



## ارزیابی رفتار سدهای بتنی وزنی تحت موج شوک حاصل از انفجار در مخزن

حسین بهزاد نسب<sup>۱</sup>، محمد عالم باقری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۱۷

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۶-۲۴

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۶-۲۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۷-۰۲

### کلمات کلیدی:

سد بتنی وزنی

انفجار

ترک خوردگی

موج شوک

ارزیابی رفتار

**خلاصه:** در مطالعه حاضر به ارزیابی رفتار سازه‌ی سدهای بتنی وزنی در برابر فشار هیدرودینامیکی ناشی از موج ضربه‌ای حاصل از انفجار در مخزن سد پرداخته شده است. بدین منظور چندین نقطه دلخواه به عنوان نقاط پایینی، میانی و بالایی در ارتفاع سد انتخاب و مواد منفجره در فواصل افقی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متری قرار داده می‌شود. تحلیل عددی تحت محل‌های متفاوت انفجاری در مخزن سد انجام و در نهایت پروفیل‌های ترک سد استخراج و نواحی محتمل ترک خوردگی سد تحت بارهای متفاوت انفجاری مشخص می‌شود. با مقایسه‌ی پروفیل ترک حاصل از تحلیل حالات مختلف بارهای انفجاری نتیجه شد که موج شوک حاصل از انفجار در ارتفاع‌های میانی و نزدیک به کف سد تأثیرات مخرب تری به نسبت قرارگیری مواد منفجره در ارتفاع‌های نزدیک به تاج سد دارد، به طوری که در ارتفاع صفر از کف سد و با فاصله افقی ۱۰ متر بیشترین خرابی سد رخ می‌دهد و همچنین نواحی مستعد ترک خوردگی پاشنه و گردن سد تشخیص داده می‌شود. پس از اتمام وقوع انفجار هنوز اثرات ناشی از آن باقی می‌ماند و موج‌های ایجاد شده حاصل از آن تا ثانیه‌های بعد قادر به ایجاد خرابی در بدنه‌ی سد هستند. هر چقدر مواد منفجره در ارتفاع کمتری از کف سد قرار بگیرد، به میزان تغییر مکان تاج سد افزوده می‌شود؛ به طوری که میزان تغییر مکان تاج سد با قرارگیری مواد منفجره در کف مخزن یعنی تراز صفر و همچنین تراز ۲۷ بیشترین مقدار را نسبت به دیگر ترازهای ارتفاعی نشان می‌دهد.

### ۱- مقدمه

خسارات سازه‌ها تحت بارهای انفجاری در سال‌های اخیر به دلیل شمار زیادی از وقایع اتفاقی و انفجارات عمدی بر ایمنی مهندسی سازه تأثیر گذاشته است. مطالعات بسیاری بر رفتار انواع سازه‌ها تحت بارهای انفجاری انجام گردید. لارمنیکوف در سال ۲۰۰۳ [۱] روش‌هایی را برای تخمین اثرات انفجار بمب بر ساختمان‌ها مورد مطالعه قرار داد و روابطی برای اثرات انفجار بر ساختمان‌ها ارائه داد. مطالعات دیگری در مورد اثرات انفجار بر روی دال‌های بتنی [۲]، سازه‌های زیرزمینی [۳]، سازه‌های نیروگاهی [۴] و دیگر سازه‌ها انجام گردید. پدیده انفجار زیر آب از موضوعاتی است که در چند دهه اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته و حل مسائل انفجار زیر آب

با افزایش حوادث عمدی ناشی از انفجار و یا انفجارات ناخواسته که در سازه‌ها ایجاد می‌شود، این‌گونه حوادث تبدیل به تهدیدی بالقوه برای زیرساخت‌ها و سازه‌های عظیم شده است که در صورت عدم تحلیل دقیق، خسارات جبران‌ناپذیری به منافع ملی و حیاتی یک کشور وارد می‌شود. باتوجه به اینکه تعداد بسیاری سدهای بتنی وزنی وجود داشته و تعداد این سدها رو به افزایش است، از این رو مطالعه وضعیت خسارت و عملکرد ضد انفجاری سدها تحت بارگذاری‌های انفجاری یک مسأله مهم و حیاتی می‌باشد. پیش‌بینی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: alembagheri@modares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



داد با وجود فشار هیدرواستاتیک پاشنه سد آسیب بیشتری می بیند و همچنین گسترش محصولات انفجاری با سرعت کمتری رخ می دهد. آن ها به اهمیت موقعیت قرارگیری مواد منفجره نیز تأکید داشتند. فرهود کلاته در سال ۲۰۱۸ [۱۳] به ارزیابی اثرات انفجار در هوا بر روی پاسخ دو سد وزنی و قوسی پرداخت. نتایج نشان داد تحت تأثیر بارهای انفجاری در هوا سدهای قوسی آسیب بیشتری نسبت به سدهای وزنی می بینند.

در تحقیق حال حاضر به بررسی موج ضربه ای حاصل از انفجار بر روی سد وزنی بتنی پرداخته می شود. بدین منظور چندین نقطه دلخواه به عنوان نقاط پایینی، میانی و بالایی در ارتفاع سد انتخاب و مواد منفجره در فواصل افقی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متری قرار داده می شود. تحلیل عددی تحت محل های متفاوت انفجاری در مخزن سد انجام و در نهایت پروفیل های ترک سد استخراج و نواحی ترک خوردگی سد تحت بارهای متفاوت انفجاری مشخص می شود.

## ۲- معرفی روابط انفجار زیر آب

تمام پدیده های انفجار زیر آب به علت وزنی از مواد منفجره می باشد. یک واکنش انفجاری حاصل از تجزیه مولکول های اصلی به یک محصول مولکولی می باشد. دمای یک محصول گازی تا ۳۰۰۰ درجه سانتیگراد و فشار آن تا حدود ۵۰۰۰ مگاپاسکال می باشد. انتشار انرژی ناگهانی حاصل از مواد انفجاری باعث ایجاد گرمای بیش از حد و منجر به تشکیل حباب های بشدت فشرده و ایجاد موج ضربه ای در آب می شود. پس از وقوع انفجار زیر آب، موج ضربه ای از محل وقوع انفجار منتشر شده و به اطراف گسترش می یابد. فشار سیال بطور ناگهانی و در زمان کوتاهی کمتر از ثانیه به مقدار حداکثر خود می رسد و سپس با تابعی تقریباً نمایی میرا می شود. فشار دینامیکی ناشی از موج ضربه بر حسب زمان  $P(t)$  در ادامه شرح داده می شود [۶].

