

## ارزیابی پاسخ لرزه ای سد بتنی دو قوسی تحت تحریک غیر یکنواخت تکیه گاهی با استفاده از روش ارتعاش تصادفی

رضا تازی نژاد<sup>۱\*</sup>، رامتین صبح خیز فومنی<sup>۲</sup>، حامد نوری ناوود<sup>۳</sup>، محسن ایثاری<sup>۴</sup>، حامد محجوب<sup>۵</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، ایران

۴- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ایران

۵- فارغ التحصیل ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ایران

### چکیده

برای بررسی اثرات جابجایی‌های غیر یکنواخت روی پاسخ لرزه‌ای یک سد اطلاعات جابجایی زمین لرزه مورد نیاز خواهد بود. چنین اطلاعاتی در طول یک زمین لرزه در ساختگاه یک سد به ندرت به ثبت رسیده است و عموماً تعداد داده‌های ثبت شده نیز به کفایت انجام تحلیل غیر یکنواخت را نمی‌نماید. در پژوهش حاضر، با استفاده از طیف کانای-تاجیمی در روش ارتعاش تصادفی، شتابهای غیر یکنواخت با اعمال اثرات عبور موج، اثرات ناپیوستگی ناشی از تفرق امواج و با اعمال مدل طیف ارتباطی، روی ساختگاه مورد بررسی، تولید شد. در ادامه مدل سه بعدی از سد کارون ۴ به عنوان بلندترین سد بتنی دو قوسی در ایران تهیه شد. مدل آماده شده، تحت شتابهای یکنواخت و غیریکنواخت تولید شده در دو حالت مخزن خالی و پر بررسی و رفتارهای لرزه ای آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که، تحلیل‌های غیر یکنواخت منجر به تفاوت در رفتار لرزه ای سازه در مقایسه با تحلیل یکنواخت می‌شود. چنانکه که دیده شد، تحریکهای غیر یکنواخت باعث افزایش تنشها بر روی بدنه سد می‌شوند. علاوه براین، وجود مخزن نیز منجر به افزایش تنش در بدنه سد شده است. همچنین نشان داده شد، تحریک‌های غیر یکنواخت باعث افزایش جابجایی در مقایسه با تحریک یکنواخت می‌شود.

کلمات کلیدی: تحریک غیر یکنواخت، سد بتنی قوسی، طیف کانای-تاجیمی، پاسخ دینامیکی، اثرات ساختگاهی.

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2018.114662.1435					
https://10.22065/jsce.2018.114662.1435	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۵/۲۵	۱۳۹۷/۰۲/۲۴	۱۳۹۶/۱۰/۲۳
			رضا تازی نژاد	*نویسنده مسئول:	
			r_tarinejad@tabrizu.ac.ir	پست الکترونیکی:	

## Evaluation the Seismic Response of Concrete Arch Dam under Non-Uniform Excitation using Stochastic Method

Reza Tarinejad <sup>\*1</sup>, Ramtin Sobhkhiz<sup>2</sup>, Hamed Nouri <sup>3</sup>, Mohsen Isari <sup>4</sup>, Hamed Mahjoob <sup>5</sup>

1- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Graduate Student, Civil Engineering Department, Islamic Azad University of Lahijan, Iran

3- Graduate Student, Civil Engineering Department, Islamic Azad University of Lahijan, Iran

4- Ph.D. Student, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

5- Master of Science, Civil Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

### ABSTRACT

To investigate the seismic responses of dams due to ground non uniform displacements, the records of earthquake displacements are required. Such data is seldom recorded during a specific earthquake and in the most cases the recorded data is not sufficient for non-uniform analysis of a dam. In this study non uniform accelerations are generated using Kanai-Tajimi spectrum with considering wave passage, incoherent effects and coherence spectrum model. A 3-d finite element model of dam-foundation of Karun 4 arch dam as the highest dam in Iran is modeled. The model is analyzed under uniform and non-uniform generated accelerations and its responses are investigated. The results show that, non-uniform excitation leads to differences in seismic response than uniform excitation on dam. It is indicated that considering non-uniform excitation in seismic analysis increases the stresses and displacements on the dam body.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 13 January 2018

**Revise Date:** 14 May 2018

**Accept Date:** 16 August 2018

### Keywords:

Non-Uniform Excitation  
Arch Concrete Dam  
Kanai-Tajimi Spectrum  
Dynamic Response  
Site Effect

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.114662.1435

\*Corresponding author: : Reza Tarinejad.

Email address: r\_tarinejad@tabrizu.ac.ir

## ۱- مقدمه

به دلیل اهمیت بسیار زیاد آب در ادامه حیات همه موجودات، از گذشته‌های دور تاکنون تلاش برای ساخت سد جهت کنترل و نگهداری آبهای سطحی و همچنین تولید انرژی از این مایع حیاتی ادامه داشته و حائز اهمیت بوده است. یکی از سدهای بتنی محبوب به دلیل شرایط اقتصادی در ساخت و همچنین زیبایی خاص خود از نظر مهندسی، سدهای بتنی قوسی می باشند. به دلیل هزینه‌های بسیار بالای ساخت، نگهداری و ترمیم و همچنین شدت خسارت ناشی از تخریب این سازه‌های عظیم، بررسی و شناخت دقیق از رفتار این سازه در برابر نیروهایی از جمله نیروی زمین لرزه را بسیار مهم می سازد. برای تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها معمولاً از تحریک یکنواخت ورودی در پی آن به عنوان عامل تحریک لرزه‌ای استفاده میکنند، این درحالی است که توسط محققین بسیاری نشان داده شده است که سازه‌های عظیم همچون سدها و پلها که دارای گستردگی زیاد در سطح زمین می باشند، در نقاط مختلف تکیه‌گاهی تحریک‌های مختلفی را تجربه کرده‌اند [۲۰۱]. در واقع نتایج حاصل از پردازش رکوردهای واقعی ثبت شده، نشان داده است که امواج رسیده به سطح زمین در نقاط مختلف از نظر دامنه و فاز دارای اختلاف می باشند. تحریک غیر یکنواخت تکیه‌گاهی منجر به ایجاد جابجایی‌های متفاوت در نقاط مختلف تکیه‌گاهی شده که می تواند منجر به ایجاد تنشهای اضافی در سازه مورد بررسی شود. برای بررسی تحریک غیریکنواخت سازه‌ها نیاز به دسترسی به داده‌های تاریخچه زمانی در نقاط مختلف می‌باشد که به علت عدم دسترسی به این داده‌ها انجام این تحلیل‌ها با مشکل مواجه می باشد.

