



Research Article

Title: Numerical Analysis of Blast-Induced Deformation and Stability in Earthen Dams: A Case Study of Alavian Dam, Maragheh, Iran

Mohammad Mehdi Ahmadi¹, Babak Alinejad^{2*}, Hamzeh Ahmadi³

1- MS in Water and Hydraulic Structural Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

2*- Assistant Professor, Department of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

3 - Assistant Professor, Department of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

Received: 02 September 2025; Revised: 24 August 2025; Accepted: 30 August 2025; Published: 22 November 2025

Abstract

Explosive events generate sudden shockwaves, dynamic pressure, and tensile forces that propagate through structures, posing critical risks to dam integrity. While historical incidents highlight the vulnerability of dams to explosive attacks, existing research predominantly focuses on concrete dams, with limited attention to earthen dams—despite their global prevalence, particularly in regions like Iran. This study addresses this gap by conducting a comprehensive numerical investigation of blast-induced deformation and stability in earthen dams using Abaqus/Explicit finite element software. A three-dimensional nonlinear dynamic model of the Alavian Dam in Maragheh, Iran, was developed to simulate surface explosions (500, 1000, and 1500 kg TNT equivalents) over a 2-second duration, accounting for soil-structure interaction and shockwave propagation through heterogeneous media (soil, water, and air). Key findings reveal significant mesh sensitivity in the simulations, emphasizing the necessity of refined meshing near the blast epicenter. Deformation patterns exhibited a direct correlation with explosive mass, peaking at the dam's crown (maximum displacement: 2.1 m for 1500 kg) and diminishing toward the toe (0.3 m). The results underscore the critical role of localized material plasticity and energy dissipation mechanisms in mitigating blast effects. These insights provide actionable guidelines for enhancing blast resistance in earthen dam design, including optimized geometry, reinforcement strategies, and sensor placement for early threat detection. This work establishes a benchmark for future studies on geostructural resilience under extreme dynamic loading.

Keywords: *Blast-induced loading, Nonlinear dynamic response, Coupled Lagrangian-Eulerian (CEL) analysis, Earthen dam stability, Finite element modeling (FEM).*

Cite this article as: Ahmadi M. M., Alinejad B., Ahmadi H. (2025). 'Numerical Analysis of Blast-Induced Deformation and Stability in Earthen Dams: A Case Study of Alavian Dam, Maragheh, Iran', Civil and Project, 7(9), e228068. doi: <https://doi.org/10.22034/cpj.2025.542150.1393>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2025 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: alinejad@maragheh.ac.ir



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

بررسی عددی پایداری ناشی از تغییر شکل سدهای خاکی، تحت بارگذاری انفجاری در بدنه سد، مطالعه موردی در سد علویان مراغه

محمد مهدی احمدی^۱، بابک علی نژاد^{۲*}، حمزه احمدی^۳

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران مهندسی آب وسازه های هیدرولیکی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.
- *۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.
- ۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

تاریخ دریافت: ۲۸ تیر ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۰۲ شهریور ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۰۸ شهریور ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ آذر ۱۴۰۴

چکیده

انفجارها به عنوان رویدادهای دینامیکی با ماهیت ناگهانی، امواج شوک، فشارهای انفجاری و تنش های کششی شدیدی ایجاد می کنند که می توانند پایداری سازه های ممانند سدها را به شدت تهدید نمایند. با وجود سابقه وقوع انفجار در سدها در طول تاریخ، مطالعات پیشین عمدتاً بر سدهای بتنی متمرکز بوده اند، در حالی که پژوهش ها در مورد سدهای خاکی - که سهم غالب سدهای جهان به ویژه در ایران را تشکیل می دهند - بسیار محدود است. این پژوهش با هدف پر کردن این خلا، به بررسی عددی اثرات بارگذاری انفجاری بر تغییر شکل و پایداری سدهای خاکی با استفاده از روش اجزای محدود در نرم افزار آباکوس/اکسپلیسیت می پردازد. در این راستا، مدل سه بعدی غیرخطی سد خاکی علویان در مراغه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه و انتشار امواج ضربه ای در محیط های ناهمگن (خاک، آب و هوا) توسعه داده شد. شبیه سازی انفجارهای سطحی با معادل تی ان تی ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم در بازه زمانی ۲ ثانیه انجام گردید. نتایج نشان دهنده حساسیت بالای مدل سازی به اندازه المان های مش، به ویژه در ناحیه کانون انفجار است. الگوی تغییر شکل سد رابطه مستقیمی با جرم مواد منفجره دارد، به طوری که بیشینه جابه جایی (۲٫۱ متر برای بار ۱۵۰۰ کیلوگرمی) در میانه تاج سد و کمینه آن (۰٫۳ متر) در ناحیه پنجه سد رخ می دهد. همچنین، تجزیه و تحلیل مکانیسم های اتلاف انرژی و رفتار پلاستیک موضعی خاک، بینش های کلیدی برای طراحی سدهای مقاوم تر در برابر انفجار ارائه می کند. این یافته ها مبنایی برای تدوین راهبردهای بهینه سازی هندسه سد، انتخاب مصالح و استقرار حسگرهای پایش آسیب در سدهای خاکی محسوب می شوند.

کلمات کلیدی: بارگذاری ناشی از انفجار، پاسخ دینامیکی غیرخطی، تحلیل کوپلشده لاگرانژی-اولری (CEL)، پایداری سدهای خاکی، مدل سازی المان محدود (FEM).

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: alinejad@maragheh.ac.ir

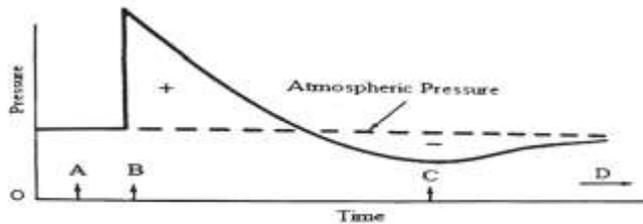
۱- مقدمه

انفجار به یک افزایش شدید در حجم و آزاد شدن ناگهانی انرژی می‌گویند که معمولاً با افزایش دما و آزاد شدن گاز همراه است. ماهیت تصادفی دارد که با ایجاد اثرات شوک ناگهانی، امواج فشاری و کشش در محیط، سازه‌ها و موانع موجود در مسیر خود را تحت تأثیر قرار می‌دهد. طراحی یک سد بر مبنای بارهای انفجاری به صرفه نیست ولی می‌توان با بررسی اثرات انفجار و قدرت تخریب آن ملاحظات را در ساخت سدها در نظر گرفت تا خسارات احتمالی به حداقل ممکن برسد.

با توجه به پیشرفت نرم‌افزارهای اجزای محدود در سال‌های اخیر و پژوهش‌های عددی انجام شده که بیشتر در زمینه انفجار در سدهای بتنی می‌باشد نیاز به پژوهش در سدهای خاکی که تعداد قابل توجهی از سدها را تشکیل داده ضروری است که بیشتر توسط نرم‌افزار اجزای محدود انسیس انجام شده است، از این رو نیاز به مطالعه و نوآوری در این خصوص، توسط نرم افزار آباکوس اکسپلیسیت به شدت حس می‌شود تا دقت و صحت، نحوه پردازش و نتایج خروجی آن مورد بحث و بررسی قرار گیرد، در این پژوهش که جزو اولین پژوهشها می‌باشد که انفجار در سد خاکی توسط نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده، صحت‌سنجی با دقت بالا و مقایسه با نمونه انفجار واقعی در خاک انجام شده است، که با توجه به پرهزینه بودن انفجار واقعی و خطرات آن، می‌تواند معیاری برای سنجش قدرت تخریب انفجار در سد خاکی یا هر نوع خاک دیگر باشد.

1-1- شاخص های امواج انفجار

در شکل (۱) نمودار فشار-زمان امواج انفجار عادی نشان داده شده است. در زمان B بعد از شروع انفجار، فشار به طور ناگهانی به بیشترین مقدار فشار می‌رسد. این افزایش فشار باعث اعمال نیرویی برابر حاصل ضرب افزایش فشار در مساحت صفحه موج انفجار می‌شود اما این شرایط پایدار نیست و افزایش فشار به طور ناگهانی شروع به کم شدن می‌کند. (Kinney, Graham)



شکل 1- نمودار فشار - زمان برای یک موج انفجار (کینی و گراهام، ۱۹۸۵)

1-2- ویژگی های انفجار

انفجار پدیده لحظه‌ای است که در اثر آزادسازی ناگهانی مقدار زیادی انرژی به وجود می‌آید. منشأ واقعی این انرژی می‌تواند باروت، تی‌ان‌تی، بخار متراکم شده در بویلر یا انفجار اتمی باشد. در هر صورت رهاسازی انرژی باید ناگهانی باشد و یک محیط پرانرژی در اطراف محل انفجار شکل گیرد، این انرژی متمرکز به سرعت از راه‌های مختلف مانند تشعشع حرارتی یا یونیزاسیون، پرتاب ترکش‌ها، موج انفجاری پخش می‌شود. قدرت یک انفجار براساس مقدار انرژی که آزاد می‌شود بیان می‌گردد. پس می‌توان آن را با واحدهای انرژی مانند ژول بیان کرد. برای مقایسه قدرت انفجاری مواد منفجره باید مبنایی در نظر گرفت یکی از مبناهای اساسی، انرژی آزاد شده در انفجار ماده منفجره TNT است، دلیل انتخاب این ماده درصد خلوص، راحتی در اندازه‌گیری و در دسترس بودن آن است. که از انفجار یک گرم TNT، 4610 ژول یا 1100 کالری انرژی آزاد می‌شود. (Kinney, Graham)

3-1- انفجار سطحی

انفجاری که در سطح زمین و یا بسیار نزدیک به سطح زمین رخ دهد را انفجاری سطحی می‌گویند. انتشار موج در انفجار سطحی به صورت نیم‌کره است و مستقیماً به سازه برخورد می‌کند. همچنین انتشار امواج حاصل از انفجار سطحی در زمین نیز رخ می‌دهد.

4-1- رابطه کینی و گراهام

کینی و گراهام^۱ برای محاسبه بیش فشار رابطه (۱) را ارائه نمودند این رابطه بیش فشار را به عنوان تابع فاصله مقیاس شده Z نشان می‌دهد این فاصله مقیاس‌بندی شده توسط رابطه (۲) بیان می‌شود که در آن W وزن معادل TNT برای ماده منفجره استفاده شده است، R فاصله از مرکز ماده منفجره و $\frac{p}{p_a}$ نسبت بیشینه فشار به فشار اتمسفر می‌باشد. (Kinney, Graham)

$$Z = \frac{R}{w^{\frac{1}{3}}} \quad (1)$$

$$\frac{p}{p_a} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35} \right)^2}} \quad (2)$$

5-1- رابطه هنریخ

هنریخ^۲ مجموعه معادلات تجربی زیر را برای محاسبه بیش فشار برای بازه‌های مختلف Z به دست آورد که در آن Z مطابق رابطه (۲-۱۷) محاسبه می‌شود. (زمانی، ۱۳۹۴)

$$\frac{p}{p_a} = \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \quad 1 \leq Z \quad (3)$$

$$\frac{p}{p_a} = \frac{1.4072}{Z} + \frac{0.555}{Z^2} + \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \quad 0.05 \leq Z \leq 0.3 \quad (4)$$

$$\frac{p}{p_a} = \frac{6.194}{Z} + \frac{0.626}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3} \quad 0.3 \leq Z \leq 1 \quad (5)$$

۲- پیشینه پژوهش

در سال ۱۹۶۴ لیاخوف کتابی تحت عنوان " اصول دینامیک انفجار در خاک و محیط مایع " منتشر کرد. در سال ۱۹۸۵ گزارشی از طرف دپارتمان داخلی مرکز تحقیقات و مهندسی ایالات متحده در زمینه تأثیر انفجار بر میزان تغییرات فشار آب منفذی در سدها تهیه شده است. (ژانگی وانگ و یانگ لو طی سالهای ۲۰۰۳ الی ۲۰۱۱)، تحقیقاتی را در زمینه تأثیر موقعیت و میزان شارژ انفجاری در خاک‌های با درجه اشباع متفاوت انجام داده‌اند. (آمبروزینی و لوجیونی، ۲۰۰۴)، آزمایشهایی به صورت مقیاس بزرگ انجام داده و با مقایسه نتایج عددی روابطی را برای ابعاد و ویژگی‌های گودال ایجاد شده ناشی از انفجار ضمن توجه به نوع آن ارائه دادند. (لوجیونی و همکاران، ۲۰۰۶)، در پژوهشی به ارزیابی بار انفجار با استفاده از هیدروکدها پرداختند، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دقت نتایج عددی، به شدت به اندازه مش استفاده شده برای تجزیه و تحلیل بستگی دارد. (لی و همکاران، ۲۰۰۷)، در پژوهشی به مطالعه تحلیل دینامیکی سدهای خاکی و خاکریزها تحت نیروی زلزله پرداختند. آزمایشی را روی سد خاکی برای بررسی اثر مواد منفجره انجام دادند و گودال ایجاد شده را با نتایج حاصل در زمین مسطح مقایسه کردند. (وندیت و همکاران، ۲۰۱۰) به بررسی و مدل‌سازی فیزیکی آسیب‌پذیری سد بتنی وزنی در برابر انفجار پرداخته و روابط عددی جهت محاسبه بارهای انفجاری را ارائه نمودند. (سازمان مهندسان ارتش آمریکا، ۲۰۰۱) به بررسی اثر انفجار بر روی سدهای خاکی

