

ارزیابی عددی اثرات حاکم بر انفجار زیر آب در سدهای بتنی به

کمک روش بدون شبکه

رامتین صبح خیز فومنی^۱، علیرضا مردوخ پور^{۲*}، همتا خانجانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱

چکیده

مسأله انفجار از جمله مسائل نوینی است که سبب رویدادهای متفاوت یا وقایع عمدی می‌شود و رفتار اعضای سازه‌ای تحت بارگذاری انفجار، موضوع طرح‌های تحقیقاتی زیادی در سال‌های اخیر مطرح بوده است. از آنجایی که انجام آزمایش تجربی بر روی یک سد واقعی امکان‌پذیر نمی‌باشد و عملی معقولی نیست و با توجه به اینکه امروزه حل قابل اعتماد به‌وسیله کامپیوتر و گسترش روش المان محدود امکان مدل‌سازی این مسائل را میسر کرده است، لذا مسأله انفجار زیر آب و تاثیر آن بر روی سد بتنی قوسی راه با این روش قابل مدل‌سازی بوده که نتایج قابل اعتمادی به دنبال دارد. بنابراین هدف از مطالعه بررسی روش اجزا محدود برای مدل‌سازی سازه به‌صورت لاگرانژی با روش بدون شبکه (SPH) برای مدل‌سازی سیال می‌باشد سد مورد مطالعه نیز سد قوسی با ارتفاع ۱۴۱/۷۳ متر و عرض دره ۱۸۴ متر و زاویه مرکزی ۱۳۳ درجه و ضخامتی حدود ۳/۶۶ متر در تاج که انفجارها از روش SPH انجام گرفته و هنگام انفجار TNT تبدیل به ذرات گردیده و به‌صورت کروی وارد محیط گردیده و موج انفجار را ایجاد می‌کند. پس از انجام صحت‌سنجی و قابلیت اعتمادپذیری انجام انفجار به روش SPH، مقدار وزنی TNT نیز برای مقادیر ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم در مخزن و خارج مخزن تحلیل گردید. با انجام پژوهش و مقایسه نتایج مشخص گردید که، تاثیر میزان ماده منفجره بر جابجایی افقی تاج سد چشمگیر بوده و با افزایش وزنی TNT از ۱۰۰ به ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم به‌ترتیب ۲۰ و ۱۰۰ درصد افزایش جابجایی مشاهده گردید. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش میزان ماده منفجره میزان انرژی مستهلک شده توسط سیال نیز افزایش می‌یابد. انفجار داخل مخزن به‌دلیل ایجاد موج در سیال و انتشار در جهت فشار هیدرو استاتیک باعث ایجاد فشار مطلق و جابجایی بیشتری می‌شود.

کلیدواژه: شبیه‌سازی عددی، انفجار، SPH سد بتنی، آباکوس

^۱ دانشجوی دکتری گروه عمران، دانشگاه قم، قم، ایران

^۲ استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران، (alireza.mardookhpour@liau.ac.ir) - نویسنده مسئول

^۳ کارشناس ارشد گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران

۱- مقدمه

وزنی تحت انفجار زیر آب بررسی کردند و اهمیت ابعاد مش بندی سدها در ارائه نتایج نشان دادند.

وانگ و ژانگ [۷] مدل سازی انفجار زیر آب را برای سدهای بتنی وزنی با احتساب اندر کنش سازه - سیال - پی، در اعماق مختلف از سطح آب و همچنین برای فواصل مختلف از نقطه standoff point با مقدار خرج های متفاوت انجام دادند و میزان آسیب دیدگی حاصل از انفجار را بررسی کردند.

رضوی طوسی و همکاران [۸] به بررسی اثر انفجار بر روی تنش های حلقوی و تغییر مکان های ایجاد شده بر روی بدنه مخزن بتن مسلح استوانه ای روزمینی ذخیره آب ناشی از نیروهای هیدرودینامیکی با در نظر گرفتن میزان پرشدگی آب و ابعاد مخازن با نرم افزار تجاری آباکوس پرداخته اند. نتایج نشان داده است که تنش های حلقوی بدنه مخزن، تحت تاثیر امواج انفجار از خارج و فشار آب از داخل قرار دارد به طوریکه وجود آب در مخزن سبب شده تا تنش های حلقوی در بدنه حدود ۲۰ مگاپاسکال افزایش پیدا کند.

برای بررسی رفتار سد طی این انفجار راه های متفاوتی وجود دارد. از آنجایی که انجام آزمایش تجربی بر روی یک سد واقعی امکان پذیر نمی باشد و کار معقولی نیست و اکنون حل قابل اعتماد به وسیله کامپیوتر و گسترش روش المان محدود امکان مدل سازی این مسائل را میسر کرده است، لذا مساله انفجار زیر آب و تاثیر آن بر روی سد بتنی قوسی راه با این روش قابل مدل سازی بوده که نتایج درخشانی ارائه داده است نوآوری پژوهش در بررسی روش اجزا محدود برای مدل سازی سازه به صورت لاگرانژی با روش بدون شبکه (SPH) برای مدل سازی سیال می باشد، به طوریکه این روش امکان حل سری را فراهم کرده است و از طرفی روش بی شبکه برای بارگذاری هایی با نرخ کرنش بالا عملکرد خوبی دارد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- معادلات حاکم موج انفجار

انفجار زیر آب بر روی سازه های مستغرق به دو دسته تقسیم بندی می شود: انفجار میدان دور و انفجار میدان نزدیک. در انفجار میدان نزدیک، فاصله بین ماده منفجره و نقطه مورد اصابت سازه، کمتر از شعاع پیشینه حباب گاز است که اولین ارتعاش حباب گازی رخ می دهد. طبق روابط تجربی، رابطه زیر برای محاسبه پیشینه شعاع حباب گازی (R_{max}) برقرار می باشد [۹].

انفجار، واکنش شیمیایی ماده است که در آن ماده اصلی، با دما و فشار زیاد، تبدیل به گاز می شود. ماده منفجره با اکسیژن هوا ترکیب شده و در مدت زمان کوتاه، انرژی زیادی آزاد می کند. در اثر اکسید شدن مواد منفجره، محصولات گازی داغ و پرفشاری ایجاد می شوند. تفاوت عمده انفجار در هوا با انفجار در زیر آب در دینامیک هسته گازی حاصل از احتراق می باشد. در هر دو حالت، این هسته پرفشار گازی داغ، به سرعت منبسط می گردد، چون فشار آن بسیار بیشتر از فشار آب و یا هوای پیرامونش است. [۱] انفجار زیر آب یک فرآیند پیچیده ای است که در پی آن، عکس العمل های شیمیایی و فیزیکی متنوعی بوجود می آید. در اولین پرپود، در انفجار زیر آب، موج شوک با شدت زیادی به سمت بیرون حرکت می کند، که موجب خسارات جدی به سازه های مستغرق می شود و پس از آن، یک حباب بزرگ که شامل محصولات انفجاری می باشد به سمت بیرون گسیل می یابد. با این وجود بیشترین مقدار فشار حاصل از حباب، کم تر از موج شوک آن می باشد. در واقع تاثیر ضربه موج انفجار بیشتر است. [۲] با توجه به اینکه یکی از مهمترین اهداف ساخت سدها، ذخیره سازی و کنترل آب های سطحی می باشد و از آنجایی که حجم عظیمی از آب، پشت سدها ذخیره می گردد، بنابراین شکست احتمالی آن می تواند باعث ایجاد سیلاب بسیار عظیمی گردد و در نتیجه خسارات بسیار زیادی به پایین دست وارد کند. بنابراین ایمنی سدها از جمله مسائلی است که از اهمیت ویژه ای برخوردار است. پاسخ دینامیکی سدی که در معرض انفجار قرار گرفته، می تواند در علم دفاعی مورد استفاده قرار گیرد. [۳]

تیانانگ بو [۴] مدل سازی عددی انفجار زیر آب را با در نظر گرفتن اندر کنش بین سازه سد- سیال- پی انجام داد. در واقع پروژه او توسط برنامه ملی تحقیقات پایه ای چین حمایت می شد. از نتایج کار او توزیع خرابی بر روی سدهای بتنی وزنی و میزان آسیب دیدگی حاصل از انفجار در عمق های متفاوت، بر روی سدهای بتنی وزنی می باشد.

