

بررسی تأثیر محل و شدت انفجار بر آسیب پذیری بدنه‌ی سدهای بتن غلتکی

قاسم دهقانی اشکذری* ۱

زانبار تکمه‌چی ۲

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی پارامترهای مؤثر در هر انفجار، شامل محل و شدت انفجار، بر رفتار سدهای بتن غلتکی و ارزیابی میزان آسیب‌پذیری این سدها است. سد جگین که از بتن غلتکی ساخته شده است، به دلیل احداث در یک دره‌ی تنگ و تغییرات زیاد هندسه‌ی مقاطع مختلف آن جهت مطالعه و ارزیابی میزان آسیب‌پذیری در برابر انفجار انتخاب شده است. به دلیل غیرممکن بودن پیش‌بینی محل انفجار و شدت آن جهت ارزیابی میزان آسیب‌پذیری، به آنالیز پارامتریک نیاز می‌باشد. لذا مدل این سد بتن غلتکی (مقطع بحرانی) برای بارهای انفجاری با شدت و محل اثر متفاوت تحلیل شده است و اثرات این پارامترها بر رفتار و میزان آسیب‌پذیری آن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان داد که همیشه وقوع انفجار در تاج سد بحرانی‌ترین و آسیب‌پذیرترین حالت محتمل برای سد نمی‌باشند. اگرچه نتایج نشان می‌دهد که درحالی‌که تمرکز تنش در محل وقوع انفجار به وجود می‌آید، اما بررسی توزیع تنش‌ها نشان می‌دهد که زمانی که محل وقوع انفجار ثابت است، با افزایش شدت انفجار میزان حداکثر تنش کششی افزایش نمی‌یابد و در بعضی از موارد این مقدار کاهش می‌یابد. به‌هرحال در مورد حداکثر تنش فشاری، می‌توان گفت که هرچه میزان شدت انفجار افزایش یابد حداکثر تنش فشاری نیز افزایش خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی:

بارگذاری انفجار، پارامترهای انفجار، روش اجزای محدود، سد بتن غلتکی

*۱. استادیار مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، gh_dehghani@mut.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، واحد بوکان، دانشگاه آزاد اسلامی، بوکان، ایران، z.tokmechi@gmail.com

مقدمه

از آغاز زندگی بشر بر روی کره‌ی خاکی بلایای طبیعی، جنگ و نزاع جزء لاینفک زندگی انسان‌ها بوده است که همواره ایمنی و خدمات‌دهی زیرساخت‌های موجود و همچنین ایمنی و سلامت ملت‌ها را مورد تهدید قرار داده است (ریحاک^۱ و همکاران، ۲۰۱۶؛ جورج^۲، ۲۰۰۸؛ دفتر پاسخگویی دولت ایالات‌متحده آمریکا، ۲۰۱۱؛ انجمن جهانی اقتصاد، ۲۰۱۴). منابع اصلی این تهدیدها به دو صورت تهدیدات طبیعی و مصنوعی رده‌بندی می‌شوند. تهدیدات طبیعی شامل زلزله، طوفان و سایر عوامل طبیعی و تهدیدات مصنوعی شامل تهدیدات نظامی، تروریستی و غیره می‌باشند (اکبرپور و حسینی^۳، ۲۰۱۱).

در این راستا تاکنون تحقیقات زیادی نیز درباره‌ی تأثیرات انفجار بر سازه‌های مختلف موردبررسی قرار گرفته است که عمده‌ی مطالعات مهندسی موجود در این حوزه، به دو دسته‌ی تحلیل و طراحی (پیشگیری از انهدام سازه ساخته نشده با استفاده از پیش‌بینی تنش‌ها و معیارهای به وجود آمده در طول عمر سازه) و ارزیابی آسیب‌پذیری و بهسازی (به‌دست آوردن تنش‌ها و شرایط سازه‌ی موجود بر اساس بارهای موجود) تقسیم‌بندی می‌شوند.

از طرفی نیز همه‌ی این مطالعات را می‌توان در سه گروه مطالعات آزمایشگاهی، مطالعات میدانی و شبیه‌سازی عددی دسته‌بندی نمود (امینی^۴ و همکاران، ۲۰۱۳). لازم به ذکر است که علاوه بر هزینه‌ی زیاد مطالعات آزمایشگاهی و میدانی، وجود عوارض دیگری چون آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز باعث شده است که بیشتر تحقیقات پیشین به‌صورت مطالعات عددی انجام شوند (انتظاری^۵ و همکاران، ۲۰۱۴).

اگرچه عمده‌ی مطالعات انجام‌شده به‌صورت مطالعات عددی بوده است اما پژوهشگرانی نیز مطالعات آزمایشگاهی و میدانی بر روی اثرات انفجار انجام داده‌اند که عمدتاً در

کشورهایی همچون روسیه، ژاپن و آمریکا صورت گرفته است (امینی و همکاران، ۲۰۱۳). اسمیت^۶ و همکاران (۱۹۸۶) به بررسی رفتار قوس‌های بتنی تحت بار انفجار پرداختند. در ادامه‌ی بررسی رفتار قوس‌های بتنی، دالریوا^۷ (۱۹۸۹) نیز مطالعات آزمایشگاهی جهت تعیین میزان ترک‌خوردگی قوس بتنی مدفون در خاک تحت اثر بار انفجار انجام داده است. همچنین ارزیابی رفتار سدهای وزنی در برابر انفجار، توسط یک مدل مقیاس شده و یک سانتریفیوژ بزرگ انجام شده است (وندیت-الیس^۸ و دیویس^۹، ۲۰۱۰). در این حوزه نیز می‌توان به پژوهش‌گران دیگری نظیر بلانچت^{۱۰} (۱۹۹۸)، اهنو^{۱۱} (۲۰۰۸)، دی^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۰) و ونگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۳) اشاره کرد. علاوه بر این می‌توان به تحقیق ایشیکاوا^{۱۴} و بیپو^{۱۵} (۲۰۰۶) که در حوزه‌ی مطالعات میدانی انجام‌گرفته اشاره نمود. این تحقیق به بررسی تونل‌های مستقیم، شاخه‌ای و شبکه‌ای پرداخته است.

به‌رحال شبیه‌سازی عددی مناسب‌ترین روش جهت بررسی اثرات انفجار است. به‌طورکلی به علت نیاز به مدل‌های پیچیده‌ی انفجار، روند شبیه‌سازی انفجار را می‌توان به سه مرحله تقسیم نمود:

الف- پروسه‌ی انفجار و شکل‌گیری گودال ناشی از آن

ب- انتشار امواج ناشی از انفجار

ج- پاسخ سازه

روش‌های عددی بر اساس نحوه‌ی به کار بردن این سه مرحله به انواع روش‌های جداشده، جدا نشده‌ی غیرکامل و جدا نشده‌ی کامل قابل دسته‌بندی است. روش جداشده بر اساس به‌دست آوردن پاسخ سازه بر اساس تنش‌های به‌دست‌آمده توسط تاریخچه‌ی تنش‌های صحرایی پایه‌گذاری شده است. در پژوهش‌های انجام‌گرفته توسط این روش، از قبیل مطالعات یانگ^{۱۶} (۱۹۹۷)، اثرات اندرکنش بین سازه و خاک

۹. Davis
۱۰. Blanchat
۱۱. Ohno
۱۲. De
۱۳. Wang
۱۴. Ishikawa
۱۵. Beppu
۱۶. Yang

۱. Rehak
۲. George
۳. Akbarpour & Hosseini
۴. Amini
۵. Entezari
۶. Smith
۷. Dallriva
۸. Vanadit-Ellis

استفاده از هر سه مرحله‌ی اشاره شده در یک مدل به‌عنوان روش جدا نشده‌ی کامل شناخته شده است. لو و ونگ با استفاده از روش SPH و روش اجزای محدود به ترتیب خاک نزدیک محل انفجار، سازه و همچنین خاک دور از محل انفجار را با استفاده از شبیه‌سازی عددی جدا نشده‌ی کامل مورد مطالعه قرار دادند (لو^{۱۳} و همکاران، ۲۰۰۵). همچنین صادق‌آذر و همکاران در سال ۲۰۱۰ توسط نرم‌افزار ANSYS به ارزیابی پاسخ سازه‌های بتن مدفون تحت اثر انفجار سطحی پرداختند.

از دیگر پژوهش‌های انجام شده می‌توان به پژوهش‌های جایاسین^{۱۴} و همکاران در سال ۲۰۱۳a و ۲۰۱۳b اشاره نمود که در این کارها با استفاده از روش اجزای محدود، رفتار پی شمعی در خاک‌های ماسه‌ای اشباع، تحت اثر انفجار و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و شمع مورد مطالعه قرار گرفته است.

