

## مقایسه اثرات زلزله‌های میدان دور و نزدیک بر پاسخ غیر خطی سدهای بتنی وزنی

جواد حاجی حسینی<sup>۱</sup> و جواد مرادلو<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه زنجان

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

### چکیده

بررسی ایمنی سدهای بتنی وزنی به خصوص در شرایط بارگذاری شدید همانند زمین‌لرزه در مقیاس MCL همواره موجب نگرانی عمده بوده و بررسی رفتار غیر خطی این سازه‌ها با احتساب اندرکنش‌های مختلف با آب و پی نیازمند مطالعات بیشتری است. ماهیت و نحوه اعمال نیرو در رکوردهای میدان دور و نزدیک زلزله بر سازه‌ها متفاوت است. در این مقاله، ابتدا معیارهای مختلف تقسیم‌بندی زلزله‌های میدان نزدیک و دور مورد بررسی قرار گرفته و سپس دو رکورد میدان نزدیک و دو رکورد میدان دور برای تحلیل‌ها انتخاب شده‌اند. دو رکورد میدان دور انتخاب شده بر اساس حداکثر شتاب افقی به رکورد میدان نزدیک متناظر مقیاس شده‌اند. سد کوینا به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. در تحلیل‌ها، پی سد در دو حالت پی صلب و پی بدون جرم مدل شده و اندرکنش دینامیکی کامل سد و مخزن لحاظ شده است. رفتار غیر خطی بتن با دیدگاه ترک پخشی مدل شده است. نتایج نشان می‌دهند که در مدل پی صلب جابجایی افقی تاج سد کمتر، اما ترک خوردگی در پاشنه سد بیشتر از مدل پی بدون جرم است. در مورد زلزله بهم، جابجایی افقی تاج سد و ترک خوردگی مقطع سد تحت اثر زلزله میدان نزدیک بیشتر از نتایج تحت رکورد مقیاس شده بوده است. در مورد زلزله منجیل، جابجایی افقی تاج سد و ترک خوردگی مقطع سد تحت اثر زلزله میدان نزدیک کمتر از نتایج تحت رکورد میدان دور مقیاس شده است که این مسئله به دلیل دانسیته انرژی معین و محتوای فرکانسی رکوردهای میدان نزدیک و مقیاس شده می‌باشد. در مقایسه تحلیل‌های غیر خطی با یکدیگر مشخص شد که مدل سد روی پی صلب با حداکثر جابجایی‌های کمتر و زودتر از مدل سد روی پی بدون جرم به خرابی رسیده و همچنین در مدل سد روی پی صلب، آسیب‌دیدگی المان‌ها و رشد ترک در پاشنه بالادست بیشتر و در محل شکستگی شیب پایین‌دست کمتر از مدل سد روی پی بدون جرم بوده است.

**واژگان کلیدی:** سد بتنی وزنی، زمین‌لرزه میدان نزدیک، ترک اندود، تحلیل غیر خطی.

### ۱- مقدمه

ذکر شده چند مورد آزمایش‌های میز لرزه بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی با مقیاس کوچک نیز انجام شده است. Peka و همکاران [۱] مدل آزمایشگاهی با مقیاس ۱:۲۰۰ سد کوینا را مورد آزمایش دینامیکی قرار دادند. در این مدل آن‌ها در محل تغییر شیب پایین دست یک شکاف به طول ۱ میلی‌متر ایجاد نمودند. وی سپس با استفاده از روش المان مرزی و تئوری مکانیک شکست خطی همان مدل را تحلیل کردند. نتایج نشان دادند که مسیر ترک به دست آمده از تحلیل عددی مطابقت کامل با نگاشت ترک به دست آمده از آزمایش دارد. Ghaemian و Ghobarah [۲] با استفاده از مدل ترک اندود و ضابطه مکانیک شکست غیر خطی، سد سفیدرود و پایین فلت را با احتساب اندرکنش سد و مخزن به روش نوسانی تحلیل کردند و نتایج را با روش جرم افزوده مقایسه نمودند. آن‌ها از نتایج به دست آمده نتیجه گرفتند که مدل مناسب اندرکنش سد و مخزن در تحلیل غیر خطی سد بتنی وزنی نقش عمده و مهمی دارد. Karaton و Calayir [۳] مدل سد و مخزن با پی صلب برای

با توجه به این که سدها معمولاً در مناطق کوهستانی احداث می‌شوند، لذا وجود گسل در فواصل دور و نزدیک محور سد اجتناب‌ناپذیر است. بررسی پتانسیل لرزه‌خیزی هر گسل در فاصله دور و یا نزدیک و تأثیر زمین‌لرزه ناشی از آن بر پایداری سد، یکی از معیارهای اصلی مکان‌یابی محور سد می‌باشد. لذا بررسی دقیق تأثیر زمین‌لرزه‌های میدان‌های دور و نزدیک بر پایداری سدها از اهمیت ویژه‌ای در طراحی سد و ارزیابی پایداری سدهای موجود، برخوردار می‌باشد. عمده تحلیل‌های سدهای بتنی وزنی بر اساس روش‌های عددی شامل کاربرد مکانیک شکست در تحلیل‌های دینامیکی در شرایط مختلف سد بررسی لغزش و احتمالات آن در وقوع زمین‌لرزه، برآورد و تحلیل لرزه‌های سدها با مدل‌های مختلف بتن از جمله مدل خرابی پیوسته، اثر پدیده کاویتاسیون، اثرات اندرکنش سد و مخزن و مدل‌سازی درزهای ساختمانی در بدنه سد بوده است. علاوه بر تحلیل‌های

رفتاری جدید برای بتن غیر مسلح ارائه کردند که عمدتاً برای تحلیل سدهای وزنی و قوسی کاربرد دارد. دو متغیر آسیب فشاری و کششی در این مدل لحاظ شده است. Lee و Fenves [۱۴] یک مدل آسیب پلاستیک برای بارگذاری دوره‌ای بتن برای تحلیل سدهای بتنی ارائه کردند. مدل مستقل از نرخ بارگذاری بوده و شامل تأثیرات نرم شونده‌گی کرنش توسط متغیرهای آسیب مجزا برای کشش و فشار می‌باشد. Mirzabozorg [۱۵] از یک مدل آسیب پیوسته برای تحلیل سه بعدی دینامیکی سدهای بتنی استفاده کرد. نشان داده شد که پروفیل‌های ترک حاصل از مدل آسیب پیوسته موضعی تر از پروفیل‌های ترک حاصل از مدل ترک پخشی بوده و همچنین این مدل‌ها دارای عملکرد نرم‌تری می‌باشند.

رحیم‌زاده [۱۶] پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی تحت اثر زلزله‌های میدان دور و نزدیک را بررسی نمود. مهم‌ترین خصوصیات زلزله‌های نزدیک گسل را وجود حرکات پالس گونه با پیرو بلند، تفاوت در مؤلفه‌های تاریخچه زمانی، بین مؤلفه‌های عمود بر جهت گسل نسبت به مؤلفه موازی گسل و اعمال نیروی ضربه گونه به سازه‌های موجود در مسیر پیشرو گسل در نزدیکی آن می‌دانند. Maniatakis و همکاران [۱۷] معیارهای تعیین رکوردهای زلزله میدان نزدیک از بین رکوردهای ثبت شده یونان در فاصله سال ۱۹۷۵ الی ۱۹۹۹ به کار برده‌اند. قائم‌مقامیان و خلیلی [۱۸] شبیه‌سازی حرکات توانمند زمین در حوزه نزدیک گسل را به وسیله مدل کامپیوتری معرفی نمودند. به منظور مطالعه پارامتری عوامل گسلش بر پالس حوزه نزدیک گسل، مدلی از گسل و ساختمانی در فاصله ۵ کیلومتری از گسل مفروض برای شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین در نظر گرفته شد.

در این تحقیق ابتدا معیارهای مختلف تقسیم‌بندی زلزله های میدان نزدیک و دور مورد بررسی قرار گرفته و بعد از صحت سنجی مدل، تحت بارگذاری با دو رکورد میدان نزدیک و دو رکورد میدان دور، تحلیل شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. دو رکورد میدان نزدیک متناظر مقیاس شده‌اند. سد کوینا به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. در تحلیل‌ها پی سد در دو حالت پی صلب و پی بدون جرم مدل شده و اندرکنش دینامیکی کامل سد و مخزن لحاظ شده است. رفتار غیر خطی بتن با دیدگاه ترک پخشی مدل شده است. ویژگی‌های زمین لرزه‌های میدان دور و نزدیک بررسی و معیارهای حداکثر شتاب افقی زمین، سرعت مطلق تجمعی، شدت آریاس و پارامتر پتانسیل

سد کوینا را با در نظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن به روش لاگرانژی و مدل خرابی پیوسته برای بتن را تحت زمین‌لرزه کوینا تحلیل نمود. وی برای حل معادله دینامیک حرکت از روش اصلاح شده HHT-a استفاده کرد و نتایج قابل قبول برای رشد ترک در بدنه سد به دست آورد. Sarkar و همکاران [۴] مدل سد کوینا به همراه مخزن و فونداسیون را بر اساس رفتار غیر خطی بتن در کشش و احتساب اندرکنش سد و مخزن و پی تحت زلزله کوینا تحلیل کرده و تأثیر ارتفاع مخزن و مدول الاستیسیته پی بر پاسخ سد را به صورت پارامتری بررسی نمود و نتیجه گرفت که کاهش مدول الاستیسیته پی باعث افزایش پاسخ جابجایی می‌شود و همچنین اگر ارتفاع مخزن کمتر از ۷۰ درصد حالت پر باشد، تأثیر مخزن بر پاسخ سد ناچیز است. Mao و Taylor [۵] ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف در تحلیل غیر خطی سدهای وزنی و مطالعه رفتار غیر خطی سدهای وزنی با ارتفاع متوسط را انجام دادند. مشاهده شد که برای سدهای با ارتفاع متوسط، ترک خوردگی در پایه سد و در ناپیوستگی شیب رخ می‌دهد.

