

بررسی تاثیر سختی بتن فونداسیون و مخزن بر پاسخ لرزه‌ای مخازن مرتفع با استفاده از تحلیل احتمالاتی

اتابک فیضی^{۱*}، مجید پاسبانی خیاوی^۲، لیلا رمزی^۳

۱- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

مخازن آب از جمله اجزاء اصلی شبکه‌های آبرسانی به منظور ذخیره، نگهداری و نیز تامین فشار آب می‌باشند و به جهت اهمیتی که این سازه‌ها دارند باید پس از وقوع زلزله قابلیت بهره‌برداری و تامین فشار در شبکه آبرسانی را داشته باشند. در این مقاله تاثیر نسبت سختی بتن فونداسیون به سختی بتن مخزن بر تحلیل لرزه‌ای مخازن هوایی مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل لرزه‌ای حاضر، نسبت سختی بتن فونداسیون به سختی بتن بدنه مخزن به صورت ضریب ثابت K بیان شده است. با تغییر این ضریب، تاثیر آن بر روی هر کدام از پارامترهای تنش کششی، فشاری و تغییرمکان با استفاده از تحلیل احتمالاتی مورد بررسی قرار گرفته است. مخزن مورد مطالعه به کمک روش‌هایی که مبتنی بر روش اجزای محدود می‌باشد به صورت سه بعدی در نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی شده است. در این مدل‌سازی اندرکنش بین بدنه مخزن، سیال و فونداسیون در نظر گرفته شده و برای اعمال زلزله از شتاب‌نگاشت زمین لرزه منجیل در مدل مورد نظر استفاده شده است. تحلیل احتمالاتی استفاده شده، شبیه‌ساز مونت کارلو با استفاده از روش نمونه برداری ابر مکعبی لاتین بوده و از ضریب K به عنوان متغیر ورودی استفاده شده است. مقدار ماکزیمم تغییر مکان افقی سازه، تنش اصلی اول حداکثر و تنش اصلی سوم حداکثر نیز به عنوان پاسخ‌های بحرانی و متغیرهای خروجی انتخاب شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها و مقایسه پاسخ‌هایی نظیر تنش‌های اصلی حداکثر و تغییرمکان حداکثر نشان می‌دهند که با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی و ضریب اطمینان مناسب برای سیستم، بهینه‌ترین و مطلوب‌ترین مقدار برای ضریب K تقریباً ۰/۷ می‌باشد.

کلمات کلیدی: مخزن هوایی، اندرکنش، فونداسیون، سختی بتن، زلزله، انسیس، مونت کارلو

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/JSCE.2018.114977.1438	doi: 10.22065/JSCE.2018.114977.1438	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
		۱۳۹۸/۰۹/۰۱	۱۳۹۷/۰۲/۲۰	۱۳۹۷/۰۲/۲۰	۱۳۹۷/۰۱/۰۸	۱۳۹۶/۱۰/۲۵
			اتابک فیضی		*نویسنده مسئول:	
			a_feizi@uma.ac.ir		پست الکترونیکی:	

Investigate the Effect of Foundation and Tank Concrete Hardness on the Seismic Response of High Tanks using Probabilistic Analysis

Atabak Feizi^{1*}, Majid Pashani Khiavi², Leila Ramzi³

1- Assistant professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Associate professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- M.Sc. in Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

Water tanks are among the main components of water supply networks for storing, maintaining and supplying pressure, and these structures should have the ability to exploit and supply pressure in the water supply network after the earthquake. In this paper, the effect of foundation concrete hardness to tank concrete hardness on seismic analysis of air tanks has been investigated. In the current seismic analysis, the relationship between the concrete hardness of the foundation and the concrete of the tank body is expressed by the definition of the constant coefficient K . By changing this coefficient, its effect on each of the tensile/compressive stress, and displacement parameters using a probabilistic analysis is examined. The tank is modeled using a three-dimensional finite element method based on ANSYS software. In this model, the interaction between the tank body, fluid and foundation are considered and the accelerogram of Manjil earthquake in the intended model is used to apply the earthquake. The probabilistic analysis used in this study is Monte Carlo simulator using the Latin hypercube sampling method and K coefficient is used as an input variable. The maximum horizontal displacement of the structure, the maximum 1st principle stress and the maximum 3rd principle stress are selected as critical responses and output variables. The results of analyzing models and comparing responses such as maximum principle stresses and maximum displacement show that with regard to economic considerations and the appropriate reliability coefficient for the system, the most efficient and optimal value for the coefficient K is approximately 0.7.

ARTICLE INFO

Received: 15/01/2018

Revised: 28/03/2018

Accepted: 10/05/2018

Keywords:

Air tank,
Interaction,
Foundation,
Concrete hardness,
Earthquake,
ANSYS,
Monte Carlo.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.114977.1438

*Corresponding author: Atabak Feizi

Email address: a_feizi@uma.ac.ir

۱- مقدمه

مخازن آب از جمله اجزاء اصلی شبکه‌های آبرسانی جهت ذخیره، نگهداری و نیز تامین فشار مورد نیاز می‌باشند. چنین سازه‌هایی باید پس از وقوع زلزله قابلیت بهره‌برداری و تامین فشار در شبکه آبرسانی را داشته باشد و شکل‌پذیری مناسب، ظرفیت جذب و استهلاک انرژی زلزله و حفظ پایداری کلی سازه از اهم موارد در طرح مناسب این گونه مخازن می‌باشند. دلیل رفتار نامناسب لرزه‌ای مخازن هوایی، مربوط به شکل کلی آنها است که به صورت پاندول وارونه است و جرم سنگینی نیز در بالای آن متمرکز می‌باشد. در گذشته مخازن هوایی بیشتر برای بارهای وزنی در نظر گرفته می‌شدند و بار طراحی و نیروی زلزله به صورت درصدی از وزن سازه در نظر گرفته می‌شد. لیکن با پیشرفت در بررسی اندرکنش سازه و سیال، طراحان با روش‌های پیشرفته‌تر به طراحی این سازه‌ها پرداخته‌اند [۱].

هاسکینز^۱ در سال ۱۹۳۴ با در نظر گرفتن مخزنی با جداره صلب که به صورت گیردار به پی متصل شده بود، به بررسی آزمایشگاهی و نظری پاسخ سیستم تحت اثر حرکت افقی زلزله پرداخت [۲]. ژاکوبسن^۲ در سال ۱۹۴۹ فشار هیدرودینامیک وارد بر دیواره مخازن استوانه‌ای که پی آن‌ها تحت اثر یک تحریک دینامیکی افقی قرار داشت را محاسبه و سرعت ذرات مایع در نقاط مختلف را به دست آورد [۳]. در زمینه بدست آوردن مدل‌های دینامیکی ساده برای مخازن هوایی آب، اولین بار، هاوسنر^۳ در سال ۱۹۶۳ به حل تحلیلی معادله فشار هیدرودینامیکی آب روی دیواره اقدام کرد. وی سپس مدلی از جرم‌های متمرکز فنر را جایگزین فشار حاصل از تلاطم آب نمود. این مدل‌ها مانند شکل (۱) براساس طبیعت دیواره مخزن بدست آمده بودند [۴]. هارون و الیتی^۴ در سال ۱۹۸۵ آزمایش‌هایی را روی مدل‌های با مقیاس ۱:۱۰ و ۱:۲۰ مخازن هوایی انجام داد و نتایج را با تحلیل‌های کامپیوتری مقایسه کرد. نتیجه بدست آمده نشان می‌داد که رفتار دینامیکی مخازن هوایی آب با دقت مناسب قابل معادل‌سازی با یک مدل مکانیکی دو درجه آزادی است [۵]. شریمالی و کانیگید^۵ در سال ۲۰۰۲ عملکرد لرزه‌ای مخازن هوایی ایزوله شده را با دو نوع جداساز مورد بررسی قرار دادند. با قرار دادن دو نوع جداساز یاطاقانی و الاستومر خطی در پایه سیستم نگهدارنده، پاسخ‌های برش پایه و تغییر شکل‌ها برای هر دو نوع جداساز لرزه‌ای به دست آمده و مشخص شد که یاطاقان‌های لغزشی در کنترل پاسخ‌ها موثرتر از الاستومرهای خطی می‌باشند [۶]. در سال ۲۰۰۴، داتا^۶ و همکاران نشان دادند که اندرکنش سازه- خاک ممکن است به ویژه در مورد مخازن هوایی با پریردهای سازه‌ای پایین، باعث افزایش برش پایه شود. همچنین نتایج بدست آمده بیانگر آن است که صرفنظر کردن از تاثیر اندرکنش سازه- خاک ممکن است در برخی ستون‌ها به دلیل بار لرزه‌ای، به نیروهای کششی بزرگ بالقوه‌ای بیانجامد [۷]. لیواگلو و دوگانگوم^۷ در سال ۲۰۰۵، پروسه تحلیلی ساده‌ای را برای تحلیل لرزه‌ای سیستم‌های خاک- پی- مخزن هوایی سیال ارائه کردند و از این تقریب در مخازن منتخب استفاده نمودند. همچنین در این تحقیق مطالعه تطبیقی بر روی رفتار لرزه‌ای مخازن هوایی با بررسی تاثیرات اندرکنش سازه- سیال و سازه- خاک انجام شده است [۸]. چن و کیانوش^۸ در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ طی دو تحقیق یک روش تحلیلی موسوم به روش تکراری برای بررسی پاسخ دینامیکی مخزن‌های بتنی ارائه دادند. در این روش، سیال داخل مخزن به صورت چندگرهی مدل شده است. این روش در واقع از روش انتگرال‌گیری مرحله به مرحله با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری جداره‌ها تحت مؤلفه‌های افقی و عمودی استفاده شده است [۹ و ۱۰].