تحقیقات زیادی برای پیش بینی تغییرات مکانی زمین لرزه و بررسی رفتار لرزه‌ای سازه تحت تحریک غیر یکنواخت براساس روش ارتعاش تصادفی انجام شده است. از جمله محققینی که در این زمینه تلاش کرده‌اند می توان به هاریچاندان و ونمارک [۱]، لوکو و وانگ [۳]، آبراهامسون [۴] و درکریقیان و همکاران [۵] اشاره کرد. درکریقیان [۵] در سال ۱۹۹۲ از روش طیفی برای بررسی تحریک غیر یکنواخت استفاده کردند. ایشان در روش خود اثرات عبور امواج، شرایط محیطی و همبستگی را اعمال کرده‌اند. هاریچاندان و همکاران [۷] به بررسی اثرات تحریک متفاوت تکیه‌گاهی روی پلها با دهانه‌های بلند پرداختند. از جمله محققینی که به طور مبسوط به بررسی اثرات تحریک چند تکیه‌گاهی با در نظر گرفتن اثرات اندرکش سازه و ساختگاه پرداختند، کامینگ بی و هائو [۹و۸] می باشند. ایشان در پژوهش خود به بررسی رفتار لرزه‌ای سازه پل که روی یک دره قرار گرفته بود، در مقایسه با تحلیل یکنواخت پرداخت. سپس با استفاده از طیف کانای-تاجیمی در روش ارتعاش تصادفی، شتابهای غیر یکنواخت شامل پارامترهای عبور موج، اثرات بزرگنمایی و تفرق امواج را تولید و اثرات این عوامل را روی سازه بررسی کرد. در سال ۲۰۱۴ چانهی و همکاران [۱۰] ابتدا یک مدل با ابعاد واقعی از توپوگرافی ساختگاه سد پاکویما را تهیه و سپس با استفاده از روش ارتعاش تصادفی جابجایی‌های یکنواخت و غیر یکنواخت ایجاد شده روی نقاط مختلف دره را ثبت کردند. ایشان در پژوهش خود نشان دادند که مکانیسم ورودی تحریک در کنار تهیه هر چه دقیقتر مدل از عوامل مهم در تدقیق نتایج با واقعیت می باشد.

بررسی خصوصیات تحریک چند تکیه‌گاهی و اثرات آن روی پاسخ های لرزه‌ای سازه‌هایی که دارای سطح تماس گسترده روی زمین می باشند همانند پلها، لوله‌های انتقال آب و سدها توسط محققینی از جمله لین و همکاران [۱۱] در سال ۱۹۹۷، کنالکی و درکریقیان

[۱۲] در سال ۲۰۱۲، آلوز [۱۳] در سال ۲۰۰۵ انجام شده است. در سال ۲۰۱۳ تازی نژاد و همکاران [۱۴] با استفاده از الگوریتم عددی جدید به تولید سری های زمانی در نقاط مختلف تکیه‌گاه سد پاکویما با اعمال تاخیر زمانی پرداختند. ایشان در پژوهش خود از روش المان مرزی سه بعدی استفاده کرد. از ویژگی‌های کار ایشان ترکیب مولفه های مختلف امواج برشی برای تولید سری های زمانی دقیق روی ساختگاه می باشد. در سالهای اخیر نیز برای شبیه سازی تحریک چند تکیه‌گاهی پژوهشهایی توسط محققین ارائه شده است. وو و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۶ مطالعه پارامتریک جامعی روی دره‌های مثلثی شکل به صورت دوبعدی تحت امواج برشی انجام دادند. ایشان در پژوهش خود به مقایسه دو روش ارتعاش تصادفی و تحلیلی پرداخت. با استفاده از هر دو روش شتاب نگاشت هایی را تولید و با یکدیگر مقایسه نمود. در سال ۲۰۱۷ لیو جوهان و همکاران [۱۶] به بررسی تحلیلی اثرات ساختگاهی روی تحریک چند تکیه‌گاهی پرداختند. سپس ایشان رابطه‌ای را برای طیف ارتباطی متناسب با ساختگاههای دره‌ای شکل ارائه کردند. تازی نژاد و همکاران [۱۷] نیز در سال ۲۰۱۷ با استفاده از روش عددی قدرتمند المان مرزی به بررسی جامع روی رفتار دینامیکی دره‌های منشوری و غیرمنشوری تحت تحریک غیر

یکنواخت تکیه گاهی پرداختند. هر چند تاکنون پژوهش های بسیاری با استفاده از روش های مختلف بخصوص ارتعاش تصادفی برای تولید و شبیه سازی شتاب نگاشتهای غیر یکنواخت انجام شده است. اما با این وجود بررسی اثرات تحریک چند تکیه گاهی روی رفتار لرزه ای سدهای بتنی قوسی علاوه بر اهمیت بسیار زیاد، چندان مورد توجه قرار نگرفته است. در این پژوهش با استفاده از روش ارتعاش تصادفی و بکارگیری طیف کانای-تاجیمی، شتابهای غیر یکنواخت متناسب با ساختگاه مورد بررسی تولید و روی سد بتنی قوسی مدل شده در نرم افزار المان محدود آباکوس اعمال و اثرات آن در حالت های مخزن خالی و پر، بررسی می شود.

## ۲- تولید شتابهای چند تکیه گاهی

تحریک متفاوت زمین لرزه بر روی یک بستر سنگی به صورت یک فرایند مانا با میانگین صفر که دارای تابع چگالی طیف توان مشابه می باشد، فرض می شود. این فرض با توجه به فاصله زیاد منبع تا ساختگاه که معمولاً از ابعاد سازه بزرگتر است، منطقی به نظر میرسد [۹و۸]. تابع چگالی طیف توان متقاطع برای تحریک زمین لرزه برای یک ساختگاه در  $n$  تکیه گاه به صورت ۱ نوشته می شود.

$$S(i\omega) = \begin{bmatrix} s_{11}(\omega) & s_{12}(i\omega) & \dots & s_{1n}(i\omega) \\ s_{21}(i\omega) & s_{22}(\omega) & \dots & s_{2n}(i\omega) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n1}(i\omega) & s_{n2}(i\omega) & \dots & s_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این رابطه  $S_{ij}(i\omega)$  و  $S_{ii}(\omega)$ ،  $i, j = 1 \dots n$  به ترتیب تابع چگالی طیف توان متقاطع و تابع چگالی طیف توان خود ارتباطی می باشند، که از رابطه ۲ تعیین می شوند.

$$S_{ii}(\omega) = |H_i(i\omega)|^2 S_g(\omega) \quad (2)$$

$$S_{ij}(i\omega) = H_i(i\omega) H_j^*(i\omega) S_g(\omega) \gamma_{ij}(d_{ij}, i\omega) \quad (3)$$

