



## بررسی اندرکنش رویه‌ی بتنی با بستر سنگریزه‌ای در تحلیل دینامیکی سه بعدی سدهای سنگریزه‌ای با رویه‌ی بتنی (CFRD)

سجاد سالمی<sup>1</sup>، علی اصغر میرقاسمی<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

[Sajjad.salemi@ut.ac.ir](mailto:Sajjad.salemi@ut.ac.ir)

2- استاد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

[aghasemi@ut.ac.ir](mailto:aghasemi@ut.ac.ir)

### چکیده

عملکرد مناسب سدهای سنگریزه‌ای در زلزله‌های اخیر موجب افزایش گرایش به ساخت این نوع سد در دهه‌های اخیر شده است. تراکم مناسب سنگدانه‌ها موجب پایداری و عدم وجود ریزدانه‌ها در بدنه‌ی سد موجب کاهش خطرات ناشی از افزایش فشار آب حفره‌ای در این سدهاست. سدهای سنگریزه‌ای با رویه بالادست بتنی (CFRD) از جمله انواع سدهای سنگریزه‌ایست که از رویه‌ای بتنی در بالادست به عنوان عنصر نفوذناپذیر بهره می‌گیرد. بررسی تماس بین رویه‌ی بتنی و بستر سنگریزه‌ای بدلیل مدول الاستیک متفاوت دو مصالح در تماس و لغزش احتمالی در سطوح تماس حائز اهمیت است؛ خصوصاً که در بارهای دینامیکی احتمال جدایی بین رویه‌ی بتنی و بدنه‌ی سنگریزه‌ای سد وجود دارد. در این مقاله سعی شده تماس بین رویه‌ی بتنی و سنگریزه‌ی بستر آن، همچنین تماس دال‌های بتنی مجاور در نرم افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی شود. رفتار بتن تحت بارگذاری سد الاستوپلاستیک فرض شده است و از مدل رفتاری موهر-کولمب برای مصالح سنگریزه‌ای استفاده شده است. در نتیجه‌گیری وضعیت سطوح تماس پس از اعمال بار زلزله بررسی خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد با تعریف سطوح تماس توزیع متفاوتی از تنش در رویه‌ی بتنی و شتاب در تاج سد ایجاد خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** CFRD، سدسنگریزه‌ای، رویه بتنی، اندرکنش، تحلیل دینامیکی

### 1. مقدمه

سدهای سنگریزه‌ای با رویه‌ی بتنی مقاومت مناسبی در برابر بارهای لرزه‌ای دارند، شرارد و کوک [1] ایمنی CFRD را به دو دلیل عمده ذکر می‌کنند، اول، بدنه‌ی سنگریزه‌ای سد در CFRD خشک است و بارهای دینامیکی نمی‌تواند موجب افزایش فشار آب حفره‌ای و کاهش مقاومت برشی (تنش موثر) در بدنه‌ی سد شود، دوم، وجود نیروی آب مخزن بر رویه‌ی بتنی در بالادست، موجب افزایش تنش محصور کننده در سنگریزه‌های بدنه و پایداری سد گردد، که در مقایسه با ECRD این موضوع از مزایای CFRD ذکر شده است. Bureau و همکاران [2] به این نتیجه رسیدند که با اطمینان بالایی می‌توان از اثر هیدرودینامیکی آب مخزن صرف نظر کرد.



Uddin [3] در پژوهش خود دو نکته زیر را ذکر می کند: (1) تغییر شکل های ماندگار در ناحیه ی یک سوم بالایی سد اتفاق می افتند که این نتیجه برای زلزله ی ثبت شده برای سد El Infiernillo در مکزیک هم مشاهده شده است. (2) حداکثر نشست برای لرزه های شدید در تاج سد حدود 1 تا 2 درصد ارتفاع سد خواهد بود. Han و همکارانش [4] مدل کوچکی از CFRD را برای آزمایش میز لرزه آماده کردند و شتاب ماکزیمم 0.14 تا 0.6 برابر شتاب  $g$  را به عنوان زلزله ورودی اعمال کردند. لغزش اولیه به صورت گوهی سطحی در تاج سد ایجاد شد که با افزایش مقدار شتاب القایی، اندازه ی گوه افزایش یافت و در نهایت در بالاترین شتاب اعمالی با قطع شدن تماس بتن و سنگریزه، رویه بتنی شبیه تیر طره عمل کرد و خرابی های برای آن اتفاق افتاد.