¹ Hoskins

² Jacobsen

³ Housner

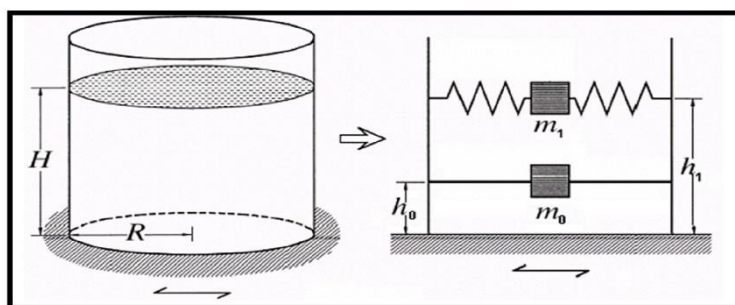
⁴ Haroun & Ellaithy

⁵ Shrimali & Jangid

⁶ Dutta

⁷ Livaoglu & Dogangun

⁸ Chen & Kianoush



شکل ۱: شماتیکی از مدل تحلیلی هائوسنر [۴]

سویدان^۹ در سال ۲۰۰۹، از یک روش مکانیکی معادل برای مدل کردن رفتار دینامیکی مخزن‌های هوایی استفاده کرد. بررسی‌های آنها نشان داد که اثر مؤلفه قائم زلزله بر فشار هیدرو دینامیکی قابل ملاحظه می‌باشد [۱۱]. شکاری^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۰۹ عملکرد لرزه‌ای مخازن هوایی نگهداری مایعات استوانه‌ای فولادی را با در نظر گرفتن اندرکنش سیال سازه و با حل درگیر اجزای محدود و اجزای استوانه‌ای با دیواره انعطاف‌پذیر، تحت اثر مؤلفه‌ی افقی رکورد زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق اثرات اندرکنش سیال سازه نیز در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که پاسخ لرزه‌ای مخازن جداسازی شده در پایه، می‌تواند کاهش قابل توجهی نسبت به مخازن با پایه‌ی گیردار داشته باشد. همچنین جداساز لرزه‌ای در مخازن لاغر موثرتر از مخازن پهن می‌باشد و بازدهی جداسازی در مخازن صلب مناسب‌تر است. [۱۲]. قائم مقامی و کیانوش در سال ۲۰۱۰ رفتار دینامیکی مخازن بتنی زمینی مستطیلی را با روش اجزای محدود به صورت دوبعدی و سه‌بعدی بررسی کردند. در این پژوهش، تحلیل دینامیکی مخازن بتنی آب به روش اجزای محدود با تحلیل‌های مودال^{۱۱} و تاریخچه زمان^{۱۲} انجام گرفت و تأثیر المان‌بندی‌های مختلف در پاسخ‌های دینامیکی بررسی شد [۱۳]. شکیب و همکاران در سال ۲۰۱۰، از روش المان محدود برای بررسی عملکرد لرزه‌ای مخازن مرتفع بتنی استفاده کرده‌اند. بدین منظور سه مخزن بتنی مسلح غیرخطی مدل شده است. نتایج حاصله نشان داده است که ماکزیمم پاسخ عموماً در مخزن پر اتفاق نمی‌افتد. همچنین با کاهش همزمان سختی قاب بتنی مسلح و افزایش جرم، پیروود طبیعی سازه افزایش می‌یابد و همچنین مخزن هوایی بتن مسلح آب به حجم ۹۰۰ مترمکعب را تحت اثر هفت رکورد زلزله مورد بررسی و تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی قرار دادند. در این تحقیق پاسخ‌های مخزن از قبیل برش پایه، لنگر واژگونی، جابجایی مخازن و جابجایی متلاطم تحت اثر این هفت شتاب‌نگاشت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که حداکثر جابجایی در محل اتصال ستون‌ها به محفظه اتفاق می‌افتد. همچنین نتایج بیانگر آن است که پاسخ بحرانی مخزن هوایی همیشه در حالت مخزن پر اتفاق نمی‌افتد و ممکن است در حالت پرشدگی با درصد کمتر و حتی خالی مخزن نیز اتفاق بیفتد. بعلاوه برش پایه و لنگر واژگونی همیشه در حالت مخزن پر بحرانی نمی‌باشند [۱۴].

تحقیقات متعددی بر روی اعتبار تحلیل احتمالاتی بر روی سازه‌های مختلف متمرکز شده است ولی در مورد مخازن هوایی تحقیقات چندانی صورت نگرفته است. آلتارجوس-گارسیا^{۱۳} و همکاران در سال ۲۰۱۲، به برآورد احتمال شکست سد بتنی وزنی با در نظر گرفتن شکست لغزشی تحت بارگذاری هیدرولیکی به عنوان یک مطالعه موردی پرداختند [۱۵]. پاسبانی در سال ۲۰۱۶ در زمینه تحلیل احتمالاتی و حساسیت به بررسی تأثیر ضریب جذب کف در آنالیز لرزه‌ای سد بتنی با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو^{۱۴} پرداخته است. نتایج حاصل شده، قابلیت تحلیل احتمالاتی را در بررسی حساسیت نمایش لرزه‌ای سد بتنی نسبت به اثرات جذب کف به وضوح نشان می‌دهد [۱۶]. در واقع تئوری احتمالات یک چارچوب ریاضی برای کمیت بخشی به عدم قطعیت‌ها به منظور تصمیم‌گیری است. تقریباً تمام پارامترهای مورد نیاز برای طراحی سازه مانند جرم، میرایی، خصوصیات مصالح، شرایط مرزی، حرکت زمین دارای عدم قطعیت می‌باشند. برای طرح یک سازه ایمن باید عدم قطعیت‌ها شناسایی شوند. عدم قطعیت‌ها در علوم مهندسی اغلب ناشی از فرضیات یا خطاهای مدل و یا

⁹ Sweedan¹⁰ Shekari¹¹ Modal analysis¹² Time history¹³ Altarejos-García¹⁴ Mont Carlo

تفاوت بارهای ورودی است. یک فرض عملی برای این رفتار، انجام تحلیل حساسیت و عدم قطعیت در چارچوب روش‌های احتمالاتی و رخدادهای تصادفی است. برای گسترش پارامترهای عدم قطعیت به عملکرد لرزه‌ای واقعی مخازن، روش‌های طراحی احتمالاتی، نظیر روش شبیه‌سازی مونت کارلو به کار گرفته می‌شود. یکی از اهداف معمول در کاربرد روش مونت کارلو تخمین پارامترهای خاص و توزیع‌های احتمال متغیرهای تصادفی می‌باشد. این روش توسط رایبستون^{۱۵} در سال ۱۹۸۱ ابداع شده، که یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای استفاده در حل مسایل پیچیده آنالیز قابلیت احتمال می‌باشد [۱۷].

در این تحقیق، به بررسی تاثیر نسبت سختی بتن فونداسیون به بتن بدنه مخزن بر پاسخ لرزه‌ای مخازن مرتفع با استفاده از تحلیل احتمالاتی پرداخته شده است. برای انجام تحلیل‌های سه بعدی از نرم‌افزار انسیس^{۱۶} استفاده شده است. تحلیل احتمالاتی بکار گرفته شده، شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از روش نمونه برداری فوق‌العاده مکعبی^{۱۷} بوده و از ضریب K (نسبت سختی بتن فونداسیون به بتن بدنه مخزن) به عنوان متغیر ورودی استفاده شده است. نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها و پاسخ‌هایی نظیر تنش‌های اصلی حداکثر و تغییر مکان حداکثر مورد بررسی بیشتر قرار گرفته است.