در این رابطه  $H_i(i\omega)$  و  $H_j(i\omega)$  عبارتند از تابع انتقال بین دو تکیه گاه،  $S_g(\omega)$  تابع چگالی طیف توان تحریک زمین و  $\gamma_{ij}$  تابع طیف ارتباطی بر روی بستر سنگی در تحریک متفاوت تکیه گاهی می باشند. ماتریس چگالی طیف توان  $S(i\omega)$  یک ماتریس هرمیتی می باشد، که به صورت حاصل ضرب دو ماتریس پایین مثلثی در ماتریس هرمیتی آن نوشته می شود.

$$S(i\omega) = L(i\omega) L^H(i\omega) \quad (4)$$

تجزیه این ماتریس با استفاده از روش چولسکی انجام و سپس درایه های ماتریس پایین مثلثی به صورت ۵ نوشته می شود.

$$L(i\omega) = \begin{bmatrix} L_{11}(\omega) & 0 & \dots & 0 \\ L_{21}(i\omega) & L_{22}(\omega) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1}(i\omega) & L_{n2}(i\omega) & \dots & L_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$L_{ii}(\omega) = \left[ S_{ii}(\omega) - \sum_{k=1}^{i-1} S_{ik}(i\omega) S_{ik}^*(i\omega) \right]^{1/2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$L_{ij}(i\omega) = \frac{S_{ij}(i\omega) - \sum_{k=1}^{i-1} S_{ik}(i\omega)S_{jk}^*(i\omega)}{S_{jj}(\omega)}, j = 1, 2, \dots, i \quad (7)$$

بعد از تعیین درایه های ماتریس مثلثی، سری های زمانی برای تکیه گاههای مختلف با استفاده از رابطه ۸ تعیین می شود.

$$u_i(t) = \sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^N A_{im}(\omega_n) \cos[\omega_n t + \beta_{im}(\omega_n) + \varphi_{mn}(\omega_n)] \quad (8)$$

در این رابطه  $A_{im}(\omega)$  برابر دامنه و  $\beta_{im}(\omega)$  فاز سری زمانی تولید شده می باشند.  $\varphi_{mn}(\omega_n)$  فاز تصادفی و  $n$  تعداد فرکانسهای گسسته شده می باشد [۹ و ۸].

$$A_{im}(\omega) = \sqrt{4\Delta\omega} |L_{im}(i\omega)|, 0 \leq \omega \leq \omega_N \quad (9)$$

$$\beta_{im}(\omega) = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}[L_{im}(i\omega)]}{\text{Re}[L_{im}(i\omega)]} \right), 0 \leq \omega \leq \omega_N \quad (10)$$

در روش های ارتعاش تصادفی برای محاسبه تحریک متفاوت تکیه گاهی به محاسبه تابع چگالی طیفی توان متقاطع بین نقاط تکیه گاهی نیاز داریم. ارتباط بین توابع چگالی طیف توان متقاطع و خود ارتباطی ما بین دو تکیه گاه  $n, m$  به صورت (۱۱) توسط تابع ارتباطی بیان می شود.

$$S_{mn}(d, \omega) = S_g(\omega) \gamma_{mn}(\omega) \quad (11)$$

برای تعریف  $S(\omega)$  از طیف اصلاح شده ارتعاش سنگید کانای-تاجیمی استفاده می شود. کانای و تاجیمی رابطه ای به شکل زیر را برای محاسبه چگالی طیف توان ارائه کرده اند [۹ و ۸].

$$S_g(\omega) = \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + (2\omega_f \omega \xi_f)^2} \frac{1 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \Gamma \quad (12)$$

در رابطه بالا  $\Gamma$  بزرگی تحریک سنگ بستر،  $\omega_f, \omega_g, \xi_f$  و  $\xi_g$  پارامترهای مربوط به خاک محیط می باشند، که برای بیان شرایط محیطی در انتشار امواج بکار می رود. تابع طیف ارتباطی بین دو ایستگاه با فرض سرعت انتشار موج C از رابطه ۱۴ تعیین می شود. با توجه به نوع خاک، پارامترهای فیلتر در طیف اصلاح شده کانای-تاجیمی به صورت جدول ۲ در نظر گرفته می شود.

جدول ۱- پارامترهای فیلتر تابع چگالی طیف توان با توجه به نوع خاک.

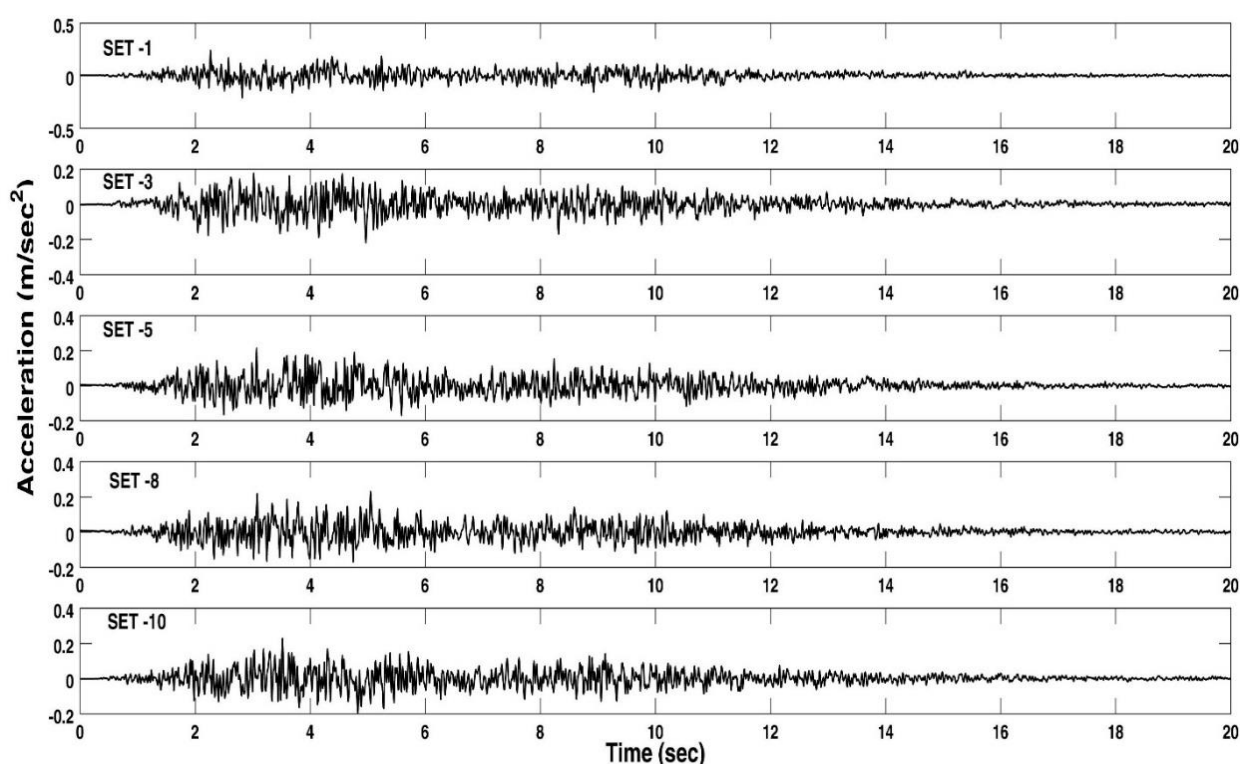
نوع خاک	$\omega_f$	$\omega_g$	$\xi_f$	$\xi_g$
سنگ سخت	۵	۱	۰/	۰/

