

Numerical study of the effect of explosive load on the stability of earth dams

Amin Gholizad^{1*}, Soheil sarparast sadat²

1- Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran
2- PhD Student in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran.

ABSTRACT

Earthen dams have a great impact on various aspects of the life of the surrounding communities. Therefore, the need for continuous monitoring and optimal control during construction and safe operation of these structures when applying dynamic loads, including earthquakes, and especially explosive loads due to possible sabotage and fire during construction has always been considered. The effects of explosive loading can be measured by considering several conditions affecting the performance of earth dams using several parameters, the from most important of which Cited are the dimensions of the pit caused by the explosion and the stability coefficient of upstream and downstream slopes. Therefore, in the present study, according to the researches done in the field of dynamic loading of earth dams, while selecting the model and its characteristics, in order to validate the simulation process and apply dynamic loading, the results of numerical solution with the article A reference is compared that provides acceptable consistency. Then, the explosion loading in the form of Abaqus finite element software is simulated in certain parts of the structure and after analysis, the results show that by increasing the explosive charge and increasing the water level of the dam reservoir and also reducing the density of dam materials; The depth and dimensions of the hole created by the explosion in the crown of the dam will increase, which will also indicate local damage. Finally, to investigate the dynamic stability of the slopes, the results are transferred from the finite element software to the slope stability analysis software (Geostudio) in the form of displacement-time data at specified depths below the blast points. The earth dam is subjected to quasi-static and then dynamic analysis and finally stability analysis. The results indicate that under an explosive charge of 800 kg with a specific loading position, the reliability coefficient of slope stability is higher than the reliability coefficient introduced by the publication 624 (seismic analysis and design of earth and gravel dams), which indicates the no of Serious damage and general instability of the dam structure and stability of slopes against explosive load have been identified.

ARTICLE INFO

Receive Date: 26 November 2021
Revise Date: 31 January 2022
Accept Date: 17 February 2022

Keywords:

Earth Dam
Blast Load
Finite Element Method
Dynamic Analysis
Stability Analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.315290.2650>

*Corresponding author: Amin Gholizad
Email address: Gholizad@uma.ac.ir

بررسی عددی تاثیر بار انفجاری بر پایداری سدهای خاکی

امین قلی‌زاد^{۱*}، سهیل سرپرست‌سادات^۲

۱- استاد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

سدهای خاکی تأثیر بسزایی بر جنبه‌های مختلف زندگی جوامع اطراف دارند از این رو ضرورت پایش مستمر و کنترل بهینه در حین ساخت و بهره‌برداری ایمن از این سازه‌ها به هنگام اعمال بارگذاری‌های دینامیکی اعم از زلزله و بخصوص بارهای انفجاری ناشی از اقدامات احتمالی خرابکارانه و آتشکاری در هنگام ساخت همواره مورد توجه بوده است. اثرات ناشی از بارگذاری انفجاری با در نظر گرفتن شرایط تاثیرگذار بر عملکرد سدهای خاکی با استفاده از پارامترهای متعددی قابل سنجش بوده که از مهم‌ترین آنها می‌توان به ابعاد گودال ناشی از انفجار و ضریب پایداری شیب‌های بالادست و پایین‌دست سازه‌ی مذکور اشاره نمود. از این رو در پژوهش حاضر با توجه به تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی بارگذاری دینامیکی سدهای خاکی، ضمن انتخاب مدل و ویژگی‌های آن، به منظور صحت‌سنجی فرآیند شبیه‌سازی و اعمال بارگذاری دینامیکی، نتایج حل عددی با مقاله مرجع مقایسه گردیده که انطباق قابل قبولی را ارائه می‌دهد. در ادامه بارگذاری دینامیکی انفجار در قالب نرم افزار اجزای محدود *Abaqus* در نقاط معینی از سازه شبیه‌سازی شده و پس از تحلیل و بررسی، نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش میزان شارژ انفجاری و افزایش سطح آب مخزن سد و نیز کاهش چگالی مواد تشکیل دهنده‌ی بدنه؛ عمق و ابعاد حفره‌ی ایجاد شده‌ی ناشی از انفجار در تاج سد که بیانگر خرابی موضعی نیز خواهد بود، افزایش می‌یابد. در نهایت برای بررسی پایداری دینامیکی شیب‌ها، نتایج به صورت داده‌های جابجایی-زمان در عمق مشخص در زیر نقاط انفجاری، از نرم‌افزار اجزای-محدود به نرم‌افزار تحلیل پایداری شیب‌ها (*Geostudio*) منتقل شده و مدل سد خاکی تحت تحلیل شبه استاتیکی و سپس دینامیکی و در نهایت تحلیل پایداری قرار می‌گیرد. نتایج بیانگر این موضوع است که تحت شارژ انفجاری ۸۰۰ کیلوگرم با موقعیت بارگذاری مشخص، ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها از میزان ضریب اطمینان معرفی شده توسط نشریه ۶۲۴ (تحلیل و طراحی لرزه‌ای سدهای خاکی و سنگریزه‌ای) بیشتر بوده که مبین عدم آسیب‌دیدگی جدی و عدم ناپایداری کلی سازه‌ی سد و پایداری شیب‌ها در برابر بار انفجاری مشخص شده است.

کلمات کلیدی: سد خاکی، بار انفجار، روش اجزای محدود، تحلیل دینامیکی، تحلیل پایداری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.315290.2650	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.315290.2650	۱۴۰۱/۰۹/۳۰	۱۴۰۰/۱۱/۲۸	۱۴۰۰/۱۱/۲۸	۱۴۰۰/۱۱/۱۱	۱۴۰۰/۰۹/۰۵
				امین قلی‌زاد	*نویسنده مسئول:	
				Gholizad@uma.ac.ir	پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

مدیریت مؤثر و محافظت از سازه‌هایی مانند سدها با توجه به هزینه‌ی بالای فرآیند طراحی، ساخت و بهره‌برداری و نیز از طرفی به علت اثرگذاری بالایی که این سازه‌ها در حیطه‌ی عملکردی، بر جنبه‌های مختلف زندگی مردم اعم از امنیت اقتصادی و اجتماعی دارند، این نوع از سازه‌ها را در زمره‌ی سازه‌های با اهمیت بالا قرار داده است. از این رو هر عاملی که باعث به خطر افتادن عملکرد بهینه و ایمن سازه‌ی سد شود لازم است مورد توجه و بررسی قرار گرفته و در صورت لزوم، اقدامات و تمهیدات لازم در زمینه‌ی طراحی، فرآیند ساخت، بهره‌برداری و محافظت پس از آن صورت گیرد. پی‌آمد این نوع از عوامل خطرزا می‌تواند باعث آسیب‌رساندن و یا تخریب تمام یا قسمتی از سازه‌ی سد شود که از این جمله می‌توان به عملیات آتشکاری حین ساخت سد و سازه‌های اطراف در حین بهره‌برداری اشاره نمود که بدون شک لزوم توجه بیشتر به منظور داشتن بینش دقیق در جهت کاهش اثرات احتمالی اقدامات ذکر شده را در پی دارد. بررسی آثار و پیامدهای ناشی از انفجارهای در حین ساخت و دوران بهره‌برداری، بر ایمنی و عملکرد سدهای خاکی و ارائه‌ی معیارهای لازم جهت انجام انفجارهای ایمن بسیار ضروری است. همچنین آگاهی از قدرت انفجارهایی که می‌تواند موجب خرابی یک سد خاکی شود، اطلاعات لازم را برای بررسی و تصمیم‌گیری در زمینه پدافند غیرعامل و مدیریت بحران در مواقع ضروری را فراهم می‌نماید. در سال ۱۹۸۵ گزارشی از طرف دیپارتمان داخلی مرکز تحقیقات و مهندسی ایالات متحده^[۱] در زمینه تأثیر انفجار بر میزان تغییرات فشار آب منفذی در سدها تهیه شده است. این گزارش تحقیقات صورت گرفته در کشورهای مختلف مانند روسیه، هند و ایالات متحده را در بر گرفته است که بر اساس گزارش مذکور با توجه به موقعیت و نیز فشار حاصل از انفجار، پارامترهای مؤثر اعم از میزان فاصله منبع انفجار، ابعاد سد، بیشینه سرعت و فشار، میزان شعاع اثرگذاری و همچنین شعاع چاله ایجاد شده و نیز حالات ممکن برای هریک از پارامترها، مورد سنجش قرار گرفته و با توجه به نتایج داده‌های تجربی، یک محدوده اثرگذاری تعریف شده است؛ در صورتی که میزان و موقعیت انفجار خارج از حیطه اثرگذاری باشد تأثیرات قابل توجهی را به دنبال نخواهد داشت.

آقایان ژانگی وانگ و یانگ لو طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ [۲ و ۳ و ۴] تحقیقاتی را در زمینه تأثیر موقعیت و میزان شارژ انفجاری در خاک‌های با درجه اشباع متفاوت انجام داده‌اند. در این مقالات توده‌ی خاک به صورت یک ماده سه فازی با در نظر گرفتن قسمت‌های دانه‌ای، آب و هوا فرض شده است که برای فرض چنین حالتی از معادلات حالت که میزان اثرگذاری هر یک از فازها را به صورت جداگانه در نظر می‌گیرد استفاده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده در این تحقیقات و با توجه به تئوری‌های موجود، میزان تغییرات تنش‌های مؤثر و کل و همچنین تغییرات فشار آب منفذی و امکان وقوع روانگرایی خاک در محدوده اثر شارژ انفجار بررسی شده که با توجه به درجه اشباع خاک و عدم وجود زمان لازم به منظور انتقال فشار تحمل شده توسط آب موجود در توده خاک به دانه‌های توده خاکی، بیشتر فشار حاصل از انفجار به اضافه فشار آب منفذی تبدیل و زایل شده است. طبق نتایج بدست آمده، منطقه‌ای که امکان وقوع روانگرایی که یکی از عوامل بسیار مهم در پایداری و ایمنی توده خاک است به میزان و فاصله شارژ انفجاری وابسته است.

در سال ۲۰۱۷ آقای پی‌لی و همکاران [۵] در مطالعه‌ای که بر پروژة‌های برق آبی در جنوب غربی چین داشتند و با توجه به لزوم ایجاد انفجارهای بزرگ و با شدت بالا برای حفر دامنه‌های سنگی، روشی برای پیش‌بینی تاریخچه زمانی ارتعاشات انفجار در شیب‌های زیاد ارائه داده که یک طرح کنترل طیفی ارتعاش انفجار بر اساس این روش پیشنهاد شده است. علاوه بر این، یک مطالعه موردی دیگر برای حفاری شیب تکیه‌گاه پروژه برق آبی خیلودو ارائه شده که نتایج نشان می‌دهد اگر فاصله زمانی تأخیر انفجار کمتر از ۲۰ میلی‌ثانیه یا بیشتر از ۵۰ میلی‌ثانیه باشد، مقدار زیادی از انرژی بار انفجاری در باند فرکانس رزونانس شیب توزیع می‌شود. با فرض فاصله زمانی تأخیر بهینه شده‌ی ۲۵-۲۰ میلی‌ثانیه و ۴۵-۵۰ میلی‌ثانیه، ترکیبات فرکانس پایین ارتعاشات انفجار بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر بوده و کنترل طیفی می‌تواند به طور مؤثرتری اجرا شود.

در سال ۲۰۱۳ آقای ایک سوها [۶] در مطالعه‌ای که هدف از آن ارزیابی سرعت موج برشی مواد سد خاکی با استفاده از ارتعاش حاصل از انفجار مصنوعی و بررسی کاربرد آن بوده توانسته است طی آزمایش و نظارت بر انفجار مصنوعی نزدیک میدان در سد سنگدک کره با استفاده از ارتعاشات ناشی از چهار نوع مختلف با وزن‌های متفاوت بار انفجاری و عمق سوراخ‌های ایجاد شده، تاریخچه زمانی شتاب‌گیری در

¹ - U.S. Department of interior, Engineering and Research Center

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 مازول‌های برشی مرتبط است، قابل تخمین خواهد بود. ضمناً مشخص شده است که تأثیر انواع انفجار بر تخمین سرعت موج برشی برای مواد سد هدف ناچیز بوده و سرعت موج برشی را می‌توان به طور مداوم ارزیابی کرد. بنابراین در مورد سدهای خاکی میانه و کوچک مقیاس، سرعت موج برشی مواد پرکننده زمین را می‌توان با استفاده از سوابق ارتعاش انفجار به دست آمده در سایت مجاور سد نیز ارزیابی کرد. سازمان مهندسان ارتش آمریکا [۷] طرح‌های مهمی را در زمینه بررسی اثر انفجار بر روی سدهای خاکی و تخمین میزان خرابی‌ها هدایت کرده است که مقالات بخشی از آنها در هشتاد و دومین سمپوزیوم ضربه و ارتعاش در نوامبر ۲۰۱۱ ارائه شده است که از جمله‌ی آنها می‌توان به "شکل‌گیری گودال انفجار در سدهای خاکی (تحلیل عددی)"، "نگاهی به مطالعات اخیر مدل‌های بزرگ مقیاس انفجار بر روی سدهای خاکی با مخزن پر" و "مطالعات کاهش اثر انفجار بر روی مدل آزمایشگاهی کوچک مقیاس" اشاره نمود.