Gunglun و همکاران [۶] یک الگوی عددی بر اساس تئوری ترک نواری غیر خطی بازانت برای مطالعه رفتار شکست سدهای وزنی بتنی ارائه کردند. در این تحقیق اصلاح شبکه المان محدود صورت گرفته است. Espandar و Lotfi [۷] مدل سه بعدی تحلیل غیر خطی سدهای قوسی را ارائه کردند. مدل ترک پخشی، برای مدل‌سازی رفتار غیر خطی بتن در نظر گرفته شده است. Zhang و Ohmachi [۸] ترک خوردگی سدهای وزنی را مطالعه کردند. در این مطالعه از مدل ترک پخشی استفاده شده است. مخزن با ایده جرم افزوده وسترگارد مدل شده است. Mirzabozorg [۹] از روش ترک چرخشی سه بعدی برای تحلیل سد ماروپوینت استفاده کرد. Ghrib و Tinawi [۱۰] و Ghrib و Tinawi [۱۱] شکست لرزه‌ای سدهای وزنی را با استفاده از ایده مکانیسم آسیب پیوسته ارائه کردند. در مدل تنها یک متغیر آسیب کششی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که پروفیل ترک حاصله با نتایج آزمایشگاهی و نتایج مطالعات دیگران سازگار است. Olivier و Cevara [۱۲] یک متدولوژی عمومی برای تحلیل سدهای بتنی بزرگ تحت تحریک لرزه‌ای ارائه کردند رفتار مکانیکی بتن با استفاده از یک مدل آسیب ایزوتروپیک که برای هر دو آسیب کششی و فشاری کاربردی است، مدل می‌شود. مدل شامل دو متغیر اسکالر داخلی برای بیان آسیب موضعی تحت کشش و فشار می‌باشد. Faria و همکاران [۱۳] در چارچوب مکانیک آسیب پیوسته یک مدل

$$\rho \bar{a}_{ns} = -\frac{\partial P}{\partial n} \quad (5)$$

در روابط فوق  $\beta, C_b, n, \rho, \rho_b, \ddot{v}_g, h$  به ترتیب عمق مخزن، مؤلفه قائم شتاب زمین، جرم واحد حجم مصالح بستر، جرم واحد حجم آب، بردار نرمال بر سطح، سرعت صوت در سنگ پی و نسبت امپدانس صوتی مخزن به امپدانس صوتی سنگ پی می‌باشد.

برای حل معادلات اندرکنشی آب و سازه از روش حل نوسانی و المان ۸ گرهی اوپلری استفاده گردید.

### ۳- مدل‌سازی رفتار غیر خطی بتن حجیم

برای مصالح تردی مانند بتن، دیدگاه مکانیک شکست معرف بهتری برای رفتار واقعی بتن به شمار می‌رود. تئوری کلاسیک پلاستیسیته برای مصالحی کاربردی است که از خود رفتار تسلیم شونده و همراه طاقت یعنی رفتاری مشابه یک خط افقی در دیاگرام تنش- کرنش نشان دهند که این ویژگی برای بتن صادق نیست [۱۹].

دو روش عمده مدل‌سازی ترک با استفاده از المان‌های محدود شامل:

(۱) روش ترک منفرد و

(۲) روش ترک پخشی می‌باشد.

در مدل ترک پخشی، ناحیه شکست خورده به صورت نواری از ترک‌های پخش شده تقریب زده می‌شود. در این روش، تشکیل ترک به وسیله جایگزینی رفتار ایزوتروپیک حاکم بر رفتار مصالح با رابطه اورتوتروپیک بعد از جوانه‌زنی ترک مدل می‌شود. رابطه اورتوتروپیک که برای این منظور ارائه شده است به صورت زیر می‌باشد [۱۹].

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_{nn} \\ \Delta\sigma_{tt} \\ \Delta\sigma_{nt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta E \\ \Delta E \end{bmatrix} \quad (6)$$

در این رابطه،  $n$  و  $t$  به ترتیب محورهای عمود و مماس بر جهت ترک می‌باشند.  $\beta$  ضریبی بین صفر و یک است که اثرات قفل بین دانه‌ای در سطح ترک را منظور می‌کند. این ضریب بیانگر این واقعیت است که قبل از باز شدن ترک به صورت کامل، سطح ترک قدرت انتقال نیروی برشی را خواهد داشت. در این تحقیق از المان Solid65 که قابلیت اعمال خواص المان ترک خورده را دارد، استفاده شده است.

خرابی و ریشه میانگین مربع شتاب  $arms$  به عنوان معیارهایی برای تفکیک زمین لرزه‌های میدان دور و نزدیک انتخاب شدند. همین‌طور ویژگی نزدیک بودن رکورد زلزله بر اساس مشخصه‌های موجود شامل ضربه اولیه و محتوای فرکانس و دانسیته انرژی مخصوص (SE) بررسی و اثرات آن‌ها بر رفتار لرزه‌ای غیر خطی سد وزنی سنجیده شده است.

### ۲- مدل‌سازی اندرکنش آب و سازه

معادله حاکم بر توزیع فشار هیدرودینامیکی در محیط سیال برای مسأله اندرکنش سد و مخزن، معادله موج (معادله هلمهولتز) می‌باشد:

$$\nabla^2 P = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (1)$$

این رابطه با ساده‌سازی معادله ناویه-استوکس با فرض جایجایی‌های کوچک و غیر لزج بودن سیال، استفاده از قوانین هوک و صرف نظر از تغییرات زمانی و مکانی دانسیته آب حاصل شده است. در این رابطه:  $\rho$  دانسیته سیال،  $P$  فشار سیال و  $C$  سرعت صوت در سیال می‌باشد. شرایط مرزی حل معادله فوق برای مسأله اندرکنش سد و مخزن عبارتند از:

شرط مرزی برای سطح آزاد:

$$[P]_y = \eta = 0 \quad (2)$$

شرط مرزی سامرفلد برای مرز دور:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{1}{C} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (3)$$

شرط مرزی جذب پاره‌ای امواج در بستر و تکیه گاه‌ها:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho \ddot{v}_{gn} - \frac{1}{\beta C} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\rho_b C_b}{\rho C}$$

و شرط مرزی اندرکنش:

اثرات متفاوتی بر سازه‌ها و ساختگاه آن‌ها دارند. رکورد شتابنگاشت ورودی به سازه در زلزله‌های میدان نزدیک با توجه به فاصله ساختگاه از مرکز زلزله همچنین جهت قرارگیری و گسترش گسل مولد زلزله نسبت ساختگاه متغیر است. لذا تنها فاصله ساختگاه از مرکز زلزله نمی‌تواند مبین طبقه‌بندی زلزله نوع میدان نزدیک باشد و برای مشخص نمودن نوع رکورد زلزله معیارهای دیگری لازم است [۲۲].

Maniatakis و همکاران [۱۷] معیارهای ذیل را برای تعیین رکوردهای زلزله میدان نزدیک از بین رکوردهای ثبت شده یونان در فاصله سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۹۹ به کار برده‌اند.

- (۱) حداکثر شتاب افقی زمین (PGA) یا (PHGA)
- (۲) سرعت مطلق تجمعی (CAV) که به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$CAV = \int_0^{t_r} |a_g(t)| dt \quad (۸)$$

که  $t_r$  مدت زمان کل شتابنگاشت می‌باشد.

(۳) شدت Arias که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_r} |a_g(t)|^2 dt \quad (۹)$$

که  $a_g(t)$  شتاب زمین است.

(۴) پارامتر پتانسیل خرابی که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_p = PGA \cdot t_D \quad (۱۰)$$

که  $t_D$  مدت زمان حرکت قوی زمین است.

(۵) ریشه میانگین مربع شتاب  $a_{rms}$  که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{t}{t_D} \int_{t_D} a_g^2(t) dt} \quad (۱۱)$$

این شاخص تأثیر شدت و محتوای فرکانسی رکوردهای قوی زمین را محاسبه می‌کند و به طور مستقیم با مربع ریشه گرادیان شاخص شدت Arias متناسب است. جدول (۱) مقادیر حداقل پارامترهای مذکور را به عنوان معیاری برای تعیین رکوردهایی

مدل بتن نرم‌افزار Ansys از نوع مدل ترک ثابت FCM می‌باشد. انرژی شکست در این مدل حفظ نشده و نیازمند رعایت بیشینه اندازه المان‌ها می‌باشد.

برای مدل‌سازی ترک لازم است پارامترهایی بدین شرح در نرم‌افزار برای خواص بتن تعریف گردند [۲۰]:

(۱) ضریب انتقال برش ترک باز  $\beta t$ ,

(۲) ضریب انتقال برش ترک بسته  $\beta c$ ,

(۳) مقاومت کششی تک محوری  $f_r$ ,

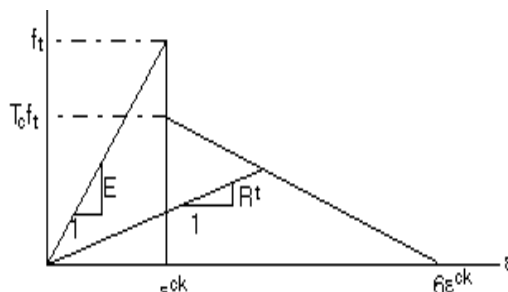
(۴) مقاومت فشاری تک محوری  $f_t$ ,

(۵) مقاومت دو محوری  $f_{cb}$

حضور ترک در یک نقطه انگرال‌گیری توسط ماتریس تنش- کرنش  $[D_c^{ck}]$  در یک سطح ضعیف (ترک) در جهت نرمال ترک تعریف می‌گردد. ماتریس فوق برای المان ترک خورده در یک جهت طبق رابطه (۷) است [۲۰].

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)} \begin{bmatrix} \frac{R^t(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{1}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta t}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta t}{2} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

که  $\nu$  ضریب پواسون،  $E$  مدول الاستیسیته بتن،  $\beta$  فاکتور ضریب انتقال برش ترک باز،  $R^t$  ضریب سکانت می‌باشد که طبق شکل (۱) تعریف می‌گردد.  $T_c$  ضریب آزاد شدگی تنش کششی و مقدار پیش فرض آن  $0/6$  است.



