

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

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 is 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.

Key Words: *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



*Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Larestan Branch, Islamic Azad University, Larestan, Iran. (mo.karkon@iau.ac.ir) - Writer-in-Charge

نشریه علمی پدافند غیرعامل

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

علمی- پژوهشی

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

چکیده

سدها یکی از اجزاء 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



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

^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 پروژه‌های 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 شاخص ارتعاش است. نتایج نشان داد که مدل ANFIS مرتبط با مدل تجربی یک تکنیک قابل‌اعتماد و مناسب برای پیش‌بینی

¹ Xue

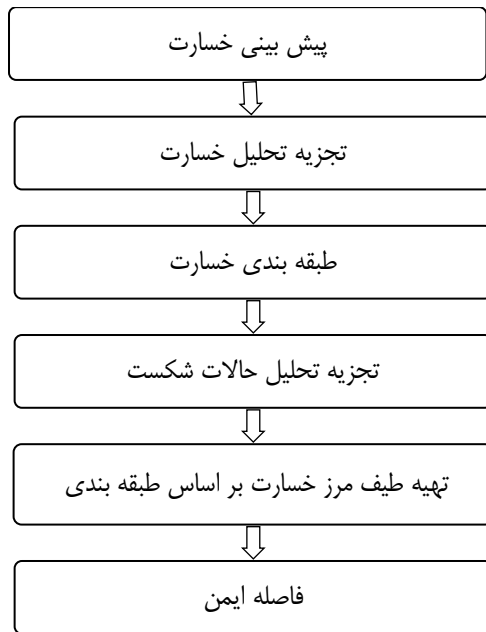
² Wang

³ Zhang, Kefan

⁴ Adaptive network-based fuzzy inference system

⁵ Peak particle velocity

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 تعبیه شده به یک شبیه‌سازی، گاهی اوقات دشوار است [۱۲]. در مدل ماده فوق برای تعیین استحکام و تنش معادل نرمال به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

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 شدید، مکانیسم آسیب و ویژگی‌های سد تحت بارهای ضربه انفجار و همچنین ارزیابی وضعیت سد پس از بارهای شدید بررسی‌های

¹ Mark Leidig

² Multi-Material Arbitrary Lagrangian

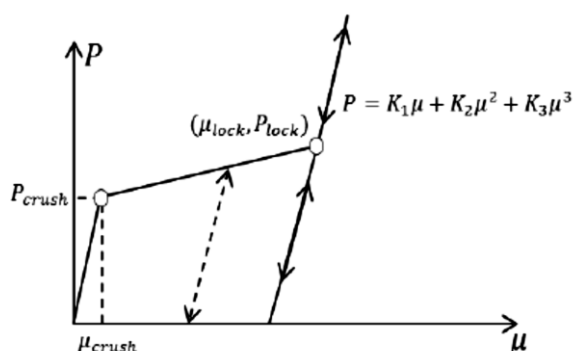
³ Load Blast Enhanced

⁴ Cheng, D.-S

⁵ Mendomo Meye

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]

فرمول‌بندی برای منطقه بسته مکعبی الاستیک و خطی به ترتیب در معادله (۷ و ۶) 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

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

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

تغییرات مختلف K در معادله قبلی، همه ثابت مواد هستند که به مدول حجم مربوط می‌شوند (K_e).

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

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 آسیب‌دیده 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 پلاستیکی 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 (۳ و ۴) 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 هولمکوست به‌عنوان 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 به‌دست‌آمده در این منطقه قابل بازیابی است، زیرا همه کشش دارد. منطقه دوم از مقادیر خردشدگی فشار و کرنش حجمی (P_{crush} ، μ_{crush}) شروع می‌شود که از زمان 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

در حالی که فشار آب در حالت انبساط می باشد.

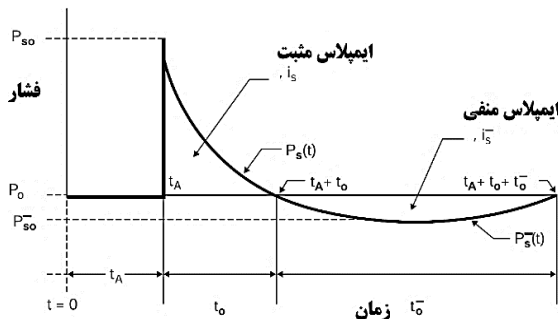
جدول (۳): پارامترهای مدل ماده آب

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]

سرعت واکنش به خصوصیات شیمیایی و فیزیکی ماده انرژی زا، نسبت واکنش دهنده ها و همگنی، هندسه ماده، مشخصات "خرج" که ماده در آن قرار دارد، روش و انرژی شروع و سایر

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 کاررفته 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
۱۴۰.۰۶	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.

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

و برای مواد منبسط شده به شکل زیر است.