$$\gamma_{mn}(d, \omega) = |\gamma(d, \omega)| e^{-i\omega d/c} \quad (13)$$

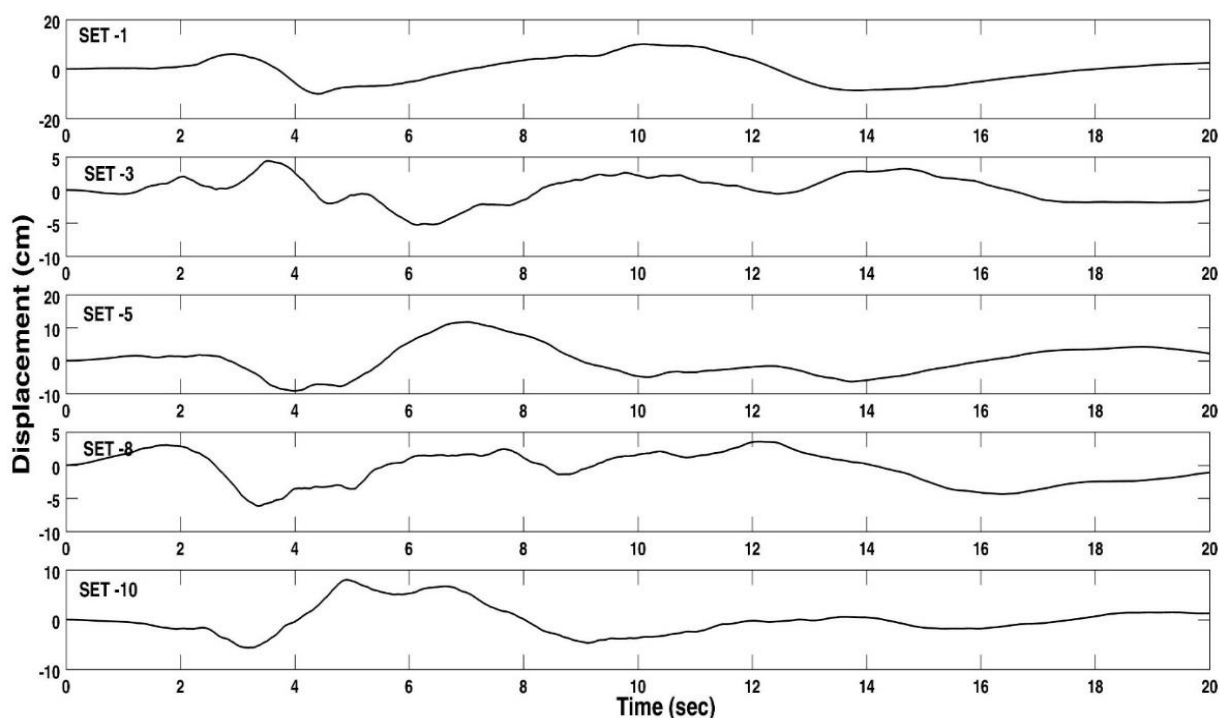
بخش نمایی رابطه ۱۳ نشان دهنده اثرات عبور موج یا تاخیر زمانی می باشد. برای عبارت داخل قدرمطلق تاکنون مدل‌های مختلفی تجربی و تحلیلی ارائه شده است. در پژوهش حاضر از مدل سابزیک [۹ و ۸] برای بیان طیف ارتباطی بین ایستگاههای مختلف استفاده میشود.

$$|\gamma_{ij}(i\omega)| = e^{-\beta\omega d_{ij}^2/c} \quad (14)$$

برای انجام تحلیل غیریکنواخت ۱۰ مجموعه شتاب مختلف تولید و در راستای محور  $y$  (شکل ۳) روی مرز فونداسیون در ۱۰ قسمت مختلف در فواصل ۱۰۰ متری، به مدل اعمال شد. در شکل‌های ۱ و ۲ نمونه‌ای از شتابها و جابجایی‌های تولید شده، ارائه شده است.



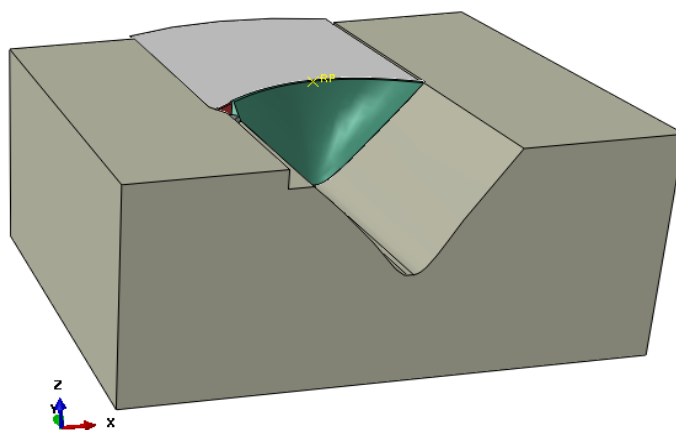
شکل ۱- شتابهای تولید شده بر روی سنگ بستر در راستای افقی.



شکل ۲- جابجایی های تولید شده بر روی سنگ بستر در راستای افقی.

### ۳- مدلسازی سد بتنی

در پژوهش حاضر سد بتنی کارون ۴ که بلندترین سد بتنی دوقوسی کشور می باشد، برای مدلسازی انتخاب شد. ارتفاع این سد ۲۳۰٫۵ و طول تاج ۴۴۰ متر است. این سد بر روی رودخانه کارون در استان چهارمحال و بختیاری و در فاصله ۶۷۰ کیلومتری ریزشگاه رودخانه کارون به خلیج فارس احداث شده است.



