نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال ششم / شماره بیست و سوم / زمستان ۹۸

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
6th Year / No. 23 / March 2020

بررسی اثر انفجار بر روی سد چراغ ویس با مدلسازی عددی

علی اصغر میرقاسمی[۱*]
ساناز هادیان[۲]
علیرضا مجیدی[۳]

چکیده

امروزه با افزایش مشکلات مربوط به انرژی و کمبود منابع آبی، صنعت سدسازی در کشورمان بطور چشمگیری رو به توسعه است. از سویی، با توجه به افزایش تهدیدهای خارجی با هدف مختل‌سازی زیرساخت‌های حیاتی کشور و ایجاد خسارات جانی و مالی با استفاده از روش‌های متنوع انفجار، موضوع تقویت پدافندی در کشور ضرورت ویژه‌ای پیدا کرده است. در این مطالعه تلاش شده است تا با شبیه‌سازی رایانه‌ای و اعمال بار انفجار بر روی بدنه سد (سد سنگریزه‌ای با هسته رسی چراغ‌ویس)، تاثیراتی که انفجار روی بدنه سد خواهد داشت را بررسی کنیم. سپس با انجام تحلیل‌های حساسیت بر روی میزان بار انفجار و اعمال تغییراتی مانند افزایش ضخامت لایه محافظ بالادست (ریپ‌رپ)، کاهش شیب بالادست، کاهش شیب پایین‌دست، کاهش تراز نرمال آب و تغییر ویژگی ها سد میزان اثرات ناشی از انفجار با مدل اصلی مقایسه می‌گردد. با مدلسازی این سد در نرم‌افزار المان‌محدود آباکوس و اعمال بارگذاری انفجار بر روی بالادست سد مشاهده شد که با افزایش ضخامت ریپ‌رپ، کاهش شیب بالادست و پایین‌دست، کاهش تراز نرمال آب مخزن و به کارگیری مصالح با مقاومت بیشتر، میزان نشست در نقطه زیر انفجار کاهش می‌یابد. همچنین ناحیه‌هایی از سد که دارای کرنش پلاستیک بیش از ۱۰ درصد می‌باشند، کاهش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی:

تهدیدهای خارجی، سد چراغ‌ویس، تحلیل دینامیکی، انفجار، تحلیل حساسیت

---

[۱]. استاد، عضو هیات علمی دانشکده فنی دانشگاه تهران Aghasemi@ut.ac.ir
[۲]. کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تهران sanaz_psi@yahoo.com
[۳]. دکتری مهندسی عمران، گرایش ژئوتکنیک، شرکت مهاب‌قدس majidi@mahabghodss.com

علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۲۷/ ۰۸/ ۱۳۹۷ تاریخ پذیرش: ۱۲/۰۳/ ۱۳۹۸

مقدمه

سدها سازه‌هایی هستند که برای ذخیره کردن آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. سدهای بزرگ به دلیل اثرات مخربی که روی پایین‌دست به واسطه شکست سد رخ می‌دهد، به عنوان سازه‌های بحرانی تلقی می‌شوند. بنایراین، سدها جزء سازه‌های مورد توجه برای حملات تروریستی هستند. در این مطالعه، به بررسی اثر انفجار روی سد چراغ‌ویس پرداخته می‌شود که انتظار می‌رود این سد به جهت موقعیت جغرافیایی (استان مرزی کردستان)، بیش از موارد مشابه دیگر در معرض حملات گروهک‌های تروریستی باشد. بنابراین درک اثرات انفجار روی این سازه‌ها برای ایمن‌تر کردن آن‌ها در برابر بارهای انفجاری و کاهش پیامدهای ناشی از شکست سد، ضروری است.

هندسه سد چراغ‌ویس به همراه ویژگی‌های کالیبره‌شده آن به عنوان مدل پایه در نظر گرفته شده است و تلاش شده است تا با ایجاد تغییراتی در هندسه و ویژگی‌های سد، اثرات ناشی از انفجار بر بدنه سد کاهش یابد.

پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بیشترین مطالعات در زمینه بررسی اثر انفجار بر سازه‌ها، به سال‌های ۱۹۳۹ تا ۱۹۴۵ (زمان جنگ جهانی دوم) برمی‌گردد. در این زمان، بیشترین خسارت به کشورهای انگلیس، ژاپن، فرانسه و آلمان وارد شده است و با توجه به این وقایع، بیشترین مطالعات نیز در این کشورها انجام گرفته شده است. تاکنون عمده فعالیت‌های صورت گرفته در مباحث مرتبط با انفجار، در سه بخش مطالعات میدانی، مدل سازی کوچک مقیاس آزمایشگاهی و توسعه روش‌های تحلیلی و عددی متمرکز شده است. انجام آزمایش‌های بزرگ-مقیاس و آزمایشگاهی به علت صرف هزینه و زمان زیاد و مشکلات محیط‌زیستی بسیار، می‌باشد. با توجه به توسعه قابل‌توجه روش‌های عددی در دهه‌های اخیر، امکان بررسی اثرات انفجار بر سازه‌های روزمینی و زیرزمینی با دقت بالا فراهم آمده است. در میان مطالعات عددی، روش‌های اجزای المان محدود و تفاضل محدود نسبت به سایر روش‌ها توسعه بیشتری داشته و در زمره روش‌های ارزان و با هزینه محاسباتی کمتر بشمار می‌روند. آمبروزینی و لوسیونی[۱] در سال ۲۰۰۴ آزمایش‌هایی به صورت بزرگ مقیاس انجام داده و با مقایسه نتایج عددی، روابطی را برای ابعاد و ویژگی ها گودال ایجاد شده ناشی از انفجار ضمن توجه به نوع آن ارائه داده‌اند. همچنین با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN به شبیه‌سازی زمین ماسه‌ای تحت انفجار ماده منفجره TNT پرداختند. هدف این پژوهش بررسی اثر ویژگی های خاک روی تغییرات اندازه گودال روی سطح زمین بوده است. دی و همکارانش[۲] نیز در سال ۲۰۱۳ به شبیه‌سازی مدل سه‌بعدی سد خاکی با ارتفاع ۵/۳۹ متر، عرض کف ۳۱ متر و طول ۳۲ متر در نرم‌افزار ANSYS پرداختند. آن‌ها با تغییر وزن مواد منفجره TNT از ۱۳۰ تا ۱۳۳۰ کیلوگرم به مقایسه نتایج این مدل و مدل تجربی ساخته شده پرداختند و به همخوانی قابل قبولی دست یافتند. لو و همکاران[۳] در پژوهش‌های خود برای مدلسازی اثرات انفجار مناسب‌ترین روش‌ها را برای حصول نتایج درست تشریح کردند. طبق مطالعات آن‌ها روش اویلری لاگرانژی اختیاری (ALE) و روش‌های کوپل از جمله روش کوپل SPH-FEM به عنوان مناسب‌ترین روش پیشنهاد شد. ترکیب دو روش گفته شده، مدل کردن اثر متقابل آب و سازه و همچنین تغییر شکل‌های بزرگ را تسهیل می‌بخشد. لی و همکاران[۴] در سال ۲۰۰۷ آزمایشی را روی سد خاکی برای بررسی اثر مواد منفجره انجام دادند و نتایج گودال ایجاد شده را با نتایج حاصل در زمین مسطح مقایسه کردند. آن‌ها عمق گودال ایجادشده روی تاج سد توسط تحلیل عددی را با آزمایش مقایسه کردند و به نتایج قابل قبولی دست یافتند. ساسان ادریسی در سال ۱۳۸۹ به بررسی رفتار دینامیکی توده خاک ماسه‌ای در عمق تحت اثر انفجار سطحی پرداخت و با استفاده از مدلسازی با نرم‌افزار FLAC2D اثرات انفجار سطحی در افزایش تنش در عمق را مورد مطالعه قرار داد. همچنین با استفاده از تحلیل رگرسیونی رابطه‌ای برای پیشبینی افزایش فشار در فواصل مختلف از محل

---

۱. Ambrosini D, Luccioni B

۲. De et al.

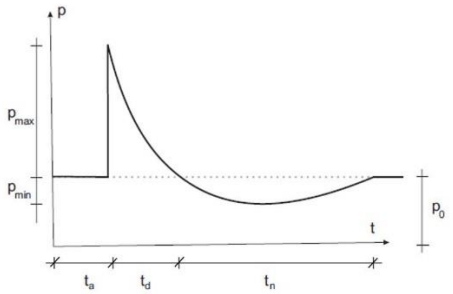
۳. lu et al.

۴. Li et al.

انفجار در خاک ماسه‌ای ارائه گردید. عیسی حسین‌زاده در سال ۱۳۹۲ با ساخت یک مدل سد خاکی با هسته رسی در نرم‌افزار ANSYS-AUTODYN و مدلسازی انفجار بر روی تاج سد، تغییر مکان‌ها و گودال ناشی از انفجار و همچنین نقاط دارای پتانسیل شکست و ترک را شناسایی کرد. مسعود ابراهیمی خسروشاهی در سال ۱۳۹۵، اثرات انفجار در هوای آزاد بر روی سدخاکی با هسته رسی را مورد مطالعه قرار داد و اثر بار انفجار در دو حالت قرارگیری آب در تراز نرمال و مخزن خالی را با مدلسازی در نرم‌افزار ABAQUS بررسی نمود و مشخص شد که هرچه فاصله انفجار کمتر باشد، جابه‌جایی تاج سد و تنش ایجاد شده در بدنه سد بیشتر می‌شود.

موج انفجار

در اثر انفجار یک ماده منفجره شیمیایی با چگالی زیاد، انرژی بسیار زیادی در زمان بسیار کوتاهی آزاد می‌گردد. در این واکنش گازهای داغ با فشار زیاد تولید می‌شود. انبساط این گاز سبب رانش هوای مجاور می‌شود. لایه‌ای از هوای فشرده که موج انفجار نامیده می‌شود در جلوی این گازها تشکیل می‌شود. به تدریج با فاصله گرفتن از منبع انفجار، فشار تولید شده کاهش می‌یابد و با فشار محیطی برابر می‌شود. چون در لحظه رسیدن به فشار محیطی مولکول‌های گاز دارای جرم و حرکت هستند مدتی طول می‌کشد تا فشار گاز صفر شود. در این وضعیت گاز بیش از حد انبساط می‌یابد و در نتیجه جریان معکوس به سمت منبع انفجار ایجاد می‌شود که به فاز منفی مرسوم است. لذا موج ایجاد شده از انفجار دارای دو فاز است. در مرحله اول که به فاز مثبت یا فاز فشاری موسوم است در یک لحظه فشار به مقدار بیشینه افزایش می‌یابد. سپس در زمان کوتاهی این فشار به حد فشار محیط (اتمسفر) کاهش یافته و سپس فاز منفی با ایجاد مکش آغاز می‌شود. شدت این فاز بسیار کمتر از فاز مثبت می‌باشد ولی مدت اثر آن به مراتب طولانی‌تر است. روند کاهش فشار نسبت به زمان در فاز مثبت را می‌توان با تابع نمایی مانند شکل (۱) نشان داد. این شکل تغییرات فشار نسبت به زمان را در فاصله‌ای معلوم از مرکز انفجار نشان می‌دهد. معمولاً برای سهولت در بارگذاری، روند کاهش فشار نسبت به زمان به شکل نمائی یا مثلثی و صرفا در محدوه فاز مثبت در نظر گرفته می‌شود و از فاز منفی که تاثیر کمی در بازتاب ماکزیمم سازه دارد و در طراحی مهندسی معمولا اهمیت کمتری نسبت به فاز مثبت دارد، صرف‌نظر می‌شود.