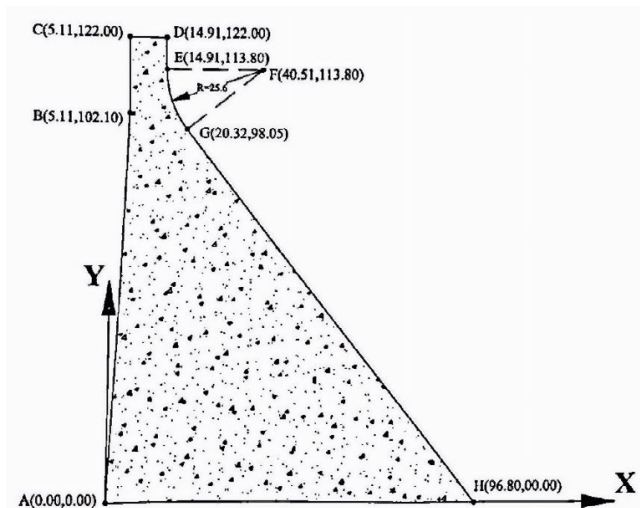
برای تعیین موج شوک ایجاد شده در اثر انفجار زیر آب، از رابطه فشار بر حسب زمان به شکل رابطه تجربی (۱) استفاده می شود. نماد  $W$  وزن ماده منفجره TNT بر حسب کیلوگرم،  $S$  فاصله افقی هر نقطه از محل انفجار بر حسب متر،  $\theta$  نمایانگر موج ضربه ای بیشینه و بر حسب میکرو ثانیه می باشد.

$$P_t = P_m e^{\left(\frac{-t}{\theta}\right)} \quad (1)$$

کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف داشته است. مطالعات تجربی و تحلیلی بر روی این موضوع در سال ۱۹۴۸ توسط کول جمع آوری و ارائه شد [۵]. در سال ۲۰۰۶ راجندران و همکارانش رفتار تغییر شکل و شکست یک نمونه صفحه فلزی تحت اثر انفجار زیر آب مورد بررسی قرار دادند [۶]. در سال ۲۰۱۴ ژانگ و همکاران [۷] به بررسی اثرات حباب های ایجاد شده ناشی از انفجار بر روی سازه کشتی پرداختند. آن ها پاسخ سازه یک کشتی را به دو بخش حرکات صلب و تغییر شکل های الاستیک تقسیم بندی نمودند. غاشال و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۸] اثرات انفجار زیر آب را با توجه به عمق، شوری و دمای آب مورد بررسی قرار دادند. آن ها نتیجه گرفتند عمق آب عامل تأثیرگذاری در طراحی کشتی های مقاوم در برابر انفجار است.

مطالعات محدودی در مورد رفتار سازه سد در برابر انفجار انجام شده است. در اکتبر ۱۹۴۰ اولین بار بر اساس مدل مقیاس شده سد مونه یک سری آزمایشات انجام گرفت تا مشخص شود یک بمب معمولی بزرگ توانایی نابودی سد را دارد [۹]. با توجه هزینه های بالای مدل سازی آزمایشگاهی انفجار و همچنین خطرهای ناشی از بارهای انفجاری، می توان از مدل سازی عددی به عنوان جایگزینی برای آزمایشات پرهزینه ی انفجار سازه استفاده کرد. از جمله مطالعات عددی انجام گرفته شده در راستای بررسی تأثیر انفجار بر روی سازه سد می توان به موارد ذیل اشاره نمود. شانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۹] سازه یک سد بتنی وزنی را با مش بندی های متفاوت در برابر بارهای انفجاری زیر آب مورد ارزیابی قرار دادند. آن ها نتیجه گرفتند دقت نتایج عددی به شدت وابسته به اندازه مش می باشد. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۰] یک تحلیل عددی برای پیش بینی آسیب های سدهای وزنی بتنی تحت اثر انفجار زیر آب انجام دادند و رفتار یک سد وزنی بتنی تحت وزن های مختلف TNT در فواصل متفاوت انفجاری مورد بررسی آن ها قرار گرفت. چهار دسته بندی شامل رده بدون خسارت، رده خسارت اندک، رده خسارت متوسط و رده خسارت شدید برای سازه سد ارائه کردند و طی مطالعه دیگری در همان سال [۱۱] به مقایسه اثرات انفجار زیر آب و در هوا بر روی سازه سدهای وزنی بتنی پرداختند.

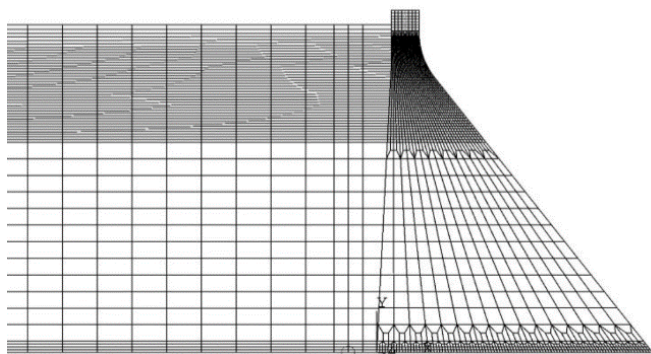
لو و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۲] نسبت به بررسی مدهای شکست سدهای وزنی بتنی تحت اثر انفجار زیر آب پرداختند. آن ها در تحقیق خود فشار هیدرواستاتیک را نیز در نظر گرفتن نتایج نشان



شکل ۱. مشخصات مقطع دوبعدی سد پاین فلت [۱۴]  
Fig. 1. Two-dimensional profile of Pine Flat Dam [14]

می باشد [۱۴] جهت مدل سازی دو بعدی سد پایت فلت به همراه مخزن آن از نرم افزار آباکوس استفاده گردیده است. مدل المان محدود مورد استفاده برای بدنه سد و بخشی از مخزن شامل ۱۹۸۴ المان برای بدنه سد در شکل ۲ نشان داده شده است. مشخصات مصالح بتنی مورد استفاده در بدنه سد و همچنین مخزن آن در جدول ۱ لیست شده است.

ارتفاع آب مخزن ۱۱۶/۸۸ متر فرض شده است. مقدار انرژی شکست مصالح بتن تقریباً ۴۰۰ نیوتن بر متر می باشد. رفتار غیرخطی مصالح بتن سد در تحلیل موج های فشاری حاصل از انفجار در مخزن سد با استفاده از رویکرد پلاستیسیته خرابی مدل می شود. بتن سد همگن در نظر گرفته می شود.



شکل ۲. مدل اجزا محدود سد پاین فلت  
Fig. 2. Finite element model of Pine Flat dam

جدول ۱. مشخصات مصالح بتنی و آبی مورد استفاده برای تحلیل  
Table 1. Specifications of concrete and water materials used for analysis

| مقدار | پارامتر                           |
|-------|-----------------------------------|
| ۳۰    | مدول الاستیسیته سالم (گیگاپاسکال) |
| ۰/۲   | ضریب پواسون                       |
| ۲۴۰۰  | چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)       |
| ۲/۹   | تنش کششی شکست (مگاپاسکال)         |
| ۳۰    | تنش فشاری تسلیم (مگاپاسکال)       |
| ۱۰۰۰  | چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)    |
| ۲/۰۷  | مدول بالک آب (گیگا پاسکال)        |

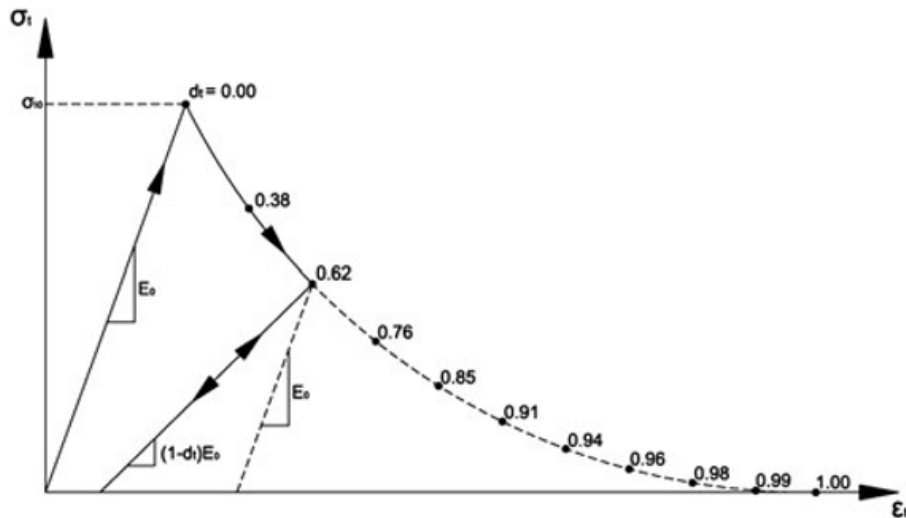
$$\theta = 96.5 \left( W \frac{1}{3} \right) \left( \frac{W \frac{1}{3}}{S} \right)^{-0.22} \quad (2)$$

