

Evaluation of Damage of Double Curvature Arch Concrete Dam According to the Mean Frequency and Velocity Caused by the Blast Wave in the Near-Field

M. Najafi , M. Karkon *, A. Ghanbari , M. Parviz 

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

(Received: 06/08/2022, Revised: 05/12/2022, Accepted: 05/02/2023, Published: 22/06/2023)

DOR: 20.1001.1.20086849.1402.14.2.3.5

ABSTRACT

Dams are one of the vital components of human societies and one of the strategically important assets of any society with a significant role in the sustainable development of the country. In this research, the damage caused by the blast of a double curvature arch concrete dam has been evaluated according to the mean velocity and frequency caused by the blast in the near-field. The model of the material used in the numerical simulation include the explosives, air, water, and concrete, which has been modeled. The problem-solving method used to apply the blast in modeling is Load Blast Enhanced. Using this method, the propagation of the pressure wave caused by the blast and finding the critical points of the dam body against the blast have been investigated. Then, the structural responses and the dam damage characteristics in different blast scenarios have been investigated according to the change in the blast depth, the distance from the concrete dam body, and the blast load. Also, by using vibration parameters such as peak velocity summation (PVS) and mean frequency (MF), the combined spectrum has been evaluated and proposed as a way to design a blast-resistant dam and find a safe standoff distance in case of emergency. Finally, two PVS-MF spectra have been suggested according to the charge weight and their distance for optimal and useful classification of dam damage according to three modes: slight, moderate, and severe, for initial and critical evaluation.

Keywords: LS-DYNA, Damage, Explosion, Concrete Arch Dam

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: mo.karkon@iaiu.ac.ir



نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال چهاردهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، (پیاپی ۵۴): صص ۳۱-۴۸

علمی- پژوهشی

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۲۹۸۰-۸۰۳۰



ارزیابی خسارت سد بتنی دو قوسی با توجه به سرعت و فرکانس

متوسط ناشی از موج انفجار در میدان نزدیک

محسن نجفی^۱، محمد کارکن^{۲*}، اکبر قنبری^۳، محسن پرویز^۴

DOR: 20.1001.1.20086849.1402.14.2.3.5

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵

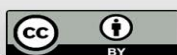
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۴

چکیده

سدها یکی از اجزای حیاتی جوامع بشری و از سرمایه‌های مهم استراتژیک هر جامعه‌ای می‌باشند که نقش قابل توجهی در توسعه پایدار کشور دارند. در این پژوهش به ارزیابی خسارت ناشی از انفجار سد بتنی دو قوسی با توجه به سرعت و فرکانس متوسط ناشی از انفجار در میدان نزدیک پرداخته شده است. مدل ماده مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی مواد منفجره، هوا، آب و بتن است که با نرم‌افزار LS-DYNA مدل‌سازی گردیده است. روش حل مسئله مورد استفاده جهت بارگذاری انفجار در مدل‌سازی LBE می‌باشد. با استفاده از این روش انتشار موج فشار ناشی از انفجار و یافتن نقاط بحرانی بدنه سد در مقابل انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با توجه به تغییر در عمق انفجار، فاصله از بدنه سد بتنی و بار انفجاری، پاسخ‌های ساختاری و ویژگی‌های خسارت سد در سناریوهای مختلف انفجار بررسی شده است. همچنین با استفاده از پارامترهای لرزش از قبیل حداکثر مجموع برداری سرعت ذرات (PVS) و میانگین فرکانس (MF) به ارزیابی و پیشنهاد طیف ترکیبی، به روشی جهت طراحی سد مقاوم در برابر انفجار و یافتن فاصله ایمن در مواقع بحرانی رسیده است. در پایان دو طیف PVS-MF پیشنهادی با لحاظ وزن خرج و فاصله آنها جهت دسته‌بندی بهینه و مفید خسارت سد، به صورت حالت جزئی، متوسط و شدید خسارت جهت ارزیابی اولیه و بحرانی پیشنهاد گردیده است.

کلید واژه‌ها: سد دو قوسی، انفجار، ارزیابی خسارت، LS-DYNA، PVS، MF

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران
^۲ استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران - mo.karkon@iau.ac.ir - نویسنده مسئول



^۳ استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران
^۴ دکتری تخصصی، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۱- مقدمه

در قرن و دهه‌های اخیر زیرساخت‌های تأمین منابع از جمله اهداف مهم نظامی، مورد توجه گروه‌های تروریستی جهت حملات هدفدار می‌باشد. زیرساخت‌های شبکه منابع آب از جمله شریان‌های حیاتی بسیار مهم محسوب می‌شود که همواره در طول سالیان در معرض انواع تهدیدات طبیعی و انسانی قرار دارد. این زیرساخت از آنجاکه شریان حیاتی یک کشور را تشکیل می‌دهد تصور شرایط حتی برای یک روز بدون آن را دشوار ساخته است.

سد یکی از اجزاء این شبکه و اولین سازه‌ای بود که بشر برای حفظ و ذخیره‌سازی آب‌های جاری ابداع نمود و از آن استفاده‌های جانبی دیگری همچون تولید انرژی و کنترل سیلاب به عمل آورد و به‌عنوان یکی از سرمایه‌های مهم ملی، نقش قابل‌توجهی در توسعه پایدار کشور دارند. اجرای طرح‌های سدسازی، به لحاظ دارا بودن پیچیدگی‌های فنی و آثار زیست‌محیطی عمده، بسیار پرهزینه و وقت‌گیر بوده و تلاش و کوشش همه‌جانبه و وسیعی را در زمینه‌های مختلف طلب می‌نماید [۱]. این طرح‌ها، در زمره طرح‌های مهم مهندسی بوده و اجرای آنها می‌تواند نقش مهمی در اعتلای اقتصادی منطقه‌ای و ملی داشته باشد و لازمه حصول این پایداری حفظ این سرمایه‌ها با تضمین ایمنی آنها است [۲]. در طراحی سدها آسیب‌پذیری از انفجار مورد توجه قرار نگرفته است، پس بررسی آسیب‌پذیری سدها در مقابل خسارت ناشی از انفجار بسیار بااهمیت است.

در این مقاله به مطالعه ارزیابی آسیب‌های ناشی از انفجار در میدان نزدیک بر روی بدنه سدهای قوسی می‌پردازیم و به روشی جهت ارزیابی آسیب محور مبتنی بر لرزش جهت نمایش صدمات بدنه سد پس از انفجار دست‌یابیم. از آنجاکه آزمایش‌های مدل پرهزینه و وقت‌گیر هستند [۳]، انجام آزمون‌های کافی برای درک درست از مکانیسم خرابی سدها غیرممکن است. بدین منظور پس از ساخت مدل در نرم‌افزار LS-DYNA و عملیات صحت‌سنجی، به استخراج سرعت حداکثر ذرات و فرکانس در محل تاج سد پرداخته شده است. با استفاده از هیدروکدهای اجزاء محدود در نرم‌افزار LS-DYNA نیز می‌توان بارهای انفجاری وارد برسازه‌ها را محاسبه نمود. این نرم‌افزار قابلیت محاسبه تنش، کرنش و پارامترهای مربوط به امواج دینامیکی را برحسب مکان و زمان دارا می‌باشد.

ژو^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۴] به مطالعه آسیب ارتعاشات ناشی از انفجار غیرمجاز بر روی سازه‌های بتنی و همچنین اینکه منجر به کاهش ایمنی سازه‌های آن می‌شود پرداخته‌اند. آنها یک مدل آسیب دینامیکی ناهمسانگرد سه بعدی برای سد قوسی تحت بارگذاری انفجار ایجاد شده است. نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که رفتار غیرخطی سدهای بتنی را می‌توان به‌طور رضایت‌بخشی پیش‌بینی کرد. این امر، پشتیبانی نظری معقول در مورد ارزیابی ایمنی قابلیت سدهای بتنی قوسی در برابر بارگذاری انفجاری و اطلاعات مفید برای تحقیقات بیشتر در این زمینه را فراهم می‌آورد.

وانگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۳] به بررسی مقاومت در برابر انفجار و حفاظت از سدهای بلند پرداختند. انفجار شبیه‌سازی عددی یک روش جایگزین مناسب برای تجزیه و تحلیل مقاومت در برابر انفجار سدها است.

ژانگ کفن^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۲ [۵] بررسی پاسخ دینامیکی سد ثقلی تحت بار انفجار هوا بر اساس قانون تشابه را بررسی کردند و در نتایج مقایسه خود از مدل‌ها نشان دادند که یک قانون شباهت بین پارامترهای پاسخ دینامیکی انفجار هر مدل مقیاس‌گذاری به‌دست‌آمده از محاسبات شبیه‌سازی و داده‌های برازش تجربی وجود دارد که با نتایج نظری قانون شباهت مطابقت دارد. روش گسترش پارامترهای دینامیکی مدل مقیاس کوچک مقیاس به مدل مقیاس بزرگ معقول و قابل‌اعتماد است.

عطایی و کاملی در سال ۲۰۱۲ [۶] به مطالعه پیش‌بینی ارتعاشات ناشی از انفجار با استفاده از سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی در نیروگاه و سد کارون ۳ پرداختند که مطالعه‌ای برای پیش‌بینی ارتعاشات زمین تولید شده توسط پروژهای انفجار در سازه‌های نیروگاه و سد کارون ۳ (شهرک ایذه، ایران) با استفاده از یک روش آماری مرسوم و یک روش محاسباتی نرم نسبتاً جدید به نام سیستم استنتاج عصبی - فازی انطباقی^۴ (ANFIS) انجام شد. در این مدل، فاصله از محل انفجار تا ایستگاه‌های نظارتی و حداکثر وزن بار در هر تأخیر به عنوان پارامترهای ورودی مدل ساخته شده انتخاب شدند، پارامتر خروجی اوج مؤلفه حداکثر مؤلفه سرعت ذره^۵ (PPV) به عنوان

¹ Xue

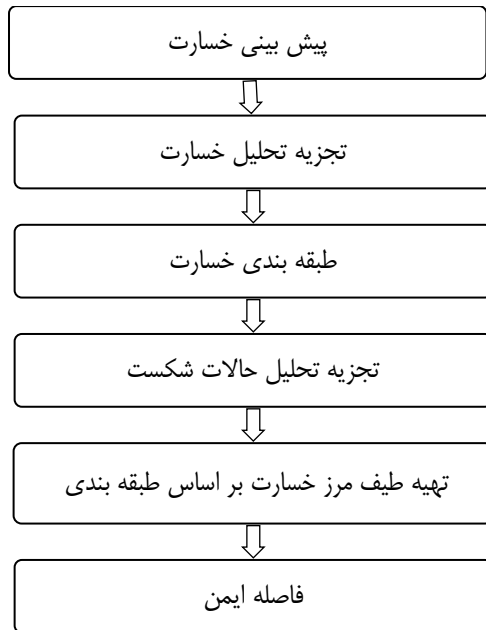
² Wang

³ Zhang, Kefan

⁴ Adaptive network-based fuzzy inference system

⁵ Peak particle velocity

شدید، مکانیسم آسیب و ویژگی‌های سد تحت بارهای ضربه انفجار و همچنین ارزیابی وضعیت سد پس از بارهای شدید بررسی‌های انجام دادند. آن‌ها دریافتند موقعیت تاج سد بخش ضعیف سد در مقابل انفجار است. به‌طور کلی انفجار در محل تاج بیشترین آسیب را در بدنه سد دارد. در شکل (۱) به فرایند کلی تحقیق جهت تعیین فاصله ایمن پرداخته شده است.



شکل (۱): فلوجارت روند پژوهش جهت تعیین فاصله ایمن

۲- شبیه سازی عددی

۲-۱- مدل ماده بتن

تحت بارگذاری انفجار، پاسخ بتن یک فرایند پیچیده است که در این مقاله برای بتن بدنه سد از مدل سازنده HJC در نرم افزار LS-DYNA استفاده شده است. این مدل را می‌توان برای بتن‌های که برای بتن‌های که تحت فشار زیاد می‌باشند استفاده کرد. مقاومت معادل به‌عنوان تابعی از فشار، میزان کشش و آسیب بیان می‌شود. فشار به‌عنوان تابعی از فشار حجمی بیان می‌شود و شامل اثر خرد شدن دائمی است. این آسیب به‌عنوان تابعی از کرنش حجمی پلاستیک، کرنش پلاستیکی معادل و فشار جمع می‌شود [۱۲]. بسیاری از مدل‌های ماده بتنی با مشاهده شبیه‌سازی ضربه برای مشاهده پاسخ شکستگی مدل‌های مواد سیمانی به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بتن آرمه باید به‌طور گسترده‌تری مورد مطالعه قرار گیرد زیرا کمی‌سازی میلگرد تعبیه‌شده به یک شبیه‌سازی، گاهی اوقات دشوار است [۱۲]. در

شاخص ارتعاش است. نتایج نشان داد که مدل ANFIS مرتبط با مدل تجربی یک تکنیک قابل‌اعتماد و مناسب برای پیش‌بینی مؤلفه حداکثر سرعت ذره ناشی از انفجار است.

