

تحلیل رفتار سدهای بتنی وزنی در ترازهای مختلف آب تحت اثر بار زلزله

پرویز ثابتی

دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه، مراغه، ایران

احمد ملکی*

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه، مراغه، ایران

maleki_civil@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۸/۰۵ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۶/۱۰/۱۶

چکیده:

با توجه به مشکلات آبرگیری که سدهای کشور در حال حاضر با آن مواجه هستند، و به منظور آگاهی کامل از تغییرات تنش در ترازهای مختلف حین آبرگیری سدها، ارزیابی متد های موجود در محاسبات پایداری سدها و کسب نتایج تنش و تغییر مکان در ترازهای مختلف آبرگیری دارای اهمیت ویژه گردیده است، لذا در این تحقیق ارزیابی تنش های وارده بر سد قبل از آبرگیری (مخزن خالی)، حین آبرگیری (مخزن نیمه پر) و پس از آبرگیری (تراز نرمال)، با استفاده از روش کلاسیک Method Simplified (چویرا) و روش مدرن Finite Element، در قالب نرم افزارهای Abaqus, Cadam انجام شده است. اصول طراحی و تحلیل لرزه ای سدهای بتنی وزنی مبتنی بر تحلیل خطی و غیر خطی می باشد. با ارزیابی سد وزنی بتنی زاوه و سد pineflat بر پایه تحلیل خطی تاریخچه زمانی به نتایج تعیین کننده در ترازهای مختلف رسیده ایم. در ادامه بر اساس معیار شکست رانکین مسیر ترک های احتمالی و صحت سنجی بین روش های خطی و غیر خطی انجام شده است. در تحلیل دینامیکی پی ارتجاعی، و اثرات هیدرو دینامیکی مخزن و مدل سازی با پی بدون جرم و پی جرم دار توسط Abaqus انجام شده است. در تحلیل غیر خطی با استفاده از شتاب نگاشت های Koyena, Kobe, Chi-Chi، مقایسه و نتایج بدست آمده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلیدواژگان: سد بتنی وزنی، تراز آب، معیار شکست، پی صلب و ارتجاعی

۱- مقدمه

PGA=0.35g و (Chi-Chi PGA=0.30g) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۱-۲ تحلیل شبه دینامیکی خطی

۱-۲- الف نتایج ارزیابی توسط روش Simplified.M, Cadam پی صلب

در جدول ۱-۲ با فرض پی صلب مقایسه در ترازهای نرمال و نیمه پر جهت حداکثر تنش‌های کششی انجام شده است.

جدول ۱-۲ مقایسه نتایج حداکثر تنش‌های کششی با فرض پی صلب برای تراز نرمال و نیمه پر

	Normal.L (kg/m ³)	Semifull.L (kg/m ³)
	S _{max}	S _{max}
Simplified.M	37	20.02
Cadam	34.2	22.5
Verification	1.08	.90

۱-۲ نتایج ارزیابی توسط روش Simplified.M, Cadam پی ارتجاعی

در جدول ۱-۲ با فرض پی ارتجاعی مقایسه در ترازهای نرمال و نیمه پر جهت حداکثر تنش‌های کششی انجام شده است، که ملاحظه می‌گردد.

جدول ۱-۲ مقایسه نتایج حداکثر تنش‌های کششی با فرض پی ارتجاعی برای تراز نرمال و نیمه پر

	Normal.L (kg/m ³)	Semifull.L (kg/m ³)
	S _{max}	S _{max}
Simplified.M	36.8	23.7
Cadam	37.8	20.6

۳- تحلیل دینامیکی خطی مودال

به منظور امکان مقایسه کاربردی تنها به مدل‌سازی بارهای مرده، فشار آب، نیروهای زلزله و عکس‌العمل‌های که بیشترین اثر را در پاسخ سدهای وزنی دارند، پرداخته و از اعمال سایر نیروها بر روی سیستم اجتناب می‌گردد. با توجه به تاثیر اندک رکورد قائم زلزله، صرفاً رکوردهای افقی زلزله مبنای محاسبات می‌باشد.