$$P_m = 52.16 \left( \frac{W \frac{1}{3}}{S} \right)^{1.13} \quad (3)$$

این روابط برای هر مقداری از مواد منفجره و در هر عمقی که منجر به انفجار شود موج ضربه ای را به درستی توصیف می کند [۱۶]. انفجار زیر آب با انفجاراتی که در سطح زمین رخ می دهد، به دلیل ویژگی های آب، متفاوت است. آب نسبت به هوا دارای چگالی بسیار بیشتری است که موجب تحرک سخت تر آب نسبت به هوا می شود. از طرفی آب نسبت به هوا تراکم ناپذیرتر است. از این رو مقدار کمتری از انرژی انفجار را جذب می کند. این دو مورد موجب شدیدتر شدن انفجار زیر آب نسبت به انفجار در هوا می شود.

### ۳- مطالعه موردی

در این مقاله، برای ارزیابی فشار دینامیکی ناشی از موج ضربه ای حاصل از انفجار در مخزن سدهای وزنی بتنی، سد پاین فلت به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است (شکل ۱). سد وزنی پاین فلت بر روی رودخانه کینگز در ایالت کالیفرنیا ایالات متحده قرار دارد. کاربرد اصلی آن کنترل سیلاب و تامین آب جهت کارهای کشاورزی



شکل ۳. رفتار بتن تحت کشش یک جهته [۱۴]  
Fig. 3. Concrete constitutive behavior in uniaxial tension [14]

کششی و فشاری به ترتیب برابر رابطه های (۴) و (۵) می باشد. در این روابط  $\varepsilon_t^{pl}$  و  $\varepsilon_c^{pl}$  به ترتیب کرنش های پلاستیک معادل کششی و فشاری نامیده می شوند. اندیس های t و c به ترتیب نماد کشش و فشار می باشند.

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\varepsilon_0 - \varepsilon_t^{pl}) \quad (4)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_0 - \varepsilon_c^{pl}) \quad (5)$$

تنش های چسبندگی کششی و فشاری مؤثر به شکل روابط (۶) و (۷) تعریف می شود.

$$\sigma_t = \frac{\sigma_t}{(1 - d_t)} = E_0 (\varepsilon_0 - \varepsilon_t^{pl}) \quad (6)$$

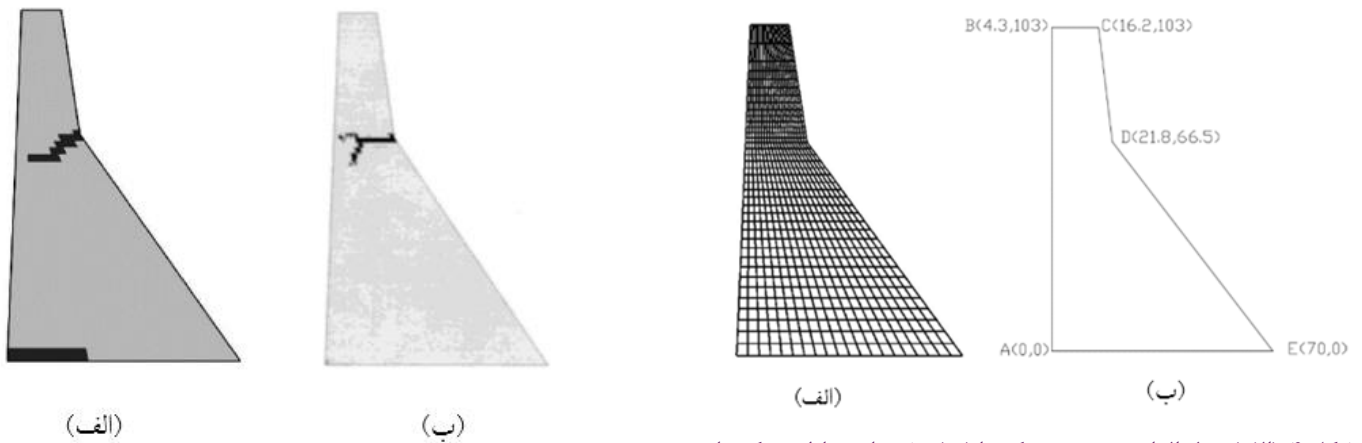
$$\sigma_c = \frac{\sigma_c}{(1 - d_c)} = E_0 (\varepsilon_0 - \varepsilon_c^{pl}) \quad (7)$$

تنش های مؤثر، اندازه (بزرگی) سطح شکست را مشخص می کنند. در مدل پلاستیته خرابی بتن، مدول الاستیسیته بتن در هر لحظه E با فرض کاهش آن بر حسب متغیر خرابی اسکالر d به شکل رابطه (۸) تعیین می شود که در آن  $E_0$  مدول اولیه (خراب نشده) مصالح می باشد.

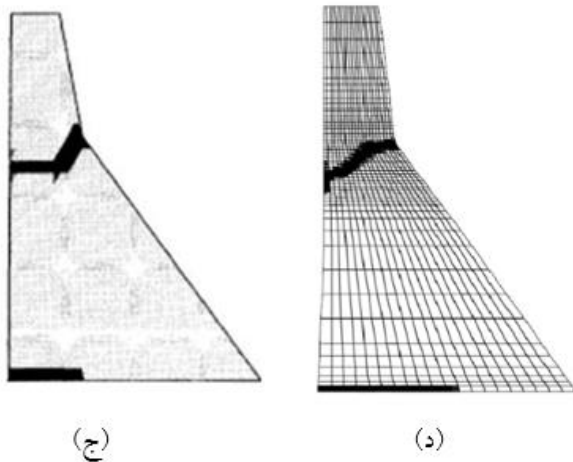
$$E = (1 - d) E_0 \quad (8)$$

### ۳-۱- مدل پلاستیسیته خرابی بتن

مدل پلاستیسیته خرابی بتن، مدل توانمندی است که برای بارگذاری های مختلف کاربرد داشته و با بیان رفتار مجزای بتن در فشار و کشش رفتار این ماده را به صورت واقعی بیان می کند. مدل معرفی شده برای بتن در حالت آسیب دیده یک مدل پیوسته بر اساس رفتار پلاستیک بوده و دو مکانیزم اصلی خرابی در این مدل، ترک های ناشی از کشش و خردشدگی در فشار می باشد. در مدل مذکور فرض می گردد که پاسخ به کشش و فشار تک محوره به وسیله ی معیار پلاستیسیته خرابی کنترل می شود. در اثر کشش تک محوره منحنی تنش-کشش تا نقطه تنش خرابی به صورت خطی تغییر می کند (شکل ۳) که این تنش همزمان با شروع و گسترش ترک های ریز در بتن می باشد. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی ها به صورت ترک های قابل مشاهده در می آیند که به صورت شاخه نرم شونده در فضای تنش-کرنش نشان داده می شوند (شکل ۳). تحت فشار تک محوره، پاسخ تا رسیدن به نقطه جاری شدگی به صورت الاستیک خواهد بود و در ناحیه پلاستیک رفتار عموماً به وسیله ی منحنی سخت شدگی بیان می شود که در نهایت با رسیدن به نقطه تنش نهایی، منحنی ها به صورت شاخه نرم شدگی در می آیند. منحنی های تنش-کرنش تک محوره بتن توسط دو متغیر خرابی  $d_c$  و  $d_t$  مشخص می شود. اگر  $E_0$  سختی الاستیک اولیه بتن (خراب نشده، سالم) باشد، رابطه تنش و کرنش تحت بارگذاری تک محوره