کلاته و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۷] به تجزیه و تحلیل شکست دینامیکی سدهای بتنی تحت انفجار هوا با استفاده از هیدروکدهای اویلری-لاگرانژی روش المان محدود پرداختند. همچنین مطالعه پارامتری برای ارزیابی اثرات بارگذاری انفجار هوا بر پاسخ سیستم‌های سد بتنی و آنالیزها برای ارتفاعات مختلف سد و مقادیر مختلف فاصله بار از مرکز باربری انجام شده است. نتایج عددی نشان داد سدهای بتنی قوسی نسبت به سدهای بتنی وزنی نسبت به بارگذاری انفجار هوا آسیب پذیرتر هستند و مخزن سد در کاهش در پاسخ سدهای بتنی تأثیر دارد، همچنین حفره صوتی جابجایی تاج سدهای بتنی را شدت می‌بخشد.

مارک لیدینگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۸] کنترل ایمنی سازه‌های در معرض انفجار را بررسی کردند و در عمل ثابت شد که ارتعاش ناشی از انفجار به شدت به فاصله و بار انفجاری مرتبط است. همچنین فرکانس PPV با افزایش فاصله از انفجار کاهش می‌یابد.

در خصوص مدل‌سازی ماده منفجره طباطبایی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ [۹] توانستند مقایسه‌ای بین روش‌های MM-ALE^۲ و LBE^۳ انجام دهند. لازم به توضیح است که این سه روش، روش‌های مدل‌سازی انتشار موج انفجار بروی دال بتنی می‌باشد. آن‌ها در نهایت روش MM-ALE را بهتر از دو روش دیگر به لحاظ استخراج نتایج ارزیابی کردند، اما مقایسه با روابط تحلیلی و یا آزمایش انجام نشده است.

در سال ۲۰۱۳ چنگ^۴ و همکارانش [۱۰] موج انفجار را در هوا شبیه‌سازی عددی نمودند. آن‌ها از نرم‌افزار LS-DYNA و روش ALE برای شبیه‌سازی خود استفاده نمودند. در واقع آن‌ها موج انفجار را تحلیل نمودند. زمانی که انتقال موج انفجار صورت می‌گیرد بهترین روش پیشنهادی LBE می‌باشد و نیازی به روش ALE نیست. در پایان به بررسی معایب و مزایای روش‌های مورد استفاده پرداختند.

مندومومی^۵ و همکاران در سال ۲۰۲۲ [۱۱] در مورد واکنش دینامیکی و مکانیسم شکست سدهای قوسی بتنی تحت بارگذاری

¹ Mark Leidig

² Multi-Material Arbitrary Lagrangian

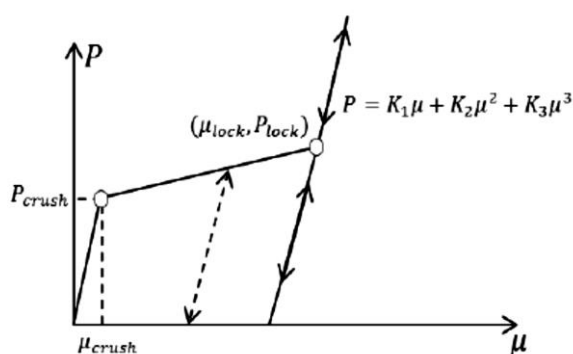
³ Load Blast Enhanced

⁴ Cheng, D.-S

⁵ Mendomo Meye

شروع خرد شدن بتن به منطقه بسته آن اتفاق می‌افتد. این بخش منطقه انتقالی است که مربوط به خاصیت پلاستیکی بتن است و یک مسیر تخلیه شده ایجاد می‌کند که از مناطق مجاور درون‌یابی می‌شود. منطقه سوم از نقطه مربوط شروع می‌شود (μ_{lock} ، P_{lock}) و با ماده‌ای کاملاً متراکم همراه است (حفره‌های هوا در مواد کاملاً فشرده شده‌اند). سه منطقه مجزا که فشار هیدرو استاتیک و رابطه حجمی را برای HJC نشان می‌دهند به صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. کرنش حجمی نیز به عنوان تابعی از چگالی جریان (ρ) و چگالی مرجع (ρ_0) تعریف می‌شود. معادله کرنش حجمی در رابطه (۵) آورده شده است. برای مدل ماده بتن مشخصات مهم جدول (۱) را منظور می‌کنیم.

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (5)$$



شکل (۲): فشار هیدرواستاتیک HJC و رابطه فشار حجمی [۱۳]

فرمول بندی برای منطقه بسته مکعبی الاستیک و خطی به ترتیب در معادله (۷۰۶) آورده شده است. منطقه الاستیک و خردکننده روابط خطی مشابهی دارند در حالی که منطقه بسته شده یک رابطه غیرخطی بین فشار هیدرواستاتیک و فشار حجمی را ایجاد می‌کند.

جدول (۱): پارامترهای مدل ماده بتن

مقدار	واحد	مشخصات مصالح
۲۴۰۰	کیلوگرم بر مترمکعب	چگالی
۱۲۵۳۰	گیگا پاسکال	مدول الاستیسیته
۰,۲۲۳	-	نسبت پواسون
۳۰	مگاپاسکال	مقاومت فشاری
۱۳,۶	مگاپاسکال	فشار خردشدگی
۰,۰۰۰۰۵۸	-	کرنش حجمی خردشدگی
۲,۴۱	مگاپاسکال	مقاومت کششی

$$P = K_e \mu \quad (6)$$

مدل ماده فوق برای تعیین استحکام و تنش معادل نرمال به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\sigma \ll \frac{\sigma}{f_c} \quad (1)$$

که در آن σ تنش معادل واقعی است و f_c مقاومت فشاری تک‌محوره شبه استاتیک است. این عبارت به صورت زیر وابسته به فشار و سرعت کرنش تعریف می‌شود:

$$\sigma = (A(1-D) + BP^N)(1 + C \ln(\epsilon)) \quad (2)$$

در معادله (۲) عنوان شده است که در صورتی که یک ماده فشارهای محدودکننده بیشتری را تجربه کرده و نرخ کرنش را افزایش می‌دهد، مقاومت محصول نیز افزایش می‌یابد. ثابت‌های مواد A، ضریب مقاومت منسجم B ضریب فشار، C ضریب سرعت کرنش و N با انطباق مدل با داده‌های تجربی تعیین می‌شوند. پارامتر D یک متغیر آسیب اسکالر است که در بخش زیر با جزئیات بیشتر شرح داده شده است، جایی که آسیب می‌تواند مقداری از ۰ تا ۱ را در برگیرد و مربوط به وضعیت آسیب یک ماده است. وقتی $D=0$ ، ماده آسیب نمی‌بیند و مقاومت آن با مقاومت ماده مطابقت دارد کاملاً سالم در حالی که $D=1$ ، ماده آسیب دیده و مقاومت آن با مقاومت ماده در حالت کاملاً شکسته مطابقت دارد که فقط حداقل مقاومت برشی محدود را حفظ می‌کند. فشار نرمالیزه به صورت فشار تقسیم شده توسط غیر محدود ارائه می‌شود. متغیرهای خرابی جمع می‌شوند و می‌توانند با تجمع کرنش پلاستیکی حجمی $\Delta\mu_{pl}$ و کرنش پلاستیکی معادل آن $\Delta\epsilon_{pl}$ که ناشی از تراکم حجمی و تغییر شکل - شکستگی است، به ترتیب تعریف شوند. خسارت با تقسیم جمع کرنش حجمی پلاستیک و کرنش پلاستیکی معادل آن توسط کرنش پلاستیکی برای شکستگی در فشار ثابت محاسبه می‌شود. معادله تجمعی آسیب و کرنش پلاستیکی به شکستگی توسط معادله های (۴ و ۳) آورده شده است. [۱۳]

$$D = \sum \frac{\Delta\epsilon_{pl} + \Delta\mu_{pl}}{\epsilon_f} \quad (3)$$

$$\epsilon_f = D1(P^* + T^*)^{D2} \quad (4)$$

پاسخ فشار هیدرواستاتیک ماده به فشار حجمی توسط هولموکوست به عنوان سه منطقه مجزا در فشرده‌سازی توصیف شده است. منطقه اول یک بخش خطی است که توسط خواص الاستیک مواد از صفر تا مقدار خرد شده از پیش تعیین شده برای فشار و کرنش حجمی حاصل از داده‌های تجربی تعریف می‌شود. هرگونه تغییر شکل به دست آمده در این منطقه قابل باز یابی است، زیرا همه کشش دارد. منطقه دوم از مقادیر خردشدگی فشار و کرنش حجمی (P_{crush} ، μ_{crush}) شروع می‌شود که از زمان

و برای مواد منبسط شده به شکل زیر است.

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)E. \quad (9)$$

در حالی که فشار آب در حالت انبساط می باشد.

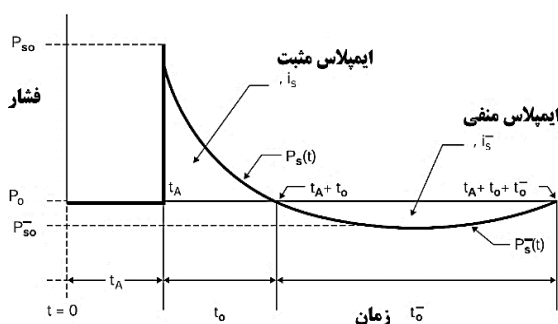
جدول (۳): پارامترهای مدل ماده آب

مقدار	مشخصات مصالح
۰	E0
۰	A
۰.۵	GAMMA0
۰.۷	S3
۰.۳۳	S2
۱۴۲	S1
۱۴۸۰	C
۱۰۰۰	RO

C, Si, GAMMA0 ثابت ها در معادله حالت و ضریب تصحیح حجم، E0 انرژی داخلی اولیه، V0 حجم نسبی اولیه معادله Gruneisen حالت با بیشینه سرعت مکعبی به عنوان تابعی از ذرات است.

۲-۴- مدل ماده مواد منفجره

در خصوص انفجارهای شامل واکنش های شیمیایی را می توان باتوجه به میزان واکنش آنها به دو گروه اصلی طبقه بندی کرد: تخلیه و انفجار. انفجار سریع یک واکنش اکسیداسیون است که با سرعت کمتر از سرعت صدا منتشر می شود. در یک انفجار، معمولاً چند برابر سریع تر از سرعت صوت جبهه واکنش به صورت کاملاً خاص پخش می شود. همان طور که در شکل (۳) دیده می شود این موج انفجار به عنوان یک موج ضربه شناخته می شود و دارای افزایش فوری فشار است. از آنجایی که فشار ارتباط نزدیکی با میزان واکنش دارد، فشارهای انفجاری معمولاً چندین برابر فشارهای تخلیه هوا هستند. انفجار ماده منفجره یک واکنش شیمیایی گرمازا است که معمولاً شامل یک اکسیدکننده و یک سوخت است.



شکل (۳): نمودار تاریخچه انفجار در هوا [14]

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \quad (7)$$

تغییرات مختلف K در معادله قبلی، همه ثابت مواد هستند

که به مدول حجم مربوط می شوند (Ke).

۲-۲- مدل ماده سنگ بستر

نرم افزار LS-DYNA در نسخه ۹،۷۱ قبل از برآوردن یک معیار مشخص برای خرابی، مواد را دارای کشش خطی می داند. پس از رسیدن به حداکثر مقاومت، تا زمانی که مواد کاملاً خراب نشود، خسارت مواد جمع خواهد شد و سپس، ماده حالت باقیمانده را حفظ می کند. ماده MAT_DRUCKER_PRAGER امکان مدل سازی مؤثر خاک و سنگ را فراهم می کند. پارامترهای مورد استفاده برای تعریف سطح عملکرد پارامترهای ژئوتکنیکی آشنایی هستند (به عنوان مثال زاویه اصطکاک). سطح عملکرد اصلاح شده دراکر-پراگر در این مدل ماده به کار رفته است که باعث می شود شکل سطح به تعریف واقعی تری برای سنگ تبدیل شود.

جدول (۲): پارامترهای مدل ماده سنگ بستر

مقدار	مشخصات مصالح
۰.۰۰۵	STR-LIM
۰	PSI
۰.۷۶۶	CVAK
۰.۴۵	PHI
۱	RKF
۰.۳	RNU
۱۴۰۰۶	GMOD
۲۶۰۰	RO

۲-۳- مدل ماده آب

EOS¹_Gruneisen برای محاسبه مشخصه داخلی آب معرفی شده است، و شکل آن با توجه به وضعیت آب تعیین می شود. EOS_Gruneisen با سرعت شوک مکعبی سرعت ذره را تعریف می کند. [۱۲] فشار برای مواد فشرده به معادله زیر تعریف می شود.