شکل ۳- تصویر سد، مخزن و فونداسیون مدل شده .

در جدول یک مشخصات مصالح سد کارون ۴ ارائه شده است. در مدل المان محدود تهیه شده از سد کارون ۴، ارتفاع سطح آب مخزن در طی تحلیل در تراز نرمال و طول آن نیز دوبرابر ارتفاع سد در نظر گرفته شد. در این مدل، برای سد بتنی ۷۷۷۶ المان سه بعدی تتراهدرون و همچنین ۳۲۱۲۶ المان آکوستیک تتراهدرون برای مخزن استفاده شد. برای شرایط مرزی انتهای دور مخزن از شرط مرزی شاران بجای

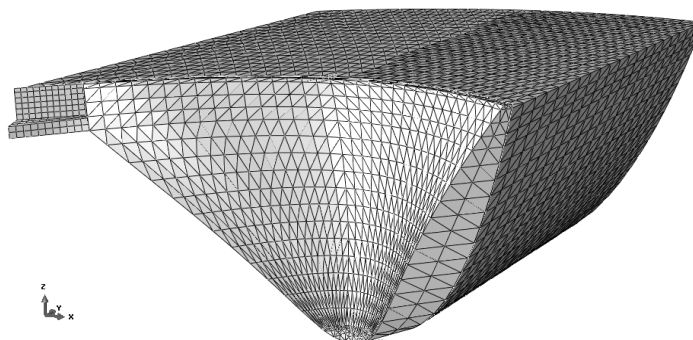
شرط مرزی سامرفیلد استفاده شد. در تقسیم بندی بر اساس سطح خطر نسبی زلزله در آیین نامه ۲۸۰۰، منطقه ساخت سد کارون ۴ جزو مناطق با خطر نسبی زلزله زیاد تقسیم بندی شده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح سد و مخزن کارون ۴

۲۴۰۰ kg/m <sup>3</sup>	جرم حجمی	بتن بدنه
۲۴ GPa	مدول الاستیسیته	
۰/۲	ضریب پواسون	
۱/۱۲	ضریب آلفای میرایی	
۰/۰۰۴۲	ضریب بتای میرایی	آب
۱۰۰۰	جرم حجمی	
۲/۰۷ GPa	مدول بالک	
۷۸۰۰ kg/m <sup>3</sup>	جرم حجمی	
۲۰۹ GPa	مدول الاستیسیته	دریچه
۰/۳	ضریب پواسون	

#### ۴- صحت سنجی مدل

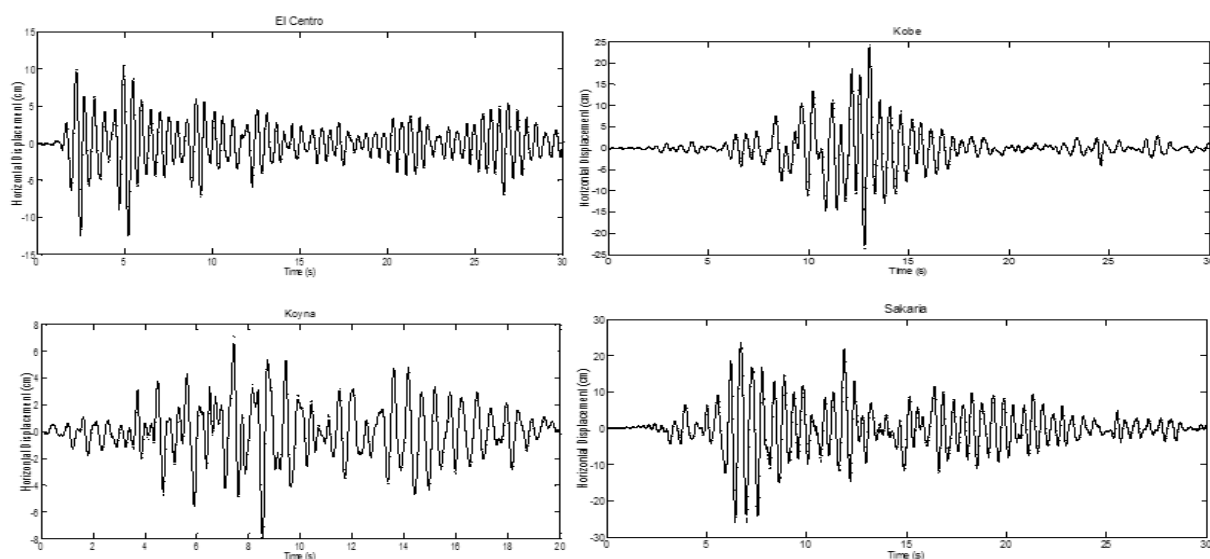
به منظور صحت سنجی مدل تهیه شده و اطمینان از نتایج به دست آمده از تحلیل‌های المان محدود، ابتدا در این تحقیق آنالیز استقلال مش برای ریز کردن المان‌ها انجام شده است، تا پاسخ‌های سد مستقل از مش شوند. مش نشان داده شده در شکل ۴ مش بهینه‌ای بوده و با ریزتر کردن آن تغییر قابل ملاحظه‌ای در پاسخ‌های سد مشاهده نشده است. تعداد کل المان‌ها ۳۹۹۰۲ المان می‌باشد. به دلیل عدم دسترسی به داده‌های واقعی روی سد برای مقایسه، مدل المان محدود تهیه شده تحت شتابهای مختلفی قرار گرفت تا رفتار دینامیکی سد مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.



شکل ۴- مدل المان محدود سد کارون ۴ همراه با مخزن [۱۸].

در ادامه، نتایج تست مدل با رکوردهای چند زلزله معروف ارائه می‌گردد. طول تمام زلزله‌ها ۳۰ ثانیه بوده، بجز زلزله‌ی کوینا که طول آن ۲۰ ثانیه می‌باشد. نتایج حاصل شده از این تحلیل‌ها، تحت زلزله‌های مختلف هرچند با نمونه ثبت شده‌ای مقایسه نشده‌اند (به دلیل عدم وجود داده ثبت شده روی سد) ولی نشان دهنده رفتار مورد انتظار (میزان جابجایی‌ها در محدوده منطقی) از مدل می‌باشد، که بیانگر اطمینان به مدل تهیه شده از سد-مخزن و فونداسیون در برنامه آباکوس می‌باشد.