شکل ۱- نمودار مقاومت المان ترک خورده

#### ۴- انتخاب رکوردهای میدان نزدیک و میدان دور

زلزله‌های میدان نزدیک در مقایسه با زلزله‌های میدان دور از لحاظ شکل رکورد و محتوای فرکانسی متفاوت می‌باشند. لذا

که مشابه شدت لرزش بیشتر از VIII (هشت) درجه مرکالی است، ارائه می‌نماید. رکوردهای انتخاب شده ایستگاه بم و ابرقو مربوط به زلزله بم بر اساس معیارهای معرفی شده در جدول (۱) بررسی شده و نتایج در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

جدول ۱- مقادیر حداقل و اندازه‌گیری شده پارامترهای حرکات زمین

حد پایینی	خصوصیات جنبش زمین				پارامترهای جنبش زمین
	دامنه	محتوای فرکانسی	تداوم	انرژی	
۰/۲ (g)	✓				PGA
۰/۳ (g sec)	✓			✓	CAV
۲۰ (cm/sec)	✓			✓	PGV
۰/۴ (m/s)	✓		✓	✓	I <sub>A</sub>
۳۰ (cm sec <sup>-0.75</sup> )	✓		✓		I
۰/۵ m/s	✓	✓	✓		a <sub>rms</sub>

جدول ۲- بررسی معیارهای رکوردهای میدان نزدیک و دور انتخاب شده

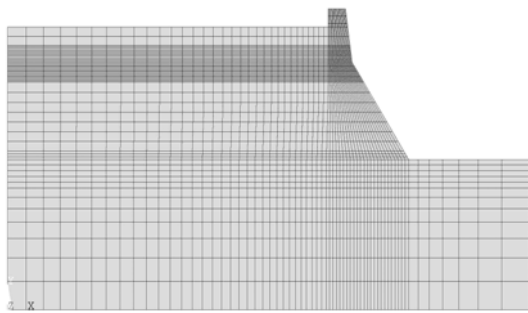
ردیف	نام رکورد	نوع رکورد	پرید غالب رکورد	فرکانس غالب رکورد	فاصله ایستگاه (km)	معیارهای تقسیم‌بندی رکوردهای میدان دور و نزدیک طبق جدول (۱)					
						PGA (g)	CAV (g sec)	PGV (cm/sec)	IA (m/sec)	I (cm sec <sup>0.75</sup> )	a <sub>rms</sub> (m/sec <sup>2</sup> )
۱	Bam-Bam	میدان نزدیک	۰/۲	۵	۱۰	۰/۸۰	۰/۲۱	۱۱۹/۵۵	۰/۰۸	۱۹۹/۵۶	۰/۲۴
۲	Bam-Abaraq	میدان دور	۰/۰۶	۱۶/۷	۵۳	۰/۱۷۱	۰/۰۵	۴/۹۸	۰/۰۰	۹/۸۹	۰/۰۳
۳	Manjil-Abbar	میدان نزدیک	۰/۱۶	۶/۲۵	۳۹	۰/۶۴	۰/۱۴	۶۷/۵۳	۰/۰۴	۱۱۶/۰۸	۱/۶۵
۴	Manjil-zanjan	میدان دور	۰/۲۶	۳/۸۵	۸۸	۰/۱۳	۰/۰۲	۲۴/۰۲	۰/۰۰	۳۶/۴۳	۰/۰۴

### ۵- نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی سد کوینا

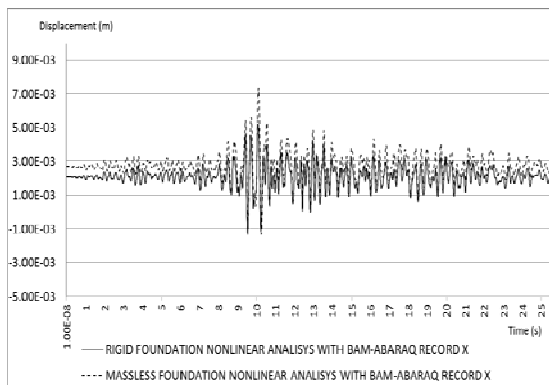
سد بتنی وزنی کوینا با طول ۸۵۰ متر واقع در هندوستان در سال ۱۹۶۷ تحت زلزله کوینا با شدت ۶/۵ ریشتر قرار گرفت که صدمات زیادی در بلندترین بلوک آن با ارتفاع ۱۰۳ متر ایجاد شد. برای مدل‌سازی پی سد از المان ۸ گرهی خطی، بدنه سد از المان ۹ گرهی غیر خطی و مدل‌سازی مخزن از المان اکوستیک ۸ گرهی استفاده شده است. برای مصالح بتن مدول الاستیسیته استاتیکی برابر ۳۱۰۲۷ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۲، نسبت میرایی ۵ درصد، جرم واحد حجم ۲۶۴۳ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری استاتیکی ۲۲/۵ مگاپاسکال، مقاومت کششی استاتیکی ۲/۲۵ مگاپاسکال، ضریب انتقال برش ترک باز ۰/۳ و ضریب انتقال برش ترک بسته برابر ۰/۴ در نظر گرفته شده است. ضرایب میرایی رایلی بر اساس مودهای ارتعاشی اول و سوم و ضریب میرایی ۵٪ در نظر گرفته شده است. برای اعمال اثر بارگذاری دینامیکی بر مقاومت کششی بتن از ضریب ۱/۵ و برای

مدول الاستیسیته از ضریب ۱/۲۵ استفاده شده است. برای آب مخزن نیز جرم حجمی ۱۰۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و سرعت صوت ۱۴۴۰ متر در ثانیه لحاظ شده است. برای حل معادلات دینامیکی از الگوی انتگرال‌گیری نیومارک با گام زمانی ۰/۰۰۵ استفاده شده است. به منظور صحت سنجی مدل‌سازی، مدل سد و مخزن روی پی صلب تحت اثر مؤلفه قائم و افقی زلزله کوینا تحلیل شده و نتایج به دست آمده با نتایج مرجع [۳] مقایسه شده‌اند (شکل-های (۲) و (۳)). ملاحظه می‌شود مقادیر حداکثر و تاریخچه پاسخ افقی تاج سد مطابقت نزدیکی با نتایج مرجع دارند. همین‌طور تحلیل‌های مودال حاضر نیز انجام گرفته و با نتایج مدل مرجع [۲۱] مقایسه گردیدند. در جدول (۳) نتایج تحلیل مودال مرجع فوق و تحلیل حاضر ارائه شده‌اند. در جدول (۴) نتایج تحلیل مقادیر ویژه برای دیگر حالات تحلیلی مد نظر در این تحقیق ارائه شده‌اند.

در ادامه ابتدا نتایج تحلیل مدل پی صلب و پی بدون جرم تحت اثر رکوردهای ایستگاه بم و سپس نتایج تحلیل مدل‌ها تحت اثر رکوردهای زلزله منجیل ارائه خواهند شد. حداکثر جابجایی افقی تاج سد کوینا تحت اثر رکورد میدان دور بم- ابرقو در مدل پی انعطاف‌پذیر برابر ۰/۷۳ سانتیمتر و برای مدل پی صلب برابر ۰/۵۳ سانتیمتر بوده است. در نتیجه جابجایی مذکور در مدل پی بدون جرم ۰/۲ سانتیمتر بیشتر از مدل پی صلب می‌باشد. تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد در شکل (۵) ارائه شده است. تحت اثر رکورد میدان دور، ترک خوردگی در المان‌های سد رخ نداده است.

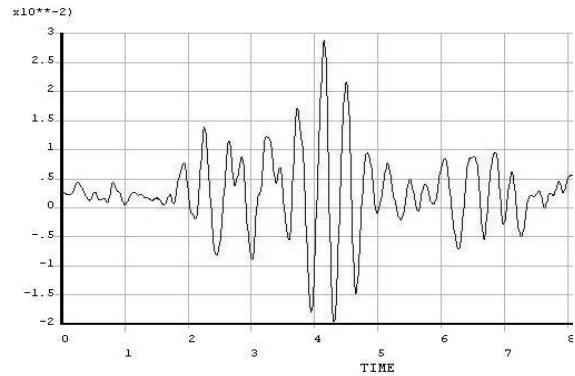


شکل ۴- مدل اجزای محدود مدل سد، مخزن و پی

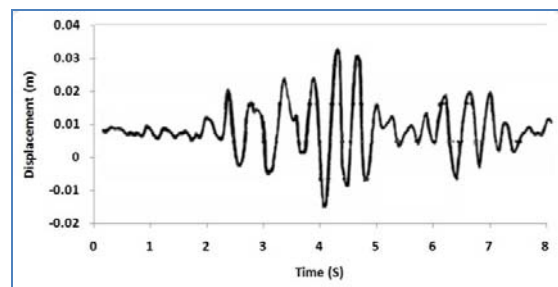


شکل ۵- تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت اثر زلزله میدان دور بم- ابرقو در مدل پی صلب و پی بدون جرم

تحت اثر زلزله میدان نزدیک بم- بم، حداکثر جابجایی افقی تاج سد در مدل پی صلب برابر ۵/۹۷ سانتیمتر بوده است. در مدل پی بدون جرم نیز حداکثر جابجایی افقی تاج سد برابر ۶/۶۴ سانتیمتر بوده است. در نتیجه در مدل پی صلب جابجایی حداکثر تاج سد کمتر از مدل پی بدون جرم است. تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد در شکل (۶) ارائه شده است.



شکل ۲- تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت اثر رکورد کوینا بر اساس تحلیل حاضر



شکل ۳- تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت اثر رکورد کوینا بر اساس تحلیل [۳]

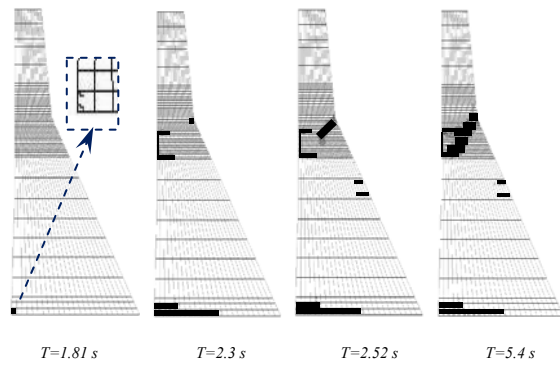
جدول ۳- مقایسه ویژه سیستم سد-پی مخزن

ردیف	نوع مدل	فرکانس مود اول	فرکانس مود دوم
۱	پی صلب بدون مخزن	۳/۰۸۱۰	۸/۲۱۲۹
۲	پی صلب با مخزن	۲/۸۴۵۲	۴/۰۰۲۱
۳	پی بدون جرم با مخزن	۲/۶۱۵۰	۳/۸۰۶۸

جدول ۴- مقایسه فرکانس‌های حاصل با نتایج مرجع [۲۱]

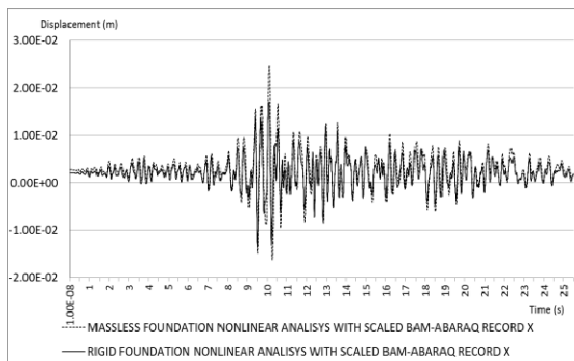
ردیف	نوع تحلیل	شماره مود			
		اول	دوم	سوم	چهارم
۱	تحلیل حاضر	۳/۰۸۱	۸/۲۱۳	۱۰/۸۴	۱۶/۰۱
۲	مرجع [۲۱]	۳/۰۸	۸/۲۳	۱۰/۸۲	۱۵/۹۸

در شکل سیستم سد و مخزن با پی صلب و پی انعطاف‌پذیر بدون جرم، تحت مؤلفه‌های افقی و قائم شتاب‌نگاشت‌های زمین لرزه بم در ایستگاه بم و ابرقو و رکورد مقیاس شده ابرقو که بر اساس حداکثر شتاب افقی به رکورد ایستگاه بم مقیاس شده و نیز شتاب‌نگاشت‌های زمین لرزه منجیل در ایستگاه آبر و زنجان و رکورد مقیاس شده زنجان که بر اساس حداکثر شتاب افقی به رکورد ایستگاه آبر مقیاس شده، تحلیل شده‌اند.