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu + (1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})) \mu \frac{a}{2} \mu^2}{(1 - (s_1 - 1) \mu - s_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - s_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2})^2} + (\gamma_0 + a\mu)E. \quad (8)$$

¹ Equation of state

می‌گیرد، به علت اینکه انرژی بسیار زیاد آزاد می‌شود مش‌های مدلسازی دچار خرابی و پارگی می‌شود لذا استفاده از این روش این امکان را به ما می‌دهد که بدون خرابی و پارگی مش‌های مدل اثر انفجار بر روی سد به‌طور واقعی قابل مشاهده باشد. سد کارون ۴ بلندترین سد قوسی کشور مدلسازی می‌شود. هدف از اجرای طرح کارون ۴ تولید انرژی برق آبی به میزان ۲۱۰۷ گیگاوات ساعت در سال و کنترل سیلاب‌های رودخانه کارون می‌باشد که با قرارگیری در زنجیره سدهای پیاپی کارون به حجم قابل ذخیره آورد رودخانه کارون جهت استفاده در مصارف کشاورزی در دشت خوزستان کمک می‌نماید. سد کارون ۴ بلندترین سد کشور محسوب می‌گردد که در بالادست مجموعه سدهای زنجیره‌ای احداث شده بر روی رودخانه کارون قرار گرفته است. این سد از نوع بتنی قوسی است. دره ساختگاه سد، یک دره ۷ شکل نامتقارن است [۱۶]. مشخصات سد بتنی فوق مطابق جدول (۵) است. شرایط مرزی سد در محل تکیه‌گاه سد (محل قرارگیری بر روی بستر سنگی) به صورت non-reflect می‌باشد و در تمامی جهات مقید شده است. همچنین کف مدل صلب و در همه جهات گیردار فرض شده است.

جدول (۵): مشخصات سد و مصالح کارون ۴

مقدار	مشخصات مصالح
۲۲۲	ارتفاع از پی (متر)
۴۴۰	طول تاج (متر)
۷	عرض تاج (متر)
۱۶۵۰	حجم بدنه سد (هزار مترمکعبی)
۲۲۳۲	حجم کل مخزن (میلیون مترمکعب)
۸۲۷	حجم مفید مخزن (میلیون مترمکعب)
۱۰	مدول الاستیسیته دینامیکی سنگ پی (گیگا پاسکال)
۲۴	مدول الاستیسیته استاتیکی (گیگا پاسکال)
۳۰	مدول الاستیسیته استاتیکی (گیگا پاسکال)
۰.۲	ضریب پواسون
۲۴۰۰	چگالی (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)
۰.۳	ضریب پواسون سنگ پی (گیگا پاسکال)
۲۶۰۰	چگالی سنگ (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)
۱۰۰۰	چگالی آب (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)

در شبیه‌سازی انجام شده، باتوجه به اینکه نقطه پیک فشار در انفجار بسیار حائز اهمیت می‌باشد که در این مقاله سعی بر این بوده است که نقاط پیک فشار هم از نظر مقدار و هم از نظر زمانی بر روی یکدیگر تطابق مناسبی داشته باشند. مقدار فشار به دست آمده از المان مذکور در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است نمودار در ابتدا به صورت افقی و مستقیم می‌باشد و شیب آن افزایش می‌یابد تا در زمان ۴

سرعت واکنش به خصوصیات شیمیایی و فیزیکی ماده انرژی‌زا، نسبت واکنش دهنده‌ها و همگنی، هندسه ماده، مشخصات "خرج" که ماده در آن قرار دارد، روش و انرژی شروع و سایر شرایط اولیه بستگی دارد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، پس از وقوع انفجار، در زمان بسیار کوتاهی فشار اتمسفر به Ps_0 می‌رسد و بعد از آن فشار کاهش می‌یابد و Pst فشار وارد فاز منفی یا مکش می‌شود.

در این مطالعه، انرژی TNT با مدل مواد منفجره و معادله حالت (JWL) مدلسازی شد. معادله حالت JWL فشار را با معادله ۱۰ تعریف کرد.

$$P = A \left[1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (10)$$

جایی که P فشار است، A، B، ω ضریب معادله، V حجم نسبی اولیه و E حجم نسبی اولیه است. جدول (۴) پارامترهای مورد استفاده در مدل شارژ TNT را نشان می‌دهد.

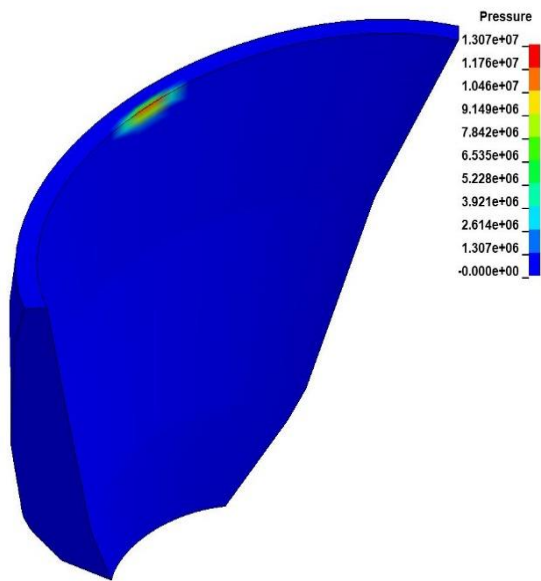
جدول (۴): مشخصات مدل ماده مواد منفجره

مقدار	مشخصات مصالح
۳.۲۳	$B(GPa)$
۳۷۴	$A(GPa)$
۲۱	$P_{C_1}(GPa)$
۶۹۳۰	$V_D \left(\frac{m}{s} \right)$
۱.۶۳	$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$
6×10^{-9}	$E_0 \left(\frac{J}{m^3} \right)$
۱	V
۰.۳۸	ω
۰.۹۵	R2
۴.۱۵	R1

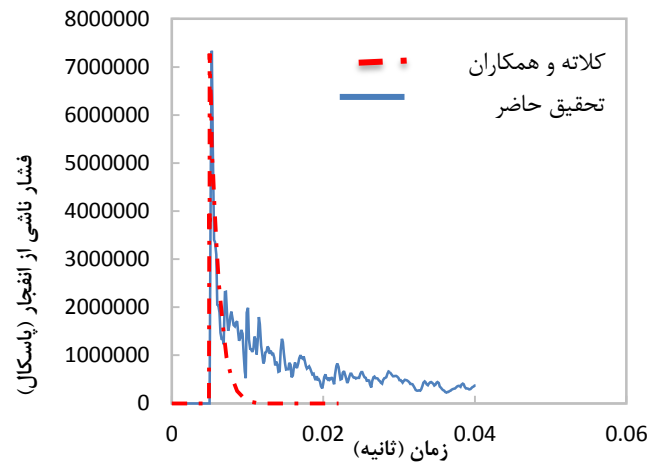
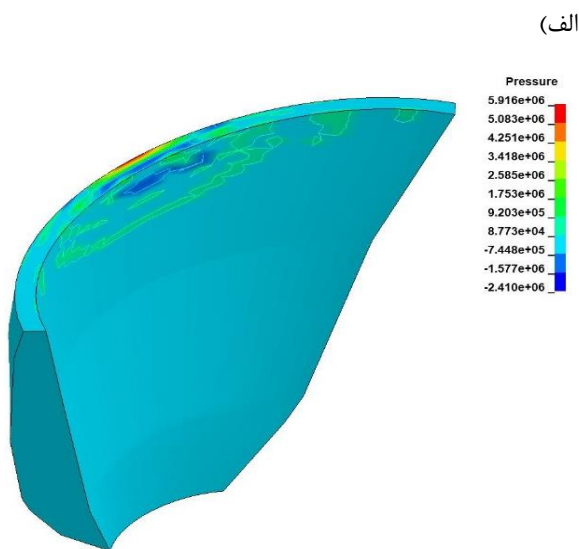
۳- صحت سنجی

۳-۱- صحت سنجی شبیه‌سازی سد کارون ۴

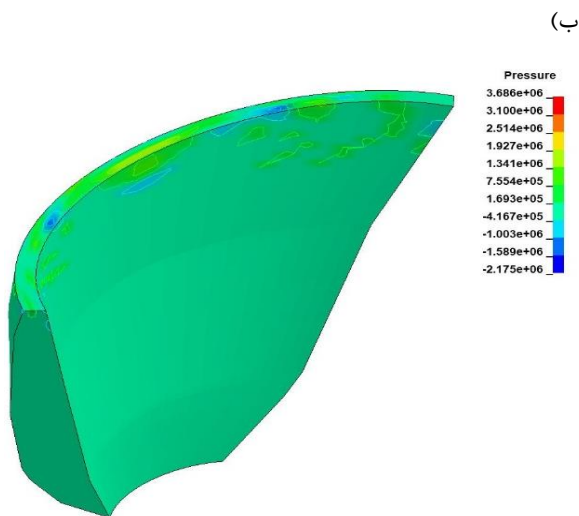
جهت راستی آزمایی در مقاله حاضر در ابتدا مقایسه‌ای بین مدل‌سازی عددی این مقاله با مدل‌سازی کلاته [۱۵] در سال ۱۳۹۷ صورت می‌دهیم. برای شبیه‌سازی و تحلیل سد قوسی تحت بار انفجار در این مطالعه از مدلسازی اجزاء محدود در نرم‌افزار LS-DYNA استفاده شده است. روش LBE از روش‌های بر پایه روش لاگرانژی است که از دیگر نوآوری این تحقیق می‌باشد. از مزیت‌های مهم این روش می‌توان به این مطلب اشاره نمود که زمان رخداد انفجار، زمانی که سازه تحت بار انفجار قرار



میلی ثانیه به پیک خود می‌رسد، و پس شروع روند کاهشی همسان با نمودار مدل صحت سنجی پس از طی گذشت ۲ میلی ثانیه تا ۴ میلی ثانیه کم کم به صفر نزدیک می‌شود. همچنین مشخص گردید، مقدار فشار بیشینه شبیه سازی در مدل برابر ۷,۳۳ مگاپاسکال شده است و پیک فشار هیدرودینامیکی مقاله مربوط به صحت سنجی با تقریباً اختلاف ۰.۲٪ همراه بوده است و برابر با ۷,۳۲ مگا پاسکال می‌باشد. همان طور که در شکل ۴ کاملاً مشخص است این میزان خطا بیانگر این موضوع است که نتایج حاصل از مدل سازی عددی بسیار نزدیک به مدل مقاله مدل صحت سنجی می‌باشد و مدل سد از صحت برخوردار است. همچنین شکل ۵ نیز مقدار و روند انتشار فشار و نواحی تحت فشار و کشش را برای زمان های مختلف در ۱/۸، ۴، ۱۰ و ۱۵ میلی ثانیه را تحت بار دیگری با وزن خرج ۱۵۰۰ کیلوگرم و فاصله ۵ متری از تاج نشان می‌دهد.



شکل (۴): مقایسه منحنی فشار برحسب زمان مدل مقاله و مدل مقاله صحت سنجی



مؤثر در تولید لرزش است. رابطه بین لرزش و خرج در هر تأخیر از نوع نمایی است:

$$V \approx Q^a \quad (11)$$

که در آن Q حداکثر خرج منفجرشده در هر تأخیر برحسب کیلوگرم V سرعت ذره برحسب متر در ثانیه و a ضریب ثابت که مقدار پیشنهادی اولیه آن حدود ۰/۸ است. همچنین فاصله از محل انفجار نیز مانند حداکثر خرج در هر تأخیر تأثیر زیادی بر روی لرزش دارد. رابطه فاصله و سرعت ذره به صورت معکوس است و با افزایش فاصله، سرعت ذره کاهش می‌یابد. براین اساس، رابطه فاصله و سرعت ذره به صورت زیر ارائه شده است:

$$V \approx \frac{1}{(D_s)^b} \quad (12)$$

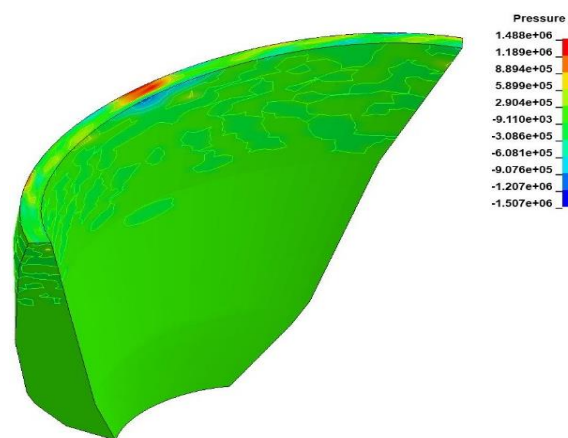
که در آن D_s فاصله از محل انفجار برحسب متر، V سرعت ذره برحسب متر در ثانیه و b ضریب ثابت که مقدار پیشنهادی اولیه آن حدود ۰/۶ است. همچنین به‌طور گسترده‌ای پذیرفته شده است حداکثر سرعت ذرات مناسب‌ترین و دقیق‌ترین معیار ارتعاش ناشی از انفجار و آسیب احتمالی است [۸، ۲۱]. جهت به دست آوردن حداکثر اجزای سرعت با فاصله مقیاس پذیر SR متفاوت می‌توان توسط معادله ۱۰ مقیاس مناسب جهت ترسیم نمودار استفاده نمود.