سدها به‌عنوان سازه‌هایی استراتژیک و مهم، در معرض تهدیدات انفجاری احتمالی حاصل از حملات نظامی یا خرابکارانه قرار دارند. با توجه به تاریخ جنگ‌های گذشته و حملات مکرر به سدها به‌عنوان یک سازه‌ی استراتژیک و همچنین اثرات جبران‌ناپذیر شکست سدها اهمیت بررسی آسیب‌پذیری سدها تحت اثر بار انفجار و مطالعه‌ی پارامتریک آن مسئله‌ای غیرقابل اغماض به نظر می‌آید (صیفی‌زاده^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۴)، (مقصودی^{۱۶} و همکاران، ۲۰۱۴)، (عمران^{۱۷} و تکمه‌چی^{۱۸}، ۲۰۱۰a، ۲۰۱۰b، ۲۰۱۱a، ۲۰۱۱b، ۲۰۱۱c)؛ اما تاکنون مطالعات اندکی در مورد رفتار سدها در برابر بارهای انفجاری انجام شده است (لو^{۱۹} و همکاران ۲۰۱۳)، (ژنگ^{۲۰} و ونگ^{۲۱}، ۲۰۱۴). بدین ترتیب در این مطالعه سعی شد رفتار سدهای بتن غلتکی، به‌عنوان یک سد جدید و در حال گسترش در ایران و جهان، در مقابل بارهای

در نظر گرفته نمی‌شود (صادق‌آذر^۱ و همکاران، ۲۰۱۰). کاهش دادن سه مرحله‌ی فوق با استفاده از ترکیب دو مرحله‌ی اول و دوم، مبنا و پایه‌ی روش جدا نشده‌ی غیرکامل است. در این روش پروسه‌ی انفجار در نظر گرفته نمی‌شود و معمولاً بار انفجار به‌عنوان یک تاریخچه‌ی زمانی به سازه اعمال شده و نتایج به دست می‌آیند. روش‌های تفاضل محدود، اجزای محدود و هیبریدی از روش‌هایی هستند که بر اساس روش جدا نشده‌ی غیرکامل پایه‌ریزی شده‌اند (انتظاری و همکاران، ۲۰۱۴).

از جمله پژوهش‌های انجام شده به این روش‌ها می‌توان به: مطالعات یانگ در رابطه با پاسخ سازه‌ی زیرزمینی تحت اثر بار انفجار سطحی در برابر افزایش عمق سازه و اندازه‌ی آن (یانگ، ۱۹۹۷)، مطالعه‌ی اثر ویژگی‌های مختلف خاک از جمله سختی دینامیکی خاک، مقاومت برشی زهکشی نشده، میرایی خاک و شدت بار انفجاری بر روی تونل‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC (گوی^۲ و چاین^۳، ۲۰۰۴)، تحلیل پاسخ غیرخطی تونل‌های زیرزمینی انجام شده توسط لیو^۴ (۲۰۰۹)، مطالعه‌ی عددی پدیده‌ی انتشار امواج و اثر آن بر خطوط مترو (اسماعیلی^۵ و فلاح‌زاده^۶، ۲۰۰۹)، بررسی اثر عمق قرارگیری ماده‌ی منفجره و انفجار سطحی بر سازه‌های مدفون توسط ناگی^۷ و همکارانش (۲۰۰۹ و ۲۰۱۰) و همچنین مطالعات انجام شده توسط هاشمی^۸ و میرزینلی^۹ (۲۰۰۹) توسط نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC اشاره نمود.

از دیگر پژوهش‌های انجام شده می‌توان به پژوهش‌های: اسدی جعفری^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۰) در رابطه با اثر انفجار بر سازه‌های بتن مسلح و اثر بمب‌های هوایی بر روی سازه‌های زیرزمینی توسط قزوینیان^{۱۱} و رحمتی‌پور^{۱۲} (۲۰۱۱) اشاره نمود.

۱۲. Rahmatipour
۱۳. Lu
۱۴. Jayasinghe
۱۵. Seyfizadeh
۱۶. Maghsoodi
۱۷. Omran
۱۸. Tokmechi
۱۹. Lu
۲۰. Zhang
۲۱. Wang

۱. Saedghazar
۲. Gui
۳. Chien
۴. Liu
۵. Esmaeili
۶. Falahzadeh
۷. Nagy
۸. Hashemi
۹. Mirzeynali
۱۰. Jafari
۱۱. Ghazvivan

که وزن آن عامل اصلی پایداری سد است. شیب پائین‌دست معمولاً بین ۱:۰/۷ تا ۱:۰/۹ (افقی: قائم) در نظر گرفته می‌شود و شیب بالادست نیز در مراحل اولیه قائم در نظر گرفته می‌شود. جهت حصول ضرایب اطمینان در حالت‌های مختلف بارگذاری در صورت لزوم می‌توان از شیب‌های سطوح بالادست و کف نیز استفاده کرد. در این پژوهش از اطلاعات سد جگین، اولین سد بتن غلتکی کشور، استفاده شده است (عمران و تکمه‌چی، ۲۰۱۱).

سد بتن غلتکی جگین

سد مخزنی جگین واقع در شهرستان جاسک استان هرمزگان در منطقه‌ی بشاگرد باهدف تأمین آب شهر جاسک و آب کشاورزی دشت‌های جاسک احداث شده است.

ساختمان سد جگین در تنگه‌ای به طول ۲۰۰ متر قرار گرفته است. عرض بستر طبیعی رودخانه در محل سد حدود ۳۰ متر می‌باشد. شیب دامنه‌ها در تکیه‌گاه چپ حدود ۶۰-۵۵ درجه و در تکیه‌گاه راست تا رقوم ۱۲۵ حدود ۳۵-۳۰ درجه و از آنجا تا رقوم تاج حدود ۱۵ درجه است (عمران و تکمه‌چی، ۲۰۱۱؛ پیرو دین ۱ و ابراهیم‌خانی ۲، ۲۰۰۶). در کل سد بتن غلتکی جگین دارای مشخصات هندسی به شرح ذیل می‌باشد (مهندسین مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۸۲):

الف- طول تاج: ۲۵۳ متر.

ب- عرض تاج: ۵ متر.

ج- ارتفاع از پی: ۷۸ متر.

مشخصات مصالح بدنه‌ی سد در جدول (۱) خلاصه شده است.

جدول (۱): مشخصات مصالح بدنه (مهندسین مشاور مه‌اب

قدس، ۱۳۸۲)

مدول تغییرشکل	ضریب پواسون	چگالی
۲۰ GPa	۰/۲۵	۲۴۰۰ Kg/m ³

ساختمان سد شامل تناوبی از ماسه‌سنگ‌های آهکی ضخیم، دانه‌متوسط تا دانه‌درشت و لایه‌های ماسه‌سنگی ریزدانه همراه با لایه‌های شیبستی است. پارامترهای ژئومکانیکی برای توده‌ی ماسه‌سنگ پی سد جگین به شرح جدول (۲) می‌باشد.

جدول (۲): مشخصات مصالح پی (مهندسین مشاور مه‌اب

قدس، ۱۳۸۲)

انفجاری موردبررسی قرار گیرد. در این پژوهش تحلیل پارامتریک اثر بار انفجار بر روی سدهای بتن غلتکی به‌عنوان یک سازه‌ی سطحی در دستور کار قرار گرفت.

با توجه به اجرای سدهای بتن غلتکی در دره‌های تنگ (از جمله سد جگین)، شکل هندسی مقاطع مختلف آن‌ها متغیر می‌باشند که منجر می‌شود برخی مقاطع نسبت به سایر مقاطع به لحاظ آسیب‌پذیری و ضرورت تقویت سازه‌ای، بحرانی‌تر باشند. لذا در این تحقیق ابتدا یکی از مقاطع به‌عنوان بحرانی‌ترین مقطع سد بر اساس معیارهای لرزه‌ای (و نه لزوماً بلندترین مقطع سد) انتخاب شده است که در مقاله حاضر آنالیز رفتار این مقطع تحت اثر بار انفجار موردنظر است. شایان ذکر است فرآیند انتخاب این مقطع، به نمایندگی از رفتار کلی سد، از حوصله‌ی این نوشتار خارج است و جهت اختصار از ذکر آن خودداری می‌گردد. در ادامه مقطع بحرانی به‌دست‌آمده تحت اثر بار انفجار قرار گرفته و با تغییر پارامترهای محل و میزان شدت انفجار (میزان ماده‌ی منفجره)، نتایج استخراج و ارائه گردید.

به‌عبارت‌دیگر به دلیل نامعلوم بودن محل و شدت انفجارهای احتمالی، لازم است که نقاط بحرانی‌تر انفجار بر روی بدنه‌ی سد شناسایی و همچنین اثر مقدار ماده‌ی منفجره بر شدت آسیب‌پذیری بررسی گردد. اثر محل انفجار و نیز مقدار ماده‌ی منفجره بر محل نقاط آسیب‌پذیر سد و میزان آسیب، با انجام شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های عددی مطالعه می‌گردد و بدین ترتیب محل بحرانی برای وقوع انفجار و نیز مقطع یا محل بحرانی به لحاظ شدت آسیب‌پذیری تحت بار انفجار تعیین می‌گردد.