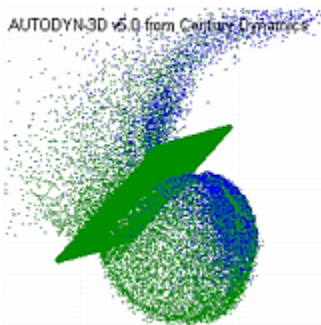
ژو و همکاران [۵] مدل سازی و تحلیل سدهای قوسی تحت انفجار زیر آب کار کردند. نتایج نشان می دهد که پاسخ دینامیکی روی صفحه افق، مهمتر از پاسخ دینامیکی در راستای قائم می باشد. همچنین قویترین پاسخ دینامیکی در نقطه ای روی صفحه قائم، در لحظه انفجار، اتفاق می افتد.

ژانگ و همکاران [۶] انفجار زیر آب بر روی سدهای بتنی وزنی به صورت شبیه سازی عددی مودهای شکست سدهای بتنی

ضربه ای و سپس رفتار آکوستیکی دارد و ناحیه چهارم رفتار سیال کلاً آکوستیکی است [۱۰].

۲-۳- روش بی شبکه SPH

این دیدگاه بر مبنای روش بدون مش ارائه شده است. به این ترتیب که محیط پیوسته به یک سری ذرات که به صورت منظم پخش شده اند، تقسیم بندی می‌شوند، توزیع درجات آزادی مجهول نیز بر اساس توابع خاص آماری است این روش در کاربردهایی که در اثر بارگذاری شدید و با نرخ بالا، به صورت ذرات متلاشی می‌شود، بسیار مناسب است این روش را می‌توان جزء قابلیت‌های پیشرفته شبیه‌سازی دسته‌بندی کرد که بر اساس روش‌های عددی نوین پایه‌گذاری شده است. از جمله مواردی که می‌توان با استفاده از این روش به نتایج قابل توجهی رسید، بحث شبیه‌سازی ذرات خاک است البته در برخوردهای سرعت بالا نیزه فلزات به صورت ذرات بسیار ریز در محیط پخش خواهند شد. شکل (۲) یک نمونه از برخورد با سرعت بالا که توسط نرم‌افزار AUTODYN شبیه‌سازی شده است را نمایش می‌دهد [۱۱].



شکل (۲): شبیه‌سازی یک برخورد بسیار پرسرعت به کمک روش SPH [۱۱].

میدان حل توسط تعدادی نقطه مادی با جرم مشخص تقریب‌زده می‌شود که تحت تاثیر معادلات اساسی حرکت می‌کنند و مستقل از شبکه می‌باشند. در این روش ممکن است نوساناتی در جواب بوجود آید که باید کنترل شود [۱۱].

۲-۴- مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

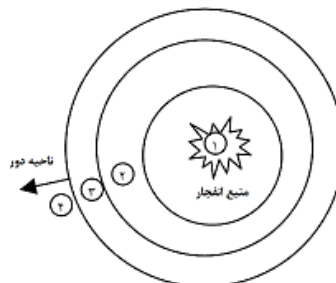
در این پژوهش برای مدل‌سازی انفجار زیر آب یک سد بتنی از نرم‌افزار قدرتمند آباکوس بهره گرفته شده است. در ابتدای کار در ماژول پارت با استفاده از ابزار ترسیم و انتخاب نوع المان، به طراحی مقاطع پرداخته می‌شود. مقاطع سد و آب پشت سد و دره

$$R_{max} = K_6 \frac{W^{1/3}}{(D+33)^{1/3}} \quad (1)$$

در حالت انفجار میدان دور، مقدار R بیشتر از اندازه بیشینه آن می‌باشد و آسیب اصلی بر روی سازه توسط موج انفجار اولیه ایجاد می‌شود.

۲-۲- بررسی عددی انفجار زیر آب

پدیده انفجار زیر آب را می‌توان در محدوده میدان نزدیک و میدان دور بررسی نمود. در زمان نزدیک اولین موج ضربه ای تشکیل شده و در آب منتشر می‌شود و در زمان دور نوسان حباب و اثر انعکاس امواج از مرزهای صلب و سطح آزاد ظاهر می‌شود. احتراق ماده منفجره از یک یا چند نقطه درون ماده منفجره بنام نقاط دتونیشن شروع شده و با سرعتی بنام سرعت دتونیشن، ماده منفجره را تبدیل به گاز پرفشار می‌نماید. پس از احتراق کامل ماده منفجره محصولات گازی شروع به انفجار می‌کنند و بر محیط اطراف اثر می‌گذارند. اگر محیط زمین باشد یک چاله (قیف انفجار) تشکیل می‌شود، در آب حباب‌های گاز تشکیل شده با انبساط خود یک موج ضربه ای ایجاد می‌نمایند و متعاقباً در محدوده زمانی مشخص دور حباب تشکیل شده حول شعاع تعادلی نوسان می‌نماید که ساده ترین فرض برای حرکت حباب، نوسان در عمق ثابت و بدن حرکت انتقالی به سمت بالاست، همچنین در بررسی پدیده انفجار زیر آب می‌توان از نظر مکانی نواحی مختلفی تعریف نمود که معادلات حاکم هر ناحیه به شکل خاصی تبدیل می‌شوند. این نواحی مطابق تجارب مطالعاتی در شکل (۱) نشان داده شده است [۱۰].



شکل (۱): نواحی تعریف شده اطراف منبع انفجار [۱۰].

ناحیه اول ماده منفجره و حباب ناشی از انفجار، ناحیه دوم جابجایی سیال بزرگ بوده و رفتار سیال کاملاً غیر خطی می‌باشد ناحیه سوم جابجایی سیال کوچک بوده ولی ابتدا سیال رفتار

روی نمونه های مکعبی در آزمایشگاه به دست آورد. در نرم افزار ABAQUS پارامترهای تعریف کننده سطح تسلیم شامل ۴ پارامتر مختلف می باشد. ضریب پواسون تغییر حجم بتن در تنش با مقادیر کمتر از حالت بحرانی را تعریف می کند.

$$V_c = 4.5 \times 10^{-7} w^{1.75} f_c^{0.5} \quad (2)$$

زمانی که تنش به مقدار بحرانی برسد، بتن افزایش حجم پلاستیک را خواهد داشت. [۱] این خاصیت توسط زاویه اتساع تعریف می گردد. E گریز از مرکزیت که میزان عدم تقارن تابع را مشخص می کند. (جریان بالقوه به خط مستقیم میل می کند در حالی که گریز از مرکز به میل صفر می کند). این مقدار به طور پیش فرض ۰/۱ است و نشان دهنده این می باشد که بتن زاویه اتساع تقریباً ثابتی را در بازه وسیعی از تنش فشاری داراست. σ_b/σ_c که نسبت تنش تسلیم دومحوری به تنش تسلیم تک محوره می باشد با مقدار پیش فرض ۱/۱۶ که مقدار توصیه شده خود نرم افزار می باشد. Kc نشان دهنده نسبت ثابت تنش ثانویه به تنش تسلیم در نیمه (مریدین) می باشد و مقدار آن به صورت پیش فرض ۰/۶۶۷ می باشد. مقادیر مربوط به E و σ_b/σ_c و Kc می بایست توسط آزمایش سه محوره تعیین گردد اما از آنجایی که هدف این تحقیق تعیین این ۳ پارامتر نیست و همچنین طبق توصیه های راهنمای نرم افزار مقادیر پیش فرض در تحقیق ها و مدل سازی های انجام شده تاکنون جواب قانع کننده را داشته اند. در عین حال با توجه به تحقیقات کیمیک و کالیمسکی [۱۲] مقدار پارامتر ویسکوز با توجه به شکل واقعی انتشار ترک در بتن مقدار ۰/۰۰۰۱ توصیه شده است و مقادیر بالاتر از آن به دلیل غیرواقعی شدن شیوه انتشار ترک توصیه نمی گردد.

