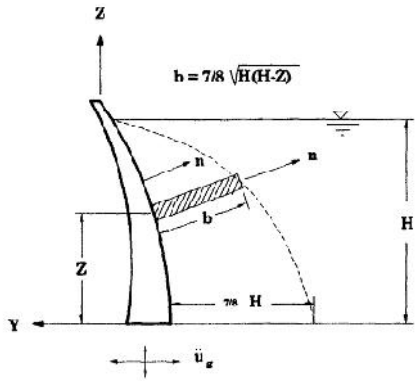
درجه‌ی آزادی فشار تمام گره‌های واقع در سطح آزاد سیال،بسته در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی انتهای دور بر مبنای جذب کامل موج و عدم برگشت آن به داخل سیستم تعریف می‌شود. در مدلسازی نیز باید شرایط به شکلی تعریف شود که امواج بطور کامل جذب شوند و به داخل مخزن بازگشتی نداشته باشند. در زمینه‌ی شرایط مرزی انتهای دور، تحقیقات زیادی انجام گرفته که از جمله معروف‌ترین آنها شرایط مرزی ارائه *شده توسط سامرفلد است (*جانی‌پور و بغلانی،۱۳۹۱*)*. برای اعمال شرایط فوق مدلسازی آب مخزن باید به طول حداقل سه برابر ارتفاع آب پشت سد انجام شود، بنابراین با توجه به ارتفاع ۳۱۰ متری مخزن سد بتنی دو قوسی بختیاری در مطالعه‌ی حاضر آب مخزن به طول ۹۳۰ متر مدلسازی شده است(Kucukarslan et al.,2004).

روش جرم افزوده‌ی وسترگارد (Theorical Manual for Analysis of arch dams)

اثرات مخزن سد بر پاسخ لرزه‌ای سدها برای اولین بار توسط وسترگارد در سال ۱۹۳۳ در نظر گرفته شد. او مفهوم جرم افزوده را به عنوان یک روش استاندارد در محاسبات پاسخ لرزه‌ای سدهای وزنی معرفی کرد و سه شرط اصلی برای مفهوم جرم افزوده در نظر گرفت. مطالعات وسترگارد نشان داد که مفهوم جرم افزوده برای کلیه‌ی سدها از جمله سدهای قوسی قابل تعمیم است. براساس این فرضیه، وسترگارد نشان داد که فشار هیدرودینامیک اعمال شده بر بدنه‌ی سد در طی زلزله با نیروی اینرسی حجم آب در تماس با بدنه‌ی سد معادل است. او برای این فرضیه یک

منحنی سهمی شکل با عرض $\frac{۷}{۸}$ ارتفاع مخزن در تراز پی پیشنهاد کرد. فرض پایه‌ای در روش جرم افزوده‌ی وسترگارد ثابت می‌کند که مقدار فشار در هر گره از بالادست بدنه‌ی سد به وسیله‌ی منحنی سهمی‌گون نشان داده شده در شکل ۲ بیان می‌شود:



شکل ۲: نمایش جرم افزوده‌ی وسترگارد برای سدهای بتنی قوسی

مقدار فشار در هر گره از بالادست بدنه‌ی سد از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$P_i = \alpha_i * \ddot{u}_{ni}^{t}$$

ضریب α_i ثابت فشار وسترگارد بوده که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_i = \frac{7}{8}\rho_w \sqrt{H_i\left(H_i - Z_i\right)}$$

نتایج

در مطالعه‌ی حاضر، کلیه تحلیل‌های تاریخچه زمانی برای دو حالت مدل‌سازی مخزن توسط المان‌های آب و مدل‌سازی توسط جرم افزوده‌ی وسترگارد انجام شده است. برای بررسی دقت روش جرم افزوده‌ی وسترگارد تعداد ۶۳ گره در ترازهای ارتفاعی مختلف بالادست سد درنظر گرفته شده و تاریخچه زمانی جابجایی در تمامی گره‌ها در هر دو روش مدل‌سازی آب واقعی و مدل‌سازی جرم افزوده مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل ۳ موقعیت گره‌های انتخاب شده را نمایش می‌دهد.