شکل (۱): نمودار فشار بر حسب زمان در انفجار

رابطه معادله موج انفجار به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$P = P_s\left(1 - \frac{t}{t_d}\right)e^{-\alpha t/t_d} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق P مقدار بیشینه فشار در لحظه t، P_s بیشینه فشار مثبت و t_d مدت فاز مثبت است. α ضریبی است که چگونگی کاهندگی نمودار را نشان می‌دهد.

مدل عددی

در پژوهش حاضر از نرم‌افزار آباکوس به دلیل توانایی آن برای مدلسازی و تحلیل انفجار استفاده گردیده است. مدلسازی انفجار با روش المان محدود و دیدگاه لاگرانژی انجام شده است. روش‌های لاگرانژی عمدتا برای مدلسازی سازه‌ها استفاده شده و قابلیت مدلسازی تغییر شکل‌های بزرگ را در سازه دارد. در این روش موقعیت شبکه متغیر می‌باشد اما جرم، مومنتوم و انرژی داخل شبکه‌ها ثابت می‌ماند. رویکردی که در این پژوهش برای حل معادلات اجزای محدود به کار رفته است، حل در حوزه زمان است که در این روش، روش‌های انتگرال-گیری عددی معادلات حرکت، در حوزه زمان تولید شده‌اند. معمولا برای مسائل مربوط به بارگذاری ناگهانی از معادله حرکت نسبت به زمان انتگرال‌گیری می‌شود. روش انتگرال-گیری مستقیم یک روش گام به گام نسبت به زمان است و پاسخ سازه در فواصل زمانی Δt محاسبه می‌گردد. برای

مدلسازی، پس از ترسیم هندسه مدل باید نواحی دارای مصالح و خصوصیات مختلف از هم مجزا شوند و در نهایت خصوصیات هر مصالح به آن بخش اختصاص داده شود. این خصوصیات شامل دانسیته و خصوصیات مکانیکی آن‌ها می‌باشد. خصوصیات مکانیکی با توجه به مدل رفتاری در نظر گرفته شده، برای تحلیل تنش- کرنش قابل استفاده هستند. همچنین ویژگی ها مصالح کالیبره شده سد که از طریق آنالیز برگشتی و با استفاده از نتایج ابزار دقیق بدست آمده است، استفاده گردید. برای مصالحی که دارای دو فاز مایع و جامد هستند، نیاز است تا مدل رفتاری سیال نیز در نرم‌افزار تعریف شود. در اینجا آب مخزن را نیز به صورت جداگانه مدل می‌کنیم و خصوصیات مربوط به آن را مشخص می‌کنیم. همچنین در سطح تماس آب و بدنه سد اندرکنش آب- سازه تعریف می-شود. پس از اختصاص مصالح به هر بخش، شرایط مرزی مدل تعریف می‌شود و سپس بارهای وارده بر مدل شامل نیروی وزن، نیروهای تراوش (با توجه به خط تراوش یا خط فشار صفر) و نیروهای بدنی یا حجمی (در بخش‌های اشباع سد) تعریف می-شود. در آخر بار انفجاری TNT به اوزان ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم بر بدنه سد اعمال می‌شود.

در ابتدا مدل سد با توجه به هندسه اصلی سد چراغ‌ویس در آباکوس ساخته و المان‌بندی شده و "مدل پایه" نام خواهد گرفت. در این پژوهش، سد چراغ‌ویس به صورت دوبعدی (با ضخامت ۱ متر) مدل شده است. ویژگی ها هندسی مدل پایه به شرح زیر است:

ارتفاع: ۶۲ متر

عرض تاج: ۱۰ متر

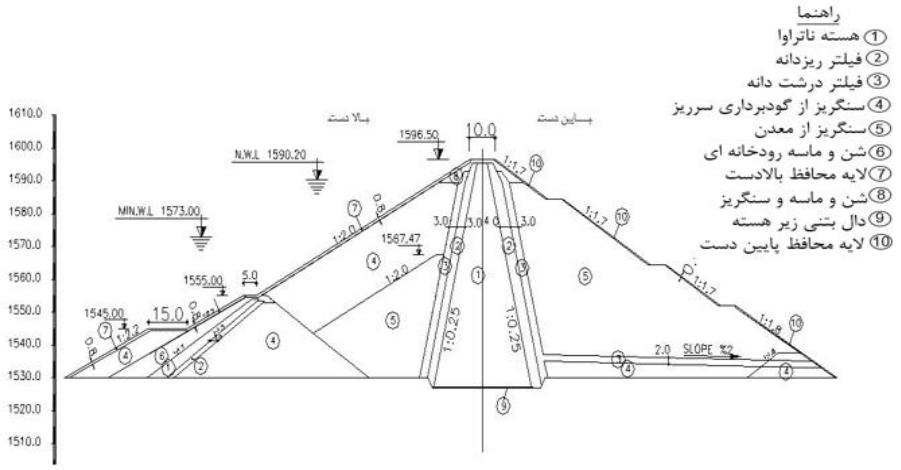
شیب بالادست:۱(عمودی) به ۲/۴(افقی)

شیب پایین‌دست: ۱(عمودی) به ۲/۱ (افقی)

ضخامت ریپ‌رپ: ۰/۸ متر

ارتفاع آب مخزن: ۶۰ متر

در شکل (۲) مقطع عرضی سد چراغ‌ویس و در شکل (۳) هندسه ساده‌شده این سد در نرم‌افزار آباکوس به همراه مش-بندی آن نشان داده شده است. علت ساده‌سازی سد در نرم-افزار، وجود مصالح مشابه در بخش‌های مختلف می‌باشد برای مثال مصالح فرازبند و قسمت فوقانی پوسته بالادست یکسان است. لازم به ذکر است که نواحی با رنگ‌های مختلف، دارای مصالح متفاوتی هستند.



شکل(۲): مقطع عرضی سد چراغ‌ویس

شکل(۳): هندسه مدل دوبعدی به همراه المان‌بندی آن

برای مش‌بندی در این مدل، از المان‌های گوه‌ای شکل به دلیل انطباق بهتر در گوشه‌های سد استفاده گردید. تعداد المان‌های کل سد در مجموع ۱۹۴۴۲ عدد است. شکل (۳) المان‌بندی کل سد را نشان می‌دهد.