ارزیابی مقاومت و عملکرد سدهای خاکی در برابر اقدامات انفجاری نه تنها به میزان شارژ انفجاری وابسته خواهد بود بلکه به الگوی و نوع اقدام آشکاری و یا احیاناً خرابکارانه، محل اقدام انفجاری (تاج سد، پایین‌دست، بالادست) و نوع مقطع سد نیز بستگی خواهد داشت. ارائه‌ی احتمالاتی و برآورد میزان تأثیر این نوع بارگذاری و چگونگی ایجاد حفره‌ی ناشی از آن در سازه و مقطع سد خاکی مورد توجه بوده است لیکن با توجه به نوع عملکرد این سدها و وجود جریان آب در توده سد، بررسی اثر همزمان اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده ناشی از شوک امواج و اثر خرابی موضعی و یا کلی ناشی از انفجار در پایداری شیب‌های بالادست و پایین‌دست که به طور مستقیم با احتمال وقوع پدیده‌ی روانگرایی در اثر بارگذاری انفجاری مرتبط می‌باشد در قالب مقاله حاضر طرح گردیده است.

۲- صحت حل عددی عددی

به منظور پذیرش نتایج تحلیل عددی و اطمینان به نتایج حاصل شده، بایستی مدل اجزای محدود با نتایج حاصل از تحقیق انتخاب شده به عنوان مقاله‌ی مرجع صحت‌سنجی شود. در صورتی که مقایسه‌ی نتایج انطباق قابل قبولی داشته باشد می‌توان نمونه‌ی تحلیل‌های مشابه را توسط تحلیل عددی مورد بررسی قرار داده و به نتایج استناد نمود.

با توجه به اینکه پژوهش‌های مورد استنادی در رابطه با عملکرد سدهای خاکی تحت بارگذاری انفجاری با در نظر گرفتن تمام پارامترهای تأثیرگذار از جمله اندرکنش سازه و سیال، پارامترهای توصیفی خاک، شرایط مرزی و دیگر شرایط اثرگذار در این رابطه صورت نگرفته و نتایج قابل اتکایی برای بررسی پایداری سدها ارائه نشده است، به همین منظور در ابتدا به منظور صحت‌سنجی روند تحلیل دینامیکی، آنالیز دینامیکی مدل سد انتخابی در قالب مقاله مرجع در نظر گرفته شده و نتایج با مقاله مذکور مقایسه شده است. در ادامه برای صحت‌سنجی فرآیند بارگذاری انفجاری، یک توده خاک با ابعاد مشخص تحت بارگذاری انفجاری مدل شده و پس از تحلیل دینامیکی، نتایج با روابط پایه-ای تعریف شده برای شرایط مختلف وقوع انفجار در آیین نامه *TM5-855-1* [۸] مطابقت داده می‌شود. پس از صحت‌سنجی مراحل یاد شده، مدل سد مذکور تحت بارگذاری انفجاری قرار گرفته و پارامترهای تأثیرگذار مورد بررسی قرار گرفته است.

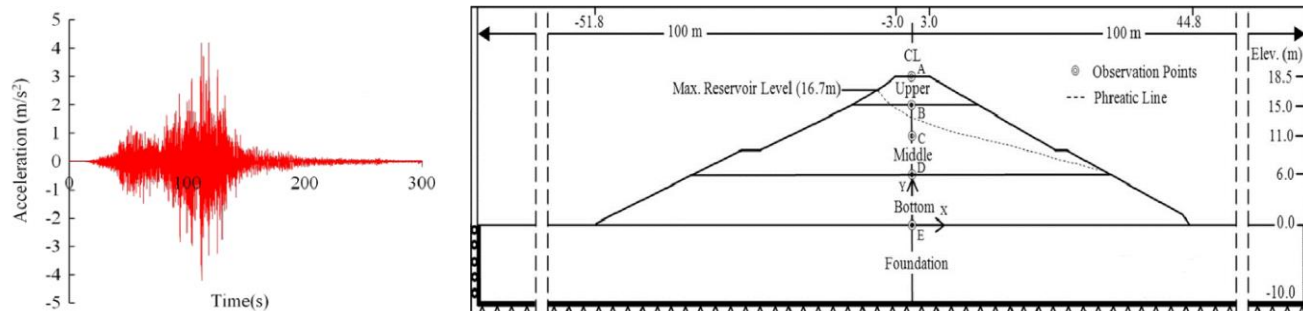
۲-۲- صحت‌سنجی روند تحلیل دینامیکی

به منظور صحت‌سنجی روند تحلیل دینامیکی سد خاکی، مقاله‌ی آقایان بودراک چاراتپانگون و همکاران که در سال ۲۰۱۱ [۹] انجام شده است به عنوان پژوهش مرجع انتخاب و مدل سد خاکی مورد بررسی در مقاله‌ی مذکور با نام سد فوجی‌نیوما^۲ (شکل ۱-الف) که تحت بارگذاری رکورد شتاب زمین لرزه توهوکو^۳ (شکل ۱-ب) واقع شده به عنوان مدل مبنا انتخاب و پس از انجام تحلیل دینامیکی لرزه‌ای، نتایج با مقاله مذکور مقایسه شده است. مقطع سد فوجی‌نیوما دارای ۱۳۳ متر طول بوده و به صورت دو بعدی و در حالت کرنش مسطح^۴ ارائه شده است.

² - Fujinuma

³ - Tohoku

⁴ - Plane Strain Condition



شکل ۱: الف - مقطع سد فوجی نیوما (شکل راست)؛ ب - تاریخچه زمانی شتابنگاشت زلزله توهوکو (شکل چپ) [۹]

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، سد همگن فرض شده و تحت چهار قسمت تقسیم بندی شده است که مشخصات توصیفی خاک برای هر قسمت در جدول ۱ ارائه شده است. طبق مقاله مذکور رفتار مصالح سد به صورت مدل موهرکلمب^۵ در نظر گرفته شده که یک مدل الاستوپلاستیک کامل^۶ با یک سطح تسلیم است که رفتار الاستیک آن توسط الاستیسیته همسانگرد^۷ و در قالب مدول الاستیسیته خطی و نسبت پواسون قابل تعریف خواهد بود.

جدول ۱: مشخصات لایه های مختلف سد خاکی [۹]

بخش	لایه	γ_{sat} (KN/m^3)	γ_{dry} (KN/m^3)	$k_x = k_y/4$ (m/s)	E (MPa)	k_{vm} (GPa)	ν	c (KPa)	ϕ (deg)
توده سد	زردین	16	18	$5.5 * 10^{-7}$	50	1.87	0.3	18.4	31
	میانی	14	16	$5.5 * 10^{-7}$	30	1.12	0.3	7.8	32
	بالایی	16	18	$5.5 * 10^{-7}$	17.5	0.65	0.3	0	37
فونداسیون	-	-	30	-	300	-	0.2	-	-

پارامترهای معرفی شده در قالب توصیف ویژگی های توده خاک مقطع سد عبارتند از: E مدول الاستیسیته، ν نسبت پواسون^۸، γ_{sat} و γ_{dry} بترتیب برابر وزن مخصوص اشباع و خشک خاک، k_x و k_y بترتیب برابر ضریب نفوذپذیری خاک در راستای y و x بوده، c مقدار چسبندگی خاک و ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک و در نهایت K_w به عنوان مدول بالک آب و n نسبت تخلخل خاک در نظر گرفته شده است. با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس و شرایط توصیف شده، شبیه سازی سد انجام شده و در شکل شماره ۲ ارائه شده است. به منظور اعمال شرایط مرزی به مدل شبیه سازی شده، شرایط مرزی در جهت های افقی و قائم در قالب مرزهای زیرین سد محدود شده است. در این مطالعه به منظور انجام صحیح تحلیل دینامیکی ابتدا سد مذکور تحت اثر حداکثر تراز آب مخزن تحت اعمال فشار استاتیکی در جهت عمود بر وجه بالادست مورد تحلیل قرار گرفته و در ادامه به منظور بدست آوردن شرایط تنش اولیه، تحلیل استاتیکی پایدار نشت^۹ از مقطع سد صورت گرفته است. المان در نظر گرفته شده برای این تحلیل از نوع المان $CPE4P$ است که یک المان پیوسته در حالت کرنش صفحه ای با فرض فشار آب منفذی می باشد. در قدم نهایی در جهت تحلیل دینامیکی، رکورد زلزله توهوکو به مدل اعمال شده و نتایج مربوط به جابجایی نقطه وسط تاج سد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

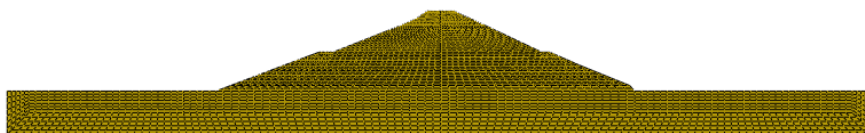
⁵ - Mohr-Coulomb

⁶ - elastic-perfectly plastic

⁷ - isotropic

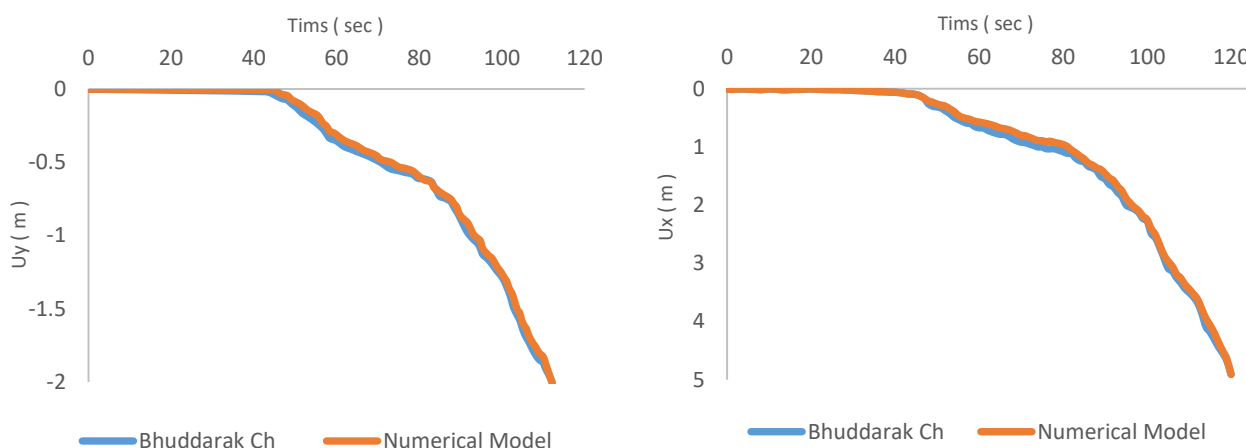
⁸ - Poisson's ratio

⁹ - steady-state



شکل ۲: مدل شبیه‌سازی شده‌ی سد خاکی فوجی نیوما

مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌سازی و روند تحلیل دینامیکی سد مذکور در شکل ۳ تحت عنوان مقایسه میزان جابجایی افقی و عمودی نقطه وسط تاج سد (نقطه A) واقع در ارتفاع ۱۸/۵ متری ارائه شده است که مطابقت قابل قبولی را نشان می‌دهد.

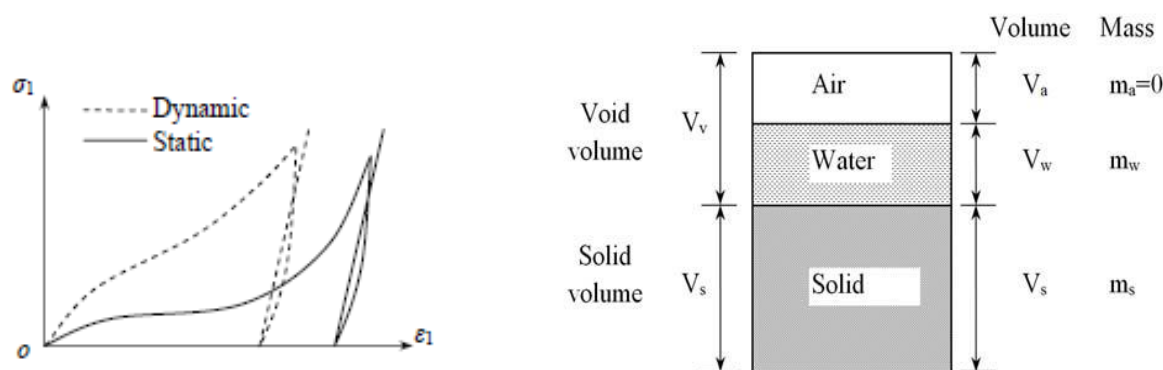


شکل ۳: مقایسه جابجایی افقی (راست) و جابجایی قائم نقطه A در وسط تاج سد فوجی نیوما تحت اعمال رکورد زلزله توهوکو

۲-۲- صحت‌سنجی فرآیند بارگذاری انفجاری

۲-۲-۱- رفتار خاک

ساختار یک توده خاک از دانه‌های جامد تشکیل شده که مابین آن از آب و هوای منفذی پر شده است. در واقع توده‌ی خاک به صورت سه فازی است که در شکل شماره‌ی ۴-الف طرح کلی این ساختار نمایش داده شده است. اسکلت خاک می‌تواند تنش‌های نرمال و برشی را به منظور تحمل نیرو به قسمت‌های تشکیل دهنده منتقل کند. این انتقال نیرو بسیار پیچیده بوده و می‌تواند به عوامل متعددی همچون نسبت تخلخل، درصد تشکیل دهنده‌ی هر یک از فازها و نیز میزان و چگونگی نیروی اعمالی بستگی داشته باشد [۱۰].