مواد و روش‌ها

سد بتن غلتکی کوبیده

این سدها که از سال ۱۹۸۰ میلادی در نقاط مختلف دنیا تحت نام‌های متفاوتی مطرح شده‌اند، مناسب‌ترین نوع برای جایگزینی سدهای بتنی وزنی معمولی و یا سدهای خاکی می‌باشند که از ویژگی‌های ساخت سدهای خاکی و رفتار سازه‌ای و مصالح سدهای بتنی برخوردار می‌باشند. مقطع عمومی سدهای بتنی وزنی عموماً به شکل مثلث است

شکافها و حفره‌های موجود در بدنه و در محل تماس بدنه با سطح زمین رسوخ کرده و یک فشار رو به بالا (برکنش) در کلیه‌ی مقاطع افقی سد به وجود می‌آورد. در محاسبات مربوط به نیروی برکنش همواره دو سؤال اصلی وجود دارد:

- چند درصد از مقطع افقی تحت تأثیر نیروی برکنش قرار دارد؟

- فشار مؤثر برکنش چقدر است؟

به‌طور کلی اگر هیچ‌گونه زهکشی انجام نشود فشار برکنش در بالادست مساوی ارتفاع آب مخزن تا تراز موردنظر و فشار برکنش در پایین‌دست مساوی ارتفاع پایاب تا تراز موردنظر است که این تغییرات فشار به‌صورت خطی در نظر گرفته می‌شود.

دو عامل مهم در کاهش فشار برکنش استفاده از پرده تزریق و چاه‌های زهکشی در پاشنه‌ی سد است.

ه- نیروهای زلزله: زلزله دو تأثیر در نیروهای طراحی سدها دارد:

- ایجاد فشار هیدرودینامیکی

- ایجاد نیروی اینرسی افقی و قائم در بدنه سد.

مطالعات تئوریک نشان می‌دهد که توزیع فشار هیدرودینامیکی آب مخزن به علت ارتعاشات زلزله به‌صورت سهمی در ارتفاع مخزن تغییر می‌کند. متداول‌ترین روش برای تعیین فشار دینامیکی روش زنگار (ZENGAR) است. طبق این روش فشار هیدرودینامیک در عمق Z از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$P = C \cdot \alpha \cdot \gamma_w H \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق:

P شدت فشار هیدرودینامیک

α ضریب زلزله‌ی افقی

γ_w وزن مخصوص آب

H حداکثر عمق آب مخزن برحسب متر

C ضریبی است که از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$C = \frac{C_m}{2} \left(\frac{Z}{H} \left(2 - \frac{Z}{H} \right) - \sqrt{\frac{Z}{H} \left(2 - \frac{Z}{H} \right)} \right) \quad (2)$$

Z عمق از سطح آب تا تراز موردنظر برای محاسبه‌ی فشار هیدرودینامیک

مدول تغییر شکل	ضریب پواسون	چگالی
۰/۷۵ GPa	۰/۳	۲۲۰۰ Kg/m ^۳

پارامترهای مقاومتی سد جگین نیز در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳): مشخصات مقاومتی مصالح بدنه (مهندسین مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۸۲)

مقاومت فشاری	مقاومت کششی
۲۵ MPa	۰/۶۵ MPa

کلیات بارهای وارده

کلیات بارهای وارده اعمال‌شده، در ترکیبات بارگذاری جهت کنترل تنش‌ها و تعیین بحرانی‌ترین مقطع سد به‌صورت ذیل است:

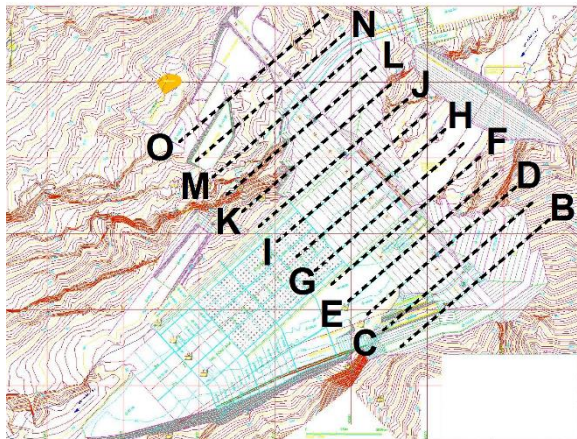
الف- بار وزن: عمده‌ی این بار ناشی از وزن بدنه و پی سد می‌باشد. همچنین وزن ناشی از آب در رویه‌های بالادست و پایین‌دست و وزن رسوب (در صورت وجود) در ترکیبات مختلف بارگذاری مدنظر بوده است.

ب- فشار هیدرواستاتیک: توزیع فشار آب به‌صورت خطی است که محل برآیند این نیرو در یک‌سوم ارتفاع از قاعده قرار دارد. تراز آب نرمال در تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است. تراز نرمال معادل ۱۴۰ متر نسبت به تراز کف سد (تراز کف سد ۸۵ متر است) بوده است و وزن مخصوص آب در محاسبات معادل ۱ تن بر مترمکعب منظور گردیده است.

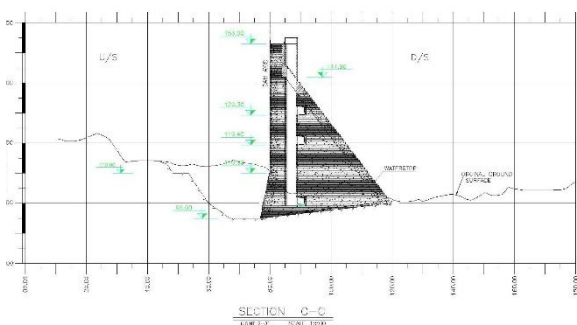
ج- فشار رسوب: رسوبات جمع‌شده در کف مخزن ایجاد نیروی قائم و فشار افقی در روی وجه بالادست می‌نمایند. در محاسبه نیروی قائم وزن آن قسمت از رسوب که روی ناحیه‌ی شیب‌دار وجه بالادست قرار دارد با وزن مخصوص ۱/۹۲۵ تن بر مترمکعب منظور می‌شود. در صورتی که قبلاً وزن آب در نظر گرفته شود کافی است وزن غوطه‌ور رسوب با وزن مخصوص ۰/۹۲۵ به آن اضافه شود.

در محاسبات افقی، رسوب به‌صورت مایعی با وزن مخصوص ۱/۳۶ تن بر مترمکعب منظور می‌شود که فشار ناشی از آن بر روی تصویر قائم وجه بالادست عمل می‌کند. با توجه به اینکه قبلاً فشار هیدرواستاتیک آب در تمام ارتفاع منظور شده است، کافی است اضافه فشار غوطه‌ور رسوب با وزن مخصوص ۰/۳۶ تن بر مترمکعب به فشار آب اضافه شود. تراز رسوب برای پروژه‌ی مزبور ۹۵ متر نسبت به تراز کف سد منظور می‌گردد (تراز کف سد ۸۵ متر است).

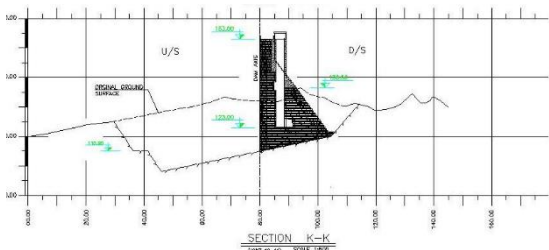
د- فشار برکنش: آب موجود در مخزن به‌مرور زمان در درزها،



شکل (۱): هندسه‌ی سه‌بعدی بدنه سد



شکل (۲): مقطع C-C سد



شکل (۳): مقطع K-K سد

برای تعیین بحرانی‌ترین مقطع سد، مدل‌های مربوط به مقاطع مختلف سد تحت اثر بارهای استاتیکی و شبه دینامیکی قرار گرفت و نتایج تحلیل تنش در بدنه‌ی سد استخراج گردید. این نتایج شامل تنش حداکثر و حداقل در بدنه‌ی سد و توزیع تنش در محل تماس بدنه با پی است. پس از تحلیل تمامی مقاطع و استخراج نتایج مربوطه نتیجه گرفته شد که بلندترین بلوک سد که در این سد بلوک‌های F-F تا H-H نشان داده شده در شکل (۱) است، بحرانی‌ترین بلوک سد نیست. بدین ترتیب نمی‌توان جهت تحلیل سدهای ساخته شده در دره‌های تنگ از هندسه‌ی بلندترین مقطع سد به‌عنوان بحرانی‌ترین مقطع جهت تحلیل استفاده نمود. آنچه از تحلیل و بررسی تمامی مقاطع به دست آمد نشان

C_m از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود و در آن ϕ زاویه‌ای است که وجه بالادست سد با امتداد قائم می‌سازد.

$$C_m = 0.73 \left(\frac{90 - \phi}{90} \right) \quad (۳)$$

با محاسبه‌ی سطح زیر نمودار، فشار برآیند آن در عمق Z از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$P_z = 0.726 P Z \quad (۴)$$

لنگر اضافه فشار در تراز در عمق Z از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$M_z = 0.3 P Z^2 \quad (۵)$$

مقدار نیروی اینرسی زلزله در امتداد افق و قائم وارد بر بدنه و پی سد، از رابطه زیر به دست می‌آید و محل تأثیر آن در مرکز ثقل مقطع مورد مطالعه منظور می‌شود.