^۱ Kinney, Graham
^۲ Henrych

و تخمین میزان خرابی‌ها پرداختند و به این نتیجه رسیدند ارزیابی مقاومت و عملکرد سدهای خاکی در برابر اقدامات انفجاری نه تنها به میزان شارژ انفجاری وابسته خواهد بود بلکه به الگو و نوع اقدام آتشکاری و یا احیاناً نوع عملیات انفجاری خرابکارانه، محل اقدام انفجاری (تاج سد، پایین دست، بالادست) و نوع مقطع سد نیز بستگی خواهد داشت. (ایک سوها، ۲۰۱۳) به ارزیابی سرعت موج برشی مواد و مصالح سازنده سدخاکی با استفاده از ارتعاش حاصل از انفجار مصنوعی و بررسی کاربرد آن پرداخت و توانست تاریخچه زمانی شتابگیری در محفظه سنگ مجاور نقطه انفجار و در تاج سد را اندازه‌گیری و فرکانس اصلی سد تحت تحلیل تاریخچه شتاب اندازه‌گیری شده را محاسبه نماید. از مقایسه بین فرکانس‌های اصلی محاسبه شده توسط تحلیل عددی و رکوردهای اندازه‌گیری شده، سرعت موج برشی که از نزدیک با ماژول‌های برشی مرتبط است، قابل تخمین خواهد بود. (دی و همکاران، ۲۰۱۳) در پژوهشی به مطالعه تحلیل دینامیکی سدهای خاکی و خاکریزها تحت اثر نیروی زلزله با شبیه‌سازی مدل سه بعدی سدخاکی در نرم افزار Ansys پرداختند. آنها با تغییر وزن مواد منفجره TNT به مقایسه نتایج این مدل و مدل تجربی ساخته شده پرداختند و به هم‌خوانی قابل توجهی دست یافتند. (حسین زاده، ۱۳۹۴)، با شبیه‌سازی سدخاکی با هسته رسی در نرم‌افزار Ansys-Autodyn و شبیه‌سازی انفجار روی تاج سد، تغییر مکان پی و گودال ناشی از انفجار و همچنین نقاط دارای پتانسیل شکست و ترک را بررسی کرد. (ابراهیمی خسروشاه، ۱۳۹۵)، اثرات انفجار در هوای آزاد را بر روی سدخاکی با هسته رسی را مورد مطالعه قرار داد و اثر بار انفجاری را در نرم‌افزار Abaqus بررسی نمود. نتایج نشان داد که هرچه فاصله انفجار کمتر باشد جابه‌جایی تاج سد و تنش ایجاد شده در بدنه سد بیشتر می‌شود. (Li et al., 2018) در پژوهشی به شبیه‌سازی عددی پاسخ دینامیکی سدهای خاکی تحت بار انفجاری با استفاده از روش‌های پیشرفته مانند روش ذرات (SPH hydrodynamics) پرداختند. این مطالعه نشان داد که روش SPH قادر است تغییر شکل‌های بزرگ و پیوسته ناشی از انفجار را با دقت بالاتری نسبت به روش‌های مرسوم اجزای محدود مدل‌سازی کند. نتایج آنها بر اهمیت در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه و انتشار امواج تنش در محیط متخلخل تأکید دارد.

(Wang et al., 2020) به بررسی سیستماتیک اثرات انفجارهای زیرسطحی بر پایداری سدهای خاکی با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA پرداختند. آنها پارامترهای کلیدی از جمله عمق انفجار، فاصله از بدنه سد و میزان مواد منفجره را مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که انفجار در عمق متوسط آب (نسبت به سطح و بستر) می‌تواند به دلیل تمرکز انرژی، بیشترین آسیب را به پایین دست سد وارد کند.

(Koneshloo et al., 2021) یک مطالعه عددی جامع روی رفتار سدهای خاکی تحت بارگذاری انفجاری با در نظر گرفتن اثر فشار آب منفذی انجام دادند. آنها از یک مدل (Coupling) بین تحلیل سازه‌ای و جریان سیال در نرم‌افزار Abaqus استفاده کردند. نتایج این پژوهش به‌طور کمی نشان می‌دهد که چگونه افزایش سریع فشار منفذی ناشی از انفجار می‌تواند منجر به کاهش سریع مقاومت برشی و در نهایت گسیختگی روانگرایی در بخش‌های اشباع بدنه سد شود.

(Guan et al., 2022) به توسعه یک مدل عددی برای پیش‌بینی اندازه و هندسه گودال انفجار در سدهای خاکی با استفاده از روش المان مجزا (Discrete Element Method - DEM) پرداختند. این مدل قادر است فرآیند گسیختگی، پرتاب ذرات و تشکیل گودال را با جزئیات بسیار خوبی شبیه‌سازی کند. کار آنها تأیید می‌کند که دانه‌بندی مصالح سد و تراکم اولیه آن تأثیر بسزایی در اندازه نهایی حفره انفجار دارد.

(Zheng & Tannant, 2023) در یک مقاله مروری جامع، پیشرفت‌های اخیر در مدل‌سازی عددی اثرات انفجار بر سازه‌های ژئوتکنیکی را جمع‌بندی کردند. آنها بر این نکته تأکید دارند که ادغام یادگیری ماشین (Machine Learning) با شبیه‌سازی‌های عددی کلاسیک، به عنوان یک پارادایم نوظهور، می‌تواند دقت و سرعت پیش‌بینی آسیب‌های ناشی از انفجار را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. این منبع برای نشان دادن جهت‌گیری آینده تحقیقات در این حوزه بسیار مفید است.

اکثر مطالعات موجود، از جمله تحقیقات (Wang et al., 2020) و (Koneshloo et al., 2021)، بر روی تحلیل اثرات آبی انفجار (مانند تشکیل گودال، انتشار موج تنش و ایجاد فشار آب منفذی لحظه‌ای) متمرکز شده‌اند. همچنین، مطالعاتی مانند (Guan et al., 2022) به دقت در شبیه‌سازی مکانیزم گسیختگی موضعی پرداخته‌اند. با این حال، ارزیابی پایداری کلی سازه

سد پس از وقوع انفجار و تغییر شکل‌های بزرگ ناشی از آن، که منجر به از دست رفتن پایداری استاتیکی می‌شود، به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته است. به عبارت دیگر، سؤال اسلاتری که هنوز پاسخ جامعی به آن داده نشده این است: «آیا سد پس از تحمل یک انفجار و تغییر شکل‌های اولیه، همچنان می‌تواند پایداری بلندمدت خود را حفظ کند یا خیر؟»

این مقاله قصد دارد تا دقیقاً همین خلأ را پر کند. مطالعه حاضر با به کارگیری یک مدل عددی پیشرفته و جامع در نرم‌افزار ABAQUS، به بررسی عددی پایداری کلی سد خاکی علویان مراغه پس از وقوع انفجار در بدنه می‌پردازد. نوآوری این پژوهش در آن است که تنها به شبیه‌سازی فاز دینامیکی انفجار اکتفا نکرده و با انجام یک تحلیل پایداری (مانند استفاده از روش کاهش تنش (Shear Strength Reduction (SSR)) بر روی پیکربندی تغییر شکل یافته سد پس از انفجار، پایداری سد را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. این رویکرد به‌طور کمی نشان می‌دهد که چگونه یک انفجار موضعی می‌تواند منجر به کاهش مقاومت برشی و در نهایت گسیختگی کلی در بدنه سد شود.

۳- روش تحقیق

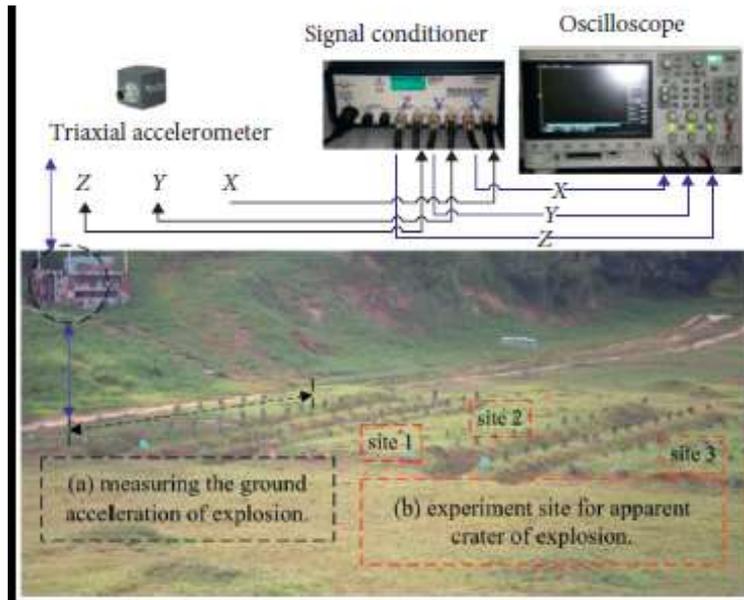
در این تحقیق بررسی پارامتری (عددی) تاثیر انفجار داخل آب مخزن به وسیله روش اجزای محدود، مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. از نرم‌افزار Abaqus برای شبیه‌سازی و تحلیل دینامیکی مبتنی بر روش اجزای محدود لاگرانژی اویلری و روش حل صریح استفاده شده است. باصحت سنجی نرم افزار و معرفی مدل شبیه‌سازی شده و همچنین مصالح استفاده شده در شبیه‌سازی، نتایج و تأثیر تغییرات عمق مواد منفجره، فاصله مواد منفجره از سد و جرم مواد منفجره بر تغییر شکل، تنش‌ها و فشار وارده به سد خاکی مورد بررسی قرار گرفته است.

3-1-صحت‌سنجی نرم‌افزار آباکوس

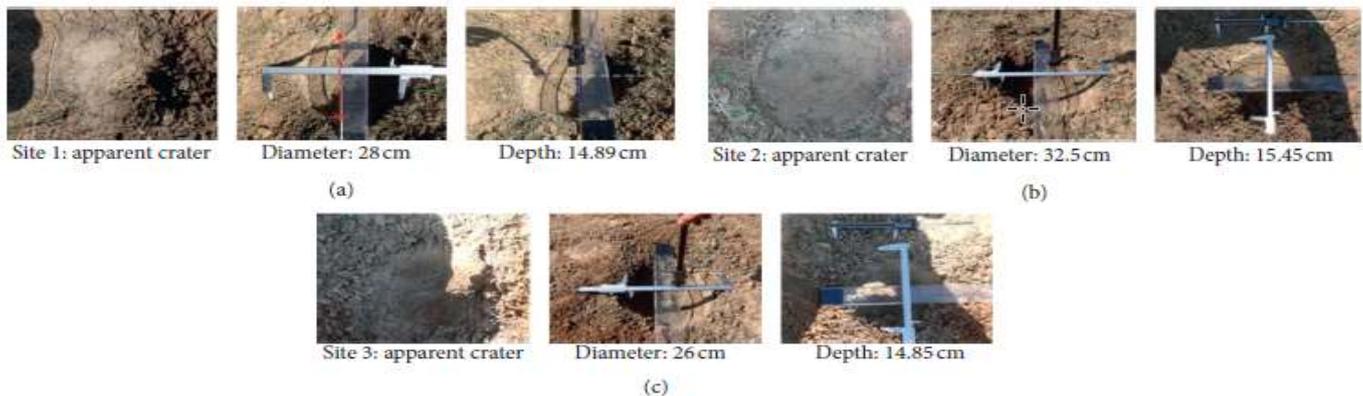
در این بخش برای نشان دادن درستی تحقیق انجام شده و صحیح بودن تحلیل بار انفجار توسط نرم‌افزار آباکوس، مدل ارائه شده در مقاله (Iau-Teh Wang) که به مقایسه نتایج انفجار واقعی در خاک و شبیه‌سازی همان انفجار توسط نرم‌افزار آباکوس پرداخته است مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