۲- معادله حاکم بر سیستم

در این تحقیق از روش اویلری- لاگرانژی در معادلات استفاده شده است. روش اویلری - لاگرانژی از یک مجهول فشار هیدرودینامیک در هر گره مدل مخزن استفاده می‌کند که در مقایسه با روش لاگرانژی- لاگرانژی، تعداد مجهولات به شدت کاهش می‌یابد. در استفاده از این روش، الگوریتم حل نوسانی برای محاسبه پاسخ سیستم با حل دو دستگاه معادلات در هر گام زمانی استفاده می‌شود که یک الگوریتم مناسب و قوی در این زمینه می‌باشد. این الگوریتم نیاز به تکرار در هر دو میدان سازه و سیال برای حل مسائل دارد. برای بدست آوردن معادلات حاکم بر سیال داخل مخزن فرض می‌شود که سیال غیرچرخشی، غیرلزج و با تغییر مکان‌ها کوچک است. در این صورت معادله موج آکوستیک به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \quad (1)$$

که در این رابطه، $c = \sqrt{\frac{k}{\rho_0}}$ بیان کننده سرعت امواج صوتی در سیال، ρ_0 چگالی سیال، k ضریب تغییرات حجمی سیال، P فشار آکوستیک و t زمان می‌باشد. معادله حاکم بر قسمت جامد سیستم شامل بدنه مخزن، پایه و فونداسیون، معادله حرکت می‌باشد که بارهای ناشی از اثرات اندرکنش لازم است به آن اضافه گردد [۱۸].

۳- مطالعه موردی

برای آنالیز مدل، مخزن هوایی آب شهر رشت، که دارای حجم نسبتاً بزرگ تقریباً ۲۵۰۰ متر مکعب می‌باشد به عنوان مطالعه موردی، در نظر گرفته شده است. هندسه مدل مورد استفاده تا حد زیادی مطابق مخزن هوایی واقعی آب شهر رشت ساخته شده که طی زلزله منجیل در سال ۱۳۶۸ دچار خسارت و ترک خوردگی شده است. مشخصات اصلی عناصر هندسی مدل مخزن آب شهر رشت به همراه نمایی از آن در شکل (۲) ارائه شده است.

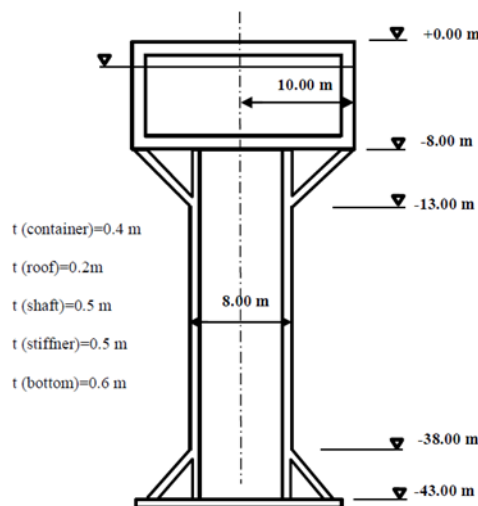
¹⁵ Rubinstein

¹⁶ ANSYS

¹⁷ Latin Hyper Cube Sampling



(ب)



(الف)

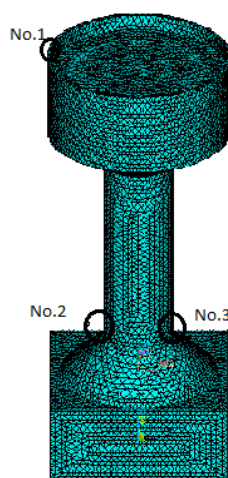
شکل ۲ الف: مشخصات هندسی مدل شبیه‌سازی شده، ب: مدل واقعی مخزن آب شهر رشت

۴- تحلیل مدل

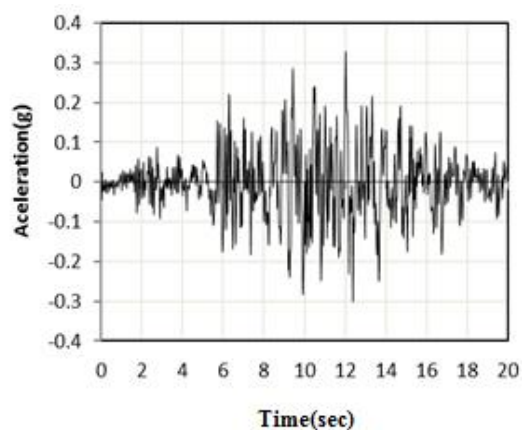
همانطوری که بیان شد، در این تحقیق برای بررسی موضوع حاضر از نرم‌افزار انسیس استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت بررسی کامل و جامع اندرکنش سازه و سیال همراه با در نظر گرفتن تحلیل لرزه ای برای هندسه نامنظم دامنه‌ها و اعمال بار زلزله به صورت شتاب‌نگاشت و تحلیل تاریخچه زمانی را دارا می‌باشد. بعد از ساخت هندسه مدل‌ها در نرم‌افزار، شبکه‌بندی‌هایی به اندازه ۰/۷ متر از المان‌های معرفی شده برای فونداسیون، پایه، مخزن و آب داخل مخزن اعمال شده است. با این شبکه‌بندی محاسبات عددی به روش اجزای محدود توسط نرم‌افزار انجام شده است. البته در خصوص تعیین ابعاد المان استفاده شده در این تحقیق بررسی‌های لازم صورت گرفته و آنالیز حساسیت انجام شده است تا بهینه‌ترین ابعاد با در نظر گرفتن استقلال شبکه‌بندی انتخاب گردد. در این تحقیق برای انتگرال‌گیری عددی از روش نیومارک^{۱۸} استفاده شده است. در واقع روش‌های انتگرال‌گیری عددی را می‌توان به دو دسته روش‌های صریح و ضمنی تقسیم کرد که روش نیومارک جزء روش‌های ضمنی محسوب می‌باشد. به طور کلی روش‌های صریح به طور مشروط پایدار می‌باشند و اگر گام زمانی به اندازه کافی کوچک انتخاب نشود، جواب‌ها واگرا خواهند شد. در حالی که در روش‌های ضمنی با انتخاب مناسب پارامترهای مربوطه به طور نامشروط پایدار می‌باشند. β و γ پارامترهایی می‌باشند که می‌توان آن‌ها را برای بدست آوردن دقت انتگرال‌گیری و پایداری روش تعیین نمود. در این تحقیق با در نظر گرفتن $\beta = 0.25$ و $\gamma = 0.5$ ، دقت انتگرال‌گیری و پایداری روش به صورت مطلوب حاصل شده است. سرعت امواج فشاری در آب ۱۴۴۰ متر بر ثانیه، فونداسیون به صورت انعطاف‌پذیر و ضریب میرایی ثابت و مساوی ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با روش Full method انجام پذیرفته است. به منظور تحلیل دینامیکی، مخزن هوایی منجیل به ارتفاع کلی ۴۷/۲۵ متر به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی مخازن سیال که در آن‌ها نرخ تغییرات جریان وجود ندارد، از المان 3D Acoustic30 استفاده شده است. بدین منظور در این تحقیق برای سیال از جزء 3D Acoustic30 شامل هشت گره و سیال تراکم ناپذیر و مدول بالک ۲GPa و چگالی برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. برای دیواره‌های مخزن از جزء سازه‌ای Solid185 که یک عنصر ۸ گرهی با سه درجه آزادی برای هر گره است استفاده شده و چگالی بتن مخزن برابر ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضریب پواسون آن ۰/۲۲ در نظر گرفته شده است. با توجه به رفتار و هندسه مخازن هوایی، مدل‌سازی به صورت سه بعدی انجام شده است. بعلاوه برای انجام آنالیز، اطراف فونداسیون در تمام جهت گیردار، سطح آب در مخزن به صورت پر و در حالت بحرانی با فشار صفر و اندرکنش آب و سازه برای محل تماس آب و جداره و کف مخزن در نظر گرفته شده است [۱۹]. مدل اجزای محدود

¹⁸ Newmark

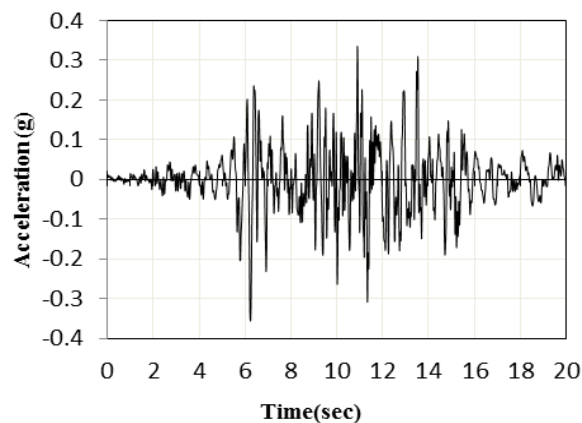
انتخاب شده برای سیستم در شکل (۳) و مولفه‌های شتاب نگاشت زمین لرزه منجیل در هر سه راستا در شکل‌های (۴) تا (۶) نشان داده شده است.