جدول (۲ و ۳) به ترتیب مشخصات مربوط به بتن مصرفی و مشخصات خاک مورد نظر در نرم افزار نشان می دهد.

و خاک زیر سد و مخزن در نرم افزار AutoCAD ترسیم سه بعدی گردیده و سپس به صورت فایل STL در آباکوس فراخوانی می گردند.

به منظور مدل سازی ماده منفجره، پس از محاسبه وزن مورد نیاز ماده منفجره بر حسب کیلوگرم و با توجه به وزن واحد ۱۶۳۰ کیلوگرم برای TNT ابعاد آن به صورت کروی و با حجم کره محاسبه می گردد.

جدول (۱): محاسبه وزن و ابعاد TNT بر اساس حجم کره معادل

وزن TNT (kg)	شعاع TNT (m)
100	0.245
500	0.418
1000	0.527

مشخصات مصالح

تعریف مشخصات مصالح و اختصاص آنها به مقاطع در ماژول مشخصات (Property) صورت می گیرد.

در ماژول Property مصالح بتن بر اساس بتن مورد استفاده در مقاله مرجع تعریف شده است. علاوه بر خصوصیات الاستیک بتن، خصوصیات پلاستیک و تخریب بتن نیز به طور کامل اعمال شده است.

مشخصات آب به صورت المان ۸ وجهی و با خواص انتشار موج معرفی می گردد و خاک نیز به صورت مصالح موهر-کولمب ایجاد می شود.

تعیین مشخصات بتن با استفاده تنها از نمودار الاستوپلاستیک بسیار مشکل می باشد. یکی از مهمترین شاخص های مورد نیاز برای تعریف دقیق رفتار بتن، تخریب پلاستیک بتن CDP می باشد که می توان آن را با بارگذاری و باربرداری بر

جدول (۲): مشخصات بتن مصرفی C30

تنش تسلیم	مدول الاستیسیته	ضریب پواسون	چگالی	گریز از مرکزیت	f_b/f_c	K	پارامتر ویسکوزیته	کرنش پیک	کرنش نهایی	مقاومت کششی	Critical Crack Opening
Mpa	Gpa	-	Kg/m ³	-	-	-	-	%	%	Mpa	mm
۳۰	۲۷	۰/۲	۲۴۸۳	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۶۷	۰/۰۰۰۱	۰/۲۷۵	۰/۳۵	۵/۳۱	۰/۱۵۶

جدول (۳): مشخصات خاک

زاویه اصطکاک	چسبندگی	ضریب پواسون	چگالی	مدول الاستیسیته
deg	Mpa	-	Kg/m ³	Gpa
۳۲	۰/۱۶	۰/۳	۱۸۰۰	۷

گام های تحلیل

در ماژول Step گام‌های تحلیل تعریف می گردند. گام اول تحلیل به نام Initial می‌باشد که معرف شرایط اولیه تحلیل می‌باشد. به منظور انجام تحلیل دینامیکی غیر خطی از تحلیل دینامیکی صریح استفاده می‌شود. زمان تحلیل نیز ۰/۸ ثانیه می‌باشد.

اندرکنش

درخصوص اندرکنش بین اجزا و قطعات مونتاژ شده یعنی فونداسیون- آب- سد در ماژول اندرکنش تعریف می‌گردد که به شرح جدول (۵) می‌باشد:

جدول(۵): شرایط اندرکنش در مدل سازی

اندرکنش سد- دیواره دره	نوع Tie و اختصاص به محل اتصال
اندرکنش سد- کف دره	نوع Tie و اختصاص به محل اتصال
اندرکنش آب- خاک	نوع بدون اصطکاک
اندرکنش آب- سد	نوع بدون اصطکاک

شرایط مدل سازی سیال

برای مدل سازی محیط سیال دو قسمت کلی را در نظر گرفته شده است. استوانه میانی و دو قسمت انتهایی که نیم کروی می باشند و شعاع استوانه و کره ها (شعاع خارجی سیال) ۶ برابر شعاع سیلندر، یعنی ۰/۹۱۵ متر در نظر گرفته شد

برای مدل سازی آب اطراف آن طبق توصیه مرجع [۱] از المان اکوستیک (AC3D4) استفاده شد. دانه بندی بر روی مرز خارجی سیال با ابعاد ۰/۱ متر انجام شده است. محیط سیال از تعداد ۴۵۵۸۶ المان تشکیل یافته است.

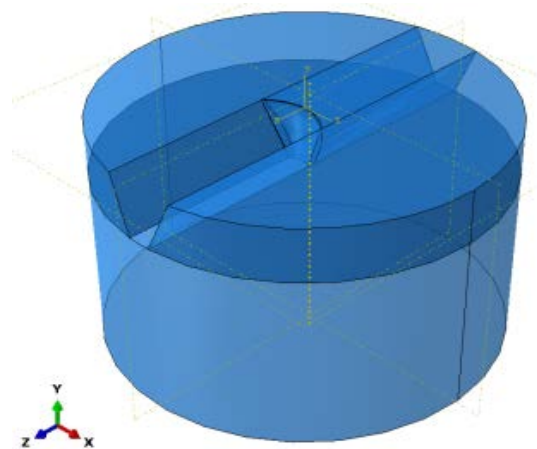
با توجه به لزوم رعایت فاصله انفجار بر اساس شعاع بیشینه حباب، ماده منفجره در فاصله ۱۰ متری از بدنه سد قرار می گیرد. لذا تنها در ماده منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرمی شعاع بیشینه گاز مماس با بدنه می‌گردد که می‌توان نادیده گرفت. جدول (۴) میزان شعاع بیشینه حباب گازی انفجار نشان می دهد.

جدول(۴): محاسبه شعاع بیشینه حباب گازی انفجار

شعاع	عمق	وزن TNT	q
m	m	kg	ثابت
۴/۹	۳۸	۱۰۰	4.44
۸/۴	۳۸	۵۰۰	4.44
۱۰/۱	۳۸	۱۰۰۰	4.44

مونتاژ قطعات

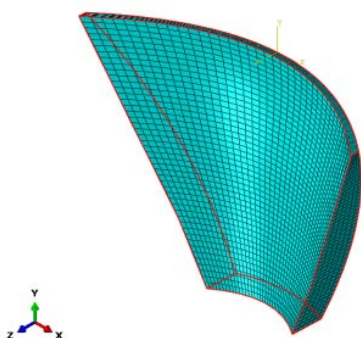
در ماژول Assembly مقطع سد، پی و آب فراخوانی و جایگذاری شده و به‌عنوان محیط حل به برنامه معرفی می‌گردد. شکل (۴) مونتاژ قطعات محدوده حل مسئله را نمایش می‌دهد.



شکل (۴): اسمبل قطعات محدوده حل مسئله

به منظور استفاده از روش SPH در انفجار می‌بایست در تعیین نوع المان از ویژگی شرایط تبدیل به ذرات در نرم‌افزار استفاده کرد. معیار تبدیل به ذره را بر اساس زمان انتخاب شده و زمان آن معادل زمان شروع تحلیل می‌انتخاب می‌شود. در صورتی که تخریب در المان‌های بتن یا خاک وجود داشته باشد، می‌بایست این گزینه برای آن‌ها هم فعال کرد و معیار تبدیل را به‌طور مثال برای بتن می‌توان تنش با مقدار ۵۰ مگاپاسکال یا کرنش ۵ درصد در نظر گرفت. از آنجایی که در این تحقیق از تخریب سد به دلیل زمان فوق‌العاده تحلیل SPH در هنگام تخریب صرف‌نظر گردیده نیازی به اعمال این گزینه برای سد و خاک نیست و همچنین مقدار انفجار باعث تخریب در سد نخواهد گردید.