3-2-آزمایش‌های تجربی

این مطالعه، آزمایش‌ها در محل و تجزیه و تحلیل آنالیز عددی را برای بررسی اثرات تغییر شکل و تخریب انفجارها بررسی نمود. اثرات انفجار بر اثر دهانه خاک با مواد منفجره که به صورت عمودی بر روی زمین قرار گرفته بودند آزمایش شد. شکل (۲) پیکربندی محل آزمایش برای اندازه‌گیری شتاب زمین و دهانه ظاهری برای اندازه‌گیری شتاب زمین و دهانه ظاهری انفجار را نشان می‌دهد. این مطالعه برای به دست آوردن ضرایب تجربی شتاب زمین برای تأیید صحت آنالیز عددی استفاده کرد. در آزمایش انفجار روی زمین، ۲۲۷ گرم (۰٫۵ پوند) ماده منفجره TNT به صورت عمودی روی زمین قرار داده شد. شتاب‌سنج‌های سه محوره در فاصله‌های ۳۵۰ و ۵۰۰ سانتی‌متری از مرکز انفجار چیده شدند تا شتاب‌های زمین را در جهت‌های X، Y و Z تجزیه و تحلیل کنند. شتاب‌سنج‌ها شتاب‌های زمینی ارتعاش انفجار را اندازه‌گیری کردند. سیگنال‌ها از طریق یک اسیلوسکوپ و به یک تنظیم کننده سیگنال برای انتقال و ذخیره داده‌ها رفتند. ابزار آزمایشی شامل شتاب‌سنج‌های سه‌محوره، سیستم‌های منبع تغذیه، اسیلوسکوپ‌ها، تهویه‌کننده‌های سیگنال و سیستم‌های جمع‌آوری داده بود. شکل (۳) مقادیر گوادل ایجاد شده را نشان می‌دهد. (Iau-Teh Wang, 2022)



شکل ۲- پیکربندی مواد منفجره در آزمایش میدانی. (a) برای اندازه گیری شتاب زمین. (b) برای آزمایش اثر ظاهری دهانه انفجار (Iau-Teh Wang, 2022)

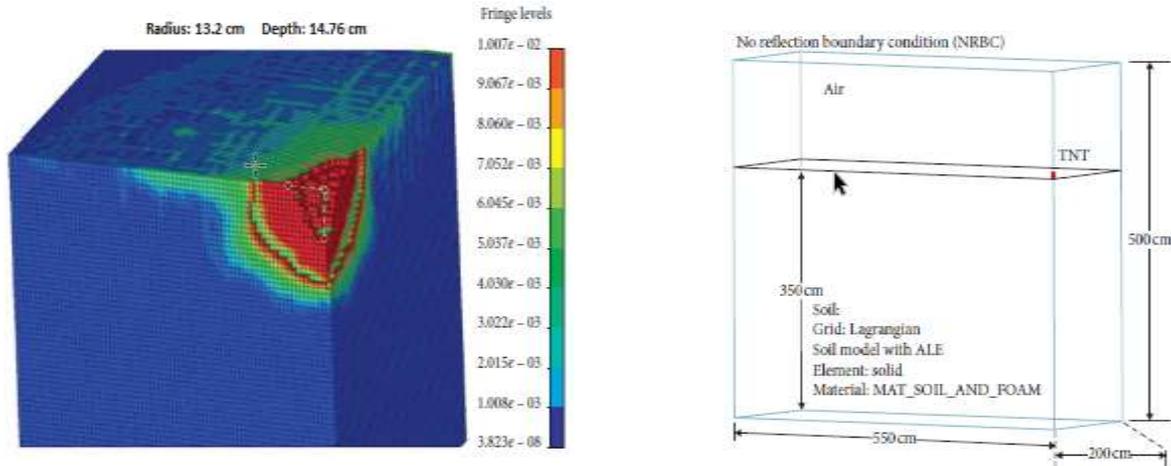


شکل ۳- دهانه های ظاهری در آزمایش های انفجار (Iau-Teh Wang, 2022)

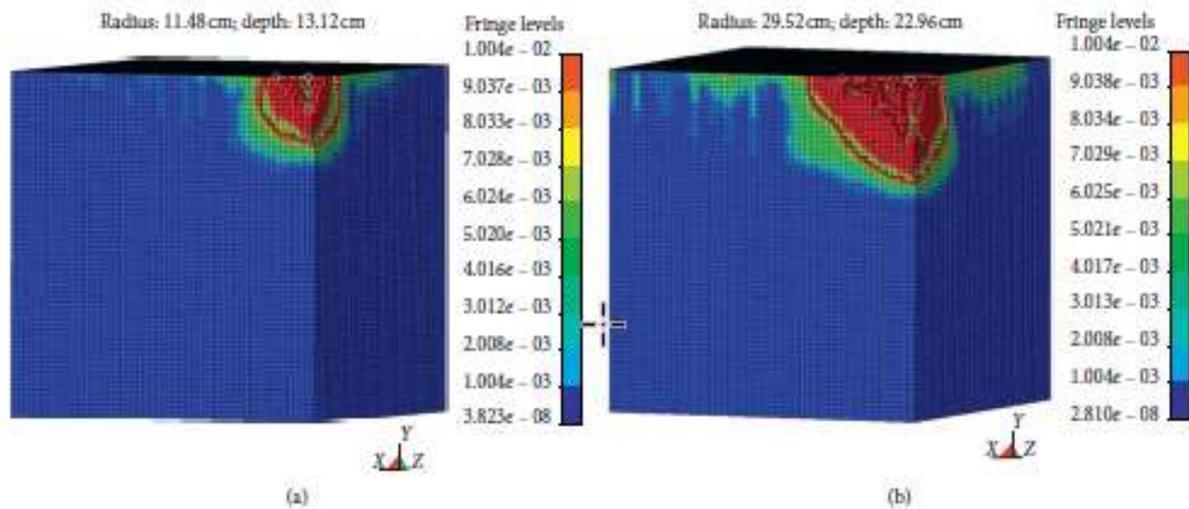
3-3- روش آنالیز عددی

اثر دهانه انفجار بسیار غیرخطی است، بیشتر مطالعات مرتبط بر روی تجزیه و تحلیل ویژگی‌های خرابی محیط انتقال ناشی از موج ضربه متمرکز شده‌اند. آزمایش‌های انفجار پرهزینه هستند، مکان‌های آزمایشی محدود هستند و آزمایش‌ها می‌توانند خطرناک باشند. استفاده از تجزیه و تحلیل مهندسی به کمک کامپیوتر می‌تواند از خطرات فرآیند انفجار جلوگیری کند. این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی عددی نتایج آزمایش‌های انفجار را تأیید کرد. تحلیل عددی بر اساس روش اجزای محدود انجام شد. از الگوریتم لاگرانژی-اویلری چند ماده‌ای با عنصر جامد ۸ گره‌ای ادغام شد تا یک مدل ساختار جامد سه بعدی از تعامل مایع-جامد ایجاد شود. شکل ۴ و ۵ نتایج یک مدل متقارن $1/4$ را برای تحلیل آنالیز عددی شتاب زمینی ناشی از انفجار نشان می‌دهد که عمق و عرض دهانه گودال بعد از انفجار را نشان می‌دهد. ابعاد مدل هوا $550 \times 500 \times 200$ سانتی متر بود. چگالی ماده منفجره $1630 \frac{Kg}{m^3}$ ، وزن ۲۲۷ گرم (۰.۵ پوند) و ابعاد مدل $3.28 \times 3.28 \times 9.3$ سانتی متر بود. ماده منفجره در مرکز مدل قرار گرفته بود و روی زمین بود. ابعاد مدل خاک $550 \times 500 \times 200$ سانتی متر بود. ابعاد مش‌المان محدود هوا، مواد منفجره و خاک $1.64 \times 1.64 \times 3.28$ سانتی متر بود. خاک از محل انفجار برای تجزیه و تحلیل فیزیکی و مکانیکی نمونه برداری شد. بر اساس

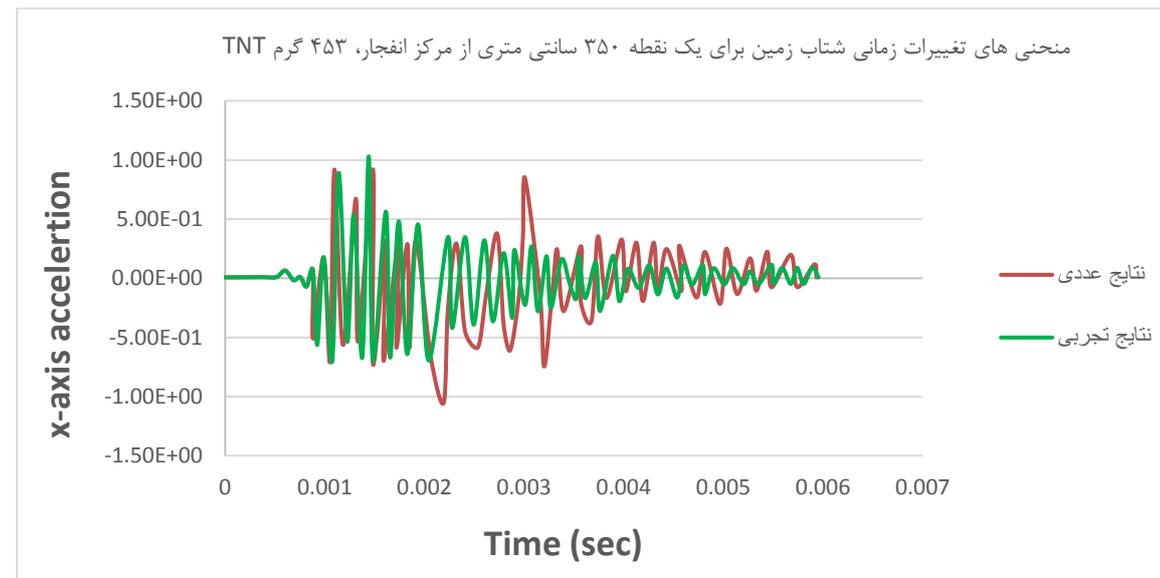
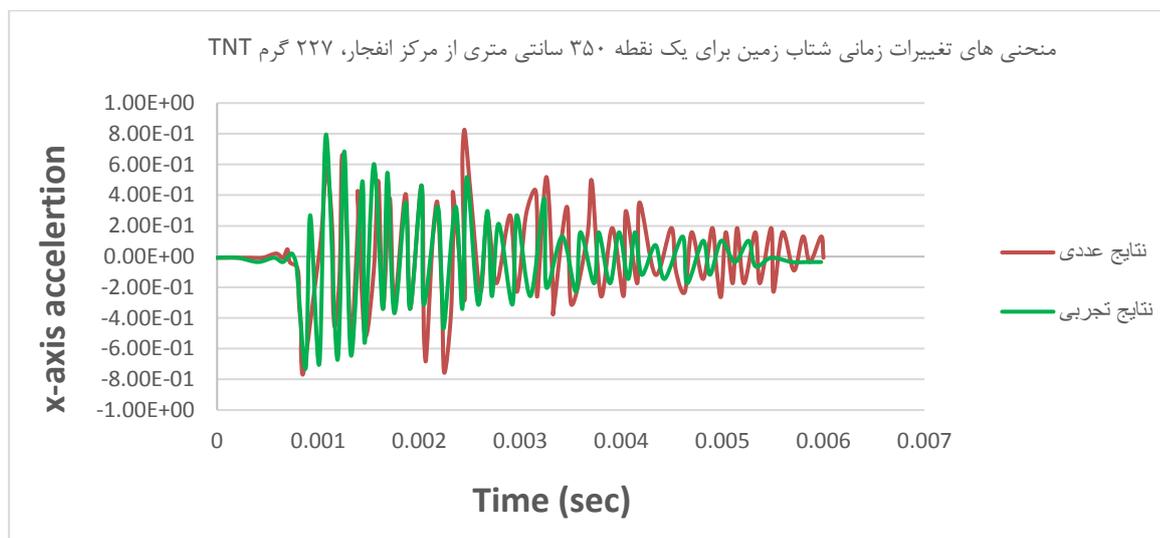
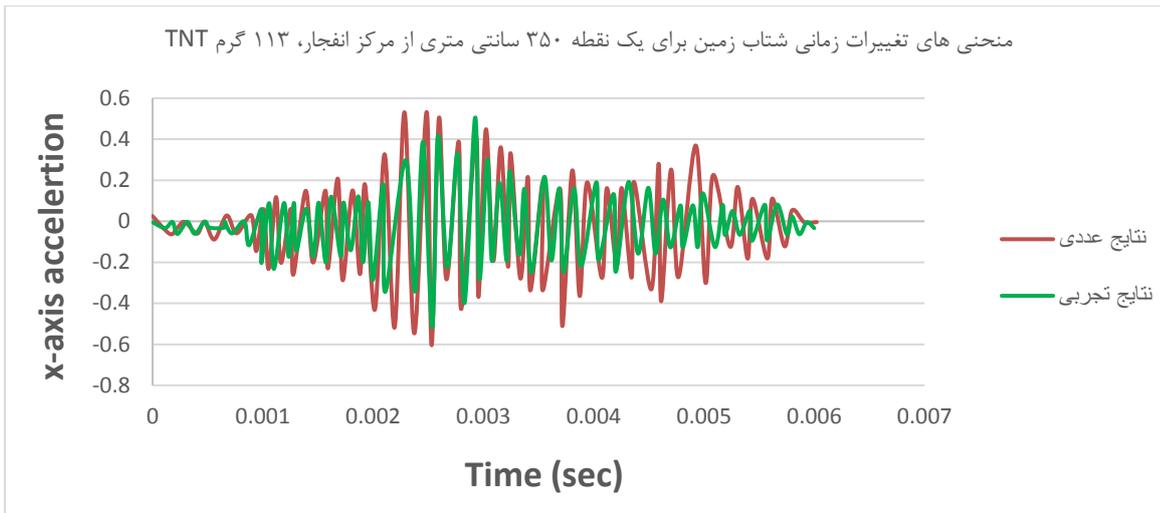
نتایج تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی، میزان رطوبت خاک محل انفجار ۱۲٫۸ درصد، چسبندگی $84300 \frac{Kg}{m^2}$ و زاویه اصطکاک ۱۴ درجه بود. نماد طبقه بندی SP-SM بود که به شن و ماسه ضعیف با سیلت اشاره داشت. پارامترهای عبارتند از: ضریب پواسون ۰٫۳، جرم مخصوص $1680 \frac{Kg}{m^3}$ ، مدول الاستیک $E = 4462532 \frac{Kg}{m^2}$ ، مدول برشی $G = 1552658 \frac{Kg}{m^2}$ (Wang, 2022)