همچنین از مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر-کولمب[۱] برای مدلسازی رفتار مصالح سنگریزه‌ای بدنه استفاده شده است. دلیل استفاده از این مدل، پارامترهای ورودی در دسترس، مقبولیت این مدل در مسائل ژئوتکنیکی و مناسب بودن برای تحلیل‌های دینامیکی است.

ویژگی ها مصالح کالیبره شده سد که از طریق آنالیز برگشتی و با استفاده از نتایج ابزار دقیق بدست آمده است، در مدلسازی استفاده گردید. این ویژگی ها کالیبره شده به شرح جدول (۱) می‌باشد (نواحی مختلف سد در شکل (۱) نشان داده شده است).

جدول (۱): پارامترهای بدست آمده پس از کالیبره شدن مدل دو-بعدی

Materials	Density $(\frac{KN}{m^2})$	$E\ (GPa)$	φ	ψ	$k\ (\frac{cm}{s})$	$C\ (KPa)$	ϑ
Mixed Clay Core	۱۸/۳	۰/۰۱۷	۲۱	۰	۱/۰۰E-۸	۱۰	۰/۲۵
Shell[۴]	۲۲/۵	۰/۰۲	۴۹/۱	۵	۱/۰۰E-۳	۰	۰/۲۵
Shell[۵]	۲۲/۵	۰/۰۲	۴۳	۰	۱/۰۰E-۴	۱۰	۰/۲۵
Filter	۲۰	۰/۰۲	۳۰	۰	۱/۰۰E-۴	۰	۰/۲۵
Foundation	۲۴	۰/۷	۲۶	۰	۷/۰۰E-۵	۲۱۰	۰/۲۵

پس از در نظر گرفتن شرایط مرزی، بار انفجار روی سد به روش incident wave مدلسازی گردید. در این روش، امواج فشاری از نوع Air Blast انتخاب می‌شوند. نمودار فشار-زمان ایجادشده توسط این موج در یک نقطه که از مرکز انفجار فاصله دارد، مطابق شکل (۱) می‌باشد. زمان رسیدن موج Blast به نقطه‌ای به فاصله دلخواه R از مرکز انفجار، T_a است. علاوه بر فشار، یک ویژگی دیگر موج Blast، ضربه آن می‌باشد که مقدار آن بر واحد سطح، برابر مساحت زیر منحنی فشار-زمان موج Blast است، بنابراین مقدار ضربه به بازه زمانی فاز مثبت و فشار بیشینه وابسته است. نرم‌افزار آباکوس اثرات موج Blast را بر روی سطح سازه‌ها با استفاده از داده‌های تجربی مدل CONWEP اعمال می‌کند. مدل CONWEP در حقیقت یک مدل مبتنی بر داده‌های تجربی است که توسط ارتش ایالات متحده آمریکا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل برای محاسبه فاصله نقطه اثر نیرو تا مرکز انفجار، از فاصله مقیاس شده (Z) استفاده می‌کند و پس از آنالیز داده-های تجربی موجود موارد زیر را تخمین می‌زند:

-زمان رسیدن فشار به نقطه مورد نظر (T_a) با فاصله مشخص

-بیشینه فشار اعمال شده در آن فاصله (P_{max})

-زمان فاز مثبت (T_d)

-توان تابع کاهش نمایی در فاز مثبت برای فشار incident

بر مبنای پارامترهای فوق، آباکوس نمودار اعمال فشار بر حسب زمان را مانند شکل (۱) برای نقاط مختلف ایجاد می-کند و تاثیر فشار بر روی سطوح سازه‌های اطراف مرکز انفجار اعمال می‌گردد. ورودی‌هایی که نرم‌افزار در این روش استفاده می‌کند، به این صورت است که یک نقطه مرجع و یک سطح که انفجار روی آن رخ می‌دهد، انتخاب شدند (در واقع انتخاب ضخامت یک متر برای مدل به همین دلیل است). نقطه مرجع، که انفجار از آن نقطه شروع می‌شود، در بالادست سد و در محدوده بین تراز نرمال و تاج سد (ارتفاع آزاد) اعمال شده است. هم‌چنین سطح زیر نقطه مرجع (که همان سطح ارتفاع آزاد سد می‌باشد) به همراه سطح بالایی آب مخزن به عنوان سطوح زیر انفجار انتخاب شدند. زمان انفجار ماده منفجره TNT ۰/۱ تا ۰/۲ ثانیه است. در این پژوهش زمان ۰/۱۵ ثانیه برای انفجار تعیین گردید و بارهای انفجاری اعمالی ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT هستند. شرایط مرزی اعمال‌شده روی این مدل شامل صفر

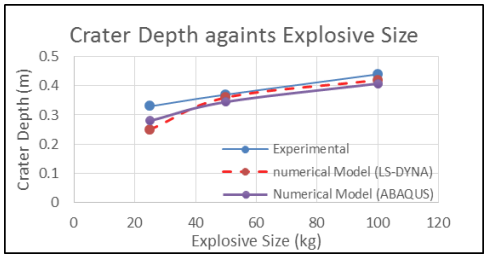
۱. Mohr-coulomb

کردن تغییر مکان در مرزهای کناری و کف مدل و همچنین اعمال بار انفجاری در گام تحلیل دینامیکی می‌باشد. در انتها نیز تحلیل دینامیکی به روش صریح انجام می‌گیرد.

اعتبارسنجی مدل

قبل از ارائه نتایج و بحث روی آن‌ها باید از صحت مدل خود اطمینان حاصل کنیم. برای این کار، از مدل پژوهش لی و همکاران استفاده گردید. آن‌ها آزمایشی را روی سد خاکی برای بررسی اثر مواد منفجره انجام دادند و عمق گودال ایجادشده روی تاج سد توسط تحلیل عددی با نرم‌افزار LS-DYNA را با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه کردند و به نتایج قابل قبولی دست یافتند. خاک مورد آزمایش به طور عمده از شن و ماسه تشکیل شده است. رطوبت آن بین ۴ تا ۸/۲ درصد می‌باشد و وزن مخصوص آن بین ۱۲۰۰ تا ۱۴۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. این مدل تحت بارهای ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره ANFO قرار گرفت.