رفتار اندرکنشی در مطالعات فراوانی انجام شده است، از جمله Uddin [3] بر اساس مدل تماسی که از قانون اصطکاکی کولمب استفاده می کند اندرکنش را برای حالت دوبعدی مدل سازی کرده است. Uddin در حالت دوبعدی نشان داد میزان نیروی محوری در رویه ی بتنی در حالتی که بتن اتصالی گیردار با سنگریزه ی زیرین دارد 20 درصد بیشتر از حالتی است که بین این دو سطح تماس تعریف شده است. در این مقاله با مدلسازی سه-بعدی سد 100 متری CFRD در نرم افزار آباکوس، اندرکنش را بین رویه ی بتنی و بدنه ی سنگریزه ای برقرار کرده و در دو حالت مقید (عدم لغزش بین بتن و سنگریزه) و اندرکنش (امکان لغزش بین بتن و سنگریزه) نتایج را در تحلیل دینامیکی مقایسه خواهیم کرد.

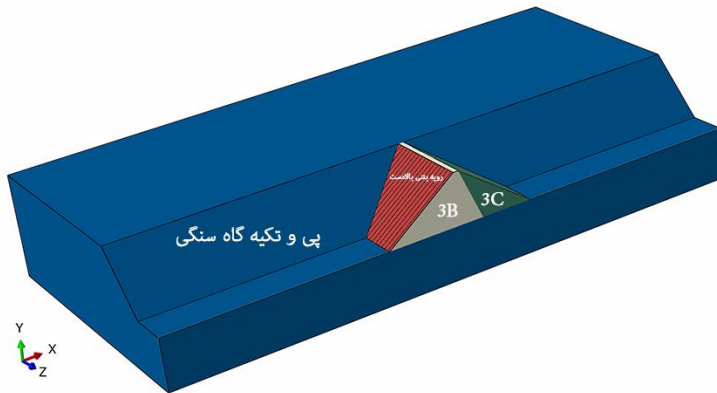
## 2. مدل المان محدود CFRD

مدل مورد مطالعه برای این مقاله، یک سد تیپ CFRD با ارتفاع 100 متر است. طول تاج این سد 350 متر و زاویه ی تکیه گاه سد در دو سمت 45 درجه است. دال بتنی رویه به 35 دال مجزا به عرض 10 متر تقسیم شده است. ضخامت رویه ی بتنی از بالا تا پایین ثابت، 35 سانتی متر است. بدنه ی سنگریزه ای سد از دو نوع مصالح 3B و 3C با خصوصیات که در جدول 1 آمده، تشکیل یافته است. ساختگاه سدهای سنگریزه ای معمولاً سنگی و با مدول الاستیک بالاست. تحلیل های انجام شده در مدل های متفاوت نشان می دهد کرنش های بدست آمده در پی در محدوده ی الاستیک است، بنابراین رفتار الاستیک پی پذیرفته شده است.

جدول (1): خصوصیات مصالح سد و پی

ناحیه	$\gamma(\text{kg/m}^3)$	E (Mpa)	ضریب پواسون $\nu$	$\phi$	C(kpa)	$\psi$
پی	2500	21000	0.25	مصالح پی الاستیک فرض شده است.		
3B	2000	100	0.3	40	0.5	8
3C	1900	50	0.35	35	0.5	4
دال بتنی	2350	28000	0.2	خصوصیات الاستوپلاستیک بتن در قسمت های بعد آمده است.		

شکل 1 نیم مدل سه بعدی در نرم افزار آباکوس را مشاهده می کنید.