پیچیدگی مباحث لرزه‌ای سد، با توجه به ویژگی‌های لرزه‌ای به لحاظ شدت، شتاب، فرکانس و زمان عملکرد موثر در زلزله‌های مختلف، ارزیابی ریسک‌پذیری سدها را با متدهای مختلف حائز اهمیت می‌سازد. با پیشرفت دانش در زمینه زلزله و توسعه روش‌های دقیقتر، روش‌های تحلیل و ارزیابی لرزه‌ای نیز کاملتر شده است. بررسی لرزه‌ای سدها از ساده‌ترین روش به نام شبه استاتیکی آغاز و به تحلیل‌های پیچیده با مدل‌های رفتاری پیشرفته منجر شده است. در این مقاله ابتدا مروری بر منابع و پیشینه تحقیق به همراه روش‌های متداول طراحی در سدهای بتنی می‌پردازیم. پس از معرفی اجمالی سد بتنی وزنی ژاوه نتایج آنالیزهای انجام شده بر روی این سد به روش‌های خطی و غیرخطی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- سد بتنی وزنی ژاوه

سد بتنی ژاوه از سدهای مهم استان کردستان و دومین سد ساخته شده در ایران با تکنولوژی RCC^۱ می‌باشد. این سد در فاصله ۶ کیلومتری پایین‌دست محل تلاقی رودخانه‌های گاوهرود و قشلاق و در چهل کیلومتری جنوب غربی سنندج می‌باشد. عملیات اجرایی این سد در سال ۱۳۸۸ شروع و در سال ۱۳۹۲ به اتمام رسید. طراحی و نظارت بر احداث سد توسط مهندسی مشاور مشانیر انجام شده است. طول تاج این سد ۳۰۰ متر و عرض تاج ۵/۱۲ متر ارتفاع ۸۴ متر و عرض بدنه در پی ۸۰ متر می‌باشد. داده‌های پروژه بر اساس مطالعات مهندسی مشاور مشانیر بشرح زیر ارائه شده است.

سنگ $\nu=0.2$, $E_s=16Gpa$, $\epsilon_r=153.8Gpa$

بتن $\epsilon_r=27.6Gpa$ سنگ $\gamma=2750kg/m^3$

بتن $\nu=0.26$ $f_c=17Mpa$ $\gamma=2400kg/m^3$

ارزیابی انجام شده بر روی سد ژاوه شامل آنالیز توسط Simplified Method، آنالیز مودال، شبه استاتیکی و دینامیکی خطی و غیرخطی می‌باشد. در این ارزیابی نرم افزار المان محدود Cadam جهت تحلیل خطی و مقایسه نتایج آن با روش Simplified Method انجام می‌پذیرد. در ادامه تحلیل طیفی خطی سد ژاوه توسط نرم افزار Abaqus با رکورد زمین لرزه Chi-Chi و با شتاب ثقل $PGA=0.3$ انجام می‌پذیرد. به منظور ارزیابی نتایج تحلیل سد ژاوه و مقایسه با سد Pineflat تحت رکورد Chi-Chi انجام می‌پذیرد. تحلیل غیرخطی به منظور تعیین مکانیزم‌های شکست و مسیرهای ترک‌های احتمالی در بدنه سد با توزیع میرایی رایلی پنج درصد^۲، ارائه و توسط رکورد زمین لرزه (Koyena, $PGA=0.31g$) و (Kobe)

² Rayleigh damping

¹ Rolling Compact Concrete

جدول ۳-۲ مقایسه روش‌های ضمنی و صریح حداکثر تنش کششی و تغییر مکان نسبی تاج و پی با فرض پی ارتجاعی برای تراز نرمال و نیمه پر

S _{max} (kg/m ³)	Normal.L		Semifull.L	
	Implicit .M	Explicit .M	Implicit .M	Explicit .M
	23.8	43.2	16.6	39.2
σ _{max} (cm)	14.14	14.08	11.50	14.74

لازم به یاد آوری است در روش صریح اثرات اندرکنشی پی و مخزن لحاظ نگردیده ولی در روش ضمنی، این اثرات منظور شده است.

۴. تحلیل استاتیکی و دینامیکی سدهای وزنی با رفتار غیر خطی مصالح بتن

تحلیل‌های خطی می‌توانند سطح تنش و تغییر شکل و همچنین پتانسیل خرابی در سازه را نشان دهد، اما این روش‌ها نمی‌توانند شکست را پیش بینی کنند، زیرا آنها باز توزیع تنش را پس از تشکیل ترک‌ها در نظر نمی‌گیرند.

