

ارزیابی لرزه‌ای رفتار برج آبگیر استوانه‌ای تحت اثر زلزله‌های میدان دور و نزدیک با در نظر گرفتن طوقه‌های بتنی و اندرکنش آب-سازه

احسان تیموری^{۱*} سعید عباسی^۲

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

۲. استادیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

*Eteymouri@znu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۱/۴

تاریخ دریافت: ۹۹/۸/۵

چکیده

در این مطالعه به بررسی آثار طوقه‌های بتنی و نیز زلزله میدان دور و نزدیک بر رفتار لرزه‌ای برج آبگیر پرداخته شده است. برای مدلسازی و آنالیز با در نظر گرفتن اندرکنش آب و سازه، از نرم‌افزار ANSYS که مبتنی بر روش اجزای محدود هست استفاده شده است. برای آنالیز بهتر این مدل‌ها دو زلزله میدان دور و نزدیک انتخاب شده و به یک شتاب یکسان مقیاس شده‌اند. در ادامه ۶۶ آنالیز برای سه حالت برج اعم از فقط سازه برج آبگیر بدون مخزن، برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل برج خالی و برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل برج پر انجام گرفته است. نتایج حاصل از تغییر مکان، تنش و عکس العمل تکیه‌گاهی برج آبگیر تحت آنالیزهای مربوطه با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که آثار زلزله میدان نزدیک در ماکزیمم تغییر مکان، تنش و عکس العمل تکیه‌گاهی به مراتب بیش‌تر از زلزله میدان دور است با این وجود مقادیر پاسخ‌ها به محتوای فرکانسی زلزله علاوه بر میدان نزدیک بودن آن بستگی دارد. همچنین نتایج نشان داد که افزودن طوقه‌های بتنی در ترازهای بالا و نزدیک به هم آثار خیلی خوب و مثبتی داشته و باعث کاهش مقادیر ماکزیمم تنش‌ها، عکس العمل تکیه‌گاهی، تغییر مکان‌ها و نیز تغییر مکان نسبی می‌شود.

واژگان کلیدی: برج آبگیر، طوقه بتنی، مدلسازی المان محدود، اندرکنش آب و سازه، زلزله میدان دور و نزدیک

۱- مقدمه

است. پژوهشگران مطالعات بسیاری را در حوزه ارزیابی عملکرد برج‌های آبگیر انجام داده‌اند [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. این پژوهشگران بیش‌تر روی سازه‌های موجود تمرکز کرده و رفتار آن را بسته به شرایط مختلف ساختگاه، ارتفاع برج آبگیر، شرایط مخزن، فاصله سد از برج آبگیر و تراز آب بررسی قرار دادند و کم‌تر روی پارامترهای دیگری اعم از آثار طوقه

برج‌های آبگیر جزء بخش‌های اساسی سدها به حساب می‌آیند و جریان آب خروجی از مخزن سدها را تامین می‌نمایند. از آنجایی که تامین آب مورد نیاز پس از زمین لرزه از اهمیت زیادی برخوردار است از این رو ارزیابی لرزه‌ای برج آبگیر و قابلیت خدمت‌دهی آن‌ها پس از زمین‌لرزه بسیار حائز اهمیت

که مقادیر تغییر مکان در حالات زلزله میدان نزدیک به مراتب بیش تر از زلزله میدان دور است [20]. هر چند مطالعات زیادی حوزه زلزله های میدان دور و نزدیک انجام شده است اما در مورد برج های آبگیر و برج های آبگیر با سازه های متصل به آنها این مطالعات کم تر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از این رو در این مطالعه آثار زلزله میدان دور و نزدیک بر پاسخ لرزه ای برج آبگیر با استفاده از نرم افزار ANSYS و برای 33 مدل ساخته شده در این نرم افزار اعم از برج آبگیر بدون طوقه بتنی و برج آبگیر با طوقه بتنی در چهار تراز ارتفاعی مختلف بررسی شده است.

۲- شرایط مرزی و معادلات حاکم

معادلات حاکم بر سیستم کوپل اندرکنش سازه- سیال و شرایط مرزی آن در شکل (۱) نشان داده شده است. در شکل مزبور حوزه سازه با Ω_s نشان داده شده است و شامل سازه برج آبگیر است، سیال نیز با Ω_w نشان داده شده است که شامل آب پیرامونی با مرز نامحدود و آب داخل برج است. معادلات حاکم بر حوزه سازه بر پایه تغییر مکان و فرمولاسیون لاگرانژی می باشد:

$$\nabla \cdot \sigma - \rho_s \ddot{u} = 0 \quad (1)$$

در رابطه بالا σ ، u و ρ_s به ترتیب تانسور تنش کوشی، بردار تغییر مکان و چگالی جامد هستند. معادله حاکم بر حوزه سیال از فرمولاسیون اویلری بر پایه فشار با فرض جابجایی های کوچک، غیرلزج بودن سیال صرف نظر از تغییرات زمانی و مکانی دانسیته آب استفاده می کند که به صورت زیر ارائه می شود:

$$\nabla \cdot p - \frac{1}{c^2} \ddot{p} = 0 \quad (2)$$

در رابطه بالا P فشار سیال و C سرعت صوت در سیال است. سه شرط مرزی اصلی برای سیال در شکل (۱) نشان داده شده است که عبارت از شرط مرزی سطح آزاد سیال Γ^{wf} ، شرط مرزی اندرکنش سازه و سیال Γ^{WSI} و شرط مرز دور Γ^{LF} هستند. برای سطح آزاد سیال با نادیده در نظر گرفتن نوسانات سطحی شرط مرزی $P=0$ می تواند برای مرز Γ^{wf} در نظر گرفته