شکل (1): نیم مدل المان محدود

برای بدنه‌ی سنگریزه ای و پی مدل از المان های خطی، چهار گرهی با در نظر گرفتن تنش های سه بعدی برای هر المان (C3D4) و برای رویه‌ی بتنی از المان های خطی، هشت گرهی با در نظر گرفتن تنش های سه بعدی برای هر المان (C3D8) استفاده شده است. در مورد المان های رویه، بدلیل ضخامت کم آن نسبت به ابعاد طولی و عرضی، استفاده از دو نوع المان امکان پذیر است. یک، استفاده از المان های سه بعدی حجم دار<sup>1</sup> که همانند دیگر المان های بدنه و پی، ضخامت آن المان در جهت عمود بر رویه در نظر گرفته می شود. دو، استفاده از المان های دوبعدی پوسته ای<sup>2</sup> که از ضخامت آن المان در جهت عمود بر رویه صرف نظر می شود. در مدل پیش رو المان های نوع اول، استفاده شده است و رویه‌ی بتنی در ضخامت خود از دو ردیف المان تشکیل یافته است.

با توجه به آنچه در مقدمه ذکر شد در CFRD می توان از اثرات هیدرودینامیکی آب مخزن صرف نظر کرد، لذا در مدل المان محدود، مخزن تا 95 متر پر فرض شده و نیروی هیدرواستاتیکی آن بر رویه‌ی بالادست اعمال شده است.

### 3. مدل رفتاری الاستوپلاستیک رویه‌ی بتنی

بتنی که به عنوان رویه نفوذناپذیر استفاده می شود روی بستری از خاک نرم اجرا می شود. در این تحقیق رفتار بتن به دو صورت الاستیک و الاستوپلاستیک در نظر گرفته ایم و نتایج را مقایسه خواهیم کرد. خصوصیات

<sup>1</sup> Solid Element

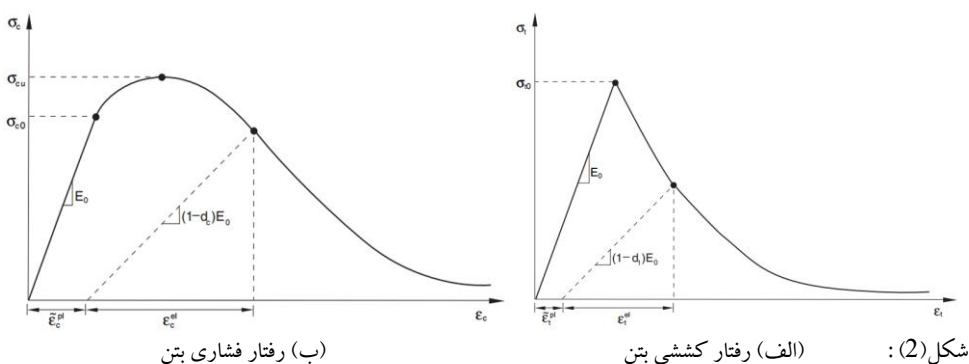
<sup>2</sup> Shell Element

الاستیک بتن مورد استفاده در جدول 1 ذکر شد. برای حالت الاستوپلاستیک از مدل رفتاری بتن الاستوپلاستیک<sup>1</sup> در نرم افزار المان محدود استفاده می کنیم. این مدل رفتاری بر پایه‌ی مدل رفتاری دراگر-پراگر است [5]. رفتار کششی و فشاری بتن به صورت مجزا تعریف می شود و بر اساس همین رفتار میزان آسیب دیدگی المان ها در طول تحلیل قابل مشاهده است.

در تئوری این مدل، دو معیار گسیختگی وجود دارد، ترک خوردگی در رفتار کششی و خردشدگی در رفتار فشاری. مسیر رسیدن به این معیارهای گسیختگی توسط دو متغیر کرنش پلاستیک کششی و کرنش پلاستیک فشاری کنترل می شود [5].

### 3-1- رفتار کششی

در آزمایش کششی تک محوره برای بتن، نمودار تا تنش تسلیم به صورت خطی الاستیک پیش می رود؛ در این نقطه اولین ترک های مویی شروع به شکل گیری می کند و رفتار کششی با نرم شدگی کرنشی و کم شدن تنش ادامه می یابد. (شکل 2-الف)