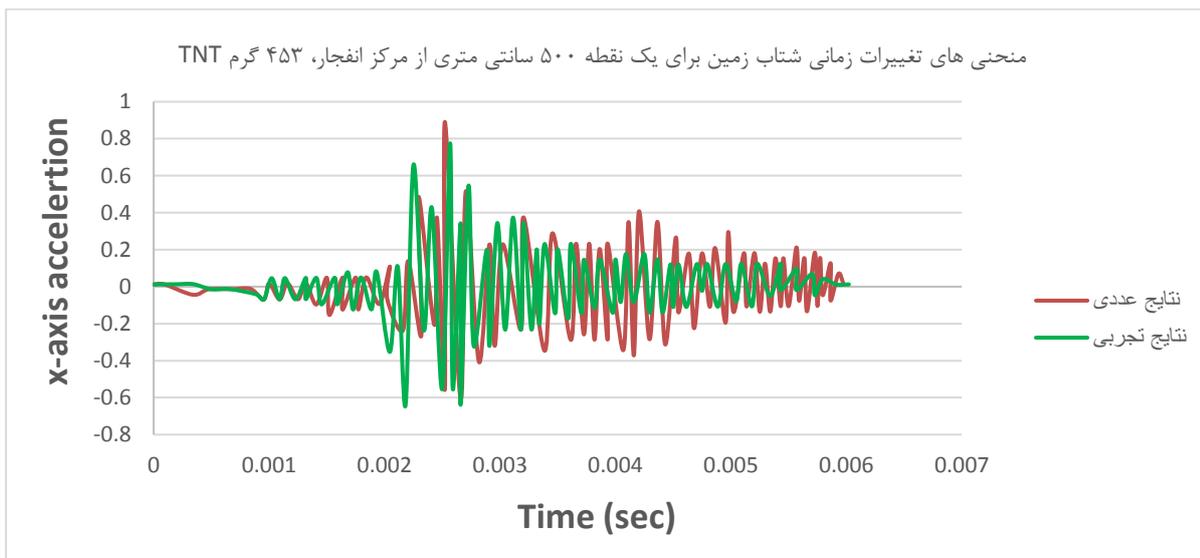
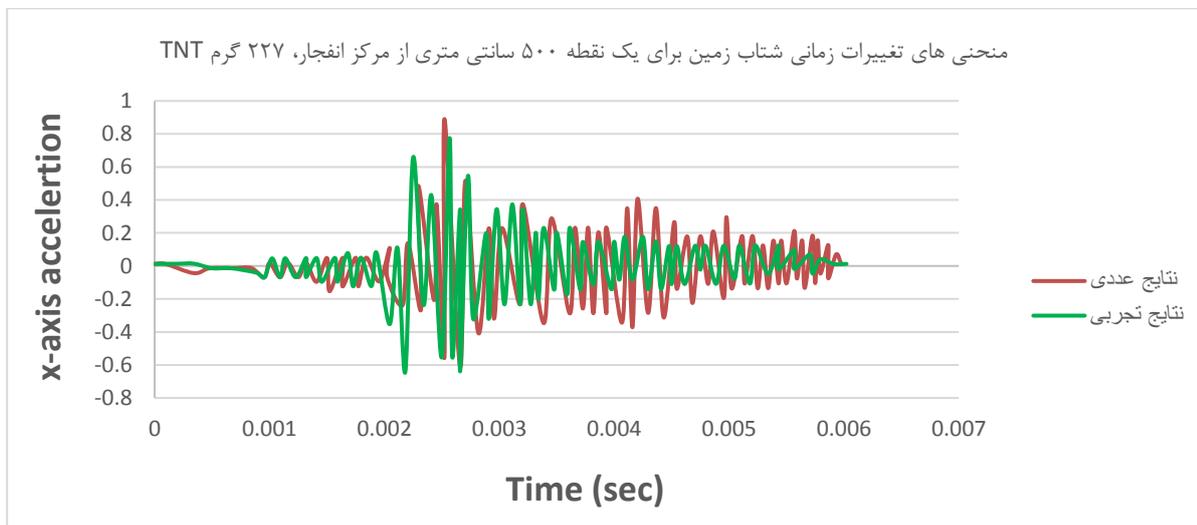
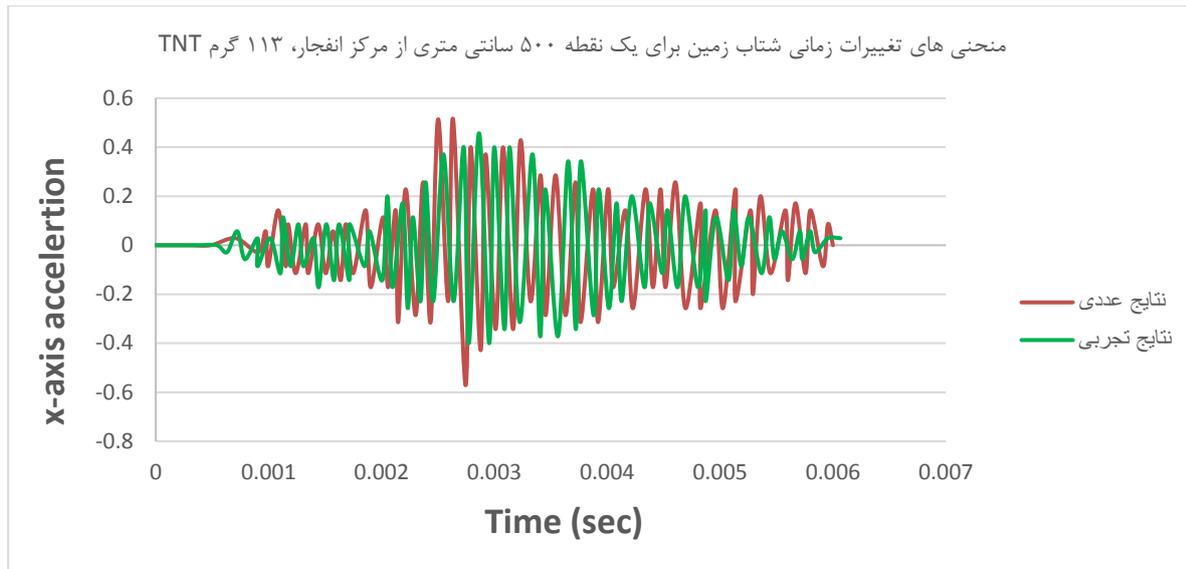
شکل ۴- تحلیل عددی فرسایش دهانه ناشی از انفجار روی زمین با استفاده از 227 گرم TNT (Wang, 2022)



شکل ۵- تحلیل عددی فرسایش دهانه ایجاد شده توسط (a) 113 گرم و (b) 453 گرم TNT (Wang, 2022)



شکل ۶- منحنی های تغییرات زمانی شتاب زمین برای یک نقطه ۳۵۰ سانتی متری از مرکز انفجار (Wang, 2022)



شکل ۷- منحنی های تغییرات زمانی شتاب زمین برای یک نقطه ۵۰۰ سانتی متری از مرکز انفجار (Wang, 2022)

3-4- نتایج صحت سنجی

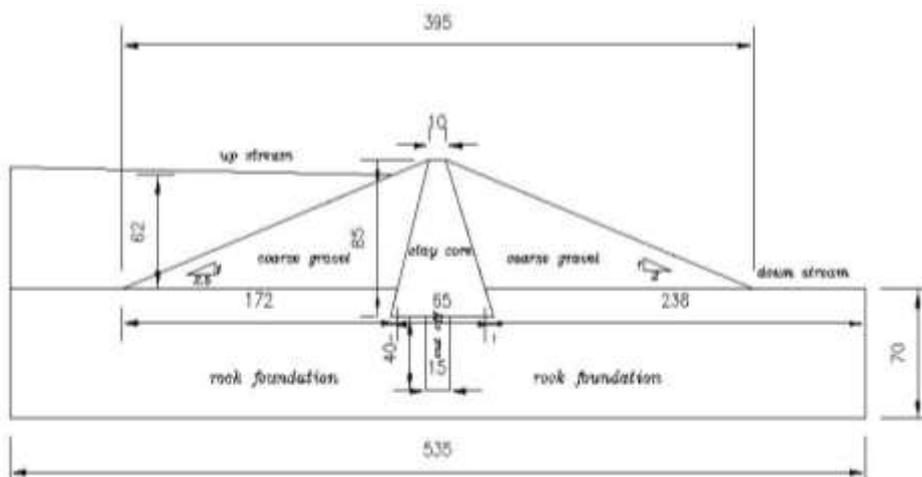
$$E_r = (X_m - X_t) / X_t \rightarrow E_r = \frac{(14.3 - 13.2)}{13.2} \times 100 = \% 9$$

$$E_r = (X_m - X_t) / X_t \rightarrow E_r = \frac{(28 - 26.4)}{26.4} \times 100 = \% 7$$

با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل انتقال موج ضربه‌ای در خاک، منحنی‌های تغییرات زمانی شتاب زمین تولید شده توسط آزمایش و آنالیز عددی (شکل‌های ۶ و ۷) از نظر زمانی سازگار می‌باشد. اگر مقدار ماده منفجره چندین برابر افزایش یابد، شعاع و عمق دهانه افزایش می‌یابد و شعاع ناحیه شکست نیز چندین برابر افزایش می‌یابد. شعاع دهانه تقریباً ۱۰ تا ۱۲ برابر عرض نمونه‌های دینامیت مستطیلی و عمق ناحیه پلاستیک تقریباً نصف (۰٫۵۴ الی ۰٫۴۷) شعاع دهانه بود. این منطقه محدوده واکنش موج شوک پلاستیک بود. بنابراین، تجزیه و تحلیل عددی در برآورد پاسخ دینامیکی اثرات انفجار و تغییرات ماده در تنش، کرنش و حجم پس از دریافت نیروهای خارجی به طور رضایت‌بخشی مؤثر بود. عمق و عرض گودال‌های ایجاد شده با خطای نسبی ۹ درصد اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده صحت آنالیز عددی و داده‌های مربوطه می‌باشد.

3-5- معرفی آنالیز عددی شبیه‌سازی شده سد علویان مراغه

سد علویان از نوع خاکی با هسته رسی مرکزی بوده و ارتفاع آن از سنگ بستر ۸۰ متر می‌باشد. طول تاج سد ۹۳۵ متر و عرض آن ۱۰ متر و حجم کل بدنه سد ۴٫۸ میلیون متر مکعب می‌باشد. به منظور اصلاح کیفیت سنگ بستر در پی و جناحین سد، پرده آب بند از طریق حفاری در یک ردیف اصلی با عمق ۴۹ متر و دو ردیف فرعی با عمق کمتر، احداث شده است. رقوم تراز سرریز ۱۵۶۸ متر از سطح دریا، تراز تاج سد ۱۵۷۲ متر از سطح دریا و تراز نرمال آب مخزن ۱۵۶۸ متر از سطح دریا می‌باشد. حجم در تراز نرمال ۶۰ میلیون متر مربع و حجم مفید آن ۵۷ میلیون متر مکعب و حجم آب تنظیم شده در حدود ۱۲۳ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد. پی سد علویان را سه نوع تف خاکستر دار با رنگ‌های سفید، خاکستری و صورتی و با مشخصات فیزیکی، مکانیکی مختلف تشکیل می‌دهد. بر مبنای بررسی‌های انجام شده در محل سد علویان، سه گسل اصلی و تعدادی گسل فرعی با امتداد کم و بیش شمالی، جنوبی وجود دارد که سه بلوک متمایز را به وجود آورده‌اند. سرریز سد علویان از نوع جانبی به طول ۶۰ متر و حداکثر دبی تخلیه ۱۱۸۰ متر مکعب بر ثانیه طراحی و ساخته شده که در تکیه گاه سمت چپ سد قرار دارد. آب پس از سرریز شدن به وسیله یک کانال جانبی با عرض متغییر ۸ متر در بالا دست و ۲۰ متر در پایین دست و با شیب طولی ۱۰٪ می‌باشد. شوت از دو قسمت با مقاطع متفاوت، ابتدا با مقطع مستطیلی به طول ۷۰ متر و عرض ۲۰ متر با ۹٫۴ درصد و سپس تا حوضچه آرامش به طول ۴۰ متر با مقطع دوزنقه ای با شیب ۳۳٪، طراحی و اجرا گردیده است. در پایین دست شوت حوضچه آرامش به طول ۵۰ متر و عرض ۳۰ متر قرار دارد. (کاردان و همکاران، ۱۴۰۰)