$$E = \alpha W \quad (۶)$$

α ضریب زلزله در حالت افقی یا قائم

وزن قطعه مورد نظر

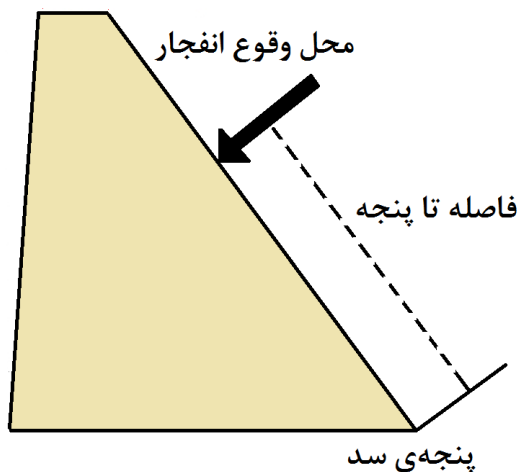
E نیروی اینرسی

هندسه‌ی سد، مقطع بحرانی و مدل اجزای محدود

همان‌گونه که ذکر گردید با توجه به اجرای سد در یک دره‌ی تنگ (با مقاطع متغیر)، بایستی بحرانی‌ترین مقطع سد تعیین گردد. دلیل نیاز به این مسئله آن است که به دلیل تفاوت‌های زیاد در هندسه‌ی مقاطع سد نمی‌توان یک مقطع را به‌عنوان مقطعی که رفتار سد را به‌طور کامل نشان دهد انتخاب نمود. هندسه‌ی سه‌بعدی سد مورد مطالعه در این تحقیق شامل ۱۴ مقطع مختلف (بلوک B-B تا بلوک O-O) است که در بین هر دو مقطع یک بلوک قرار گرفته است (شکل (۱)). نمونه‌هایی از هندسه مقاطع در دو بلوک مختلف C و K به ترتیب در شکل‌های (۲) و (۳) آمده است.

نیست. جهت توضیح بیشتر می‌توان گفت که در تحلیل‌های انجام‌شده در گذشته عمدتاً محل انفجار (که در بیشتر آن‌ها تاج سد می‌باشد) و شدت انفجار ثابت در نظر گرفته‌شده است، حال آن‌که در واقع نه محل انفجار و نه شدت انفجار قابل پیش‌بینی نیست. در این تحقیق با توجه به اینکه لزومی بر ثابت بودن این دو پارامتر نیست مطالعات پارامتریک بر اساس ثابت نبودن این دو عامل و اثر آن بر رفتار سدهای بتن غلتکی مورد مطالعه قرار گرفته است.

در این مقاله محل اثر انفجار به ترتیب در فاصله‌های ۳، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۶۵ متری از پنجه‌ی سد به سمت تاج سد و چهار وزن متفاوت ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم (وزن معادل TNT که معادل آن‌ها برحسب پوند بر سد اعمال شده است.) جهت تحلیل در نظر گرفته شد. در شکل ۵ محل ماده منفجره و فاصله تا پنجه‌ی سد نشان داده شده است.



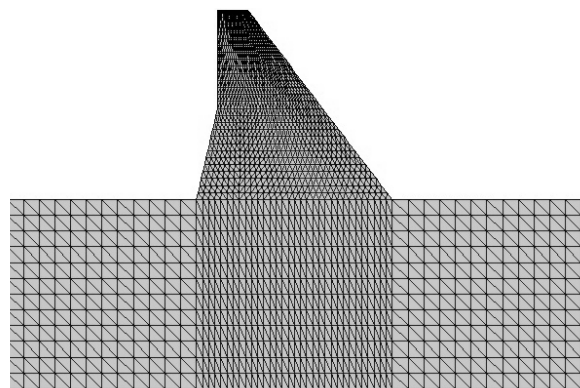
شکل (۵): محل وقوع انفجار و فاصله تا پنجه‌ی سد

مدل سازی بار انفجار

برای بارگذاری انفجار در فرآیند مدل‌سازی از آیین‌نامه‌ی UFC 3-340-02 استفاده شده است. با توجه به این‌که محل ماده منفجره بر روی بدنه‌ی سد در نظر گرفته‌شده، از شکل ۱۵-۲ این آیین‌نامه که مربوط به انفجار سطحی است جهت محاسبه‌ی بار انفجار استفاده شده است. اولین مرحله در تعیین بار انفجار تبدیل نیروی ناشی از انفجار به معادل تی‌ان‌تی است. مطالعات زیادی در رابطه با این تبدیل انجام‌گرفته است. هرچند در این گزارش مستقیماً از وزن معادل تی‌ان‌تی استفاده شده است. قابل ذکر است که می‌توان انفجار را به دو دسته‌ی: انفجار در هوا و انفجار در

داد که در این سد مقطع بلوک D-D بحرانی‌ترین مقطع سد است و مقادیر تنش‌های فشاری و کششی حداکثر در این بلوک نسبت به سایر بلوک‌ها بیشتر می‌باشد. لذا جهت تحلیل پارامتریک اثر انفجار بر این سد بتن غلتکی، هندسه‌ی بلوک D-D مورد تحلیل قرار گرفت.

در این تحقیق، از المان مثلثی با کرنش ثابت جهت تحلیل تنش در بدنه‌ی سد استفاده شده است. دلیل استفاده از این نوع المان، در نظرگیری مدت‌زمان لازم جهت انجام تحلیل‌های پیچیده می‌باشد. آنچه در شکل (۴) آمده است، نمونه‌ای از مدل‌های اجزای محدود استفاده‌شده است که شامل ۳۰۷۲ المان برای تحلیل رفتار سد می‌باشد.



شکل (۴): مدل اجزا محدود بدنه سد

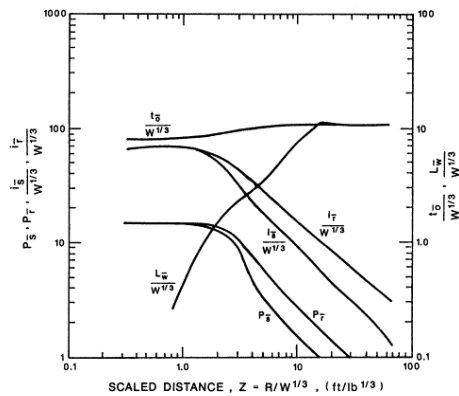
بحث و بررسی نتایج

تعیین سطح مقطع بحرانی

اگرچه ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و تعیین مقطع بحرانی با معیارهای لرزه‌ای از اهداف این تحقیق نیست، اما با توجه به مقاطع متغیر سد به دلیل موقعیت جغرافیایی منطقه، تنها یکی از مقاطع سد جهت ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر انفجار انتخاب شده است که این مقطع آسیب‌پذیرترین مقطع سد از نظر لرزه‌ای یعنی بلوک D-D و نه لزوماً بلندترین مقطع از سد است.

تحلیل و مطالعات پارامتریک اثر انفجار (پارامترهای مؤثر)

در این بخش مطالعات پارامتریک اثر انفجار بر سدهای بتن غلتکی با استفاده از مقطع بحرانی آن‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این مقاله فرض بر این است که انفجار بر پایین‌دست سد اتفاق خواهد افتاد. با توجه به ماهیت اتفاقی بودن انفجار تعیین تنها یک حالت برای تحلیل اثر آن مناسب



شکل (۸): پارامترهای فاز منفی انفجار

در این شکل‌ها می‌توان Z را از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود:

$$Z = R/W^{1/3} \quad (۷)$$

R فاصله از مرکز منبع انفجار و W وزن معادل تی‌ان‌تی است. جهت ساده‌سازی اعمال بار انفجار، می‌توان فشار بار انفجار را به صورت مثلث‌های نشان داده شده در شکل (۶) مدل نمود. پارامترهای مربوط به این فشارهای مثلثی با استفاده از دو رابطه‌ی زیر قابل‌دستیابی است.

$$t_{of} = \frac{2i_s}{P_{s0}} \quad (۸)$$

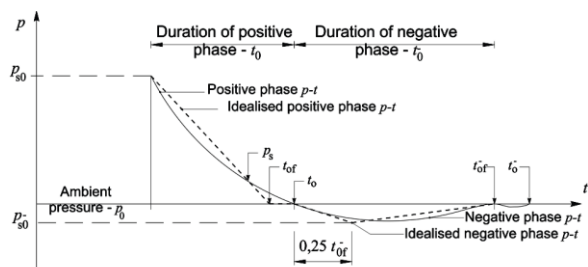
$$t_{of} = \frac{2i_T}{P_{s0}} \quad (۹)$$

با توجه به تغییر منحنی فشار به زمان انفجار در هر نقطه از سد، سطح سد به نواحی هم‌عرض تقسیم‌بندی شده و برای هر ناحیه، فاصله‌ی مرکز آن تا مرکز ماده منفجره به‌عنوان R در نظر گرفته‌شده و یک منحنی فشار به زمان یکسان در کل سطح هر ناحیه اعمال می‌گردد.