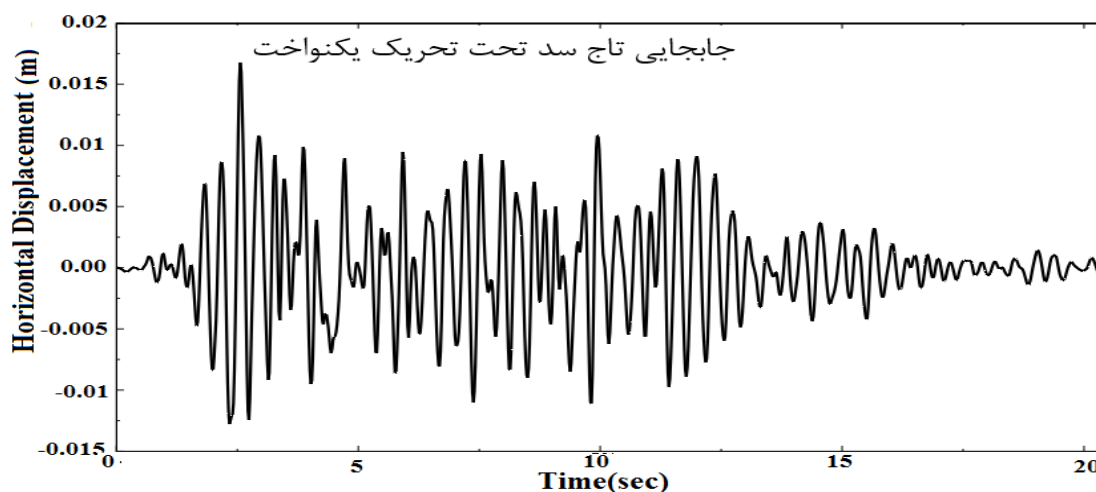




شکل ۵- نتایج جابجایی های مشاهده شده در تاج سد تحت زلزله های مختلف.

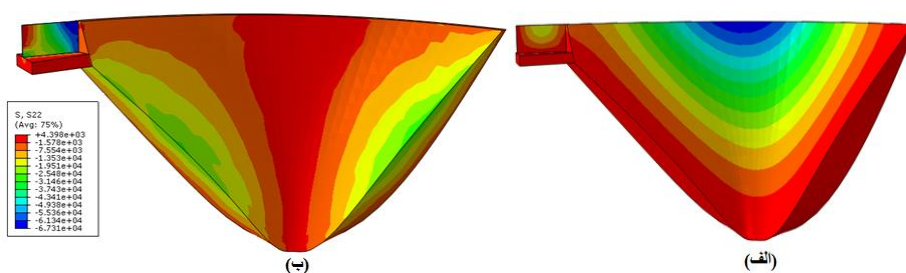
## ۵- نتایج تحلیل

۵-۱- در این بخش نمونه مدل شده سد کارون ۴ تحت تحلیل های یکنواخت و غیریکنواخت در حالی که مخزن در نظر گرفته نشده، بررسی و تحلیل می شود. نتایج حاصل شده، برای دو فاکتور جابجایی و تنش در راستای جریان ارائه شده اند. چنانکه در شکل ۶ دیده می شود، تاج سد در حالت تحریک یکنواخت و مخزن خالی، در ثانیه  $2/5$  ماکسیمم جابجایی برابر  $0/0175$  متر را تجربه کرده است.



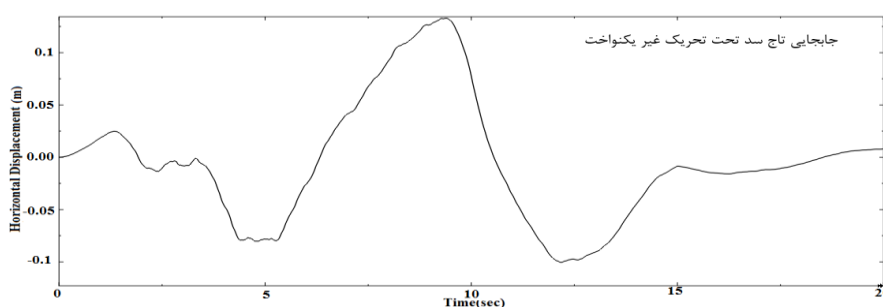
شکل ۶- نمودار جابجایی تاج سد تحت تحریک یکنواخت در حالت مخزن خالی.

در ادامه نتایج به دست آمده در این قسمت، نحوه توزیع تنش و جابجایی در راستای جریان در شکل ۷ آورده می شود. چنانکه در شکل ۷ نشان داده می شود، توزیع جابجایی ها بخصوص روی دیواره سد در دو سمت آن، به صورت یکنواخت در آمده است. در شکل ۷ قسمت ب نیز توزیع تنش در حالت تحریک یکنواخت، تقریباً به صورت متقارن بر روی بدنه سد در آمده است.



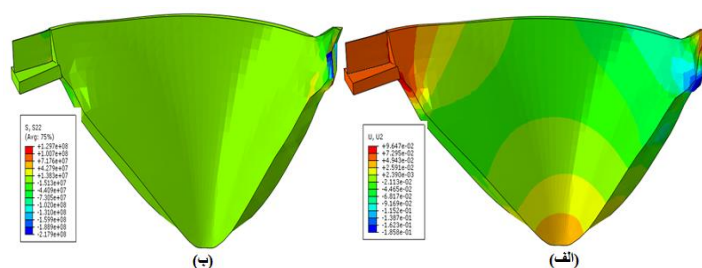
شکل ۷- الف) نحوه توزیع جابجایی تاج سد، ب) نحوه توزیع تنش تحت تحریک یکنواخت در حالت مخزن خالی.

۵-۲- در ادامه تحلیل های انجام شده در این بخش، سد در حالت مخزن خالی تحت تحریک غیر یکنواخت قرار میگیرد. شکل ۸ نمودار جابجایی تاج سد را در این وضعیت نشان می دهد. چنانکه نشان داده می شود، حداکثر جابجایی در ثانیه  $9/63$  برابر مقدار  $13$  سانتی متر است. از مقایسه تحلیل یکنواخت و غیر یکنواخت در حالت مخزن خالی می توان مشاهده کرد که تحلیل غیر یکنواخت منجر به ایجاد تغییر شکل بیشتری در سازه مورد بررسی شده است.