بعد از ساخت این مدل و اعمال بارهای ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در نرم‌افزار آباکوس، عمق گودال زیر انفجار در هر یک از سه حالت به صورت نمودار در شکل (۴) قابل مشاهده است. با مقایسه مدل اصلی که توسط لی و همکاران ساخته شده است و مدل ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس نتیجه می‌گیریم نتایج، انطباق نسبتا خوبی با هم دارند و در نتیجه نحوه مدلسازی مدل این پژوهش قابل اعتماد است.



شکل (۴): مقایسه مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار LS-DYNA و ABAQUS

مطالعه بر روی اثرات انفجار روی سد خاکی چراغ‌ویس

هدف از این پژوهش، تحلیل حساسیت برای پارامترهای حساسیت، شامل ضخامت ریپ‌رپ، شیب بالادست، شیب پایین‌دست، تراز نرمال آب و مصالح هسته و پوسته است. برای نظم دادن به تحلیل‌های حساسیت، ۵ گروه تحلیل انجام شده است:

گروه اول- تغییر در ضخامت ریپ‌رپ: انفجار بر روی ریپ‌رپ سد رخ می‌دهد پس این قسمت از سد نقش موثری روی انفجار خواهد داشت. ضخامت اصلی سد ۰/۸ متر است که جهت تقویت‌سازی و بهبود عملکرد سد، این ضخامت را به ۱/۲ متر و ۱/۶ متر افزایش می‌دهیم.

گروه دوم- تغییر در شیب بالادست: کاهش شیب به معنی افزایش خاکریزی و وزن سد می‌باشد. برای مشاهده تاثیر آن، از مقدار اولیه ۱:۲/۴ (۱ قائم به ۲/۴ افقی) به مقادیر ۱:۳ و ۱:۳/۵ تغییر کرده است.

گروه سوم- تغییر در شیب پایین‌دست: مشابه با ملایم سازی شیب بالادست، شیب پایین‌دست نیز از مقدار ۱:۲/۱ به مقادیر ۱:۲/۵ و ۱:۳ کاهش پیدا کرد تا اثر آن را بر عمق گودال ایجاد شده در اثر انفجار مشاهده کنیم.

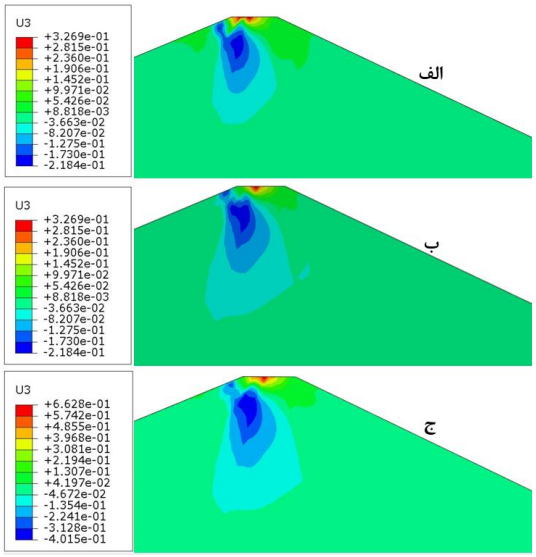
گروه چهارم- تغییر در تراز نرمال آب: سد چراغ‌ویس تاکنون آبگیری نشده است اما مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تا تراز نرمال ۶۰ متر امکان آبگیری دارد. در این پژوهش برای مشاهده اثر تغییرات تراز آب، این تراز از ۶۰ متر به ۵۰ متر و ۴۰ متر کاهش داده شد. لازم به ذکر است که در هر حالت خط فشار صفر (خط تراوش) رسم گردید و نیروهای تراوش به بدنه سد وارد گردید.

گروه پنجم- تغییر در ویژگی ها مصالح: برای مصالح به کاررفته در مدل پایه از ویژگی ها کالیبره شده سد استفاده گردید. اما برای مشاهده تاثیر این خصوصیات تحت اثر انفجار، از دو مدل دیگر استفاده شد. در یکی از مدل‌ها، زاویه اصطکاک داخلی هسته ۵ درجه بیشتر شد و چسبندگی مصالح هسته و پوسته ۵ کیلوپاسکال افزایش یافت. در مدل دیگر زاویه اصطکاک داخلی هسته ۵ درجه و چسبندگی مصالح هسته و پوسته ۵ کیلوپاسکال کاهش پیدا کرد.

نتایج و بحث

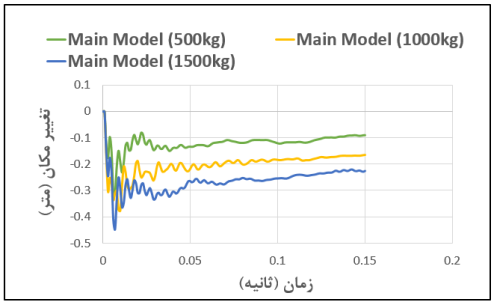
-تغییر شکل بدنه سد در زمان انفجار

همانطور که در شکل (۵) مشخص است در مدل پایه، بدنه سد در پایان انفجار در زیر نقطه انفجار نشست کرده و گودالی ایجاد می‌شود. همچنین در اثر فشار ناشی از انفجار در قسمتی از تاج سد بالاآمدگی رخ داده است.