شکل ۴: الف- طرح کلی ساختار خاک (راست) [۱۰]؛ ب- اثر نرخ کرنش سریع بر رفتار فشاری یک بعدی خاک (چپ) [۱۱]

در شکل شماره ۴- ب میزان اثر نرخ زمانی تغییرات کرنش بر رفتار خاک در دو حالت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی ارائه شده است [۱۱]. برای توصیف انتشار امواج تنش در یک توده‌ی خاک لازم است ویژگی‌های توده خاک بررسی گردد. اصل پایه‌ای این توصیف تناسب بین فشار وارده و تغییر حجم نسبی خاک است. خاک‌ها می‌توانند به دو گروه اصلی چسبنده و غیر چسبنده تقسیم شوند. در خاک‌های چسبنده مقدار کافی رس وجود دارد که ذرات خاک را به هم می‌چسباند و یک استحکام داخلی ایجاد میکند. در خاک‌های غیر چسبنده که فاقد ماده بهم‌پیوست دهنده‌ی ذرات جامد است، استحکام داخلی از طریق اصطکاک مابین ذرات جامد حاصل می‌شود. با توجه به این که مکانیزم تغییر شکل در خاک به نسبت اجزای تشکیل دهنده‌ی خاک و شرایط بارگذاری وابسته است، از این رو مکانیزم تغییر شکل خاک خشک و مرطوب نیز متفاوت خواهد بود. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان گفت که در تحلیل تغییر شکل خاک دو مکانیزم اصلی وجود دارد:

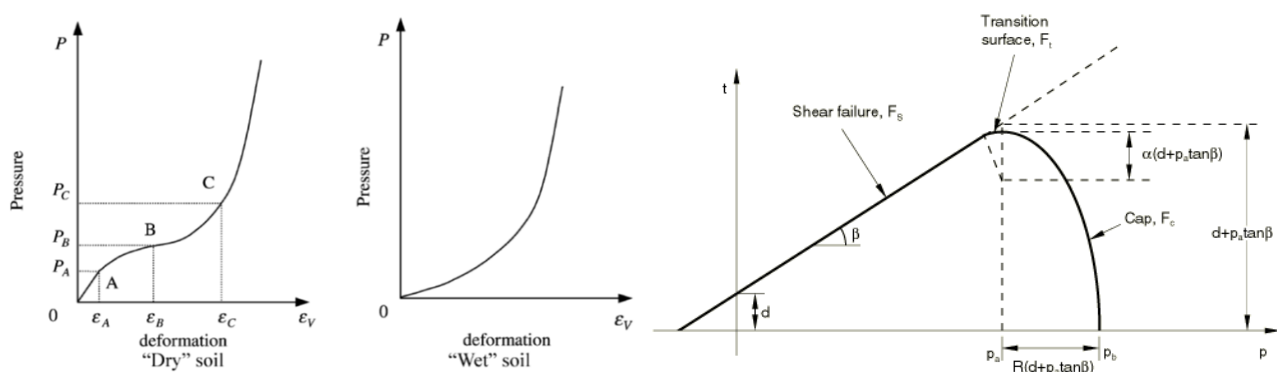
۱- تغییر شکل اسکلت خاک (ذرات جامد)

۲- تغییر شکل تمام فازهای خاک

زمانی که خاک فشرده می‌شود هر دو مکانیزم اثر مشابهی دارند ولی در صورت تفاوت فرآیند بارگذاری و به نسبت اختلاف میان اجزای تشکیل دهنده‌ی خاک، یکی از مکانیزم‌ها چیره شده و می‌توان از مکانیزم دیگر صرف‌نظر نمود. در خاک خشک مکانیزم اول غالب است و زمانی که بارگذاری به صورت استاتیکی و یا دینامیکی آرام باشد، با توجه به ایجاد ممانعت از تغییر شکل اسکلت خاک به علت تراکم‌پذیری اولیه‌ی هوای منفذی، از این رو با افزایش فشار، مرز بین ذرات خاک تغییر کرده و اسکلت ذرات خراب شده و پس از آن مکانیزم دوم فعال خواهد شد و از مکانیزم اول صرف نظر می‌شود و در واقع مکانیزم دوم زمانی مطرح می‌شود که $P > P_B$ باشد. از این رو نسبت بین فشار و تغییر شکل در نمودار شکل ۵- الف ارائه شده است. در خاک مرطوب مرز مابین ذرات جامد سست بوده و آب و هوای منفذی مقاومت بالایی نسبت به مرزهای ذرات جامد دارد و با یک بارگذاری دینامیکی سریع تغییر شکل و مقاومت خاک‌ها به وسیله مکانیزم دوم و بخصوص بوسیله تغییر شکل آب و هوای منفذی و نیز تغییر شکل ذرات جامد که به تنهایی در فشارهای بالا کافی است، تعیین می‌شود. تغییر شکل خاک خشک در مقایسه با خاک مرطوب بسیار پیچیده است [۲]. رفتار مکانیکی خاک‌ها ممکن است در سطوح مختلفی مدل شوند. از جمله این موارد می‌توان به قانون خطی هوک و الاستیسیته خطی اشاره نمود که با در نظر گرفتن روابط ساده شده‌ی تنش-کرنش بدست می‌آیند، اما در اصل برای توصیف ویژگی‌های ضروری رفتار خاک بسیار ناقص هستند.

از این رو برخی از مدل‌های رفتاری در رابطه با بارگذاری‌های سریع توسعه داده شده‌اند که می‌توانند توصیف بهتری از مدل‌های رفتاری خاک داشته باشند و در نرم افزارهای المان محدود نیز مورد استفاده قرار گیرند که مدل دراگر-پراگر^{۱۰} از جمله این مدل‌های رفتاری است. در این مدل رفتاری که از اثر J_2 بر روی سطح مقطع رویه‌ی گسیختگی صرف‌نظر شده، سطح گسیختگی خاک در قالب شکل ۵- ب و روابط ارائه شده تعریف می‌شود [۱۲]

¹⁰ - Drucker prager



شکل ۵: الف- نمودار نسبت فشار و تغییر شکل در خاک خشک و تر (راست) [۱۱]: ب- مدل دراگر پراگر (چپ) [۱۲]

$$f = aI_1 + \sqrt{J_2} - k \tag{1}$$

I_1 نامتغیر اول تانسور تنش و J_2 دومین نامتغیر تانسور تنش انحرافی بوده و φ زاویه اصطکاک داخلی تعریف می‌شود به صورتیکه

$$I_1 = tr \sigma = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \tag{2}$$

$$(J_2 = s : s = s_{11}^2 + s_{22}^2 + s_{33}^2), (s = \text{تنش انحرافی}) \tag{3}$$

در این رابطه مقدار a و k در قالب روابط (۴) و (۵) تعریف می‌شوند.

$$a = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \tag{4}$$

$$k = \frac{6c \cdot \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \tag{5}$$

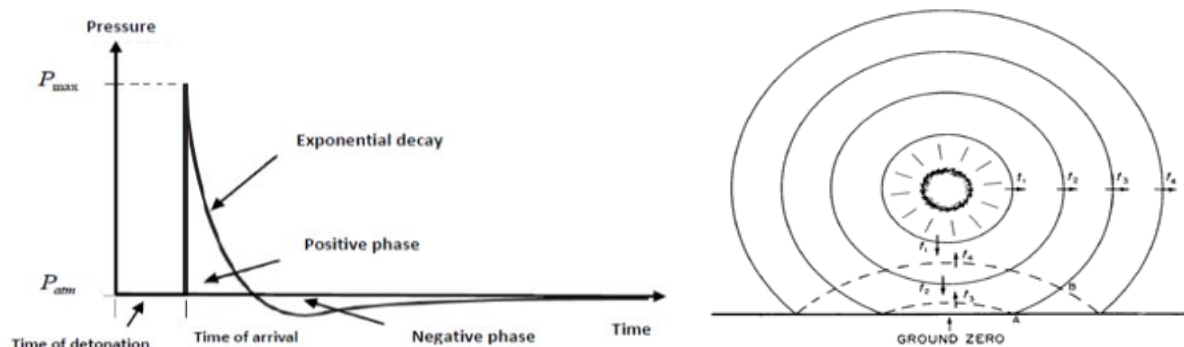
از جمله مزایای معیار دراگر-پراگر استفاده آسان و ارائه‌ی جواب منحصر بفرد است. در عین حالی که مدل دراگر-پراگر رفتار خاک را به صورت خوبی مدل می‌کند لیکن مدل‌های کاملاً پلاستیک خاک به صورت ذاتی محدودیت‌ها و نقص‌هایی دارند که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود

- ۱- میزان اتساع پیش‌بینی شده توسط این مدل‌ها بزرگتر از داده‌های تجربی است.
- ۲- داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که یک چرخه هیسترسیس قابل توجهی به هنگام بارگذاری و باربرداری هیدرواستاتیکی وجود دارد که این امر نمی‌تواند با استفاده از مدول‌های بالک یکسان پیش‌بینی شود و همچنین سطح تسلیم نیز نمی‌تواند محور بارگذاری هیدرواستاتیکی را قطع نماید [۱۳ و ۱۴].
- ۳- امکان ارائه رفتار نرم شوندگی کرنشی وجود ندارد.
- ۴- تأثیر نرخ کرنش در نظر گرفته نمی‌شود.

۲-۲-۲ انفجار

آثار وقوع انفجار به صورت امواجی که ترکیبی است از شوک فشار بالایی که به سمت بیرون از نقطه انفجار گسترش می‌یابد همراه با فشار افزایشی محو شونده به نسبت فاصله، تعریف می‌شود. بارگذاری انفجاری تحت حالت انفجار در هوا، سطح و یا نزدیک سطح زمین و نهایتاً انفجار در زیر سطح زمین و یا زیر سطح آب تقسیم‌بندی می‌شوند. در دینامیک انفجار در هوا به هنگام وقوع انفجار، امواج ناشی از انفجار از

نقطه وقوع به صورت کروی تشکیل شده و گسترش یافته و به سطح زمین برخورد می کند که در شکل ۶-الف چگونگی گسترش امواج ناشی از انفجار دیده شده است. انتقال امواج در هوا بوسیله تخمین فشار ایجاد شده ارزیابی می شود. این ارزیابی با در نظر گرفتن بیشینه فشار ناشی از انفجار در هوا و ایجاد یک شوک به شکل کروی و انتشار آن و نهایتاً برخورد به زمین و بازگشت موج انفجار خواهد بود. امواج ناشی از انفجار که در نتیجه ایجاد دما و فشار بالایی تولید می شوند، به دو شکل موج ضربه و موج فشار تقسیم بندی می شود [۱۵]. از مهمترین عواملی که در انتشار امواج ناشی از انفجار در هوا و گرمای ناشی از آن تعیین کننده است، میزان وزن ماده منفجر شونده است بطوریکه به نسبت افزایش وزن، میزان گرما و موج حاصل از انفجار افزایش می یابد. فرآیند انفجار در هوا در شکل ۶-ب نشان داده شده است [۸].



شکل ۶: الف-انتشار و بازتاب موج انفجار (راست)، ب- تغییرات فشار ناشی از انفجار (چپ) [۸ و ۱۵]

فاز مثبت در نمودار به هنگام افزایش فشار نقطه مورد بررسی در اثر رسیدن موج انفجار به فشار بیشینه ایجاد شده و فاز منفی زمانی رخ می دهد که با گذر موج انفجار، یک فضایی از خلأ ایجاد می شود که باعث مکیدن هوا به سمت نقطه وقوع انفجار شده و هوا در اطراف منطقه مورد نظر، فشاری کمتر از فشار اتمسفر خواهد داشت. پارامترهای انفجار به میزان انرژی انفجار و فاصله از مرکز انفجار وابسته بوده و برای بدست آوردن میزان فشار ماکزیمم از پارمتر فاصله مقیاس شده^{۱۱} تا مرکز انفجار استفاده شده که به صورت زیر تعریف می شود [۸].

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (6)$$

در رابطه ارائه شده R فاصله از نقطه انفجار و W وزن شارژ انفجاری است. با استفاده از پارمتر فاصله مقیاس شده، روابطی متعددی توسط محققین ارائه گردیده که از جمله آنها به روابط براد^{۱۲} [۱۶] و نیز روابط هنریش^{۱۳} برای فاز مثبت و روابط لارچر^{۱۴} [۱۷] برای فاز منفی نمودار تغییرات ناشی از فشار اشاره نمود. به دلیل لزوم استناد به آیین نامه $TM5-855-1$ از این رو روابط توصیه شده آیین نامه برای تابع فشار ایجاد شده در خاک تحت بار انفجاری ارائه می شود [۸]:

$$P(t) = P_0 e^{-\frac{\alpha t}{t_a}} \quad (7)$$

در این رابطه، α مقادیر ثابتی بوده که می توان آن را برابر ۱ در نظر گرفت و $t_a = \frac{R}{c}$ ارائه شده و c (به عنوان میانگین سرعت انتشار امواج است. مقدار P_0 نیز به عنوان پیک فشار به صورت زیر قابل تعریف خواهد بود

$$P_0 = f \cdot \rho c \cdot 160 \cdot \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (8)$$

در این رابطه f فاکتور کوپل^{۱۵}، ρc (psi/fps) مقاومت ظاهری آکوستیک^{۱۶} و n ضریب میرایی در نظر گرفته شده است.