بتنی و آثار زلزله میدان دور و نزدیک بر رفتار لرزه ای برج آبگیر تمرکز کرده اند. ارجمندی و کلانتری الگوی رشد ترک در سد قوسی OKHURA و برج آبگیر متصل به آن را تحت آنالیز لرزه ای ارزیابی کردند. نتایج کار آنها نشان داد که الگوهای ترکیبی ترک در محل اتصال المان افقی برج آبگیر به بدنه سد ایجاد شده که منجر به بروز ترک در عمق بدنه نیز می شود. [10]. پیرهادی و عالم باقری در سال 2019 یک سیستم کوپل دینامیکی از پل بتنی برج آبگیر و اندرکنش با آب مخزن و فونداسیون را به صورت عددی با در نظر گرفتن یک برج آبگیر مستغرق در مخزن و یک پل دسترسی متصل شده به بالای برج را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج کار آنها نشان داد که حضور پل به صورت قابل ملاحظه ای روی پاسخ دینامیکی برج تاثیر دارد [11]. تاثیر حرکات زمین نزدیک به گسل در بسیاری از سازه های مهندسی عمران مانند ساختمان ها و پل ها و غیره مورد بررسی قرار گرفته است [14, 15]. مانیاتاکیس و همکاران برای رکوردهای ثبت شده بین سال های ۱۹۷۵ الی ۱۹۹۹ در کشور یونان معیارهای تعیین رکوردهای زلزله میدان نزدیک را به کار بردند [16]. قائم مقامیان و خلیلی شبیه سازی حرکات توانمند زمین در حوزه نزدیک گسل را به وسیله مدل کامپیوتری معرفی نمودند [17]. آکوسه و شیمشک یک سد بتنی وزنی را تحت بارگذاری لرزه ای زلزله میدان دور و نزدیک و با در نظر گرفتن آثار اندرکنش سد-آب-رسوبات و فونداسیون مورد بررسی قرار دادند نتایج کار آنها نشان داد که تغییر شکل ها تحت اثر زلزله میدان نزدیک از زلزله میدان دور بیشتر است [18]. مرادلو و حسینی آثار زلزله های میدان دور و نزدیک را بر پاسخ غیرخطی سدهای بتنی وزنی با در نظر گرفتن پی بدون جرم و پی صلب مورد مطالعه قرار دادند. نتایج کار آنها حاکی از این بود که هر چند در بیشتر حالات آثار زلزله های میدان نزدیک بر پاسخ لرزه ای سد به مراتب بیش تر از حالات زلزله میدان دور است اما باید زلزله های مزبور از لحاظ دانسیته انرژی معین، محتوای فرکانسی و احتمال رخداد تشدید مورد بررسی قرار گیرند [19]. کارابولوت و همکاران در سال ۲۰۱۶ تحلیل لرزه ای سد بتنی قوسی را با در نظر گرفتن آثار فونداسیون تحت زلزله میدان دور و نزدیک انجام دادند نتایج کار آنها نشان داد

گسترش مولد زلزله نسبت به ساختگاه متغیر است از این رو فاصله زلزله از ساختگاه سازه به تنهایی نمی‌تواند مبین زلزله میدان دور یا نزدیک باشد و برای تعیین نوع رکورد زلزله معیارهای دیگری نیز لازم است [21]. مانیتاکیس و همکاران [16] معیارهایی را برای تعیین زلزله‌های میدان دور و نزدیک برای زلزله‌های رخ داده در یونان بین سال‌های ۱۹۷۵ الی ۱۹۹۹ به کار برند که در جدول شماره (۱) ارائه شده است. این معیارها عبارتند از:

۱- بیشینه شتاب افقی زمین (PGA)

۲- سرعت مطلق تجمعی (CAV) که به صورت زیر

تعریف می‌شود:

$$CAV = \int_0^t |a_g(t)| \quad (5)$$

در رابطه فوق tr زمان کل شتاب نگاشت است.

۳- شدت Arias که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_A = \frac{1}{2g} \int_0^t |a_g(t)| dt \quad (6)$$

در رابطه بالا $a_g(t)$ شتاب زمین است.

۴- پارامتر پتانسیل خرابی که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_p = PGAt_D \quad (7)$$

در رابطه بالا t_D مدت زمان حرکت قوی زمین است.

۵- ریشه مربعات a_{rms} که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_D} \int_0^{t_D} a_g^2(t) dt} \quad (8)$$

جدول ۱. کمینه مقدار پارامترهای لازم برای تعیین زلزله‌های میدان نزدیک

Low limit	Ground motion characteristics				Ground motion parameters
	Amplitude	Frequency content	Continuity	Energy	
0.2 (g)	*				PGA
0.3(g sec)	*			*	CAV
20(cm/sec)	*			*	PGV
0.4 (m/sec)	*		*	*	I _A
30 (cm sec ^{-0.75})	*		*		I
0.5 (m/sec)	*	*	*		a _{rms}
0.1 (sec)					PGV/PGA

Table.1. Minimum amount of required parameters to determine near field earthquakes

اساس روش تشخیص زلزله میدان نزدیک انتخاب شده‌اند که مشخصات و شتاب‌نگاشت آن‌ها به ترتیب

شود. شرط مرزی در مرز Γ_{WSI} با در نظر گرفتن عدم جریان در محل ارتباط سیال و سازه می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{\partial}{\partial n} = -\rho_F \ddot{u}_n \quad (3)$$

شکل ۱. سیستم کوپل اندرکنش آب، سازه و مرزهای پیرامونی

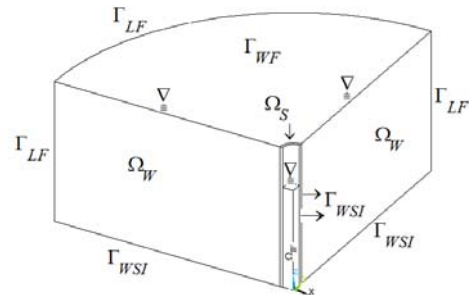


Fig. 1. Water-structure interaction coupling system and surrounding boundaries

که در رابطه بالا ρ_F جرم سیال، n بردار عمود بر مرز Γ_{WSI} است.

شرط مرزی سامرفیلد برای مرز دور قطع شده به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial n} = -\frac{p}{c} \quad (4)$$

۳- پارامترهای زلزله میدان دور و نزدیک

زلزله‌های میدان دور و نزدیک از لحاظ محتوای فرکانسی و شکل رکورد و از نظر تاثیر بر سازه‌ها با یکدیگر تفاوت دارند. از آنجایی که شتاب وارد شده به سازه در زلزله میدان نزدیک با توجه به فاصله سازه از مرکز زلزله و جهت قرارگیری و

با توجه به شرایط ارائه شده در جدول شماره (۱) در این مطالعه ۲ مورد از زلزله کوبه ژاپن با توجه به مشخصات آن‌ها و بر

در جداول (۲ و ۳) نشان داده شده است. در این مطالعه برای آنگیر این زلزله‌ها به شتاب یکسان $0.5g$ مقیاس شده‌اند. بررسی بهتر آثار طوقه‌های افزوده شده بر بدنه خارجی برج

جدول ۲. مشخصات زلزله کوبه

Name	Region	Latitude	Longitude	Depth	Mechanism	Strike	Dip	Rake	Mw
Kobe	Japan	34.5948	135.0121	17.9	Strike-slip	230	85	180	6.9

Table.2. Characteristics of Kobe earthquake

جدول ۳. زلزله میدان دور و نزدیک انتخاب شده با استفاده از پارامترهای جدول ۱

Earthquake classification criteria based on Table 1							Station distance (km)	Earthquake Type	Name	Row
PGV/PGA	a_{rms}	I	IA	PGV	CAV	PGA				
0.1 (sec)	0.5 (m/s ²)	30 (cm.s ^{-0.75})	0.4 (m/s)	20 (cm/s)	0.3 (g sec)	0.2 (g)				
0.1114	1.299	153.9852	8.377	91.108	2.0985	0.834	1	Near	KOBE	1
0.06656	0.22167	9.488	0.09096	5.157	0.2743	0.079	86.94	Far	KOBE	2