شکل ۴. (الف) مدل المان محدود سد کوینا (ب) مختصات نقاط سد کوینا  
 Fig. 4. (a) The finite element model of Koyna Dam (b) The coordinates of the points of Koyna Dam



شکل ۵. پروفیل ترک نهایی (الف) نمافزار آباکوس (ب) [15] Lee and Fenves (ج) [16] Cervera et al (د) [17] Calayir Karaton (ه) [18] Subrata et al

Fig. 5. (a).Crack profile from Abaqus. (b).Crack profile from Lee and Fenves [15]. (c). Crack profile from Cervera et al. [16] (d). Crack profile from Calayir & Karaton [17] (e). Crack profile Subrata et al [18]

همان طور که در شکل ۳ دیده می شود، متغیر خرابی از صفر، که بیان کننده عدم خرابی مصالح می باشد، تا یک، که نمایانگر زوال کامل می باشد، تغییر می کند. در مطالعه حاضر، تنها شکست کششی بتن به عنوان مکانیزم گسیختگی محتمل در نظر گرفته می شود. از خردشدگی صرف نظر شده و رفتار فشاری مصالح بتن، خطی در نظر گرفته می شود [۱۴]

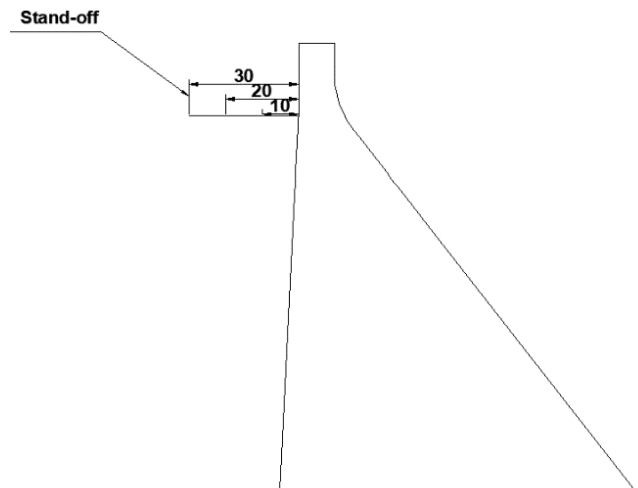
### ۳-۲- صحت سنجی روش عددی و رفتار غیر خطی سدهای وزنی بتنی

در تاریخ ۱۱ دسامبر سال ۱۹۶۷ زلزله شدیدی به نام کوینا در کشور هند رخ می دهد. تحت این زلزله سد کوینا دچار ترک خوردگی کلی می شود. سد کوینا به عنوان مدل مطالعاتی مورد استفاده قرار می گیرد. به دلیل اینکه به طور گسترده توسط محققین مختلف مورد تحقیق قرار گرفته است، با شبیه سازی زلزله کوینا بر روی مدل المان محدود سد کوینا در نرم افزار به صحت سنجی رفتار غیر خطی بتن با استفاده از تئوری پلاسیسته خرابی بتن پرداخته می شود. مصالح بتن با چگالی ۲۶۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته سالم ۳۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ و همچنین رفتار تنش-کرنش بتن در کشش با استفاده از مدل پلاستیک خرابی مدل می شود. برای تحلیل دینامیکی غیر خطی از مختصات و مش بندی شکل ۴ استفاده شده است. ارتفاع آب مخزن در این تحلیل ۹۷/۱ متر فرض گردیده است.

| نام تحلیل | مقدار TNT(Kg) | فاصله افقی Meter | ارتفاع Meter | فواصل نرمال شده نسبت به ارتفاع |
|-----------|---------------|------------------|--------------|--------------------------------|
| U1        | ۵۰۰           | ۱۰               | ۰            | ۰                              |
| U2        | ۵۰۰           | ۲۰               | ۰            | ۰                              |
| U3        | ۵۰۰           | ۳۰               | ۰            | ۰                              |
| U4        | ۵۰۰           | ۱۰               | ۲۷           | ۰/۲۲                           |
| U5        | ۵۰۰           | ۲۰               | ۲۷           | ۰/۲۲                           |
| U6        | ۵۰۰           | ۳۰               | ۲۷           | ۰/۲۲                           |
| U7        | ۵۰۰           | ۱۰               | ۶۹           | ۰/۵۶                           |
| U8        | ۵۰۰           | ۲۰               | ۶۹           | ۰/۵۶                           |
| U9        | ۵۰۰           | ۳۰               | ۶۹           | ۰/۵۶                           |
| U10       | ۵۰۰           | ۱۰               | ۱۰۲          | ۰/۸۳                           |
| U11       | ۵۰۰           | ۲۰               | ۱۰۲          | ۰/۸۳                           |
| U12       | ۵۰۰           | ۳۰               | ۱۰۲          | ۰/۸۳                           |
| D1        | ۱۰۰۰          | ۱۰               | ۰            | ۰                              |
| D2        | ۱۰۰۰          | ۲۰               | ۰            | ۰                              |
| D3        | ۱۰۰۰          | ۳۰               | ۰            | ۰                              |
| D4        | ۱۰۰۰          | ۱۰               | ۲۷           | ۰/۲۲                           |
| D5        | ۱۰۰۰          | ۲۰               | ۲۷           | ۰/۲۲                           |
| D6        | ۱۰۰۰          | ۳۰               | ۲۷           | ۰/۲۲                           |
| D7        | ۱۰۰۰          | ۱۰               | ۶۹           | ۰/۵۶                           |
| D8        | ۱۰۰۰          | ۲۰               | ۶۹           | ۰/۵۶                           |
| D9        | ۱۰۰۰          | ۳۰               | ۶۹           | ۰/۵۶                           |
| D10       | ۱۰۰۰          | ۱۰               | ۱۰۲          | ۰/۸۳                           |
| D11       | ۱۰۰۰          | ۲۰               | ۱۰۲          | ۰/۸۳                           |
| D12       | ۱۰۰۰          | ۳۰               | ۱۰۲          | ۰/۸۳                           |

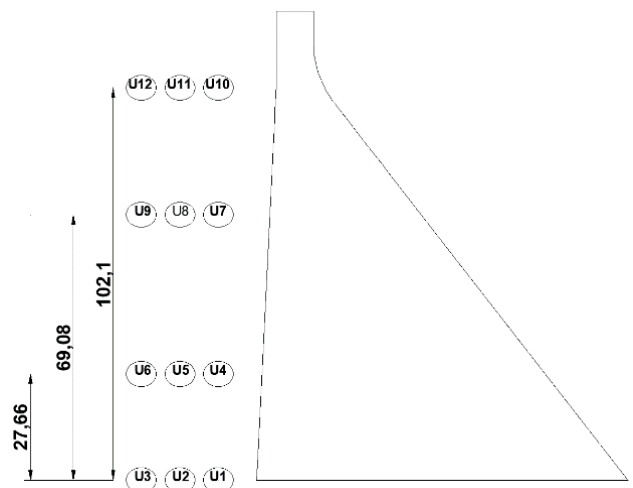
جدول ۲. نامگذاری تحلیلهای عددی حاصل از انفجار زیر آب