فرضیات ساده کننده در تحلیل‌های خطی، شامل رفتار مونولیت سد (عدم در نظرگیری درز) و تبعیت از قانون هوک برای مصالح می‌باشد. لذا تحلیل‌های خطی بیانگر رفتار واقعی سازه نمی‌باشد. در تحلیل‌های غیر خطی بسیاری از فرضیات غیر واقعی که در روش‌های خطی منظور گردیده، نادیده انگاشته می‌شود. تحلیل‌های غیرخطی می‌توانند منتج به نتایج واقع بینانه‌تری شده، و به پیش بینی آستانه خرابی در سازه‌ها کمک شایانی می‌کنند. در تحلیل خطی، معیار موسوم به شکست رانکین^۸ بیان می‌دارد، اگر تنش اصلی ماکزیمم کششی در نقطه‌ای از مصالح بتن غیرمسلح از مقاومت کششی بتن بیشتر شود، بتن دچار ترک خوردگی می‌شود. راستای این ترک خوردگی عمود بر راستای تنش اصلی ماکزیمم می‌باشد. بر اساس تحلیل خطی بروی سد ژاوه که با شتابنگاشت Chi-Chi انجام شده، با توجه به شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود، ترک گسیختگی احتمالی از المان ۶۴ واقع در پاشنه سداغاز شده و ادامه خواهد داشت. در شکل ۴-۲، نتایج تحلیل مشابه در حوزه غیر خطی، بیانگر عدم ایجاد گسیختگی در المان‌های سد می‌باشد. این امر تاکید می‌نماید، تحلیل‌های غیر خطی به منظور حصول نتایج قابل پذیرش، جهت بررسی مکانیزم و موقعیت شکست در سازه در هر صورت انجام پذیرد.

۳-۱ آنالیز مودال

آنالیز مودال برای محاسبه پارامترهای لرزه‌ای با فرض رفتار خطی و مخزن خالی و پی بر بستر صلب، تخمین مناسبی از پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی در نزدیکی تسلیم و ترک خوردگی بدست می‌دهد. در این مقاله از توزیع میرایی رایلی استفاده شده است. جرم کل مدل ۷۳۵۸٫۵ تن و محل مرکز جرم در مختصات (۳۰٫۲۳، ۲۴٫۱۴) می‌باشد. برای مداول فرکانس طبیعی سیستم در دو حالت فرکانس چرخشی (ω) با واحد رادیان بر ثانیه و فرکانس معمولی (f) با واحد سیکل بر ثانیه (هرتز) نمایش داده شده است. در این تحلیل فرکانس پایه مود اول سیستم سد ۲۹٫۲۱۶ رادیان بر ثانیه یا ۴٫۶۵ هرتز و مقدار پریود پایه سد عکس فرکانس و برابر با ۰٫۲۱۵ ثانیه می‌باشد. فرکانس پایه مود سوم ۸۲٫۷۹۲ رادیان بر ثانیه یا ۱۳٫۱۷۷ هرتز و مقدار پریود پایه سد برابر با ۰٫۰۷۵۸ ثانیه می‌باشد.

۳-۲ تحلیل دینامیکی خطی تاریخچه زمانی

گزینه تحلیل در Abaqus

۱- آباکوس استاندارد یا ضمنی

۲- آباکوس صریح

آباکوس استاندارد یا ضمنی^۱، یک فرآیند تحلیل کلی می‌باشد که توانایی حل محدوده وسیعی از تحلیل‌های خطی و غیر خطی، استاتیکی و دینامیکی را دارد و در هر بازه تحلیل انجام می‌گیرد. در مقابل آباکوس صریح^۲ تحلیل در طی زمان با استفاده از بازه‌های زمانی بسیار کوچک انجام می‌گیرد. در این تحقیق، سیستم سد - مخزن و پی، با استفاده از تحلیل صریح انجام شده و سپس نتایج با تحلیل ضمنی مقایسه گردیده. نتایج تحلیل در دو حالت پی بر بستر صلب و ارتجاعی در جداول ۳-۱ و ۳-۲ شرح ذیل می‌باشد.