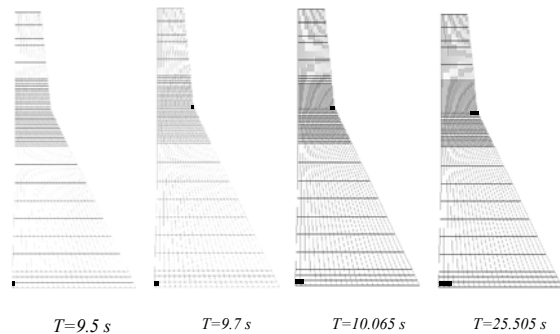


شکل ۸- مراحل رشد ترک در تحلیل مدل سد و مخزن روی پی بدون جرم (زلزله میدان نزدیک بم- بم)

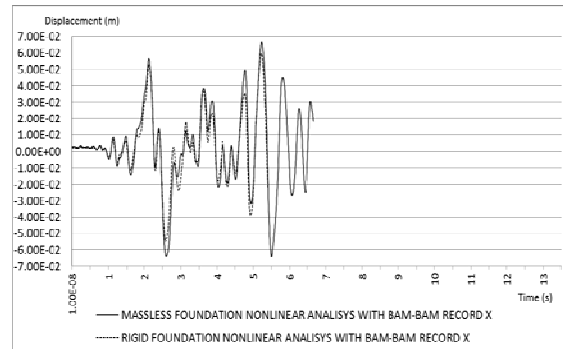
در نتیجه در مدل پی صلب جابجایی حداکثر تاج سد کمتر از مدل پی بدون جرم است. تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد در شکل (۹) ارائه شده است. در شکل (۱۰) مراحل رشد ترک و ترک خوردگی نهایی مدل پی صلب نشان داده شده است و ملاحظه می‌گردد آسیب‌دیدگی المان‌ها و رشد ترک در پاشنه سد در طول ۸/۸۵ متر (۳ المان) بوده است.



شکل ۹- تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت اثر زلزله مقیاس شده بم- ابرقو در مدل پی صلب و پی بدون جرم

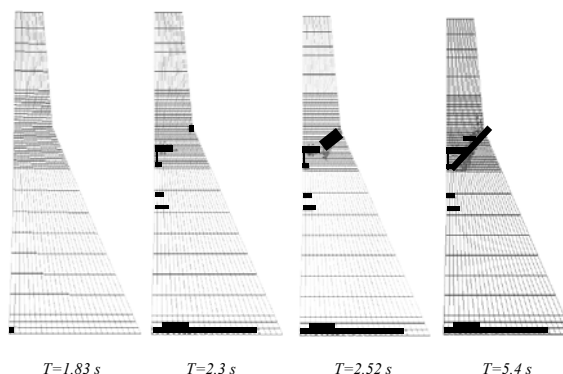


شکل ۱۰- مراحل رشد ترک در تحلیل مدل سد و مخزن روی پی صلب، تحت اثر رکورد زلزله مقیاس شده بم- ابرقو

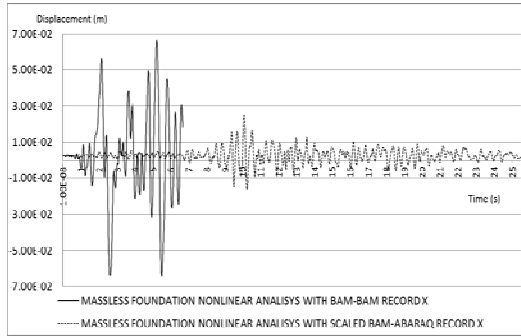


شکل ۶- تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت اثر زلزله میدان نزدیک بم- بم در مدل پی صلب و پی بدون جرم

در شکل (۷)، مراحل رشد ترک و ترک خوردگی نهایی مدل پی صلب نشان داده شده است و ملاحظه می‌گردد آسیب‌دیدگی المان‌ها و رشد ترک در پاشنه سد در طول ۵۸/۵۰ متر (۲۰ المان) بوده است. در شکل (۸) نیز مراحل رشد ترک برای مدل پی بدون جرم نشان داده شده است و ملاحظه می‌گردد آسیب‌دیدگی المان‌ها و رشد ترک ۳۸ متر (۱۳ المان) بوده است که ۲۰/۵ متر کمتر از آسیب‌دیدگی المان‌ها در مدل پی صلب می‌باشد. همچنین با مقایسه شکل‌های (۷) و (۸) ملاحظه می‌گردد در تراز شکستگی شیب پایین‌دست، عرض محدوده ترک خورده مدل پی بدون جرم بیش از مدل پی صلب می‌باشد. تحت اثر زلزله مقیاس شده بم- ابرقو، حداکثر جابجایی افقی تاج سد در مدل پی صلب برابر ۱/۷۱ سانتیمتر بوده است. در مدل پی بدون جرم نیز حداکثر جابجایی افقی تاج سد برابر ۲/۴۷ سانتیمتر به دست آمده است.



شکل ۷- مراحل رشد ترک در تحلیل مدل سد و مخزن روی پی صلب (زلزله میدان نزدیک بم- بم)



شکل ۱۳- تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت زلزله میدان نزدیک بم و زلزله مقیاس شده میدان دور بم- ابرقو برای مدل پی بدون جرم

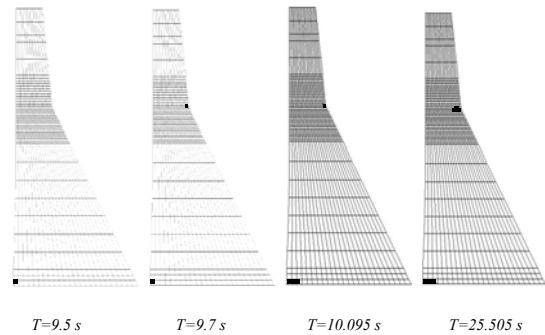
حداکثر جابجایی افقی تاج سد تحت اثر زلزله میدان نزدیک در مدل پی صلب برابر ۵/۹۷ سانتیمتر و تحت اثر زلزله مقیاس شده برابر ۱/۷۱ سانتیمتر و در مدل پی بدون جرم برابر ۶/۶۴ سانتیمتر و تحت اثر زلزله مقیاس شده برابر ۲/۴۷ سانتیمتر بوده است. حداکثر جابجایی افقی تاج سد در هر دو مدل پی صلب و بدون جرم، تحت اثر زلزله میدان نزدیک بیشتر از رکورد مقیاس شده است.

با توجه به شکل‌های (۷) تا (۱۱) نیز ملاحظه می‌گردد ترک خوردگی و آسیب‌دیدگی المان‌ها در مدل‌ها تحت اثر زلزله میدان نزدیک بیشتر از رکورد مقیاس شده بوده و تحت اثر رکورد میدان نزدیک، سد ناپایدار شده است. ولی تحت اثر رکورد مقیاس شده المان‌ها ترک خورده ولی سد دچار ناپایداری نشده و تحلیل تا انتهای رکورد ادامه یافته است.

با توجه نتایج حاصله در مورد جابجایی حداکثر افقی تاج سد و نحوه ترک خوردگی و آسیب المان‌های سد تحت اثر زلزله میدان نزدیک بم- بم و زلزله مقیاس شده بم- ابرقو ملاحظه می‌شود علی‌رغم این که حداکثر شتاب افقی هر دو رکورد میدان نزدیک و مقیاس شده با هم برابر هستند (0.8g) ولی حداکثر جابجایی سد و ترک خوردگی سد تحت اثر زلزله میدان نزدیک بم- بم بیشتر از نتایج تحلیل تحت اثر زلزله میدان دور بم- ابرقو است.

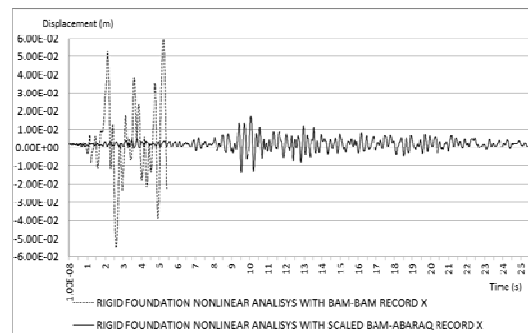
جابجایی افقی تاج سد کوینا تحت اثر رکورد میدان دور منجیل- زنجان در مدل پی انعطاف‌پذیر برابر ۱/۷۲ سانتیمتر و برای مدل پی صلب برابر ۱/۴۱ سانتیمتر بوده است. در نتیجه جابجایی مذکور در مدل پی بدون جرم ۰/۳۱ سانتیمتر بیشتر از مدل پی صلب می‌باشد (شکل (۱۴)). تحت اثر رکورد میدان دور، در مدل پی صلب ترک خوردگی در المان‌های سد رخ نداده است.

در شکل (۱۱) نیز مراحل رشد ترک برای مدل پی بدون جرم نشان داده شده است و ملاحظه می‌گردد آسیب‌دیدگی المان‌ها و رشد ترک در طول ۸/۸۵ متر (۳ المان) بوده است. همچنین با مقایسه شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ملاحظه می‌گردد در تراز شکستگی شیب پایین‌دست، محدوده ترک خورده در مدل پی بدون جرم کمی بیش از مدل پی صلب می‌باشد.