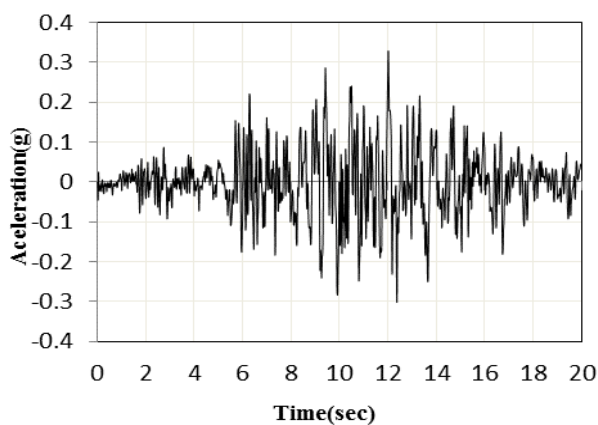
شکل ۳: مدل المان محدود مخزن



شکل ۵: مولفه افقی شرق - غرب شتاب نگاشت زمین لرزه منجیل

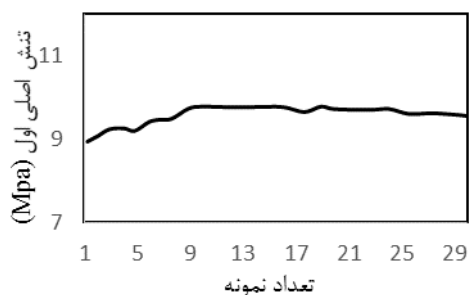


شکل ۴: مولفه افقی شمال - جنوب شتاب نگاشت زمین لرزه منجیل

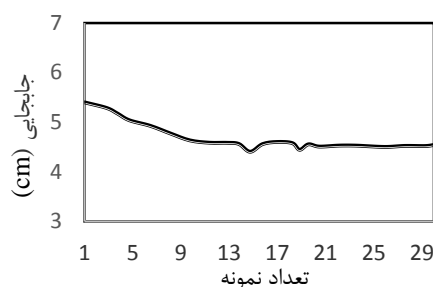


شکل ۶: مولفه عمودی شتاب نگاشت زمین لرزه منجیل

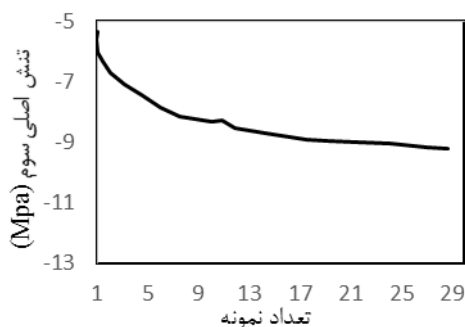
به منظور آنالیز دینامیکی، ۱۵ ثانیه اول از هر سه مولفه شتاب نگاشت‌های زلزله منجیل، با گام زمانی ۰/۰۲ ثانیه اعمال شده است. گره‌های بحرانی، نقاطی هستند که در آن‌ها، مقدار پاسخ‌ها نسبت به نقاط دیگر سازه بیشتر می‌باشد. در این تحقیق بعد از اعمال زلزله منجیل به تحلیل تاریخچه زمانی پرداخته شده است. بدین صورت که در ابتدا با استفاده از نمودار تاریخچه زمانی، در زمانی که در آن‌ها مقدار پاسخ‌ها حداکثر بوده نقاط بحرانی مشخص گردیده است. بعد از مشخص شدن سه زمان بحرانی برای پاسخ‌ها، کانتور توزیع پاسخ در زمان بحرانی برای هر پاسخ استخراج شده است که با استفاده از این کانتورها نقاط بحرانی مشخص گردیده است. بدین صورت گره‌های بحرانی شامل گره موجود در اتصال پایه به مخروطی پایین (No2 و No3) برای بدست آوردن تنش‌های ماکزیمم و گره موجود در بالاترین ارتفاع مخزن (No1) برای حداکثر تغییر مکان انتخاب شده است. محل گره‌های بحرانی (No1، No2، No3) در شکل (۳) نیز نشان داده شده است. در این تحقیق با اعمال عدم قطعیت در پارامتر تصادفی (ضریب مدول) به بررسی احتمالاتی پاسخ‌های سازه تحت اعمال شتاب‌نگاشت زلزله منجیل پرداخته شده است. برای بررسی اثر مدول الاستیسیته فونداسیون بر تحلیل و طراحی سیستم، از ضریبی به نام ضریب مدول K استفاده شده است. این ضریب نسبت مدول الاستیسیته فونداسیون به مدول الاستیسیته بتن مخزن تعریف شده است. با توجه به اینکه جرم فونداسیون مخزن هوایی در مقایسه با جرم فونداسیون سدهای بتنی محدود می‌باشد، در مخازن هوایی لحاظ کردن مدل بدون جرم و یا با جرم تفاوت چندانی در پاسخ‌ها نشان نمی‌دهد. بنابراین در این تحقیق برای مدل‌سازی فونداسیون از روش فونداسیون بدون جرم استفاده شده و ضریب K به عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته بتن مخزن ثابت و برابر ۲۸ گیگاپاسکال فرض شده است. با انجام آنالیز حساسیت نسبت به مقادیر انحراف معیار، این نتیجه حاصل شده است که انحراف معیار ۰/۴ محدوده پراکندگی داده‌ها را بهتر از بقیه مقادیر نمایش می‌دهد. در این تحقیق مقدار متوسط پارامتر ورودی در حلقه‌های شبیه‌سازی به عنوان تابعی از تعداد حلقه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های (۷) تا (۹)، به ترتیب تغییر مکان متوسط تاج مخزن، تغییرات متوسط تنش‌های اصلی اول و سوم را نسبت به تعداد نمونه‌ها نشان می‌دهند. از این نمودارها استنباط می‌شود که بعد از تعداد ۲۰ نمونه، روند نمایش منحنی‌ها به صورت افقی درآمده است. در نتیجه حداقل تعداد نمونه‌ها یعنی ۲۰ نمونه به جهت صرفه‌جویی در زمان تحلیل، برای شبیه‌سازی نهایی تحقیق حاضر انتخاب شده است. با توجه به داده‌های موجود، مقدار میانگین در این تحقیق ۱/۵۶ بوده است.



شکل ۸: تغییرات متوسط تنش اصلی اول



شکل ۷: تغییر مکان متوسط تاج مخزن



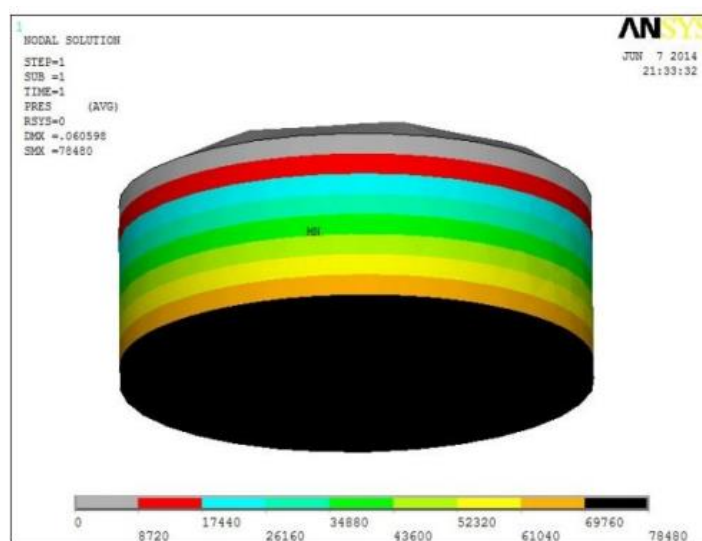
شکل ۹: تغییرات متوسط تنش اصلی سوم

۵- بررسی صحت سنجی مدل

صحت سنجی مدل، در دو حالت بررسی پارامتر فشار هیدرواستاتیکی وارد بر کف مخزن با در نظر گرفتن تمام شرایط مرزی و همچنین بررسی فرکانس بدست آمده از تحلیل مودال مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱- تحلیل استاتیکی

با انجام تحلیل استاتیکی مدل ناشی از شتاب ثقل نتایج زیر حاصل شده است که این نتایج با نتایج حاصل از مقادیر تحلیلی مقایسه شده تا صحت سنجی مدل کنترل شود. کانتور فشار هیدرواستاتیکی وارد بر کف مخزن بدست آمده از مدل در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.