$$SR = D \times Q^{\frac{1}{E}} \quad (13)$$

Q وزن خرج، D فاصله از محل انفجار و E بسته به ابعاد بار و فاصله تا انفجار در ۲ یا ۳ است. وقتی نسبت طول بار به قطر کمتر از ۶ باشد، ریشه مکعب وزن ممکن است مناسب‌تر باشد زیرا دارای ملاحظات انرژی است همچنین نشان داد که مقیاس گذاری ریشه مکعب ممکن است سرعت پیش‌بینی شده دقیق‌تری را برای انفجار را فراهم می‌کند [۲۲]. انفجار دامنه موج لرزه‌ای به‌عنوان حداکثر فاصله‌ای که ذره در حول موقعیت تعادل خود نوسان می‌کند تعریف می‌شود. دامنه موج به صورت سرعت ذره که سرعت نوسان ذره حول نقطه تعادل خود است نشان داده می‌شود. رفتار سنجی لرزه‌ای عموماً به صورت سه مؤلفه‌ای انجام می‌شود. بنابراین دامنه شتاب، سرعت و جابجایی ذره با حالت تک مؤلفه‌ای تفاوت خواهد داشت. در این شرایط از حاصل جمع برداری دامنه‌ها یا حداکثر دامنه ذره استفاده می‌شود. در حالت سه مؤلفه‌ای، لرزه دریافت شده در یک نقطه در سه جهت مختلف (عمود بر هم) ثبت می‌شود. بنابراین به صورت سه سیگنال لرزه تک مؤلفه یا تک‌محوری مشخص می‌شوند. به‌منظور محاسبه دامنه برآیند سیگنال سه مؤلفه‌ای از عملگر جمع برداری استفاده می‌شود:

$$V_{sum}(t) = \sqrt{A_x(t)^2 + A_y(t)^2 + A_z(t)^2} \quad (14)$$

(ج)



(د)

شکل (۵): انتشار موج فشار در زمان‌های مختلف: تصاویر (الف) $t = 1.8$ ms؛ (ب) $t = 4$ ms؛ (ج) $t = 10$ ms؛ (د) $t = 18$ ms

۴- ارزیابی خسارت سد در معرض انفجار

۴-۱- راه‌های ارزیابی خسارت انفجار

عموماً اعتقاد بر این است که آسیب‌های ناشی از انفجار را می‌توان با خواص لرزش اندازه‌گرفت همچنین در مطالعات گذشته ثابت شده است که لرزش ناشی از انفجار کاملاً با فاصله و بار انفجاری ارتباط دارد [۸، ۱۷]. در انفجار در هوا لرزش هوا نیز مانند لرزش زمین به عوامل مختلفی بستگی دارد که بعضی قابل کنترل و بعضی غیرقابل کنترل هستند. تأثیر این عوامل بر روی لرزش هوا در بعضی موارد مشابه لرزش زمین و در بعضی حالات دیگر به صورت معکوس است. میزان و شدت لرزش زمین و هوا در یک نقطه معین با میزان خرج منفجر شده رابطه مستقیم دارد. همچنین سرعت ذرات اوج (PPV) شاخص مؤثر می‌باشد که برای توصیف وضعیت خسارت یک سازه استفاده می‌شود [۱۸، ۱۹]. با این حال مطالعات نشان داده که عامل سرعت ذرات اوج (PPV) به تنهای نشان دهنده میزان خسارت نیست و تخریب سازه‌ها در زیر انفجارها ارتباط نزدیکی با فرکانس لرزش دارد [۲۰].

در انفجارهایی که از چاشنی‌هایی با زمان‌های تأخیر متفاوت استفاده می‌شود، حداکثر خرج در هر تأخیر، بیشترین تأثیر را بر روی شدت لرزش دارد و کل خرج مصرفی در انفجار در نظر گرفته نمی‌شود. برای تعیین وزن خرج در هر تأخیر، قسمتی از خرج کلی که به‌وسیله چاشنی‌ها در یک زمان تأخیر منفجر شود را در نظر می‌گیرند. حداکثر خرج در هر تأخیر، مهم‌ترین عامل

که در آن MFi نشان دهنده میانگین فرکانس یک جزء سرعت واحد است، و به ترتیب x ، y و z را نشان دهند اجزای سرعت افقی، عمودی و عرضی هر جز سرعت است. An دامنه در طیف دامنه - فرکانس و فرکانس مربوط به آن f_n می باشد.

۴-۲- رفتارسنجی انفجار میدان نزدیک

رفتار سنجی لرزش ناشی از انفجار، یکی از روش های مناسب به منظور ارزیابی اثرات انفجار بر محیط اطراف است. دو نوع رفتار سنجی لرزش ناشی از انفجار تعریف شده که شامل میدان دور (دور از نقطه انفجار) و میدان نزدیک است. در میدان نزدیک به دلیل فاصله کم تا منبع لرزه، مقدار انرژی، دامنه و فرکانس امواج بالا است. هر قدر انفجار بزرگ تر باشد منطقه میدان نزدیک گسترش پیدا خواهد کرد. برای میدان نزدیک فاصله مقیاس شده بین ۰٫۵ تا ۲ است [۲۰] که در مطالعه حاضر همه انفجارها مشمول حالت میدان نزدیک می شود. رفتار سنجی میدان نزدیک برای اندازه گیری سطوح لرزش خالص برای درجه بندی منحنی های برآورد دامنه یا ارزیابی و کنترل خسارت ناشی از انفجار انجام می شود.

جدول (۶): ناحیه بندی انواع انفجار بر اساس مقیاس [۲۰].

فاصله مقیاس شده*	ناحیه
$0.5 <$	میدان خیلی نزدیک
$0.5-2$	میدان نزدیک
$2-10/1$	میدان متوسط
$>10/1$	میدان دور

* نسبت فاصله از نقطه انفجار بر حسب متر به ریشه دوم حداکثر خرج منفجر شده در یک تاخیر بر حسب کیلوگرم

۴-۳- تعیین آسیب پذیرترین محل سد بتنی

مقدار آسیب موضعی بر اساس کرنش پلاستیک مؤثر سد دو قوسی بتنی در معرض انفجار در هوا در شکل ۷ نشان داده شده است. مقدار کانتور بین ۰ تا ۲ است که مقدار در بازه ۱ تا ۲ بیانگر میزان خسارت بتن سد است. از محدوده دست نخورده تا کاملاً آسیب دیده سد در اثر انفجار در هنگام لغزش و فروریختن یک بخش سد کامل در هنگام شکاف نافذ به دلیل انفجار در هوا، تشکیل شده است. بنابراین، تجزیه و تحلیل آسیب سد دو قوسی بتنی بر اثر انفجار در هوا، بر اساس نمای بالادست، پایین دست و نمای جانبی مدل سد برای قضاوت در مورد میزان نفوذ ترک ها، عمق تخریب و دسته بندی خسارت به سه حالت تخریب جزئی، متوسط و شدید است. همچنین مشخص گردید بیشترین مقدار تخریب در تاج سد رخ می دهد.

که در آن V_{sum} دامنه لرزش ثبت شده در لحظه t و Ax ، Ay و Az دامنه لرزش ثبت شده به ترتیب در طول محور x ، y و z است. دامنه های ذکر شده در رابطه ۱ را می توان در واحدهای شتاب، سرعت و جابه جایی ذره عنوان کرد. حداکثر مقدار دامنه برآیند به عنوان حداکثر دامنه ذره انفجار نامیده می شود و مقدار خالص دامنه حداکثر را ارائه می دهد. بر اساس لرزه نگاشت ثبت شده، حداکثر دامنه ذره به صورت حداکثر شتاب ذره، حداکثر سرعت ذره و حداکثر جابه جایی ذره بیان می شود [۲۰]. پس در مقایسه با بزرگ ترین مقدار اجزای عمودی، شعاعی و عرضی یک جمع برداری واقعی اندازه گیری دقیق تری از سرعت ذرات را در هر یک فراهم می کند و از رابطه زیر نتایج شکل موج جمع شده جمع می شود [۸، ۲۰، ۲۱].

$$PVS_{max}(t) = \text{Max} \sqrt{Vx(t)^2 + Vy(t)^2 + Vz(t)^2} \quad (15)$$

فرکانس، یک ویژگی بسیار مهم هر رویداد لرزشی است. فرکانس یک موج هارمونیک ساده به صورت تعداد نوسان در یک ثانیه تعریف می شود. زمان تناوب یک موج نیز پارامتر مهمی است که به صورت عکس فرکانس و به عنوان مدت زمان یک سیکل یا نوسان تعریف می شود. امواج حاصل از انفجار به صورت ترکیب پیچیده ای از امواج سینوسی هستند که هر کدام از آنها دارای یک فرکانس است؛ بنابراین امواج ناشی از انفجار دارای فرکانس های مختلفی هستند. تبدیل فوریه سریع (FFT) یکی از مهم ترین الگوریتم های مورداستفاده در پردازش سیگنال و آنالیز داده است. در این مطالعه، اطلاعات فرکانس سیگنال های ارتعاش به وسیله تبدیل فوریه سریع برای به دست آوردن فرکانس ارتعاشات استفاده شده است. در طیف فرکانس موج لرزشی، فرکانسی که بالاترین محتوای انرژی را داشته باشد به عنوان فرکانس غالب معرفی می شود. این فرکانس غالب در تحلیل های تأثیر لرزش بر سازه ها مورداستفاده قرار می گیرد. مفهوم فرکانس در تحلیل لرزش های ناشی از انفجار به اندازه دامنه مهم است. دامنه به تنهایی فقط شدت یک سیگنال را مشخص می کند و بدون در نظر گرفتن فرکانس، انرژی واقعی حمل شده به وسیله این سیگنال قابل ارزیابی نیست [۲۰]. با این حال مطالعات تجربی انجام شده توسط ژیان یانگ کیو و همکاران نشان می دهد متوسط فرکانس پاسخ های قابل اعتماد تر و دقیق تری را به ما می دهد که با توجه به مطالعات موجود در این مطالعه نشان دهنده درستی این موضوع است [۲۱].

$$\begin{cases} MF_i = \frac{\sum_{n=1}^m A_{in} f_{in}}{\sum_{n=1}^m A_{in}} \\ MF = \sum \frac{MF_i}{3} \end{cases} \quad (16)$$

¹ Fast Fourier Transform

بدلیل حداکثر درجه خسارت و به عنوان ضعیف ترین پیوند سد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۴ - طبقه بندی مقدار خسارت

مشخص است که آسیب سد، ناشی از انفجار تا حدودی با PPV ارتباط دارد. به طور کلی، معیارها و استانداردهای لرزش موجود به منظور اندازه گیری خسارات وارد به سازه‌ها در اثر لرزش انفجار در نشریه ۶۱۶ آمده است و در منابع دیگر نیز اکثراً از معیار PPV استفاده می‌شود که در جدول (۷) آورده شده است. براین اساس، استانداردها و معیارهایی بر پایه PPV ارائه شده است؛ بنابراین، با توجه به اهمیت تأثیر فرکانس بر خسارات ناشی از لرزش انفجار میدان نزدیک، استانداردهایی بر پایه PPV و فرکانس ارائه شده‌اند. رده بندی خسارت بر اساس PPV می‌تواند به سه دسته تقسیم کرد. بدین ترتیب PPV سد بتنی ۰/۱۵ متر بر ثانیه مرز بین آسیب جزئی و متوسط، حداکثر سرعت ذرات ۰/۲۲ متر بر ثانیه برای مرز بین آسیب متوسط و خسارت شدید مقرر می‌گردد. با این وجود این معیار کاملاً دقیق نیست و بررسی دقیق نحوه تأثیر امواج لرزه‌ای و ایجاد خسارت آنها بر سازه‌ها و موارد دریافت کننده لرزش مختلف، نشان می‌دهد که عوامل دیگری مانند فرکانس، طول موج، طول مدت لرزش و نظایر آن نیز اهمیت زیادی دارند. بر این اساس، ارائه معیار خسارت بر اساس یک عامل حداکثر سرعت ذره در همه موارد کار آیی ندارد در این پژوهش، شبیه سازی‌های عددی با پارامترهای مختلف انفجار، از نظر وزن بار، فاصله از سد بتنی و ارتفاع خرج انفجار از کف، برای ارزیابی پاسخ‌های دینامیکی ساختاری در شرایط مختلف انفجار که منجر به حالت‌های مختلف آسیب می‌شود انجام شد.

جدول (۷): رده بندی خسارت بر اساس حداکثر سرعت ذرات [۲۰].