جدول ۳-۱ مقایسه روش‌های ضمنی و صریح حداکثر تنش‌های کششی و تغییر مکان نسبی تاج و پی با فرض پی صلب برای تراز مخزن خالی^۲، نرمال^۴ و نیمه پر^۵

S _{max} (kg/m ³)	Emp.L	Normal.L		Semifull.L	
	Implic it.M	Implic it.M	Expli cit.M	Implic cit.M	Expli cit.M
	14	26.4	21.6	29.1	30.2
σ _{max} (cm) ^۷	2.95	3.67	3.69	5.40	5.92

^۶ حداکثر تنش کششی

^۷ حداکثر جابجایی بین پاشنه و تاج سد

^۸ Rankin failure critrion

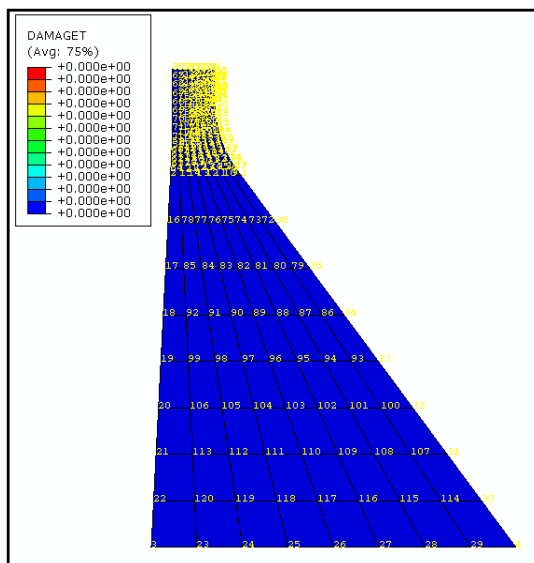
^۱ Implicit Method

^۲ Explicit Method

^۳ Empty Level

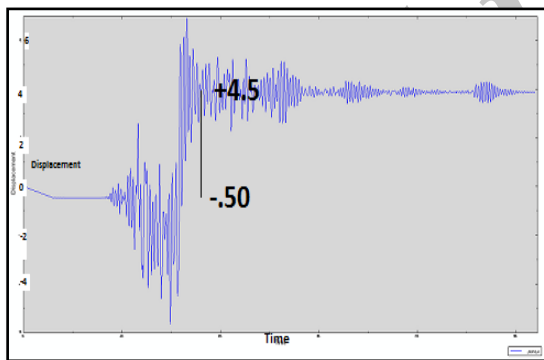
^۴ Normal Level

^۵ Semifull Level

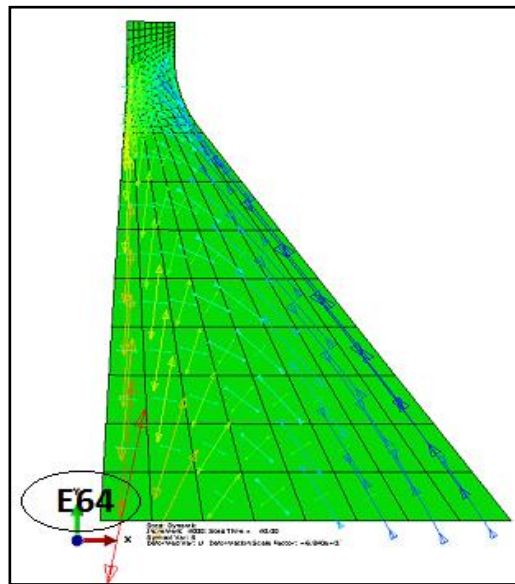


شکل ۴-۲ عدم مشاهده ترک خوردگی در اجزاء با تحلیل غیر خطی Chi-Chi

با توجه به شکل ۴-۲ و ۴-۳ جابجایی نسبی پس ماند در تاج سد نسبت به پاشنه ۵۰ میلیتر بوده که ناشی از ترک خوردگی کششی در مقطع سد، طی زلزله پایه Kobe بر اساس تحلیل تاریخیچه زمانی آ غیر خطی می باشد.



شکل ۴-۳ تاریخچه زمانی جابجایی نسبی تاج سد (Kobe)



شکل ۴-۱ شکست رانکین تراز نرمال و پی صلب Implicit

تحت زلزله های شدید، معمولاً تغییر شکل ها از ظرفیت الاستیک سدهای بتنی تجاوز نموده، شاهد ترک خوردگی کششی در مقطع سد و کاهش سختی کلی سازه خواهیم بود. برای پیش بینی خرابی و ترک خوردگی لازم است، تا وضعیت موجود تنش با مقاومت مصالح مقایسه شود. دو منبع اصلی رفتار غیر خطی در سدهای بتنی وزنی شامل رفتار غیر خطی مصالح ترک خوردگی کششی^۱ و یا خردشدگی فشاری مصالح بتن^۲ و نیز رفتار غیر خطی هندسی لغزش و بلند شدگی در امتداد درزهای موجود در سطوح ترک خورده می باشد.