¹¹ - Scaled Distance

¹² - Brode

¹³ - Henrych

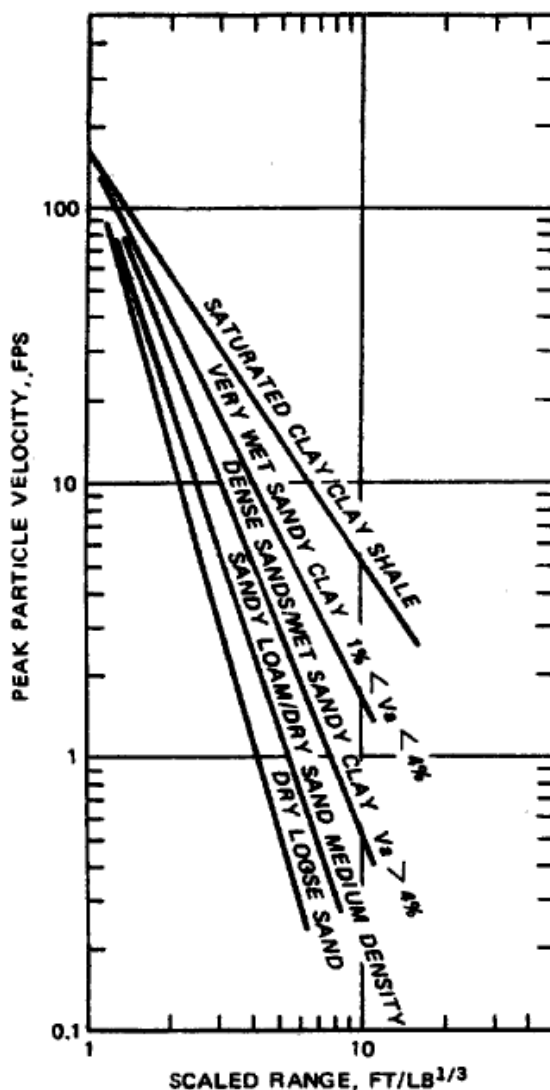
¹⁴ - Larcher

¹⁵ - Coupling factor

لرزش‌هایی که به واسطه انفجار در خاک ایجاد می‌شوند توسط امواج لرزه‌ای انتقال می‌یابند. امواج تولید شده ناشی از شوک وارد بر زمین می‌تواند به ترتیب در دو دسته امواج توده‌ای^{۱۷} و امواج سطحی^{۱۸} شکل گرفته و منتشر می‌شوند [۱۸]. امواج توده‌ای از میان لایه‌های زمین عبور می‌کنند در حالی که امواج سطحی در امتداد سطح زمین منتشر می‌شوند. با توجه به پیچیدگی خاک و پارامترهای تاثیرگذار بر آن نحوه انتشار امواج ناشی از انفجار نیز بسیار پیچیده بوده و به عوامل متعددی بستگی دارد. از جمله این عوامل می‌توان به میزان محتوای آب منفذی توده‌ی خاک اشاره نمود که با افزایش میزان درجه اشباع خاک میزان پیک تنش و شتاب تنش ایجاد شده افزایش خواهد یافت. از عوامل دیگر می‌توان به سرعت لرزه‌ای، c ، به منظور فرض شاخصی برای مقایسه سرعت انتشار شوک ناشی از انفجار در محیط‌های خاکی و سنگی اشاره نمود که طبق رابطه ارائه شده ۹ تعریف می‌گردد [۸]

$$c = \sqrt{\frac{M}{\rho_0}} \quad (۸)$$

که در این رابطه M به عنوان سختی یا مدول خاک و ρ_0 به عنوان چگالی خاک تعریف شده است. در شکل شماره ۷ میزان بیشینه سرعت امواج ناشی از انفجار در خاک‌های مختلف به نسبت فاصله مقیاس شده نشان شده است.



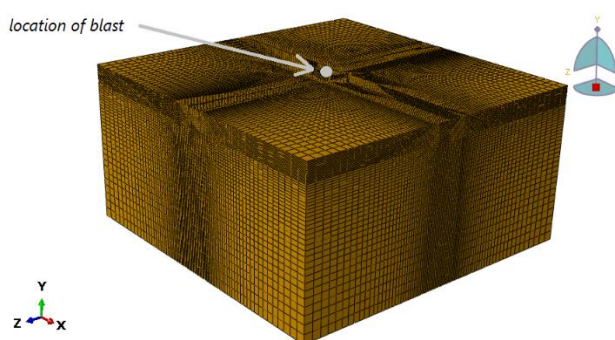
¹⁶ - Acoustic Impedance

¹⁷ - Body waves

¹⁸ - Surface waves

شکل ۷، نحوه انتشار امواج ناشی از شوک زمین [۸]

به منظور اعتبارسنجی روند بارگذاری انفجاری خاک، با استفاده از آیین‌نامه *TM5-855-1* و همچنین پژوهشی که در این رابطه با موضوع تأثیر انفجار سطحی بر سازه‌های بتن مسلح مدفون توسط ناگی و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۱۹] صورت گرفته است، مدل توده‌ی خاک سه بعدی تعریف شده و طی بارگذاری دینامیکی انفجاری در بالای سطح زمین، فشار حاصل از وقوع انفجار در توده خاک مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با مبانی آیین‌نامه‌ای مقاسیه شده و نتایج بدست‌آمده اعتبارسنجی می‌شود. یک مدل سه بعدی توده‌ی خاک به ابعاد ۱۰۰*۱۰۰*۱۰ متر و به ارتفاع ۵۰ متر که در شکل ۸ نشان داده شده است، شبیه‌سازی شده و پارامترهای معرف ویژگی‌های خاک که به صورت مدل رفتاری دراگر پراگر که در جدول ۲ ارائه شده است نیز به مدل مورد نظر اختصاص داده می‌شود.



شکل ۸: مدل توده خاک مدل شده تحت بارگذاری انفجاری

برای بارگذاری دینامیکی وابسته به زمان ناشی از انفجار، از الگوریتم *CONWEP* موجود در حلگر حل صریح نرم‌افزار آباکوس استفاده شده و تحلیل دینامیکی صورت گرفته است.

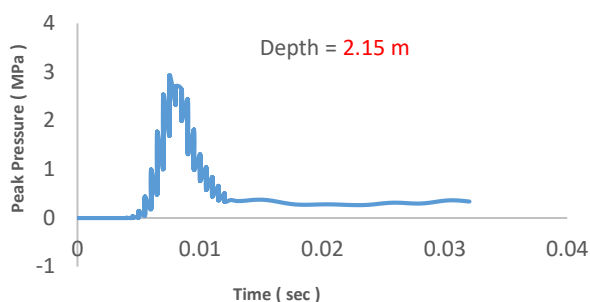
جدول ۲: مشخصات لایه‌های مختلف توده خاک [۱۹]

	Parameters	
1	Young's modulus, E (MPa)	51/7
2	Poisson's ratio, ν	0/45
3	Density, ρ (kg/m^3)	1920
4	Material cohesion, d (MPa)	0/036
5	Material angle of friction, β	24
6	Cap eccentricity parameter, R	0/3
7	Initial cap yield surface position, ε_v	0/02
8	Transition surface radius parameter, a	0/05
9	Cap hardening behaviour, Stress, plastic volumetric strain (MPa)	2/75 - 0/00
		4/83 - 0/02
		5/15 - 0/04
		6/20 - 0/08

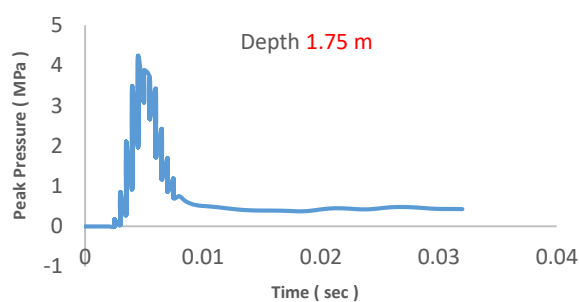
به منظور بارگذاری انفجاری توسط این روش از یک شارژ انفجاری ۱۰۰ کیلوگرم *TNT* در فاصله ۰/۵ متری از سطح زمین استفاده شده است. طبق آیین‌نامه، ماکزیمم پیک فشار حاصل از انفجار در عمق خاک از رابطه شماره ۷ که پارامترهای تعریف شده در آن به صورت زیر توصیف شده است، بدست می‌آید. طبق آیین‌نامه *TM5-855-1*، مقادیر پارامترهای شوک زمین با نوع خاک رسی و رس ماسه‌ای مرطوب با هوای منفذی به صورت زیر تعیین می‌شود

$$n = 2/5, \quad \rho c = 41, \quad f = 0/14$$

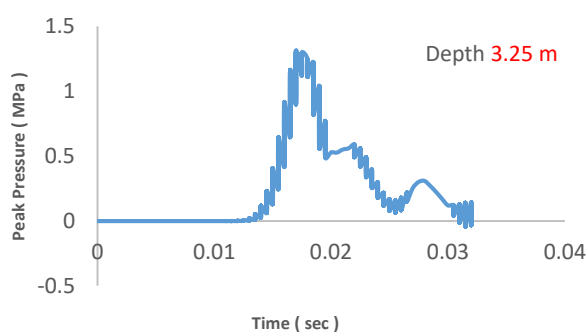
نمودار تاریخچه زمانی تابع پیک فشار برای عمق‌های مختلف از خاک مورد بررسی، بصورت اشکال ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ قابل ارائه است.



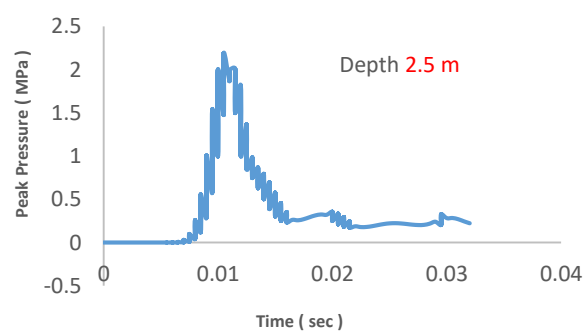
شکل ۱۰: نمودار فشار-زمان در فاصله ۲/۱۵ متری عمق زمین



شکل ۹: نمودار فشار-زمان در فاصله ۱/۷۵ متری عمق زمین

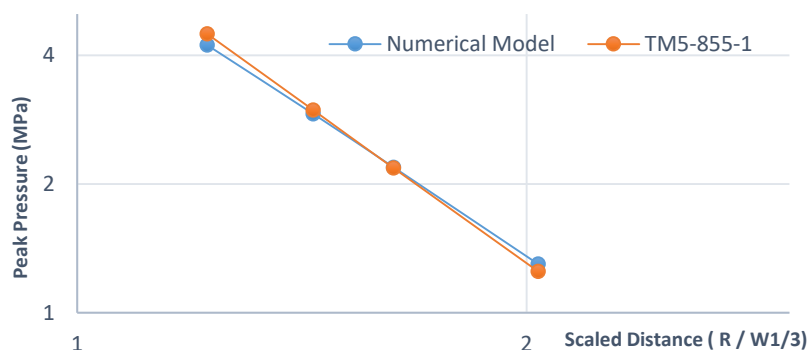


شکل ۱۲: نمودار فشار-زمان در فاصله ۳/۲۵ متری عمق زمین



شکل ۱۱: نمودار فشار-زمان در فاصله ۲/۵ متری عمق زمین

با بررسی نمودارهای فشار-زمان در اعماق مختلف زمین مشاهده می‌شود که با فاصله گرفتن از مرکز شارژ انفجاری و محل وقوع انفجار، بیشینه فشاری حاصل از انفجار در خاک کاهش یافته و انرژی انفجار در عمق خاک میرا خواهد شد. در ادامه در شکل ۱۳ به منظور اعتبارسنجی، نتایج بدست آمده در قالب نمودار لگاریتمی با نتایج حاصل از روابط آیین‌نامه‌ای مورد مقایسه قرار گرفته است که تطابق قابل قبولی را ارائه داده است.



شکل ۱۳: نمودار صحت سنجی نتایج بدست آمده با مقادیر آیین نامه ای

۳- بررسی عددی

پس از اعتبارسنجی روند تحلیل های دینامیکی و فرآیند بارگذاری انفجاری در خاک، به منظور ترکیب فرآیندهای فیزیکی تأثیرگذار در حین تحلیل، بایستی پدیده های موثر در روند بارگذاری انفجار مورد توجه قرار گرفته شود که از جمله آنها می توان به تغییر شکل های بزرگ در همسایگی شارژ انفجاری و اندرکنش بین سیال و سازه اشاره کرد. به همین جهت روش کوپل لاگرانژ اولرین (CLE)^{۱۹} را می توان به عنوان یکی از این روش ها انتخاب نمود که در قالب استفاده از نرم افزار المان محدود امکان استفاده از این ویژگی وجود دارد. حل گر لاگرانژی به طور کلی برای توصیف مواد جامد مناسب بوده و از نظر محاسباتی سریع است و تعریف خوبی از رابط های ماده ارائه می دهد. اشکال اصلی روش لاگرانژی، عدم توانایی آن در مدیریت تغییر شکل های بزرگ است. از این رو برای تغییر شکل های کوچک مناسب تر است. در روش اولرین مش بندی در فضا ثابت فرض شده و با ثابت بودن مش، هنگام تغییر شکل زیاد مشکلی در اعوجاج شبکه وجود ندارد. این روش به طور معمول برای توصیف رفتار سیال و گاز مناسب خواهد بود. برای ترکیب مزایای این دو روش از روش ترکیبی لاگرانژی و اولرین استفاده می شود که می تواند به طور موثر برهم کنش سیال-سازه و مسائل تغییر شکل بزرگ را ارائه کند. روش CLE به طور گسترده ای برای بررسی رفتار دینامیکی سازه های تحت بار انفجار نیز استفاده شده است. در این شبیه سازی، سد خاکی و فونداسیون سد به صورت مدل لاگرانژی شبیه سازی شده و به منظور شبیه سازی ماده آب از مدل اولرین استفاده شده است. از طرف دیگر به منظور ترکیب ویژگی های آنالیزهای اولرین و لاگرانژین در یک مش بندی واحد و نیز برای کنترل اعوجاج های شدید المانی در بخش های لاگرانژین در قالب مدل تحت بارگذاری های با نرخ بالا، از ویژگی مش بندی تطبیقی (ALE)^{۲۰} بهره گرفته شده است [۲۰].