Table.3. The near and far-field earthquakes which selected using the parameters of Table 1

شده برای تمامی مدل‌ها ۵٪ است که با استفاده از میرایی رایلی ضرایب آلفا و بتای مورد نیاز برای آنالیز لرزه‌ای بدست آمده است. در این سازه‌ها از فونداسیون صلب استفاده شده است. طوقه‌های بتنی افزوده شده به این سازه‌ها از جنس بتن خود بدنه سازه برج آنگیر و به ضخامت ۶/۰ متر و شعاع خارجی آن‌ها نیز به میزان یک متر بیش تر از شعاع خارجی برج آنگیر در نظر گرفته شده است که به صورت یکپارچه با بدنه استوانه‌ای برج آنگیر لحاظ شده‌اند. طول حوزه سیال مدلسازی شده برای بررسی لرزه-ای برج آنگیر مطابق مرجع [9] به اندازه ۳۰ برابر میانگین شعاع بدنه اصلی برج آنگیر در طول و عرض مخزن در نظر گرفته شده است که این مقادیر برای در نظر گرفتن آثار دینامیکی سیال اطراف برج کفایت می‌کند. در این مطالعه برای شرط مرزی سازه (اعم از فونداسیون صلب و بدنه برج آنگیر با در نظر گرفتن طوقه‌های بتنی) و سیال داخل و خارج برج آنگیر شرایط اندرکنشی تعریف شده است.

۴- مدل اجزاء محدود سیستم برج آنگیر و مخزن

در شکل (۲) مدل‌های المان محدود برج آنگیر مورد مطالعه به همراه مخزن پیرامونی و آب داخل برج نشان داده شده است. برای مدلسازی بدنه برج از المان Solid95 و برای مدلسازی سیال از المان Fluid30 استفاده شده است. برای یافتن اندازه‌های مناسب مش‌بندی و نیز سائز المان‌ها، مدل‌های اصلی ابتدا چندین بار مورد آنالیز فرکانسی قرار گرفت و پس از کاهش میزان خطا به زیر ۳٪ نسبت به مرجع اصلی به عنوان مدل اولیه مدنظر قرار گرفت و سپس آنالیزهای بعدی انجام گرفت. همان‌گونه که در شکل (۲) و جدول (۴) ارائه شده است ۱۱ مدل برج آنگیر در سه حالت شامل فقط سازه برج، برج آنگیر با مخزن پیرامونی بدون آب داخلی و برج آنگیر با مخزن پیرامونی و آب داخلی مدل شده است که جمعاً ۳۳ مدل را شامل می‌شود که تحت آثار زلزله میدان دور و نزدیک قرار گرفته است. میرایی در نظر گرفته

جدول ۴. مشخصات مادی برج آنگیر و سیال

Concrete		
Density (kg/m ³)	Modulus of Elasticity(Gpa)	Poisson ratio
2480	34.5	0.17
Water		
(kg/m ³) Density	Bulk Modulus(kg/m ³)	
1000	2068.5	

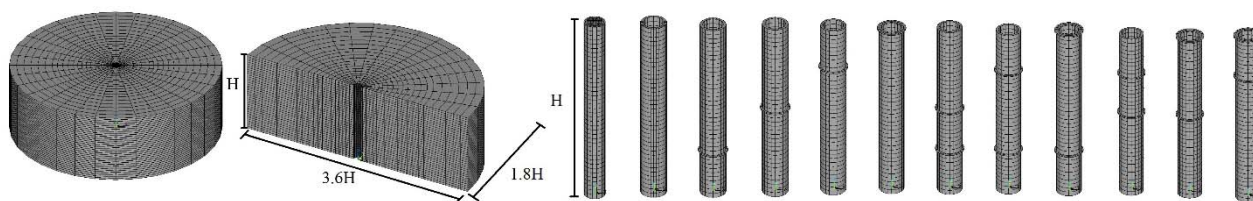
Table.4. Material properties of the intake tower and Fluid

جدول ۵. مشخصات هندسی مدل‌های برج آنگیر

Ring Thickness (m)	Radius of ring (m)		Radius of the intake tower (m)		Height (m)	Material		
	External	Internal	External	Internal				
-	-	-	6.80	5.44	100	Concrete	Without the ing	Model A
0.6	7.80	6.80	6.80	5.44	100	Concrete	With the rings	Other Models

Table.5. Geometric characteristics of the intake tower models

شکل ۲. مدل المان محدود برج‌های آبگیر، مخزن پیرامونی و آب داخلی و نیز مرزهای اندرکنش برج آبگیر طوقه‌دار

**Fig. 2.** Finite element model of the intake towers, the peripheral reservoir, and internal water as well as interaction boundaries of the intake tower and water

آنالیز فرکانسی برج آبگیر ساخته شده و فرکانس ارائه شده برای مدل اصلی در مرجع [6] در جدول (۶) نشان داده شده است که نتایج نشان از دقت مناسب روش مدلسازی دارد. در ادامه سایر مدل‌های مورد مطالعه با افزودن طوقه بتنی در ترازهای ارتفاعی ذکر شده و با استفاده از روش استفاده شده در راستی‌آزمایی شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفتند. در جدول شماره (۷) اسامی مدل‌ها ارائه شده است.

جدول ۶. نتایج آنالیز فرکانسی و مقایسه با مدل اصلی (HZ)

Percentage error	Ref [6]	Present Study	Model
2.05	0.90718	0.88864	Intake Tower without the reservoir
2.70	0.67641	0.65817	Intake Tower with the Surrounding reservoir

Table.6. Results of the Frequency analysis and comparison with the original model (HZ)

جدول ۷. مدل‌های برج‌های آبگیر با طوقه‌های افزوده شده و فواصل آن‌ها از پایین برج

	Name of the models										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
PM model	✓										
0.25 H		✓				✓	✓	✓			
0.5 H			✓			✓			✓	✓	
0.75H				✓			✓		✓		✓
H					✓			✓		✓	✓

Table.7. Models of the intake tower with the added rings and their distances from the bottom of the tower

طوری‌که که برای مدل برج آبگیر با طوقه‌های بتنی در تراز ۷۵ و ۱۰۰ متری مقدار ماکزیمم تغییر مکان افقی برای زلزله میدان دور و نزدیک به ترتیب به میزان ۳٪ و ۲٪ نسبت به مدل بدون طوقه کاهش می‌یابد. برای برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل برج خالی مطابق نتایج جدول (۱۲) مشخص می‌شود با افزایش ارتفاع طوقه‌های بتنی و نزدیک شدن تراز ارتفاعی آن‌ها به یکدیگر مقادیر ماکزیمم تغییر مکان کاهش می‌یابد به طوری که بیش‌ترین کاهش برای مدل برج آبگیر با طوقه‌های بتنی در تراز ۷۵ و ۱۰۰ متری رخ داده است، این کاهش برای زلزله میدان دور و نزدیک به ترتیب برابر با ۱۷٪/۳ و ۱۲٪/۱ است. همچنین