شکل ۱۰: توزیع فشار هیدرواستاتیکی آب داخل مخزن

همانطوری که ملاحظه می شود مقدار ماکزیمم فشار در کف مخزن برابر ۷۸۴۸۰ پاسکال بدست آمده است. مقدار ماکزیمم فشار در کف مخزن طبق معادلات حاکم و با توجه به رابطه (۲) بدست می آید:

$$P = \rho gh = 8 \times 9 / 81 \times 1000 = 78480 Pa \quad (2)$$

در این رابطه، P فشار هیدرواستاتیکی بر حسب پاسکال، ρ چگالی آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب و h ارتفاع آب مخزن بر حسب متر می باشد. مقایسه نتایج بدست آمده نشان می دهد که مقدار حاصل از تحلیل استاتیکی مدل با محاسبات رابطه (۲) اختلاف چندانی نداشته، بنابراین مدل دارای دقت مناسب بوده است.

۵-۲- تحلیل مودال

آنالیز مودال در واقع به شناسایی خواص دینامیکی سازه می پردازد. از جمله خواص دینامیکی سازه می توان به فرکانس های طبیعی سازه اشاره کرد. در این صحت سنجی نتایج فرکانس های حاصل از تحلیل مودال با نتایج حاصل از مقادیر تحلیلی مقایسه شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل مودال با استفاده از نرم افزار انسیس نشان می دهد که مقدار فرکانس اولیه ۱/۰۷۷۶ هرتز می باشد که برای ادامه

صحت‌سنجی با روش تحلیل مودال، این مقدار در نظر گرفته شده است. مقدار تحلیلی طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای زمان تناوب اصلی نوسان جرم متمرکز در انتهای طره لاغر با مقطع یکنواخت (در صورتی که از جرم طره صرف‌نظر نشود) از روابط (۳) و (۴) به دست می‌آید:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P'l^3}{3gEI}} \quad (3)$$

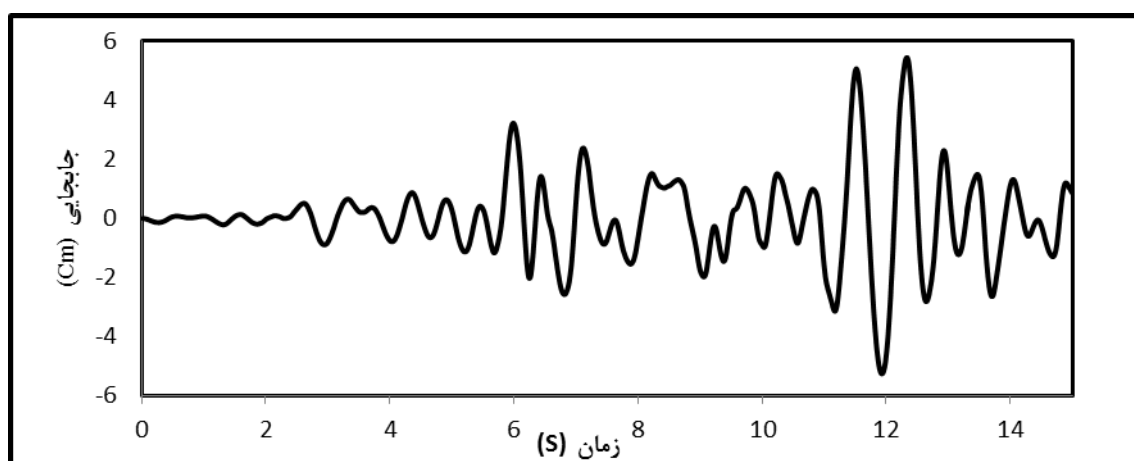
$$P' = P + \frac{33}{140} ql \quad (4)$$

در این روابط، P : وزن جرم متمرکز بر حسب کیلوگرم، q : وزن واحد طول طره بر حسب کیلوگرم، l : طول طره بر حسب متر، g : شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه، E : مدول ارتجاعی بر حسب پاسکال و I : ممان اینرسی مقطع بر حسب m^4 می‌باشد. وزن جرم متمرکز در مدل مورد مطالعه، قسمت بالای مخزن حاوی سیال می‌باشد. با جایگذاری مقادیر موجود در تحقیق حاضر، فرکانس بدست آمده از رابطه تحلیلی $1/0.63$ هرتز بدست آمده است. اختلاف مقدار فرکانس اولیه بدست آمده از مدل تحقیق حاضر با مقدار تحلیلی حدود $0/014$ می‌باشد، که بیانگر این است که مدل دارای دقت مناسبی در ارائه نتایج می‌باشد.