میزان خسارت	سرعت ذره
بدون خسارت	۵۰ میلی ثانیه <
ترک‌های ریز	۱۰۰ میلی ثانیه
ایجاد شکاف	۱۵۰ میلی ثانیه
شکاف‌های بزرگ	۲۲۰ میلی ثانیه

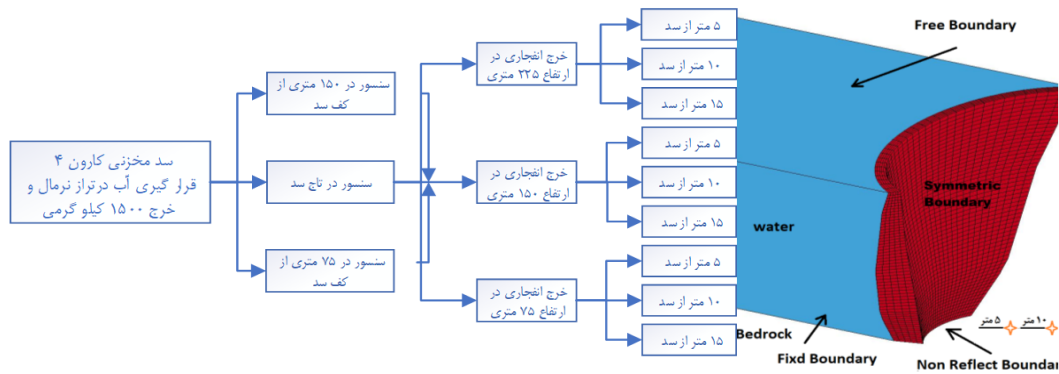
بر اساس طبقه بندی آسیب پذیری و خسارت در سدهای بتنی دو قوسی که در معرض انفجار حوزه میدان نزدیک قرار دارد، در شکل (۹) و جدول (۸) برخی از نتایج دسته بندی خسارت برای سدهای دو قوسی نشان داده شده است. در این مطالعه با مدل سازی در دو حالت به شرح ذیل به آنالیز PPV پرداخته شده است. در شکل (۹) و جدول (۸) حالت اول ارتفاع انفجار ۲۲۵ متر ثابت از روی سطح زمین، وزن بار از ۳۰۰ کیلوگرم با هر بار افزایش ۳۰۰ کیلوگرم در هر مرحله تا ۱۵۰۰ کیلوگرم و فاصله از سد بتنی از ۵ متر به ۲۵ متر افزایش می‌یابد را بر اساس سه

برای بررسی پاسخ‌های دینامیکی ساختاری سد در معرض انفجار، به بررسی مطالعات انجام شده بر روی سدهای قوسی پرداخته شده است. جهت بررسی آسیب پذیرترین محل سد بتنی سه مختصات مبنا در ارتفاع‌های ۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۵ متری از پای کنسول سد مشخص شده است و سپس المان مورد ارزیابی را جهت بررسی خواص ارتعاش در بدنه سد و در همان ارتفاع در نظر گرفته شده است. پس از آن خرج انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرمی را نیز در همان ارتفاع و فواصل مختلف به ترتیب ۵، ۱۰، ۱۵ متر در فاصله عرضی از سد قرار داده شده است. مطابق با شکل ۶ مشخصات شرایط مرزی و مدل‌های مورد استفاده در مقاله در مقابل موج انفجار با حداکثر سرعت ذرات نشان داده شده است. در شکل ۸ نمودارهای حداکثر سرعت در فاصله مقیاس شده به ما نشان می‌دهد، در فاصله عرضی ۵ متری از سد مقدارهای حداکثر سرعت در ارتفاع ۲۲۵ متری نسبت به ارتفاع ۱۵۰ متری حدود ۳۸ درصد افزایش یافته است و این مقدار برای ارتفاع ۷۵ متری با افزایش ۹۱ درصد همراه بوده است. همچنین سرعت ناشی از موج انفجار در فاصله عرضی ۱۰ متری از سد بتنی در ارتفاع ۲۲۵ متری به مقدار ۳۷ درصد بیشتر از ارتفاع ۱۵۰ متری و ۱۹ درصد نسبت به ارتفاع ۷۵ متری بیشتر بدست آمده است. همچنین این مقدار در فاصله عرضی ۱۵ متری در ارتفاع ۲۲۵ متری به مقدار ۲۲ درصد نسبت به حالتی که ارتفاع سد ۱۵۰ متر می‌باشد افزایش داشته است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر سرعت در فاصله مقیاس شده در ارتفاع ۷۵ متری در فاصله ۵ متری از سد بتنی برابر با ۰/۸ متر بر ثانیه، در فاصله ۱۰ متری از سد بتنی برابر با ۰/۳ و در فاصله ۱۵ متری از سد برابر با ۰/۱۵ متر بر ثانیه بدست آمده است. این مقدار در ارتفاع ۱۵۰ متری برای فاصله ۵ متری از سد بتنی برابر با ۰/۶، برای فاصله ۱۰ متری ۰/۲ و در فاصله ۱۵ متری از سد بتنی برابر با ۰/۱۵ متر بر ثانیه بدست آمده است. همچنین حداکثر سرعت در ارتفاع ۲۲۵ متری برای فواصل ۵، ۱۰ و ۱۵ متری از سد بتنی به ترتیب برابر با ۰/۴، ۰/۲ و ۰/۱ متر بر ثانیه بدست آمده است. به عبارتی دیگر با دو برابر کردن فاصله تی از سد ۶۷٪ و با سه برابر کردن فاصله تی از سد ۷۵٪ کاهش یافته است و در ارتفاع ۲۲۵ متری با دو و سه برابر کردن فاصله تی از سد حداکثر سرعت به ترتیب ۵۰٪ و ۷۵٪ با کاهش همراه بوده است. در واقع اوج لرزش ذرات سد بتنی در تاج سد با توجه به موقعیت خرج ایجاد می‌شود. همچنین بدلیل خطرات مربوط به شکست سد برای پایین دست سد مخزن را در حالت پر و محل انفجار در میدان نزدیک تاج سد

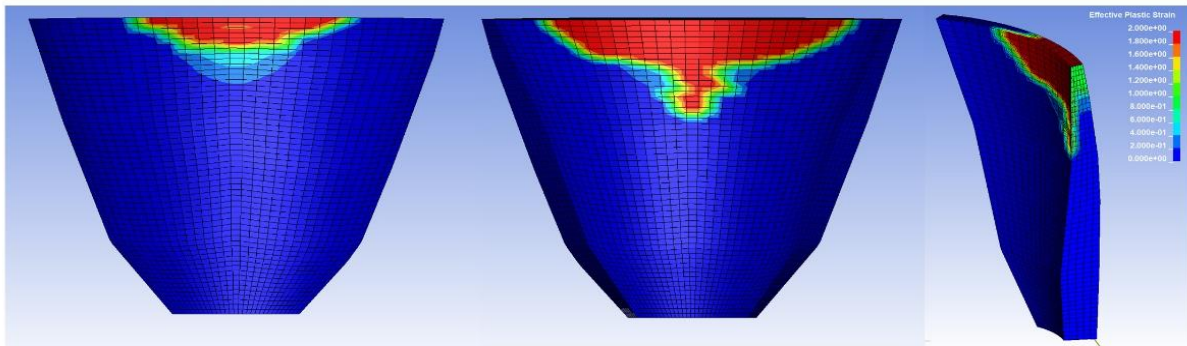
۲ متر، تا ۵ متر و هر ۵ متر در هر مرحله تا ۲۵ متر افزایش می‌یابد را بر اساس سه مؤلفه افقی، عمودی و برشی نشان می‌دهد. همان‌گونه که نتایج حاصل نشان می‌دهد در ۶ مدل در محدوده آسیب شدید، ۴ مدل نیز در محدوده آسیب متوسط و مابقی مدل‌ها در محدوده آسیب جزئی است. روند آشکاری وجود دارد که PPV را در آن مشاهده می‌کند و با افزایش فاصله و عمق مقیاس کاهش می‌یابد.

مؤلفه افقی، عمودی و برشی نشان می‌دهد. همان‌گونه که نتایج حاصل نشان می‌دهد در ۵ مدل در محدوده آسیب شدید، ۳ مدل نیز در محدوده آسیب متوسط و مابقی مدل‌ها در محدوده آسیب جزئی است. همچنین همان‌گونه که مشخص است مؤلفه قائم بیشترین سرعت مؤلفه را دارا می‌باشد.

در شکل (۱۰) و جدول (۹) حالت دوم با مقدار خرج ۱۵۰۰ کیلوگرم ثابت و ارتفاع انفجار متغیر ۲۲۵ متر و کاهش ۱۰ متر در هر مرحله تا ۱۹۵ متر از روی سطح زمین و فاصله از سد بتنی از



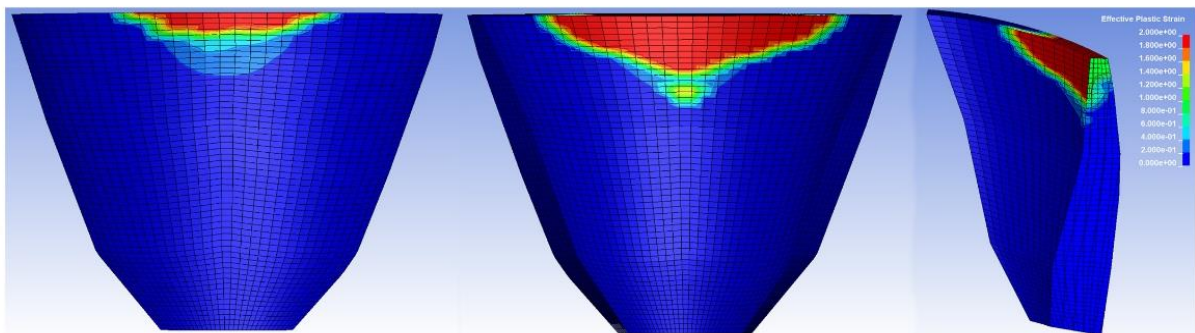
شکل (۶): حالت های مورد بررسی در تحقیق مدل‌سازی جهت یافتن محل آسیب پذیر سد بتنی



بالا دست

پایین دست

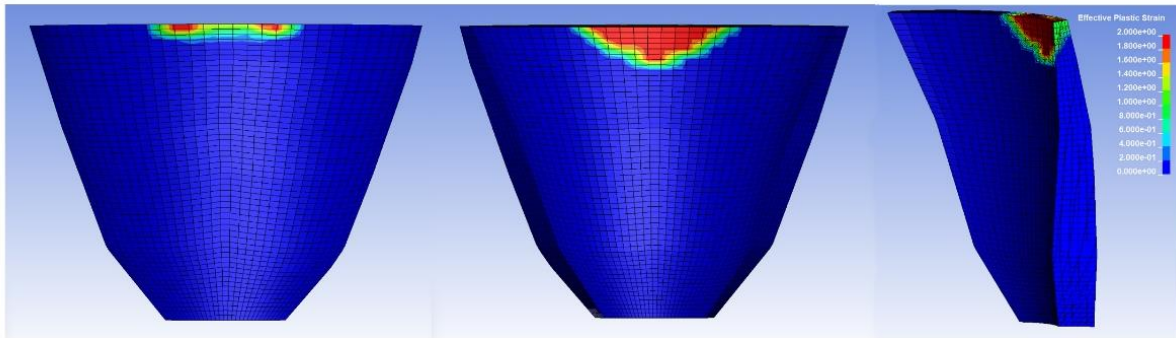
نمای جانبی (R=5 m , h=225, q= 1200 Kg) الف



بالا دست

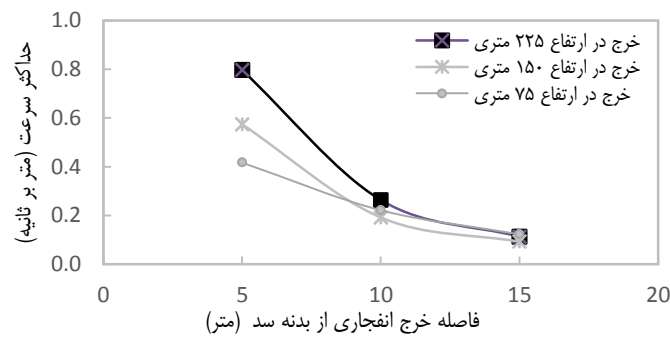
پایین دست

نمای جانبی (R=10 m , h=225, q= 1200 Kg) ب



ج) (R=20 m , h=225, q= 1200 Kg) نمای جانبی پایین دست بالا دست

شکل (۷): نمونه مدل فرآیند انتشار آسیب سد دو قوسی بتنی تحت بارگذاری انفجار هواد در میدان نزدیک