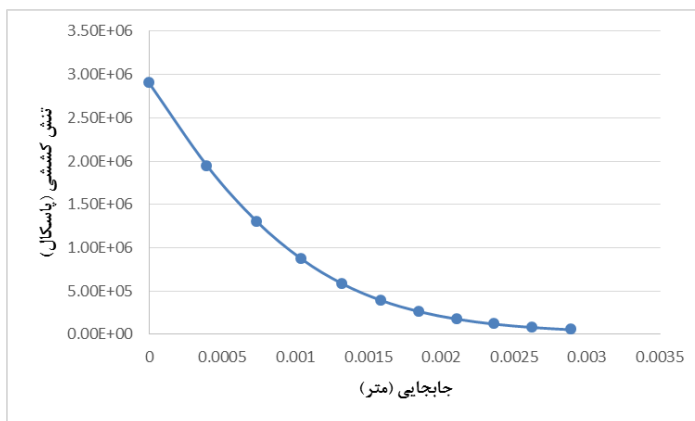
### 3-2- رفتار فشاری

در آزمایش فشاری تک محوره، تا تنش اولیه جاری شدن رفتار خطی الاستیک اتفاق می افتد و در این لحظه با افزایش اندکی تنش، سخت شدگی فشاری دیده می شود و از این ناحیه به بعد، نرم شدگی کرنشی تا رسیدن به کرنش گسیختگی ملاحظه می گردد. (شکل 2-ب)

اگر بارگذاری کششی و فشاری به صورت سیکلیک انجام شود، نمودار در مرحله نرم شدگی از نقاطی تشکیل خواهد شد که میزان کاهش در مدول الاستیسیته را تعیین می کند. همانگونه که از اشکال بالا پیداست، مدول کاهش یافته با رابطه  $E=(1-d)E_0$  تعیین می گردد که  $E_0$  مدول الاستیک اولیه و  $d$  متغیر کاهش سختی تابعی از کرنش پلاستیک و سطح تنش است. در نرم افزار المان محدود رفتار الاستوپلاستیک را می توان به دو

<sup>1</sup> Concrete Damaged Plasticity

شکل به عنوان داده ورودی معرفی کرد. نمودار رفتار بتن با معیار کرنش (تغییر شکل) یا رفتار بتن با معیار جابجایی (تغییر مکان). در مسائلی که تماس برای سطوح تعریف شده است استفاده از معیار جابجایی توصیه شده است [5]. در این مقاله از رفتار الاستوپلاستیک فقط در حالت کششی استفاده شده است و در حالت فشاری فرض بر رفتار خطی الاستیک تا رسیدن به تنش فشاری حداکثر 24 مگاپاسکال است. در شکل 3 رفتار کششی را ملاحظه می کنید.



شکل (3): رفتار کششی بتن مورد استفاده در رویه‌ی بتنی بالادست

#### 4. مشخصات سطوح تماس خاک و سازه

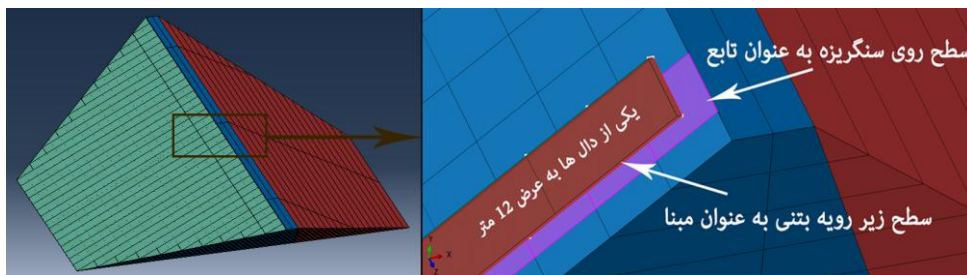
در نرم افزار اجزای محدود آباکوس به چند روش می توان تماس بین اجسام را شبیه سازی کرد. یکی از عمومی و پرکاربردترین این روش ها، استفاده از تعریف سطوح تماس صفحه به صفحه<sup>1</sup> است [5]. در این روش دو سطحی که در تماس با یکدیگر قرار دارند را تعیین کرده و یک سطح را به عنوان مینا<sup>2</sup> و سطح دیگر را به عنوان تابع<sup>3</sup> انتخاب خواهیم کرد. توصیه می گردد سطح متعلق به جسم سخت تر (بتن) را مینا قرار داده و سطح تابع از جسم نرم تر (خاک، سنگریزه) انتخاب شود (شکل 4). در روش تماس صفحه به صفحه، نرم افزار سطوح مینا و تابع را با المان های تماس مناسب می پوشاند و تماس با یک مسیر<sup>4</sup> روی سطح مینا تعریف می شود که این مسیر می تواند با توجه به شکل سطوح برخوردی خطی یا نمایی باشند.