۶- تحلیل لرزه‌ای

در جداول شماره (۱۱) الی (۱۳) مقادیر ماکزیمم تغییر مکان و در جداول (۱۴) الی (۱۶) ماکزیمم تنش و عکس‌العمل تکیه‌گاهی برج آبگیر ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جداول (۱۱) الی (۱۳) مشخص می‌شود که مقادیر تغییر مکان در هر سه راستای X ، Y و Z برای زلزله میدان نزدیک به مراتب بیش‌تر از زلزله میدان دور است. با توجه به نتایج جدول (۱۱) مشخص می‌شود که برای برج آبگیر بدون مخزن هر چقدر تراز قرارگیری طوقه‌ها در قسمت‌های بالاتر برج باشد و نیز نزدیک به هم باشد مقادیر ماکزیمم تغییر مکان افقی بیش‌تر کاهش می‌یابد، به

در این مدل برای زلزله میدان نزدیک شاهد تغییر مکان نسبی در طول ارتفاع برج و در راستای Y هستیم که مقدار تغییر مکان نسبی ماکزیمم برای مدل بدون طوقه برابر با $30/8141$ سانتی-متر است که با افزودن طوقه‌های بتنی مقادیر تغییر مکان نسبی تقریباً در تمامی مدل‌های دارای طوقه کاهش می‌یابد که بیش-ترین مقدار کاهش برای مدل با طوقه‌های بتنی در تراز ۷۵ و ۱۰۰ متری بوده که نشانگر کاهش ۲۵٪ تغییر مکان نسبی افقی است. با توجه نتایج ارائه شده در جدول (۱۳) برای برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل برج پر نیز مشخص می‌شود که در این حالت برای زلزله میدان دور ماکزیمم کاهش تغییر مکان در حالت طوقه منفرد و در تراز ۲۵ متری است و برای زلزله میدان نزدیک مطابق حالات قبلی بیش‌ترین کاهش تغییر مکان نسبت به مدل بدون طوقه برای مدلی که طوقه‌های بتنی در تراز ۷۵ و ۱۰۰ متری قرار دارند است. همچنین در این مدل و برای زلزله میدان دور میزان بیش‌ترین کاهش تغییر مکان نسبی برای راستای Y و مدل ۲۵ متری است که نشانگر کاهش ۱۰۰٪ تغییر مکان

نسبی در طول بدنه برج است. با توجه به نتایج ارائه شده برای سه حالت مورد بررسی مشخص می‌شود که در بیشتر موارد استفاده از طوقه‌های بتنی در ترازهای بالا و نزدیک به هم باعث افزایش ایمنی سازه می‌شود و همچنین افزودن طوقه بتنی منفرد در ترازهای پایین علاوه بر اینکه در زمان پر بودن داخل برج سبب کاهش ماکزیمم تغییر مکان افقی و تغییر مکان نسبی می‌شود در سایر حالات نیز باعث افزایش محسوسی در مقدار ماکزیمم تغییر مکان افقی نمی‌شود. در ادامه با توجه به نتایج ارائه شده در جداول (۱۲ و ۱۳) مشخص می‌شود که با افزودن آب داخل برج تغییرات مقادیر ماکزیمم تغییر مکان نسبت به حالتی که فقط مخزن پیرامونی را داریم بستگی به نوع زلزله و محتوای فرکانسی آن دارد. در زلزله میدان دور افزودن آب داخل برج سبب افزایش مقدار تغییر مکان در هر دو راستای X و Y شده است در حالی که برای زلزله میدان نزدیک مقدار تغییر مکان در راستای X و Y به ترتیب کاهش و افزایش یافته است که درصد میزان ماکزیمم افزایش بیش‌تر از ماکزیمم کاهش است.

جدول ۱۱. بیشینه تغییر مکان بالای برج آبگیر بدون مخزن تحت اثر زلزله میدان دور و نزدیک

		Far-field			Near-field		
		Ux(cm)	Uy(cm)	Uz(cm)	Ux(cm)	Uy(cm)	Uz(cm)
Model	A1	12.2574	4.9208	1.4742	33.1346	24.1262	3.9543
	B1	12.2728	4.9290	1.4479	33.1903	24.1687	3.9601
	C1	12.2650	4.9310	1.4852	33.1578	24.1650	3.9551
	D1	12.2224	4.9128	1.5848	33.9821	24.0727	4.3673
	E1	12.0255	4.8848	1.6743	33.5820	24.7632	4.4319
	F1	12.2826	4.9383	1.4893	33.2097	24.2084	3.9610
	G1	12.2406	4.9207	1.5874	33.0355	24.0716	4.3741
	H1	12.0529	4.8915	1.6799	33.6360	24.8104	4.4384
	I1	12.2303	4.9229	1.5880	33.0092	24.0608	4.3682
	J1	12.0115	4.8976	1.6871	33.6028	23.7928	4.4338
	K1	11.8807	4.8853	1.6829	33.4081	23.6268	4.4140

Table.11. Maximum displacement values on top of the intake tower without the reservoir due to the near and far-field earthquakes

جدول ۱۲. بیشینه مقادیر تغییر مکان بالای برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل برج خالی تحت اثر زلزله میدان دور و نزدیک

		Far-field			Near-field		
		Ux(cm)	Uy(cm)	Uz(cm)	Ux(cm)	Uy(cm)	Relative displacement for Uy
Model	A2	13.1118	5.8748	1.7509	52.0593	16.9271	30.8141
	B2	13.1317	5.8621	1.7571	52.0829	16.9391	29.6995
	C2	13.1211	5.9009	1.7557	52.0786	16.9427	32.0228
	D2	13.0373	5.9609	1.8422	51.9779	17.1755	23.2617
	E2	12.7060	6.0683	1.9691	51.5329	18.1531	22.9859
	F2	13.1638	5.7880	1.7620	52.0830	16.8584	25.6731
	G2	13.0956	5.8536	1.8486	52.0357	16.9344	29.0688
	H2	12.8786	5.9799	1.9733	51.5760	16.4986	23.0840
	I2	13.0741	5.8865	1.8466	52.0352	16.9376	30.8383
	J2	12.8337	6.0113	1.9718	51.5809	17.7022	22.8955
	K2	12.6956	6.0648	1.9627	51.4920	18.0176	22.8080

Table 12. Maximum displacement values on top of the intake tower with the surrounding reservoir and intra-empty due to the near and far-field earthquake

جدول ۱۳. بیشینه مقادیر تغییر مکان بالای برج آبگیر برای سه حالت مورد بررسی و با مخزن پیرامونی و داخل برج پر