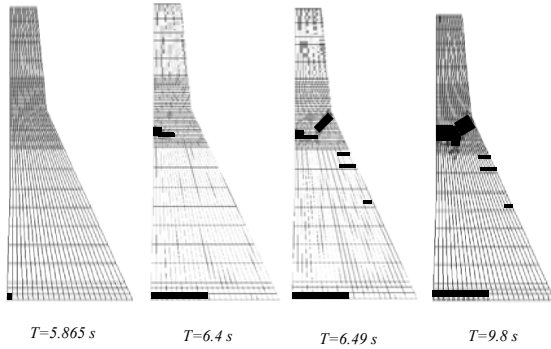
شکل ۱۱- مراحل رشد ترک در تحلیل مدل سد و مخزن روی پی بدون جرم، تحت اثر رکورد زلزله مقیاس شده بم- ابرقو

با توجه به نتایج به دست آمده تحت اثر رکوردهای زلزله بم برای مدل‌های پی صلب و پی بدون جرم، نتیجه می‌گردد در مدل پی صلب جابجایی‌ها کمتر و آسیب‌دیدگی المان‌ها بیشتر است که این امر به علت انعطاف‌پذیری بیشتر و قابلیت پخش نیرو در مدل پی بدون جرم نسبت به مدل پی صلب می‌باشد. به منظور مقایسه نتایج از دیدگاه تأثیر نوع زلزله، در شکل (۱۲) تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت اثر رکورد میدان نزدیک و مقیاس شده برای پی صلب و در شکل (۱۳) تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت اثر رکورد میدان نزدیک و مقیاس شده برای پی بدون جرم نشان داده شده‌اند.

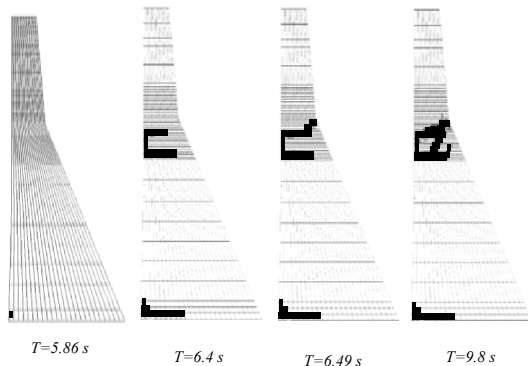


شکل ۱۲- تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت زلزله میدان نزدیک بم و زلزله مقیاس شده میدان دور بم- ابرقو برای مدل پی صلب



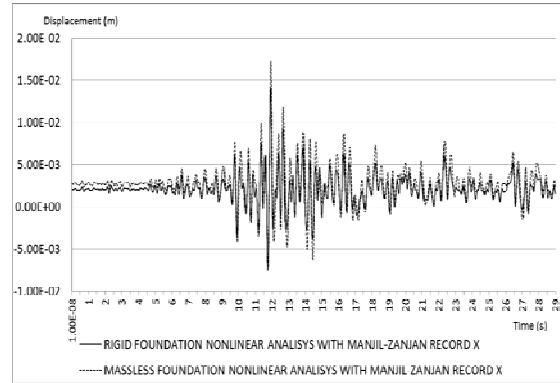


شکل ۱۶- مراحل رشد ترک در تحلیل مدل سد و مخزن روی پی صلب (زلزله میدان نزدیک منجیل- زنجان)



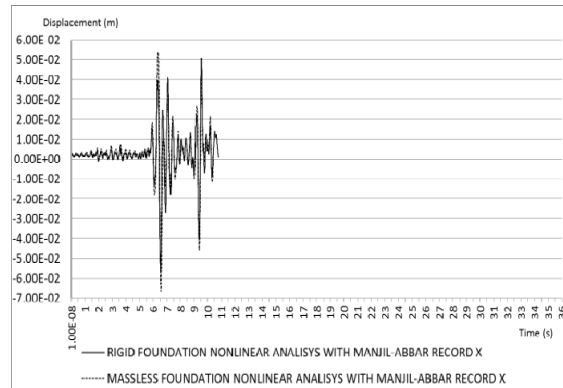
شکل ۱۷- مراحل رشد ترک در تحلیل مدل سد و مخزن روی پی بدون جرم (زلزله میدان نزدیک منجیل- زنجان)

همچنین با مقایسه شکل (۱۶) و شکل (۱۷) ملاحظه می-گردد در تراز شکستگی شیب پایین دست، گستردگی محدوده ترک خورده مدل پی بدون جرم بیش از مدل پی صلب می باشد. تحت اثر زلزله مقیاس شده منجیل- زنجان، حداکثر جابجایی افقی تاج سد در مدل پی صلب برابر ۹/۹۰ سانتیمتر بوده است. در مدل پی بدون جرم نیز حداکثر جابجایی افقی تاج سد برابر ۱۶/۰۳ سانتیمتر به دست آمده است. لذا در مدل پی صلب جابجایی حداکثر تاج سد کمتر از مدل پی بدون جرم است. تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد در شکل (۱۸) ارائه شده است. در شکل (۱۹) مراحل رشد ترک و ترک خوردگی نهایی مدل پی صلب نشان داده شده است و ملاحظه می گردد آسیب دیدگی المان ها و رشد ترک در پاشنه سد در طول ۳۲/۵ متر (۱۱ المان) بوده است.



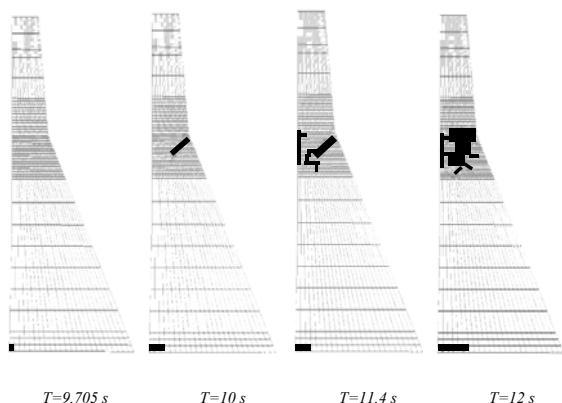
شکل ۱۴- تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت اثر زلزله میدان دور منجیل- زنجان در مدل پی صلب و پی بدون جرم

تحت اثر زلزله میدان نزدیک منجیل- آبر، حداکثر جابجایی افقی تاج سد در مدل پی صلب برابر ۵/۶۳ سانتیمتر بوده است. در مدل پی بدون جرم نیز حداکثر جابجایی افقی تاج سد برابر ۶/۶۷ سانتیمتر بوده است. در نتیجه در مدل پی صلب جابجایی حداکثر تاج سد کمتر از مدل پی بدون جرم است (شکل (۱۵)).

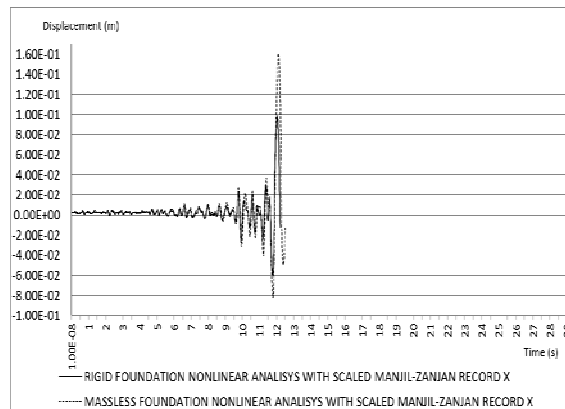


شکل ۱۵- تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت اثر زلزله میدان نزدیک منجیل- آبر در مدل پی صلب و پی بدون جرم

در شکل (۱۶) مراحل رشد ترک و ترک خوردگی نهایی مدل پی صلب نشان داده شده است و ملاحظه می گردد آسیب دیدگی المان ها و رشد ترک در پاشنه سد در طول ۳۲/۵۰ متر (۱۱ المان) بوده است. در شکل (۱۷) نیز مراحل رشد ترک برای مدل پی بدون جرم نشان داده شده است و ملاحظه می گردد آسیب دیدگی المان ها و رشد ترک ۲۶/۵ متر (۹ المان) بوده است که ۶ متر کمتر از آسیب دیدگی المان ها در مدل پی صلب می باشد.



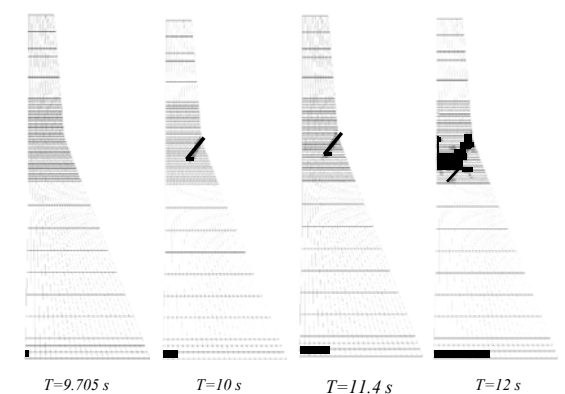
شکل ۲۰- مراحل رشد ترک در تحلیل مدل سد و مخزن روی پی بدون جرم (زلزله مقیاس شده منجیل- زنجان)



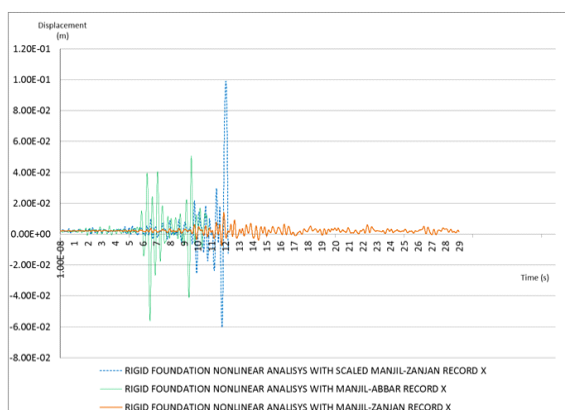
شکل ۱۸- تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت اثر زلزله مقیاس شده منجیل- زنجان در مدل پی صلب و پی بدون جرم

به منظور مقایسه نتایج از دیدگاه تأثیر نوع زلزله، در شکل (۲۱) تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت اثر رکورد میدان نزدیک و مقیاس شده برای پی صلب و در شکل (۲۲) تاریخچه زمانی جابجایی افقی تاج سد تحت اثر رکورد میدان نزدیک و مقیاس شده برای پی بدون جرم نشان داده شده‌اند.