با استفاده از ابزارهای برنامه ABAQUS مش بندی منظم بر روی مدل استوانه انجام شد. دانه بندی روی مرز خارجی استوانه به ابعاد المان $0.35/0$ متر تعیین شدند. المان مورد استفاده از نوع پوسته‌ای ۴ گرهی (هر گره با ۶ درجه آزادی) S4R می‌باشد. مدل مش بندی شده دارای 2402 المان است. شکل (۶) مش بندی سد بتنی در محیط نرم‌افزاری آباکوس نشان می‌دهد.



شکل (۶): مش بندی سد بتنی

صحت‌سنجی

بعد از مدل‌سازی هندسی سد مورد نظر باید در ابتدا آنالیز مودال انجام شود تا از صحت مدل‌سازی هندسی اطمینان حاصل گردد و بنابراین آنالیز مودال جهت اطمینان از درستی کلیه تحلیل‌ها باید در ابتدا انجام شود. آنالیز تحت بارگذاری وزن سازه و شرایط مرزی نام برده انجام می‌شود. دامنه فرکانسی تا 100 هرتز مد نظر قرار گرفته، که این دامنه پوشش مناسبی برای آنالیز ایجاد می‌کند. نتایج ۵ مود اول در جدول زیر آمده است و همچنین مقادیر سایر محققین برای مقایسه، ارائه شده است. با مقایسه آنالیز مودال مراجع اصلی و نتایج آنالیز مودال انجام شده مطابق جدول (۶)، مشاهده می‌شود که نتایج این دو آنالیز تقریباً منطبق

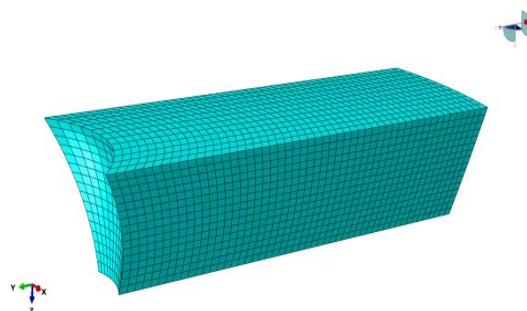
در خصوص شرایط مرزی، سطوح خارجی سیال به صورت مرزهای غیر انعکاسی برای جلوگیری از تداخل امواج بازگشتی با موج حادث ناشی از انفجار در نظر گرفته شده‌اند.

شرایط مدل‌سازی مخزن

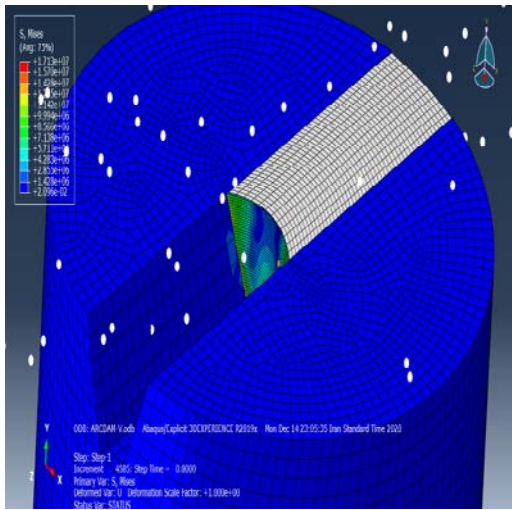
برای مدل‌سازی مخزن و همچنین صحت‌سنجی از المان‌های اکوستیک استفاده شده است زیرا که این المان‌ها با بارگذاری انفجاری داخل آب سازگاری دارند. طول مخزن با توجه به مراجع [۱] و [۲]، 300 متر در نظر گرفته و مدل‌سازی شد. شرایط مرزی در انتها، طرفین و کف مخزن به صورت شرایط جاذب و از نوع غیر بازگشتی مدل‌سازی شد و در سطح مشترک محیط سیال و سازه اندرکنش آب و سازه بین سطوح مذکور اعمال گردیده است. لازم به ذکر است که المان‌های مورد استفاده در مخزن از نوع اکوستیک (AC3D8) و از نوع ۸ گرهی می‌باشد و تعداد المان‌های مخزن 106782 است.

مش بندی

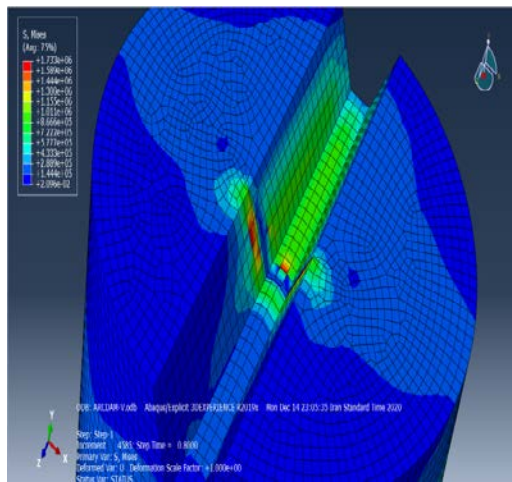
یکی از روش‌هایی که به منظور ارزیابی مناسب بودن ابعاد المان‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، بررسی نتایج المانی در مدل است. وجود ناپیوستگی‌ها و پرش‌های بزرگ نتایج در یک المان موید دقت کم تحلیل خواهد بود. بنابراین پس از اتمام شبیه‌سازی نتایج المانی باید بررسی گردد. در صورتی که پرش‌های شدید در نتایج مورد نظر در تعداد زیادی از المان‌ها رخ دهد، مدل المان محدود از دقت کافی برخوردار نبوده و باید اصلاح گردد. البته نرم‌افزارهای المان محدود مانند ABAQUS می‌توانند نواحی ای را که در آنها خطای تحلیل بالا است، شناسایی نمایند. پس از انتقال دادن مدل به ماژول Mesh در نرم‌افزار ABAQUS به منظور تولید المان‌ها و ایجاد مدل المان محدود مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از ابزارهای موجود در ماژول مش نرم‌افزار آباکوس، متناسب با داده‌هایی که برای حل مساله انتخاب شده است. شکل (۵) مش بندی آب پشت سد در محیط آباکوس نمایش می‌دهد.



شکل (۵): مش بندی آب پشت سد



شکل (۸): کانتور تنش در سد



شکل (۹): کانتور تنش در خاک

۳-۱- مقایسه نتایج انفجار داخل مخزن

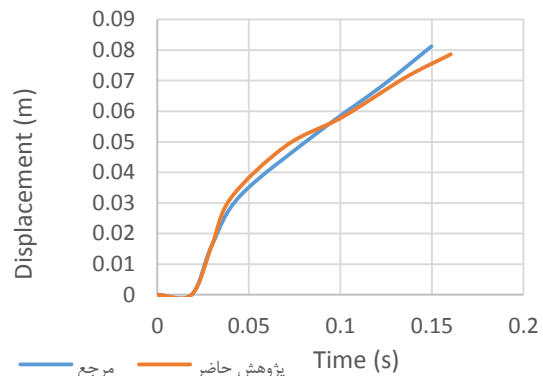
اکنون به مقایسه نتایج حاصل از انفجار داخل مخزن پرداخته می‌شود. شکل (۱۰) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای تغییر مکان قائم تاج سد تحت انفجارهای داخل مخزن می‌باشد. مطابق این نمودار جابجایی قائم تاج سد تحت اثر انفجار با مقادیر وزنی متفاوت تغییرات کمی دارد و حداکثر آن ۷ سانتی‌متر برای ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره است و با افزایش ماده منفجره از ۱۰۰ به ۱۰۰۰ کیلوگرم تنها ۱ سانتی‌متر به تغییر مکان قائم تاج سد اضافه گردیده است. این در حالی است که در تحقیق مشابه طلعت اهری و همکاران [۱۶] و مرادلود و همکاران [۱] برای ماده منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم، میزان تغییر مکان قائم تاج سد به ترتیب حدود ۴/۵ و ۵/۷ برآورده شده است که حاکی از انطباق مناسب مقادیر تحقیقات پیشین با نتایج این تحقیق می‌باشد و فاصله بین مقادیر حاکی از شرایط خاص هر پژوهش می‌باشد

برهم بوده، بنابراین می‌توان استنباط نمود که مدل‌سازی هندسی به صورت صحیح انجام گرفته و بر مشخصات مدل اصلی منطبق می‌باشد. نمونه ای از اشکال مودها نیز در شکل ارائه شده است.