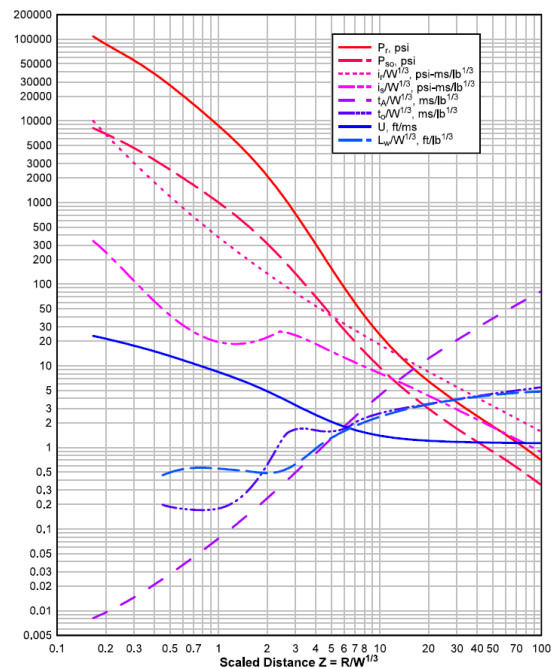
تحلیل تنش در بدنه

پس از مدل‌سازی در نرم‌افزار ANSYS و تعیین حالت‌های مختلف برای دو پارامتر مؤثر در تحلیل انفجار (مشمول بر ۳۲ حالت مختلف)، نتایج تحلیل شامل حداکثر تنش کششی و فشاری به وجود آمده در بدنه‌ی سد استخراج گردید. نمونه‌هایی از نتایج تحلیل در شکل‌های (۹) تا (۱۳) آمده است. لازم به ذکر است که در ادامه‌ی متن منظور از حداکثر تنش اصلی، حداکثر تنش کششی (تنش‌های با مقدار مثبت) است و حداقل تنش اصلی معادل حداکثر تنش فشاری (تنش‌های با مقدار منفی) است.

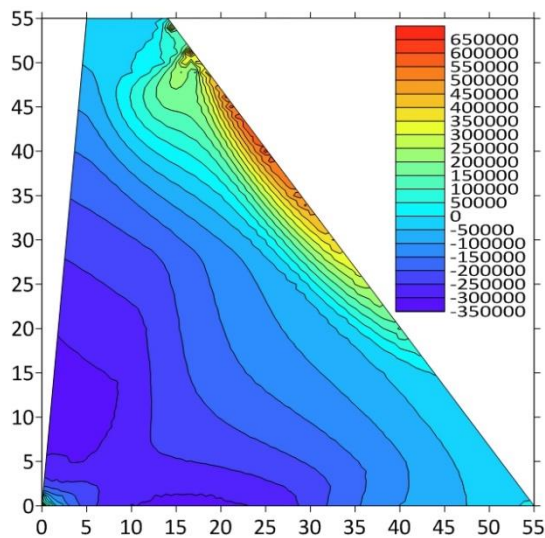
نزدیکی سطح (بر روی سطح) تقسیم‌بندی نمود. در این مطالعه فرض شده است که انفجار بر روی پایین‌دست بدنه‌ی سد رخ می‌دهد. موج ناشی از انفجار در زمان t_A به سازه رسیده و پس از اعمال فشار P_{s0} مقدار فشار در زمان t_0 کاهش و به فشار اتمسفر تقلیل پیدا می‌کند. این کاهش ادامه پیدا نموده و فشار وارد فاز منفی خواهد شد و به حداکثر مقدار P_{s0}^- می‌رسد. ویژگی‌های فشار ناشی از انفجار در شکل (۶) آمده است. پارامترهای موجود در این شکل را می‌توان با استفاده از آیین‌نامه UFC 3-340-02 و با استفاده از شکل‌های (۷) و (۸) به دست آورد.



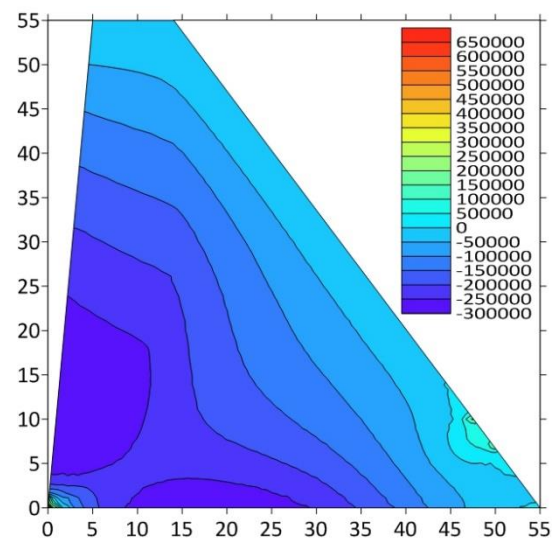
شکل (۶): نمودار فشار انفجار بر حسب زمان



شکل (۷): پارامترهای فاز مثبت انفجار

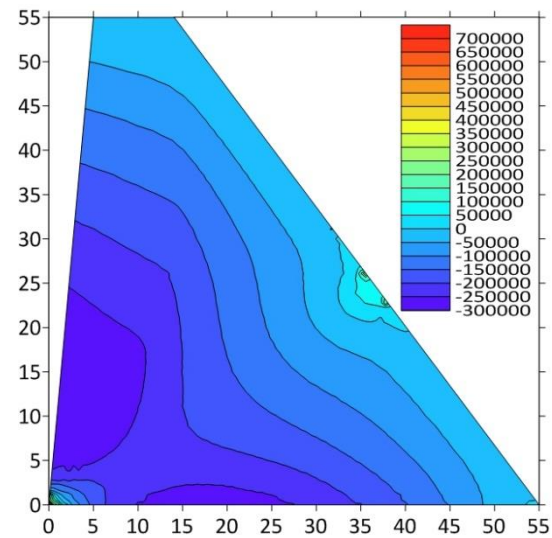


شکل (۱۲): حداکثر تنش‌های اصلی به ازای ۱۰ کیلوگرم TNT و به فاصله ۶۵ متر از پنجه سد



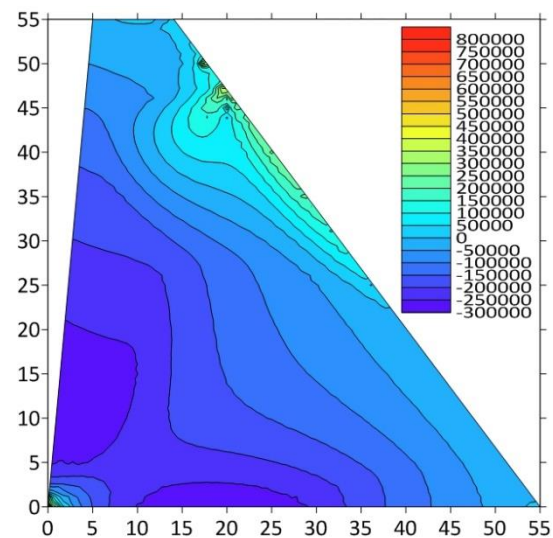
شکل (۹): حداکثر تنش‌های اصلی به ازای ۱۰ کیلوگرم TNT و به فاصله ۱۰ متر از پنجه سد

با مقایسه‌ی شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) می‌توان دریافت که در محل اثر انفجار میزان تمرکز تنش بیشتری اتفاق می‌افتد. به‌عنوان مثال در صورت اعمال انفجار در فاصله‌ی ۶۰ متری از پنجه‌ی سد تمرکز تنش نزدیک به این نقطه (شکل (۱۱)) رخ می‌دهد.



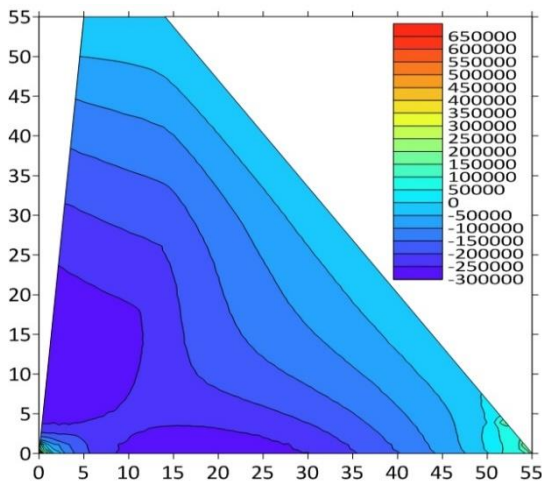
شکل (۱۰): حداکثر تنش‌های اصلی به ازای ۱۰ کیلوگرم TNT و به فاصله ۳۰ متر از پنجه سد

نتیجه‌ی مهم دیگری که از شکل‌ها می‌توان دریافت وقوع انفجار در تاج سد بحرانی‌ترین حالت نیست. این مهم را می‌توان بر اساس مقایسه‌ی نتایج شکل‌های (۱۱) و (۱۲) دریافت. با توجه به این شکل‌ها حداکثر تنش اصلی درحالی‌که انفجار در فاصله‌ی ۶۰ متری از پنجه‌ی سد رخ داده در حدود ۷۵۷۳۰۰ پاسکال است ولی زمانی که محل انفجار به تاج سد نزدیک می‌شود (شکل (۱۲)) میزان حداکثر تنش اصلی به مقدار کمتری و در حدود ۶۲۸۳۰۰ پاسکال خواهد بود؛ بنابراین استفاده از تحلیل انفجار با فرض رخ دادن انفجار در تاج سد لزوماً نماینده‌ی بحرانی‌ترین حالت بارگذاری نیست.