شکل (۸): سرعت اوج ذرات سد بتنی

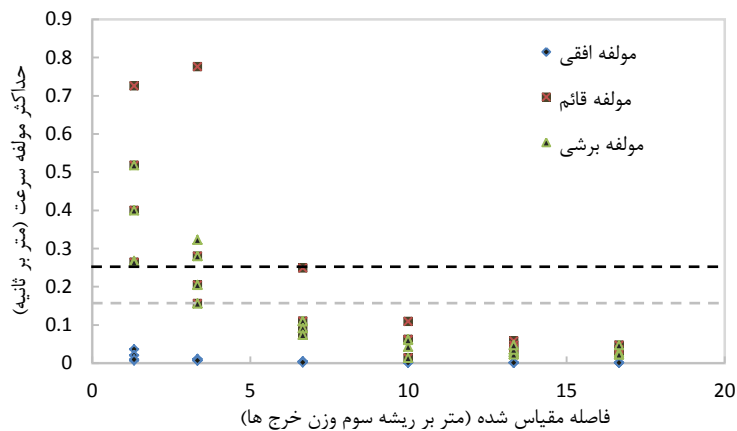


شکل (۹): PPV و مرز خسارت در المان‌های مدل ۱

جدول (۸): رده‌بندی خسارت بر اساس حداکثر سرعت ذرات در مدل ۱

شماره مدل	وزن خرج (کیلو گرم)	ارتفاع (متر)	فاصله از سد (متر)	حداکثر سرعت ذرات در حالت فشاری (متر بر ثانیه)			حداکثر سرعت ذرات در کشش (متر بر ثانیه)			مولفه حداکثر سرعت ذرات (متر بر ثانیه)			درجه خسارت	
				افقی	قائم	برشی	افقی	قائم	برشی	افقی	قائم	برشی		
														۱
۲	۱۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۳۶	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۱	-۰/۰۶۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۶۳	آسیب جزئی			
۳	۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۱۸	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰	-۰/۰۲۶	-۰/۰۱۹	۰/۰۰۰	۰/۰۲۶	۰/۰۱۹	آسیب جزئی			
۴	۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰	-۰/۰۱۴	-۰/۰۰۸	۰/۰۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۰۸	آسیب جزئی			
۵	۶۰۰	۳۰۰	۵	۰/۰۰۳	۰/۱۹۳	۰/۱۱۸	-۰/۰۰۴	-۰/۳۲۵	-۰/۱۵۰	۰/۰۰۴	۰/۳۲۵	۰/۱۵۰	آسیب شدید	
۶			۱۰	۰/۰۰۱	۰/۰۶۷	۰/۰۴۳	-۰/۰۰۱	-۰/۱۰۹	-۰/۰۶۲	۰/۰۰۱	۰/۱۰۹	۰/۰۶۲	آسیب جزئی	
۷			۱۵	۰/۰۰۱	۰/۰۲۷	۰/۰۲۳	۰/۰۰۰	-۰/۰۴۸	-۰/۰۲۴	۰/۰۰۱	۰/۰۴۸	۰/۰۲۴	آسیب جزئی	
۸			۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۱۸	۰/۰۱۱	۰/۰۰۰	-۰/۰۲۵	-۰/۰۱۶	۰/۰۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۱۶	آسیب جزئی	
۹			۹۰۰	۵	۰/۰۰۶	۰/۳۳۷	۰/۱۹۶	-۰/۰۰۷	-۰/۵۴۸	-۰/۲۲۵	۰/۰۰۷	۰/۵۴۸	۰/۲۲۵	آسیب شدید

۱۰	۱۲۰۰	۱۰	۰/۰۰۲	۰/۰۹۳	۰/۰۶۱	-۰/۰۰۲	-۰/۱۵۳	-۰/۰۶۸	۰/۰۰۲	۰/۱۵۳	۰/۰۶۸	آسیب متوسط	
۱۱			۱۵	۰/۰۰۱	۰/۰۴۳	۰/۰۲۹	-۰/۰۰۱	-۰/۰۶۷	-۰/۰۳۴	۰/۰۰۱	۰/۰۶۷	۰/۰۳۴	آسیب جزئی
۱۲			۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۲۸	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰	-۰/۰۳۵	-۰/۰۲۲	۰/۰۰۰	۰/۰۳۵	۰/۰۲۲	آسیب جزئی
۱۳		۱۵	۵	۰/۰۰۶	۰/۳۳۰	۰/۱۸۰	-۰/۰۰۷	-۰/۵۴۹	-۰/۲۲۲	۰/۰۰۷	۰/۵۴۹	۰/۲۲۲	آسیب شدید
۱۴			۱۰	۰/۰۰۲	۰/۱۱۰	۰/۰۶۸	-۰/۰۰۲	-۰/۱۸۷	-۰/۰۸۶	۰/۰۰۲	۰/۱۸۷	۰/۰۸۶	آسیب متوسط
۱۵			۱۵	۰/۰۰۱	۰/۰۶۶	۰/۰۳۸	-۰/۰۰۱	-۰/۰۸۸	-۰/۰۴۲	۰/۰۰۱	۰/۰۸۸	۰/۰۴۲	آسیب جزئی
۱۶		۱۵۰۰	۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۳۹	۰/۰۲۴	۰/۰۰۰	-۰/۰۴۸	-۰/۰۲۶	۰/۰۰۰	۰/۰۴۸	۰/۰۲۶	آسیب جزئی
۱۷			۵	۰/۰۰۸	۰/۴۴۸	۰/۲۷۷	-۰/۰۱۰	-۰/۷۷۶	-۰/۳۲۳	۰/۰۱۰	۰/۷۷۶	۰/۳۲۳	آسیب شدید
۱۸			۱۰	۰/۰۰۳	۰/۱۴۸	۰/۰۹۴	-۰/۰۰۴	-۰/۲۴۹	-۰/۱۱۰	۰/۰۰۴	۰/۲۴۹	۰/۱۱۰	آسیب شدید
۱۹		۲۰	۱۵	۰/۰۰۱	۰/۰۸۴	۰/۰۴۳	-۰/۰۰۱	-۰/۱۰۸	-۰/۰۴۲	۰/۰۰۱	۰/۱۰۸	۰/۰۴۲	آسیب جزئی
۲۰			۲۰	۰/۰۰۱	۰/۰۵۰	۰/۰۲۶	-۰/۰۰۱	-۰/۰۵۷	-۰/۰۲۸	۰/۰۰۱	۰/۰۵۷	۰/۰۲۸	آسیب جزئی



شکل (۱۰): PPV و مرز خسارت در المان‌های مدل ۲

جدول (۹): رده‌بندی خسارت بر اساس PPV در مدل ۲

شماره مدل	وزن خرج (کیلو گرم)	ارتفاع (متر)	فاصله از سد (متر)	حداکثر سرعت ذرات در حالت فشاری (متر بر ثانیه)			حداکثر سرعت ذرات در کشش (متر بر ثانیه)			مولفه حداکثر سرعت ذرات (متر بر ثانیه)			درجه خسارت
				افقی	قائم	برشی	افقی	قائم	برشی	افقی	قائم	برشی	
۱	۱۵۰۰	۲۲۵	۲	۰/۰۰۶	۰/۷۲۵	۰/۲۱۲	۰	-۰/۱۶۸۶	-۰/۲۶۷	۰/۰۰۶	۰/۷۲۵	۰/۲۶۷	آسیب شدید
۲			۵	۰/۰۰۸	۰/۴۴۸	۰/۲۷۷	-۰/۰۱۰	-۰/۷۷۶	-۰/۳۲۳	۰/۰۱۰	۰/۷۷۶	۰/۳۲۳	آسیب شدید
۳			۱۰	۰/۰۰۳	۰/۱۴۸	۰/۰۹۴	-۰/۰۰۴	-۰/۲۴۹	-۰/۱۱۰	۰/۰۰۴	۰/۲۴۹	۰/۱۱۰	آسیب متوسط
۴			۱۵	۰/۰۰۱	۰/۰۸۴	۰/۰۴۳	-۰/۰۰۱	-۰/۱۰۸	-۰/۰۴۲	۰/۰۰۱	۰/۱۰۸	۰/۰۴۲	آسیب جزئی
۵			۲۰	۰/۰۰۱	۰/۰۵۰	۰/۰۲۶	-۰/۰۰۱	-۰/۰۵۷	-۰/۰۲۸	۰/۰۰۱	۰/۰۵۷	۰/۰۲۸	آسیب جزئی
۶			۲۵	۰/۰۰۰	۰/۰۳۴	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰	-۰/۰۳۵	-۰/۰۲۲	۰/۰۰۰	۰/۰۳۵	۰/۰۲۲	آسیب جزئی
۷		۲۱۵	۲	۰/۰۳۶	۰/۶۴۱	۰/۴۳۲	-۰/۰۳۱	-۰/۵۲۴	-۰/۵۱۷	۰/۰۳۶	۰/۶۴۱	۰/۵۱۷	آسیب شدید
۸			۵	۰/۰۰۷	۰/۲۰۹	۰/۲۸۰	-۰/۰۰۶	-۰/۲۹۲	-۰/۱۶۳	۰/۰۰۷	۰/۲۹۲	۰/۲۸۰	آسیب شدید
۹			۱۰	۰/۰۰۳	۰/۱۳۴	۰/۱۰۹	-۰/۰۰۲	-۰/۱۸۷	-۰/۰۸۰	۰/۰۰۳	۰/۱۸۷	۰/۱۰۹	آسیب متوسط
۱۰			۱۵	۰/۰۰۲	۰/۰۸۴	۰/۰۴۷	-۰/۰۰۲	-۰/۱۰۳	-۰/۰۶۱	۰/۰۰۲	۰/۱۰۳	۰/۰۶۱	آسیب جزئی
۱۱			۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰	-۰/۰۱۴	-۰/۰۲۲	۰/۰۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۲۲	آسیب جزئی
۱۲			۲۵	۰/۰۰۰	۰/۰۴۱	۰/۰۱۷	۰/۰۰۰	-۰/۰۳۷	-۰/۰۲۷	۰/۰۰۰	۰/۰۴۱	۰/۰۲۷	آسیب جزئی
۱۳		۲۰۵	۲	۰/۰۲۰	۰/۳۱۴	۰/۳۰۰	-۰/۰۱۴	-۰/۲۷۵	-۰/۳۹۹	۰/۰۲۰	۰/۳۱۴	۰/۳۹۹	آسیب شدید
۱۴			۵	۰/۰۰۷	۰/۱۱۲	۰/۱۴۸	-۰/۰۰۵	-۰/۰۹۸	-۰/۲۰۴	۰/۰۰۷	۰/۱۱۲	۰/۲۰۴	آسیب متوسط
۱۵			۱۰	۰/۰۰۲	۰/۰۳۵	۰/۰۷۰	-۰/۰۰۳	-۰/۰۳۷	-۰/۰۹۱	۰/۰۰۳	۰/۰۳۷	۰/۰۹۱	آسیب جزئی
۱۶			۱۵	۰/۰۰۱	۰/۰۲۰	۰/۰۵۱	-۰/۰۰۱	-۰/۰۱۷	-۰/۰۶۰	۰/۰۰۱	۰/۰۲۰	۰/۰۶۰	آسیب جزئی
۱۷			۲۰	۰/۰۰۱	۰/۰۱۶	۰/۰۳۳	-۰/۰۰۱	-۰/۰۱۴	-۰/۰۳۵	۰/۰۰۱	۰/۰۱۶	۰/۰۳۵	آسیب جزئی

۱۸	۱۹۵	۲۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰	-۰/۰۱۴	-۰/۰۲۲	۰/۰۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۲۲	آسیب جزئی
۱۹		۲	۰/۰۰۹	۰/۱۶۵	۰/۲۳۹	-۰/۰۰۶	-۰/۱۲۴	-۰/۲۶۳	۰/۰۰۹	۰/۱۶۵	۰/۲۶۳	آسیب شدید
۲۰		۵	۰/۰۰۶	۰/۰۹۲	۰/۱۲۱	-۰/۰۰۴	-۰/۰۵۱	-۰/۱۵۶	۰/۰۰۶	۰/۰۹۲	۰/۱۵۶	آسیب متوسط
۲۱		۱۰	۰/۰۰۱	۰/۰۱۳	۰/۰۶۳	-۰/۰۰۱	-۰/۰۱۳	-۰/۰۷۴	۰/۰۰۱	۰/۰۱۳	۰/۰۷۴	آسیب جزئی
۲۲		۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۱	-۰/۰۱۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۱۳	آسیب جزئی
۲۳		۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۱۲	۰/۰۴۷	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۸	-۰/۰۲۹	۰/۰۰۰	۰/۰۱۲	۰/۰۴۷	آسیب جزئی
۲۴		۲۵	۰/۰۰۰	۰/۰۱۲	۰/۰۴۷	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۸	-۰/۰۲۹	۰/۰۰۰	۰/۰۱۲	۰/۰۴۷	آسیب جزئی

بر اساس تعاریف فوق، PVS و MF برای هر سناریو انفجار را می‌توان به راحتی به دست آورد. به علاوه، مشابه تعریف فاصله مقیاس دار در معادله (۱۳)، عمق مقیاس شده به همان شکل تعریف می‌شود و فاصله از سد بتنی (R) را با اختلاف ارتفاع (D) بین نقطه هدف و منبع انفجاری جایگزین می‌کند. سپس می‌توان اثر عمق انفجار بر روی لرزش انفجار را نیز در نظر گرفت. پس شکل (۱۲) تنوع PVS و MF را برای تاج سد همراه با فاصله مقیاس و عمق نشان می‌دهد. بدیهی است که هر دو با افزایش فاصله مقیاس (یا عمق مقیاس شده) روند کاهش چشمگیری نشان می‌دهند. به منظور تولید نمودار بار مسافت و ایستادگی برای سدهای قوسی می‌توان وزن بار و فاصله ایستادن برای هر سناریو متناظر با وضعیت خسارت سد را از جدول (۱۰) استخراج و ترسیم نمود. سپس می‌توان معیارهای مبتنی بر آنالیز حالت آسیب مستقیم را به دست آورد و به طور کلی، معیارهای طیف پیشنهادی برای وزن بار و فاصله ایستادن را می‌توان به شرح زیر بیان کرد.

$$D = 3.8687 \ln(Q) - 16.938 \quad (17)$$

برای مرز خسارت متوسط و شدید

$$D = 1.8656 \ln(Q) + 4.0124 \quad (18)$$

برای مرز خسارت متوسط و جزئی

منحنی‌های بحرانی روابط (۱۷ و ۱۸) که خطوط مرزی بین سطوح مختلف آسیب هستند با استفاده از روش برازش لگاریتمی منحنی به دست می‌آیند. رابطه ۱۷ مربوط به منحنی برای مرز خسارت متوسط و جزئی، یعنی در بالای نمودار خسارت ناچیز به بتن سد وارد می‌شود.