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

¹ Equation of state

اثر انفجار بر روی سد به طور واقعی قابل مشاهده باشد. سد کارون ۴ بلندترین سد قوسی کشور مدل سازی می شود. هدف از اجرای طرح کارون ۴ تولید انرژی برقی آبی به میزان ۲۱۰۷ گیگاوات ساعت در سال و کنترل سیلاب های رودخانه کارون می باشد که با قرارگیری در زنجیره سدهای پیاپی کارون به حجم قابل ذخیره آورد رودخانه کارون جهت استفاده در مصارف کشاورزی در دشت خوزستان کمک می نماید. سد کارون ۴ بلندترین سد کشور محسوب می گردد که در بالادست مجموعه سدهای زنجیره ای احداث شده بر روی رودخانه کارون قرار گرفته است. این سد از نوع بتنی قوسی است. دره ساختگاه سد، یک دره V شکل نامتقارن است [۱۶]. مشخصات سد بتنی فوق مطابق جدول (۵) است. شرایط مرزی سد در محل تکیه گاه سد (محل قرارگیری بر روی بستر سنگی) به صورت non-reflect می باشد 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 مترمکعب)
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 شبیه سازی انجام شده، با توجه به اینکه نقطه پیک فشار در انفجار بسیار حائز اهمیت می باشد 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. همان طور که مشخص است نمودار در ابتدا به صورت افقی و مستقیم می باشد و شیب آن افزایش می یابد تا در زمان ۴ میلی ثانیه به پیک خود می رسد، و پس شروع روند کاهش می یابد. همسان با نمودار مدل صحت سنجی پس از طی گذشت ۲ میلی ثانیه تا ۴ میلی ثانیه کم کم به صفر نزدیک می شود. همچنین

شرایط اولیه بستگی دارد. همان طور که در شکل (۳) مشاهده می شود، پس از وقوع انفجار، در زمان بسیار کوتاهی فشار اتمسفر به P_{S0} می رسد و بعد از آن فشار کاهش می یابد و Pst فشار وارد فاز منفی یا مکش می شود.

در این مطالعه، انرژی TNT با مدل مواد منفجره و معادله حالت (JWL) مدل سازی 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 می دهد.

جدول (۴): مشخصات مدل ماده مواد منفجره

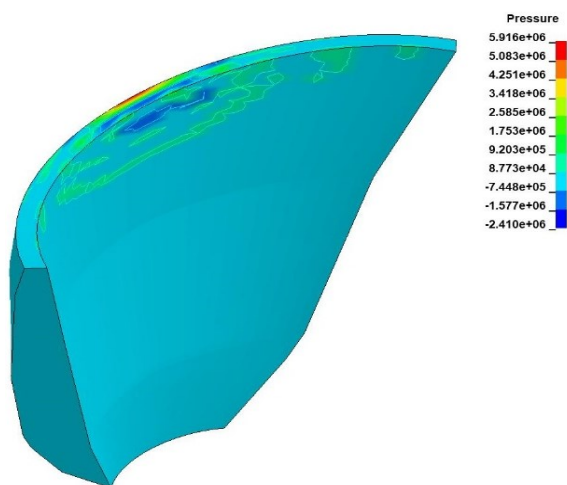
مقدار	مشخصات مصالح
۳.۲۳	$B(GPa)$
۳۷۴	$A(GPa)$
۲۱	$P_{CJ}(GPa)$
۶۹۳۰	$V_D \left(\frac{m}{s} \right)$
۱.۶۳	$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$
6×10^9	$E_0 \left(\frac{J}{m^3} \right)$
۱	V
۰.۳۸	ω
۰.۹۵	R2
۴.۱۵	R1

۳- صحت سنجی

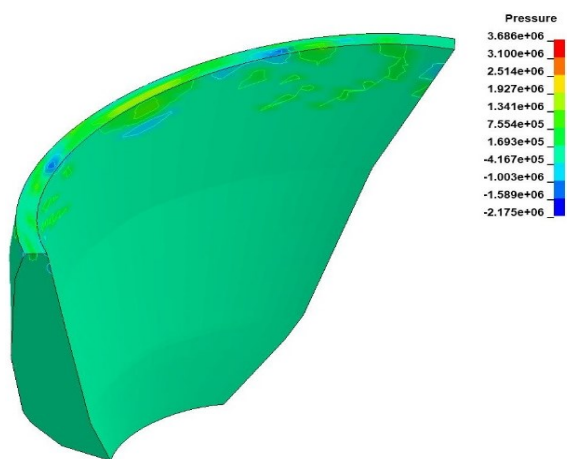
۳-۱- صحت سنجی شبیه سازی سد کارون ۴

جهت راستی آزمایی در مقاله حاضر در ابتدا مقایسه ای بین مدل سازی عددی این مقاله با مدل سازی کلاته [۱۵] در سال ۱۳۹۷ صورت می دهیم. برای شبیه سازی و تحلیل سد قوسی تحت بار انفجار در این مطالعه از مدلسازی اجزاء محدود در نرم افزار LS-DYNA استفاده شده است. روش LBE از روش های بر پایه روش لاگرانژی است که از دیگر نوآوری این تحقیق می باشد. از مزیت های مهم این روش می توان به این مطلب اشاره نمود که زمان رخداد انفجار، زمانی که سازه تحت بار انفجار قرار می گیرد، به علت اینکه انرژی بسیار زیاد آزاد می شود مش های مدلسازی دچار خرابی و پارگی می شود لذا استفاده از این روش این امکان را به ما می دهد که بدون خرابی و پارگی مش های مدل