شکل ۳: موقعیت گره‌های انتخاب شده در بالادست سد جهت بررسی دقت روش جرم افزوده‌ی وسترگارد

بررسی نتایج حاصل از مقایسه‌ی جابجایی گره‌ای، دقت پایین روش جرم افزوده‌ی وسترگارد در تحلیل‌های لرزه‌ای را نشان می‌دهد که بخشی از این نتایج در جدول ۷ گزارش شده است. لازم به ذکر است که در این جدول شماره‌ی گره‌ها با افزایش ارتفاع تراز گره‌ای کاهش پیدا می‌کند.

مقدار ضرایب شبیه سازی با کاهش تراز ارتفاعی گره‌ها کاهش یافته و می‌توان بطور محافظه کارانه برای مطالعه‌ی حاضر ضریب حداقل ۰/۲۵ و حداکثر ۰/۵را برای شبیه سازی نتایج جابجایی گره‌ای روش جرم افزوده‌ی وسترگارد به روش مدل‌سازی آب واقعی در بیشتر ترازهای ارتفاعی پیشنهاد کرد که البته مقدار دقیق این ضریب به ماهیت زلزله‌ی اعمال شده و تراز ارتفاعی بستگی زیادی دارد و در برخی از گره‌ها ضرایبی نزدیک به ۱ مشاهده شده است.لازم به ذکر استکه نتایج ارائه شده صرفا برای تحلیل لرزه‌ای خطی سد بتنی دو قوسی بختیاری با فرضیات لحاظ شده از قبیل رفتار خطی بتن، صفر بودن جرم فونداسیون و عدم بازشدگی طره‌ها می‌باشد و ممکن است دقت این روش برای مدل‌های دیگر با حجم متفاوت مخزن تفاوت‌هایی داشته باشد.

جدول ۷ : ضریب شبیه سازی تاریخچه زمانی گره‌ای در روش مدل‌سازی جرم افزوده‌ی وسترگارد به روش مدل‌سازی آب واقعی

شتابنگاشت	ایستگاه	شماره‌ی گره‌های بالادست بدنه‌ی سد							
		۹	۵۹	۴۰۱۴	۴۰۵۸	۹۰۱۳	۹۰۵۷	۱۷۰۰۳	۱۷۰۵۳
Imperial Valley	Delta, 352	۰/۵۳	۰/۵۳	۰/۲۴	۰/۴	۰/۲۴	۰/۳۷	۰/۳۱	۰/۳۳
Imperial Valley	El Centro,230	۱/۰۳	۱/۰۶	۰/۶۷	۰/۸۳	۰/۴۳	۰/۶۷	۰/۴	۰/۴
Landers	Yermo,270	۰/۴۱	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۹
Landers	Coolwater,LN	۰/۸	۰/۷۹	۰/۶۱	۰/۷	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۳۸	۰/۳۶
Loma Prieta	Gilroy,000	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۲۶	۰/۵۲	۰/۲۶	۰/۳۴	۰/۳	۰/۲۹
Superstition Hills	Poe,360	۰/۵۴	۰/۵۳	۰/۲۷	۰/۴۱	۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۳
Chi-Chi	TCU045,N	۱/۰۱	۱	۰/۴	۰/۷۱	۰/۳۵	۰/۵	۰/۳۶	۰/۳۷
Friuli	Tolmezzo,000	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۴۲	۰/۶	۰/۳۶	۰/۴۵	۰/۳۴	۰/۳۵

قدردانی

نگارندگان مقاله از مساعدت‌های مسئولان محترم شرکت مهندسی سپاسد و مهندسین مشاور توسعه که ما را در جمع‌آوری اطلاعات یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

ابریشمی جو و هابن (۱۳۸۶) سدهای بتنی، طرح و اجرا، انتشارات آستان قدس رضوی

جانی‌پور مو بغلانیع (۱۳۹۱) بررسی اثر شرایط مرزی دوردست بر فشار هیدرودینامیکی سیال،یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران

Ghafory-Ashtiany Mand Azarbakht A (2010)Strong ground motion record selection for the reliable prediction of the mean seismic collapse capacity of a structure group,*EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS in Wiley Online Library*, 40:691–708

Kucukarslan S, Coskun SB and Taskin B (2004)Transient Analysis of Dam - Reservoir Interaction Including the Reservoir Bottom Effects,*International Journal for Fluids and Structures*

StuckyA&Derron M (1957)ProblemesThermiques poses par la Construction des Barrages-Reservoirs, Science & Technique, Paul Feissly, Libraire-Editeur, Lausanne

Theorical Manual for Analysis of arch dams, prepared for headquarters, U.S army crops of engineers,Washington, DC 20314-1000