در رابطه (۱۸) مربوط به منحنی برای مرز خسارت متوسط و شدید، یعنی در پایین نمودار خسارت شدید به بتن سد وارد می‌شود که در روابط فوق D فاصله ایستادن به متر، Q وزن خرج برحسب کیلوگرم است. برای مثال اگر یک مواد منفجره با وزن ۱۵۰۰، ۹۰۰، ۶۰۰ کیلوگرمی در فاصله متری سد منفجر ۳۰۰ شود خسارت بتن بدنه سد شدید می‌باشد و با وزن

به طور کلی، با کاهش وزن خرج یا افزایش فاصله خرج از سد بتنی، سطح آسیب کاهش می‌یابد. با این حال، استراتژی طبقه‌بندی خسارت به طور مستقیم مبتنی بر آنالیز حالت آسیب است که ارتباط نزدیکی با ذهنیت محقق دارد و کشف آسیب کلی یک بخش سد واقعی پس از انفجار پرهزینه و ناخوشایند است و ممکن است خطرات احتمالی در پایین دست سد را برای آن ایجاد کند؛ بنابراین در بخش بعد، ما از خواص لرزش برای ارزیابی وضعیت آسیب سدهای دو قوسی در معرض انفجارهای حوزه نزدیک میدان استفاده می‌کنیم. حداکثر مؤلفه سرعت ذرات شاخص اصلی است که برای درک لرزش منفجر شده مورد استفاده قرار می‌گیرد که به طور گسترده‌ای برای ارزیابی ایمنی سازه در زیر انفجار مورد استفاده قرار گرفته است.

۵- سرعت و ارتعاش در انفجار

۵-۱- ارتعاش ناشی از انفجار در سد

همان‌طور که در بخش ۴-۱ توضیح داده شده است، وضعیت خسارت سد قوسی که در معرض انفجار قرار گرفته است می‌تواند توسط خواص ارتعاش ذرات ارزیابی شود، پس در مقایسه با بزرگ‌ترین مقدار اجزای عمودی، شعاعی و عرضی، یک جمع برداری واقعی اندازه‌گیری دقیق‌تری از سرعت ذرات را در هر یک فراهم می‌کند و از رابطه زیر نتایج شکل موج جمع شده جمع می‌شود و توسط رابطه (۱۵) تعریف می‌شود؛ بنابراین می‌توان اندازه‌گیری دقیق‌تری از PPV را با حاصل از جمع برداری سرعت می‌تواند در هر لحظه به دست آورد. همچنین فرکانس، یک ویژگی بسیار مهم هر رویداد لرزشی است در طیف فرکانس موج لرزشی، فرکانسی که بالاترین محتوای انرژی را داشته باشد به عنوان فرکانس غالب معرفی می‌شود. این فرکانس غالب در تحلیل‌های تأثیر لرزش بر سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد مفهوم فرکانس متوسط در تحلیل لرزش‌های ناشی از انفجار در رابطه (۱۶) به اندازه دامنه مهم است.

اطراف مرزهای بین دسته‌های مختلف آسیب معیار طیف جمع برداری سرعت لرزش و فرکانس متوسط پیشنهادی را برای سدهای دو قوسی بتنی در معرض انفجار در هوا به دست آورد. به‌طور کلی، معیارهای طیف پیشنهادی را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

$$PVS = 1.3 \times 10^{-3} MF - 0.026 \quad (19)$$

برای مرز خسارت متوسط و شدید

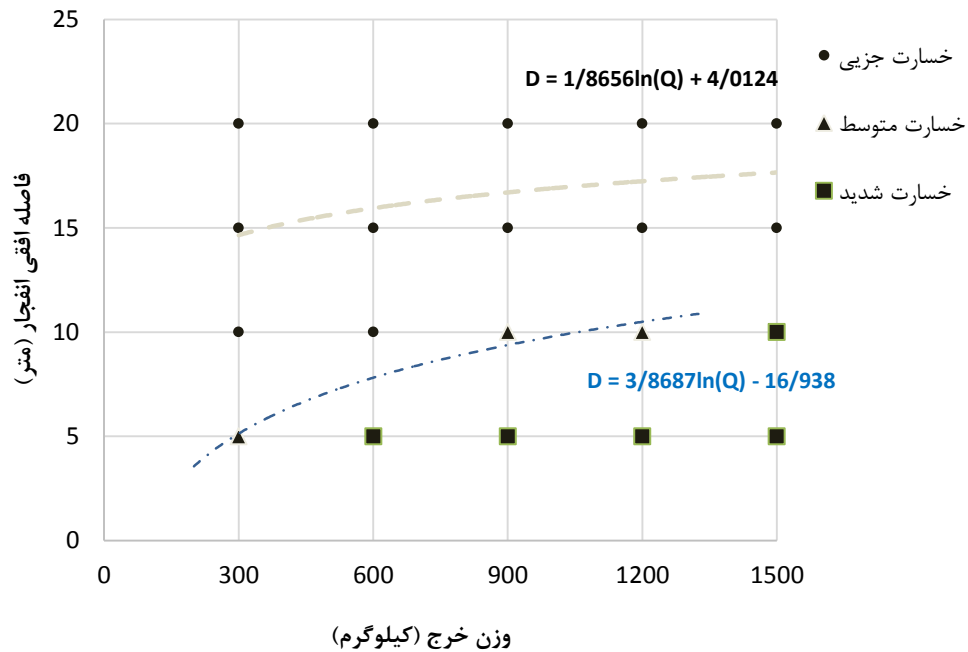
$$PVS = 2.5 \times 10^{-3} MF - 0.3234 \quad (20)$$

برای مرز خسارت متوسط و جزئی

کیلوگرمی خسارت متوسط می‌باشد. همچنین برای بار وزن ۱۵۰۰ کیلوگرم فاصله ایمن برای جلوگیری از آسیب شدید باید حداقل ۱۱/۳۵ متر و برای جلوگیری از آسیب متوسط ۱۷/۶۵ متر باشد. طبقه‌بندی خسارت در شکل (۱۳) نیز بر اساس تجزیه و تحلیل حالت آسیب مستقیم در مدل ۲ است که از نظر جمع برداری سرعت لرزش و فرکانس متوسط توصیف می‌شود. در مقایسه با شکل (۹)، به نظر می‌رسد که این طبقه‌بندی آسیب بهینه‌تر از نمودار حداکثر سرعت ذره است و هنگامی که حداکثر سرعت لرزش و فرکانس را در نظر گرفت، مرزهای آشکارتری را می‌توان یافت. دلیل این امر ممکن است این دو با مؤلفه‌های سرعت متعامد باشد که در مقایسه با سرعت اوج ذرات اندازه‌گیری دقیق‌تری از سرعت لرزش ذرات را در هر لحظه نمونه‌گیری ارائه دهد. حال می‌توان با قرار دادن نقاط داده در

جدول (۱۰): رده‌بندی خسارت بر اساس جمع برداری سرعت ذرات در مدل ۱

شماره مدل	ارتفاع (متر)	وزن خرج (کیلوگرم)	فاصله از سد (متر)	فشار بیشینه (مگاپاسکال)	کشش بیشینه (مگاپاسکال)	جمع برداری سرعت ذره (متر بر ثانیه)	فرکانس متوسط (هرتز)	درجه خسارت
۱	۲۲۵	۳۰۰	۵	۶/۷۴	-۰/۷۰	۰/۱۸	۱۹۵/۶۳	آسیب متوسط
۲			۱۰	۰/۳۲	-۱/۵۰	۰/۰۶	۱۴۸/۵۹	آسیب جزئی
۳			۱۵	۰/۵۳	-۰/۰۹	۰/۰۳	۱۴۶/۳۲	آسیب جزئی
۴			۲۰	۰/۲۵	-۰/۰۱	۰/۰۱	۱۶۲/۹۸	آسیب جزئی
۵		۶۰۰	۵	۱۲/۳۱	-۱/۲۵	۰/۳۳	۱۹۷/۰۹	آسیب شدید
۶			۱۰	۲/۹۵	-۰/۴۲	۰/۱۲	۱۸۴/۶۵	آسیب جزئی
۷			۱۵	۱/۰۲	-۰/۲۰	۰/۰۵	۱۷۱/۵۶	آسیب جزئی
۸			۲۰	۰/۴۶	-۰/۱۲	۰/۰۳	۱۴۲/۱۵	آسیب جزئی
۹		۹۰۰	۵	۱۳/۴۷	-۲/۲۲	۰/۵۷	۱۹۴/۷۱	آسیب شدید
۱۰			۱۰	۴/۲۹	-۰/۵۳	۰/۱۶	۱۸۰/۲۱	آسیب متوسط
۱۱			۱۵	۱/۴۷	-۰/۳۰	۰/۰۷	۱۷۷/۱۴	آسیب جزئی
۱۲			۲۰	۰/۶۶	-۰/۱۸	۰/۰۴	۱۷۱/۸۴	آسیب جزئی
۱۳		۱۲۰۰	۵	۱۳/۴۷	-۲/۲۱	۰/۵۶	۱۹۳/۱۱	آسیب شدید
۱۴			۱۰	۵/۴۶	-۰/۷۳	۰/۲۰	۱۸۰/۹۰	آسیب متوسط
۱۵			۱۵	۱/۹۶	-۰/۳۶	۰/۰۹	۱۷۱/۹۸	آسیب جزئی
۱۶			۲۰	۰/۸۷	-۰/۲۰	۰/۰۵	۱۷۵/۸۱	آسیب جزئی
۱۷		۱۵۰۰	۵	۱۳/۰۷	-۲/۳۹	۰/۸۰	۱۹۲/۳۹	آسیب شدید
۱۸			۱۰	۷/۳۴	-۰/۹۷	۰/۲۶	۱۷۶/۴۸	آسیب شدید
۱۹			۱۵	۲/۴۵	-۰/۳۸	۰/۱۱	۱۶۵/۴۷	آسیب جزئی
۲۰			۲۰	۱/۰۸	-۰/۲۲	۰/۰۶	۱۴۵/۰۵	آسیب جزئی

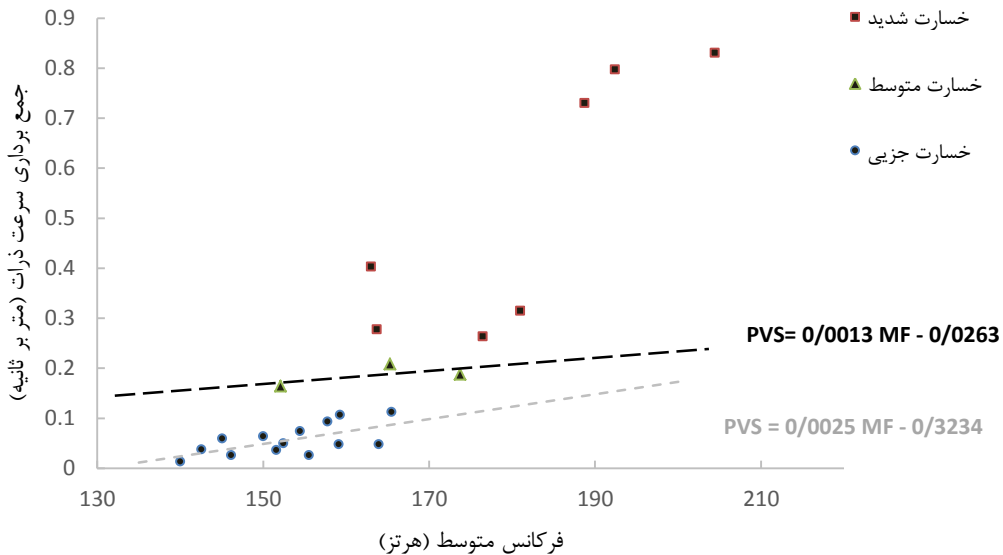


شکل (۱۱): طبقه‌بندی درجه‌بندی میزان آسیب که بر اساس وزن خرج و فاصله افقی در تاج سد در مدل ۱