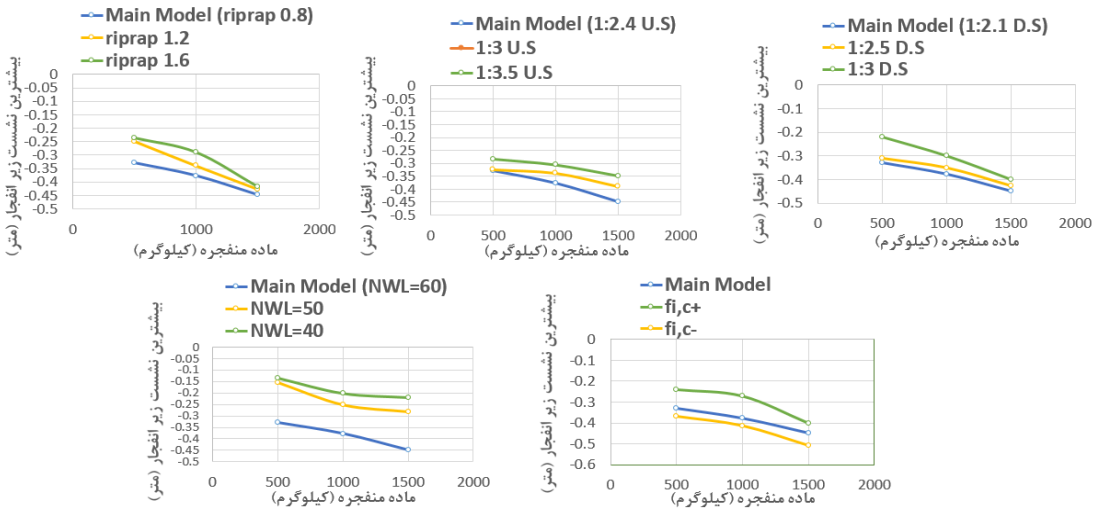
شکل (۵): الف) کانتورهای نشست در زمان انفجار تحت بار ۵۰۰ کیلوگرم TNT ب) کانتورهای نشست در زمان انفجار تحت بار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT ج) کانتورهای نشست در زمان انفجار تحت بار ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT

شکل (۶) مقدار نشست در نقطه زیر انفجار در طی زمان انفجار را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، بیشترین نشست در ابتدای انفجار رخ داده است و دارای مقادیر۳۳، ۳۸ و ۴۵ سانتی‌متر به ترتیب برای بارهای ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم می‌باشد اما با گذر زمان این نشست به مقداری تقریبا ثابت رسیده است. مقدار این نشست پسماند به ترتیب ۱۶/۹ و ۲۳ سانتی‌متر در پایان انفجار برای بارهای ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوگرم می‌باشد.

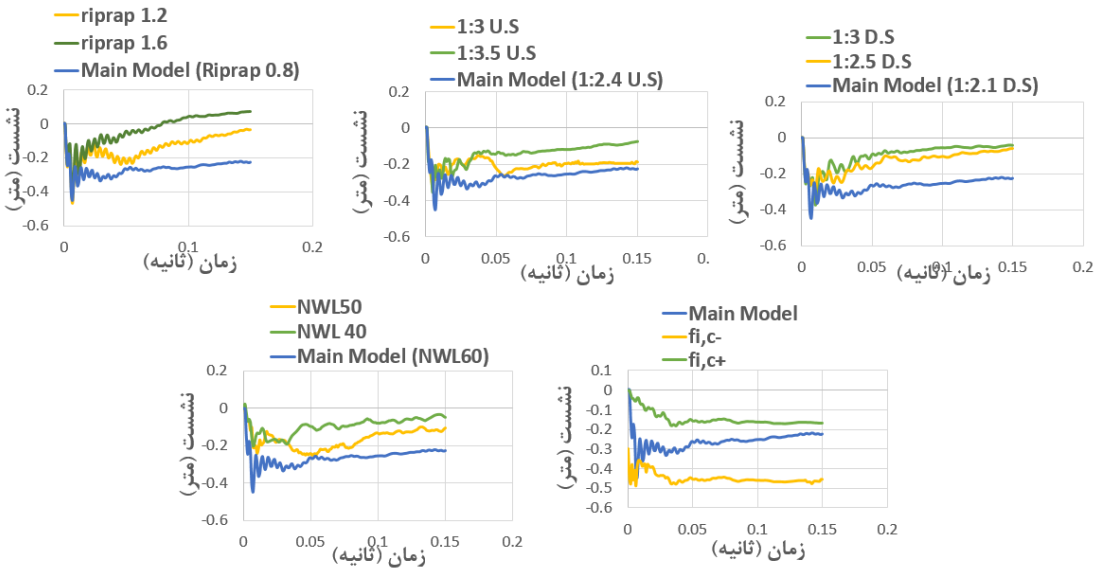


شکل (۶): میزان نشست در نقطه زیر انفجار طی زمان انفجار در مدل پایه

پس از تغییر هندسه و ویژگی‌های سد به نحوی که گفته شد، مقادیر نشست ماکزیمم در زیر نقطه انفجار و همچنین میزان نشست در نقطه زیر انفجار در طی زمان انفجار و تحت بار ۱۵۰۰ کیلوگرم در مدل‌های مختلف، به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) آورده شده است.



شکل (۷): نشست ماکزیمم در زیر نقطه انفجار در مدل‌های مختلف



شکل (۸): نشست در نقطه زیر انفجار تحت بار ۱۵۰۰ کیلوگرم در مدل‌های مختلف

همانطور که نشان داده شده است، الگوی جابه‌جایی بدنه سد در این سه حالت مشابه است و با کاهش بار انفجاری اعمال‌شده از میزان بیشینه نشست در نقطه انفجار کاسته می‌شود.