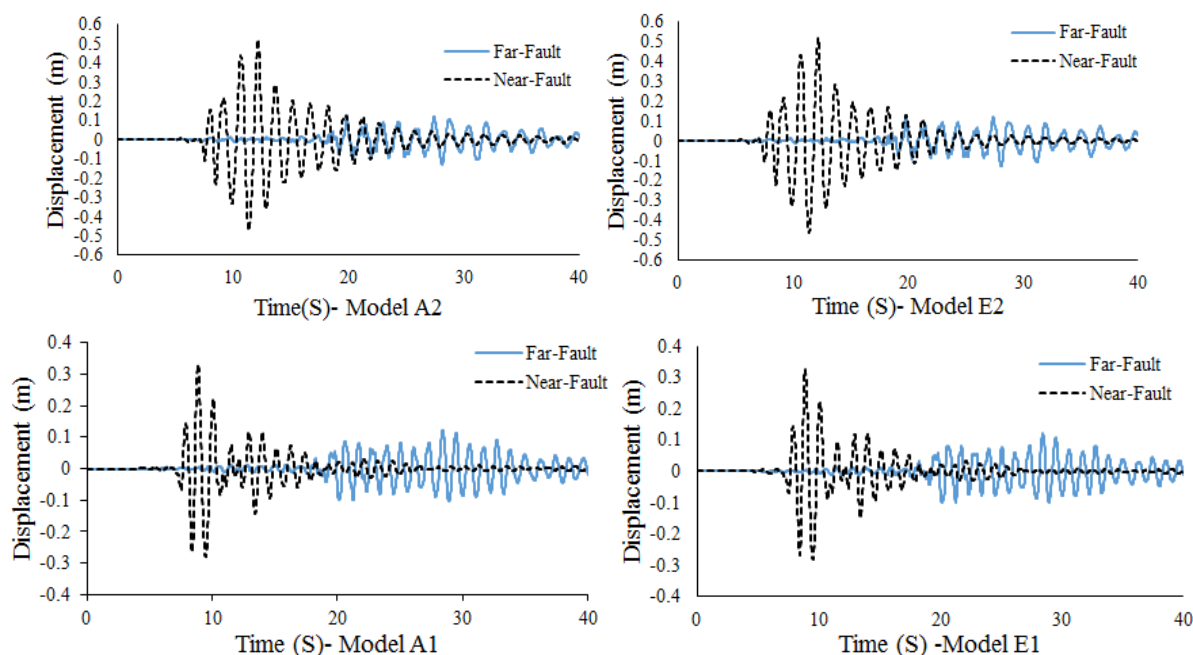
		Far-field				Near-field			
		Ux(cm)	Relative displacement for Ux	Uy(cm)	Relative displacement for Uy	Uz(cm)	Ux(cm)	Uy(cm)	Uz(cm)
Model	A3	13.0475	19.5727	7.2605	12.3395	2.3698	47.0024	29.0725	5.2023
	B3	12.9569	19.5935	7.5170	0	2.3440	46.9470	29.0705	5.1833
	C3	13.1543	19.6772	7.1889	12.5607	2.3800	46.9938	29.0644	5.1972
	D3	12.9982	19.4875	7.0955	12.7309	2.4267	46.9196	29.0009	5.7162
	E3	13.2181	19.6183	6.8912	12.1505	2.6975	46.6336	28.7878	5.9173
	F3	13.2011	19.7418	7.2549	12.3487	2.3901	47.0968	29.1124	5.2096
	G3	13.0487	19.5562	7.1673	12.5299	2.4351	46.9984	29.0531	5.7262
	H3	13.2597	19.6774	6.9088	12.1928	2.7089	46.7203	28.8511	5.9321
	I3	13.0473	19.5434	7.0998	12.7470	2.4345	47.0011	29.0479	5.7269
	J3	13.2707	19.6793	6.9039	12.1728	2.7049	46.7183	28.8369	5.9318
	K3	13.1088	19.4905	6.8893	11.8376	2.6987	46.6375	28.7522	5.9291

Table 13. Maximum displacement values on top of the intake tower with the surrounding reservoir and intra-full due to the near and far-field earthquake

این زلزله که متناسب با زمان‌های انتهایی زلزله میدان نزدیک است بیش‌تر است. با افزوده شدن مخزن پیرامونی مقدار تغییر مکان در نیمه ابتدایی شتاب شروع زلزله میدان دور کم‌تر از مقدار تغییر مکان در زلزله میدان نزدیک است و در نیمه انتهایی آن بیش‌تر از تغییر مکان در زلزله میدان نزدیک است. در نهایت زمانی که علاوه بر مخزن پیرامونی داخل برج آبگیر پر هست مقدار تغییر مکان در کل تاریخچه زمانی برای زلزله میدان دور کم‌تر از زلزله میدان نزدیک می‌شود.

در این قسمت تاریخچه زمانی تغییر مکان بالای برج آبگیر برای مدل‌های A1 الی A3 و E1 الی E3 در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده مشخص می‌شود که آثار زلزله میدان نزدیک بر پاسخ لرزه‌ای سازه به مراتب بیش‌تر از زلزله میدان دور است. همچنین رفتار سازه در زلزله میدان نزدیک به مراتب بیش‌تر از زلزله میدان دور تحت تاثیر حضور آب قرار می‌گیرد. به گونه‌ای که برای حالت برج آبگیر بدون مخزن مقدار تغییر مکان برای زلزله میدان دور در زمان شروع

شکل ۳. تاریخچه زمانی تغییر مکان بالای برج



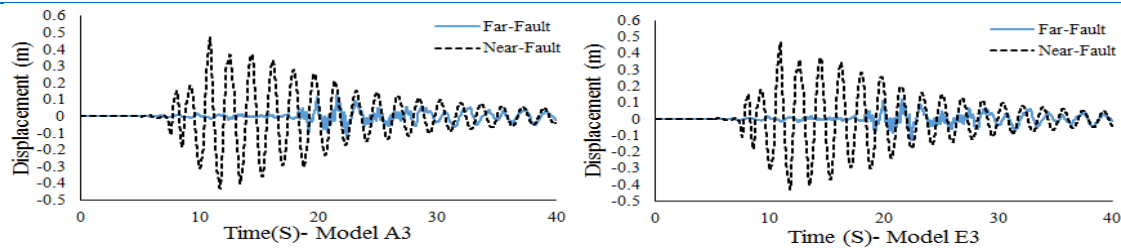


Fig. 3. Time history of displacement on top of the intake tower

مقادیر ماکزیمم تنش اصلی اول برج آبگیر برای زلزله میدان دور و نزدیک به ترتیب افزایش و کاهش یافته است که این نشانگر اهمیت محتوای فرکانسی زلزله بر رفتار آب و سازه دارد. در ادامه در شکل (۴ و ۵) برای زلزله میدان دور و نزدیک پوش تنش اصلی اول مدل اصلی و مدلی که بیشترین کاهش تنش اصلی اول را نسبت به مدل اصلی دارند نشان داده شده است. همچنین در جدول (۱۴) الی (۱۶) نتایج برای مقادیر ماکزیمم عکس العمل تکیه گاهی برای حالت مورد بررسی تحت زلزله میدان دور و نزدیک نیز ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جداول مربوطه مشخص می شود که مقدار ماکزیمم عکس العمل تکیه گاهی برای زلزله میدان نزدیک در دو حالت برج آبگیر بدون مخزن و برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل خالی به مراتب بیش تر از زلزله میدان دور است. با توجه به جداول (۱۲ و ۱۳ و جداول ۱۵ و ۱۶) مشخص می شود که تغییر مقدار عکس العمل تکیه گاهی برای حالت برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل خالی همیشه روند افزایش را شاهد نخواهد بود و بستگی به نوع زلزله و محتوای آن دارد.