۳-۱- هندسه مدل سد خاکی و شرایط تحلیل

شبیه سازی سد خاکی فوجی نیوما که قبلاً مشخصات مقطع و طول مدل توصیف شده است، به صورت سه بعدی انجام پذیرفته و خاک مورد استفاده در این پژوهش بر اساس جدول ۱ که خصوصیات بخش های مختلف بدنه و فونداسیون سد مذکور را ارائه می دهد، تعریف گردیده و با استفاده از نوع المان $C3D8R$ که از نوع المان های پیوسته می باشد مش بندی شده است. به منظور حل عددی اثر انفجار در نرم افزار آباکوس از روش الگوریتم $CONWEP$ برای شبیه سازی اثر انفجار بهره گرفته شده و به منظور تحلیل اثر انفجار از آنالیز $Dynamic/Explicit$ استفاده شده و نیز در شکل ۱۴ نیز هندسه مدل و نقاطی که محل وقوع انفجار خواهد بود قابل مشاهده است. نقطه اول در بالای تاج سد، نقطه دوم در شیب پایین دست و در محل اتصال لایه ی بالایی و میانی سد و نهایتاً نقطه سوم در شیب پایین دست و در محل پنجه سد اختیار شده است. در خصوص انتخاب محل وقوع انفجار در قالب نقطه شماره ۱ (روی تاج سد) می توان به این موضوع اشاره کرد که این نقطه از محتمل ترین نقاط برای اقدامات انفجاری بر روی سد می باشد که از این رو بررسی اثر انفجار در این نقطه ضروری است. در خصوص علت انتخاب نقاط انفجاری شماره ۲ و ۳ که به ترتیب بر روی شیب پایین دست و پنجه سد اختیار شده است نیز می توان به احتمال بیشتر وقوع انفجار در این نقاط در مقایسه با نقاط مفروض احتمالی واقع در شیب بالادست اشاره کرد که باعث افزایش ضریب اثرگذاری این نقاط بر ناپایداری سد در هنگام وقوع انفجار خواهد بود. از جمله تئوری های محتمل در این خصوص می توان به احتمال ایجاد مجرای از نشت در مقطع سد اشاره کرد که مواد و ذرات خاک را به سمت پایین دست شسته و هدایت می کند و با گذر زمان در اثر شرایط محیطی و فرسایش طبیعی ممکن است بزرگتر شده و به علت نزدیکی به محیط اشباع گسترش یافته و باعث خرابی موضعی و در نهایت باعث تخریب و ناپایداری سد شود.

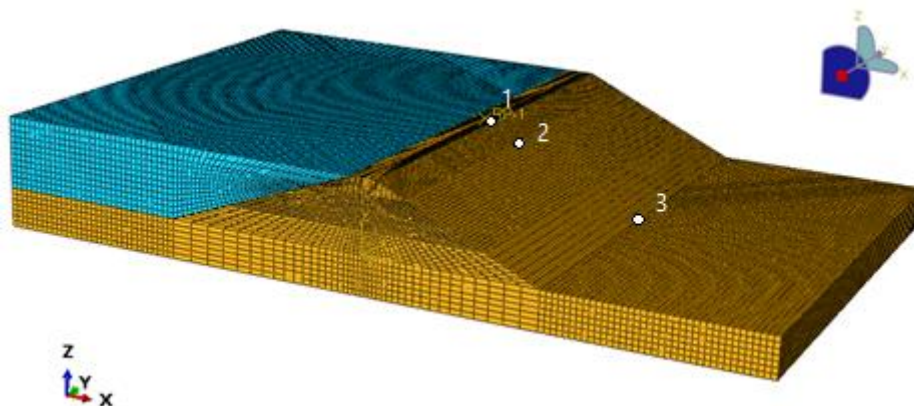
در ادامه به منظور لحاظ ویژگی های ماده ی سیال آب از معادله حالت U_s-U_p Hugoniot و داده های جدول ۲ استفاده شده است که در آن c_0 و s رابطه خطی بین سرعت خطی شوک U_s و سرعت مخصوص U_p را تعریف میکند. سیال آب با استفاده از المان نوع $EC3D8R$ که یک المان اولرین است مش بندی شده است.

¹⁹ - Coupled Lagrangian-Eulerian (CLE)

²⁰ - Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)

جدول ۳: مشخصات سیال آب

c_0	s	Grüneisen ratio Γ_0
۱۵۰۰	۰	۰



شکل ۱۴: هندسه مدل سد خاکی به همراه مخزن سد و نقاط مفروض وقوع انفجار

۴- تفسیر نتایج

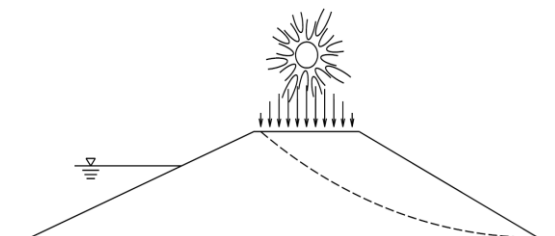
در ابتدا به منظور بررسی اثر انفجار بر خرابی‌های احتمالی در سازه‌ی سد، می‌توان خرابی‌ها را در قالب موارد زیر بیان نمود

۴-۱- خرابی حاصل از انفجار

وقوع انفجار بر روی سد خاکی در صورتیکه امواج ناشی از انفجار به حد کافی از نظر انرژی و محدوده‌ی اثرگذاری موثر باشد می‌تواند منجر به خرابی پایداری کلی و خرابی موضعی سد شده و از طرف دیگر در صورتی که انرژی ناشی از انفجار بر روی تاج سد گودالی به حد کافی بزرگ ایجاد کند ممکن است قسمتی از تاج سد را از بین برده و منجر به سرریز شدن آب و نهایتاً فرسایش و خرابی سد شود. از طرف دیگر امواج شوک انتشار یافته در میان سد نیز ممکن است منجر به افزایش اضافه فشار آب منفذی و کاهش تنش مؤثر شود. در ادامه انواع خرابی‌های ناشی از انفجار ارائه شده است.

۴-۱-۱- خرابی پایداری کلی ناشی از انفجار^{۲۱}

انتشار امواج ناشی از انفجار و ارتعاش ناشی از آن ممکن است منجر به افزایش برش داخلی و یا افزایش فشار آب منفذی و کاهش تنش مؤثر شده که در نهایت به شکست و ناپایداری کلی سد منجر می‌شود [۲۱].



شکل ۱۵: خرابی پایداری کلی دینامیکی [۲۱]

²¹ - Global Stability Failure

فشار آب منفذی که از حضور آب در منافذ خاک منشأ می‌گیرد و در ویژگی‌های مکانیکی خاک همچون مقاومت برشی، میزان نفوذ پذیری و تغییرات حجم به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم تأثیر گذار است ممکن است مثبت و یا منفی باشد. فشار آب منفذی به صورت منفی تحت حالت مکش در مقاومت برشی خاک شرکت می‌کند که این میزان افزایش مقاومت، اغلب در طراحی سدهای خاکی صرف نظر شده و تنش موثر بوسیله تغییر حالت تنش که توسط ترزاقی ارائه شده است تعریف می‌شود [۲۲]

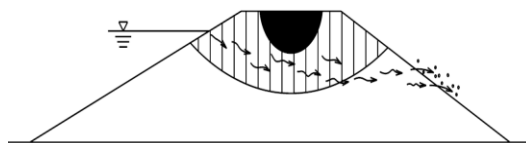
$$\sigma' = \sigma - u \quad (9)$$

در این رابطه σ' به عنوان تنش مؤثر، σ تنش کل و u فشار آب منفذی تعریف می‌شود. در سدهای با مقیاس بزرگ ممکن است فشار آب منفذی زیادی در داخل هسته‌ی سد مشاهده شود لیکن زمانی که نشت پایدار از بدنه سد رخ می‌دهد، با توجه به سطح تراز آب مخزن سد، خط فریاتیکی^{۲۲} یا خط جریان و سطح فشار آب منفذی اولیه در داخل سد نیز تعریف خواهد شد. فشار آب منفذی اولیه با توجه به تغییرات تراز آب مخزن سد و بموجب آن تغییرات خط نشت، تغییر خواهد کرد. از این رو اضافه فشار آب منفذی (Δu) زمانی ایجاد خواهد شد که تغییری در تنش اعمالی به سد بوجود آید و از طرف دیگر زمان کافی برای زایل شدن این اضافه تنش وجود نداشته باشد. از این رو مقاومت برشی کاهش خواهد یافت. افزایش پیوسته اضافه فشار آب منفذی می‌تواند منجر به تنش‌های برشی شود که از میزان طراحی خیلی بیشتر باشد و در نهایت منجر به پدیده پایپینگ^{۲۳} گردد. این خرابی زمانی اتفاق می‌افتد که تنش موثر کوچکتر و یا مساوی صفر شده و خاک به صورت مایع روان گردد.

انفجار باعث شوک تنشی بالایی در توده خاک شده و نرخ کرنش بزرگی به میزان 10^{-1} تا 10^{-3} ایجاد می‌کند که نهایتاً منجر به شرایط تنش و فشار بالاتری در مقایسه با شرایط بارگذاری استاتیکی می‌شود [۲۳]. زمان کوتاه شوک تنشی باعث افزایش آبی اضافه فشار آب منفذی خواهد شد که در یک دوره زمانی نسبتاً طولانی باقی می‌ماند [۲۴]. برای داشتن درک صحیح از اثر اضافه فشار آب منفذی ناشی از انفجار، در نظر گرفتن سه موضوع ضروری است که بترتیب عبارتند از؛ ۱- انتقال پاسخ از خاک به هنگام انتشار امواج شوک، ۲- پاسخ رسوب کرده خاک پس از گذر امواج شوک و ۳- زایل شدن فشار آب منفذی ناشی از انفجار. از این رو در خاک‌های اشباع، زمانی که پاسخ سیال به صورت الاستیک و پاسخ خاک به امواج شوک پلاستیک باشد، منجر به افزایش در اضافه فشار آب منفذی خواهد شد و در حالتی که هر دو اسکلت خاک و سیال رفتار الاستیک داشته باشند اضافه فشار آب منفذی دیده نمی‌شود [۲۵].

۴-۱-۲- خرابی موضعی ناشی از انفجار^{۲۴}

در صورتی که انرژی ناشی از انفجار بر روی تاج سد گودالی به حد کافی بزرگ ایجاد کند ممکن است قسمتی از تاج سد را از بین برده و منجر به سرریز شدن آب و نهایتاً فرسایش و خرابی سد شود.



شکل ۱۶: خرابی موضعی ناشی از انفجار در تاج سد [۲۱]

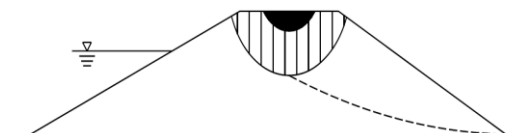
۴-۱-۳- خرابی پایداری کلی سد ناشی از انفجار پس از تغییر شکل مقطع سد

پس از ایجاد گودال و تغییر شکل مقطع سد در اثر انفجار ممکن است پایداری کلی سد تحت تأثیر قرار گیرد و در صورتی که سد همچنان مورد بهره برداری باشد در اثر عوامل معمول، پتانسیل ناپایداری و خرابی کلی و خطرپذیری سازه سد افزایش می‌یابد.

²² - Phreatic Line

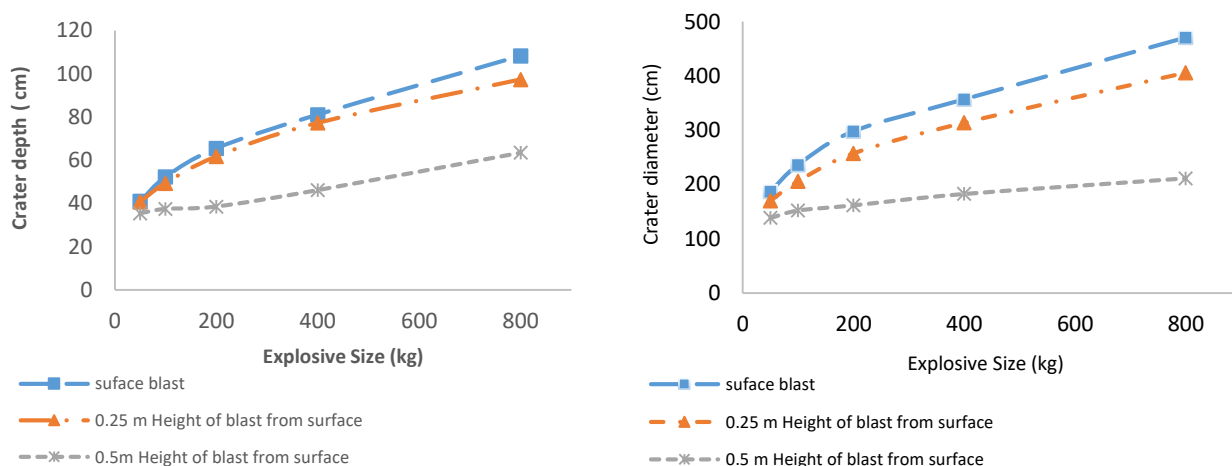
²³ - Piping phenomena

²⁴ - Localize Failure



شکل ۱۷: خرابی پایداری کلی در نتیجه تغییر شکل مقطع سد پس از انفجار [۲۱]

در اولین گام، نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی سد خاکی در معرض شارژ متفاوت بار انفجاری در سه حالت مختلف موقعیت وقوع انفجار در نقطه شماره ۱ که عبارتست از: بر روی تاج سد، ۰/۲۵ متری و ۰/۵ متر بالای سطح تاج سد خاکی در قالب نمودارهای میزان عمق و قطر حفره ایجاد شده مربوط به هر یک از حالات بارگذاری به صورت مقایسه‌ای در شکل ۱۸ نمایش داده شده است.