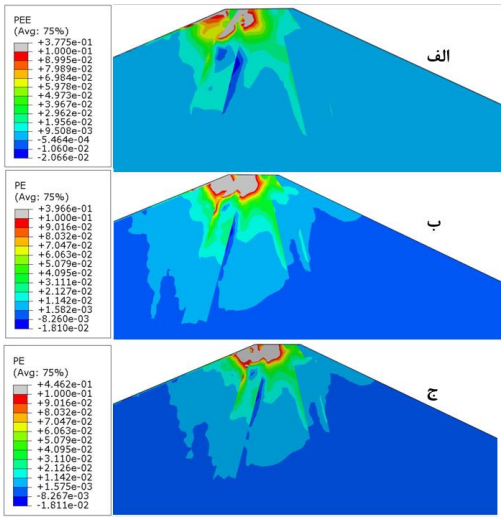
برای مقایسه بهتر اعداد منحنی‌های نشست در زیر انفجار بر حسب ماده منفجره، اعداد نمودارها به صورت جدول (۲) آورده شده است و میزان تغییرات نشست نسبت به مدل اصلی به صورت درصد بیان شده است. با مقایسه این اعداد می‌توان نتیجه گرفت که کاهش تراز نرمال آب بیشترین تاثیر را روی کم کردن اثر انفجار بر تغییر شکل سد داشته است. همچنین کاهش شیب پایین‌دست کمترین تغییر را در میزان نشست‌ها داشته و چون انفجار در پوسته بالادست سد رخ داده است، تغییرات شیب بالادست تاثیر بیشتری روی کاهش نشست‌ها داشته است.

جدول(۲): مقایسه میزان نشست بر حسب متر بر اساس بار انفجاری در همه مدل‌ها

	۵۰۰ کیلوگرم	تغییرات (٪)	۱۰۰۰ کیلوگرم	تغییرات (٪)	۱۵۰۰ کیلوگرم	تغییرات (٪)
مدل اصلی	۰/۳۳	۰/۰۰	۰/۳۸	۰/۰۰	۰/۴۵	۰/۰۰
ضخامت ریپ‌رپ ۱/۲ متر	۰/۲۵	۲۴/۲۴	۰/۳۴	۱۰/۵۳	۰/۴۳	۴/۴۴
ضخامت ریپ‌رپ ۱/۶ متر	۰/۲۳	۳۰/۳۰	۰/۲۹	۲۳/۶۸	۰/۴۲	۶/۶۷
شیب بالادست ۱:۳	۰/۳۲	۳/۰۳	۰/۳۴	۱۰/۵۳	۰/۳۸	۱۵/۵۶
شیب بالادست ۱:۳/۵	۰/۲۸	۱۵/۱۵	۰/۳	۲۱/۰۵	۰/۳۵	۲۲/۲۲
شیب پایین‌دست ۱:۲/۵	۰/۳۱	۶/۰۶	۰/۳۵	۷/۸۹	۰/۴۲	۶/۶۷
شیب پایین‌دست ۱:۳	۰/۲۲	۳۳/۳۳	۰/۳	۲۱/۰۵	۰/۴	۱۱/۱۱
تراز آب مخزن ۵۰ متر	۰/۱۵	۵۴/۵۵	۰/۲۵	۳۴/۲۱	۰/۲۸	۳۷/۷۸
تراز آب مخزن ۴۰ متر	۰/۱۳	۶۰/۶۱	۰/۲	۴۷/۳۷	۰/۲۲	۵۱/۱۱
مصالح قوی‌تر	۰/۲۴	۲۷/۲۷	۰/۲۷	۲۸/۹۵	۰/۴	۱۱/۱۱
مصالح ضعیف‌تر	۰/۳۷	-۱۲/۱۲	۰/۴۲	-۱۰/۵۳	۰/۵۱	-۱۳/۳۳

کرنش‌های برشی پلاستیک حین انفجار

کانتور کرنش پلاستیک ناشی از انفجار ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT برای مدل پایه در پایان انفجار در شکل (۹) نشان داده شده است. با فرض کرنش برشی پلاستیک ۱۰ درصد به عنوان مرز گسیختگی خاک، نواحی نزدیک به انفجار شامل پوسته بالادست و مقداری از هسته دارای کرنش پلاستیک بیشتر از ۱۰ درصد می‌باشند و به حدود ۴۴ درصد برای مدل پایه (تحت بار ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT) می‌رسد. برای مقایسه مدل‌ها و مشاهده تاثیر پارامترها روی کرنش پلاستیک، مقادیر بیشینه و همچنین مساحت ناحیه گسیخته شده اندازه‌گیری شده و در جدول (۳) آورده شده است.



شکل (۹): الف) کانتور کرنش پلاستیک سد پس از انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT ب) کانتور کرنش پلاستیک سد پس از انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT ج) کانتور کرنش پلاستیک سد پس از انفجار ۱۵۰۰ کیلوگرم TNT

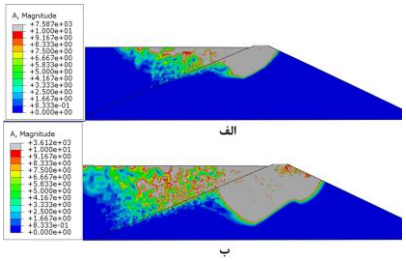
جدول (۳): مساحت‌ها و مقادیر بیشینه کرنش پلاستیک در مدل‌های مختلف تحت بارگذاری

مدل	اندازه بار انفجاری					
	۵۰۰ کیلوگرم		۱۰۰۰ کیلوگرم		۱۵۰۰ کیلوگرم	
	بیشینه	مساحت (متر مربع)	بیشینه	مساحت (متر مربع)	بیشینه	مساحت (متر مربع)
مدل اصلی	۰/۳۸	۱۸/۵	۰/۳۹	۳۸/۱	۰/۴۵	۴۱/۸
ضخامت ریپ‌رپ ۱/۲ متر	۰/۴۸	۱۳/۴	۰/۴۶	۳۶/۴	۰/۴۲	۳۸/۶
ضخامت ریپ‌رپ ۱/۶ متر	۰/۴۲	۱۱	۰/۴۴	۳۳/۱۶	۰/۵۲	۳۴/۴
شیب بالادست ۱:۳	۰/۴۵	۱۸/۱	۰/۵۲	۳۷/۱۲	۰/۵۲	۳۹/۸
شیب بالادست ۱:۳/۵	۰/۴۶	۱۲/۴	۰/۳۹	۳۵/۲	۰/۳۸	۳۸/۲
شیب پایین‌دست ۱:۲/۵	۰/۵۴	۱۱/۷	۰/۹۵	۲۹/۱۳	۰/۶۷	۳۴/۵
شیب پایین‌دست ۱:۳	۰/۳۸	۵/۹	۰/۴۵	۱۴/۶	۰/۳۳	۳۰/۲
تراز آب مخزن ۵۰ متر	۰/۴۸	۱۶/۲	۰/۴۹	۳۰/۲	۰/۵۹	۳۷/۵
تراز آب مخزن ۴۰ متر	۰/۳۹	۶/۱	۰/۳۹	۱۹/۷	۰/۴۸	۲۴/۵
مصالح قوی‌تر	۰/۳	۹/۳	۰/۴۷	۳۲/۲	۰/۴۳	۳۹/۳
مصالح ضعیف‌تر	۰/۴۷	۱۹/۷	۰/۳۹	۳۹/۳	۰/۴۶	۴۵/۴