<sup>1</sup> Surface-To-Surface Contact Method

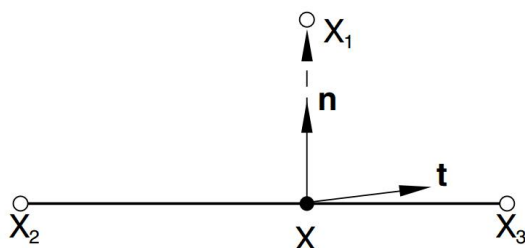
<sup>2</sup> Master Surface

<sup>3</sup> Slave Surface

<sup>4</sup> Slide Line Surface



شکل (4): سطوح مبنا و تابع در تماس رویه‌ی بتنی و سنگریزه‌ی زیر آن



شکل (5): تماس خطی بین سطح مبنا و تابع

شکل 5 یک تماس خطی را نشان می‌دهد که نقطه‌ی  $X$  نقطه‌ای متعلق به سطح مبنا است و  $X_1$  نزدیکترین نقطه‌ی روی سطح تابع است. همانگونه که در شکل پیداست خصوصیات این تماس با دو رفتار نرمال بر سطح و مماسی تعیین شده است. رفتار نرمال به گونه‌ای تعریف شده که نفوذی بین دو سطح تماس وجود نداشته باشد و برای مقدار فشار تماس<sup>1</sup> هیچ محدودیتی نباشد. همچنین امکان جدایی بین سطوح در مدلسازی قابل کنترل است. در رفتار مماسی هم بر اساس مدل اصطکاک کولمب<sup>2</sup> وقتی که مقدار تنش برشی معادل در سطح تماس (رابطه 1) به حد بحرانی لغزش (رابطه 2) برسد، لغزش در سطح تماس رخ می‌دهد.

$$\tau_{eq} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} \quad (1)$$

$$\tau_{crit} = \mu \cdot p \quad (2)$$

در این روابط،  $\tau_1$  و  $\tau_2$  تنش برشی در سطح مورد نظر در جهات عمود بر هم،  $\mu$  ضریب اصطکاک بین سطوح و  $p$  فشار تماسی است. این لغزش برای اصطکاک ایزوتروپیک در جهت تنش برشی معادل اتفاق می‌افتد.

در این مقاله قصد داریم تحلیل دینامیکی را برای دو حالت خصوصیات تماسی انجام دهیم. در حالت اول مطابق تئوری ذکر شده تماس بین سطوح (رویه‌ی بتنی با سنگریزه‌ی زیر آن و رویه‌های بتنی مجاور با همدیگر) مانند آنچه در جدول 2 آمده، مدل شده است. در حالت دوم فرض بر این است تمام سطوح به همدیگر کاملاً مقید

<sup>1</sup> Contact Pressure

<sup>2</sup> Coulomb Friction Model

شده اند. در هر دو حالت فرض بر این است اتصال رویه‌ی بتنی به تکیه‌گاه‌ها به صورت کاملاً گیردار است که تقریباً در واقعیت با این حالت روبرو هستیم.

جدول (2): خصوصیات تماس سطوح

بتن - بتن		خاک - بتن		خصوصیات تماس
ضریب اصطکاک = 0.25		ضریب اصطکاک = 0.35		1. رفتار مماسی
اجازه جدایی = دارد	تماس سخت (عدم فرورفتگی)	اجازه جدایی = دارد	تماس سخت (عدم فرورفتگی)	2. رفتار نرمال