جدول (۱۱): رده‌بندی خسارت بر اساس جمع برداری سرعت ذرات در مدل ۲

شماره مدل	وزن خرج (کیلوگرم)	ارتفاع (متر)	فاصله از سد (متر)	فشار بیشینه (مگاپاسکال)	کشش بیشینه (مگاپاسکال)	جمع برداری سرعت ذره (متر بر ثانیه)	فرکانس متوسط (هرتز)	درجه خسارت	
۱	۱۵۰۰	۲۲۵	۲	۱۳/۵۲	-۲/۴۱	۰/۷۲۵	۲۰۴/۴۵۳	آسیب شدید	
۲			۵	۱۳/۰۷	-۲/۳۹	۰/۷۹۷	۱۹۲/۳۸۹	آسیب شدید	
۳			۱۰	۷/۳۴	-۰/۹۷	۰/۲۶۳	۱۷۶/۴۸۲	آسیب شدید	
۴			۱۵	۲/۴۵	-۰/۳۸	۰/۱۱۲	۱۶۵/۴۶۹	آسیب جزئی	
۵			۲۰	۱/۰۸	-۰/۲۲	۰/۰۵۹	۱۴۵/۰۵۵	آسیب جزئی	
۶			۲۵	-۰/۵۹	-۰/۰۹	۰/۰۳۷	۱۴۲/۵۵۶	آسیب جزئی	
۷		۲۱۵	۲۰۵	۲	۱۳/۴۸	-۲/۴۱	۰/۷۳۰	۱۸۸/۷۲۵	آسیب شدید
۸				۵	۵/۳۰	-۲/۴۱	۰/۳۱۵	۱۸۰/۹۹۷	آسیب شدید
۹				۱۰	۲/۹۲	-۰/۶۲	۰/۱۸۸	۱۷۳/۷۱۹	آسیب متوسط
۱۰				۱۵	۱/۵۹	-۰/۳۳	۰/۱۰۶	۱۵۹/۲۶۴	آسیب جزئی
۱۱				۲۰	-۰/۳۴	-۰/۱۰	۰/۰۲۶	۱۴۶/۱۲۳	آسیب جزئی
۱۲				۲۵	-۰/۵۵	-۰/۰۹	۰/۰۴۹	۱۵۲/۴۳۹	آسیب جزئی
۱۳		۲۰۵	۱۹۵	۲	۳/۷۸	-۲/۲۹	۰/۴۰۳	۱۶۲/۹۹۰	آسیب شدید
۱۴				۵	۱/۳۰	-۰/۷۷	۰/۲۰۸	۱۶۵/۲۷۴	آسیب متوسط
۱۵				۱۰	-۰/۷۹	-۰/۴۶	۰/۰۹۳	۱۵۷/۷۴۵	آسیب جزئی
۱۶				۱۵	-۰/۶۹	-۰/۳۰	۰/۰۶۳	۱۴۹/۹۹۳	آسیب جزئی
۱۷				۲۰	-۰/۴۵	-۰/۱۸	۰/۰۳۶	۱۵۱/۵۷۱	آسیب جزئی
۱۸				۲۵	-۰/۳۴	-۰/۱۰	۰/۰۲۶	۱۵۵/۵۳۰	آسیب جزئی
۱۹		۱۹۵	۱۹۵	۲	۱/۵۱	-۱/۲۴	۰/۲۷۷	۱۶۳/۶۷۷	آسیب شدید
۲۰				۵	-۰/۶۳	-۰/۸۰	۰/۱۶۴	۱۵۲/۰۹۷	آسیب متوسط
۲۱				۱۰	-۰/۳۷	-۰/۱۸	۰/۰۷۴	۱۵۴/۴۳۰	آسیب جزئی
۲۲				۱۵	-۰/۲۲	-۰/۴۲	۰/۰۱۳	۱۴۲/۲۴۸	آسیب جزئی

۲۳		۲۰	۰/۱۱	-۰/۱۰	۰/۰۴۷	۱۶۳/۹۴۳	آسیب جزئی
۲۴		۲۵	۰/۱۱	-۰/۱۰	۰/۰۴۷	۱۵۹/۱۱۰	آسیب جزئی



شکل (۱۲): طبقه‌بندی درجه‌بندی میزان آسیب که بر اساس لرزش ناشی از انفجار و فرکانس متوسط در تاج سد در مدل

به روش LBE بررسی شد. نتایج حاصل از تأثیر دو نوع طیف ترسیم‌شده در انفجار هوا بر بدنه سد، در حقیقت بیانگر این موضوع است که هرچه فاصله کمتر و وزن خرج بیشتر باشد به سد بتنی فشار بیشتری انتقال می‌یابد که با افزایش جمع برداری سرعت لرزش و فرکانس متوسط در نتایج شاهد خسارت شدیدتری مشاهده شده است و همچنین تاج سد ضعیف‌ترین محل بدنه شناسایی شد. ارزیابی زیان برآمده از خطرات انفجارها در جایگاه مهم و به‌دست آوردن زیان وارد به بدنه سدهای قوسی از اهمیت بالایی در مرحله طراحی برخوردار است. این امر یکی از موارد بسیار حائز اهمیت می‌باشد که می‌تواند در قیمت اجرای پروژه‌های سدسازی تأثیرگذار باشد. جهت دسترسی مفید به دسته‌بندی خسارت طیف PVS-MF بر اساس سرعت ارتعاش ذرات در این مطالعه پیشنهاد شده است که به نظر به ارزیابی و پیشنهاد طیف ترکیبی به روشی جهت طراحی سد مقاوم در برابر انفجار و یافتن فاصله ایمن در مواقع اضطراری می‌رسد.

۷- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از همفکری اساتید دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان کمال سپاسگزاری را دارند.

۸- مراجع

[1] S. Gholizadeh, M. A. Nekooie, and H. Fakhrace, "The Study and Assessments on Threats of Dams Downstream Assets with Passive Defense Approach (A Case Study: Shirin Darreh Dam)", Passive Defense

چهار رابطه اخیر فقط برای سدی که تحت تأثیر موج شوک انفجار ناشی از انفجار در هوا قرار دارد مناسب است. به‌منظور یافتن دید کلی از رهیافت فوق، نیاز به تجزیه و تحلیل بیشتر در مورد سدهای قوسی بتنی (قوسی و دو قوسی) در ابعاد مختلف، عمق‌های مختلف انفجار، سطح مختلف بالادست آب و شرایط مرزی مختلف و همچنین مواد مختلف است.

۶- نتیجه‌گیری

ارزیابی خسارت سدهای قوسی با دسته‌بندی خسارت بدنه سد در انفجار به سه نوع و تعیین معیار مناسب جهت تشخیص درجه دسته‌بندی بر اساس جمع برداری سرعت لرزش و فرکانس متوسط پیشنهاد نموده است. در این مقاله ابتدا با بررسی ضعف بدنه سد در محل تاج مشخص گردید با دو برابر کردن فاصله تیان تی از سد بتنی در ارتفاع ۷۵ متری حدود ۶۲/۵٪ از سرعت پیشینه کاهش یافته است. این مقدار با سه برابر کردن فاصله از سد بتنی با کاهش حدود ۸۱/۲۵٪ همراه بوده است. حداکثر سرعت در ارتفاع ۱۵۰ متری با دو برابر کردن فاصله تیان تی از سد حدود ۶۷٪ و با سه برابر کردن فاصله تیان تی از سد ۷۵٪ کاهش یافته است و در ارتفاع ۲۲۵ متری با دو و سه برابر کردن فاصله تیان تی از سد حداکثر سرعت به ترتیب ۵۰٪ و ۷۵٪ با کاهش همراه بوده است. همچنین سه دسته خسارت جزئی، متوسط و شدید بر اساس خواص ارتعاش با پاسخ‌های دینامیکی ساختاری این سد تحت سناریوهای مختلف انفجار با مدل عددی

- 94-551-0712, r:10572.
- [13] G. A. Mata, "Evaluation of Concrete Constitutive Models for Impact Simulations," Masters, Mechanical Engineering ETDs, THE UNIVERSITY OF NEW MEXICO, 2017.
- [14] [۱۴] P. F. Mlakar and D. Barker, "Blast Phenomena," in Handbook for Blast- Resistant Design of Buildings, 2010, pp. 159-182.
- [15] H. ghanbari, A. roshanravan, and F. kalateh, "Investigation of the Reservoir Effects on the Response of Arch Dam Under Blast Loading," J. Energetic Mater., vol. 13, no. 1, pp. 17-26, 2018. (In Persian).
- [16] M. A. Peyman Shadman heydari, "Evaluation and reliability performance determination of double curved concrete dam curved concrete dam," Earthq. Struct., vol. 12, no. 2, pp. 63-74, 2016.
- [17] [۱۷] H. Ak and A. Konuk, "The effect of discontinuity frequency on ground vibrations produced from bench blasting: A case study," Soil Dyn. Earthq. Eng., vol. 28, no. 9, pp. 686-694, 2008/09/01/ 2008.
- [18] J. H. Yang, W. B. Lu, Z. G. Zhao, P. Yan, and M. Chen, "Safety distance for secondary shotcrete subjected to blasting vibration in Jinping-II deep-buried tunnels," Tunn. Undergr. Space Technol., vol. 43, pp. 123-132, 2014/07/01/ 2014.
- [19] W. Xia, W. Lu, G. Wang, P. Yan, D. Liu, and Z. Leng, "Safety threshold of blasting vibration velocity in foundation excavation of Baihetan super-high arch dam," Bull. Eng. Geol. Environ., vol. 79, no. 9, pp. 4999-5012, 2020/11/01 2020.
- [20] Guidelines for the assessment and control of the consequences of blasting in surface mines, 2012.
- [21] X. Qiu, X. Shi, Y. Gou, J. Zhou, H. Chen, and X. Huo, "Short-delay blasting with single free surface: Results of experimental tests," Tunn. Undergr. Space Technol., vol. 74, pp. 119-130, 2018.
- [22] I. Elseman, "Abdel-Rasoul 2000. "Measurement and Analysis of the Effect of Ground Vibrations Induced by Blasting at the Limestone Quarries of the Egyptian Cement Company", in The Proceeding of the International Conference of the Environmental Hazards Mitigation, pp. 54-71.
- Quarterly, vol. 8, no. 1, pp. 25-, 2017(In Persian).
- [2] General technical specifications of dams, 2013(In Persian).
- [3] G. Wang et al., "A state-of-the-art review on blast resistance and protection of high dams to blast loads," Int. J. Impact Eng, vol. 139, p. 103529, 2020/05/01/ 2020.
- [4] X. Xue, X. Yang, and W. Zhang, "Numerical modeling of arch dam under blast loading," J VIB CONTROL, vol. 20, no. 2, pp. 256-265, 2014/02/01 2012.
- [5] K. Zhang, F. Lu, Y. Peng, and X. Li, "Study on dynamic response of gravity dam under air blast load based on similarity law," Eng. Fail. Anal, vol. 138, p. 106225, 2022/08/01/ 2022.
- [6] M. Ataei and M. Kamali, "Prediction of blast-induced vibration by adaptive neuro-fuzzy inference system in Karoun 3 power plant and dam," J VIB CONTROL, vol. 19, no. 12, pp. 1906-1914, 2013/09/01 2012.
- [7] F. Kalateh, "Dynamic failure analysis of concrete dams under air blast using coupled Euler-Lagrange finite element method," Front. Struct. Civ. Eng., vol. 13, no.1, pp. 15-37, 2019/02/01 2019.
- [8] M. Leidig, J. L. Bonner, T. Rath, and D. Murray, "Quantification of ground vibration differences from well-confined single-hole explosions with variable velocity of detonation," International Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 47, no. 1, pp. 42-49, 2010/01/01/ 2010.
- [9] Z. S. Tabatabaei and J. S. Volz, "A comparison between three different blast methods in LS-DYNA: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE," 2012.
- [10] D.-S. Cheng, C.-W. Hung, and S.-J. Pi, "Numerical simulation of near-field explosion," J. Appl. Sci. Eng., vol. 16, no. 1, pp. 61-67, 2013.
- [11] S. Mendo Meye, G. Li, Z. Shen, J. Zhang, G. F. Emani, and V. Edem Setordjie, "Dynamic Response and Failure Mechanism of Concrete Arch Dams under Extreme Loadings: A Solid Foundation for Real-World Actions to Reduce Dam Collapse Losses during Wartime or Terrorist Attacks," Water J., vol. 14, no. 10, p. 1648, 2022.
- [12] L. S. T. Corporation., LS-DYNA keyword user's manual Material Models. Livermore, California