شکل ۸- ابعاد و مشخصات کلی سد علویان مراغه (کاردان و همکاران، ۱۴۰۰)

6-3- مشخصات مواد منفجره

از مواد منفجره TNT به عنوان خرج انفجاری در نقاط مختلف سد برای شبیه‌سازی انفجار استفاده شده است که در جدول (۱) و (۲) مشخصات ماده منفجره و همچنین پارامترهای لازم جهت شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس برای تحلیل انفجار سطحی، هوایی و زیر آب به صورت بسیار دقیق ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات مواد منفجره (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴)

مواد منفجره TNT			
Property	معادل فارسی	Value	Unit
Density	وزن مخصوص	1657	Kg/m ³
gas specific ratio		1.2	
garavitational acceleration		9.81	m/s ²
atmosphoric pressure		100000	m/s
flow drag coefficient		0.1	
flow drag exponent		2	
speed of sound in fluid		1500	m/s
fluid density		1000	Kg/m ³
constant k		59700000	
constant K		0.0000883	
constant A		0.13	
constant B		0.18	
constant Kc		1050000000	
charg mass	جرم ماده منفجره در هر مرحله		kg
bubble model stepdata			
time duration		0.002	s
max number step		1500	
relative control		0.00000000001	
absulute control		0.00000000001	
control exponent		0.2	
conwep data			
time of detonation		0	
magnitude ascale factor		1	

جدول ۲: ضرایب هم‌ارزی برای مواد منفجره متفاوت، بر مبنای انرژی معادل (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴)

Explosive	Compound B	RDX	HMX	Nitroglycerin	Nitroglycerin Dynamite	Semtex	C4
TNT Equivalent	1.148	1.185	1.256	1.481	0.60	1.25	1.34

7-3- مشخصات آب مخزن

مشخصات آب داخل مخزن سد به شرح جدول (۳) می‌باشد.

جدول ۳: مشخصات آب داخل مخزن (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴)

آب			
Property	معادل فارسی	Value	Unit
Density	وزن مخصوص	1000	Kg /m ³
Bulk Modulus	نسبت تراکم	260000000	Mpa

8-3- مشخصات مصالح خاک سد

سدخاکی علویان از سه قسمت پوسته (سنگریزه شنی)، هسته (رسی) و فونداسیون (سنگ تف کاملاً هوازده، نیمه هوازده، کم هوازده) تشکیل شده است که مشخصات به شرح جدول (۴) و ابعاد دقیق و مرزبندی لایه‌های خاک در شکل (۸) می‌باشد. از مدل موهر کلمب جهت مدل‌سازی مشخصات خاک استفاده شده است. لازم به ذکر است که نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی رفتار خاک نیاز به اطلاعات بسیار دقیق از سایر پارامترهای خاک ندارد و به راحتی می‌تواند با ویژگی‌های ارائه شده در جداول رفتار خاک را شبیه‌سازی نماید.

جدول ۴: مشخصات مصالح سنگی و خاکی سد (کاردان و همکاران، ۱۴۰۰)

پوسته سد : سنگریزه شنی (ماسه سنگ)			
Property	مادل فارسی	Value	Unit
Density	وزن مخصوص	2150	Kg /m ³
Yong,s Modulus(E)	مدول الاستیک	51.7	Mpa
Poisson,s Ratio (ν)	نسبت پواسون	0.3	
هسته سد : رسی			
Density	وزن مخصوص	1800	Kg /m ³
Yong,s Modulus(E)	مدول الاستیک	20	Mpa
Poisson,s Ratio (ν)	نسبت پواسون	0.4	
فونداسیون سد (سنگ تف کاملاً هوازده، نیمه هوازده، کم هوازده)			
Property	معادل فارسی	Value	Unit
Density	وزن مخصوص	2150	Kg /m ³
Yong,s Modulus(E)	مدول الاستیک	328	Mpa
Poisson,s Ratio (ν)	نسبت پواسون	0.34	

9-3- بررسی نتایج انفجار سطحی

بررسی انفجار سطحی در چهار حالت، پشت، وسط، جلو تاج و پنجه سد تحت اثر بار انفجاری ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ کیلوگرم در ۱۲ شبیه‌سازی مختلف با تحلیل اکسپلیسیت لاگرانژی اویلری و مدل خاک از نوع موهرکلمب با گام زمانی ۲ ثانیه انجام شده است. با توجه به ابعاد بزرگ سد خاکی و حساسیت زیاد به اندازه مش‌بندی ۴۰ متر از عرض سد مدل‌سازی شده است تا زمان تحلیل را کوتاه نماید همچنین در فرایند تحلیل از شرایط موج بدون بازگشت استفاده شده است (نرم‌افزار دچار خطا در تجمیع نتایج می‌شود و زمان تحلیل افزایش می‌یابد) که تاثیر بسیار کمی در نتایج نهایی دارد. با توجه به محدودیت تعداد صفحات مقاله ۶ شبیه‌سازی که بیش‌ترین اثر تخریبی را دارد به شرح ذیل می‌باشد. با توجه به هندسه سد خاکی، تاج آسیب پذیرترین نقطه سد می‌باشد و به همین خاطر بیشتر مد نظر قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی از انفجار نوع (surface blast-conwep) استفاده شده که فقط جرم مواد منفجره وارد شده و سایر ویژگی‌های ماده منفجره از کتابخانه نرم‌افزار آباکوس به صورت خودکار اعمال می‌گردد. در این روش نقطه انفجار و سطوح تحت تاثیر جهت بررسی اثر آسیب اعمال می‌گردد. شبیه‌سازی از ۵ قسمت آب، هسته رسی، فونداسیون، خاکریز پشت و جلوی سد تشکیل شده است. با توجه به شکل هندسی سد و ابعاد بزرگ فونداسیون و دور بودن از محل انفجارهای شبیه‌سازی شده تعداد المان‌های مش کمتری در نظر گرفته شده است تا زمان تحلیل کاهش یابد. تعداد کل المان‌های به کار رفته در مش بندی ۸۲۲۷۶۲ می‌باشد. با توجه به نتایج استخراج شده از نرم‌افزار در جدول ۶، میانگین اعداد به دست آمده برای طیف کیفیت تعامد در محدوده بسیار خوبی قرار دارد.

جدول ۵- کیفیت تعامد (توحیدی، ۱۳۹۶)

غیر قابل قبول	بد	قابل قبول	خوب	بسیار خوب	عالی
0 - .001	.001 - .1	.1 - .2	.2 - .7	.7 - .95	1

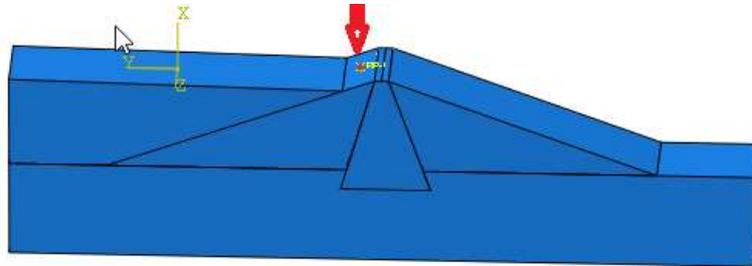
جدول ۶- نتایج کیفیت مش‌بندی

Mesh metric	Orthogonal quality
min	0.412
max	1
average	0.865
Standard deviation	0.193

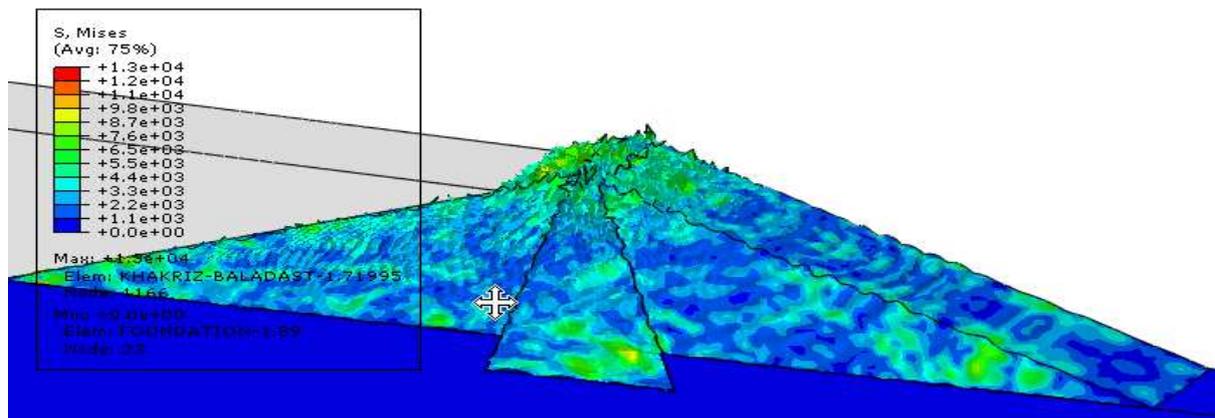
۱-۳-۹- بررسی نتایج انفجار سطحی پشت تاج سد

با توجه به شکل‌های ۹ الی ۱۷ میزان تنش حداکثر در اثر بار انفجاری ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ کیلوگرم به ترتیب ۷۸۰۰۰، ۴۶۰۰۰، ۱۳۰۰۰ کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد و مقدار تغییر شکل کلی سد با افزایش وزن مواد منفجره افزایش می‌یابد که بیشترین مقدار تغییر شکل در بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم در پشت تاج و کمترین مقدار در پنجه سد می‌باشد که تنش حداکثر با افزایش وزن مواد منفجره از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ کیلوگرم ۳،۵۴ برابر، با افزایش مواد منفجره از ۱۰۰۰ به ۱۵۰۰ کیلوگرم ۱،۶۹ برابر و با ۳ برابر شدن مواد منفجره ۶ برابر می‌شود. با توجه به نتایج بررسی شده و شکل هندسی سد، با افزایش فاصله محل انفجار، از تاج سد اثر تخریبی انفجار کم می‌شود.

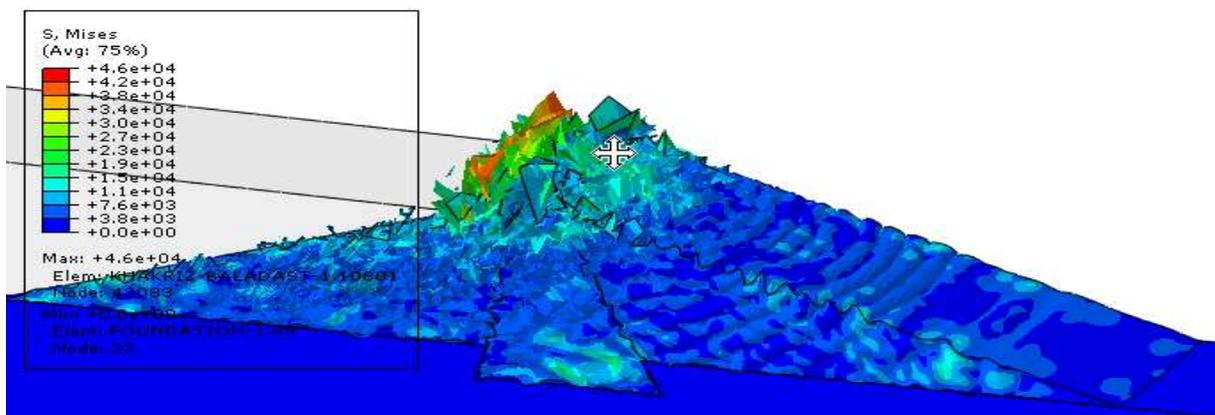
با توجه به شکل ۱۶ میزان حداکثر انرژی حاصل از انفجار در اثر بار انفجاری ۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰ کیلوگرم به ترتیب ۶۸۰۰۰۰۰، ۲۷۰۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰۰ ژول می‌باشد که با افزایش وزن مواد منفجره از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ کیلوگرم ۵,۴ برابر، با افزایش مواد منفجره از ۱۰۰۰ به ۱۵۰۰ کیلوگرم ۲,۵ برابر و با ۳ برابر شدن مواد منفجره ۱۳,۶ برابر می‌شود.