حداکثر جابجایی افقی تاج سد تحت اثر زلزله میدان نزدیک در مدل پی صلب برابر ۵/۶۳ سانتیمتر و تحت اثر زلزله مقیاس شده برابر ۹/۹۰ سانتیمتر و در مدل پی بدون جرم برابر ۶/۶۷ سانتیمتر و تحت اثر زلزله مقیاس شده برابر ۱۶/۰۳ سانتیمتر بوده است. بنابر این حداکثر جابجایی افقی تاج سد در هر دو مدل پی صلب و بدون جرم، تحت اثر زلزله میدان نزدیک بیشتر از رکورد مقیاس شده است.



شکل ۱۹- مراحل رشد ترک در تحلیل مدل سد و مخزن روی پی صلب (زلزله مقیاس شده منجیل- زنجان)

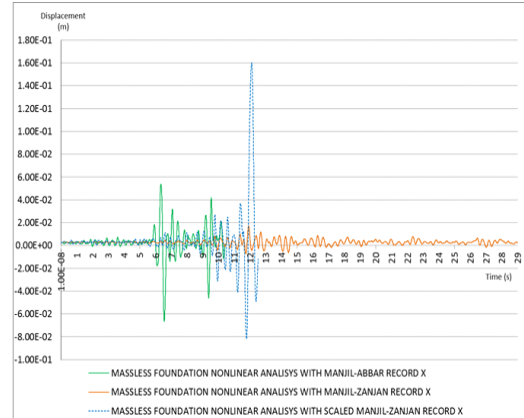


شکل ۲۱- مقایسه پاسخ جابجایی افقی تاج سد کوینا در مدل سد و مخزن روی پی صلب برای تحلیل دینامیکی غیر خطی تحت اثر رکورد زلزله میدان نزدیک منجیل- آبر، میدان دور منجیل- زنجان و مقیاس شده منجیل- زنجان

در شکل (۲۰) نیز مراحل رشد ترک برای مدل پی بدون جرم نشان داده شده است و ملاحظه می‌گردد آسیب‌دیدگی المان‌ها و رشد ترک در طول ۱۷/۷ متر (۶ المان) بوده است که ۱۴/۸۰ متر کمتر از مدل پی صلب می‌باشد. همچنین با مقایسه شکل (۱۹) و شکل (۲۰) ملاحظه می‌گردد در تراز شکستگی شیب پایین دست، محدوده ترک خورده در مدل پی بدون جرم گسترده‌تر از مدل پی صلب می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده تحت اثر رکوردهای زلزله بم برای مدل‌های پی صلب و پی بدون جرم نتیجه می‌گردد در مدل پی صلب جابجایی‌ها کمتر و آسیب‌دیدگی المان‌ها در محل پاشنه نسبت به مدل پی بدون جرم بیشتر است که این امر به علت انعطاف‌پذیری بیشتر و قابلیت پخش نیرو در فونداسیون مدل پی بدون جرم نسبت به مدل پی صلب می‌باشد.

آسیب‌دیدگی المان‌ها در رکورد میدان نزدیک بم- بم بیشتر از رکورد مقیاس شده بم- ابرقو می‌باشد. ولی تحت رکوردهای زلزله منجیل جابجایی حداکثر و آسیب‌دیدگی المان‌ها در رکورد میدان نزدیک منجیل- آبر کمتر از رکورد مقیاس شده منجیل- زنجان است. این مسئله می‌تواند به علت کم بودن دانسیته انرژی معین (SED)<sup>۱</sup> شتابنگاشت میدان دور بم- ابرقو باشد که طبق رابطه (۱۲) به تاریخچه سرعت مرتبط می‌باشد.

$$SED = \int_0^t [v(t)]^2 \quad (12)$$



شکل ۲۲- مقایسه پاسخ جابجایی افقی تاج سد کوبنا در مدل سد و مخزن روی پی بدون جرم برای تحلیل دینامیکی غیر خطی تحت اثر رکورد زلزله میدان نزدیک منجیل- آبر، میدان دور منجیل- زنجان و مقیاس شده منجیل- زنجان

با توجه به شکل‌های (۱۶)، (۱۷)، (۱۹) و (۲۰) نیز ملاحظه می‌گردد ترک خوردگی و آسیب‌دیدگی المان‌ها در مدل‌ها تحت اثر زلزله میدان نزدیک کمتر از نتایج تحت اثر رکورد مقیاس شده بوده‌اند.

با توجه نتایج حاصله در مورد جابجایی حداکثر افقی تاج سد و نحوه ترک خوردگی و آسیب المان‌های سد تحت اثر زلزله میدان نزدیک منجیل- آبر و زلزله مقیاس شده منجیل- زنجان ملاحظه می‌شود علی‌رغم این که حداکثر شتاب افقی هر دو رکورد میدان نزدیک و مقیاس شده با هم برابر هستند (0.64g) ولی حداکثر جابجایی سد و ترک خوردگی سد تحت اثر زلزله میدان نزدیک بم- بم کمتر از نتایج تحلیل تحت اثر زلزله میدان دور بم- ابرقو است.

در جدول (۵) خلاصه نتایج تحلیل‌های انجام شده مدل‌های سد و مخزن روی پی صلب و پی بدون جرم تحت اثر رکوردهای میدان نزدیک، میدان دور و مقیاس شده زلزله بم و منجیل ارائه شده‌اند. در جدول فوق در ستون نام تحلیل، پارامتر اول مربوط به نوع مدل‌سازی پی (پی صلب: R و پی بدون جرم: M) می‌باشد. پارامتر دوم نیز مربوط به نام رکورد مربوطه تحلیل می‌باشد (رکورد بم- بم: BB، رکورد بم- ابرقو: BA، رکورد مقیاس شده بم- ابرقو: SBA، رکورد منجیل- آبر: MA، رکورد منجیل- زنجان: MZ، رکورد مقیاس شده منجیل- زنجان: SMZ).

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۵) و نحوه ترک خوردگی سد تحت اثر زلزله‌های میدان نزدیک و مقیاس شده بم و منجیل که در شکل‌های (۱۶ تا ۲۰) و (۷ تا ۱۱) ارائه شده‌اند، مشخص می‌گردد تحت رکوردهای زلزله بم، جابجایی حداکثر و

جدول ۵- خلاصه نتایج تحلیل‌های انجام شده

ردیف	نام تحلیل	حداکثر جابجایی افقی (cm)	ترک خوردگی
۱	R-BB	۵/۹۷	✓
۲	M-BB	۶/۶۴	✓
۳	R-BA	۰/۵۲	-
۴	M-BA	۰/۷۳	-
۵	R-SBA	۱/۷۱	✓
۶	M-SBA	۲/۴۷	✓
۷	R-MA	۵/۶۳	✓
۸	M-MA	۶/۶۷	✓
۹	R-MZ	۱/۴۱	-
۱۰	M-MZ	۱/۷۲	-
۱۱	R-SMZ	۹/۹۰	✓
۱۲	M-SMZ	۱۶/۰۳	✓

در جدول (۶) مقادیر حداکثر شتاب افقی و دانسیته انرژی معین برای رکوردهای میدان دور، میدان نزدیک و مقیاس شده بم و منجیل ارائه شده‌اند. طبق جدول (۶)، مقدار دانسیته انرژی معین برای رکورد میدان نزدیک بم برابر ۸۴۰۸ و برای رکورد مقیاس شده برابر ۶۶۲ سانتیمتر مربع بر ثانیه می‌باشد و لذا جابجایی تاج سد و ترک خوردگی المان‌ها تحت اثر زلزله میدان نزدیک بم- بم بیشتر از زلزله مقیاس شده میدان دور بم- ابرقو است.

در مورد زلزله منجیل مقدار دانسیته انرژی معین برای رکورد میدان نزدیک آبر برابر ۱۰۷۶۴ و برای رکورد مقیاس شده برابر ۲۷۲۸۱ سانتیمتر مربع بر ثانیه می‌باشد و لذا جابجایی تاج سد و ترک خوردگی المان‌ها تحت اثر زلزله میدان نزدیک منجیل- آبر کمتر از زلزله مقیاس شده میدان دور منجیل- زنجان است. در نتیجه ملاحظه می‌گردد در شرایط PGA یکسان دانسیته انرژی معین (SED) نقش تعیین کننده‌ای در پاسخ سدهای بتنی وزنی دارد.

✓ در تحلیل‌ها، پی در دو حالت صلب و بدون جرم (انعطاف-پذیر) مدل‌سازی شده و اندرکنش کامل دینامیکی آب و سد در نظر گرفته شده است.

✓ با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده ملاحظه می‌گردد جابجایی حداکثر افقی تاج سد در مدل پی صلب کمتر از مدل پی بدون جرم اما ترک خوردگی پاشنه سد در مدل پی صلب بیشتر از مدل پی بدون جرم می‌باشد.

✓ نتایج تحلیل‌های خطی نشان داده‌اند که حداکثر جابجایی افقی تاج سد برای مدل پی بدون جرم کمی بیشتر از مدل پی صلب بوده است، ولی مقادیر تنش‌ها در مدل پی صلب بیشتر از مدل پی دارای جرم بوده‌اند.

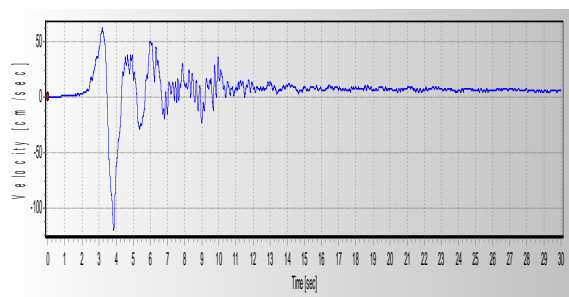
✓ در مقایسه تحلیل‌های غیر خطی با یکدیگر مشخص شد که مدل سد روی پی صلب با حداکثر جابجایی‌های کمتر و زودتر از مدل سد روی پی بدون جرم به خرابی رسیده و همچنین در مدل سد روی پی صلب، آسیب‌دیدگی‌ها و رشد ترک در پاشنه بالادست بیشتر و در محل شکستگی شیب پایین‌دست کمتر از مدل سد روی پی بدون جرم بوده است.