با توجه به نتایج ارائه شده در جداول (۱۴ الی ۱۶) مشخص می شود که مقادیر تنش اصلی اول برای زلزله میدان نزدیک و برای هر سه حالت به مراتب بیش تر از زلزله میدان دور است. با توجه به جدول (۱۴) مشخص می شود که برای برج آبگیر بدون مخزن طوقه های بتنی تغییر چندانی روی تنش اصلی ایجاد نمی نمایند اما با این وجود چنانچه در ترازهای بالایی قرار گیرند و تراز طوقه ها به یکدیگر نزدیک باشد سبب کاهش تنش اصلی اول برای هر دو زلزله میدان دور و نزدیک نسبت به مدل بدون طوقه می شوند. ماکزیمم کاهش تنش اصلی اول برای هر دو زلزله میدان دور و نزدیک برای مدل با طوقه های بتنی در تراز ۷۵ و ۱۰۰ متری اتفاق می افتد که به ترتیب مقدار ۲/۴۱٪ و ۴/۰۷٪ کاهش را نشان می دهد. با توجه به جدول (۱۵) برای برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل خالی مشخص می شود که هرچقدر تراز طوقه های بتنی بالاتر بوده و فاصله آن ها نزدیک به هم باشد مقدار کاهش تنش اصلی اول بیش تر خواهد بود. ماکزیمم کاهش تنش اصلی اول برای مدل مذکور در زلزله میدان دور و نزدیک به ترتیب برابر با ۱۰/۳۲٪ و ۸/۱۴٪ است. نتایج تنش اصلی اول برای مدل برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل پر در جدول شماره (۱۶) ارائه شده است. برای زلزله میدان دور ماکزیمم کاهش تنش اصلی اول در تراز ارتفاعی ۲۵ متری طوقه رخ داده و برابر با ۲/۰۹٪ کاهش است. برای زلزله میدان نزدیک هرچند تغییرات تنش اصلی اول با افزودن طوقه های بتنی چندان محسوس نیست با این وجود با افزایش تراز ارتفاعی طوقه های بتنی و کاهش فاصله بین آن ها مقادیر تنش اصلی اول کاهش می یابد که ماکزیمم مقدار این کاهش برای مدل با طوقه های بتنی در تراز ارتفاعی ۷۵ و ۱۰۰ متری رخ می دهد که نشانگر ۱/۱۶٪ کاهش می باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در جداول (۱۵ و ۱۶) مشخص می شود که با افزودن آب داخلی

جدول ۱۴. ماکزیمم مقادیر تنش‌های اصلی و عکس‌العمل تکیه‌گاهی برای برج آبگیر بدون مخزن

		Far-field			Near-field		
		S1(MPa)	S3(MPa)	Max Horizontal Reaction(KN)	S1(MPa)	S3(MPa)	Max Horizontal Reaction(KN)
Model	A1	9.121	-15.3	37.770	35.972	-40.9	57.728
	B1	9.142	-15.4	38.309	35.959	-41.1	57.842
	C1	9.174	-15.4	37.860	35.894	-41	57.630
	D1	9.142	-15.5	37.237	35.500	-40.6	57.800
	E1	8.991	-15.5	36.785	34.840	-39.8	56.510
	F1	9.114	-15.4	38.350	34.043	-41.1	57.725
	G1	9.168	-15.5	37.770	35.655	-40.8	57.920
	H1	9.030	-15.5	37.250	34.986	-40	56.590
	I1	9.172	-15.5	37.318	35.584	-40.7	57.680
	J1	9.00	-15.5	37.011	34.909	-40	56.310
	K1	8.901	-15.6	36.194	34.508	-39.6	56.450

Table 14. Maximum values of the principal stresses and base reaction for the intake tower without the reservoir

جدول ۱۵. ماکزیمم مقادیر تنش‌های اصلی و عکس‌العمل تکیه‌گاهی برای برج آبگیر بدون مخزن پیرامونی و داخل خالی

		Far-field			Near-field		
		S1(MPa)	S3(MPa)	Max Horizontal Reaction(KN)	S1(MPa)	S3(MPa)	Max Horizontal Reaction(KN)
Model	A2	17.1	-13.9	70.62	59	-53.2	122.25
	B2	17.2	-14	71.17	59.2	-53.4	123.10
	C2	17.1	-14	70.75	58.9	-53.2	122.81
	D2	17	-13.9	70.60	58.4	-53.3	122.77
	E2	17.2	-13.8	71.18	56.9	-50.2	122.11
	F2	15.6	-13.4	72.23	57	-53	125.20
	G2	15.6	-13.3	72.13	56.6	-52.6	125.16
	H2	15.7	-13.3	72.53	54.9	-51.5	124.73
	I2	15.5	-13.3	71.68	56.3	-52.5	124.90
	J2	15.7	-13.2	72.14	54.7	-51.2	124.40
	K2	15.6	-13.2	71.91	54.2	-50.8	124.36

Table 15. Maximum values of the principal stresses and base reaction for the intake tower without the reservoir and intra- empty

جدول ۱۶. ماکزیمم مقادیر تنش‌های اصلی و عکس‌العمل تکیه‌گاهی برای برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل پر

		Far-field			Near-field		
		S1(MPa)	S3(MPa)	Max Horizontal Reaction(KN)	S1(MPa)	S3(MPa)	Max Horizontal Reaction(KN)
Model	A3	29.0790	-32.9	165.870	52.897	-58.2	149.72
	B3	28.4692	-32.3	162.460	53.115	-58.4	150.29
	C3	30.5986	-34	164.300	55.175	-60.1	147.64
	D3	30.4125	-33.8	162.806	54.917	-59.8	146.07
	E3	30.8604	-34.3	165.980	54.3454	-59.3	147.11
	F3	29.4463	-33.3	168.630	53.1520	-58.5	151.72
	G3	29.2713	-33.1	167.140	52.8946	-58.3	150.16
	H3	29.7197	-33.1	170.480	52.7863	-58	151.26
	I3	29.2109	-33.1	166.710	52.7474	-58.1	149.59
	J3	29.5924	-33.1	169.620	52.7111	-57.9	150.61
	K3	29.5714	-32.9	169.130	52.2835	-57.5	149.16