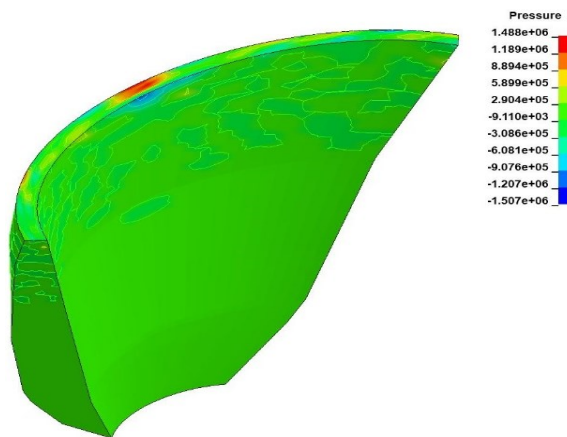
مشخص گردید، مقدار فشار بیشینه شبیه‌سازی در مدل برابر ۷,۳۳ مگاپاسکال شده است و پیک فشار هیدرودینامیکی مقاله مربوط به صحت سنجی با تقریباً اختلاف ۰.۲٪ همراه بوده است و برابر با ۷,۳۲ مگا پاسکال می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۴ کاملاً مشخص است این میزان خطا بیانگر این موضوع است که نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی بسیار نزدیک به مدل مقاله مدلسازی 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 زمان‌های مختلف در ۱/۸، ۴، ۱۰ و ۱۵ میلی‌ثانیه را تحت بار دیگری با وزن خرج ۱۵۰۰ کیلوگرم و فاصله ۵ متری از تاج نشان می‌دهد.



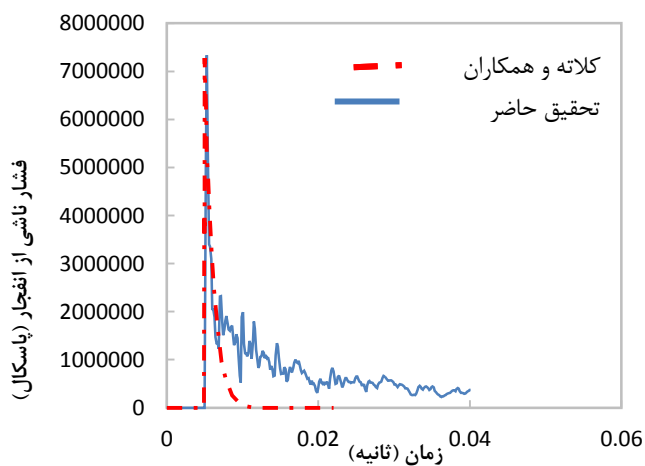
(ب)



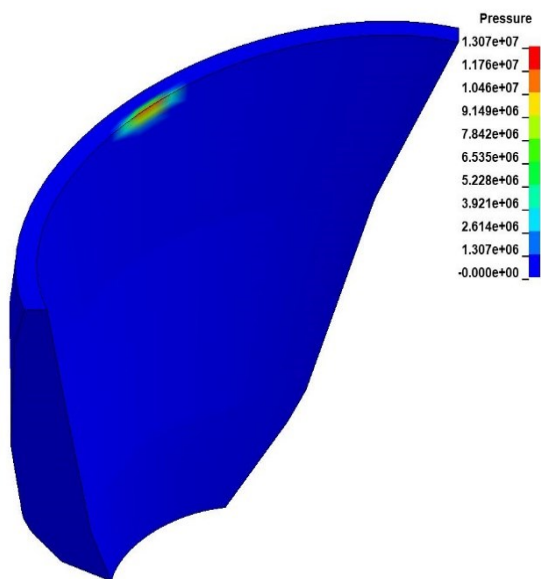
(ج)



(د)



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



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

(الف)

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 اندازه گرفت همچنین در مطالعات گذشته ثابت شده است که لرزش ناشی از انفجار کاملاً بافاصله 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 می باشد که برای توصیف وضعیت خسارت یک سازه استفاده می شود [۱۸، ۱۹]. با این حال مطالعات نشان داده که عامل سرعت ذرات اوج (PPV) به تنهای نشان دهنده میزان خسارت نیست و تخریب سازه ها 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 یک‌زمان تأخیر منفجر شود را در نظر می‌گیرند. حداکثر خرج در هر تأخیر، مهم‌ترین عامل 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 به‌صورت معکوس است و با افزایش فاصله، سرعت ذره کاهش می‌یابد. براین‌اساس، رابطه فاصله و سرعت ذره به‌صورت 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.