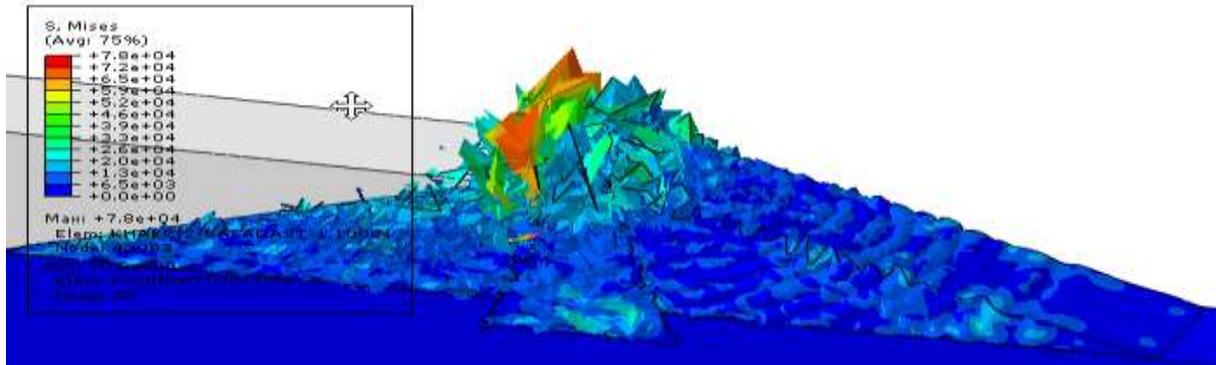
شکل ۹- نقطه اثر بار انفجاری در سطح، پشت تاج سد



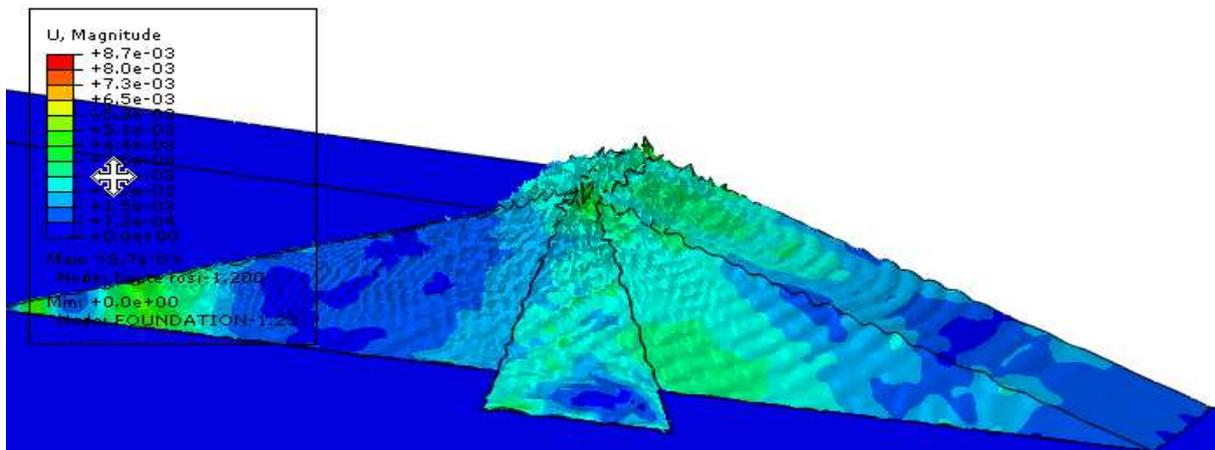
شکل ۱۰- کانتور تنش در اثر بار انفجاری ۵۰۰ کیلوگرم در سطح، پشت تاج سد



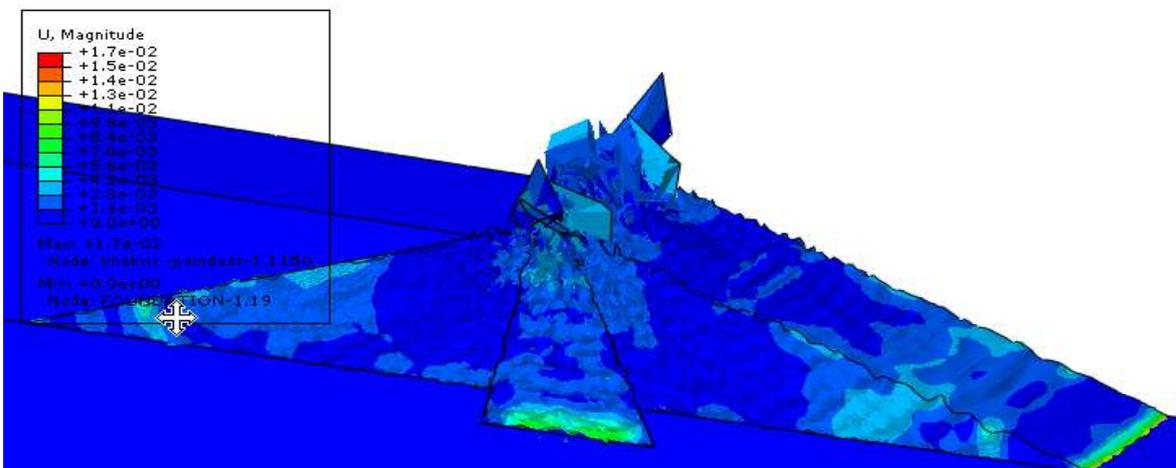
شکل ۱۱- کانتور تنش در اثر بار انفجاری ۱۰۰۰ کیلوگرم در سطح، پشت تاج سد



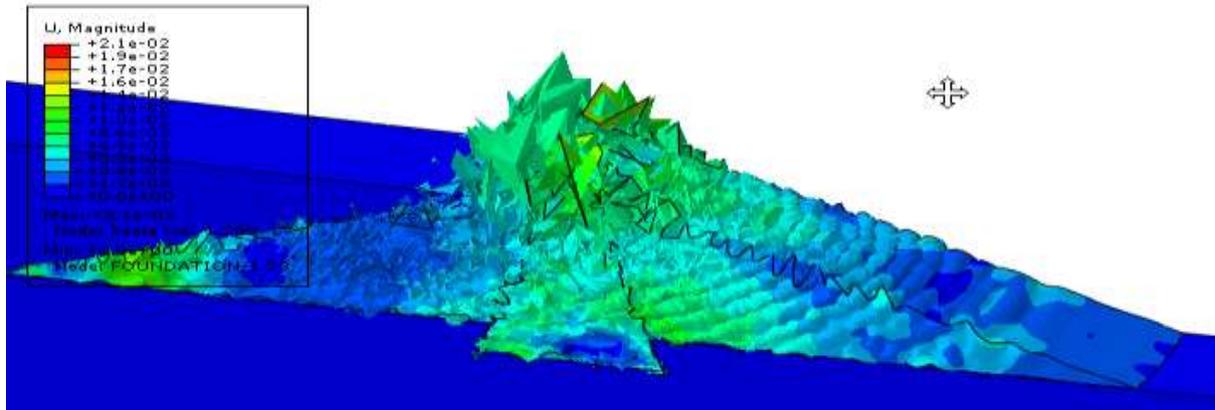
شکل ۱۲- کانتور تنش در اثر بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم در سطح ، پشت تاج سد



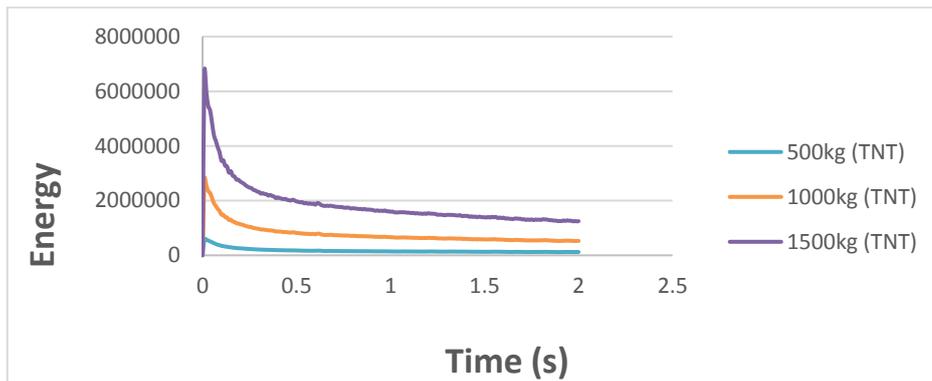
شکل ۱۳- کانتور جابه‌جایی در اثر بار انفجاری ۵۰۰ کیلوگرم در سطح ، پشت تاج سد



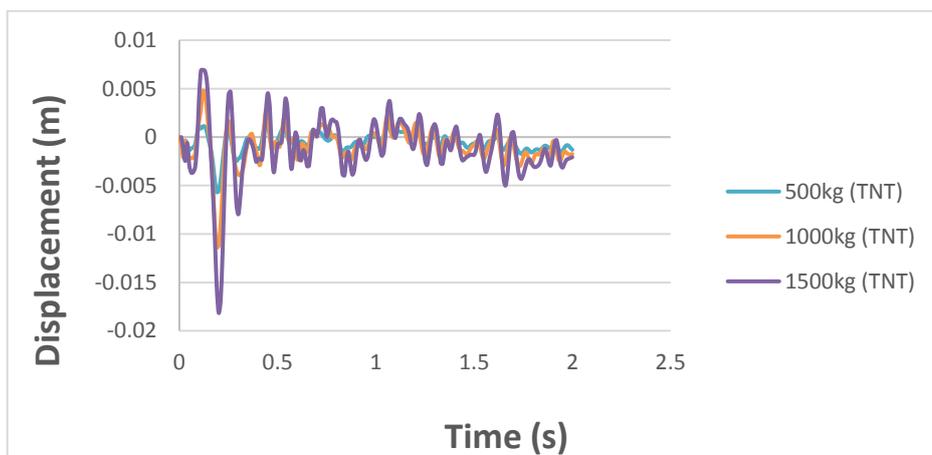
شکل ۱۴- کانتور جابه‌جایی در اثر بار انفجاری ۱۰۰۰ کیلوگرم در سطح ، پشت تاج سد



شکل ۱۵- کانتور جابه‌جایی در اثر بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم در سطح ، پشت تاج سد



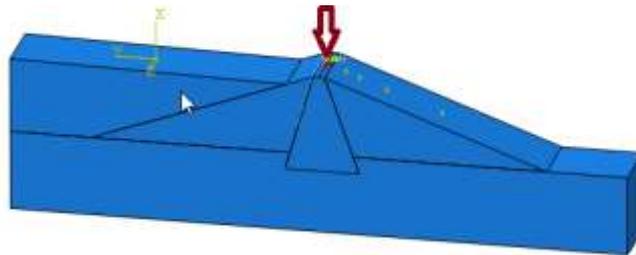
شکل ۱۶- نمودار کانتور انرژی (ژول) در اثر بار انفجاری در سطح ، پشت تاج سد



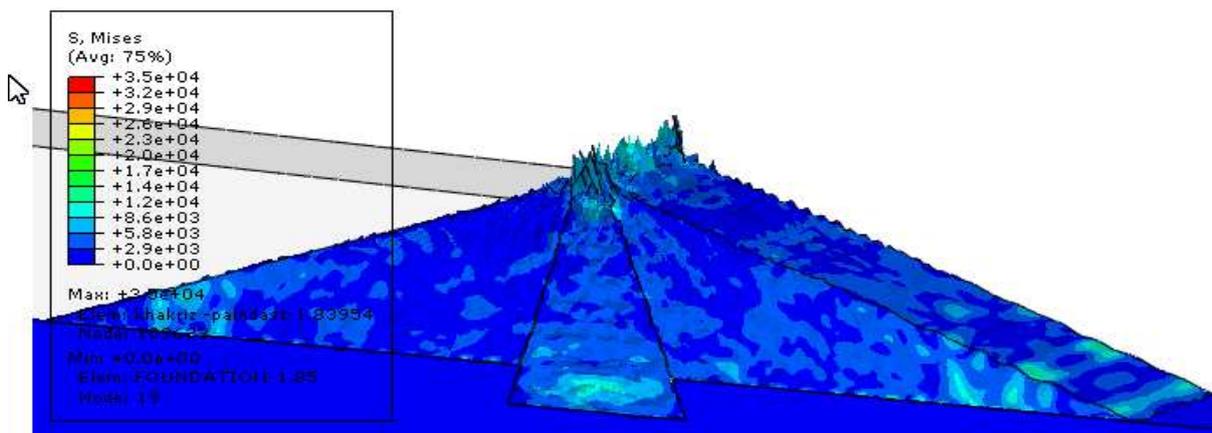
شکل ۱۷- نمودار کانتور جابه‌جایی افقی وسط تاج سد در اثر بار انفجاری در سطح ، پشت تاج سد