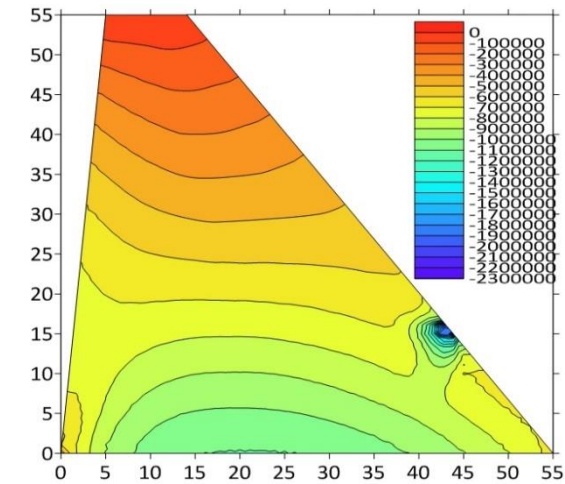


شکل (۱۱): حداکثر تنش‌های اصلی به ازای ۱۰ کیلوگرم TNT و به فاصله ۶۰ متر از پنجه سد

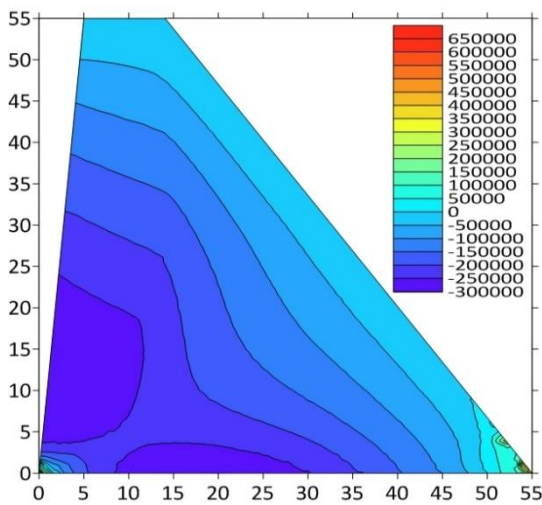
لازم به ذکر است که این نتیجه به معنای آن نیست که تنها در حالت حداکثر تنش کششی این مسئله صادق می‌باشد، بلکه بررسی حداکثر تنش‌های فشاری نیز نشان می‌دهد لزوماً وقوع انفجار در تاج سد حداکثر تنش را ایجاد نمی‌کند. این مسئله را می‌توان با مقایسه‌ی شکل‌های (۱۳) و (۱۴) دریافت. با توجه به این شکل‌ها حداکثر تنش فشاری (حداقل تنش اصلی) زمانی رخ می‌دهد که انفجار در فاصله‌ی ۲۰ متری از پنجه‌ی سد رخ دهد.



شکل (۱۵): حداکثر تنش‌های اصلی به ازای ۱۰ کیلوگرم TNT و به فاصله ۳ متر از پنجه سد

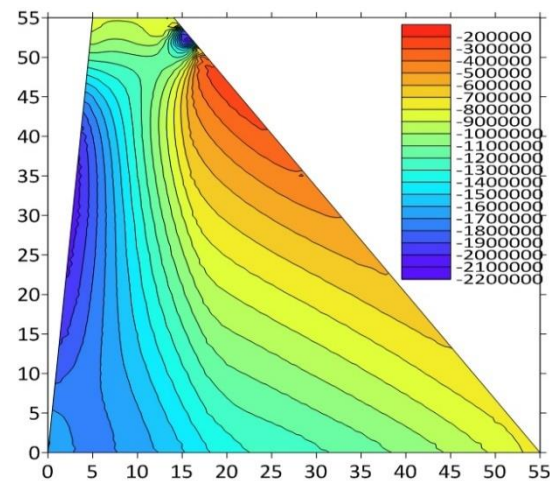


شکل (۱۳): حداقل تنش‌های اصلی به ازای ۱۰ کیلوگرم TNT و به فاصله ۲۰ متر از پنجه سد

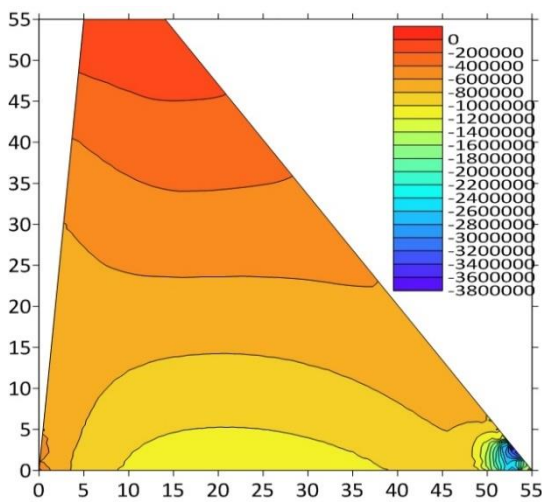


شکل (۱۶): حداکثر تنش‌های اصلی به ازای ۲۵ کیلوگرم TNT و به فاصله ۳ متر از پنجه سد

با توجه به این دو شکل نیز می‌توان دریافت که به مانند حداکثر تنش اصلی، در بررسی حداقل تنش اصلی نیز در محل اثر انفجار تمرکز تنش به وجود می‌آید (۲۶۰۳۲۵۷- پاسکال در حالت وقوع انفجار در ۲۰ متری و ۲۳۹۱۷۲۱- پاسکال در حالت وقوع انفجار در نزدیکی تاج سد).



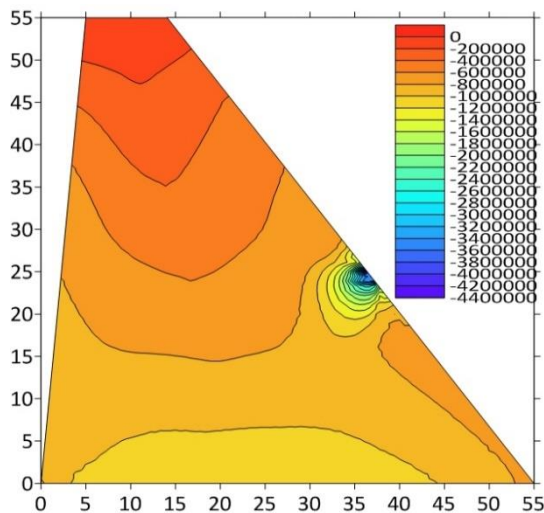
شکل (۱۴): حداقل تنش‌های اصلی به ازای ۱۰ کیلوگرم TNT و به فاصله ۶۵ متر از پنجه سد



شکل (۱۷): حداکثر تنش‌های اصلی به ازای ۵۰ کیلوگرم TNT و به فاصله ۳ متر از پنجه سد

پس از بررسی اثرات محل اثر انفجار اثر میزان شدت انفجار را بر روی رفتار سد بررسی می‌کنیم. بر اساس حدس‌های اولیه و بخشی از مطالعات گذشته شاید بتوان گفت که هرچه میزان شدت انفجار بیشتر باشد میزان تخریب آن نیز بیشتر خواهد بود، حال آن‌که نتایج جدیدی به دست می‌دهد. نمونه‌هایی از بررسی پارامتر شدت انفجار در شکل‌های (۱۵) تا (۲۰) آمده است.

با مقایسه‌ی شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) می‌توان دریافت که هرچه میزان شدت انفجار بیشتر شود منجر به ایجاد تنش بیشتری نخواهد شد. همچنین تنش حداکثر اصلی در حالتی



شکل (۲۰): حداقل تنش‌های اصلی به ازای ۵۰ کیلوگرم TNT و به فاصله ۳۰ متر از پنجه سد

بررسی شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) نشان می‌دهد که هرچه میزان شدت انفجار بیشتر باشد و محل انفجار محل ثابتی باشد، میزان حداقل تنش اصلی بیشتر خواهد بود. نتایج مرتبط با حداکثر و حداقل تنش به وجود آمده در حالت‌های مختلف در جدول‌های (۴) و (۵) آمده است.