## 5. تحلیل دینامیکی

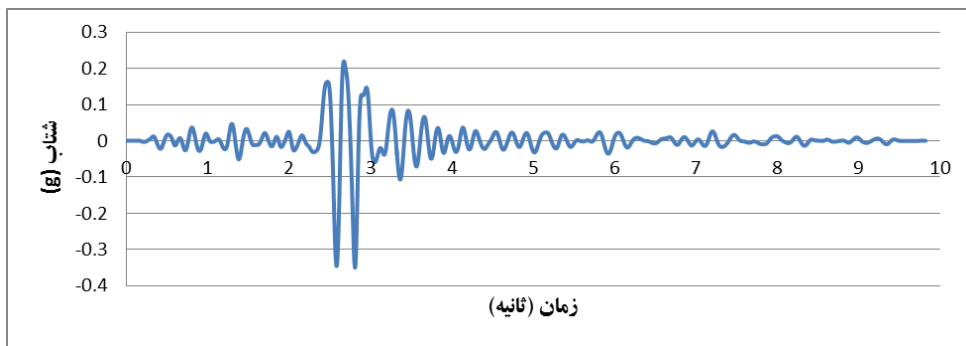
### 5-1- فرکانس طبیعی

نرم افزار قادر به تعیین فرکانس طبیعی سد؛ وابسته به سختی و جرم سازه، می‌باشد. با استفاده از 5 درصد میرایی رایلی مقادیر ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب 0.36 و 0.0034 به عنوان پارامترهای میرایی تعریف شده است.

### 5-2- زلزله ورودی

زلزله 5 ریشتری کوالینگا<sup>1</sup> به عنوان زلزله ورودی برای هر دو مدل اعمال شده است. این لرزه 9.825 ثانیه ثبت شده و بعد از اصلاحات دارای شتاب ماکزیمم 0.35g است. جهت زلزله‌ی ورودی برای مدل‌های حاضر بالادست - پایین دست است و تاریخچه‌ی زمانی این زلزله تحت شرایط مرزی در گام تحلیل دینامیکی به مرزهای مدل المان محدود اعمال شده است. در شکل 6 ارتعاش ورودی به سیستم را می‌بینیم.