10-3- بررسی نتایج انفجار سطحی وسط تاج سد

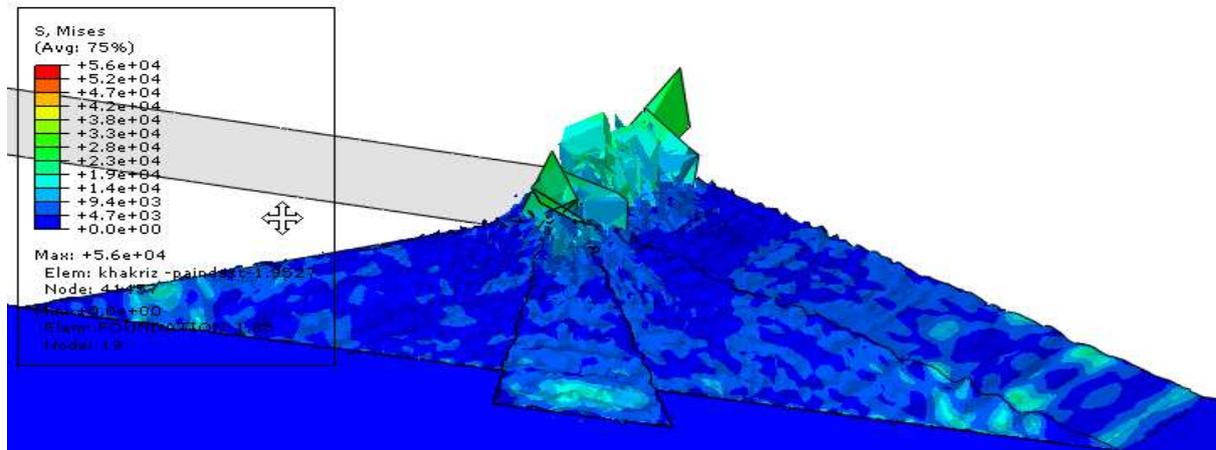
با توجه به شکل‌های ۱۸ الی ۲۶ میزان تنش حداکثر در اثر بار انفجاری ۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰ کیلوگرم به ترتیب ۷۴۰۰۰، ۵۶۰۰۰، ۳۵۰۰۰ کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد و مقدار تغییر شکل کلی سد با افزایش وزن مواد منفجره افزایش می‌یابد که بیش‌ترین مقدار تغییر شکل در بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم در وسط تاج و کم‌ترین مقدار در پنجه سد می‌باشد که تنش حداکثر با افزایش وزن مواد منفجره از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ کیلوگرم ۱٫۶ برابر، با افزایش مواد منفجره از ۱۰۰۰ به ۱۵۰۰ کیلوگرم ۱٫۳۲ برابر و با ۳ برابر شدن مواد منفجره ۲٫۱۱ برابر می‌شود. با توجه به شکل ۲۵ میزان حداکثر انرژی حاصل از انفجار در اثر بار انفجاری ۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰ کیلوگرم به ترتیب ۴۶۰۰۰۰۰، ۲۵۰۰۰۰۰، ۸۵۰۰۰۰ ژول می‌باشد که با افزایش وزن مواد منفجره از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ کیلوگرم ۲٫۹۴ برابر، با افزایش مواد منفجره از ۱۰۰۰ به ۱۵۰۰ کیلوگرم ۱٫۸۴ برابر و با ۳ برابر شدن مواد منفجره ۵٫۴۱ برابر می‌شود.



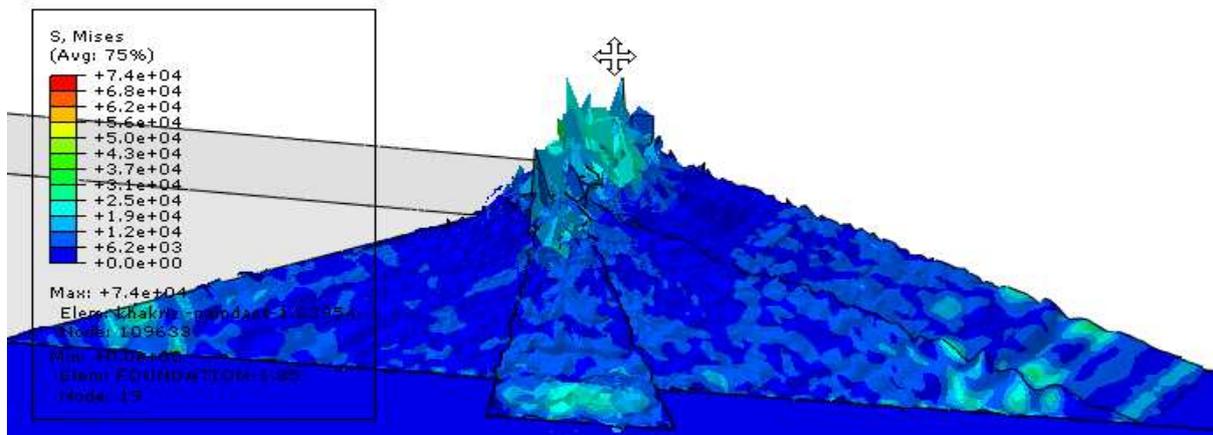
شکل ۱۸- نقطه اثر بار انفجاری در سطح، وسط تاج سد



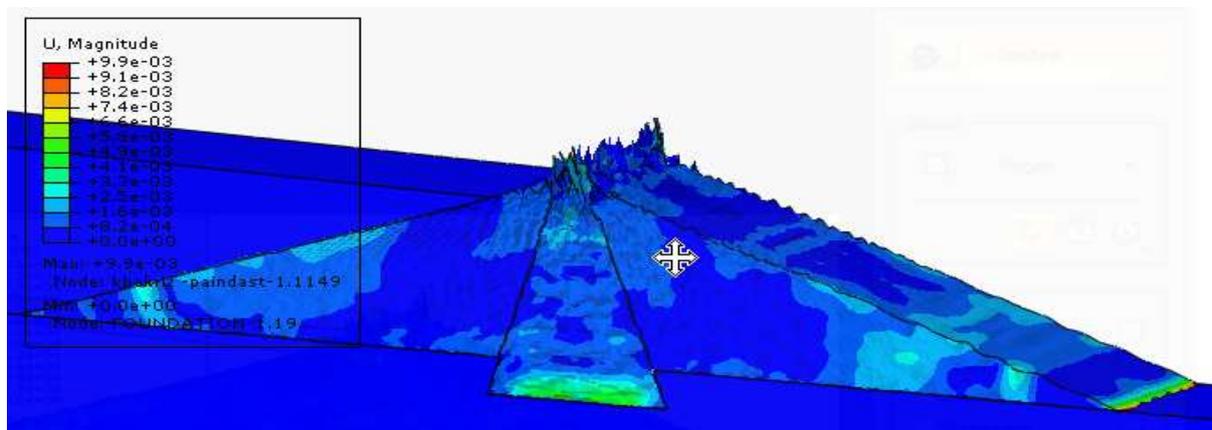
شکل ۱۹- کانتور تنش در اثر بار انفجاری ۵۰۰ کیلوگرم در سطح، وسط تاج سد



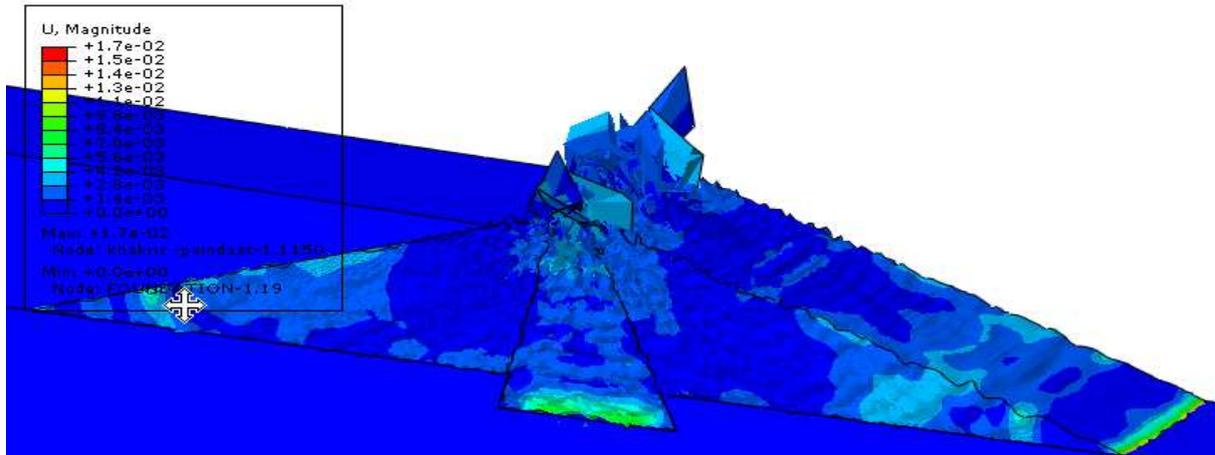
شکل ۲۰- کانتور تنش در اثر بار انفجاری ۱۰۰۰ کیلوگرم در سطح ، وسط تاج سد



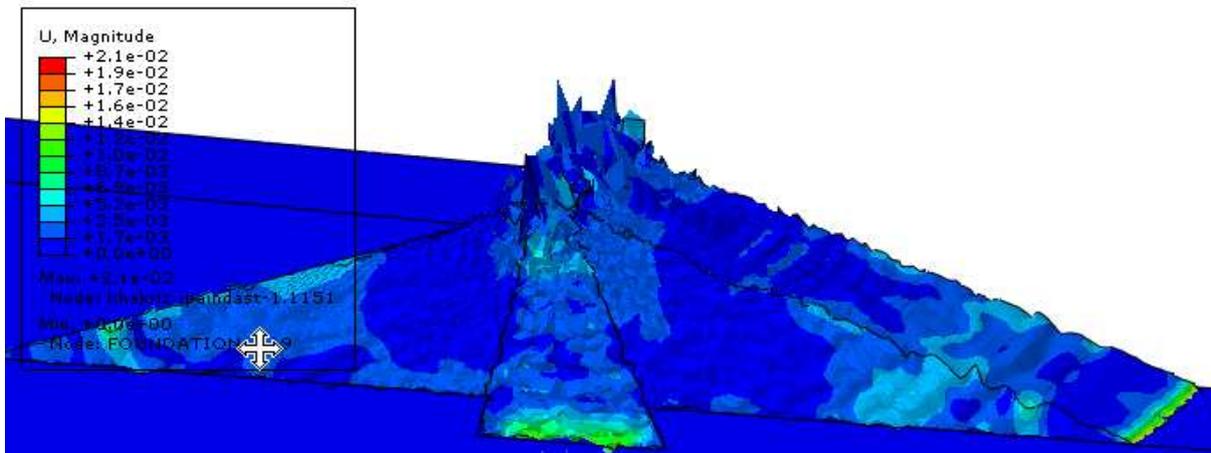
شکل ۲۱- کانتور تنش در اثر بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم در سطح ، وسط تاج سد



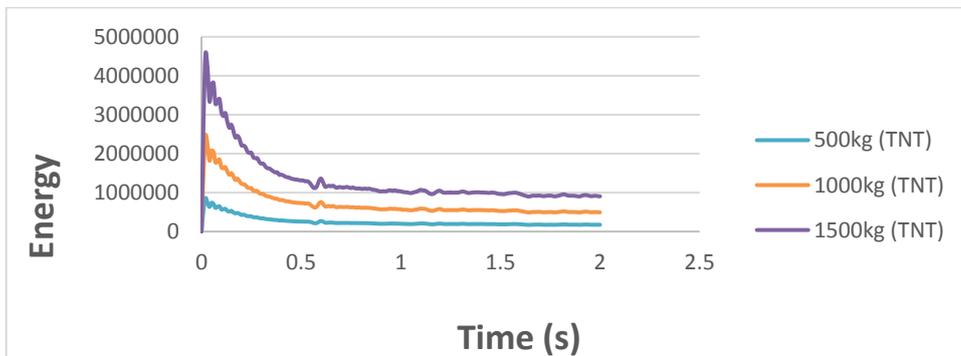
شکل ۲۲- کانتور جابه‌جایی در اثر بار انفجاری ۵۰۰ کیلوگرم در سطح ، وسط تاج سد



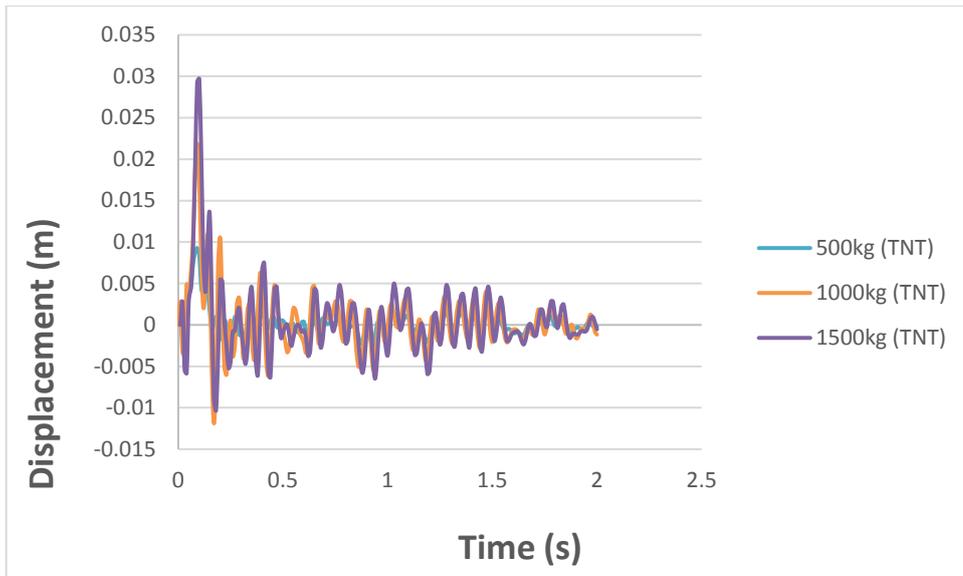
شکل ۲۳- کانتور جابه‌جایی در اثر بار انفجاری ۱۰۰۰ کیلوگرم در سطح، وسط تاج سد