$$SR = D \times Q_E^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

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 مقیاس‌گذاری 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 به‌صورت سه مؤلفه‌ای انجام می‌شود. بنابراین دامنه شتاب، سرعت و جابجایی ذره باحالت 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 به‌صورت سه سیگنال لرزه تک مؤلفه یا تک‌محوری مشخص می‌شوند. به‌منظور محاسبه دامنه برآیند سیگنال سه مؤلفه‌ای از عملگر جمع برداری استفاده می‌شود:

$$V_{sum}(t) = \sqrt{Ax(t)^2 + Ay(t)^2 + Az(t)^2} \quad (14)$$

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. دامنه‌های ذکر شده در رابطه ۱ را می‌توان در واحدهای شتاب، سرعت و جابه‌جایی ذره عنوان کرد. حداکثر مقدار دامنه برآیند به‌عنوان حداکثر دامنه ذره انفجار نامیده می‌شود و مقدار خالص دامنه حداکثر را ارائه می‌دهد. بر اساس لرزه‌نگاشت ثبت شده، حداکثر دامنه ذره به‌صورت حداکثر شتاب ذره، حداکثر سرعت ذره و حداکثر جابه‌جایی ذره بیان می‌شود [۲۰]. 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 [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 به‌صورت تعداد نوسان در یک ثانیه تعریف می‌شود. زمان تناوب یک موج نیز پارامتر مهمی است که به‌صورت عکس فرکانس و به‌عنوان مدت‌زمان یک سیکل یا نوسان

منحنی‌های برآورد دامنه یا ارزیابی و کنترل خسارت ناشی از انفجار انجام می‌شود.

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

۳-۴- 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 دست‌نخورده تا کاملاً آسیب‌دیده 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 ترک‌ها، عمق تخریب و دسته‌بندی خسارت به سه حالت تخریب جزئی، متوسط و شدید است. همچنین مشخص گردید بیشترین مقدار تخریب در تاج سد رخ می‌دهد.

برای بررسی پاسخ‌های دینامیکی ساختاری سد در معرض انفجار، به بررسی مطالعات انجام‌شده بر روی سدهای قوسی پرداخته شده است. جهت بررسی آسیب‌پذیرترین محل سد بتنی سه مختصات مبنا در ارتفاع‌های ۰.۷۵، ۱.۵۰ و ۲.۲۵ 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

تعریف می‌شود. امواج حاصل از انفجار به صورت ترکیب پیچیده‌ای از امواج سینوسی هستند که هرکدام از آنها دارای یک فرکانس است؛ بنابراین امواج ناشی از انفجار دارای فرکانس‌های مختلفی هستند. تبدیل فوریته سریع^۱ (FFT) یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های مورد استفاده در پردازش سیگنال و آنالیز داده است. در این مطالعه، اطلاعات فرکانس سیگنال‌های ارتعاش به وسیله تبدیل فوریته 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 می‌شود. این فرکانس غالب در تحلیل‌های تأثیر لرزش بر سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مفهوم فرکانس در تحلیل لرزش‌های ناشی از انفجار به اندازه دامنه مهم است. دامنه به تنهایی فقط شدت یک سیگنال را مشخص می‌کند 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 می‌دهد متوسط فرکانس پاسخ‌های قابل اعتماد تر و دقیق‌تری را به ما می‌دهد که با توجه به مطالعات موجود در این مطالعه نشان‌دهنده درستی این موضوع است [۲۱].

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

که در آن MF_i نشان‌دهنده 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. A_n دامنه در طیف دامنه - فرکانس و فرکانس مربوط به آن f_n می‌باشد.

۲-۴- رفتار سنجی انفجار میدان نزدیک

رفتار سنجی لرزش ناشی از انفجار، یکی از روش‌های 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 بزرگ‌تر 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 می‌شود. رفتار سنجی میدان نزدیک برای اندازه‌گیری سطوح لرزش خالص برای درجه‌بندی

¹ Fast Fourier Transform

گردد. باین وجود این معیار کاملاً دقیق نیست و بررسی دقیق نحوه تأثیر امواج لرزه‌ای و ایجاد خسارت آنها بر سازه‌ها و موارد دریافت‌کننده 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، شبیه‌سازی‌های 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): رده‌بندی خسارت بر اساس حداکثر سرعت ذرات [۲۰].