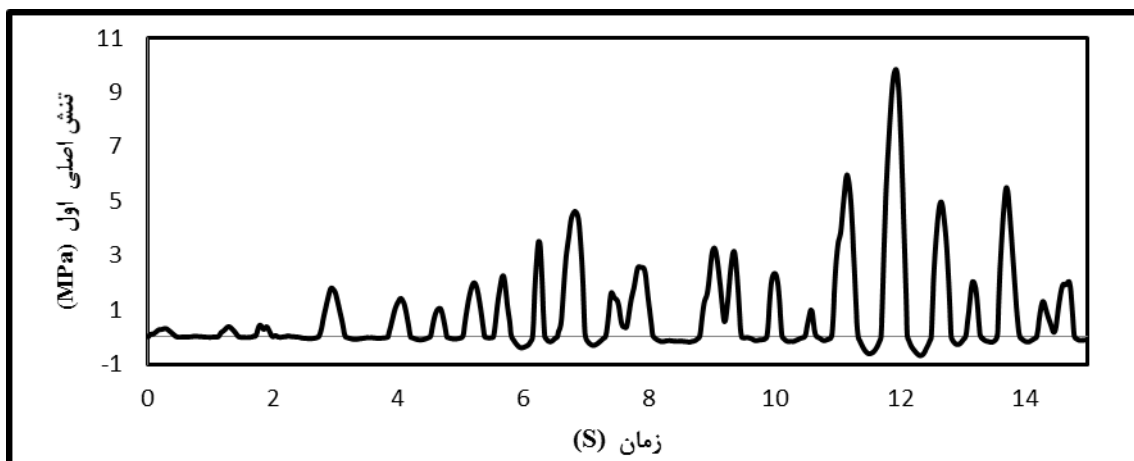
۶- نتایج

۶-۱- تحلیل دینامیکی

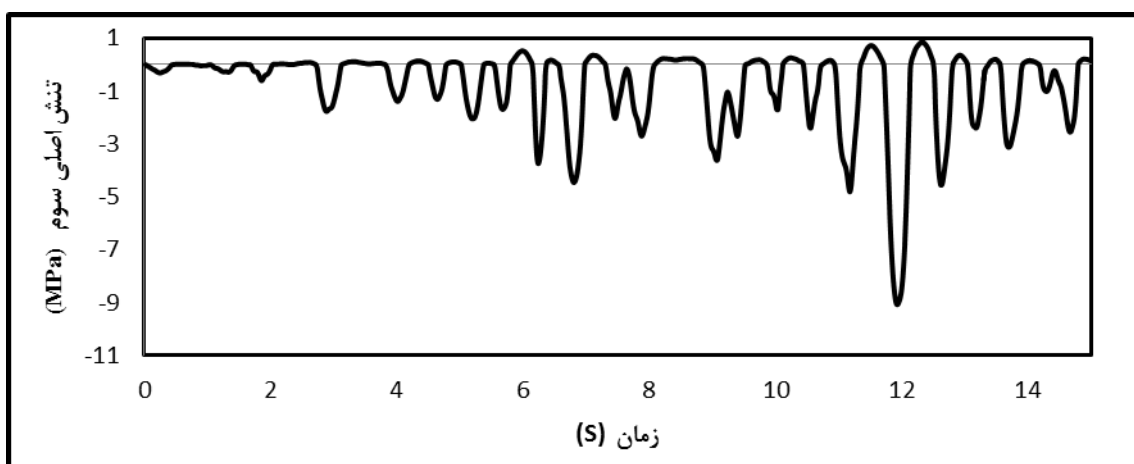
در این تحقیق بعد از مدل‌سازی سازه مخزن بتنی، رکورد زمین‌لرزه منجیل برای تحلیل دینامیکی این سازه تحت شرایط زمین لرزه‌ای مورد استفاده قرار گرفته شده است. داده‌های مربوط به شتاب‌نگاری استفاده شده در این تحقیق از بانک اطلاعاتی شبکه شتاب‌نگاری بدست آمده است. این داده‌ها به صورت رقومی به نرم افزار Seismosignal وارد شده و با انتخاب نوع رکورد، گام زمانی مورد نظر و همچنین عامل مقیاس، داده‌های حاصل از ایستگاه‌های شتاب‌نگاری را در سه شکل شتاب T ، V ، L مربوط به جهت‌های سرعت و جابجایی بر حسب زمان بدست آمده است. نهایتاً این شتاب نگاشت‌ها با گام زمانی $0/02$ ثانیه به مدل اعمال شده است. نتایج مربوط به تحلیل دینامیکی سازه مورد مطالعه که شامل حداکثر تغییر مکان افقی، تنش فشاری و کششی مربوط به گره‌های بحرانی می‌باشد در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) ارائه شده است. با توجه به شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) مشاهده می‌شود که مقدار ماکزیمم جابجایی در زمان $12/34$ ثانیه برابر $5/44$ سانتیمتر است. همچنین مقدار ماکزیمم تنش اصلی اول و سوم به ترتیب برابر $9/83$ و $9/60$ مگا پاسکال بوده که در زمان $11/94$ ثانیه رخ داده است.



شکل ۱۱: تاریخچه زمانی حداکثر تغییر مکان افقی برای زلزله منجیل



شکل ۱۲: تاریخچه زمانی حداکثر تنش اصلی اول برای زلزله منجیل



شکل ۱۳: تاریخچه زمانی حداکثر تنش اصلی سوم برای زلزله منجیل

دستورالعمل ACI-318 رابطه‌ای بین مدول الاستیسیته بتن و مقاومت فشاری استوانه‌ای برای محاسبه تغییرشکل خمشی را به صورت رابطه (۵) ارائه کرده است:

$$E_c = 5000 f_c'^{\frac{1}{2}} \text{ MPa} \quad (5)$$

در این رابطه E_c : مدول الاستیسیته و f_c' : مقاومت فشاری نمونه بتنی است.

محققان زیادی روش‌های گوناگونی را برای تعیین مقاومت کششی بتن ارائه داده‌اند. رافائل (Raphael, 1984) برای تعیین مقاومت کششی بتن بر روی ۱۲۰۰ نمونه با ابعاد معمولی آزمایش انجام داد. در پایان رافائل با برازش منحنی‌ها و نتایج آزمایش‌ها، معادله (۶) را برای مقاومت کششی بتن ارائه داده است [۲۰]:

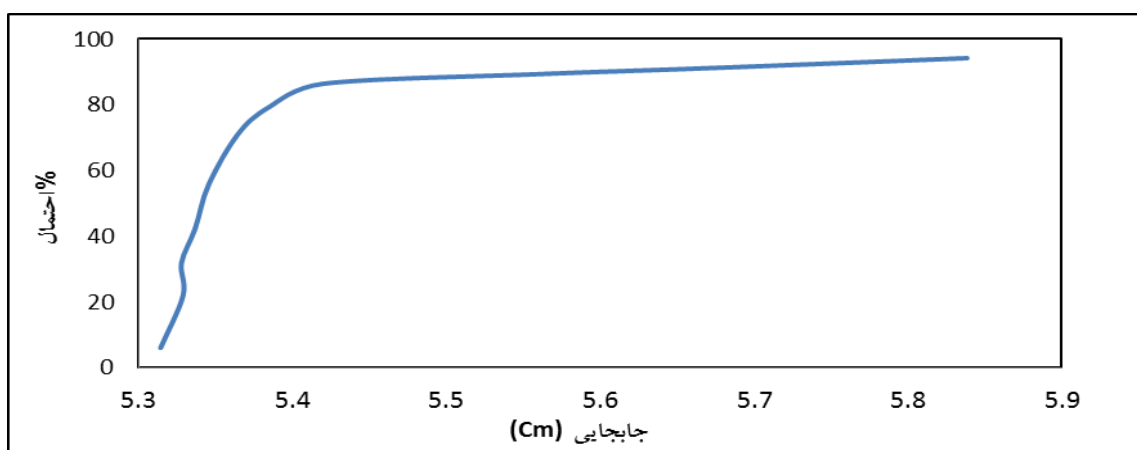
$$\sigma_t = 2.6 f_c'^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

در این رابطه σ_t : مقاومت کششی بتن و f_c' : مقاومت فشاری نمونه بتنی برحسب Psi می‌باشند.

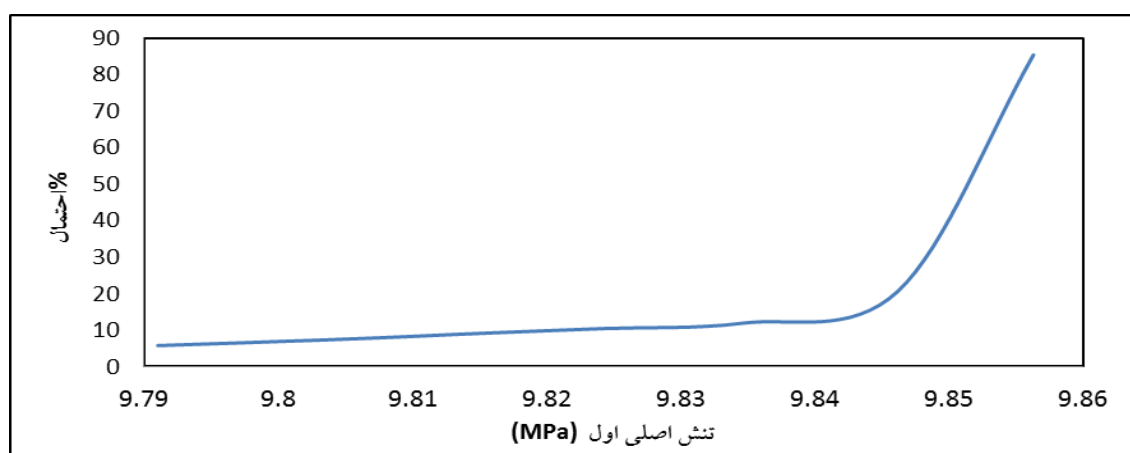
با استفاده از روابط (۵) و (۶) می توان تنش کششی و فشاری مجاز را بدست آورد و آن ها را با مقادیر بدست آمده از نتایج مقایسه کرد تا در صورت بیشتر بودن تنش ها از مقدار مجاز، تمهیدات لازم صورت گیرد. در تحقیق حاضر، مقاومت فشاری مجاز $31/36$ مگاپاسکال و مقاومت کششی مجاز $4/65$ مگاپاسکال بدست آمده است.