✓ ویژگی‌های زمین‌لرزه‌های میدان دور و نزدیک بررسی و معیارهای حداکثر شتاب افقی زمین، سرعت مطلق تجمعی، شدت آریاس و پارامتر پتانسیل خرابی و ریشه میانگین مربع شتاب  $arms$  به عنوان معیارهایی برای تفکیک زمین‌لرزه‌های میدان دور و نزدیک انتخاب شدند.

✓ با مقایسه تحلیل از دیدگاه تأثیر نوع رکورد زلزله، بررسی نتایج تحلیل‌های خطی مربوط به ایستگاه بم نشان داد که علی‌رغم این که  $PGA$  هر دو رکورد میدان نزدیک بم-بم و مقیاس شده بم-ابرقو یکسان هستند، ولی حداکثر جابجایی افقی تاج سد رکورد میدان نزدیک حدود  $2/4$  برابر رکورد مقیاس شده دست آمده است. همان‌طور که از تاریخچه زمانی سرعت‌های این دو رکورد نیز واضح است، پالس سرعت در رکورد میدان نزدیک زلزله بم وجود دارد در حالی که در تاریخچه زمانی زمین‌لرزه میدان دور این پالس‌ها وجود ندارد.

✓ با مقایسه نتایج تحلیل‌های خطی مربوط به ایستگاه منجیل نیز ملاحظه شد که علی‌رغم این که  $PGA$  هر دو رکورد میدان نزدیک منجیل-آبر و مقیاس شده منجیل-زنجان یکسان هستند، حداکثر جابجایی افقی تاج سد رکورد میدان نزدیک حدود  $0/76$  برابر رکورد مقیاس شده بوده است که این امر به دلیل دانسیته انرژی معین رکوردهای میدان دور در مقایسه با رکوردهای میدان نزدیک می‌باشد. از طرف دیگر با مقایسه مقادیر زمان تناوب سد  $(3/9)$  ثانیه برای مدل پی جرم‌دار و  $4/0$  برای مدل پی صلب و زمان تناوب غالب این دو شتاب‌نگاشت (میدان نزدیک  $6/25$  و میدان دور  $3/85$ ) دریافت می‌شود که محتوای فرکانسی و رخداد پدیده تشدید در مورد زمین‌لرزه

از طرف دیگر با مقایسه مقادیر زمان تناوب سد در جداول (۲) و (۴)  $(3/9)$  ثانیه برای مدل پی جرم‌دار و  $4/0$  برای مدل پی صلب و زمان تناوب غالب این دو شتاب‌نگاشت (میدان نزدیک  $6/25$  و میدان دور  $3/85$ ) دریافت می‌شود که محتوای فرکانسی و رخداد پدیده تشدید در مورد زمین‌لرزه میدان دور می‌تواند عامل مهم دیگری در افزایش غیر منتظره پاسخ سد در زمین‌لرزه‌های میدان دور باشد. در شکل (۲۳) تاریخچه زمانی سرعت مربوط به رکورد میدان نزدیک زلزله بم ارائه شده است. وجود پالس در این طیف مشهود است.



شکل ۲۳- سرعت نگاشت زلزله بم میدان نزدیک (پالس سرعت)

جدول ۶- حداکثر شتاب افقی و دانسیته انرژی مخصوص رکوردهای استفاده شده

ردیف	نام رکورد	PGA (g)	SED $cm^2/sec$
۱	Bam-Bam	۰/۸	۸۴۰۸
۲	Bam-Abaraq	۰/۱۷	۳۰
۳	Scaled Bam-Abaraq	۰/۸	۶۶۲
۴	Manjil-Abbar	۰/۶۴	۱۰۷۶۴
۵	Manjil-Zanjan	۰/۱۳	۱۱۸۷
۶	Scaled Manjil-Zanjan	۰/۶۴	۲۷۲۸۱

##### ۵- خلاصه و نتیجه‌گیری

✓ در این مقاله تحلیل غیر خطی دینامیکی سد کوینا تحت اثر زمین‌لرزه‌های میدان نزدیک و مقیاس شده میدان دور ارائه شد.

✓ معیارهای رکوردهای میدان نزدیک و ویژگی‌های آن‌ها ارائه شد و رکوردهای مورد استفاده بر اساس این معیارها دسته‌بندی شدند.

- Concrete Gravity Dams", *Computers and Structures*, 1997, 64 (5/6), 1197-1204.
- [6] Gunglun, W., Pekau, O. A., Chuhan, Z., Shaumin, W., "Seismic Fracture Analysis of Concrete Gravity Dams Based on Nonlinear Fracture Mechanics", *Engineering Fracture Mechanics*, 2000, 65, 67-87.
- [7] Espandar, R., Lotfi, V., "Comparison of Non-Orthogonal Smeared Crack and Plasticity Models for Dynamic Analysis of Concrete Arch Dams", *Computers and Structures*, 2003, 81 (14), 1461-1474.
- [8] Zhang, H., Ohamachi, T., "Seismic Cracking and strengthening of concrete gravity dams", 12<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering, 2000.
- [9] Mirzabozorg, G., "Non-Linear Behavior of Mass Concrete in Three-Dimensional Problems using a Smeared Crack Approach", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2005, 34, 247-269.
- [10] Ghrib, F., Tinawi, R. "An Application of Damage Mechanics for Seismic Analysis of Concrete Gravity Dams", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1995, 24, 157-173.
- [11] Tinawi, R., Ghrib, F., "An Anisotropic Damage Model for the Response of Concrete Gravity Dams", *Dam Fracture and Damage*, Bourdarot, Mazars, Sauma (eds.), Balkema, 1994.
- [12] Olivier, J., Cevera, M., "Seismic Evaluation of Concrete Rams Via Continuum Damage Models", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1995, 24, 1225-1245.
- [13] Faria, R., Oliver, J., Cevera, M., "A Strain-based Plastic Viscose Damage Model for Massive Concrete Structures", *International Journal of Solids and Structures*, 1998, 35 (14), 1533-1558.
- [14] Lee, J., Fenves, G., L., "A Plastic-damage Concrete Model for Earthquake Analysis of Dams", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1998, 27, 937-965.
- [15] Mirzabozorg, G., "Damage Mechanics Approach in Seismic Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam-Reservoir Interaction", *European Earthquake Engineering* 3, 2004.
- [۱۶] رحیمزاده رفوئی، ف.، "بررسی پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی با در نظر گرفتن اثر جرم پی تحت اثر میدان دور می‌تواند عامل مهم دیگری در افزایش غیر منتظره پاسخ سد در زمین لرزه‌های میدان دور باشد.
- ✓ با ملاحظه نتایج تحلیل‌های خطی و غیر خطی مدل‌ها تحت تأثیر رکورد مقیاس شده بم- ابرقو با PGA برابر 0.8g و رکورد مقیاس شده منجیل- زنجان با PGA برابر 0.64g مشخص شد که صرف نظر از مقادیر PGA، حداکثر جابجایی افقی تاج سد و خرابی‌المان‌ها در تحلیل تحت اثر رکورد مقیاس شده منجیل- زنجان بیشتر از نتایج تحلیل تحت اثر زلزله مقیاس شده بم- ابرقو بوده است که این امر به علت مقادیر دانسیته انرژی مخصوص (SED) رکوردها می‌باشد که با سطح زیر منحنی شتاب‌نگاشت رکورد ارتباط دارد. در این مورد نیز محتوای فرکانسی و رخداد پدیده تشدید در مورد زمین لرزه میدان دور منجیل عامل مهم دیگری می‌باشد.
- ✓ همچنین علی‌رغم این که حداکثر شتاب افقی رکورد میدان نزدیک و مقیاس شده برابر می‌باشند، ولی در مورد زلزله بم جابجایی تاج سد و ترک خوردگی سد کوینا در اثر زلزله میدان نزدیک بم بیشتر از نتایج تحت اثر زلزله مقیاس شده می‌باشد؛ و در مورد زلزله منجیل، جابجایی تاج سد و ترک خوردگی سد کوینا در اثر زلزله میدان نزدیک آبر کمتر از نتایج تحت اثر زلزله مقیاس شده می‌باشد که این مسئله به علت اثر دانسیته انرژی مخصوص است.
- ✓ توصیه می‌شود در طراحی سدهای وزنی، اثر زلزله‌های میدان نزدیک مورد توجه خاص قرار گیرد و تمهیدات لازم در طراحی و بارگذاری سد همانند برخی آئین‌نامه‌های لرزه‌ای سازه‌ها در نظر گرفته شود.
- ۶- مراجع
- [1] Pekau, O. A., Lingmin, F., Chuhan, Z., " Seismic Fracture of Koyna Dam: Case Study", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1995, 24, 15-33.
- [2] Ghaemian, M., Ghobarah, A., "Staggered Solution Schemes for Dam-Reservoir Interaction", *Journal of Fluids and Structures*, 1998, 12, 933-948.
- [3] Calayir, Y., Karaton, M., "A Continuum Damage Concrete Model for Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dam-Reservoir Systems", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, 25, 857-869.
- [4] Rajib Sarkar, D. K., Paul, L., Stempniewski, L., "Influence Of Reservoir and Foundation on the Nonlinear Dynamic Response of Concrete Gravity Dams", *ISET Journal of Earthquake Technology*, 2007, 44, 377-389.
- [5] Mao, M., Taylor, C. A. "Nonlinear Seismic Cracking Analysis of Medium Height

- of Concrete: Implications for Dams", Dam Fracture and Damage, Bourdarot, Mazars, Sauma (eds.) Balkema, 1994.
- [20] ANSYS, "Software Help, Ver. 10".
- [21] Huang, J., "Seismic Response Evaluation of Concrete Gravity Dams Subjected to Spatially Varying Earthquake Ground Motions", PhD Thesis, Drexel University, 2011.
- [22] Naeim, F., "The Seismic Design Handbook", 2<sup>nd</sup> Edition, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- زلزله‌های Near Field"، دفتر امور پژوهشی و پشتیبانی علمی شرکت سهامی مدیریت منابع آب، ایران.
- [17] Maniatakis, Ch. A., Taflampas, I. M., Spyarakos, C. C., "Identification of Near-Fault Earthquake Record Characteristics", 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 12-17 October, 2008.
- [۱۸] قائم‌مقامیان، م. ر.، خلیلی، ب.، "تأثیر نوع گسل، بزرگای زلزله و اثر فاصله برای گسلش ناهمگن بر حرکات توانمند زمین در حوزه نزدیک گسل"، پژوهشنامه زلزله-شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۵، ۹ (۳).
- [19] Bazant, Z. P., "Recent Advances in Fracture Mechanics, Size Effect and Rate Dependence

**EXTENDED ABSTRACT**

## Comparison of Near-Filed and Far-Filed Earthquakes on Nonlinear Response of Concrete Gravity Dams

Javad Hajhoseyni , Javad Moradlou \*

*Department of Civil Engineering , School of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran*

**Received:** 19 February 2014; **Accepted:** 25 August 2014

**Keywords:**

Concrete gravity dam, Near-field earthquakes, Far-field earthquakes, smeared crack, Nonlinear analysis

### 1. Introduction

With respect to catastrophic effects of a possible failure of concrete dam, their continuous safety evaluation seems essential. Investigation on concrete dams has increased extensively during the recent decades. However, considering intrinsic complexity of arch dams, there are considerable ambiguities that require more attention. One of the existing concerns is nonlinear dynamic behavior analysis of dam subject to severe loading such as earthquakes at MCL. On the other hand, type of earthquake has different effects on seismic behavior of dam. Near-field and far-field type of earthquake are two major classifications of earthquakes. The importance of the near-source motion characteristics on the elastic and inelastic behavior of engineered structures has been noted by several researchers [1, 2]. Various criteria for classification of earthquakes to near- and far-field types have also been proposed [2].