شکل ۱۸: نمودار میزان قطر (راست) و عمق (چپ) حفره ایجاد شده در اثر انفجار در موقعیت های متفاوت

تحت تأثیر بارهای انفجاری تعریف شده، سطح خاک به طور چشمگیری فشرده می‌شود و در نتیجه‌ی تحلیل‌های صورت گرفته، گودالی ناشی از انفجار ایجاد می‌شود که فاصله بین مواد منفجره و سطح خاک نیز تأثیر قابل توجهی در شکل هندسی و نیز عمق و قطر دهانه‌ی گودال ناشی از انفجار دارد بطوریکه وقتی انفجار مواد منفجره نزدیک به سطح خاک رخ دهد، عمق گودال ناشی از انفجار نیز بیشتر خواهد شد.

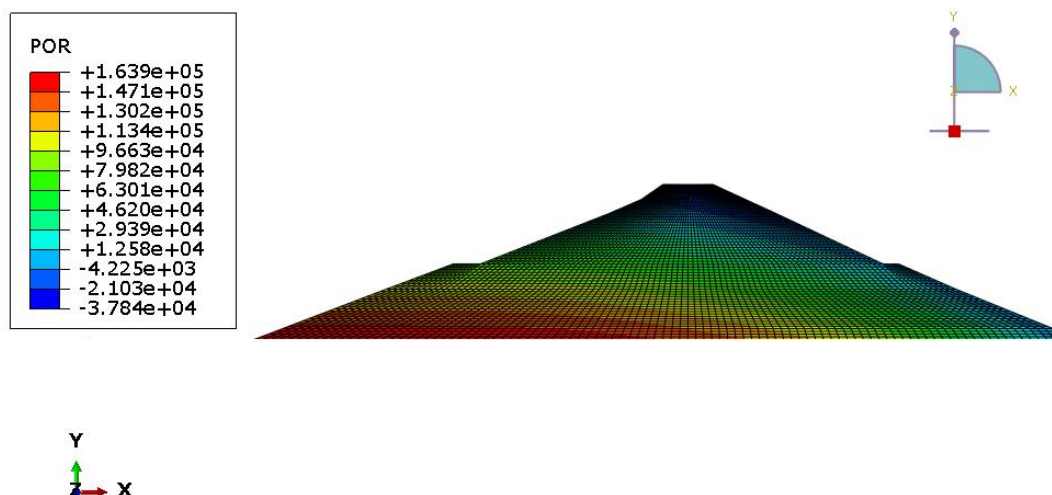
با توجه به نتایج تحلیل، مقدار بیشینه قطر و عمق گودال ایجاد شده ناشی از انفجار متعلق به شارژ انفجاری ۸۰۰ کیلوگرم بوده که قطر گودال ایجاد شده کوچکتر از عرض تاج سد مورد مطالعه است بنابراین شرایط مورد نظر نمی‌تواند منجر به خرابی موضعی مهم و یا ناپایداری کلی سد شود ولی این احتمال وجود دارد که با ادامه بهره‌برداری، پایداری سد بیشتر تهدید گردد. از جمله عوامل تأثیرگذار دیگر میتوان به امکان ایجاد مویرگ‌هایی از جریان آب در بدنه‌ی سد که به مرور زمان ممکن است منجر به فرسایش بدنه سد شود و نیز می‌توان به امکان فرسایش تاج سد تحت عوامل محیطی و سرریز شدن آب مخزن سد که به عنوان یک خرابی هیدرولیکی مطرح است اشاره نمود.

قطر و عمق دهانه گودال ناشی از انفجار با وزن مواد منفجره نیز رابطه داشته و همانطور که داده‌های بررسی عددی نیز نشان می‌دهد، قطر حفره با نسبت افزایش میزان شارژ انفجاری و کاهش فاصله از سطح مورد نظر افزایش می‌یابد. برای عمق حفره‌ی ناشی از انفجار نیز افزایش در شارژ انفجاری و کاهش فاصله از سطح، باعث بیشتر شدن عمق خواهد شد ولی این امکان وجود دارد که در حالت واقعی عمق گودال از یک تناسب و نظم قابل پیش‌بینی برخوردار نباشد که از عوامل آن می‌توان به فاصله محل وقوع انفجار و نیز خاک‌هایی که ممکن است در اثر شدت انفجار به بیرون از حفره پرتاب شده و مجدداً در اثر شتاب گرانشی بخش از این خاک به دورن گودال ریخته شود بستگی داشته باشد. از دیگر عواملی که بر اندازه دهانه گودال ممکن است تأثیرگذار باشد می‌توان به میزان رطوبت، مقاومت برشی، تخلخل و قابلیت انعطاف‌پذیری مصالح خاک اشاره نمود که یکی از مهمترین این عوامل فاکتور میزان رطوبت خاک است. با افزایش میزان آب در خاک، مقاومت برشی خاک به طور مداوم کاهش می‌یابد که در اینصورت یک دهانه بزرگتر تحت همان بار انفجاری تشکیل خواهد شد. علاوه بر

این، با افزایش تخلخل و قابلیت فشردگی خاک، انرژی انفجاری بیشتری به خاک منتقل می‌گردد که در نتیجه آن دهانه‌های بزرگتری تشکیل می‌شود.

۴-۲- مطالعه پارامتری اثر انفجار بر ابعاد حفره ناشی از انفجار در تاج سد خاکی

بررسی عددی و تحلیل سد خاکی تحت بارگذاری انفجاری، اگرچه عملکرد این نوع از سازه‌های هیدرولیکی را در برابر بارگذاری دینامیکی انفجار بیان می‌کند؛ لیکن برای در نظر گرفتن اثر سیال مخزن سد در ابعاد حفره ناشی از انفجار در تاج سد، مطالعه پارامتریک صورت گرفته و اثرات تغییر در تراز آب مخزن سد در اثر عوامل مختلف و تغییر در چگالی مواد تشکیل دهنده سد، مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور درک صحیح از نتایج بدست آمده در ابتدا تحلیل پایدار نشت از بدنه سد تحت تراز ماکزیمم طراحی آب مخزن (تراز فریبورد^{۲۵}) که برای مقطع سد فوجی نیوما ارتفاع ۱۶/۷ متری در نظر گرفته شده، صورت گرفته و در نتیجه خط تراز لایه‌های اشباع که مرز میان لایه‌های اشباع و غیر اشباع می‌باشد مشخص شده و چگالی مربوط به هر یک از لایه‌ها برای مطالعه‌ی پارامتریک بر اساس داده‌های تجربی سد مذکور در نظر گرفته می‌شود. با توجه به خط نشت، نقاطی که در پایین این خط در بدنه سد قرار دارند دارای فشار آب منفذی مثبت و نقاط بالای این خط دارای فشار آب منفذی منفی هستند. در شکل ۱۹ خط جریان نشت از مقطع بدنه سد نشان داده شده است.



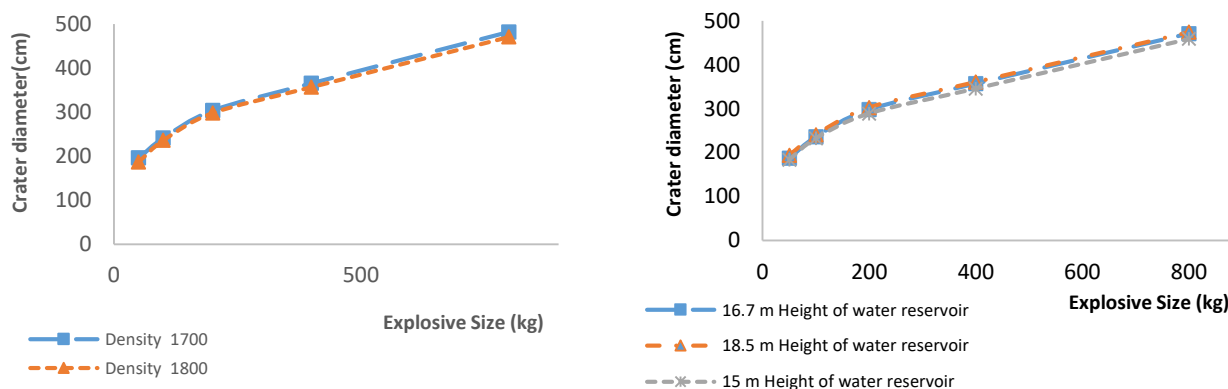
شکل ۱۹: کانتور نشت از بدنه سد

همانطور از خط فریاتیگ بدنه سد مشخص است تقریباً فقط بخشی از لایه‌ی بالایی سد، بالای خط فریاتیگ قرار گرفته و جزو ناحیه اشباع نمی‌باشد. با تغییر ارتفاع خط تراز مخزن سد، کانتورهای فشار آب منفذی در مقطع سد تغییر کرده و با توجه به این موضوع که فشار آب منفذی خود از عوامل مؤثر بر ابعاد حفره ناشی از انفجار است، از این رو تأثیر تغییر ارتفاع تراز مخزن در انفجار سطحی مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج این تحلیل در شکل نموداری ۲۰-الف که میزان تغییرات ابعاد گودال را ارائه می‌دهد نشان داده شده است. همانطور که از نتایج مشخص است با افزایش تراز آب مخزن سد، ابعاد حفره ناشی از انفجار بخصوص عمق گودال افزایش یافته و با کاهش تراز آب میزان عمق گودال کاهش می‌یابد. افزایش ابعاد گودال را می‌توان به کانتور فشار آب منفذی در داخل سد نیز مرتبط دانست. همانطور که بیان شده است مناطق پایینی خط فریاتیگ در مقطع سد دارای فشار آب منفذی مثبت هستند که این موضوع تمایل دارد که مقاومت خاک را کاهش دهد که باعث کاهش توانایی خاک در برابر تحمل فشار بالای امواج شوک ناشی از انفجار شده و متعاقب آن مقدار خاک بیشتری از توده خاک جدا شده و نهایتاً ابعاد حفره بیشتری را منجر خواهد کرد. عواملی مانند درجه اشباع خاک و فشار آب منفذی در عمق و ابعاد حفره بوجود آمده در اثر انفجار و نیز انتقال نیروها و فشارهای حاصل از انفجار در داخل خاک و چگونگی انتشار آن بسیار تأثیر دارند، بطوریکه در صورت بالا بودن درجه اشباع و یا کاملاً اشباع بودن خاک، به علت تراکم ناپذیر بودن فشار آب منفذی موجود در خاک، این

²⁵ - Available Freeboard

موضوع باعث تأثیرپذیری بیشتر خاک از بارگذاری مذکور خواهد شد علاوه بر این درصد رطوبت بیشتر در خاک منجر به کاهش هوای منفذی خواهد شد که این موضوع باعث می شود امواج شوک ناشی از انفجار در مقایسه با کاهش رطوبت در خاک، برای میرا شدن در عمق خاک نیاز به زمان بیشتری داشته باشد.

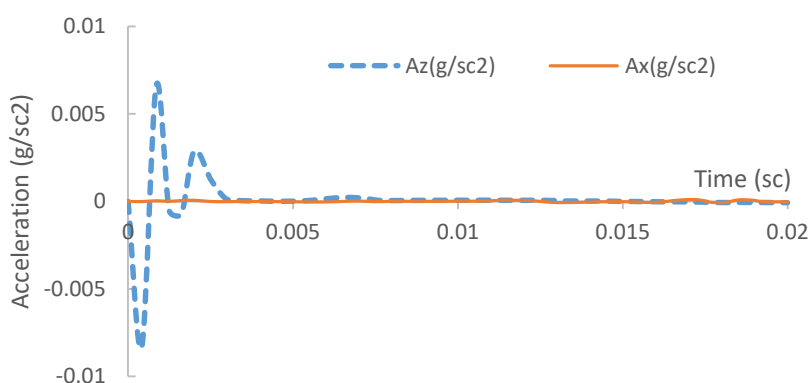
در هنگام ساخت سد خاکی برای لایه های مختلف بدنه سد، عملیات تراکم صورت می گیرد که باعث افزایش میزان چگالی لایه های متراکم شده می شود که این موضوع منجر به افزایش پایداری سراسری سد خاکی خواهد شد. از طرفی تغییر در مقدار چگالی لایه ها در میزان نشت آب در بدنه سد نیز بسیار مؤثر است. از این رو در سد خاکی مورد مطالعه که موقعیت خط فریاتیک به ویژگی های لایه های بدنه ی سد خاکی نیز وابسته است. تغییر در میزان چگالی لایه ها موقعیت خط نشت را جابجا کرده و باعث تغییر درجه اشباع در ناحیه بالای این خط می شود. شکل ۲۰-ب میزان تغییر در ابعاد گودال در برابر تغییر چگالی لایه ی بالایی را در برابر انفجار در سطح تاج و نیز تراز آب ۱۶/۷ متری مخزن سد ارائه کرده است. همانطور که مشاهده می شود افزایش میزان چگالی لایه ی بالایی که می توان آن را به کل سد نیز تعمیم داد، باعث کاهش ابعاد حفره ی ناشی از انفجار خواهد شد. این اثرگذاری را از طرفی نیز می توان به درجه اشباع خاک نیز نسبت داد چرا که با بالا رفتن رطوبت در خاک، میزان بیشینه فشار و شتاب ایجاد شده افزایش می یابد. در خاک های دانه ای با چگالی کمتر که لایه ی بالایی را تشکیل داده اند، میزان تنش های پیک بالاتری خاک را متأثر میکند و در مقایسه با خاک های با چگالی بیشتر، این تنش ها به سهولت از طریق تماس مابین دانه های خاک زایل می شود.