جدول (۴): حداکثر تنش‌های کششی بر اساس فاصله و میزان شدت‌های مختلف

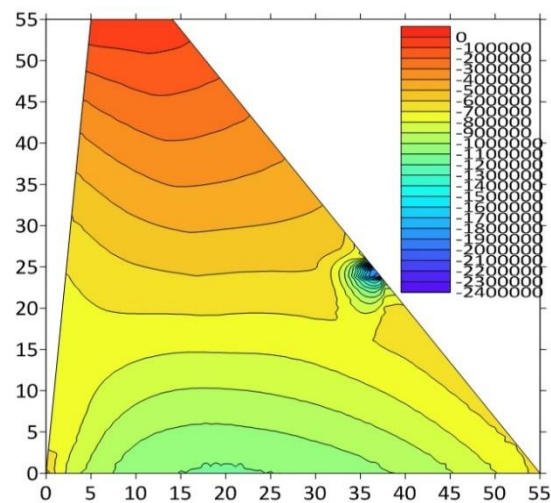
فاصله از پنجه (m)	۱۰ کیلوگرم TNT	۲۵ کیلوگرم TNT	۵۰ کیلوگرم TNT
۳	۶۱۴۶۰۰	۶۰۶۳۰۰	۹۰۱۹۰۰
۱۰	۶۲۲۰۰۰	۵۹۸۴۰۰	۶۶۱۶۰۰
۲۰	۶۴۰۴۰۰	۵۸۵۷۰۰	۶۳۸۷۰۰
۳۰	۶۷۵۰۰۰	۵۵۹۷۰۰	۱۰۲۸۰۰۰
۴۰	۷۰۹۲۰۰	۶۱۲۲۰۰	۸۳۹۹۰۰
۵۰	۷۵۷۰۰۰	۷۳۵۹۰۰	۹۸۸۴۰۰
۶۰	۷۵۷۳۰۰	۸۹۸۴۰۰	۱۱۸۷۰۰۰
۶۵	۶۳۸۳۰۰	۱۱۳۳۰۰۰	۱۶۳۰۰۰۰

جدول (۵): حداکثر تنش‌های فشاری بر اساس فاصله و میزان شدت‌های مختلف

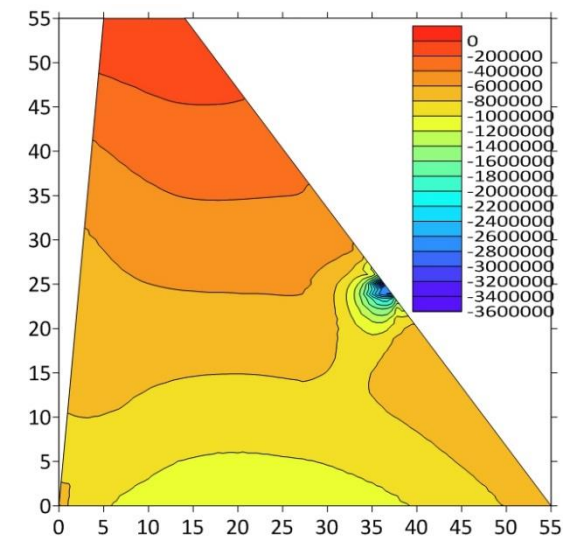
فاصله از پنجه (m)	۱۰ کیلوگرم TNT	۲۵ کیلوگرم TNT	۵۰ کیلوگرم TNT
۳	۲۳۳۵۶۸۰	۳۳۶۵۰۳۷	۴۲۷۴۷۸۴
۱۰	۲۵۵۹۰۹۳	۳۶۸۱۸۷۱	۴۶۷۰۷۶۷
۲۰	۲۶۰۳۲۵۷	۳۷۵۴۹۶۷	۴۷۶۸۲۸۱
۳۰	۲۵۹۰۹۲۶	۳۷۶۰۷۹۸	۴۷۸۸۶۱۰
۴۰	۲۵۲۶۱۸۰	۳۷۰۵۴۵۰	۴۷۳۸۸۲۲
۵۰	۲۴۳۳۶۷۱	۳۶۱۲۶۶۱	۴۶۴۳۲۷۴
۶۰	۲۳۵۰۹۲۸	۳۵۳۳۷۷۶	۴۵۶۵۷۶۵
۶۵	۲۳۹۱۷۲۱	۳۵۹۷۲۱۹	۴۶۵۰۲۸۶

نتایج به‌دست‌آمده از این جداول مؤید نتایج به‌دست‌آمده بر

که انفجار معادل ۱۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۳ متری از پنجه‌ی سد رخ می‌دهد معادل ۶۱۴۶۰۰ پاسکال است و این در حالی است که در همین فاصله اگر انفجاری معادل ۲۵ کیلوگرم TNT داشته باشیم میزان تنش حداکثر اصلی به مقدار ۶۰۶۳۰۰ پاسکال کاهش پیدا می‌کند؛ اما از طرفی این بدان معنا نیست که هرچه میزان شدت انفجار بیشتر شود میزان تنش حداکثر اصلی کاهش می‌یابد. برای بررسی بیشتر نتایج مرتبط با حداقل تنش اصلی را در حالت‌های مختلف بررسی می‌کنیم (شکل‌های (۱۸) تا (۲۰)).



شکل (۱۸): حداقل تنش‌های اصلی به ازای ۱۰ کیلوگرم TNT و به فاصله ۳۰ متر از پنجه سد



شکل (۱۹): حداقل تنش‌های اصلی به ازای ۲۵ کیلوگرم TNT و به فاصله ۳۰ متر از پنجه سد

۲- نتایج نشان داد که وقوع انفجار در تاج سد بحرانی‌ترین حالت نیست؛ بنابراین فرض رخ دادن انفجار در تاج سد لزوماً نماینده‌ی بحرانی‌ترین حالت بارگذاری برای تحلیل تحت انفجار نمی‌باشد.

۳- بر اساس حدس‌های اولیه و بخشی از مطالعات گذشته شاید بتوان گفت که هرچه میزان شدت انفجار بیشتر باشد میزان تخریب آن نیز بیشتر خواهد بود، حال آنکه نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که هرچه میزان شدت انفجار بیشتر شود لزوماً منجر به ایجاد تنش بیشتری نخواهد شد.

۴- بر اساس بررسی توزیع تنش‌ها، در حالت ثابت بودن محل انفجار، لزوماً هرچه میزان شدت انفجار بیشتر شود میزان حداکثر تنش کششی افزایش نمی‌یابد و در بعضی از موارد این مقدار کاهش می‌یابد (و نه در همه‌ی موارد). حال آن که در مورد حداکثر تنش فشاری می‌توان گفت که هرچه میزان شدت انفجار افزایش یابد حداکثر تنش فشاری نیز افزایش خواهد یافت.

۵- بر اساس نتایج لازم به ذکر است هرچند با افزایش شدت انفجار میزان تنش کششی حداکثر در تمامی موارد افزایش نمی‌یابد اما اگر محل انفجار به تاج سد نزدیک باشد، حداکثر تنش کششی نیز با افزایش میزان شدت انفجار افزایش می‌یابد.

مراجع

1. Rehak, D. Markuci, J. Hromada, M. Barcova, K. (2016), "Quantitative Evaluation of the Synergistic Effects of Failures in a Critical Infrastructure System"; *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 14, 3-17.
2. George, R. (2008), "Critical Infrastructure Protection"; *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 1, 4-5.
3. U. S. General Accounting Office, (2011), "Critical Infrastructure Protection, Cyber Security Guidance is Available, but More Can be Done to Promote Its Use"; *Report to Congressional Requesters*, GAO-12-92, Washington, DC.
4. World Economic Forum (2014), "Global Risks 2014, Ninth Edition"; Geneva, Switzerland.
5. Akbar Pour, A. Hosseini, S. A. (2011), "Reduction Methods of Blast Effects On Entrances Of Underground Safe Spaces"; *Passive Defense Quarterly*, 7, 53-59.
6. Amini Mazareno, M. Ravan Bakhsh, A. Dehghan Niri, Gh. (2013), "Blast Loading Effect On The Bearing Capacity Of Shallow Foundations"; *Journal Of Passive*

اساس کانتورهای تنش در شکل‌های (۱۵) تا (۲۰) می‌باشد. در حالت ثابت بودن محل انفجار، لزوماً هرچه میزان شدت انفجار بیشتر شود میزان حداکثر تنش کششی افزایش نمی‌یابد و در بعضی از موارد این مقدار کاهش می‌یابد (و نه در همه‌ی موارد). حال آنکه در حالت حداکثر تنش فشاری هرچه میزان شدت انفجار افزایش یابد حداکثر تنش فشاری نیز افزایش خواهد یافت. البته لازم به ذکر است هرچه که محل انفجار به تاج سد نزدیک‌تر شود حداکثر تنش کششی نیز با افزایش میزان شدت انفجار افزایش می‌یابد، هرچند قبلاً ثابت شد که انفجار در تاج سد حالت بحرانی انفجار نیست و در کل نمی‌توان گفت که هرچه انفجار با شدت بیشتر و در تاج سد اتفاق افتد وضعیت تنش‌ها بحرانی‌تر خواهد بود.

نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در مباحث سازه‌ای پدافند غیرعامل مطرح می‌شود، بحث پیش‌بینی رفتار سازه‌ها تحت اثر انفجار و بررسی روش‌های معمول تحلیل سازه‌ها است. عدم وجود سازه‌های امن در مقابل حوادث ساخته دست بشر (به‌عنوان مثال حملات نظامی) و یا غیرمترقبه (مانند زلزله) سبب ایجاد مخاطرات بسیاری در هنگام بروز بحران خواهد شد. به‌عنوان مثال در صورت ایجاد شکست در سدها به‌عنوان مخازنی جهت تأمین آب، کنترل سیلاب و تولید برق، تلفات مالی و انسانی شدیدی رخ می‌دهد. بدین ترتیب ارتقای مقاومت و پیش‌بینی صحیح رفتار سدها در مقابل بارهای مختلف از قبیل بار انفجار موجب استمرار خدمت‌رسانی و حفظ سلامت آن‌ها می‌شود.