بارگذاری انفجار زیر آب، مواد انفجاری در فواصل افقی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متری از وجه بالادست سد داخل مخزن (شکل ۶) در چهار نقطه در ترازهای ارتفاعی مختلف ۰ (کف مخزن)، ۲۷، ۶۹ و ۱۰۲ متری قرار می گیرد. در شکل ۷ موقعیت قرارگیری مواد منفجره نشان داده شده است. در این نقاط در دو تحلیل جداگانه موج انفجار ناشی از ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT مدل سازی می شود. پیش از انجام تحلیل انفجار زیر آب، بارهای وزن و هیدرو استاتیک به بدنه سد اعمال می شوند که نشان دهنده شرایط اولیه پیش از بارگذاری انفجاری می باشد. بارگذاری انفجار طبق روابط (۱) تا (۳) محاسبه شده و در مختصات های ذکر شده در مخزن سد وارد می شود. مدت زمان اعمال بار انفجاری ۰/۰۴ ثانیه می باشد. پاسخ بدنه سد حین انفجار و همچنین حرکت ارتعاش آزاد آن پس از انفجار به منظور بررسی رفتار سد حین و بعد وقوع انفجار مورد بررسی قرار می گیرد. در جدول ۲، تحلیل های بارهای انفجاری با عناوین U1 الی U12 برای ۵۰۰



شکل ۶. نمایش فواصل افقی انفجار بر حسب متر

Fig. 6. Shows the horizontal explosion distances in meters



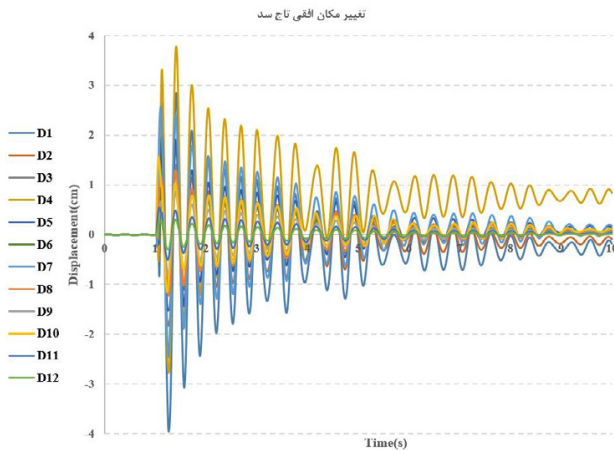
شکل ۷. موقعیت قرارگیری مواد منفجره از کف مخزن بر حسب متر

Fig. 7. Position of explosives from the bottom of the Reservoir in meters

شکل ۵ پروفیل ترک بدست آمده از آباکوس و پروفیل های ترک تحلیل دینامیکی غیرخطی حاصل از مطالعه دیگر محققین بر روی سد کوپنا را نشان می دهد. با توجه به پارامترهای متعددی که در تحلیل غیرخطی سدهای بتنی تأثیرگذار می باشند، انتظار به دست آمدن پاسخ کاملاً یکسان بین تحقیقات مختلف امری بیهوده می باشد؛ اما یکسان بودن سطح نتایج به دست آمده را می توان انتظار داشت.

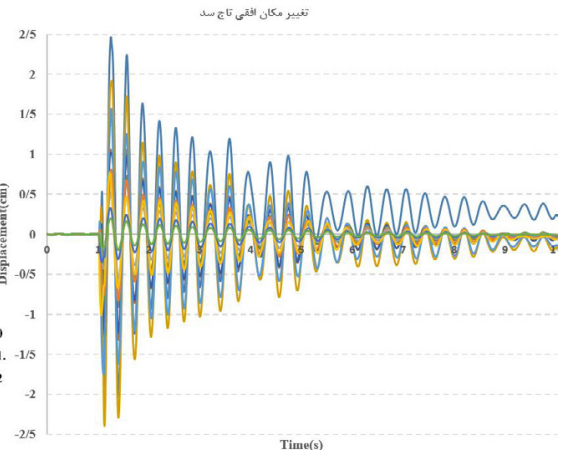
### ۳-۳- بارگذاری انفجار زیر آب

در این تحقیق به منظور ارزیابی رفتار غیرخطی بدنه سد تحت



شکل ۹. نمودارهای تغییر مکان نسبی تاج سد در حالات تحلیل D1 تا D12

Fig. 9. Diagrams Relative Crest Displacement in U1 to U12 Analysis Modes



شکل ۸. نمودارهای تغییر مکان نسبی تاج سد در حالات تحلیل U1 تا U12

Fig. 8. Diagrams Relative Crest Displacement in U1 to U12 Analysis Modes

شرط مرزی تعریف خواهد شد. همچنین این فرض، عدم وجود امواج سطحی در سدهای بتنی را بیان می نماید، زیرا امواج سطحی در مدل سازی صرف نظر می گردد.

#### ۳-۴- شرط مرزی انتهای دور مخزن

مرز بریده شده در انتهای مخزن مدل المان محدود مخازن با طول بی نهایت، توسط محققان متعددی بررسی شده است. شرط مرزی زومرفلد یکی از معمول ترین آن ها می باشد که مبتنی بر فرض انتشار امواج صفحه ای سیال در فاصله دور از وجه سد می باشد. این شرط به شکل ریاضیاتی به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{C} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (11)$$

که در آن  $n$  راستای عمود بر مرز بریده شده می باشد. این رابطه، شرط مرزی انتشار معروف زومرفلد را بیان می کند. این شرط، یک میرایی را به سیستم معرفی نموده که اتلاف انرژی امواج بیرون رونده از سیستم را مدل می کند.

#### ۵- نتایج تحلیل موج شوک حاصل از انفجار

در شکل های ۱۰ الی ۱۳ مقادیر حداکثر تغییر مکان نسبی تاج سد در جهت پایین دست و بالادست سد برای محل های انفجار مختلف نشان داده شده است و همچنین نمودار تاریخچه زمانی جابه جایی نسبی تاج سد تحت حالات مختلف بارگذاری ۵۰۰ کیلوگرم TNT و

کیلوگرم TNT و D1 تا D12 برای ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT نام گذاری می شوند.

#### ۴- تعریف شرایط مرزی تحلیل

##### ۴-۱- شرط مرزی سد-مخزن

سطح سد- مخزن جریانی در بین سطح مشترک وجود ندارد. این فرض بر اساس این واقعیت است که سطح بتنی نفوذ ناپذیر می باشد. این فرض منجر به شرطی می شود که در جهت عمود بر مرز مشترک، سرعت نسبی وجود ندارد و یا به زبان ریاضیات :

$$v_n^s = v_n \quad (9)$$

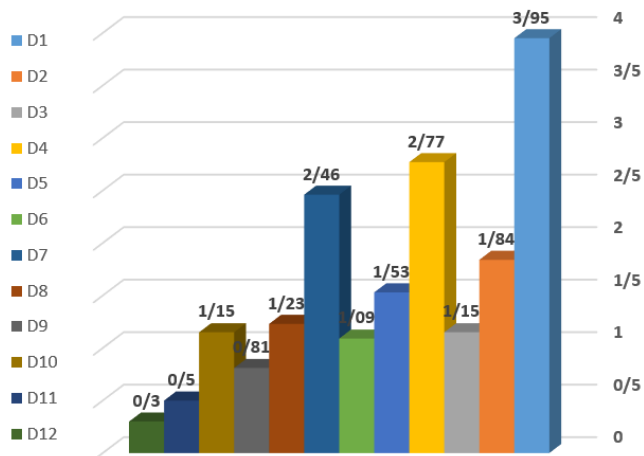
که در آن  $n$  راستای بردار نرمال به سطح مشترک سد- مخزن، و به ترتیب سرعت سازه (سد) و سرعت سیال در راستای  $n$  می باشد. با مشتق گیری دوطرفه رابطه (۹) نسبت به زمان و نیز با استفاده از معادله اویلر رابطه (۱۰) به دست می آید.