شکل ۲۰: نمودار میزان قطر حفره ایجاد شده در اثر انفجار سطحی در برابر؛ الف- تغییر تراز مختلف آب مخزن (راست)، ب- تغییر چگالی (چپ)

۴-۳- ارزیابی پایداری دینامیکی سد خاکی

ارزیابی پایداری سدها در هنگام وقوع انفجار پیچیده خواهد بود. با توجه به اینکه نرم افزارهای موجود جهت تحلیل انفجار، امکان ارزیابی پایداری دینامیکی را پس از انفجار فراهم نمی کنند، به همین منظور لازم است از نرم افزارهایی با چنین قابلیتی استفاده نمود. با اختیار نمودن نتایج حاصل از حل صریح آنالیز انفجار در نرم افزار اجزای محدود و انتقال این نتایج به عنوان داده های اولیه به نرم افزار پایداری شیبها ژئواستدیو (*Geostudio*) که بر مبنای روش حل اجزای محدود بوده و ویژگی های بسیار خوبی در زمینه تحلیل پایداری سدها و شیبها دارد، می توان اثر انفجار را بر پایداری دینامیکی شیب های سد خاکی نیز شبیه سازی نمود. با توجه به ماهیت بار انفجاری و شباهت ماهوی آن به بار لرزه ای، می توان از نتایج شتاب حاصل از تحلیل دینامیکی انفجار، به عنوان شرایط اولیه تحلیل پایداری استفاده نمود. با عنایت به این که نرم افزار مذکور در حالت دو بعدی تعریف شده است و از طرفی نتایج شتاب استخراج شده از تحلیل دینامیکی تحت حالت سه بعدی بدست آمده اند و در شکل ۲۱ نمایش داده شده است، برای انتقال این داده ها بایستی بعد طول سد را تا حد امکان کوچک فرض نمود. این فرض با در نظر گرفتن این موضوع که میزان شتاب خروجی از تحلیل دینامیکی در حالت سه بعدی به جرم مدل بستگی دارد از این رو با تقلیل بعد سوم مدل؛ نتایج مستخرج از تحلیل دینامیکی آنچنان مورد تأیید نبوده و نتایج تحلیل پایداری که از داده های این تحلیل استفاده خواهد نمود نیز معقول نخواهد بود.

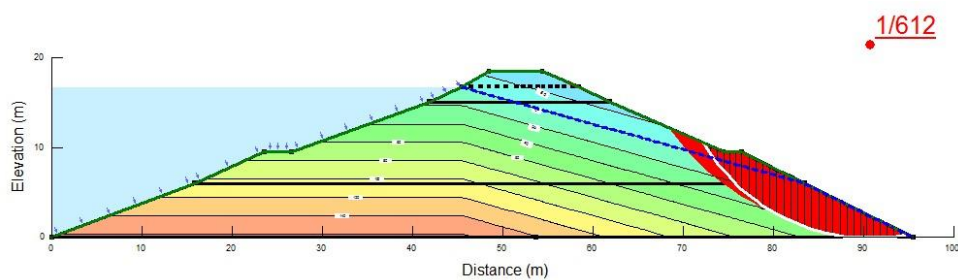


شکل ۲۱: تاریخچه زمانی شتاب استخراج شده تحت تحلیل دینامیکی در جهت x و z

با در نظر گرفتن شرایط ذکر شده، به منظور ارزیابی پایداری دینامیکی سد خاکی از نتایج داده‌های حرکت زمین در نقاط معینی استفاده شده است. به همین منظور برای ثبت حرکت زمین در اثر انفجار بروی سطح تاج سد مذکور اندازه‌گیرهایی در چندین ردیف در عمق $1/8$ متری زیر سطح تاج سد که در این پژوهش حداکثر ارتفاع آب مخزن سد ($16/7$ متر) می‌باشد فرض شده و برای ثبت حرکت زمین در اثر انفجار در نقاط ۲ و ۳ که در شیب پایین دست سد قرار گرفته اند نیز سنسورهایی هایی در عمق مشخص تعریف گردیده و در انتهای تحلیل دینامیکی انفجار، نتایج حرکت زمین در نقاط مذکور به منظور تحلیل پایداری شیب‌ها معدل گیری شده و استخراج می‌شود. در خصوص علت انتخاب ارتفاع تعیین شده، باید به این نکته اشاره نمود که ارتفاع $16/7$ متری برابر تراز طراحی سد مذکور که بیشترین تراز مخزن سد است می‌باشد که محل شروع خط فریاتیک در مقطع سد بوده و با توجه به اندرکنش بین سیال و خاک و وجود تفاوت در میزان فشار آب منفذی و تنش موثر در لایه‌های بالا و پایین این نقطه به عنوان تراز نصب حسگرهای مربوط به داده های جابجایی-زمان انتخاب شده است. در مرحله بعد برای تحلیل پایداری شیب‌های بالادست و پایین دست لازم است که نتایج استخراج شده، در نرم افزار *Quake/W* به عنوان شرایط مرزی اولیه در عمق مذکور وارد شوند ولی چون این امکان در نرم افزار مذکور وجود ندارد، از این رو برای تولید داده‌های حرکت زمین، نتایج به صورت داده‌های سرعت-زمان به نرم‌افزار معرفی می‌شوند تا شرایط مرزی اولیه جابجایی در نرم‌افزار تولید شود. پس از تحلیل دینامیکی توسط نرم افزار مذکور نتایج حاصل به عنوان شرایط اولیه برای تحلیل پایداری شیب به نرم افزار *Slope/W* معرفی شده و تحلیل پایداری صورت می‌گیرد. به منظور تحلیل شبه استاتیکی تحت شرایط مرزی اولیه جابجایی در نقاط اندازه‌گیری مشخص در سد، طبق توصیه آیین نامه "راهنمای تحلیل و طراحی سد های خاکی و سنگریز (نشریه شماره ۶۲۴) [۲۵]، از روش معادل خطی^{۲۶} و روش توصیه شده اسپنسر^{۲۷} استفاده شده است که به عنوان یک راه حل کامل برای تحلیل پایداری شیب‌ها به روش تعادل حدی است. بر اساس بررسی ضرایب اطمینان پایداری شیب سد خاکی که آیین نامه مذکور ارائه نموده است، این ضریب برای تمام سدهای مورد بررسی عددی مابین ۱ الی $1/15$ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که تمامی تحلیل‌های صورت گرفته در این بخش تحت شارژ انفجاری 800 کیلوگرم انجام گردیده است. در ادامه نتایج ضریب اطمینان پایداری برای تحلیل استاتیکی نشت و تحلیل شبه استاتیکی و دینامیکی سد خاکی در شرایط مختلف وقوع انفجار ارائه شده است

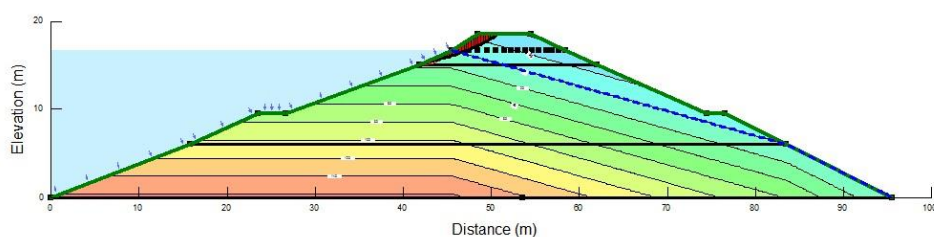
²⁶ - Equivalent Linear Method

²⁷ - Spencer's method



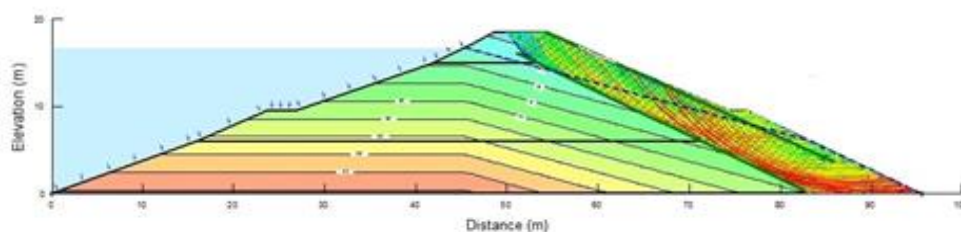
شکل ۲۲: سطح لغزش بحرانی و ضریب اطمینان شیب پایین دست تحت شرایط تحلیل استاتیکی پایدار نشت

1/822



شکل ۲۳: سطح لغزش بحرانی و ضریب اطمینان شیب بالادست تحت شرایط تحلیل استاتیکی پایدار نشت

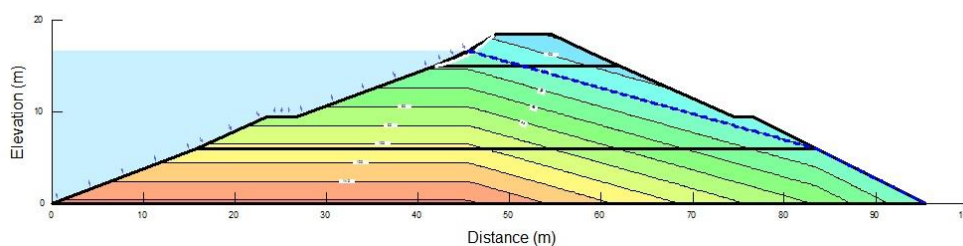
1/554



شکل ۲۴: سطح لغزش بحرانی و ضریب اطمینان شیب پایین دست تحت شرایط تحلیل شبه استاتیکی اسپنسر و نهایتاً تحلیل پایداری در اثر شارژ انفجاری ۸۰۰

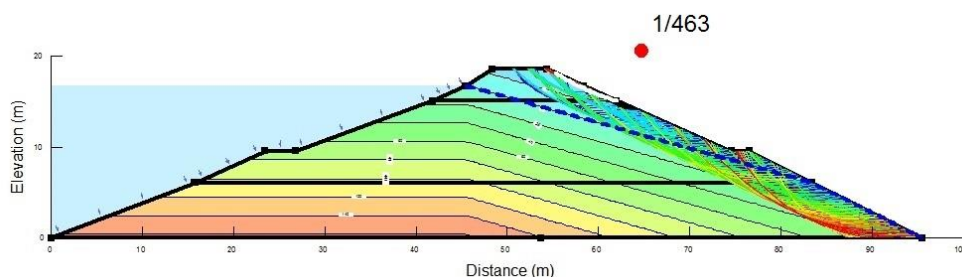
کیلوگرم بر روی تاج سد

1/646

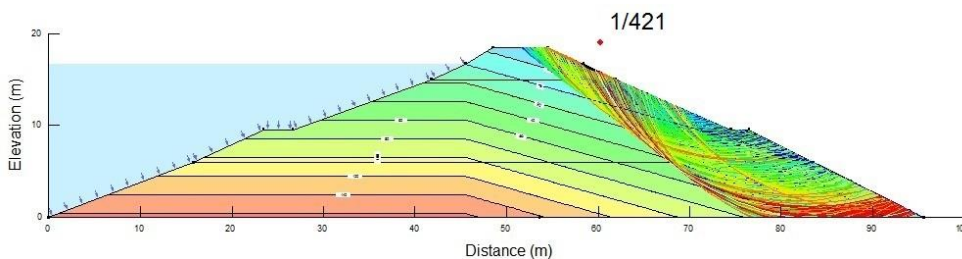


شکل ۲۵: سطح لغزش بحرانی و ضریب اطمینان شیب بالادست تحت شرایط تحلیل شبه استاتیکی اسپنسر و نهایتاً تحلیل پایداری در اثر شارژ انفجاری ۸۰۰ کیلوگرم

بر روی تاج سد



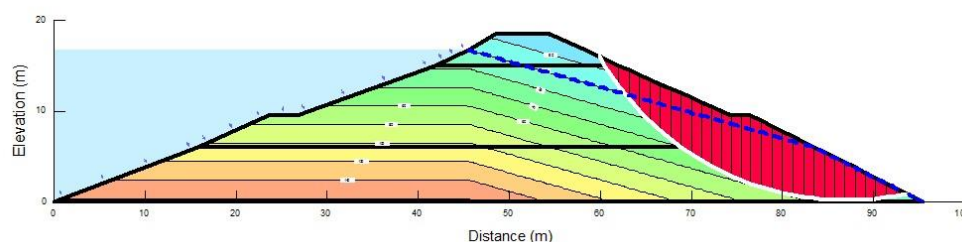
شکل ۲۶: سطح لغزش بحرانی و ضریب اطمینان شیب پایین دست تحت شرایط تحلیل شبه استاتیکی اسپنسر و نهایتاً تحلیل پایداری در اثر شارژ انفجاری ۸۰۰ کیلوگرم بر روی نقطه ۲ (مرز بین لایه های بالایی و میانی سد)