از جدول بالا نتیجه می‌شود که هر چه بار بیشتری به سد اعمال می‌شود، مساحت کرنش پلاستیک بیشتر شده و همچنین در اثر تغییرات هندسه سد در راستای بهبود اثرات ناشی از انفجار مساحت گسیخته شده کمتر می‌شود. همانطور که مشخص است، میزان تاثیر پنج گروه مختلف بر روی مساحت کرنش پلاستیک، تقریبا مشابه است و نمی‌توان نظر قطعی راجع به اینکه کدام پارامتر بیشترین بهبود را داشته است، ارائه داد.

تغییرات شتاب حین انفجار

این خروجی برای نشان دادن پیشروی موج انفجار در بدنه سد و همچنین در داخل آب استخراج می‌شود. شکل (۱۰) پیشروی موج را در زمان‌هایی از انفجار در مدل پایه نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): الف) پیشروی موج در اواسط زمان انفجار ب) پیشروی موج لحظه‌ای پس از پایان انفجار

همانطور که از شکل‌های فوق مشخص است این پیشروی در آب بیشتر از بدنه سد خاکی است. همچنین این پیشروی به صورت متقارن در داخل خاک پیش نمی‌رود و در واقع هسته سد روند پیشروی موج را کندتر می‌سازد. علت این پدیده سختی کمتر هسته است زیرا امواج مکانیکی در امواج سخت-تر، سریع‌تر حرکت می‌کنند و برعکس.

نتیجه‌گیری

خلاصه ای از روند پژوهش و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس به شرح زیر است:

با افزایش بار انفجاری روی مدل پایه، ماکزیمم نشست در نقطه زیر انفجار افزایش یافت. روند تغییر نشست در طول انفجار به این صورت است که در ابتدا به بیشینه مقدار خود می‌رسد و سپس روندی تقریبا یکنواخت و بدون تغییر را ادامه می‌دهد. با کاهش شیب بالادست، کاهش شیب پایین‌دست، افزایش ضخامت ریپ‌رپ، کاهش تراز نرمال آب و به کارگیری مصالح با مقاومت بالاتر، میزان تغییر شکل سد در نقطه زیر انفجار کاهش یافت. با مقایسه درصد تغییرات نشست در هر حالت، مشاهده شد که با کاهش تراز نرمال آب، بیشترین کاهش نشست در محل انفجار رخ داده است. با اعمال تغییرات بالا، مساحت قسمتی از سد که تحت کرنش‌های پلاستیک بیش از ۱۰ درصد قرار می‌گیرند، کاهش پیدا کرده است. پیشروی موج انفجار در بدنه سد نشان‌دهنده این است که هسته روند پیشروی موج را کندتر ساخته است که علت آن سختی کمتر آن است.

مراجع

۱- مسعود ابراهیمی خسروشاهی، فرهود کلاته، (۱۳۹۵)، "بررسی اثر مخزن بر رفتار دینامیکی سدهای خاکی تحت بار انفجاری در هوای آزاد"، سومین کنفرانس بین‌المللی معماری و شهرسازی پایدار.

۲- ساسان ادریسی عراقی، حمیدرضا صبا، (۱۳۸۹)، "برآورد رابطه فاصله-فشار در عمق برای خاک‌های دانه‌ای در اثر انفجار سطحی"، اولین کنفرانس پدافند غیرعامل و سازه‌های مقاوم.

۳- عیسی حسین‌زاده، (۱۳۹۲)، "اثر انفجار بر سد خاکی" به راهنمایی دکتر قلی‌زاده، پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی.

۴- احسان شهیری طبرستانی، (۱۳۹۶) "رفتارنگاری سد چراغ‌ویس در دوران ساخت با استفاده از اطلاعات ابزار دقیق" به راهنمایی دکتر میرقاسمی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

۵- فردین نوروزی، فرهود کلاته و محمدعلی لطف‌اللهی، (۱۳۹۶)، "تحلیل عددی رفتار دینامیکی سد بتنی وزنی تحت بار انفجاری داخل مخزن"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۷، شماره ۱، ص ۹۱-۱۰۴.

۶- گزارش برنامه‌ریزی منابع آب سد مخزنی چراغ‌ویس، شرکت مشاوره دزآب، (۱۳۹۱).

7- Ambrosini D, Luccioni B, Danesi R. (2004). “Craters produced by explosions on the soil surface”, Computer Mechanics, 22: 678–92.

8- De A., Butler S., Zimmie T.F., (2013), “Effects of Surface Explosions on top of Earth Embankment” Dams.” Geo-congress 2013; ASCE 2013.

9- Li, Y., Contestabile, E., Braimah, A. and Wilson, D., (2007), “Preliminary Vulnerability of an Embankment Dam due to Explosions”, CERL Report.

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

11-Yong Lu, Chunhua Bai, Zhongqi Wang, (2011), Numerical simulation of explosion and its effect on surface structures, Finite Elements Analysis and Design 47, 1079-1090

12- P.ABAQUS. Users’ manual. Simulia, Rhode Island; (2008).