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho a_n^s \quad (10)$$

که در آن  $\rho$  چگالی آب و  $a_n^s$  شتاب سازه در راستای عمود بر سطح مشترک ( $n$ ) می باشد.

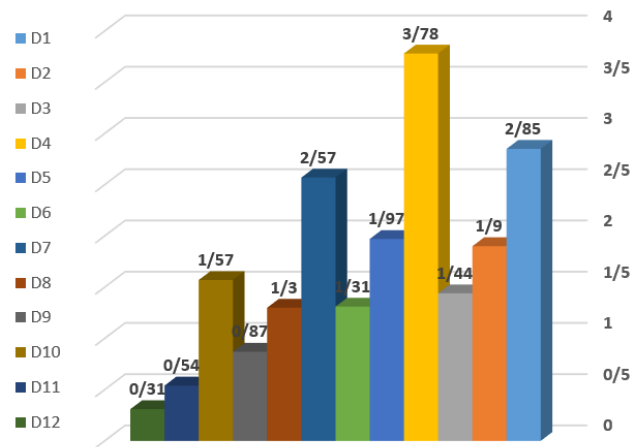
##### ۴-۲- شرط مرزی سطح آزاد

در سطح آزاد مخزن، مقدار فشار برابر صفر می باشد. به عبارتی دیگر برای کلیه گره های واقع بر سطح مخزن سد فشار صفر به عنوان



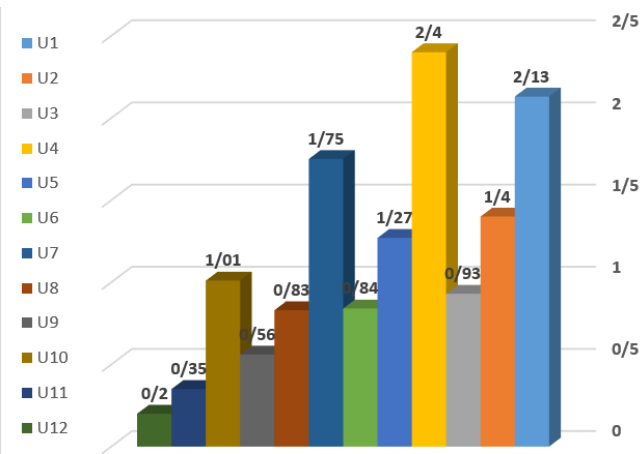
شکل ۱۲. تغییر مکان نسبی تاج سد در جهت بالا دست بر حسب سانتیمتر حالات تحلیلی D1 تا D12

Fig. 12. Relative Crest Displacement in the upstream direction in centimeters Analytical modes D1 to D12



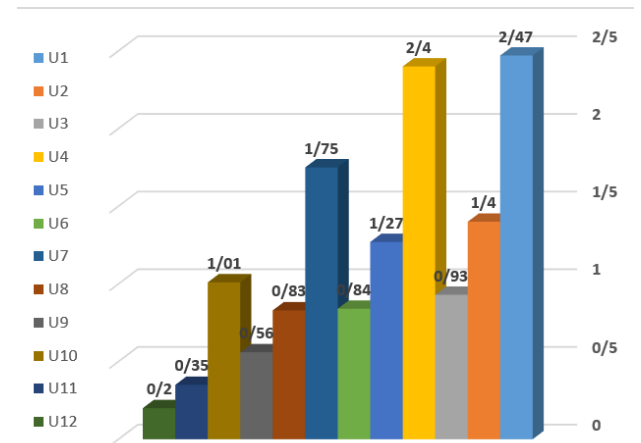
شکل ۱۰. تغییر مکان نسبی تاج سد در جهت پایین دست بر حسب سانتیمتر حالات تحلیلی D1 تا D12

Fig. 10. Relative Crest Displacement in the downstream direction in centimeters Analytical states D1 to D12



شکل ۱۳. تغییر مکان نسبی تاج سد در جهت بالا دست بر حسب سانتیمتر حالات تحلیلی U1 تا U12

Fig. 13. Relative Crest Displacement in the upstream direction in centimeters Analytical modes U1 to U12



شکل ۱۱. تغییر مکان نسبی تاج سد در جهت پایین دست بر حسب سانتیمتر حالات تحلیلی U1 تا U12

Fig. 11. Relative Crest Displacement in the downstream direction in centimeters Analytical states U1 to U12

بیشترین مقدار را نسبت به دیگر ترازهای ارتفاعی نشان می دهد. هر میزان مواد منفجره در ترازهای بالاتری داخل مخزن منفجر شوند، تغییر مکان تاج سد در کلیه حالات کاهش می یابد، به طوری که در ارتفاع ۱۰۲ متری از کف سد و در فاصله افقی ۳۰ متری به کمترین مقدار خود می رسد.

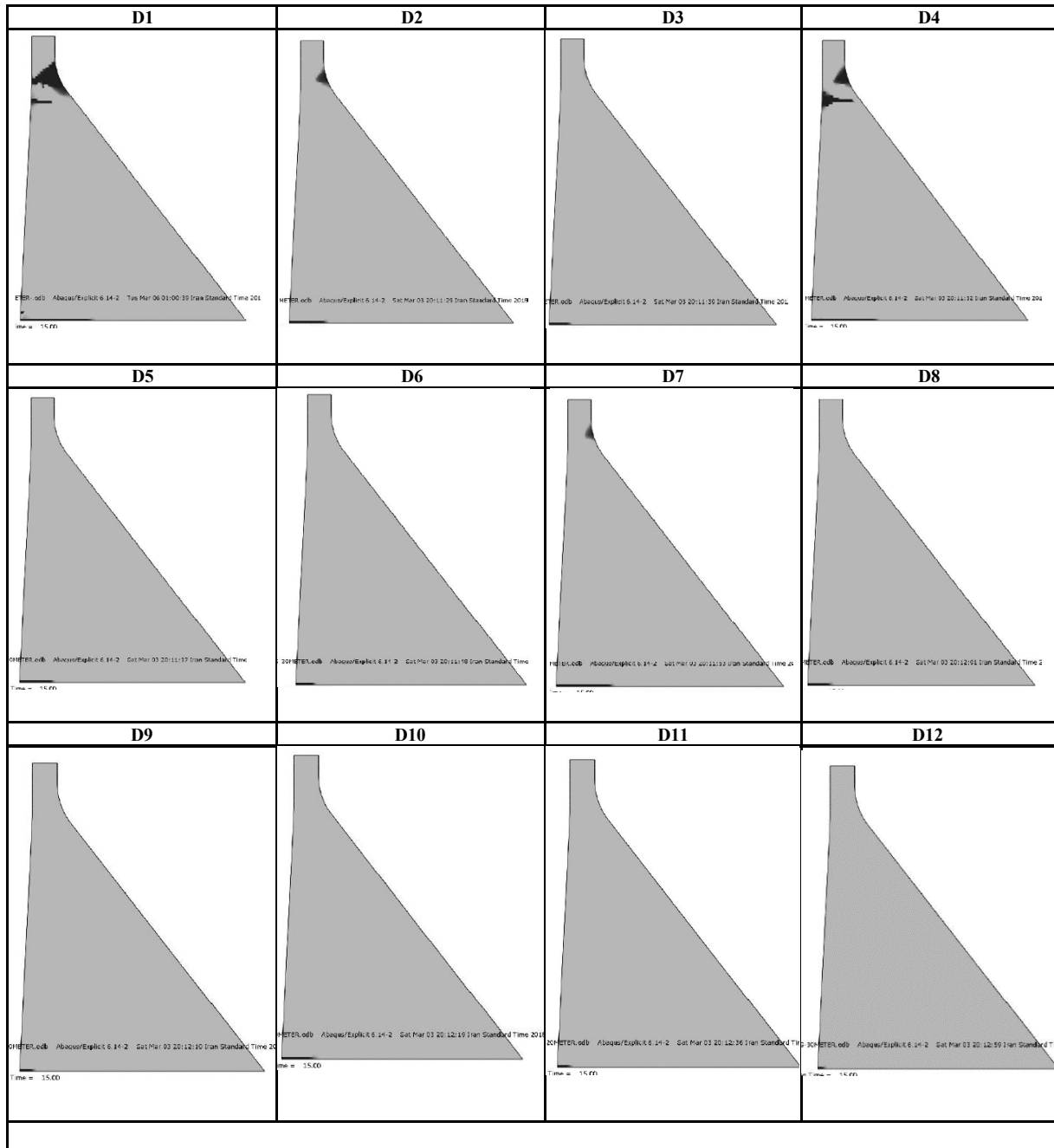
با توجه به شکل های ۱۴ و ۱۵ نتایج ذیل قابل استخراج است :