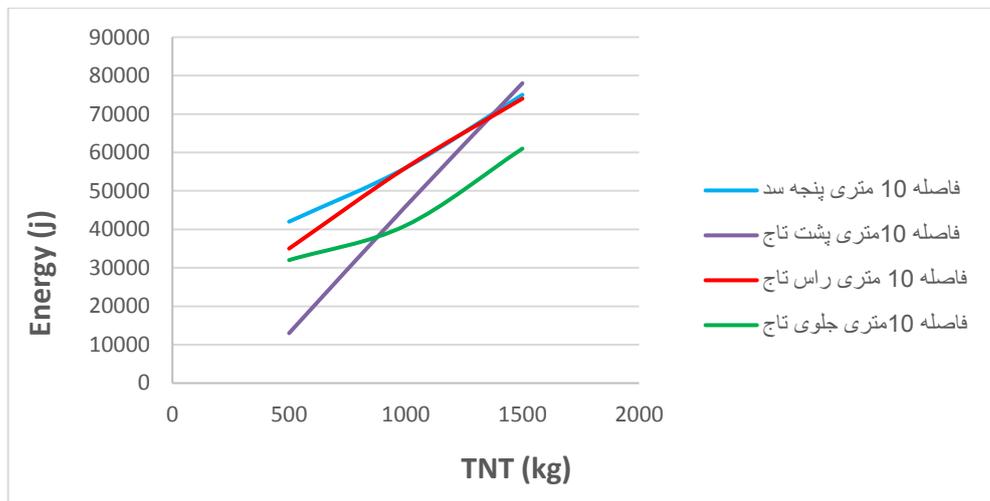
شکل ۲۴- کانتور جابه‌جایی در اثر بار انفجاری ۱۵۰۰ کیلوگرم در سطح، وسط تاج سد



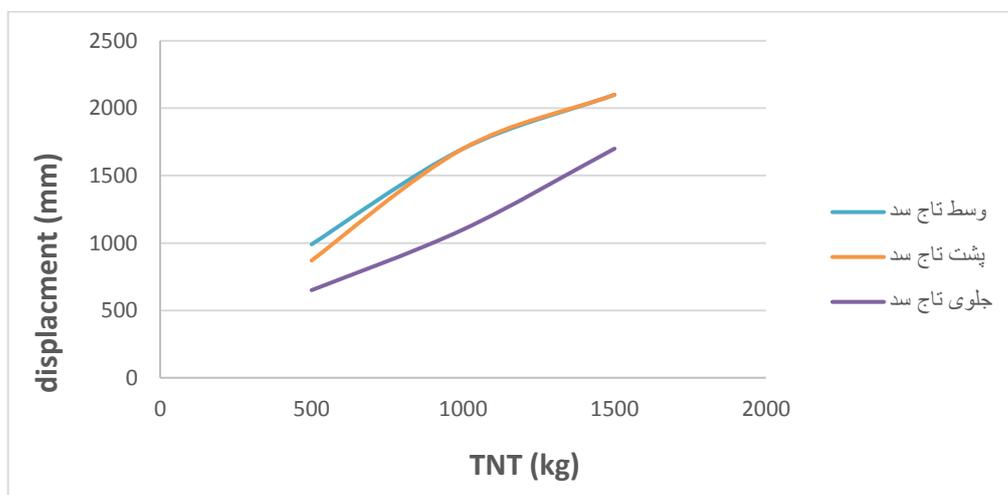
شکل ۲۵- نمودار کانتور انرژی (ژول) در اثر بار انفجاری در سطح، وسط تاج سد



شکل ۲۶- نمودار کانتور جابه‌جایی افقی وسط تاج سد در اثر بار انفجاری در سطح، وسط تاج سد



شکل ۲۷- نمودار کلی مقایسه میزان تنش حداکثر در انفجار سطحی



شکل ۲۸- نمودار کلی مقایسه میزان جابه‌جایی حداکثر در انفجار سطحی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انفجار در پایه پایین دست سد بحرانی‌ترین حالت را ایجاد می‌کند، چرا که همزمان موجب ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ و کاهش شدید ضریب اطمینان پایداری می‌شود. بر این اساس، سه توصیه عملی برای طراحی و پایش ارائه می‌شود:

۱. تقویت نظارت و پایش در ناحیه پایین دست: تمرکز سیستم‌های نظارتی و حفاظتی (مانند حسگرهای سنجه یا دوربین‌های تحت نظارت مداوم) در ناحیه پایه و پنجه پایین دست به عنوان آسیب‌پذیرترین نقطه، ضروری است.
۲. بهبود روش‌های به‌سازی و مقاوم‌سازی: تقویت ناحیه پایین دست با روش‌هایی مانند اجرای دیواره‌های مسلح یا تراکم اضافی می‌تواند پایداری کلی سد را در برابر چنین تهدیداتی به میزان قابل توجهی افزایش دهد.
۳. تدوین دستورالعمل‌های ارزیابی امنیتی: نتایج این تحقیق می‌تواند مبنایی برای تدوین پروتکل‌های ارزیابی سریع آسیب‌پذیری سدهای موجود در برابر بارهای انفجاری قرار گیرد و به مهندسان کمک کند تا نقاط ضعف سازه را سریع‌تر شناسایی و نسبت به رفع آن اقدام کنند.

با توجه به این که شبیه‌سازی انفجار در سدخاکی برای اولین بار توسط نرم‌افزار آباکوس انجام شده تحقیق علمی معتبر قبلی برای مقایسه نتایج در دسترس نمی‌باشد ولی صحت سنجی دقیق و معتبر موجود در مقاله، صحت پژوهش را آشکار می‌سازد. با توجه به خاص بودن هندسه سدخاکی و غیراصولی بودن تغییر هندسه سد، پیشنهاد می‌شود از روش بتنی مسلح در نقاط نزدیک به تاج در پشت و جلو سد با ضخامت حداقل ۱۲ سانتیمتر و عرض ۲۰ متر و در طول کل سد اجرا شود تا اثرات موج شوک انفجار را کاهش دهد.

۴- نتیجه گیری

این کار عددی، در سدعلویان با مدل‌سازی حالت‌های مختلف انفجار سطحی در نقاط مختلف سد انجام گردید و نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که میزان تغییر شکل کلی سد رابطه مستقیمی با جرم مواد منفجره دارد، به طوری که بیشینه جابه‌جایی (۱,۲) متر برای بار ۱۵۰۰ کیلوگرمی) در منطقه میانی تاج سد رخ می‌دهد، در حالی که کمینه تغییر شکل (۰,۳) متر) در ناحیه پنجه سد مشاهده می‌شود. همچنین، تحلیل توزیع تنش‌ها نشان داد که تنش ماکزیمم در فاصله ۱۰ متری از مرکز تاج سد متمرکز شده و با افزایش جرم مواد منفجره از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ کیلوگرم (افزایش ۲ برابری)، تنش حداکثر ۱۶۰٪ افزایش می‌یابد. این روند در مقیاس بزرگتر نیز ادامه دارد، به نحوی که با افزایش ۱,۵ برابری ماده منفجره (۱۰۰۰ به ۱۵۰۰ کیلوگرم)، تنش حداکثر ۱۳۲٪ رشد نشان می‌دهد که بیانگر رفتار غیرخطی مصالح خاکی تحت بارهای انفجاری شدید است.

از سوی دیگر، فاصله کانون انفجار از تاج سد تأثیر معکوسی بر شدت تخریب دارد؛ به طوری که با افزایش این فاصله، اثرات انفجار به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد. بررسی پارامتر پر یا خالی بودن مخزن سد نیز تأثیر قابل توجهی ($>5\%$) بر الگوی تغییر شکل و توزیع تنش در انفجارهای سطحی نداشت، که می‌تواند ناشی از جذب انرژی موج توسط خاک و نه آب باشد. مقایسه کمی بین انواع انفجارها نشان داد که انفجار سطحی با ایجاد تمرکز تنش در لایه‌های فوقانی خاک، اثرات تخریبی شدیدتری نسبت به انفجار هوایی دارد، اما این اثرات در مقایسه با انفجار زیرآبی (به دلیل انتقال کارآمدتر انرژی در محیط آب) به مراتب کمتر است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پایه پایین دست سد در برابر انفجار آسیب‌پذیرترین ناحیه است. برای طراحی مقاوم‌تر، تقویت نظارت و به‌سازی هدفمند این ناحیه و تدوین دستورالعمل‌های امنیتی بر اساس این یافته‌ها توصیه می‌شود.

مراجع

- Ambrosini, R. D., & Luccioni, B. M. (2006). Craters produced by explosions on the soil surface.
- Chowdhury, I., & Dasgupta, S. P. (2019). Dynamic Analysis of Earth Dams Under Earthquakes. In *Earthquake Analysis and Design of Industrial Structures and Infra-structures* (pp. 369-404). Springer, Cham.
- Clough, R. W., & Penzien, J. *Dynamics of Structures* (1975). Journal of Structures, New York, McGraw-Hill Companies.
- Cole, R. H. (1948). *Underwater explosions*. New Jersey: Princeton Publications Inc.
- Contestabile, Li.Y.,E, Braimah, A. and Wilson, D., (2007). Preliminary Vulnerability of an Embankment Dam due to Explosions, CERL Report.
- Cormie, D., Mays, G., & Smith, P. (Eds). (2009). *Blast effects on buildings*. Thomas Telford Publishing.
- De A., Butler S., Zimmie T.F., (2013). Effects of Surface Explosions on top of Earth Embankment, Dams, Geocongress 2013; ASCE 2013.
- Engineers, U. (2008). UFC 3-340-02: Structures to Resist the Effects of Explosions. UDo Defense, Editor.
- George A. Afriyie. (2014). Effects of explosions on embankment dams.
- Guan, Z., Deng, T., & Li, Y. (2022). Discrete element modeling of crater formation and soil ejection in earth dams subjected to surface explosions. *Computers and Geotechnics*, 145, 104671.
- Henrych, J. (1979). *The dynamics of Explosion and Its Use*, Elsevier press, Amsterdam.
- Iau-Teh Wang, "Numerical and Experimental Approach for Failure Analysis of Soil
- Kardan, N., Soltani-Jigheh, H., Saeedi Farzad, B., & Shokri, R. (2021). Two-Dimensional Numerical Analysis of Alavian Earth Dam under Dynamic Loading. *Iranian journal of Marine technology*.(1400)
- Kardan, N., Soltani-Jigheh, H., Saeedi Farzad, B., & Shokri, R. (2021). Two-Dimensional Numerical Analysis of Alavian Earth Dam under Dynamic Loading. *Darya-fonoun Journal*, 8 (Issue).
- Keil, A. H. (1961). *The response of ships to underwater explosions*. DAVID TAYLOR MODEL BASIN WASHINGTON DC.
- Kinney, G. F., & Graham, K. I. (1985). *Explosive Shocks in air*, Poringer-Verlag Berlin Heidelberg. New York Tokyo.
- Koneshloo, M., & Vafaeian, M. (2021). Coupled analysis of pore water pressure generation and structural response in earth dams under blast loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 142, 106549.
- Li, X., Wang, G., & Zhang, F. (2018). Numerical simulation of the dynamic response of earth dams subjected to surface explosion using the SPH method. *Engineering Structures*, 165, 165-178.
- Mazaheri, A. R., Zeinolebadi Rozbahani, M., & Beiranvand, B. (2020). Quasi-Static and Dynamic Analysis of Vertical and Horizontal Displacements in Earth Dams (Case Study: Azadi Earth Dam). *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 4(4), 223-232.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., & Ramsay, J. (2007). Blast loading and blast effects on structures—an overview. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 7(S1), 76-91.
- Rajendran, R., & Lee, J. M. (2009). Blast loaded plates. *Marine Structures*, 22(2), 99-127.
- Sherard, J. L., Woodward, R. J., Gizienski, S. F., & Clevenger, W. A. (1967). *Earth and earth-rock dams*.

Subjected to Surface Explosion Loading, Shock and Vibration, Article ID 4981507, 2021.

TM 5-855-1, Fundamental of Protective design for conventional weapon, (1986). Washington: department of army technical manual.

Wang, C., Chen, W., & Hao, H. (2020). Effects of subsurface explosion on the stability of earth embankments: A parametric study. *International Journal of Impact Engineering*, 140, 103542.

Wang, Z., Lu, Y., & Bai, C. (2011). Numerical simulation of explosion-induced soil liquefaction and its effect on surface structures. *Finite elements in analysis and design*, 47(9), 1079-1090.

Zamyshlyayev. B. V., Y. S. Yakovlev. (1973). *Dynamic Loads in Underwater Explosion*, Naval.

Zhang, Z, Wang, G, Wang, C, Pang, B. (2014), Numerical simulation of failure modes of concrete gravity dams subjected to underwater explosion. *Engineering Failure Analysis*.

Zheng, J., & Tannant, D. D. (2023). Numerical modelling of blast effects on geotechnical structures: Recent advances and future trends. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 131, 104827.