<sup>1</sup> Coalinga

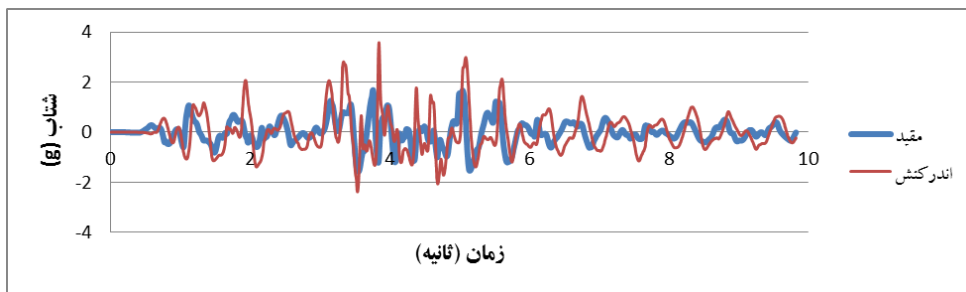


شکل (6): تاریخچه زمانی زلزله ورودی

## 6. نتایج تحلیل دینامیکی

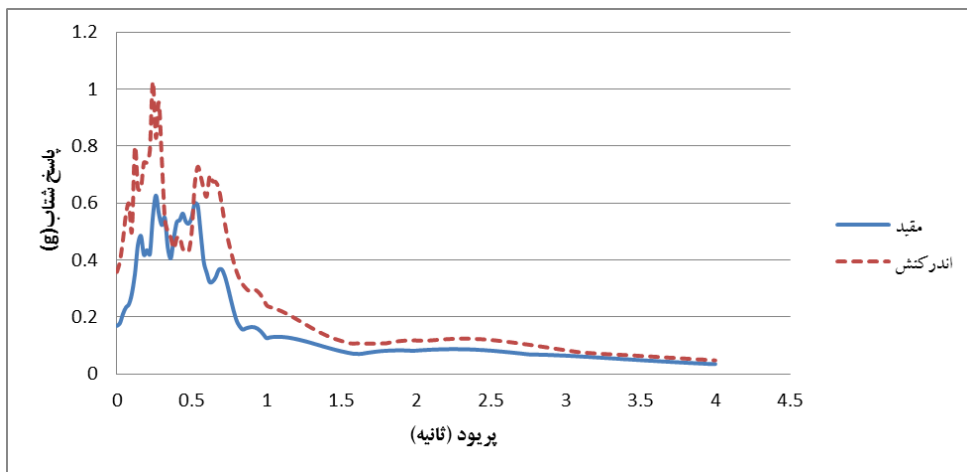
### 6-1- پاسخ تاج سد و تغییر شکل پسماند

در نمایش اشکال حالت «اندرکنش» معرف مدل با در نظر گرفتن اندرکنش بین سطوح و حالت «مقید» معرف مدل با سطوح کاملا مقید شده است. شکل 7 پاسخ شتاب تاج سد در مقطع میانی برای دو حالت نشان داده شده است. شکل 8 طیف پاسخ شتاب در دو حالت مقایسه شده است. در شکل 9 کانتور جابجایی افقی و نشست پسماند در پایان زلزله برای سد قابل مشاهده است.

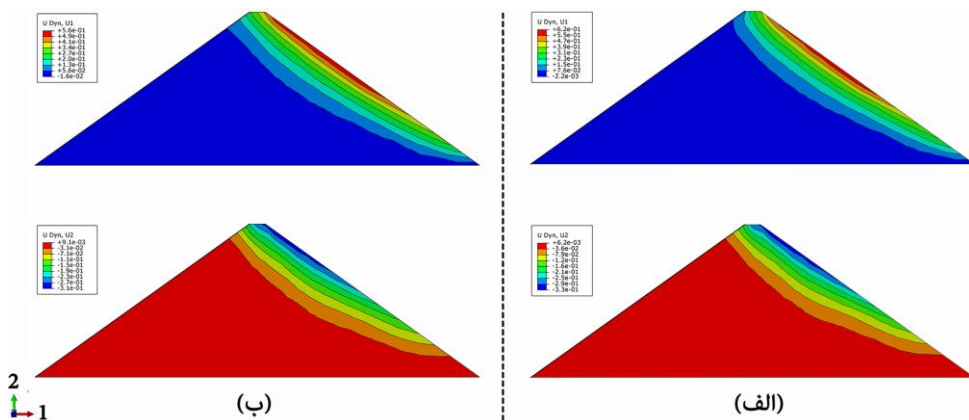


شکل (7): مقایسه‌ی شتاب تاج سد، (الف) مقید، (ب) اندرکنش





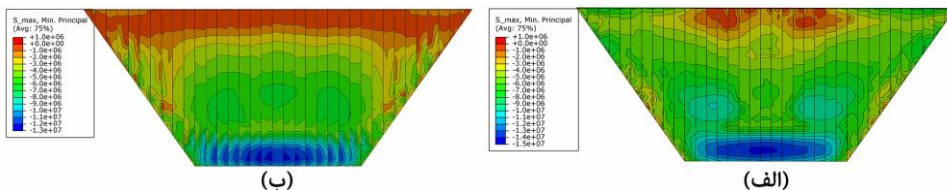
شکل (8): مقایسه طیف پاسخ شتاب تاج سد، (الف) مقید، (ب) اندرکنش



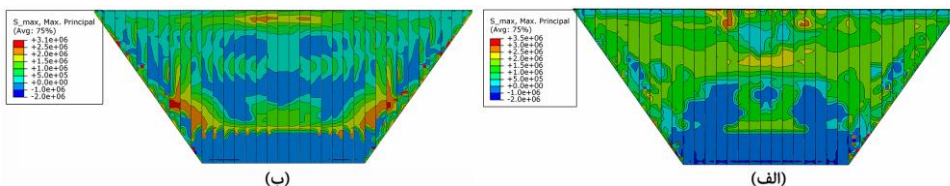
شکل (9): جابجایی افقی (U1) و نشست پسماند (U2) در پایان زلزله برای مقطع میانی سد، (الف) مقید، (ب) اندرکنش

## 6-2- تنش کششی و فشاری در رویه بتنی

در اشکال 10 و 11 مقایسه ای برای پوش تنش های اصلی فشاری و کششی در دو حالت مشاهده می گردد. منظور از پوش تنش، بالاترین میزان تنش برای هر المان در طول زمان اعمال زلزله است که نشانگر بحرانی ترین حالت است.