۴-۱ نتایج بدست آمده از تحلیل دینامیکی لرزه ای غیر خطی

تحلیل انجام شده با فرض مخزن در تراز نرمال و پی بر بستر ارتجاعی و بر اساس سه شتاب نگاشت Chi-Chi، Koyena، Kobe مورد ارزیابی قرار می گیرد. (جدول ۴-۱)

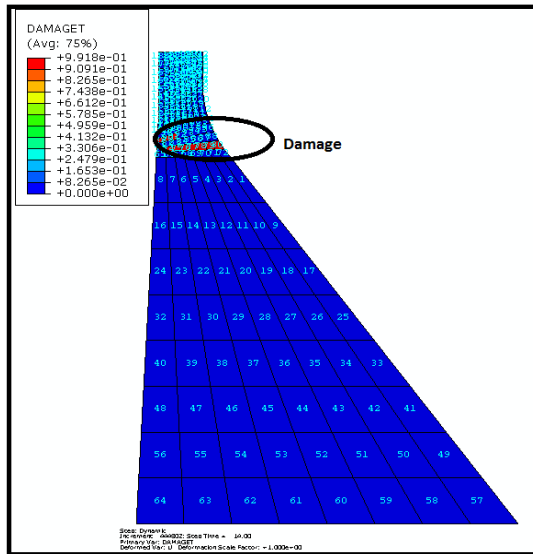
جدول ۴-۱ حداکثر تنش کششی و تغییر مکان نسبی تاج و پی بر اساس سه شتابنگاشت

	Chi-Chi	Koyena	Kobe
$S_{max}(kg/m^3)$	27.9	27.9	27.8
$\sigma_{max}(cm)$	0.50	0.50	4

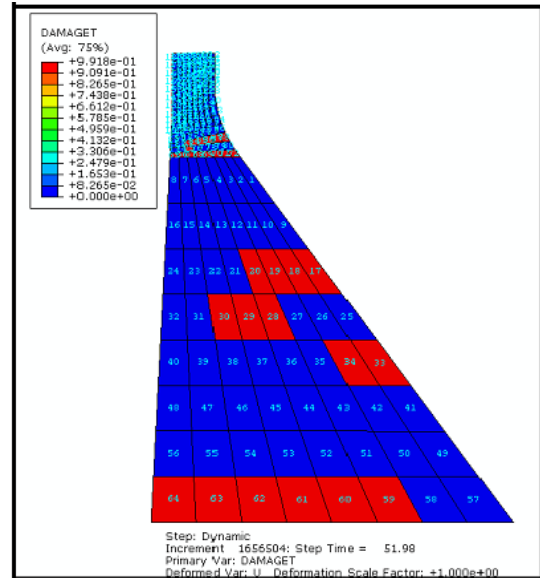
³ Time History

¹ Tensile cracking

² Compressive crushing



شکل ۴-۶ ترک خوردگی در اجزاء با تحلیل غیر خطی Koyena



شکل ۴-۴ ترک خوردگی در اجزاء با تحلیل غیر خطی Kobe

۵- نتیجه گیری، تفسیر نتایج

با توجه به شکل ۴-۵ و ۴-۶ جابجایی نسبی پس ماند در تاج نسبت به پاشنه ۵ میلیمتر بوده که شاهد ترک خوردگی در مقاطع ۲۴ الی ۸۰ و ۸۹ الی ۹۱ طی زلزله پایه Koyena هستیم.