Table 16. Maximum values of the principal stresses and base reaction for the intake tower with the reservoir and intra- full

شکل ۴. پوش تنش اصلی اول برای زلزله میدان دور

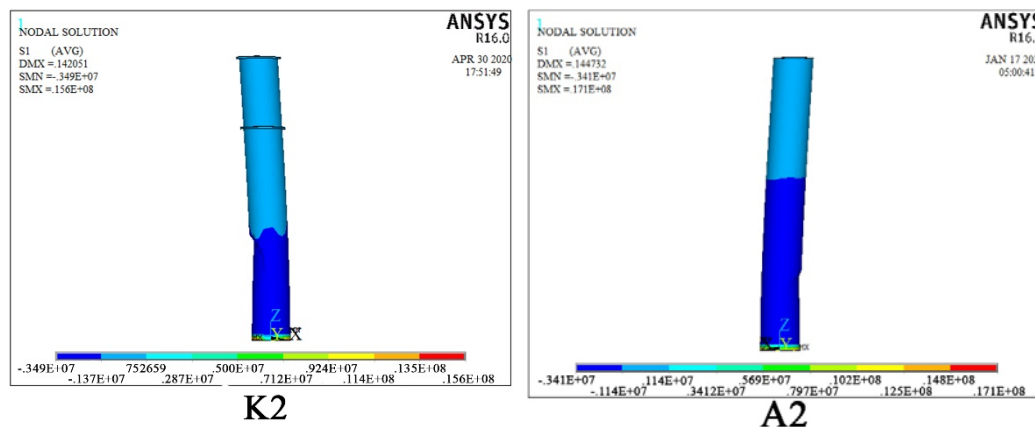


Fig. 4. Push of the first principle stress for the far-field earthquake

شکل ۵. پوش تنش اصلی اول برای زلزله میدان نزدیک

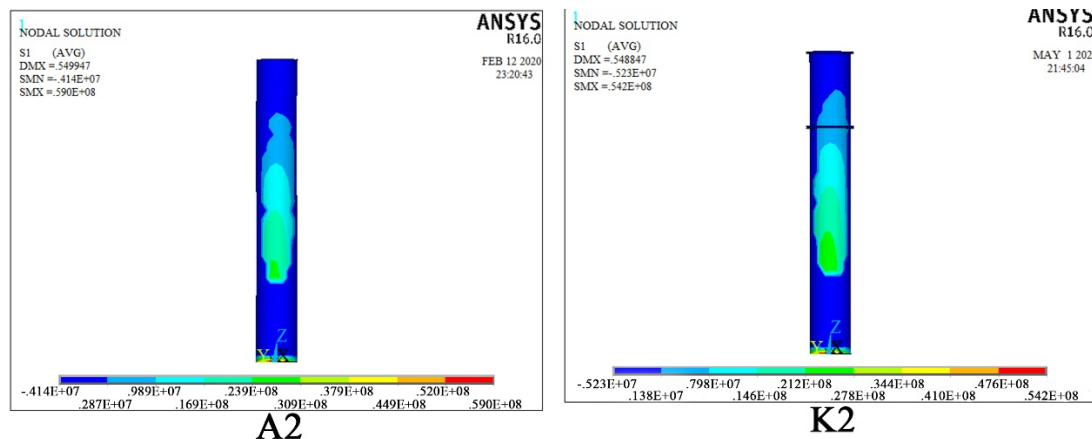


Fig. 5. Push of the first principle stress for the near-field earthquake

افزایش مدت زمان اثر زلزله میدان نزدیک بر پاسخ لرزه ای سازه می شود.

(۲) مقایسه مقادیر ماکزیمم تغییر مکان برای حالت برج آبگیر با داخل پر نسبت به زمانی که داخل آن خالی است نشان داد که مقدار تغییر مکان برای برج آبگیر بامخزن پیرامونی و داخل پر بستگی به نوع زلزله دارد چنانچه برای زلزله میدان نزدیک و میدان دور به ترتیب سبب کاهش و افزایش مقدار ماکزیمم تغییر مکان می شود.

(۳) افزودن طوقه های بتنی زمانی که به صورت تک طوقه و در ترازهای پایین و بالای برج باشد و یا در ترازهای بالا بوده و فواصل ترازهای ارتفاعی طوقه ها کم باشد باعث کاهش مقدار تغییر مکان ماکزیمم می شود. همچنین افزودن طوقه های بتنی در ترازهای ارتفاعی بالا و نزدیک به هم باعث کاهش مقادیر ماکزیمم تنش اصلی اول و سوم در کل مدل ها می شود. همچنین

۸- نتیجه گیری

در این مطالعه آثار طوقه های بتنی بر رفتار برج آبگیر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. بدین منظور از یک زلزله میدان نزدیک و یک زلزله میدان دور استفاده شد. معیارهای تعیین رکورد میدان نزدیک و ویژگی های مربوط به آن ارائه شد و با استفاده از آن رکوردهای استفاده شده در این مطالعه دسته بندی شد. تحلیل های انجام گرفته در سه حالت برج آبگیر تنها، برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل خالی و برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل پر انجام شد که در کل شامل ۶۶ آنالیز بود.

(۱) مقادیر ماکزیمم تغییر مکان در تمامی مدل های بررسی شده در زلزله میدان نزدیک به مراتب بیش تر از زلزله میدان دور در همان حالات است. همچنین با افزوده شدن آب به برج آبگیر اعم از مخزن پیرامونی بدون آب داخلی یا با آب داخلی سبب

- with dam and foundation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 84 108-119.
- [8] Alembagheri M. 2017 Frequency domain analysis of submerged tower-dam dynamic interaction, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 54(4) 264-275.
- [9] Alembagheri M. 2016 Earthquake response of solitary slender freestanding intake towers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 90, 1-14.
- [10] Arjomandi A.A. & Kalantari H. 2016 Evaluate patterns of crack growth and spread in Ohkura arch dam and intake tower connected to it under earthquake” *International Conference on Architecture, Urbanism, Civil Engineering, Art, Enviroment Future Horizons and Retrospect*, Tehran, Iran.(in Persian)
- [11] Prihadi P. & Alembagheri M. 2019 The influence of bridge-tower interaction on the dynamic behavior of intake-outlet towers, *SN Applied Sciences*, 16.
- [12] Zhang SH. & Wang G. 2013 Effects of near-fault and far-fault ground motions on nonlinear dynamic response and seismic damage of concrete gravity dams, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 53 217-229
- [13] Mavroeidis G. P. & Papageorgiou A. S. 2003 A mathematical representation of near-fault ground motions, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 93(3) 1099-1131.
- [14] Wang G. Q., Zhou X. Y., Zhang P. Z., & Igel H. 2002 Characteristics of amplitude and duration for near-fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 22(1) 73-96.
- [15] Somerville P. G. 2003 Magnitude scaling of the near-fault rupture directivity pulse, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 137(1) 2001-2012.
- [16] Maniatakis CH. A., Taflampas I. M., & Spyarakos C. C. 2008 Identification of Near-Fault Earthquake Record Characteristics, *14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 12-17 October*.
- [17] Ghayamghamian M.R. & Khalili B. 2005 The effects of fault local parameters and site geometry on near-fault pulse characteristics, *Research Bulletin of Seismology and Earthquake Engineering*. 42 (4).(in Persian)

نتایج نشان می‌دهد که ماکزیمم تاثیر طوقه‌ها برای برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل خالی رخ داده است.