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

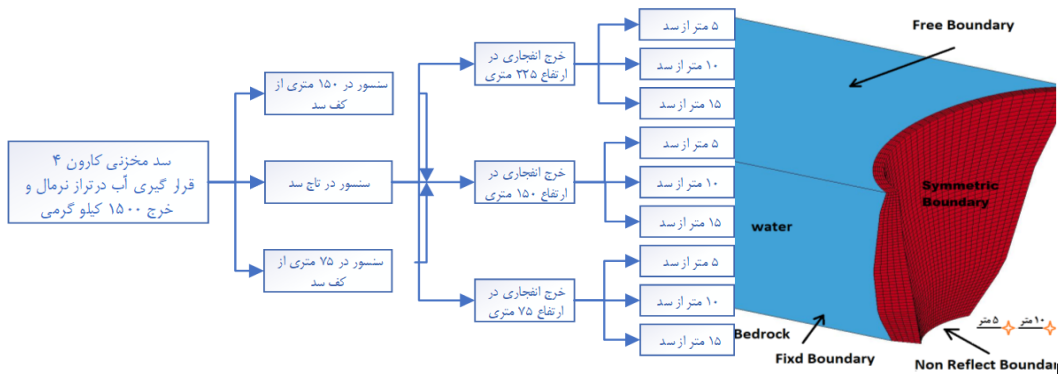
بر اساس طبقه‌بندی آسیب‌پذیری و خسارت در سدهای بتنی دو قوسی که در معرض انفجار حوزه میدان نزدیک قرار دارد، در شکل (۹) و جدول (۸) برخی از نتایج دسته‌بندی خسارت برای سدهای دو قوسی نشان داده شده است. در این مطالعه با مدل‌سازی در دو حالت به شرح ذیل به آنالیز PPV پرداخته شده است. در شکل (۹) و جدول (۸) حالت 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 بر اساس سه 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 ۲ متر، تا ۵ متر و هر ۵ متر در هر مرحله تا ۲۵ متر افزایش می‌یابد 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.

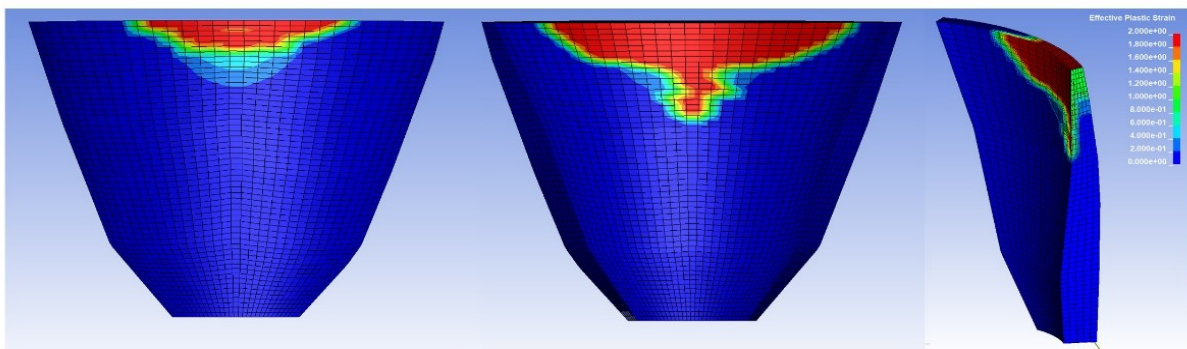
انفجار در فاصله عرضی ۱۰ متری از سد بتنی در ارتفاع ۲۲۵ متری به مقدار ۳۷ درصد بیشتر از ارتفاع ۱۵۰ متری و ۱۹ درصد نسبت به ارتفاع ۷۵ متری بیشتر بدست آمده است. همچنین این مقدار در فاصله عرضی ۱۵ متری در ارتفاع ۲۲۵ متری به مقدار ۲۲ درصد نسبت به حالتی که ارتفاع سد ۱۵۰ متر می‌باشد افزایش داشته است. نتایج نشان 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 ان تی از سد بتنی در ارتفاع ۷۵ متری حدود ۶۲/۵٪ از سرعت بیشینه 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 تی ان تی از سد حدود ۶۷٪ و با سه برابر کردن فاصله تی ان تی از سد ۷۵٪ کاهش یافته است و در ارتفاع ۲۲۵ متری با دو و سه برابر کردن فاصله تی ان 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 بدلیل حداکثر درجه خسارت و به عنوان ضعیف‌ترین پیوند سد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۴ - طبقه‌بندی مقدار خسارت

مشخص است که آسیب سد، ناشی از انفجار تا حدودی با PPV ارتباط دارد. به‌طور کلی، معیارها و استانداردهای لرزش موجود به‌منظور اندازه‌گیری 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، باتوجه به اهمیت تأثیر فرکانس بر خسارات ناشی از لرزش انفجار میدان نزدیک، استانداردهایی بر پایه PPV و فرکانس ارائه شده‌اند. رده‌بندی خسارت بر اساس PPV می‌تواند به سه دسته تقسیم کرد. بدین ترتیب PPV سد بتنی ۰/۱۵ متر بر ثانیه مرز بین آسیب جزئی = متوسط، حداکثر سرعت ذرات ۰/۲۲ متر بر ثانیه برای مرز بین آسیب متوسط و خسارت شدید مقرر می‌