جدول (۶): مقایسه آنالیز مودال مدل‌سازی

مردلو و همکاران [۱]	طلعت اهری و همکاران [۱۶]	کاوه و مهدوی [۱۵]	سلاجقه و همکاران [۱۴]	تن و چوپرا [۱۳]	نتایج پژوهش	مود
۴/۲۶	۴/۲۹	۴/۲۸	۴/۲۹	۴/۲۷	۴/۲۸	۱
۴/۵۲		۴/۵۹			۴/۵۶	۲
۴/۶۵		۶/۷۸	۶/۷۱		۶/۶۸	۳
۶/۹۴					۶/۹۷	۴
۷/۱۷					۷/۱۹	۵

همچنین در خصوص صحت‌سنجی جابجایی نقطه میانی تاج سد با مرجع [۱] مطابق شکل (۷)، اختلاف بسیار جزئی در مشاهده می‌گردد مطابق این نمودار، صحت مدل‌سازی و تحلیل انفجار برای ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره و در فاصله ۷ متری و عمق ۳۸/۵ متری از تاج از روش SPH در مقابل تحلیل Index می‌باشد.

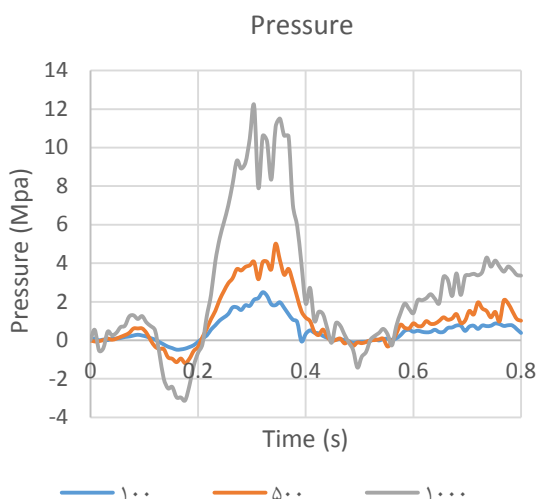


شکل (۷): مقایسه جابجایی قائم نقطه میانی تاج سد

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

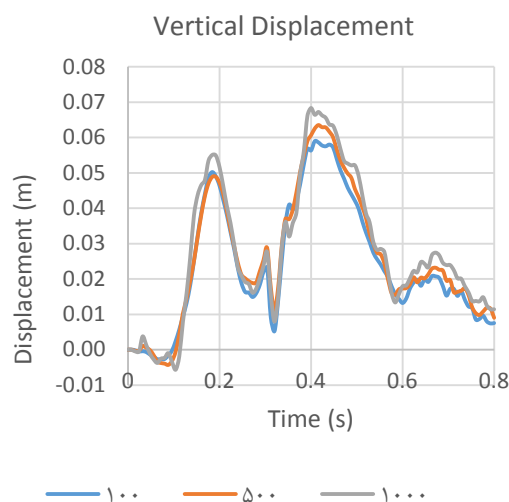
برای ادامه تحلیل مقادیر TNT با وزن ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰ متری در داخل و خارج مخزن قرار داده می‌شود تا علاوه بر افزایش مقدار TNT بتوان فاصله آن را تا دیواره با احتساب شعاع بیشینه گاز ثابت نگه داشت و بتوان مقایسه درستی براساس افزایش میزان ماده منفجره و تاثیر آن به دست آورد. شکل (۸ و ۹) به ترتیب کانتورهای تنش در سد و خاک را در محیط نرم‌افزار نمایش می‌دهد.

شکل (۱۲) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای تغییر فشار در تاج سد تحت انفجارهای داخل مخزن می‌باشد. مطابق این نمودار تغییر مقدار وزن ماده منفجره از ۱۰۰ کیلوگرم به ۵۰۰ کیلوگرم باعث ۲ برابر شدن فشار وارد بر المان میانی تاج سد شده و مقدار آن از ۲ مگاپاسکال به ۴ مگاپاسکال رسیده است. افزایش وزن ماده منفجره از ۱۰۰ کیلوگرم به ۱۰۰۰ کیلوگرم نیز باعث افزایش ۶ برابری فشار شده و مقدار آن به ۱۲ مگاپاسکال رسیده است. این در حالی است که در تحقیق مشابه سلاجقه و همکاران [۱۴] و میزان تغییر فشار تاج برای ماده منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم به عدد ۱۰/۹ مگاپاسکال برآورده شده است که حاکی از انطباق مناسب مقادیر تحقیقات پیشین با نتایج این تحقیق می‌باشد و فاصله بین مقادیر حاکی از شرایط خاص هر پژوهش می‌باشد.



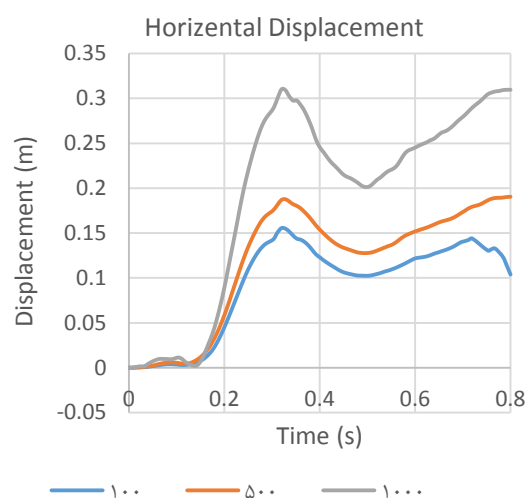
شکل (۱۲): نمودار مقایسه‌ای تغییر فشار در تاج سد تحت انفجارهای داخل مخزن

شکل (۱۳) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای انرژی مستهلک شده سیال در مدل تحت انفجارهای داخل مخزن است. مطابق این نمودار انرژی مستهلک شده توسط سیال در مدل با افزایش مقدار ماده منفجره از ۱۰۰ کیلوگرم به ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم از مقدار ۲۰۰۰ مگاژول به ۵۵۵۶ و ۱۱۳۲۶ مگاژول رسیده که به ترتیب افزایش ۲/۷ و ۵/۶ برابری را داشته است. این در حالی است که در تحقیق مشابه مرادلو و همکاران [۱] و میزان تغییر انرژی مستهلک شده برای ماده منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم به عدد ۱۰۷۵۲ مگاژول برآورده شده است که حاکی از انطباق مناسب مقادیر تحقیقات پیشین با نتایج این تحقیق می‌باشد و فاصله بین مقادیر حاکی از شرایط خاص هر پژوهش می‌باشد.