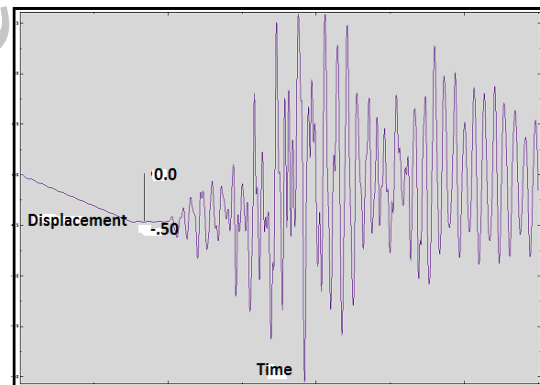
۱- ارزیابی نتایج حاصل از تحلیل سیستم مخزن - پی

بروش Cadam , Simplified Method برای مخزن در تراز نرمال و نیمه پر، با فرض پی بر بستر ارتجاعی، و بستر صلب، اختلاف ناچیز ۲ الی ۸ درصد را نشان می‌دهد، که نتایج حاصله بیانگر صحت تحلیل انجام شده می‌باشد. به جدول (۵-۱) و (۵-۲) توجه فرمایید.

جدول ۵-۱ مقایسه حداکثر تنش بروش Simplified و Cadam

برای پی صلب

	Semifull.L(kg/m3)	Normal.L(kg/m)
	Smax	Smax
Simplified.M	36.8	23.7
Cadam	37.8	20.6
Verification	.98	1.15



شکل ۴-۵ تاریخچه زمانی جابجایی نسبی تاج سد Koyena

پیشنهاد می‌شود مطالعات فاز یک در محل ساختمان با دقت و توجه خاصی انجام پذیرد.

بدیهیست در صورتیکه مطالعات انجام شده بیانگر وجود پی با کیفیت مناسب در محل ساختمان باشد، گزینه پی بدون جرم، گزینه مناسبتری خواهد بود.

جدول ۵-۵ حداکثر مقادیر تنش‌ها در حالت پی جرم دار و بدون جرم، بر روی پی ارتجاعی در تراز نرمال

نوع پی	S_{max}, S_{min} (kg/m ²)	Pineflat	Jaweh
پی با جرم	S_{max}	36.7	43.2
	S_{min}	49.6	39.3
پی بدون جرم	S_{max}	36.4	23.8
	S_{min}	45.1	24.8

۵- در بررسی تحلیل تاریخچه زمانی سیستم سد- پی و مخزن نیمه پر بر روی پی صلب و ارتجاعی پیشنهاد می‌شود، با توجه به مشکلات آبیگری که سدهای کشور در حال حاضر با آن مواجه هستند و به منظور آگاهی کامل از تغییرات تنش در ترازهای مختلف و ارائه اطلاعات جامع حین آبیگری سدها، ارزیابی تاریخچه زمانی در ترازهای مختلف انجام پذیرد.

۶- در صورتیکه مقادیر تنش کششی بیش از مقاومت کششی مقطع باشد آنالیز تاریخچه زمانی به منظور بررسی مکانیزم شکست و نواحی بحرانی شکست الزامی است.

۷- بر اساس معیار شکست رانکین، اگر تنش اصلی ماکزیمم کششی در نقطه‌ای از مصالح بتن غیر مسلح از مقاومت کششی بتن بیشتر شود، بتن دچار ترک خوردگی می‌شود. لذا به منظور درک واقعی از تنش‌های کششی وارده بر المان‌های بدنه و مسیر شکست‌هایی که موجب گسیختگی و ایجاد ترک در سازه می‌شود، آنالیز غیر خطی در سطح زلزله حداکثر MCE توسط ۳ رکورد زلزله با مولفه‌های شتاب افقی و قائم، که دارای مشخصه‌های نزدیک به طیف طرح ساختمان می‌باشند صورت پذیرد. به منظور صحت سنجی نتایج با معیار شکست رانکین و همچنین تغییر مکان نسبی تاج سد و پاشنه ارزیابی شود.

جدول ۵-۲ مقایسه حداکثر تنش برش Simplified و Cadam برای پی ارتجاعی

	Normal.L(kg/m ³)	Semifull.L(kg/m ³)
	Smax	Smax
Simplified.M	37	20.02
Cadam	34.2	22.5
Verification	1.08	.90

۲- در سدهای با فرض پی ارتجاعی، حداکثر مقادیر تنش‌های کششی و فشاری در حالت پی جرم دار بیش از مقادیر مشابه در حالت بدون جرم می‌باشد. با توجه به جدول ۵-۳ مطالعات انجام شده بر روی سد Pineflat نیز، موید این مطلب می‌باشد.