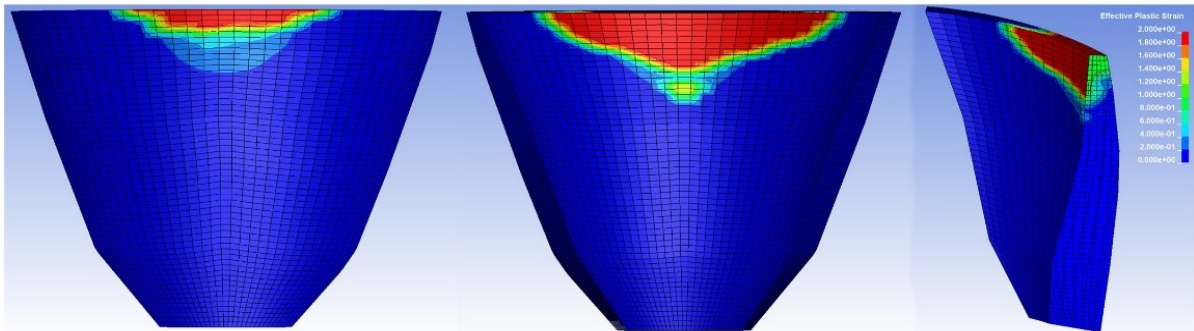
شکل (۶): حالت های مورد بررسی در تحقیق مدل سازی جهت یافتن محل آسیب پذیر سد بتنی



بالا دست

پایین دست

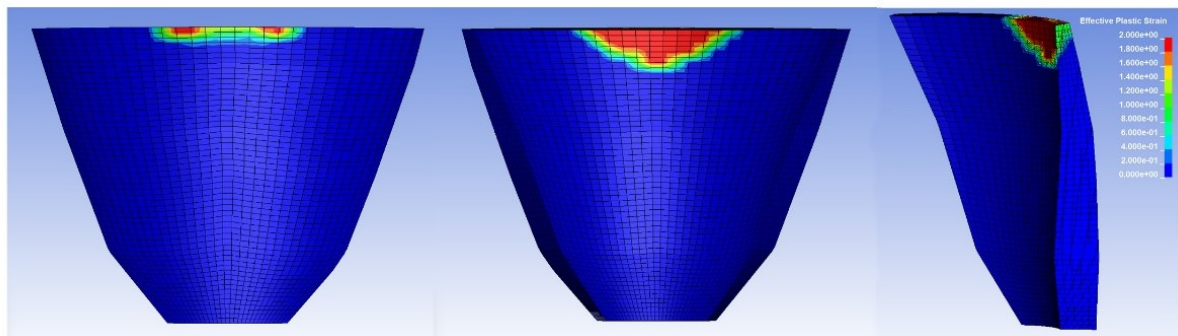
نمای جانبی (R=5 m , h=225, q= 1200 Kg) الف