شکل ۲۷: سطح لغزش بحرانی و ضریب اطمینان شیب پایین دست تحت شرایط تحلیل شبه استاتیکی اسپنسر و نهایتاً تحلیل پایداری در اثر شارژ انفجاری ۸۰۰ کیلوگرم بر روی نقطه ۳ (پنجه سد)

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های پایداری و ضرایب اطمینان ناشی از محل‌های متفاوت بارگذاری انفجاری در توده‌ی سد خاکی، بحرانی‌ترین نقطه با کمترین مقدار ضریب اطمینان پنجه‌ی پایین دست سد می‌باشد که برای این مورد ضریب اطمینانی برابر ۱/۴۲۱ ارائه شده است. با توجه به مطالب تحلیلی ارائه شده در خصوص ویژگی لایه‌های زیرین خط نشت و تاثیر افزایش فشار آب منفذی و تنش موثر در افزایش اثرات بار انفجاری بر پایداری سد خاکی می‌توان بیان نمود که نتایج حاصل از نرم‌افزار تحلیل پایداری با نتایج تحلیل‌های تئوری پایداری در قالب ارزیابی‌های اولیه مطابقت داشته بنابراین می‌توان نقطه ۳ که در پنجه‌ی پایین دست سد قرار گرفته است به عنوان بحرانی‌ترین نقطه در نظر گرفت و اقدامات تأمینی در حین ساخت و بهره‌برداری ایمن در سازه سد در نظر گرفته شود. لذا برای سدهای خاکی با ساختار مشابه می‌توان پنجه پایین دست را به عنوان بحرانی‌ترین نقطه برای اقدامات آتشکاری و خرابکارانه‌ی انفجاری در نظر گرفت. با توجه به اینکه در روش تحلیل شبه استاتیکی تغییر مکان در انتهای تحلیل محاسبه نمی‌شود به همین منظور برای تخمین تغییر مکان‌های ماندگار، از روش تحلیل دینامیکی معادل خطی و از ترکیب نتایج روش‌های عددی و روش‌های مکمل نظیر روش بلوک لغزشی نیومارک بهره گرفته شده که طبق این روش کم‌ترین مقدار ضریب اطمینان شیب‌ها عدد ۱ فرض می‌شود که در مواقعی که ضریب اطمینان از این مقدار کم باشد شیب مورد بررسی از نظر پایداری معتبر نخواهد بود. در شکل ۲۸ میزان تغییرات ضریب اطمینان پایداری شیب پایین دست را پس از تحلیل دینامیکی با استفاده از روش نیومارک ارائه می‌دهد.

1/500



شکل ۲۸: سطح لغزش بحرانی و ضریب اطمینان شیب پایین دست تحت شرایط تحلیل دینامیکی نیومارک و نهایتاً تحلیل پایداری در اثر شارژ انفجاری ۸۰۰ کیلوگرم بر روی تاج سد

همانطور که در شکل‌های مربوط به نتایج تحلیل پایداری سد مورد مطالعه در دو حالت آنالیز پایدار استاتیکی نشت و آنالیز شبه استاتیکی و دینامیکی تحت شرایط مرزی اولیه اعمال شده در نقاط واقع در زیر تاج سد در عمق ۱/۸ متری و نقاط ۲ و ۳ در شیب پایین دست سد در اثر انفجار مشاهده می‌شود، مقدار ضریب اطمینان پایداری و سطوح لغزش برای شیب‌های بالادست و پایین دست و در ادامه نیز نتیجه تحلیل دینامیکی با فرض روش نیومارک ارائه شده است. بر این اساس تمامی ضرایب اطمینان شیب‌ها چه در حالت آنالیز استاتیکی و چه در حالت آنالیز شبه استاتیکی و نیز دینامیکی با یک فاصله قابل قبولی از مقادیر توصیه شده آیین‌نامه قرار داشته و با در نظر گرفتن مقدار ۸۰۰ کیلوگرم از شارژ انفجاری مورد بررسی، کمترین مقدار ضریب اطمینان پایداری عدد ۱/۴۲۱ برای شیب پایین دست در اثر انفجار در نقطه ۳ (مرز بین لایه پایینی و فونداسیون سد) رخ می‌دهد. نتایج استخراج شده این مطلب را بازگو می‌نماید که فرض مقدار شارژ انفجاری ۸۰۰ کیلوگرم تأثیر آنچنانی بر پایداری کلی و دینامیکی سد نداشته و برای بدست آوردن مقدار بحرانی شارژ بایستی این مراحل طی شده و آنالیزهای ذکر شده تکرار گردد و نتایج در مورد پایداری کلی دینامیکی سد مورد بررسی قرار گیرد. در این صورت بحرانی‌ترین منطقه ای از سد که هنگام بارگذاری انفجاری در حد خرابی قرار گرفته باشد، مناطقی هستند که در نتایج تحلیل پایداری دینامیکی دارای کمترین مقدار ضریب اطمینان پایداری خواهند بود که بر اساس نتایج حاصل شده پنجه سد در شیب پایین دست نقطه بحرانی از نظر ضریب اطمینان است.

لازم به ذکر است که به هنگام وقوع انفجار چه در تاج سد و چه در شیب پایین دست در همان محل انفجار خرابی موضعی حاصل از انفجار که خود را به صورت تشکیل گودال نشان می‌دهد پدیدار خواهد شد و تنها زمانی این خرابی موضعی می‌تواند مورد توجه اکید باشد و پایداری کلی سد را مورد مخاطره قرار دهد که میزان گودال ایجاد شده به حد کافی بزرگ و قابل توجه بوده و در نهایت منجر به نتایجی همچون سرریز آب و یا ناپایداری کلی سد شود.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش با در نظر گرفتن یک سد خاکی با مقطع و مصالح مشخص و شبیه‌سازی تمام شرایط لازم برای تحلیل دینامیکی انفجار، آنالیز تحت بارگذاری‌های مختلف صورت گرفته و می‌توان بیان نمود که عواملی مانند درجه اشباع خاک و فشار آب منفذی در عمق و ابعاد حفره بوجود آمده در اثر انفجار و نیز انتقال نیروها و فشارهای حاصل از انفجار در داخل خاک و چگونگی انتشار آن بسیار تأثیر دارند، بطوریکه در صورت بالا بودن درجه اشباع و یا کاملاً اشباع بودن خاک، به علت تراکم ناپذیر بودن فشار آب منفذی موجود در خاک، این موضوع باعث تأثیرپذیری بیشتر خاک از بارگذاری انفجاری خواهد شد. برای داشتن درک صحیح از عملکرد سد خاکی بایستی کانتور فشار آب منفذی و جریان عبوری از مقطع سد مورد بررسی قرار گرفته شود. با اعمال صحیح ویژگی‌های مناطق مختلف خاک، تحلیل انفجار صورت گرفته و ابعاد گودال ناشی از انفجار تعیین شده و عوامل تأثیرگذار در مقدار ابعاد گودال با بررسی اثر چگالی مواد تشکیل دهنده بدنه سد بررسی شده است و مشخص شده که با افزایش چگالی در صورت یکسان ماندن تراز آب مخزن سد، میزان ابعاد گودال انفجاری کاهش می‌یابد و نیز با افزایش تراز آب مخزن سد با ثابت فرض نمودن چگالی ناحیه غیر اشباع، افزایش در ابعاد گودال انفجار را شاهد خواهیم بود.

به منظور بررسی پایداری کلی سد خاکی تحت تحلیل دینامیکی از نرم افزار *Geostudio (Quake/w & Slope/w)* استفاده شده و پس از تحلیل دینامیکی تحت خروجی‌های حسگرهای ثبت جابجایی در زیر نقطه تاج سد و همچنین نقطه ۲ (مرز بین لایه بالایی و لایه میانی سد) و نقطه ۳ (واقع در پاشنه سد)، ضریب اطمینان پایداری در تحلیل دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته و با توجه به آیین نامه‌های موجود در این رابطه همچون نشریه ۶۲۴ مشاهده می‌شود، علی‌رغم اینکه کمترین مقدار ضریب اطمینان پایداری مربوط به بارگذاری انفجاری در پنجه شیب پایین دست سد می‌باشد لیکن با در نظر گرفتن مقدار بار انفجاری ۸۰۰ کیلوگرم و شرایط توصیف شده برای انفجار، ضریب اطمینان پایداری شیب‌های سد خاکی به مقدار چشمگیری متأثر نخواهد شد و لازم است برای بدست آوردن میزان بار انفجاری بحرانی که پایداری دینامیکی سد خاکی را تهدید می‌کند تحلیل‌هایی با مقادیر شارژ انفجاری بیشتری صورت گیرد.

فهرست منابع

- [1]-United States Department of Interior. 1985. *Review of Present Practices Used in Predicting the Effects of Blasting on Pore Pressure*. Bureau of Reclamation, Division of Research and Laboratory Services, Geotechnical Branch, GR-85-9.
- [2]-Wang, Z. and Y. Lu. 2003. *Numerical analysis on dynamic deformation mechanism of soils under blast loading*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 23(8): 705-714.
- [3]-Z. Wang, Y. Lu, C. Bai. 2008. *Numerical analysis of blast-induced liquefaction of soil*, Computers and Geotechnics 35 (2) 196-209.
- [4]-Wang Z., Lu Y. and Bai C. 2011. *Numerical simulation of explosive-induced soil liquefaction and its effects on surface structures*. Finite Elements in Analysis and Design 47: 1079-1090, Elsevier.
- [5]- P. Li, W.B. Lu, X.X. Wu, M. Chen, P. Yan, Y.G. Hu. 2017. *Spectral prediction and control of blast vibrations during the excavation of high dam abutment slopes with millisecond-delay blasting*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 94, Pages 116-124
- [6]- Ik-Soo Ha. 2013. *Estimation of shear wave velocity of earth dam materials using artificial blasting test*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 55, Pages 120-129
- [7]- The 82nd Shock and Vibration Symposium in Baltimore, Maryland on Oct. 30 – Nov. 3, 2011.
- [8]- Syndicate of University of Cambridge Hemisphere Publishing Corporation., TM 5-855-1. 1986. *Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons*. Arlington, Virginia: Department of Defense.
- [9]- Bhuddarak Charatpangoon, Junji Kiyono, Aiko Furukawa, Chayanon Hansapinyo. 2014. *Dynamic analysis of earth dam damaged by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake*. 64 (2014) 50-62
- [10]- Helwany, S. 2007. *Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications*.
- [11]- Heierli, W. 1962. *Inelastic wave propagation in soil columns*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. 88(SM6): 33-63
- [12]- Drucker, D. C. and W. Prager 1952. *Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design*. Quarterly of Applied Mathematics 10: 157-175.
- [13]- Brinkgreve, R.B.J. 2005. *Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application*. In: soil constitutive models: Evaluation, selection and calibration, Geo-frontier Conference of ASCE, Austin, Texas: 69-98
- [14]- DiMaggio, F.L. and Sandler, I.S. 1971. *Material model for granular soils*. J. Engrg. Mech. Div. ASCE, 97(EM3): 935-950.
- [15]- Glasstone, S. and P.J. Dolan. 1977. *The Effects of Nuclear Weapons*. 3rd Edition. Washington, DC. Department of Defense and Energy Research and Development Administration.
- [16]- Brode, H.L. 1954. *Numerical Solutions of Spherical Blast Waves*. RM-1363-AEC. Santa Monica, California: The Rand Corporation. September
- [17]- Larcher, M. 2007. *Simulation of the Effects of an Air Blast Wave*. JRC Technical Notes (JRC) 41337. Luxembourg: European Communities.
- [18]- Murphy, J.R. 1981. *Near-Field Rayleigh Waves From Surface Explosions*. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 71, No. 1. pp. 223-248.
- [19]- N. Nagy, M. Mohamed, J.C. Boot. 2010. *Nonlinear numerical modelling for the effects of surface explosions on buried reinforced concrete structures*. Geomechanics and Engineering, Vol. 2, No. 1 (2010) 1-18
- [20]- ravayi, Farzad. 1392. *Securing buried structures against explosion*. Masters. university of mohaghegh ardabili, Faculty of Civil Engineering.
- [21]- Parkes, J et al. 2014. *Embedding the Principles of Prevention in all the Education We Invest in*. Institute of Health and Wellbeing- University of Northampton.

- [22]- Vanpalli S.K. 2010. *Shear strength of unsaturated soils and its application in geotechnical engineering practice*. Taylor and Francis Group, London.
- [23]- Ambrosini D, Luccioni B, Danesi R. 2004. *Craters produced by explosions on the soil surface*. Computer Mechanics 22 : 678–92.
- [24]- Braimah A., Rosen von B., Li Y., Rayhani M. 2012. *Explosive Cratering on Embankment Dams*. Canadian Dam Association 2012 Annual Conference, Canada.
- [24]- Dobry, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R.M. and Powell, D. 1982. Prediction of Pore- water Pressure Buildup and Liquefaction of Sands during Earthquakes by Cycle Strain Method. National Bureau of Standards Building Science Series 138, 150 pp
- [25]- Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, Office of Deputy for Strategic Supervision Department of Technical Affairs 2013. *Guideline for Seismic Analysis and Design of Earth & Rockfill Dams* NO. 624