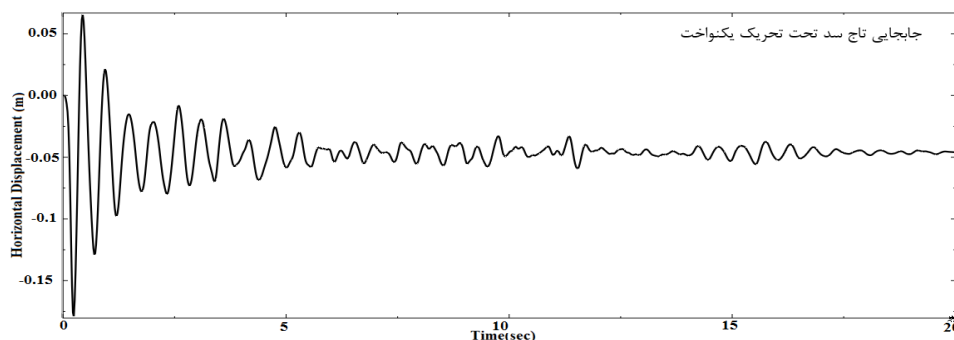
شکل ۸- نمودار جابجایی تاج سد تحت تحریک غیر یکنواخت در حالت مخزن خالی.

در ادامه نتایج به دست آمده، نحوه توزیع تنش و جابجایی در راستای جریان در شکل ۹ آورده می شود. چنانکه در شکل ۹ نشان داده می شود، توزیع جابجایی ها بخصوص روی دیواره سد در دو سمت آن، در مقایسه با حالت یکنواخت تغییر بسیار محسوسی را دارا می باشد. در شکل ۹ قسمت (ب) نیز توزیع تنشها در حالت تحریک غیر یکنواخت، افزایش نسبتا محسوسی را در مقایسه با بخش قبل نشان می دهد.



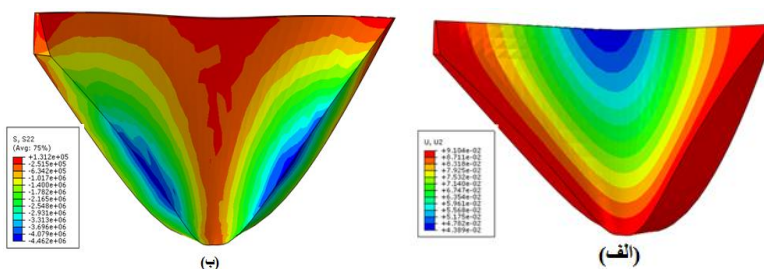
شکل ۹- الف) نحوه توزیع جابجایی تاج سد، ب) نحوه توزیع تنش تحت تحریک غیر یکنواخت در حالت مخزن خالی.

۵-۳- در این بخش تحلیل های مربوط به تحریک یکنواخت سد به همراه مخزن پر، ارائه شده است. شکل ۱۰ جابجایی تاج سد در وضعیت بررسی شده را نشان می دهد. چنانکه در شکل دیده می شود، وجود مخزن موجب افزایش جابجایی در تاج سد در مقایسه با حالت های قبلی، شده است. ماکسیمم جابجایی ایجاد شده در سد برابر  $17/5$  سانتی متر ثبت شده است. چنانکه از نمودار تاریخچه زمانی تحلیل قابل مشاهده است، ماکسیمم جابجایی در لحظات اولیه تحریک ثبت شده و با گذشت زمان از میزان دامنه جابجایی کاسته شده است.



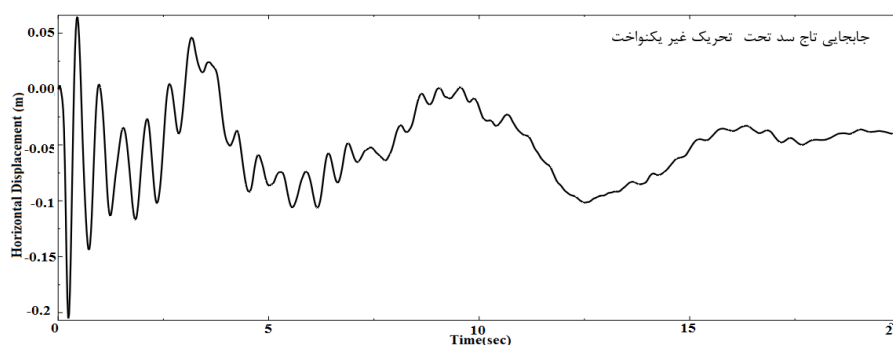
شکل ۱۰- نمودار جابجایی تاج سد تحت تحریک یکنواخت در حالت مخزن پر.

شکل ۱۱ نحوه توزیع تنش و جابجایی در راستای جریان بر روی بدنه سد در حالت مخزن پر را نشان می دهد. چنانکه در شکل ۱۱ نشان داده می شود، توزیع جابجایی ها بخصوص روی دیواره سد در دو سمت آن در مقایسه با حالت های بررسی شده در حالت مخزن خالی، افزایش محسوسی را در نقاط مختلف روی سد نشان میدهد. این رفتار لرزه ای سد را می توان به دلیل اثرات اندرکنش با مخزن توجیه کرد. در شکل ۱۱ قسمت (ب) نیز توزیع تنشها در حالت تحریک یکنواخت، افزایش نسبتاً محسوسی را در مقایسه با مخزن خالی نشان می دهد.



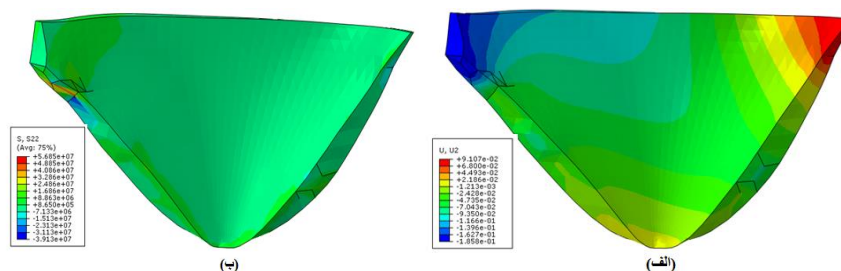
شکل ۱۱-الف) نحوه توزیع جابجایی تاج سد، ب) نحوه توزیع تنش تحت تحریک یکنواخت در حالت مخزن پر.

۴-۵- در ادامه تحلیل های صورت گرفته نتایج مربوط به تحریک غیر یکنواخت سد به همراه مخزن پر، ارائه شده است. شکل ۱۲ جابجایی تاج سد در وضعیت بررسی شده را نشان می دهد. چنانکه در شکل دیده می شود، وجود مخزن در حالت تحریک غیر یکنواخت در مقایسه با حالت بدون مخزن موجب افزایش نوسان و دامنه جابجایی در تاج سد، شده است. ماکسیمم جابجایی ایجاد شده در سد برابر ۲۰ سانتی متر ثبت شده است. چنانکه از نمودار تاریخچه زمانی تحلیل قابل مشاهده است با گذشت زمان از میزان نوسان و دامنه جابجایی کاسته شده است. افزایش دامنه جابجایی و نوسان در این حالت را می توان مرتبط با اثرات اندرکنش مخزن و سازه دانست.