بالا دست

پایین دست

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

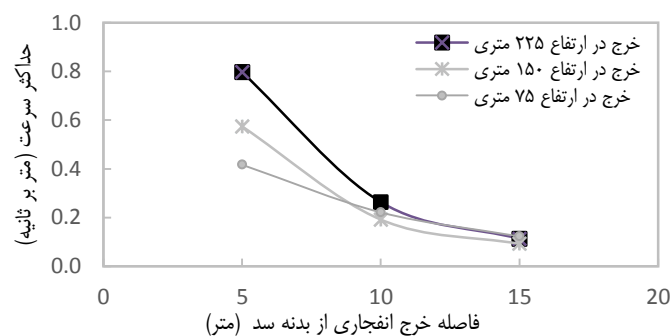


بالا دست

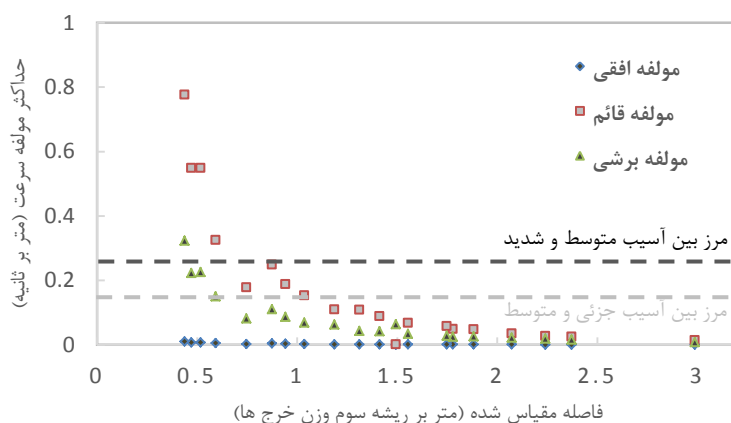
پایین دست

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

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



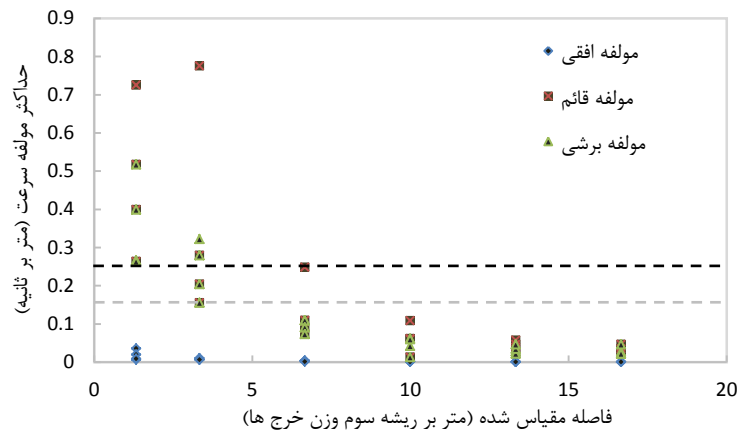
شکل (۸): سرعت اوج ذرات سد بتنی



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	۲۲۵	۳۰۰	۵	۰/۰۰۲	۰/۱۱۲	۰/۰۷۰	-۰/۰۰۲	-۰/۱۷۸	-۰/۰۸۱	۰/۰۰۲	۰/۱۷۸	۰/۰۸۱	آسیب متوسط
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	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			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		۱۲۰۰	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			۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۳۹	۰/۰۲۴	۰/۰۰۰	-۰/۰۴۸	-۰/۰۲۶	۰/۰۰۰	۰/۰۴۸	۰/۰۲۶	آسیب جزئی
۱۷		۱۵۰۰	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			۱۵	۰/۰۰۱	۰/۰۸۴	۰/۰۴۳	-۰/۰۰۱	-۰/۱۰۸	-۰/۰۴۲	۰/۰۰۱	۰/۱۰۸	۰/۰۴۳	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	-۰/۳۴۹	-۰/۱۱۰	۰/۰۰۴	۰/۳۴۹	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	-۰/۳۷۵	-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			۲۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰	-۰/۰۱۴	-۰/۰۲۲	۰/۰۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۲۲	آسیب جزئی
۱۹		۱۹۵	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

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

به‌طور کلی، با کاهش وزن خرج یا افزایش فاصله خرج از سد بتنی، سطح آسیب کاهش می‌یابد. با این حال، استراتژی طبقه‌بندی خسارت به‌طور مستقیم مبتنی بر آنالیز حالت آسیب است که ارتباط نزدیکی با ذهنیت محقق دارد و کشف آسیب کلی یک

$$D = 3.8687 \ln(Q) - 16.938 \quad (۱۷)$$

برای مرز خسارت متوسط و شدید

$$D = 1.8656 \ln(Q) + 4.0124 \quad (۱۸)$$

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 شود خسارت بتن بدنه سد شدید می‌باشد و با وزن ۳۰۰ 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 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:

$$PVS = 1.3 \times 10^{-3} MF - 0.026 \quad (۱۹)$$

برای مرز خسارت متوسط و شدید

$$PVS = 2.5 \times 10^{-3} MF - 0.3234 \quad (۲۰)$$

برای مرز خسارت متوسط و جزئی

نزدیک میدان استفاده می‌کنیم. حداکثر مؤلفه سرعت ذرات شاخص اصلی است که برای درک لرزش منفجر شده مورد استفاده قرار می‌گیرد که به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی ایمنی سازه در زیر انفجار مورد استفاده قرار گرفته است.