۱۰۰۰ کیلوگرم TNT به ترتیب در شکل های ۸ و ۹ و پروفیل های

ترک استخراجی در شکل های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.

همان طور که از نتایج به دست آمده برداشت می شود، هر چقدر مواد منفجره در ارتفاع کمتری از کف سد قرار بگیرد، میزان تغییر مکان تاج سد بیشتر می شود. میزان تغییر مکان تاج سد با قرارگیری مواد منفجره در کف مخزن یعنی تراز صفر و همچنین تراز ۲۷

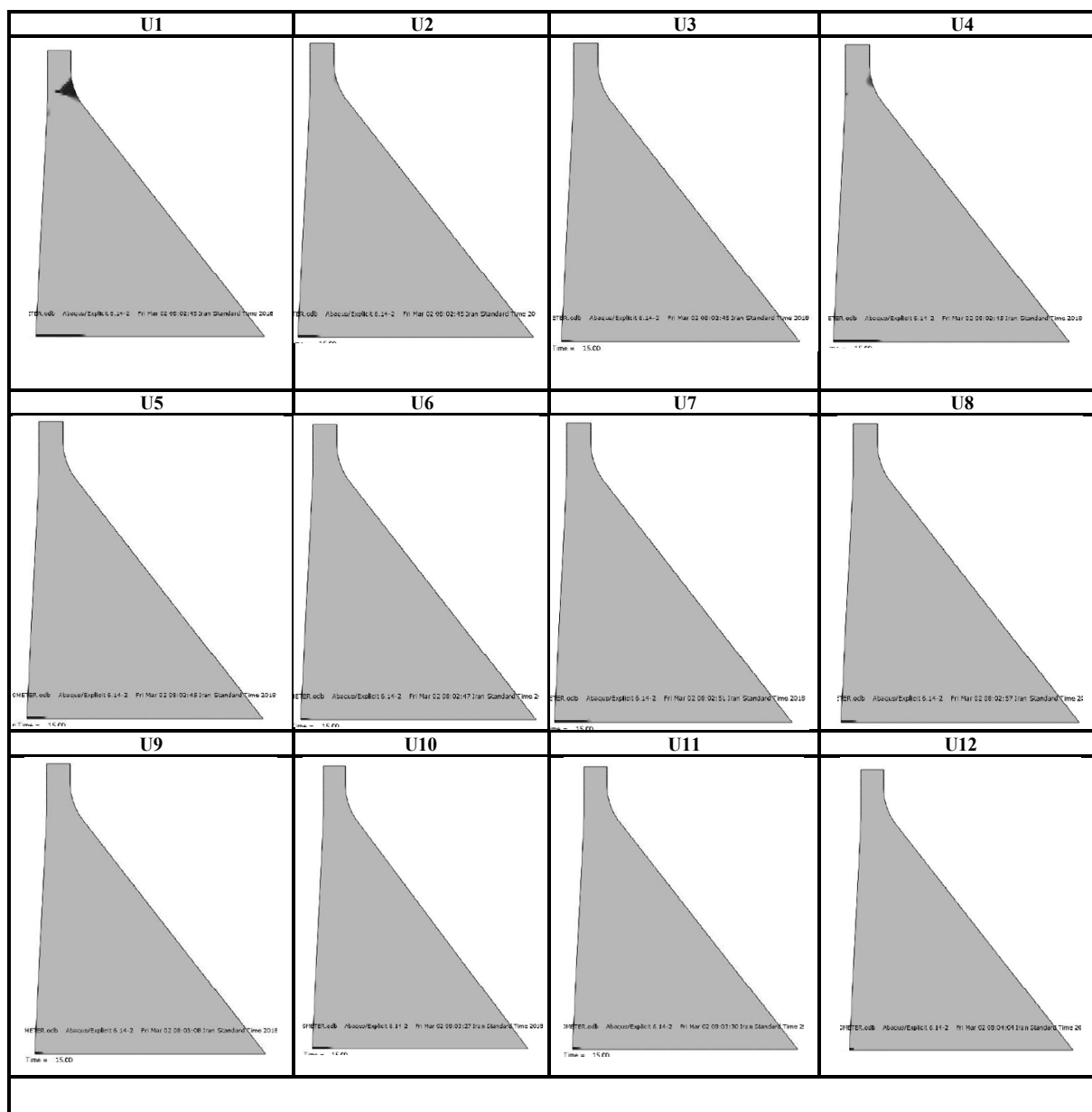




شکل ۱۴. پروفیل ترک سد تحت حالات تحلیلی D1 تا D12  
 Fig. 14. Dam crack profile under analytical states D1 to D12

قرارگیری مواد منفجره در ارتفاع ۱۰۲ متری می باشد (شکل ۱۴ و ۱۵ حالت تحلیلی D12 و U12). هنگامی که مواد منفجره در ارتفاع ۶۹ و ۲۷ متری از کف سد و فواصل افقی ۲۰، ۱۰ و ۳۰ متری می باشد، ترک خوردگی در هر سه حالت مشاهده می شود که میزان آسیب دیدگی در کف سد در فاصله افقی ۱۰ متری (شکل ۱۴ و ۱۵ حالت تحلیلی D4، D7، U4 و U7)

با مقایسه ترک های ایجاد شده دیده می شود که بیشترین آسیب دیدگی سد در زمانی رخ می دهد که مواد منفجره در ارتفاع صفر از کف سد و با فاصله افقی ۱۰ متر قرار دارد (شکل ۱۴ و ۱۵ حالت تحلیلی D1 و U1) که در این حالت سد ترک خوردگی بیشتری را نشان می دهد، به طوری که کل نوار عرضی تاج سد طی می شود و ترک می خورد. کم ترین آسیب دیدگی به سد در محل



شکل ۱۵. پروفیل ترک سد تحت حالات تحلیلی U1 تا U12  
 Fig. 15. Dam crack profile under analytical states U1 to U12

سد در گردن سد ایجاد می شود که در ارتفاع ۲۷ متری علاوه بر ترک قبلی ترک دیگری از سمت پایین دست رویت می شود که خسارت بیشتری در گردن سد به نسبت محل قرارگیری ماده منفجره در ارتفاع ۶۹ متری وارد می کند (شکل ۱۴ و ۱۵ حالت تحلیلی D4 و U4). با این تفاسیر می توان نتیجه گرفت عامل ارتفاع نیز به مانند فاصله ی افقی در میزان آسیب به بدنه سد دارای اهمیت می باشد. آنچه که برداشت می شود موج شوک حاصل از انفجار در ارتفاع های میانی و نزدیک به کف سد تأثیرات مخرب تری به نسبت

از دیگر فواصل افقی بیشتر می باشد.