۴) مقادیر ماکزیمم عکس‌العمل تکیه‌گاهی در دو مدل برج آبگیر تنها و برج آبگیر با مخزن پیرامونی برای زلزله میدان نزدیک به مراتب بیش‌تر از زلزله میدان دور است اما برای مدل برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل پر برای زلزله میدان دور بیش‌تر از زلزله میدان نزدیک هست که به دلیل کاهش تغییرمکان در راستای ماکزیمم برای زلزله میدان نزدیک است و نشان از آثار نوع زلزله در آنالیز لرزه‌ای دارد.

۵) نتایج نشان داد که هرچند آثار زلزله میدان نزدیک در بیشتر مراتب بیش‌تر از زلزله‌ی میدان دور است ولی برای آنالیز دقیق‌تر بهتر است که زلزله میدان دور نیز مورد بررسی قرار گیرد و همچنین افزودن طوقه‌های بتنی در بیشتر موارد سبب بهبود رفتار سازه می‌شود به ویژه چنانچه در ترازهای بالا و نزدیک به هم قرارگیرند.

مراجع

- [1] Goyal A. & Chopra A. K. 1989 Simplified evaluation of added hydrodynamic mass for intake towers. *Proceedings of ASCE, Journal of Engineering Mechanics*, 115(7), 1393-1412.
- [2] Goyal A. & Chopra A. K. 1989 Earthquake analysis of intake-outlet towers including tower-water-foundation-soil interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 18(3) 325-334.
- [3] Daniell W. E. & Taylor C. A 1994 Full-scale dynamic testing and analysis of a reservoir intake tower, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 23(11), 1219-1237.
- [4] Daniell W. E. & Taylor C. A. 2003 Developing a numerical model for a UK intake tower seismic assessment, *P. I. Civil Eng-water*. 56(1), 63-72.
- [5] Xiaoxi Zh. & Zongmin W. 2005 The application of ANSYS software to the static and dynamic stress analysis of high intake tower, *Water power*. 31(3) 72-83.
- [6] Millan M. A., Young Y. L. & Prevost J. H. 2009 Seismic Response of Intake Towers Including Dam – Tower Interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 38(3), 307-329.
- [7] Alembagheri M. 2016 Dynamics of submerged intake towers including interaction

- Environmental Engineering*. 44(4) 25-38.(in Persian)
- [20] Karabulut M., Kartal M. E., Capar O. F., & Cavusli M. 2016 Earthquake Analysis of Concrete Arch Dams Considering Elastic Foundation Effects, *DISASTER SCIENCE AND ENGINEERING*. 2(2) 46-52.
- [21] Naeim F. 2001 The Seismic Design Handbook, 2th ed, Kluwer Academic Publishers.
- [18] Akköse M. & Şimşek E. 2010 Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam-water-sediment-foundation interaction, *Applied Mathematical Modelling*. 34(11) 3685-3700.
- [19] Haj.Hoseyni J. & Moradloo J. 2015 Comparison of Near-Filed and Far-Filed Earthquakes on Nonlinear Response of Concrete Gravity Dams, *Journal of Civil and*

Seismic evaluation of the behavior of cylindrical intake tower under the effects of the far and near-field earthquakes by considering concrete rings and water-structure interaction

Ehsan Teymouri ^{1*}, Saeed Abbasi ²

1. PHD Student, School Of Civil Engineering, University Of Zanjan

2. Assistant Professor, School Of Civil Engineering, University Of Zanjan

*Eteymouri@znu.ac.ir

Abstract

In this study, the effects of the concrete rings as well as the far and near field earthquake on the frequency and seismic behavior of the intake tower have been investigated. For modeling and analysis with considering the interaction of water and structure, ANSYS software which is based on the finite element method is used. For a better analysis of these models, two far and near field earthquakes have been selected and scaled to the same maximum value acceleration. To evaluate the effects of concrete rings on the behavior of the intake tower, 33 intake tower models have been modeled by considering concrete rings in different number and height levels. In the following, ۶۶ analyzes have been performed for three modes of the tower, including only the structure of the intake tower without a reservoir, the intake tower with the surrounding reservoir and without inside water and the intake tower with the surrounding reservoir and inside of the tower is full. The results of displacement, stress, and base reactions of the intake tower under the relevant analyzes have been compared with each other. Based on the results, it was found that the effects of a near-field earthquake at maximum displacements and stresses are far greater than a far-field earthquake. However, the values of the responses depend on the frequency of the earthquake in addition to its proximity to the field. The results also showed that surrounding water and internal water have different effects on the seismic response of intake towers affected by near and far field earthquakes. The presence of water increases the effective duration of the earthquake on the response of the intake tower, especially in the near field earthquake. The results showed that by adding circular rings, the frequencies of the intake towers undergo significant changes, which require seismic analysis to evaluate its effects. In the case of a intake tower without a surrounding reservoir and a intake tower with a surrounding reservoir and without inside water, the maximum values of displacement decrease with increasing the height of the concrete rings and decreasing the distance between them. For a intake tower with a surrounding reservoir and full inside, in the case of far field earthquake analysis, the greatest reduction in displacement occurs for a intake tower with a ring at 25 meters, while for a near field earthquake in this case the amount of displacement is further reduced with increasing height level of concrete rings. The pattern of changes in the first principal stresses for all the studied models is also in accordance with the changes in the values of the maximum displacement. The maximum values of the base reaction for the intake tower without surrounding reservoir and the intake tower with the surrounding reservoir and without inside water for near field earthquake are greater than for the far field earthquake while for the intake tower with surrounding reservoir and full inside for far field earthquake it is more than a near field earthquake which is due to the frequency content of the desired earthquakes. Eventually, the results showed that adding concrete platforms at high and close to each other has very good and positive effects also reduces the maximum values of stress, base reaction, displacement, and relative displacement.

Keywords: Intake tower, Concrete ring, Finite Element Method, Water-Structure interaction, Far-Field and Near-Field Earthquake