شکل (۱۰): نمودار مقایسه‌ای تغییر مکان قائم تاج سد تحت انفجارهای داخل مخزن

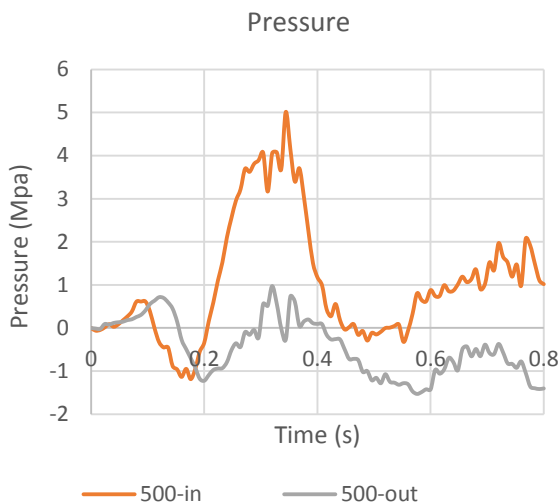
شکل (۱۱) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای تغییر مکان افقی تاج سد تحت انفجارهای داخل مخزن می‌باشد. مطابق این نمودار جابجایی افقی تاج سد تحت اثر انفجار با افزایش وزن TNT از ۱۰۰ کیلوگرم به ۵۰۰ کیلوگرم حدود ۵ سانتی‌متر افزایش جابجایی داشته و تحت انفجار با ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT جابجایی تقریباً دوبرابر شده و به مقدار ۳۰ سانتی‌متر رسیده است. این در حالی است که در تحقیق مشابه مرادلو و همکاران [۱] میزان تغییر مکان افقی تاج سد به ترتیب حدود ۲۷ سانتی‌متر برآورده شده است که حاکی از انطباق مناسب مقادیر تحقیقات پیشین با نتایج این تحقیق می‌باشد و فاصله بین مقادیر حاکی از شرایط خاص هر پژوهش می‌باشد



شکل (۱۱): نمودار مقایسه‌ای تغییر مکان افقی تاج سد تحت انفجارهای داخل مخزن

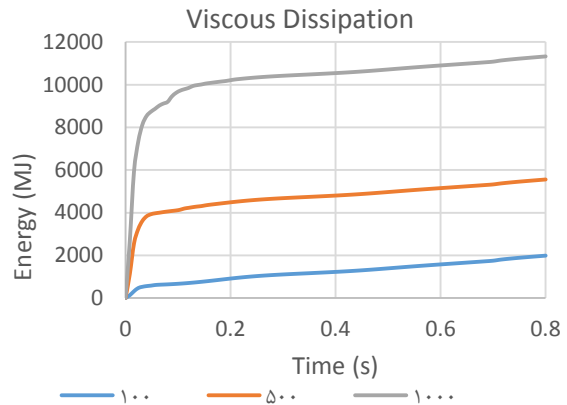
شکل (۱۵) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای تغییر فشار در تاج سد تحت انفجارهای داخل و خارج مخزن می‌باشد. مطابق این نمودار با جابجا نمودن TNT ۵۰۰ کیلوگرمی از داخل مخزن به خارج مخزن باعث کاهش ۸۰ درصدی در فشار شده است و مقدار آن از ۵ مگاپاسکال به ۱ مگاپاسکال رسیده است. لازم به ذکر است که فشار در خارج مخزن با علامت منفی می‌باشد و اعداد با عکس علامت آن در نمودار ترسیم شده اند.

این در حالی است که در تحقیق مشابه سلاجقه و همکاران [۱۴] و میزان کاهش تغییر فشار تاج برای ماده منفجره مرتبط ۶۵ درصدی برآورده شده است که حاکی از انطباق مناسب مقادیر تحقیقات پیشین با نتایج این تحقیق می‌باشد و فاصله بین مقادیر حاکی از شرایط خاص هر پژوهش می‌باشد.



شکل (۱۵): نمودار مقایسه‌ای تغییر فشار در تاج سد تحت انفجارهای داخل و خارج مخزن

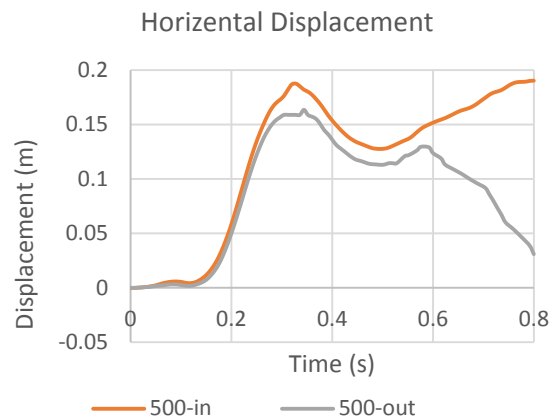
شکل (۱۶) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای انرژی مستهلک شده سیال در مدل تحت انفجارهای داخل و خارج مخزن است. با خروج ماده منفجره از داخل مخزن و در فاصله قرینه مقدار انرژی مستهلک شده توسط سیال حدود ۶۰ درصد کاهش را در پی دارد. از آنجایی که انفجار داخل مخزن، انفجار داخل آب می‌باشد، بیشترین مقدار انرژی تولید شده توسط آب مستهلک می‌گردد ولی در انفجار خارج از مخزن آب باعث استهلاک کمتری در انرژی تولید شده در مدل را دارد و تنها قطعی از موج کروی که به بدنه می‌رسد، ابتدا توسط دیواره سد و سپس توسط آب مستهلک می‌گردد. در عین حال که در انفجار داخل آب کل کره موج انفجار داخل آب بوده و توسط آن مستهلک می‌گردد. این در حالی است که در تحقیق مشابه مرادلو و همکاران [۱] و میزان کاهش انرژی مستهلک شده برای ماده منفجره مرتبط به



شکل (۱۳): نمودار مقایسه‌ای انرژی مستهلک شده سیال در مدل تحت انفجارهای داخل مخزن

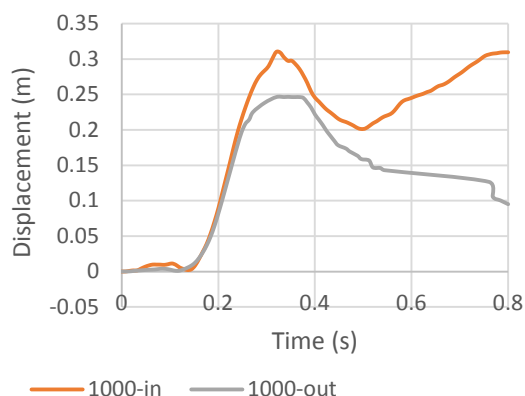
۳-۲- مقایسه نتایج انفجار داخل و خارج مخزن، ماده منفجره ۵۰۰ کیلوگرم

در این مقایسه انفجارهای متفاوت تحت ماده منفجره ۵۰۰ کیلوگرم پرداخته می‌شود. شکل (۱۴) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای تغییر مکان افقی تاج سد تحت انفجارهای داخل و خارج مخزن می‌باشد. مطابق این نمودار با انجام انفجار هم وزن در خارج مخزن و فاصله قرینه، جابجایی افقی ۳ سانتی‌متر معادل ۱۶ درصد کاهش جابجایی را مشاهده می‌شود. دلیل این کاهش جابجایی، مقاومت آب در مقابل جابجایی تاج سد در اثر انفجار خارج مخزن می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که جابجایی در خارج مخزن با علامت منفی می‌باشد و قدر مطلق آن در نمودار ترسیم شده است. این در حالی است که در تحقیق مشابه طلعت اهری و همکاران [۱۶] و مرادلود و همکاران [۱] میزان کاهش تغییر مکان قائم تاج سد ۱۲ و ۱۰/۲ درصد برآورده شده است که حاکی از انطباق مناسب مقادیر تحقیقات پیشین با نتایج این تحقیق می‌باشد و فاصله بین مقادیر حاکی از شرایط خاص هر پژوهش می‌باشد