زمانی که مواد منفجره در ارتفاع ۲۷ متری از کف سد قرار می گیرد به مانند ارتفاع ۶۹ متری همچنان ترک خوردگی در فواصل افقی ۲۰ و ۳۰ متری مشاهده می شود، با این تفاوت که ترک های ایجاد شده در کف سد اندکی بیشتر می باشد (شکل ۱۴ و ۱۵ حالت تحلیلی D5-D6 و U5-U6).

هنگامی که در فاصله افقی ۱۰ متری در این دو ارتفاع ماده منفجره قرار می گیرد، مشاهده گردید که ترکی از سمت بالادست

$P_m$  فشار سیال بیشینه، Pa  
 $\theta$  نمایانگر موج ضربه ای بیشینه،  $\mu_s$   
 $d_t$  متغیرخرابی کششی  
 $E_0$  مدول الاستیسیته سالم، GPa  
 $d_c$  متغیرخرابی فشاری  
 علائم یونانی  
 $\sigma_t$  تنش کششی شکست، MPa  
 $\sigma_c$  تنش فشاری تسلیم، MPa  
 $\epsilon_t^{pl}$  کرنش های پلاستیک معادل کششی  
 $\epsilon_c^{pl}$  کرنش های پلاستیک معادل فشاری

### مراجع

- [1] A.M. Remennikov, A review of methods for predicting bomb blast effects on buildings, Journal of battlefield technology, 6(3) (2003) 5.
- [2] Li, J., et al. (2015). "Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion." Engineering Structures 102: 395-408.
- [3] Lu, Y., et al. (2005). "A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulations." Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25(4): 275-288.
- [4] Pandey, A. K., et al. (2006). "Non-linear response of reinforced concrete containment structure under blast loading." Nuclear Engineering and design 236(9): 993-1002.
- [5] Cole, R. (1948). "Underwater explosions, Princeton Univ." Press, Princeton, NJ.
- [6] Rajendran, R. and K. Narasimhan (2006). "Deformation and fracture behaviour of plate specimens subjected to underwater explosion—a review." International Journal of Impact Engineering 32(12): 1945-1963.
- [7] Zhang, N., et al. (2014). "Dynamic response of a surface ship structure subjected to an underwater explosion bubble." Marine Structures 35: 26-44.

قرارگیری مواد منفجره در ارتفاع های نزدیک به تاج سد دارد. در کلیه حالات با افزایش مقدار ماده منفجره خسارت بیشتری به سد وارد می شود. هنگامی که ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در فاصله افقی ۱۰ متری و ارتفاع ۲۷ قرار می گیرد، مشاهده شد از سمت بالادست جوانه زنی ترک آغاز می شود و در همان حالت باقی می ماند، ولی با افزایش مقدار ماده منفجره به ۱۰۰۰ کیلوگرم و اعمال آن در همان مختصات ذکر شده ترک کاملی نوار عرضی سد را طی می کند که این خود نشان دهنده اهمیت مقدار ماده منفجره در شدت آسیب به بدنه سد می باشد.

### ۵- نتیجه گیری

با اندازه گیری فشار هیدرودینامیک در نزدیکترین نقاط به محل انفجار مشاهده شد که فشار هیدرودینامیکی در محل انفجار در کلیه حالات بیشتر از دیگر نقاط می باشد و در محل انفجار به اوج خود می رسد و با دور شدن از آن مقادیر کاسته می شود و همچنین پس از اتمام وقوع انفجار هنوز اثرات ناشی از آن باقی می ماند و موج های ایجاد شده حاصل از آن تا ثانیه های بعد قادر به ایجاد خرابی در بدنه ی سد می باشند. انفجار از شعاعی کوچک شروع شده و به تدریج بزرگتر می شود. با افزایش مقدار TNT از ۵۰۰ کیلوگرم به ۱۰۰۰ کیلوگرم تغییر مکان تاج سد در کلیه حالات افزایش یافت و همان طور که انتظار می رفت تغییر مکان سد با افزایش فاصله افقی به تدریج افزایش می یافت، ولی زمانی که در ارتفاع ۱۰۲ متری در نزدیکی تاج سد انفجار رخ می دهد، این روند برعکس شده، به طوری که هر چقدر دورتر از بدنه سد انفجار رخ می دهد تغییر مکان کمتری گزارش می شود. همان طور که در شکل ۱۴ و ۱۵ مشاهده می شود پروفیل ترک سد تحت بارهای انفجاری در پاشنه و گردن سد ایجاد می گردد و نواحی مستعد ترک خوردگی پاشنه و گردن سد تشخیص داده می شود.

### ۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

W وزن ماده منفجره TNT، kg

S فاصله افقی هر نقطه از محل انفجار، m

$P_t$  فشار دینامیکی ناشی از موج ضربه، s

- dams under air blast using coupled Euler-Lagrange finite element method, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(1) (2019) 15-37.
- [14] M. Alembagheri, M. Ghaemian, Seismic assessment of concrete gravity dams using capacity estimation and damage indexes, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 42(1) (2013) 123-144.
- [15] J. Lee, G.L. Fenves, A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 27(9) (1998) 937-956.
- [16] M. Cervera, J. Oliver, O. Manzoli, A rate-dependent isotropic damage model for the seismic analysis of concrete dams, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 25(9) (1996) 987-1010.
- [17] Y. Calayir, M. Karaton, Seismic fracture analysis of concrete gravity dams including dam-reservoir interaction, *Computers & structures*, 83(19-20) (2005) 1595-1606.
- [18] S. Mridha, D. Maity, Experimental investigation on nonlinear dynamic response of concrete gravity dam-reservoir system, *Engineering Structures*, 80 (2014) 289-297.
- [8] R. Ghoshal, N. Mitra, Underwater explosion induced shock loading of structures: Influence of water depth, salinity and temperature, *Ocean Engineering*, 126 (2016) 22-28.
- [9] S. Zhang, G. Wang, C. Wang, B. Pang, C. Du, Numerical simulation of failure modes of concrete gravity dams subjected to underwater explosion, *Engineering Failure Analysis*, 36 (2014) 49-64.
- [10] Wang, G. and S. Zhang (2014). "Damage prediction of concrete gravity dams subjected to underwater explosion shock loading." *Engineering Failure Analysis* 39: 72-91.
- [11] G. Wang, S. Zhang, Y. Kong, H. Li, Comparative study of the dynamic response of concrete gravity dams subjected to underwater and air explosions, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(4) (2015) 04014092.
- [12] Q. Li, G. Wang, W. Lu, X. Niu, M. Chen, P. Yan, Failure modes and effect analysis of concrete gravity dams subjected to underwater contact explosion considering the hydrostatic pressure, *Engineering Failure Analysis*, 85 (2018) 62-76.
- [13] F. Kalateh, Dynamic failure analysis of concrete

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Behzadnasab, M. Alembagheri, Evaluation of the Behavior of Concrete Gravity Dams under Shock Waves Resulted from the Explosion in the Reservoir, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(3) (2020) 629-640.

DOI: 10.22060/ceej.2018.14805.5744