۵- سرعت و ارتعاش در انفجار

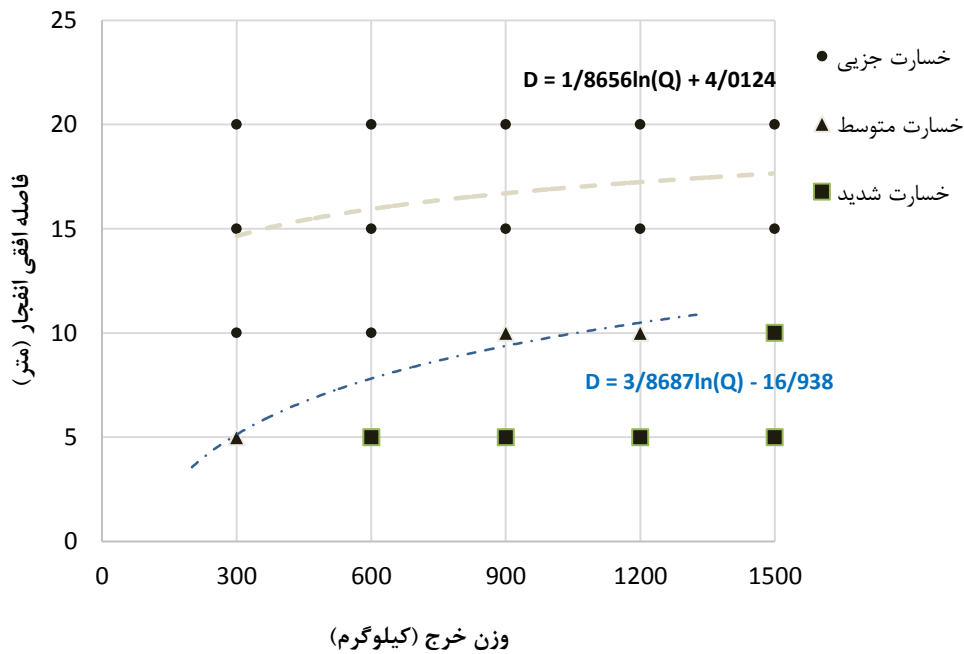
۵-۱- ارتعاش ناشی از انفجار در سد

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 به‌عنوان فرکانس غالب معرفی می‌شود. این فرکانس غالب در تحلیل‌های تأثیر لرزش برسازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد مفهوم فرکانس متوسط در تحلیل لرزش‌های ناشی از انفجار در رابطه (۱۶) به‌اندازه دامنه مهم است.

بر اساس تعاریف فوق، PVS و MF برای هر سناریو انفجار را می‌توان به راحتی به دست آورد. به‌علاوه، 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. به‌منظور 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 به‌طور کلی، معیارهای طیف پیشنهادی برای وزن بار و فاصله ایستادن را می‌توان به شرح زیر بیان کرد.

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

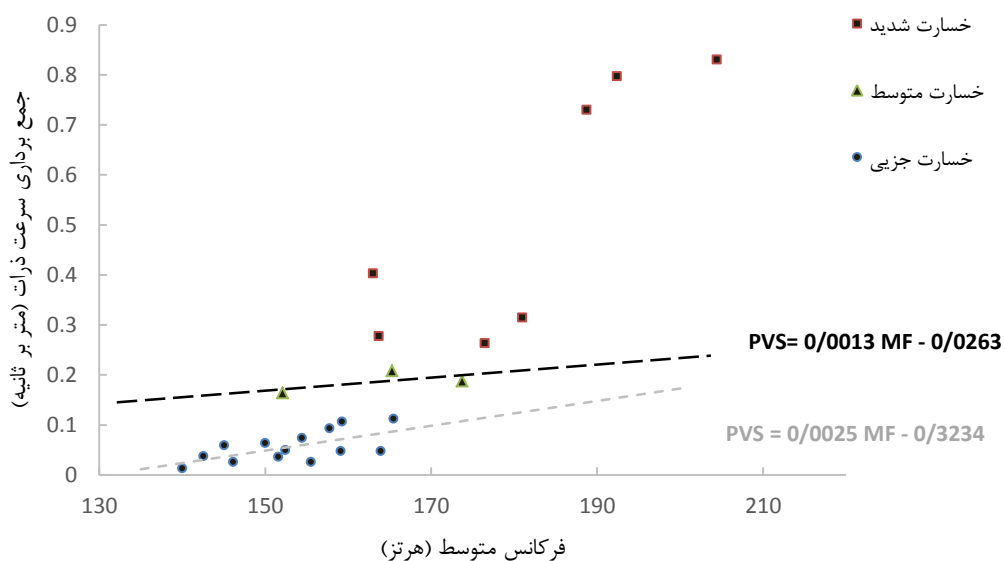
شماره مدل	ارتفاع (متر)	وزن خرج (کیلوگرم)	فاصله از سد (متر)	فشار بیشینه (مگاپاسکال)	کشش بیشینه (مگاپاسکال)	جمع برداری سرعت ذره (متر بر ثانیه)	فرکانس متوسط (هرتز)	درجه خسارت
۱	۲۲۵	۳۰۰	۵	۶/۲۴	-۰/۷۰	۰/۱۸	۱۹۵/۶۳	آسیب متوسط
۲			۱۰	۰/۳۲	-۱/۵۰	۰/۰۶	۱۴۸/۵۹	آسیب جزئی
۳			۱۵	۰/۵۳	-۰/۰۹	۰/۰۳	۱۴۶/۳۲	آسیب جزئی
۴			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): طبقه بندی درجه بندی 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	۲۰۴/۴۵۲	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	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	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	۲	۱/۵۱	-۱/۲۴	۰/۳۷۷	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

۸- مراجع

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

چهار رابطه اخیر فقط برای سدی که تحت تأثیر موج شوک انفجار ناشی از انفجار در هوا قرار دارد مناسب است. به منظور 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 بیشینه 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 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 به دست 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.

- [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.
- 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.