شکل (۱۴): نمودار مقایسه‌ای تغییر مکان افقی تاج سد تحت انفجارهای داخل و خارج مخزن

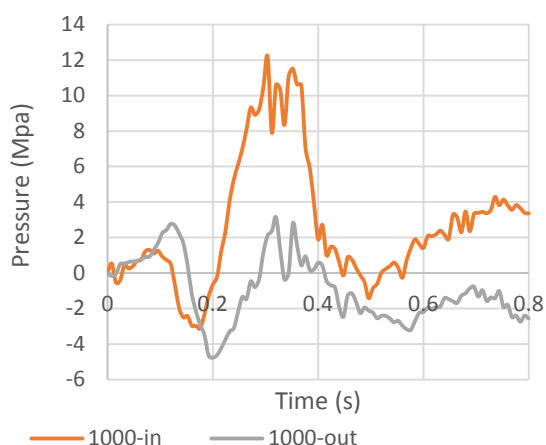
Horizontal Displacement



شکل (۱۷): نمودار مقایسه‌ای تغییر مکان افقی تاج سد تحت انفجارهای داخل و خارج مخزن

شکل (۱۸) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای تغییر فشار در تاج سد تحت انفجارهای داخل و خارج مخزن می‌باشد. مطابق این نمودار با جابجا نمودن TNT ۱۰۰۰ کیلوگرمی از داخل مخزن به خارج مخزن باعث کاهش ۷۵ درصدی در فشار شده است و مقدار آن از ۱۲ مگاپاسکال به ۳ مگاپاسکال رسیده است. این در حالی است که در تحقیق مشابه سلاجقه و همکاران [۱۶] و میزان درصد کاهش فشار تاج برای ماده منفجره مرتبط ۶۲ درصد برآورده شده است که حاکی از انطباق مناسب مقادیر تحقیقات پیشین با نتایج این تحقیق می‌باشد و فاصله بین مقادیر حاکی از شرایط خاص هر پژوهش می‌باشد

Pressure

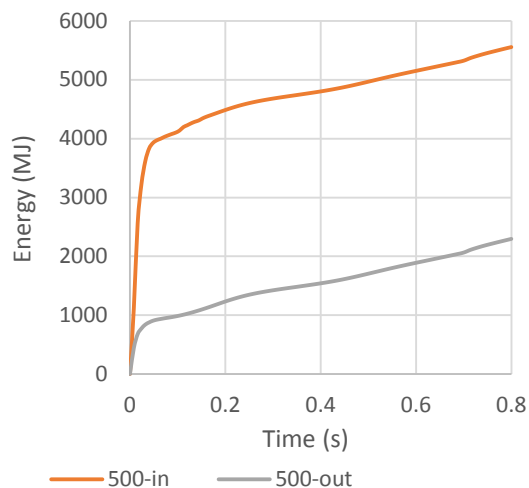


شکل (۱۸): نمودار مقایسه‌ای تغییر فشار در تاج سد تحت انفجارهای داخل و خارج مخزن

شکل (۱۹) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای انرژی مستهلک شده سیال در مدل تحت انفجارهای داخل و خارج مخزن است. با خروج ماده منفجره از داخل مخزن و در فاصله قرینه مقدار

عدد ۴۸ درصد برآورده شده است که حاکی از انطباق مناسب مقادیر تحقیقات پیشین با نتایج این تحقیق می‌باشد و فاصله بین مقادیر حاکی از شرایط خاص هر پژوهش می‌باشد.

Viscous Dissipation



شکل (۱۶): نمودار مقایسه‌ای انرژی مستهلک شده سیال در مدل تحت انفجارهای داخل مخزن

۳-۳- مقایسه نتایج انفجار داخل و خارج مخزن، ماده منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم

بعد از بررسی شرایط انفجار در ماده ۵۰۰ کیلوگرم، اکنون ماده منجره ۱۰۰۰ کیلوگرمی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۱۷) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای تغییر مکان افقی تاج سد تحت انفجارهای داخل و خارج مخزن می‌باشد. مطابق این نمودار با انجام انفجار هم وزن در خارج مخزن و فاصله قرینه، جابجایی افقی ۶ سانتی‌متر معادل ۲۰ درصد کاهش جابجایی را مشاهده می‌کنیم. دلیل این کاهش جابجایی مقاومت آب در مقابل جابجایی تاج سد در اثر انفجار خارج مخزن می‌باشد. در عین حال موج‌های بعدی در خارج مخزن به دلیل عدم وجود سیال (آب یا هوا) و ایجاد موج‌های رفت و برگشتی بسیار کوچکتر می‌باشند و تاج سد سریع‌تر به محل اولیه خود باز می‌گردد. لازم به ذکر است که جابجایی در خارج مخزن با علامت منفی می‌باشد و قدر مطلق آن در نمودار ترسیم شده است. این در حالی است که در تحقیق مشابه طلعت اهری و همکاران [۱۶] و مرادلود و همکاران [۱] میزان کاهش تغییر مکان قائم تاج سد با توجه به وزن ماده منفجره به ترتیب ۱۵ و ۱۳/۸ درصد برآورده شده است که حاکی از انطباق مناسب مقادیر تحقیقات پیشین با نتایج این تحقیق می‌باشد و فاصله بین مقادیر حاکی از شرایط خاص هر پژوهش می‌باشد.

مخرب‌تر و بحرانی‌تری می‌باشند. نتایج موردی این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

۱- در روش SPH ماده منفجره در لحظه انفجار تبدیل به ذرات می‌شود و در تمام جهات منتشر می‌گردد و انرژی انفجار را منتشر می‌کند.

۲- در صورت بزرگتر بودن فاصله انفجار از شعاع بیشینه حباب گازی، می‌توان از اثرات حباب و کاویتاسیون صرف نظر نمود.

۳- تاثیر میزان ماده منفجره بر میزان جابجایی قائم تاج سد بسیار کم می‌باشد.

۴- تاثیر میزان ماده منفجره بر جابجایی افقی تاج سد چشمگیر بوده و با افزایش وزنی TNT از ۱۰۰ به ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم به ترتیب ۲۰ و ۱۰۰ درصد افزایش جابجایی مشاهده گردید.

۵- با افزایش میزان ماده منفجره از ۱۰۰ کیلوگرم به ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم، میزان فشار در تاج به ترتیب ۲ و ۶ برابر شده است.

۶- با افزایش میزان ماده منفجره میزان انرژی مستهلک شده توسط سیال نیز افزایش می‌یابد.

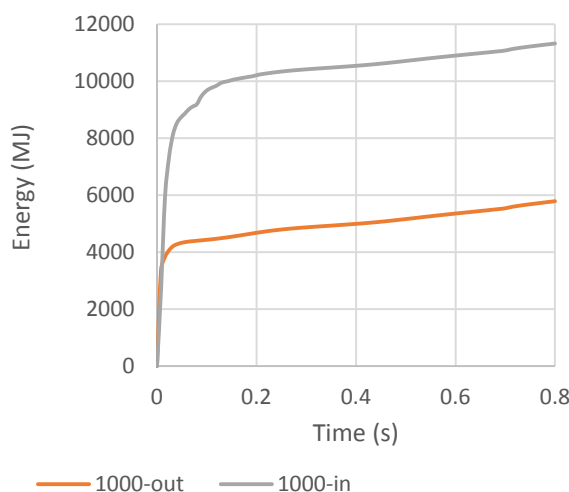
۷- انفجار داخل مخزن به دلیل ایجاد موج در سیال و انتشار در جهت فشار هیدرو استاتیک باعث ایجاد فشار مطلق و جابجایی بیشتری می‌شود و انفجار خارج مخزن با اینکه به دلیل عدم وجود آب انرژی اولیه انفجار استهلاک کمتری دارد اما هنگام برخورد موج انفجار به بدنه سد و در جهت خلاف نیروی هیدرواستاتیک، مقدار زیادی از انرژی رسیده به تاج سد صرف مقابله با نیروی هیدرواستاتیک می‌شود.

۸- از آنجایی که کل کره موج انفجار داخل مخزن داخل آب می‌باشد، استهلاک انرژی توسط آب بیشتر از حالتی است که انفجار خارج مخزن باشد. در انفجار خارج مخزن تنها قسمتی از موج که به صورت مستقیم به بدنه می‌رسد، از طریق بدنه سد به آب رسیده و انرژی کمتری برای استهلاک دارد.