شکل (10): تنش اصلی فشاری، (الف) مقید، (ب) اندرکنش



شکل (11): تنش اصلی کششی، (الف) مقید، (ب) اندرکنش

## 7. نتیجه گیری

با توجه به مقایسه انجام شده در دو حالت «الف» مقید و «ب» اندرکنش، نتایج در ادامه آمده است:

- در شکل 7 مشاهده می‌گردد حالت «ب» شتاب بیشتری نسبت به «الف» دارد، بطوریکه در حالت «الف» رویه بتنی با کل بدنه‌ی سد یکپارچه عمل کرده و نقش موثری در کاهش شتاب تاج سد و نقاط دیگر دارد. اما در حالت «ب» در طول زلزله امکان لغزش و جدایی رویه نسبت به بدنه‌ی سد وجود دارد و همین امر موجب افزایش شتاب در بدنه‌ی سد شده است. لغزش رویه بتنی در هنگام زلزله موجب تشکیل شتاب‌های موضعی نسبتاً زیادی در محل اندرکنش رویه‌ی و سنگریزه شد که بررسی آن در مطالب این مقاله نمی‌گنجد. همچنین در شکل 8 طیف پاسخ شتاب را برای دو حالت می‌بینیم که محتوای فرکانسی طیف پاسخ برای هر دو حالت تقریباً یکسان است و در دو پرپود کوچکتر از یک بالاترین پاسخ را دارند با این تفاوت که در حالت (الف) پاسخ کوچکتر از یک را شاهدیم (کاهش شتاب تاج نسبت به شتاب زلزله ورودی) و در حالت (ب) کاهش یا افزایش شتابی دیده نشده است.

- در مقایسه‌ی توزیع نشست و جابجایی افقی (شکل 9) می‌بینیم تفاوت چندانی بین دو حالت وجود ندارد. در هر دو حالت بیشترین میزان تغییر شکل در ارتفاع یک سوم بالایی سد و در شیب پایین دست اتفاق می‌افتد.

- شکل 10 و 11 تنش‌های اصلی فشاری و کششی را نشان می‌دهد. با مقید شدن سطوح لغزش انتظار می‌رود رویه بتنی عملکردی یکپارچه داشته باشد که در اشکال قابل ملاحظه است. در شکل 11 می‌بینیم میزان تنش اصلی فشاری برای حالت «الف» حداکثر 15 مگاپاسکال و برای حالت «ب» 13 مگاپاسکال است که این دلیلی بر یکپارچگی رویه بتنی در حالت «الف» است. در تحقیقات Uddin هم برای حالت دوبعدی تفاوت 20

درصدی برای تنش‌ها ذکر شده بود [3]. ناپیوستگی تنش در حالت «ب» مخصوصاً در ترازهای پایین‌تر به وضوح قابل مشاهده است. لغزش در سطوح بین رویه‌های بتنی موجب بازتوزیع و این ناپیوستگی شده است. - شکل 11 هم تنش‌های اصلی کششی را نشان می‌دهد که در این شکل هم در حالت «ب» ناپیوستگی‌های تنش را مشاهده می‌کنیم. لغزش رویه‌ی بتنی در توزیع تنش کششی هم تاثیرگذار است. بدلیل یکپارچگی رویه در حالت «الف» ناحیه‌ی کششی نسبتاً وسیع‌تری نسبت به حالت «ب» تشکیل شده است.

## 9. مراجع

- [1] Sherard JL, Cooke JB. Concrete-face rockfill dam: I. Assessment and II. Design. *Geotech Eng.* 1987
- [2] Bureau G, Volpe R, Roth W, Udaka T. Seismic analysis of concrete faced rock fill dams. In : proceeding of symposium on concrete – face rockfill dams Design, construction and performance, ASCE , New York , 1985: 479- 508.
- [3] Nasim Uddin, A dynamic analysis procedure for concrete-faced rockfill dams subjected to strong seismic excitation, *Computers and Structures* 72 (1999) 409±421
- [4] Han G, Kong X, Li J. Dynamic experiments and numerical simulations of model concrete-face rockfill dams. In : Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, vol. VI, 1988.
- [5] ABAQUS. Users' manual. Simulia, Pawtucket, Rhode Island; 2008.