در این مقاله در ابتدا بحرانی‌ترین مقطع سد بتن غلتکی قرارگرفته در یک دره‌ی تنگ با بهره‌گیری از آنالیزهای استاتیکی و شبه‌دینامیکی زلزله تعیین شد. شایان ذکر است این مقطع بلندترین مقطع از سد نیست. سپس مطالعات پارامتریک این سدها تحت اثر بار انفجار انجام گردید. اثر دو پارامتر مهم محل و شدت بار انفجار با استفاده از روش اجزای محدود موردبحث و بررسی قرار گرفت که در عمده‌ی تحقیقات پیشین ثابت در نظر گرفته می‌شدند. نتایج این تحقیق به شرح ذیل است:

۱- بر اساس نتایج می‌توان دریافت که در محل اثر انفجار میزان تمرکز تنش فشاری بیشتری اتفاق می‌افتد.

- ASAT- 13, Egypt.
22. Nagy, N. M. Mohamed, M. Boot, J. C. (2010), "Nonlinear Numerical Modeling For The Effects Of Surface Explosions On Buried Reinforced Concrete Structures"; *Geomech. Eng. J.* 2, 1-18.
 23. Hashemi, H. R. Mirzeynali, S. H. (2009), "Effect Of Projectile Explosion On The Metro Tunnels In The Coarse Soil With Finite Difference Software FLAC (Case Study: Karaj Metro Tunnel)"; Technical Report, Univ. Of Maleke Ashtar, Tehran.
 24. Asadi Jafari, A. Sadrnezhad, S. A. Saedi Daryan, A. Bahrapour, H. (2010), "The Study Of Blast Effect On Reinforced Concrete Structures"; *Passive Defense Quarterly*, 2, 55-66.
 25. Ghazvinian, A. H. Rahmatipour, Sh. (2011), "Effect Of Airborne Bombs On Underground Structures"; *Journal Of Energetic Materials*, 12, 3-16.
 26. Lu, Y. Wang, Zh. Chong, K. (2005), "A Comparative Study Of Buried Structure In Soil Subjected To Blast Load Using 2D And 3D Numerical Simulations"; *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 25, 275-288.
 27. Jayasinghe, L. B. Thambiratnam, D. P. Perera, N. (2013), "Blast Induced Ground Shock Effects On Pile Foundations"; *World Academy Of Sci. Eng. & Tech.* 76, 139-143.
 28. Jayasinghe, L. B. Thambiratnam, D. P. Perera, N. (2013), "Computer Simulation Of Underground Blast Response Of Pile In Saturated Soil"; *Computers And Structures Archive*, 120, 86-95.
 29. Seyfizadeh, M. Emadi, A. Fazlola, R. (2014), "Investigation Of Polrood Dam Break Due To Overtopping And Its Resulted Flood Routing In The Downstream"; *Journal Of Watershed Management Research*, 10, 15-29.
 30. Maghsoodi, R. Amini, R. Moghaddam, N. Z. (2014), "Using Isogeometric Method For Dam Break Modeling By Lagrangian Approach"; *Journal Of Solid And Fluid Mechanics*, 14, 45-55.
 31. Omran, M. E. Tokmechi, Z. (2010), "The Effects Of Alkali Silica Reaction On The Roller Compacted Concrete Dams Cracking"; *Payam Mohandes Journal*, 53, 32-40.
 32. Omran, M. E. Tokmechi, Z. (2010), "Parametric Optimization Studies On Kahir Dam"; *Payam Mohandes Journal*, 53, 4-8.
 33. Omran, M. E. Tokmechi, Z. (2011), "The Probability Of The Cracks Distribution Due To Alkali-Silica Reaction In Dams"; *ASAS Quarterly*, 30, 24-37.
 34. Omran, M. E. Tokmechi, Z. (2011), "Structural Analysis Of Kahir Dam In Iran"; *Payam Mohandes Journal*, 54, 8-12.
 35. Omran, M. E. Tokmechi, Z. (2011), "Thermal Analysis And Thermal Cracking Studies Of Roller Compacted Concrete Dams"; *Payam Mohandes Journal*, 54, 40-48.
 36. Lu, L. Li, X. Zhou, J. (2013), "Protection scheme for concrete gravity dam acting by strong underwater shock wave"; *Advanced Science Letters*, 19, 238-43.
 37. Zhang, S. Wang, G. (2014), "Numerical simulation of failure modes of concrete gravity dams Defence Science And Technology, 13, 199-210.
 7. Entezari Zarch, H. Dehghani Ashkezari, Gh. Barkhordari Bafghi, K. (2014), "Investigation Of The Effects Of Tunnel Cross-Section Geometry On The Performance Of The Lining Structure Subjected To External Blast Loading"; *Journal Of Passive Defence Science And Technology*, 15, 61-70.
 8. Smith, J. L. Betz, J. F. Baird, G. T. (1986), "Kachina Test Series: Dynamic Arch Test Three (DAT-3) Analysis Report"; Final Report, AFWL-TR-85-36, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland AFB.
 9. Dallriva, F. D. (1989), "Data Report For FY86 Dynamic Shallow Buried Arch Test"; U.S.A.E, Waterways Experiment Station, Vicksburg.
 10. Vanadit-Ellis W. Davis L. K. Physical modeling of concrete gravity dam vulnerability to explosions in: *International Waterside Security Conference, IEEE*, 2010, 1-11.
 11. Blanchat, T. K. (1998), "Development Of Explosive Event Scale Model Testing Capability At Sandia's Large Scale Centrifuge Facility"; *Sandia National Laboratories*.
 12. Ohno, T. (2008), "Study On Structural Response To Explosion Of Explosives And Blast Resistance 2008.
 13. De, A. Zimmie, T. F. Abdoun, T. Tessari, A. (2010), "Physical Modeling Of Explosive Effects On Tunnels"; *Geotech. Test J.* 30, 427-431.
 14. Wang, W. Zhang, D. Lu, F. Wang, S. C. Tang, F. (2013), "Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion"; *Engineering failure analysis*, 27, 41-51.
 15. Ishikawa, N. Beppu, M. (2006), "Lessons From Past Explosive Tests On Protective Structures In Japan"; *Int. J. Impact Eng.* 34, 1535-1545.
 16. Yang, Z. (1997), "Finite Element Simulation Of Response Of Buried Shelters To Blast Loadings"; *Finite Elem. Anal. Des.* 24, 113-132.
 17. Sadeghazar, M. Atarnezhad, R. Khosravi, A. (2010), "Evaluating The Response Of Buried Reinforced Concrete Structures Under Surface Burst Explosion Using Numerical Simulations"; In *Proc. Of The Int. Conf. On Structures - Earthquake - Geotech.* 212-222.
 18. Gui, M. W. Chien, M. C. (2004), "Blast Resistant Analysis For A Tunnel Passing Beneath Taipei Shongsan Airport - A Parametric Study"; *Geotech. Geolog. Eng.* 24, 227-248.
 19. Liu, H. (2009), "Dynamic Analysis Of Subway Structures Under Blast Loading"; Department Of Civil Eng. The City College Of New York/CUNY, New York; NY 10031 USA.
 20. Esmaeili, M. Falahzadeh, P. (2009), "Behavior Of Underground Structures Under Explosion Loads (Case Study - Tehran Metro)"; In *Proc. Of The 8th. Int. Conf. On Tunnel*, 344-353.
 21. Nagy, N. M. Eltehawy, E. A. Elhanafy, H. M. Eldesouky, A. (2009), "Numerical Modeling Of Geometrical Analysis For Underground Structures"; *13th Int. Conf. On Aerospace Sci. & Aviation Tech.*

subjected to underwater explosion”; Engineering Failure Analysis, 36, 49–64.

38. Peyrodi, R. Ebrahim Khani, N. (2006), “Jehgin dam construction project (The First Rcc Dam In Iran)”; Shams Journal, 124, 10-20.

39. Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, (2003), “Design Report of Jegin Dam”.

40. Department of Defense; United States of America, (2008), “Unified Facilities Criteria (UFC), Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions”; UFC 3-340-02.

Investigation of the effects of explosion location and intensity on roller compacted concrete dams body vulnerability

Ghasem Dehghani Ashkezari^{*1}

Zaniar Tokmechi^۲

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effects of explosion parameters (location and intensity) on the behavior of roller compacted concrete dams and their vulnerability. The Jehgin dam, made by roller compacted concrete, has been chosen to study and evaluate its vulnerability to explosion due to its construction in a narrow valley and its many variations in geometry. Due to the impossibility of predicting the explosion location and intensity, parametric analysis is needed to assess the vulnerability. Therefore, the model of this roller compacted concrete dam (critical cross section) has been analyzed due to explosive loads with different intensity and location, and the effects of these parameters on its behavior and vulnerability have been studied. The results showed that the explosion in the dam crest is not always the most critical and most vulnerable situation. Although, the results show that while stress concentration occurs at the blast location, the analysis of stress distributions shows that when the blast location is constant, the maximum tensile stress doesn't increase with increasing blast intensity and in some cases it decreases. However, for maximum compressive stress, the higher the explosive intensity, the higher the compressive stress will occur.

Keywords

Explosion load, Explosion parameters, Finite element method, Roller compacted concrete dam

۱. Malek Ashtar University of Technology, Passive Defense Faculty, Structure and Material Research Center.
gh_dehghani@mut.ac.ir

۲. Boukan branch, Islamic azad university, Boukan, Iran