جدول ۵-۳ حداکثر مقادیر تنش‌ها در تراز نرمال و نیمه پر در حالت پی جرم دار و بدون جرم، بر روی پی ارتجاعی Pineflat

نوع پی		Normal.L	Semifull.L
پی جرم دار	Smax	43.2	39.2
	Smin	33.9	33.2
پی بی جرم	Smax	23.8	16.6
	Smin	24.8	22.1

۳- بررسی تحلیل تاریخچه زمانی سیستم سد- پی و مخزن در تراز نرمال و نیمه پر بر روی پی ارتجاعی، بیانگر افزایش چشم‌گیر تغییر مکان نسبی تاج و پی سد، در مقایسه با پی‌های صلب می‌باشد، (جدول ۵-۴). لذا در صورت کاهش در نسبت E_f/E_s شاهد کاهش در تغییر مکان نسبی بین تاج و پاشنه سد می‌باشیم.

جدول ۵-۴ حداکثر تغییر مکان نسبی پاشنه و تاج سد فرض پی ارتجاعی و پی صلب برای مخازن در تراز نرمال و نیمه پر

		Rigid		Flexible	
		Pineflat	Jaweh	Pineflat	Jaweh
O_{max} (cm)	Semi.L	4.9	5.9	25.4	14.7
O_{max} (cm)	Norm.L	5.1	3.6	10.7	14.1

۴- بررسی تحلیل تاریخچه زمانی سیستم سد- پی و مخزن در تراز نرمال بر روی پی ارتجاعی نشان می‌دهد، در پی‌هایی که جرم لحاظ گردیده، نتایج حاصل از تنش‌های فشاری و کششی بیش از پی بدون جرم می‌باشد، جدول (۵-۵). لذا به منظور کاهش هزینه احداث،

مراجع

۱. باقری، محمد عالم، سید کاظمی، محمد. (۱۳۹۳) "مدل سازی عددی سدهای بتنی وزنی با استفاده از Abaqus". تهران، سیمای دانش.
۲. شرکت مهندسين مشاور مشانير، شرکت مهندسی ژيان "طرح اختلاط بتن غلطکی سد ژاوه" دفتر فنی. شهریور ۱۳۸۹.
3. Alembagheri, M., Ghaemian, M. (2013). "Seismic assessment of concrete gravity dams using capacity estimation and damage indexes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 4 (2), 123-144.
4. Chopra, A.K., Chakrabarti, P. and Gupta, S. (1980). "Earthquake response of concrete gravity dams including hydrodynamic and foundation flexibility effects". *EERC Report No. UCB/EERC-80/01*.
5. Ghaemian, M., Ghobarah, A. (1999) "Nonlinear seismic response of concrete gravity dams with dam reservoir interaction". *Engineering Structures*. 21 (2), 306-315.
6. Hall, JF. (2006) "problems encountered from the use (or misuse) of Rayleigh damping". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 35(3), 525-545.
7. Feneves, G., Chopra, A. (1985) "Simplified earthquake analysis of concrete gravity dams: separate hydrodynamic and foundation interaction effects". *Journal of Engineering Mechanics ASCE*; 111(1):715-735

Analysis of Behavior of Concrete Gravity Dams with Different Water Level Subjected to Earthquake Loading

Parviz Sabeti

Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

Ahmad Maleki

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

Abstract:

The design and evaluation of concrete gravity dams will be studied in the present study. The case study consists of a comparison between old research methods and new ones. In the present case, an analysis of concrete gravity dams with different water levels influenced by earthquake will be presented. The subject of the study is a concrete gravity dam project by Rolling Compact Concrete (R.C.C), which is to be located 30 kilometers away from the South East of Sanandaj named Jaweh. It would be the second R.C.C dam made in Iran. The data used in the study is collected from detective. One of the investigation methods is a simplified one by Chopra and Feneves, which is based on a pseudo dynamic method. The new investigation method is conducted on the basis of finite element. Abaqus and Cadam Softwares are based on finite element method as well. This essay investigates the effect of linear behavior of concrete gravity dam with different water levels on rigid and flexible foundation. Afterwards the effect of non-linear behavior of concrete gravity dam on tensile cracking will be investigated and cracking seems directions will be studied by three earthquake accelerators.

Keywords: Concrete gravity dam, R.C.C dam, Linear and non-linear analyses, Rigid foundation, Flexible foundation, Tensile cracking.