۶-۲- تحلیل احتمالاتی

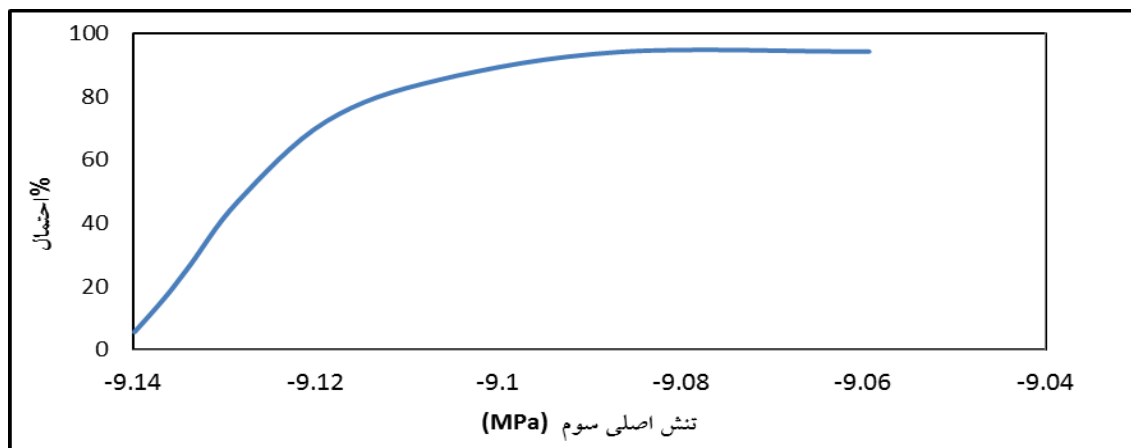
تابع توزیع تجمعی متغیرها ابزاری اولیه برای بررسی عدم اطمینان است تابع توزیع تجمعی همواره صعودی بوده و همچنین مقادیر تابع توزیع تجمعی به صورت درصد برای هر مقدار از پاسخ مشخص شده است. شکل های (۱۴) تا (۱۶) توزیع احتمال پارامتر ورودی را برای سیستم مورد مطالعه تحت اعمال زلزله منجیل نمایش می دهند. شکل ۱۴ نشان می دهد که احتمال اینکه تغییر مکان مرتفع ترین قسمت مخزن (نقطه بحرانی برای تغییر مکان حداکثر) تحت زلزله منجیل کمتر از $5/8$ سانتی متر باشد، نزدیک به 100% می باشد. نتایج شکل (۱۵) بیانگر آن است که تنش اصلی کششی برای مدل تحت زلزله منجیل به طور 100% بیشتر از مقاومت کششی معادل $4/65$ مگاپاسکال می باشد. بنابراین سیستم باید برای ناحیه ای که در محدوده مجاز مقاومت کششی نیستند، مقاوم سازی شده و طراحی بهینه ارائه گردد. شکل (۱۶) نیز نشان دهنده این نتیجه است که احتمال آنکه تنش اصلی فشاری بیشتر از $9/04$ مگاپاسکال باشد، 95% درصد است. در واقع این سیستم در قبال تنش های اصلی سوم ایمن می باشد و از مقدار مجاز تجاوز نمی کند.



شکل ۱۴: روند تغییرات احتمالی جابجایی در تاج مخزن (محل NO.1 واقع در شکل ۳)

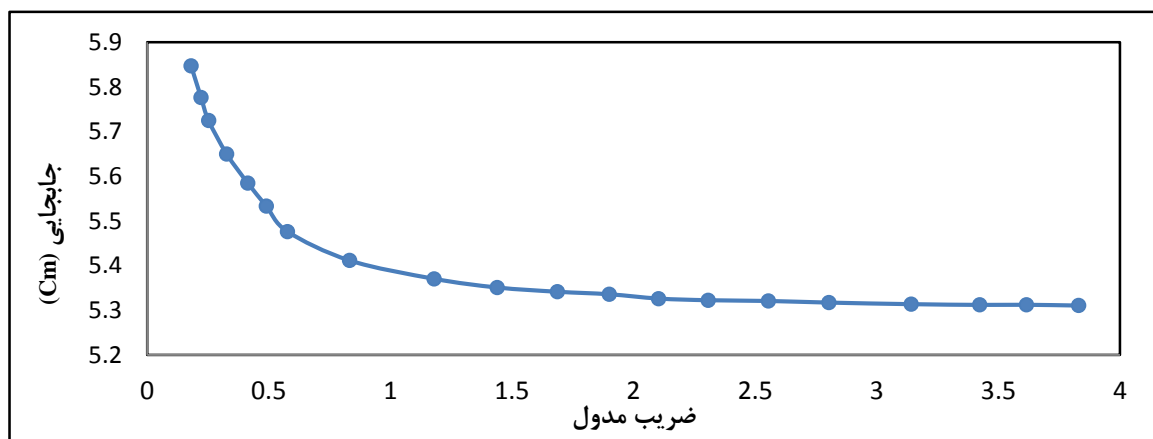


شکل ۱۵: روند تغییرات احتمالی تنش کششی (تنش اصلی اول) در مخروطی پایین (محل NO.2 واقع در شکل ۳)

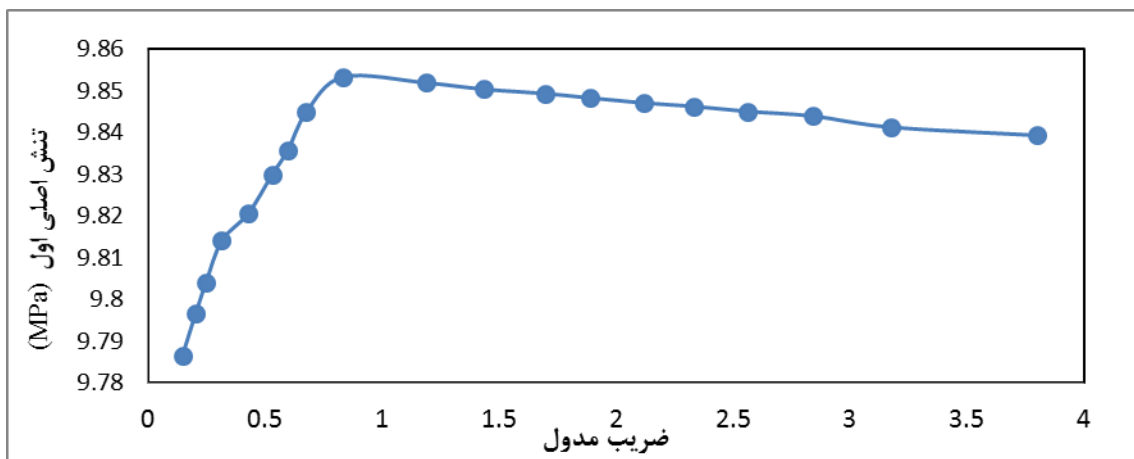


شکل ۱۶: روند تغییرات احتمالی تنش فشاری (تنش اصلی سوم) در مخروطی پایین (محل NO.2 واقع در شکل ۳)

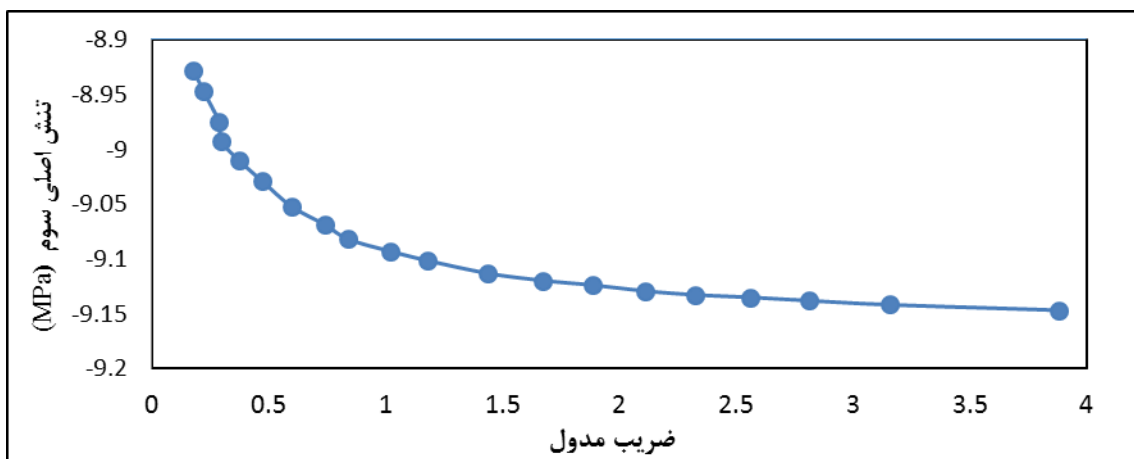
شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) نمودارهای توزیعی ضریب مدول تحت اعمال زلزله منجیل را نمایش می‌دهند. این نمودارها در حقیقت نمودار توزیعی پارامتر ورودی بر حسب پارامترهای خروجی بوده و بیانگر میزان کنترل پارامترهای خروجی توسط پارامتر ورودی می‌باشند. پراکندگی بسیار اندک نقاط روی نمودارها نشان‌دهنده میزان مناسب کنترل پارامترهای خروجی توسط ضریب مدول می‌باشد. با توجه به شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) می‌توان به طور کلی نتیجه گرفت که تغییرات ضریب مدول برای بازه ۰/۱ تا ۰/۷ بسیار موثرتر از بازه ۰/۷ تا ۴ است. نتایج حاصله برای K بزرگتر از ۰/۷ بیانگر رفتار صلب سازه و تغییرات بسیار اندک پاسخ‌های تنش به ازای تغییرات ضریب مدول می‌باشد. همچنین با توجه به شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) می‌توان گفت که منحنی‌های پاسخ بدست آمده به صورت دو خطی می‌باشند. در واقع شیب خط اول در هر سه منحنی نسبت به خط دوم بیشتر بوده و تغییرات تا $K=0/7$ شدیدتر است. بعد از $K=0/7$ شیب خط به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و این کاهش بیانگر رفتار صلب سازه و تغییرات بسیار اندک پاسخ‌ها به ازای تغییرات ضریب مدول می‌باشد. مطابق با شکل (۱۸) مشاهده می‌شود که برای تمامی نمونه‌های شبیه‌سازی شده در کل بازه، با در نظر گرفتن ضریب مدول (K)، یا ضریب مدول الاستیسیته بتن (E_c) در محور افقی نمودار، تنش‌های اصلی اول از مقاومت کششی مجاز ۴/۶۵ مگاپاسکال فراتر رفته‌اند و برای جلوگیری از ایجاد ترک‌های کششی در نواحی بحرانی مخزن تحت اعمال زلزله منجیل نیازمند طراحی ایمن و بهینه می‌باشد. درصد تغییرات پاسخ‌ها برای محدوده‌های مختلف ضریب مدول (K) در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج بدست آمده بیانگر آن است درصد تغییرات پاسخ‌ها در محدوده تغییرات K بین ۰/۷ تا ۴، قابل ملاحظه نبوده و این بدان معنا است که بتن رفتار تقریباً صلبی از خود نشان می‌دهد.