شکل ۱۲- نمودار جابجایی تاج سد تحت تحریک غیر یکنواخت در حالت مخزن پر.

شکل ۱۳ چگونگی توزیع تنش و جابجایی در راستای جریان بر روی بدنه سد در حالت مخزن پر را نشان می دهد. چنانکه در شکل ۱۳ نشان داده می شود، توزیع جابجایی ها بخصوص روی دیواره سد در دو سمت آن در مقایسه با حالت های بررسی شده در حالت مخزن خالی، افزایش محسوسی را در نقاط مختلف روی سد نشان میدهد. این رفتار لرزه ای سد را می توان به دلیل اثرات اندرکنش با مخزن توجیه کرد. در شکل ۱۳ قسمت (ب) نیز توزیع تنشها در حالت تحریک غیر یکنواخت، نسبت به حالت مخزن خالی، افزایش را نشان می دهد. در جدول ۳ ماکسیمم جابجایی تجربه شده در اثر تحلیل های دینامیکی در حالت های مختلف، ارائه شده است.



شکل ۱۳- الف) نحوه توزیع جابجایی تاج سد، ب) نحوه توزیع تنش تحت تحریک غیر یکنواخت در حالت مخزن پر.

جدول ۳- ماکسیمم جابجایی (بر حسب متر) مشاهده شده ناشی از تحلیل دینامیکی سد کارون ۴

۰/۰۱۷۵	مخزن خالی	تحلیل یکنواخت
۰/۱۷۵	مخزن پر	
۰/۱۳	مخزن خالی	تحلیل غیر یکنواخت
۰/۲	مخزن پر	

## ۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از روش ارتعاش تصادفی و بکارگیری طیف کانای-تاجیمی، شتابهای غیر یکنواخت در نقاط مختلف یک ساختگاه بر روی بستر سنگی و منطبق بر سطح خطر نسبی زلزله تولید شد. در ادامه با استفاده از نرم افزار قدرتمند المان محدود آباکوس مدل سه بعدی دقیق از سد، مخزن و فونداسیون سد کارون ۴ آماده شد. شتابهای تولید شده به مدل آماده شده، در دو حالت مخزن خالی و پر، برای بررسی اثرات اندرکنش بین سازه و مخزن، به صورت تحریک های یکنواخت و غیر یکنواخت تکیه گاهی، اعمال شدند. نتایج حاصل شده نشان می دهد که، نسبت جابجایی ماکسیمم در حالت تحریک غیر یکنواخت تکیه گاهی به حالت تحریک یکنواخت هنگامی که مخزن پر باشد، تقریباً برابر ۱/۱۵ و این نسبت هنگامی که مخزن خالی باشد، برابر ۷/۵ شده است. علاوه بر این نشان داده شد که، در تحلیل یکنواخت اثرات وجود مخزن موجب افزایش چشمگیر جابجایی ها در تاج سد شده به گونه ای که تقریباً موجب ۱۰ برابر شدن جابجایی ها شده است. این افزایش در حالت تحریک غیر یکنواخت تکیه گاهی برابر ۱/۵۳ محاسبه شده است. در حالت کلی نشان داده شد که تحریک های چند تکیه گاهی اثرات قابل توجهی روی رفتار لرزه ای سازه بخصوص وقتی که مخزن سد خالی باشد، دارا می باشند، و باید برای هرچه واقعی تر کردن طراحی های لرزه ای در تحلیل ها در نظر گرفته شوند.

## مراجع

- [1] Harichandran RS, Vanmarcke EH. (1986) *Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time*. Journal of the Engineering Mechanics Division. 112:154–74.
- [2] Zerva, A. (2009) *Spatially variation of seismic ground motions: Modeling and engineering applications*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- [3] Luco, J.E., and Wong, H. L. (1986) *Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.14, 891-908.
- [4] Abrahamson NA. (1993) *Spatial variation of multiple support inputs*. In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> US Seminar on Seismic Evaluation and Retrofit of Steel Bridges*, San Francisco, CA.
- [5] Der Kiureghian A, Neuenhofer A. (1992) *Response spectrum method for multiple- support seismic excitation*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 21:712–40.
- [6] Der Kiureghian, A. (1996) *A coherency model for spatially varying ground motions*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics **25**, 99–111.
- [7] Harichandran, R. S., Hawwari, A., and Sweidan, B. N. (1996) *Response of long-span bridges to spatially varying ground motion*. J. Struct. Eng., 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:5(476), 476–484.
- [8] Bi, K. and Hao, H. (2011) *Influence of irregular topography and random soil properties on coherency loss of spatial seismic ground motions*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics **40**, 1045–1061.
- [9] Bi, K. and Hao, H. (2012) *Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with vary conditions*, Probabilistic Engineering Mechanics 29, 92–104.
- [10] He, C., Wang, J., Zhang, C and Jin., F. (2014) *Simulation of broadband seismic ground motions at dam canyons by using a deterministic numerical approach*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 0267-7261.
- [11] Lin, J., Li, J., Zhang, W. and Williams, F. W. (1997) *Random seismic responses of multi-support structures in evolutionary inhomogeneous random fields*, Earthquake engineering & structural dynamics 26(1), 135-145.
- [12] Konakli, K., and Der Kiureghian, A. (2012). *Simulation of spatially varying ground motions including inherence, wave-passage and differential site-response effects*. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 41(3), 495–513.
- [13] Alves, S.W. (2005) *Nonlinear analysis of Pacoima Dam with spatially non-uniform ground motion*, PhD Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- [14] Tarinejad, R, Fatehi R and Harichandarn, R.S. (2013) *Response of an arch dam to non-uniform excitation generated by a seismic wave scattering model*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 52, Pages 40-54.
- [15] Wu, Y., Gao, Y, Zhang, N, Li, D. (2016) *Simulation of Spatially Varying Ground Motions in V-shaped Symmetric Canyons*. Journal of Earthquake Engineering, 00:1–19.
- [16] Liu, G., Feng, X., Jijian., L. and Haitao., Z. (2017) *Simulation of Spatially Variable Seismic Underground Motions in U-shaped Canyons*, Journal of Earthquake Engineering, DOI: 10.1080/13632469.2017.1326427.
- [17] Tarinejad, R., Isari, M., TaghaviGhalesari, A. (2017) *A new boundary element solution to evaluate the geometric effects of the canyon site on the displacement response spectrum*, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, In press.
- [18] Tarinejad, R., Mahjoob, H., Roshanravan, A. (2015) *Development of a Neural-Autoregressive Model for Time History Analysis of an Arch Dam-Reservoir System*, 10th International Congress on Civil Engineering, 5-7, University of Tabriz, Tabriz, Iran.