۹- از آنجایی که نوآوری این پژوهش بررسی بدون شبکه برای شرایط مختلف مواد منفجره می‌باشد لذا مقایسه نتایج این پژوهش با تحقیقات پیشین در بخش تحلیل مودال و درصد تغییر مکان و فشار و انرژی مستهلک شده ناشی از مواد منفجره

انرژی مستهلک شده توسط سیال حدود ۵۰ درصد کاهش را پی‌برد. از آنجایی که انفجار داخل مخزن، انفجار داخل آب می‌باشد، بیشترین مقدار انرژی تولید شده توسط آب مستهلک می‌گردد ولی در انفجار خارج از مخزن آب باعث استهلاک کمتری در انرژی تولید شده در مدل را دارد و تنها قطعی از موج کروی که به بدنه می‌رسد، ابتدا توسط دیواره سد و سپس توسط آب مستهلک می‌گردد در عین حال که در انفجار داخل آب کل کره موج انفجار داخل آب بوده و توسط آن مستهلک می‌گردد. این در حالی است که در تحقیق مشابه مرادلو و همکاران [۱] و میزان کاهش انرژی مستهلک شده برای ماده منفجره مرتبط به عدد ۴۲ درصد برآورده شده است که حاکی از انطباق مناسب مقادیر تحقیقات پیشین با نتایج این تحقیق می‌باشد و فاصله بین مقادیر حاکی از شرایط خاص هر پژوهش می‌باشد.

Viscous Dissipation



شکل (۱۹): نمودار مقایسه‌ای انرژی مستهلک شده سیال در مدل تحت انفجارهای داخل مخزن

۴- نتیجه‌گیری

امروزه یکی از مهمترین موضوعات، بحث انفجار و تاثیر آن بر روی سازه‌های مختلف از جمله در سدهای بتنی می‌باشد که با توجه به هزینه ساخت بالای ساخت سد، بررسی پدیده انفجار بسیار مهم می‌باشد. در عین حال با توجه به ایجاد آسیب‌های مالی و جانی به دلیل شکست سد، این مسئله دارای اهمیت بسیار بالایی می‌باشد. به این دلیل در پژوهش حاضر به تحلیل اثر انفجار زیر آب در سدهای بتنی به روش SPH پرداخته شده است. نتایج کلی این پژوهش نشان می‌دهد که انفجارهای داخل مخزن انفجارهای

- [8] V. Razavi Tusi, M. Moghadam, M. Shahrbanouzadeh "Dynamic analysis of reinforced concrete water tanks under explosion with regard to water-structure interaction" Scientific Journal of Passive Defense.2021(in persian).
- [9] M. Alem Bagheri, M. Seyed Kazemi "Numerical modeling of weighted concrete dams using Abaqus software" Simaye Danesh Publications, First Edition, 2013(in persian).
- [10] Sh. Imamzadeh, M.T. Ahmadi "Study of the propagation of underwater explosion shock waves by finite element method" Journal of Marine Engineering, vol 3, pp 13-26 .2006 (in persian).
- [11] A. Saedi Darian, A.Jalili, Sina " Impact and Explosion Engineering with a Comprehensive Guide to Autodyn Software" Darian Publications, First Edition, 2012 (in persian).
- [12] P. Kmiecik, M. Kamiński "Modeling of Reinforced Concrete Structures and Composite Structures with Concrete Strength Degradation Taken Into Consideration" Journal of Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol 11, pp 623-636. 2011.
- [13] H. Tan, A.K Chopra " Dam-foundation rock interaction effects in earthquake response of arch dams" Journal of Strucural Enginnering, vol 122, pp 528-538.1996.
- [14] S.M Seyedpoor, J. Salajegheh, E. Salajegheh, S. Gholizadeh "Optimal design of arch dams subjected to earthquake loading by a combination of simultaneous perturbation stochastic approximation and particle swarm algorithms" Journal of Applied Soft Computing, vol 11, pp.39-48. 2011.
- [15] A. Kaveh, A.V.R Mahdavi "Optimal design of arch dams for frequency limitations using charged system search and particle swarm optimization" International Journal of Optimization in Civil Engineering, vol 4, pp.455-543.2011.
- [16] S. Talatahari, M.T Aalami, R. Parsiavash, 2016. "Optimum design of double curvature arch dams using a quick hybrid charged system search Algorithm" Journal of Iran University of Science & Technology, vol 6, pp.227-243.2016.
- در مخزن حاکی از همبستگی نسبتاً مناسب این نتایج با پیشینه تحقیق می‌باشد و اختلاف‌های موجود می‌تواند به شرایط مدل‌سازی و فرضیه‌های مربوطه هر پژوهش برگردد.

۵- مراجع

- [1] J. Moradloo "Analysis of Dynamic Nonlinear Behavior of Arched Concrete Dams in the Range of Large Displacement" Tarbiat Modares University PhD Thesis, 2006 (in persian).
- [2] H. Mirza Bozorg "Non-linear seismic analysis of three-dimensional concrete dams with consideration of the interaction effect of the dam" Sharif University of Technology Ph.D.2003 (in persian).
- [3] H.Valaei " Study of effective parameters in nonlinear dynamic behavior of submerged steel chamber under underwater explosion" Master Thesis, Zanjan University, 2014 (in persian).
- [4] B.L. Wahalathantri, D.P. Thambiratnam, T.H.T. Chan and S. Fawzia and A. April "Material Model for Flexural Crack Simulation in Reinforced Concrete Elements Using ABAQUS"; Procceding of the International Conference on Engineering, pp 260-264.2011
- [5] F. E. Zhu, W. E Zhu, D. Fei, J.L. Yan, X.S. Xu, X. Chen and J. J Zhuo "Modelling and Analysis of Arch Dam Withstand Underwater Explosion"; Journal of Applied and Computational Mechanic, vol 48, 2013.
- [6] S.H. Zhang, G. A Wang, C.H Wang, B.O. Pang and C.H Du "Numerical Simulation of Failure Modes of Concrete Gravity Dams Subjected to Underwater Explosion"; Journal of Engineering Failure Analysis, vol 36, pp 49-64 .2013.
- [7] G. Wang and S. Zhang "Damage Prediction of Concrete Gravity Dams Subjected to Underwater Explosion Shock Loading" Journal of Enginnering Failure Analysis, vol 39, pp 72-91.2014.

The Numerical Evaluation of the Effects of Underwater Explosion in Concrete Dams Using a Network-Less Method

R. Sobhkhiz Foumani¹, A. R. Mardookhpour^{2*}, H. Khanjani³

Abstract

The issue of explosions is one of the new issues that cause various happenings or intentional events and the behavior of structural members under the load of explosion has been the subject of many research projects in recent years. Since it is neither possible nor reasonable to perform exploratory experiments on a real dam and considering that today a reliable solution by computer simulations is feasible and also the development of finite element method, these problems are solved using models. Hence underwater explosion and its effect on the arched concrete dam are modeled using such a method, with reliable results. This study considers an arched dam with a height of 141.73 meters, a width of 184 meters, a central angle of 133 degrees and a thickness of about 3.66 meters in the crown, experiencing an explosion wave. After performing the accuracy and reliability of the explosion by SPH method, the weight of TNT is analyzed for 500 and 1000 kg in the tank and outside the tank. The effect of explosive amount on the horizontal displacement of the dam crown is significant and with increasing the weight of TNT from 100 to 500 and 1000 kilograms, 20% and 100% increase in the displacement are observed, respectively. The results also show that with increasing the amount of explosive, the amount of energy consumed by the fluid also increases. The explosion inside the tank causes absolute pressure and more displacement, due to wave creation in the fluid and wave propagation in the direction of the hydrostatic pressure.

Key Words: *Numerical Simulation, Explosion, SPH Concrete Dam, Abaqus*