شکل ۱۷: نمودار توزیعی تغییر مکان حداکثر نسبت به افزایش ضریب مدول (K)



شکل ۱۸: نمودار توزیعی تنش اصلی اول حداکثر نسبت به افزایش ضریب مدول (K)



شکل ۱۹: نمودار توزیعی تنش اصلی سوم حداکثر نسبت به افزایش ضریب مدول (K)

جدول ۱: درصد تغییرات پاسخها در محدوده‌های مختلف ضریب مدول (k)

پاسخها	$0.1 \leq K \leq 0.7$	$0.7 \leq K \leq 4$
تغییرات جابجایی	-۶۶/۸	-۳/۳۶
تغییرات تنش اصلی اول (تنش کششی)	+۱۱/۰۱	-۰/۱۷
تغییرات تنش اصلی سوم (تنش فشاری)	+۲۵	-۲/۴

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی عملکرد لرزه‌ای مخزن هوایی با استفاده از تحلیل احتمالاتی مونت کارلو پرداخته شده است. برای این منظور، مخزن هوایی شهر رشت به ارتفاع ۴۳ متر با استفاده از شتاب‌نگاشت زمین لرزه منجیل و با در نظر گرفتن شرایط حاکم بر سیستم و همچنین اندرکنش بین اجزای سیستم در روش اجزای محدود، به صورت سه بعدی با نرم افزار انسیس مدل‌سازی شده است. پارامتر تصادفی مورد نظر در تحلیل‌های احتمالاتی نسبت ضریب مدول الاستیسیته فونداسیون به بتن (K) بوده که با استفاده از انحراف معیار مناسب، بازه‌ای برای بررسی و تحلیل احتمالاتی انتخاب شده است. پارامترهای خروجی و در واقع پاسخ‌های مورد بررسی در طول مطالعه شامل تغییر مکان، تنش اصلی اول و سوم در نواحی بحرانی می‌باشند و در نهایت تحلیل‌های دینامیکی و تحلیل احتمالاتی با کمک شبیه‌سازی مونت کارلو و استفاده از روش نمونه‌برداری فوق‌العاده مکعبی لاتین بر روی مدل انجام شده و خروجی‌های لازم برای تحلیل لرزه‌ای از نرم‌افزار حاصل گشته است. پارامتر مدول الاستیسیته بتن که از جمله مهم‌ترین پارامتر در تعیین سختی بتن است، به عنوان متغیر ورودی در بررسی تاثیر بر روی مقاومت بتن در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده بیانگر آن است که افزایش سختی بتن از یک مقدار مشخص، تاثیری بر پاسخ‌ها نداشته و شیب منحنی حساسیت به صفر میل می‌کند و می‌توان گفت سختی بالا ملاک طراحی نیست. به طوری که با افزایش ضریب مدول تا $K=0.7$ ، جابجایی $66/8$ درصد کاهش، تنش اصلی اول $11/01$ درصد افزایش و تنش اصلی سوم نیز 25 درصد افزایش یافته است. همچنین نتایج بدست آمده بیانگر آن است که میزان تغییرات پاسخ‌ها برای محدوده $0.7 \leq K \leq 4$ ، قابل ملاحظه نمی‌باشد. دلیل این امر می‌تواند در عملکرد رفتار صلب فونداسیون نسبت به بدنه مخزن هوایی باشد.

مراجع

- [1] Omidinasab, F., & Shakib, H. (2012). Seismic response evaluation of the RC elevated water tank with fluid-structure interaction and earthquake ensemble. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 16(3), 366-376.
- [2] Hoskins, L. M., & Jacobsen, L. S. (1934). Water pressure in a tank caused by a simulated earthquake. *Bulletin of the seismological society of America*, 24(1), 1-32.
- [3] Jacobsen, L. S. (1949). Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of fluid surrounding a cylindrical pier. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 39(3), 189-204.
- [4] Housner, G. W. (1963). The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the seismological society of America*, 53(2), 381-387.
- [5] Haroun, M. A., & Ellaithy, H. M. (1985). Seismically induced fluid forces on elevated tanks. *Journal of Technical Topics in Civil Engineering*, 111(1), 1-15.
- [6] Shrimali, M. K., & Jangid, R. S. (2002). Seismic response of liquid storage tanks isolated by sliding bearings. *Engineering Structures*, 24(7), 909-921.
- [7] Dutta, S., Mandal, A., & Dutta, S. C. (2004). Soil-structure interaction in dynamic behaviour of elevated tanks with alternate frame staging configurations. *Journal of Sound and Vibration*, 277(4-5), 825-853.
- [8] Livaoglu, R., & Dogangun, A. (2005). Seismic evaluation of fluid-elevated tank-foundation/soil systems in frequency domain. *Structural Engineering and Mechanics*, 21(1), 101-119.
- [9] Chen, J. Z., & Kianoush, M. R. (2005). Seismic response of concrete rectangular tanks for liquid containing structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(4), 739-752.
- [10] Kianoush, M. R., & Chen, J. Z. (2006). Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks. *Engineering structures*, 28(5), 704-715.
- [11] Sweedan, A. M. (2009). Equivalent mechanical model for seismic forces in combined tanks subjected to vertical earthquake excitation. *Thin-Walled Structures*, 47(8), 942-952.
- [12] Shekari, M. R., Khaji, N., & Ahmadi, M. T. (2009). A coupled BE-FE study for evaluation of seismically isolated cylindrical liquid storage tanks considering fluid-structure interaction. *Journal of Fluids and Structures*, 25(3), 567-585.
- [13] Ghaemmaghami, A. R., & Kianoush, M. R. (2010). Effect of wall flexibility on dynamic response of concrete rectangular liquid storage tanks under horizontal and vertical ground motions. *Journal of structural engineering*, 136(4), 441-451.
- [14] Shakib, H., Omidinasab, F., & Ahmadi, M. T. (2010). Seismic demand evaluation of elevated reinforced concrete water tanks. *International Journal of Civil Engineering*, 8(3), 204-220.

- [15] Altarejos-García, L., Escuder-Bueno, I., Serrano-Lombillo, A., & de Membrillera-Ortuño, M. G. (2012). Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis. *Structural safety*, 36, 1-13.
- [16] Khiavi, M. P. (2016). Investigation of the effect of reservoir bottom absorption on seismic performance of concrete gravity dams using sensitivity analysis. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(5), 1977-1986.
- [17] Cardoso, J. B., de Almeida, J. R., Dias, J. M., & Coelho, P. G. (2008). Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks. *Advances in Engineering Software*, 39(6), 505-513.
- [18] Wolf, J. (1985). *Dynamic soil-structure interaction*. Prentice Hall international series in civil engineering and engineering mechanics, Inc., Englewood Cliffs, Ne Jersey 07632.
- [19] Ansys User Manual. (2007). *Release 11.0 Documentation for ANSYS*. SASIP, Inc.
- [20] Raphael, J. M. (1984). Tensile strength of concrete. *ACI Journal*, 81(2), 158-165.