### 2. Methodology

In this study, at first the different criteria for classification of earthquakes to near and far field earthquakes has been studied and based on these criteria, two near-field earthquake records and two far-field earthquake records were selected. Also, two other far-field earthquakes were scaled to corresponding near-field earthquake based on maximum horizontal ground acceleration and they were used in analysis. Koyna dam was considered as research case study. Fluid-structure interaction was modeled including water compressibility and reservoir bottom absorption. Rigid and mass less models were considered for the foundation.

Linear and nonlinear behavior of dam models subjected to horizontal and vertical components of selected and scaled earthquake records were analyzed. The difference between crack and damage patterns in nonlinear analysis of models subjected to selected records was investigated.

#### 2.1. Concrete modeling

In the analysis, a three dimensional smeared crack model was used to consider nonlinear behavior of mass concrete. This model is a Fixed Crack Model (FCM) implemented in ANSYS commercial finite element software.

#### 2.2. Near-field earthquake criteria

It is broadly accepted that the most severe damage from earthquake activity is localized in a region close to the causative fault, known as the “near-field” region. Near-field earthquakes are different from far-field types in some aspects such as record’s form and frequency content. Hence, they have different effects on seismic behavior of structures. Earthquake record in near field events with respect to its distance from epicenter and orientation of faults is different from far field events. So distance of sites from earthquake epicenter is not a good criterion for near field events itself and development of other criteria is a necessary research topic.

Maniatakis et al. [1] investigated the available strong motion data of earthquake events from Greece for the period from 1975 to 1999 in order to identify near-source records. The following parameters have been selected:

\* Corresponding Author

*E-mail addresses:* javad\_hajhoseyni@yahoo.com (Javad Hajhoseyni), ajmoradloo@znu.ac.ir (Javad Moradlou).

- i) Peak horizontal ground acceleration (PHGA) or (PGA)
- ii) Cumulative absolute velocity (CAV), defined as:

$$CAV = \int_0^{tr} |a_g(t)| dt \tag{1}$$

Where  $tr$  is total duration of record.

- iii) Arias intensity, defined as:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{tr} |a_g^2(t)| dt \tag{2}$$

Where  $a_g(t)$  is ground acceleration.

- IV) Damage potential parameter proposed defined as:

$$I_p = PGA.t_D \tag{3}$$

Where  $t_D$  is duration of strong ground motion.

- V) The root mean square acceleration  $a_{rms}$ , defined as:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{t}{t_D} \int_{t_D} a_g^2(t) dt} \tag{4}$$

Table 1 presents the lower bounds for the parameters listed above that serve as criteria to identify records that correspond to seismic intensities  $MMI \geq VIII$ .

The selective records investigated by criteria listed in Table 1 are presented in Table 2.

**Table 1.** Ground motion parameters, measured characteristics and lower-bound values

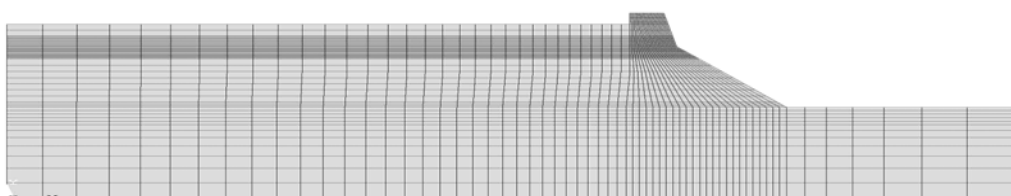
Ground Motion Parameters	Ground Motion Characteristics				Lower-Bound
	Amplitude	Frequency Content	Duration	Energy	
PGA	✓				0.2 (g)
CAV	✓			✓	0.30 (g sec)
PGV	✓			✓	20 (cm/sec)
$I_A$	✓		✓	✓	0.4 (m/s)
I	✓		✓		30 (cm sec <sup>-0.75</sup> )
$a_{rms}$	✓	✓	✓		0.5 m/s

**Table 2.** Investigation of selected records

$a_{rms}$ 0.5 (m/sec <sup>2</sup> )	Classification criteria based on table 1					Distance of station (km)	Types of record	Name of Record	Row
	I (cm sec <sup>0.75</sup> )	IA (m/sec)	PGV (cm/sec)	CAV (g sec)	PGA (g)				
0.24	199.56	0.08	119.55	0.21	0.80	10	Near field	Bam-Bam	1
0.03	9.89	0.00	4.98	0.05	0.171	53	Far-field	Bam-Abaraq	2
1.65	116.08	0.04	67.53	0.14	0.64	39	Near field	Manjil-Abbar	3
0.04	36.43	0.00	24.02	0.02	0.13	88	Far-field	Manjil-Zanjan	4

### 2.3. Analysis

The nonlinear behavior of Koyna dam was studied by the application of selected records above. The finite element model of the dam is presented at Fig. 1.



**Fig. 1.** Finite element model of dam body, reservoir and foundation



The ground motion records listed in Table 2 were selected as the free-field ground acceleration. The loads applied on the system are self weight, hydrostatic pressure and seismic load. The standard Newmark method was used for the integration of dynamic equation in time domain. The Newmark parameters were assumed as 0.5 and 0.25 respectively. The time integration steps were 0.01.

### 3. Results and discussion

Two models of Koyna dam, rigid foundation and mass less foundation model were analyzed subjected to four selective earthquakes (Table 2). Time history of crest displacement of dam subjected to Manjil far-field earthquake is presented in Fig. 2. Also crack pattern related to this earthquake loading is presented in Fig. 3.

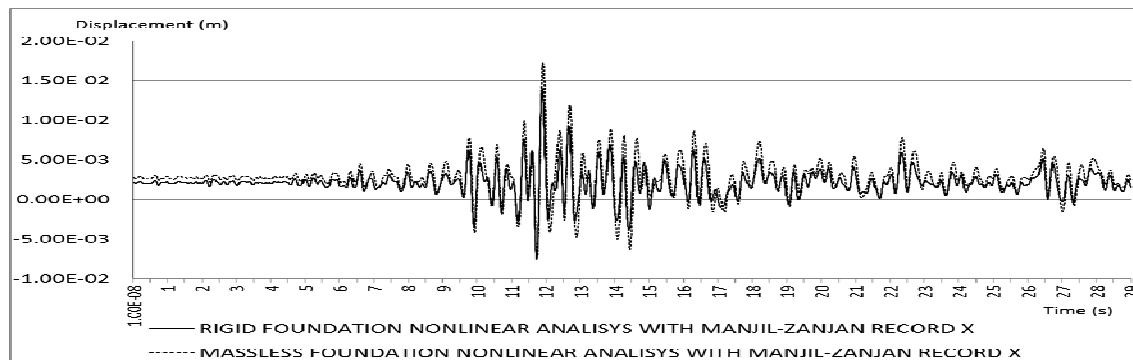


Fig. 2. Time history of crest displacement subjected to Manjil far-field earthquake (rigid and mass less foundation)

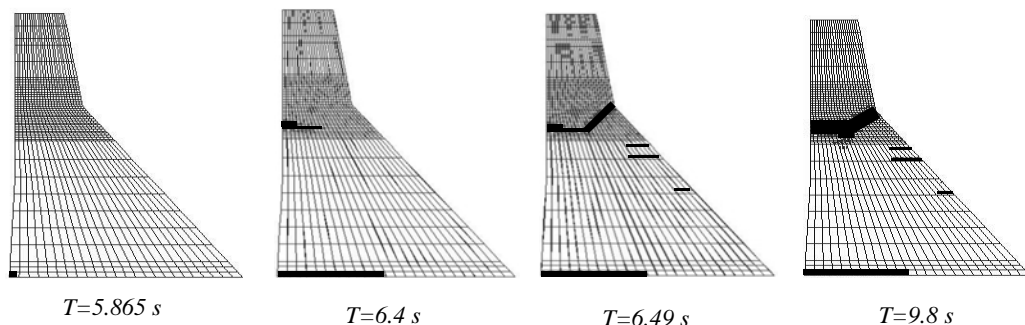


Fig. 3. Crack growth pattern of dam subjected to Manjil far-field earthquake (rigid and mass less foundation)

### 4. Conclusions

In the present study, nonlinear dynamic analysis of concrete gravity dams subjected to near-and far-field earthquakes were presented. Deduced results showed that:

Linear analysis results showed that maximum horizontal displacement of the dam crest for the massless foundation model has been slightly more than rigid foundation model. But tensile stresses in the massless foundation have been more than rigid foundation model.

Comparison of results of nonlinear analysis indicated that the rigid foundation model failed with smaller maximum displacements and also in earlier time rather than massless foundation. Also in rigid foundation model damage of elements and crack growth in upstream heel has been more than massless foundation model.

Investigation of results with the viewpoint of earthquake records effect showed that records with the same PGA have different effects on the dam response. In addition to PGA of record, frequency contents, specific energy density and the source of earthquake can affect the on dam response significantly.

### 5. References

- [1] Maniatakis, Ch. A., Taflampas, I. M., Spyrakos, C. C., "Identification of Near-Fault Earthquake Record Characteristics", 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 12-17 October, 2008.
- [2] Naeim, F., "The Seismic Design Handbook", 2<sup>nd</sup> Edition, Kluwer Academic Publishers, 2001.