تحلیل و بررسی پاسخ برج آبگیر آزاد تحت اثر پالس‌های لرزه‌ای با فرکانس و ماکزیمم شتاب‌های متغیر

احسان تیموری[1]، سعید عباسی*[2]، محتشم محبی[3]

۱- فارغ‌التحصیل دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، Eteymouri@znu.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، Abbasi.saeed@znu.ac.ir

۳- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، Mohebbi@uma.ac.ir

چکیده

در این مطالعه به بررسی رفتار برج‌های آبگیر آزاد- ایستا تحت اثر پالس‌های لرزه‌ای با شدت و فرکانس‌های مختلف پرداخته شده است. همچنین اثرات فرکانس و شدت بارگذاری بر رفتار مخزن پیرامونی و آب داخل برج و متعاقبا اثرات آن‌ها بر رفتار برج آبگیر بررسی شده است. برای ارزیابی بهتر رفتار برج آبگیر، مدل‌هایی مبتنی بر حالات مختلف حضور و عدم حضور مخزن پیرامونی و آب داخلی که شامل ۵ حالت مختلف می‌باشد مدلسازی و بررسی شده است. آنالیزهای انجام گرفته شامل شرایط مختلفی از بارگذاری پالسی اعم از شتاب و فرکانس متغیر می‌باشد. تعداد کل آنالیزهای انجام گرفته ۸۰ آنالیز خطی می‌باشد. جهت مدلسازی و بررسی رفتار دینامیکی خطی مدل‌های برج آبگیر ساخته شده از نرم افزار آباکوس استفاده شده است.آنالیزهای انجام گرفته مشتمل بر دو گام استاتیکی و پالسی بوده و از روش تاریخچه‌ی زمانی برای آنالیز استفاده شده است. مدلسازی برج آبگیر و اندرکنش آن با مخزن پیرامونی و آب داخلی به‌وسیله‌ی فرمول‌بندی کوپل اویلری – لاگرانژی صورت گرفته است. نتایج نشان داد که برای هر مدل اثرات افزایش شتاب بارگذاری و فرکانس بارگذاری بر پاسخ‌های سازه به ترتیب فزاینده و کاهنده می‌باشد. افزوده شدن مخزن پیرامونی و آب داخلی در تمامی شتاب‌ها و فرکانس‌های بارگذاری اثرات فزاینده بر پاسخ سازه دارند. اثرات آب داخل برج و تراز ارتفاعی آن بر پاسخ برج آبگیر وابستگی شدید به فرکانس بارگذاری داشته و حتی در برخی از فرکانس‌های بارگذاری برج با آب داخلی نیمه‌پر نسبت به زمانی که آب داخل برج پر است شرایط بحرانی‌تری از پاسخ‌ها را ایجاد می‌کند.

کلمات کلیدی

برج آبگیر، پالس لرزه‌ای، اندرکنش آب و سازه، اثرات فرکانسی، اثرات ارتفاع تراز آب.

ACCEPTED MANUSCRIPT

* Corresponding Author

۱-مقدمه

سدها و سازه‌های وابسته به آن، از جمله برج‌های آبگیر، تونل‌های انتقال آب، دریچه‌ها و سایر اجزای مرتبط، جزو سازه‌های حیاتی و کلیدی برای تأمین منابع آب به شمار می‌آیند. حفظ ایمنی و عملکرد مستمر این سازه‌ها در شرایط بحرانی، مانند زلزله، انفجار یا سایر بارگذاری‌های شدید، برای تأمین آب مورد نیاز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. برج‌های آبگیر می‌توانند به صورت سازه‌های مستقل و منفرد یا در اتصال با سد پایین‌دست طراحی شوند و وظیفه اصلی آن‌ها آبگیری از مخزن، دریاچه، کانال یا رودخانه است. بسته به شرایط حضور آب در اطراف و داخل برج، انواع مختلف برج‌های آبگیر شامل برج آبگیر مرطوب، برج آبگیر نمایان، برج آبگیر مستغرق و برج آبگیر خشک تعریف می‌شوند که هر یک ویژگی‌ها و رفتار دینامیکی خاص خود را دارند [۲و۱]. لیا و چوپرا را می‌توان آغازگر پژوهش‌های گسترده در زمینه عملکرد برج‌های آبگیر دانست. مطالعات آن‌ها، هرچند مبنای مهمی برای تحلیل‌های بعدی فراهم کرد، برخی پارامترهای کلیدی مانند تعامل سازه–فونداسیون–مخزن و فشارهای هیدرودینامیکی را در نظر نمی‌گرفت. تحقیقات آن‌ها عمدتاً بر اساس رفتار مودال برج آبگیر متقارن با مخزن پیرامونی انجام شد و در نهایت منجر به ارائه مفهوم جرم هیدرودینامیکی افزوده برای برج‌های آبگیر گردید[۴و۳]. پس از مطالعات لیا و چوپرا [۴و۳]، محققان متعددی رفتار برج‌های آبگیر را با در نظر گرفتن حالات مختلف برج، از جمله برج‌های چاق و لاغر، مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعات، تأثیرات فشارهای هیدرودینامیکی، تعامل آب–سازه–فونداسیون، و حضور یا عدم حضور سد در تحلیل‌ها لحاظ شده و پاسخ برج‌ها در شرایط استاتیکی، دینامیکی و طیفی مورد ارزیابی دقیق قرار گرفته است[۵-۱۶]. برخی محققان به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای و فرکانسی برج‌های آبگیر پرداخته و رفتار این سازه‌ها را تحت بارگذاری های مختلف مورد تحلیل و بررسی دقیق قرار داده‌اند [۱۷-۲۲]. عالم باقری (۲۰۱۷) اثرات تعامل متقابل برج آبگیر و سد را برای دو حالت سد کوتاه–برج کوتاه و سد بلند–برج بلند تحت حرکات افقی و عمودی زمین مورد بررسی قرار داد. نتایج این مطالعه نشان داد که وجود سد کم ارتفاع تنها در شرایط مخزن پر بر پاسخ برج‌های چاق تأثیر قابل توجهی دارد، در حالی که سد بلند باعث تشدید چشمگیر پاسخ برج‌های لاغر حتی در حالت نیمه‌پر بودن مخزن می‌شود. همچنین، جذب کف مخزن به طور قابل ملاحظه‌ای بر رزونانس‌های ایجاد شده توسط تعامل سد–آب–برج تأثیرگذار است[۱۸]. عالم باقری و حاج رضایی به بررسی پاسخ واژگونی و حرکت گهواره‌ای برج‌های آبگیر آزاد-ایستا تحت پالس‌های لرزه‌ای پرداختند. در این مطالعه از پالس‌های لرزه‌ای سینوسی با پریود و شتاب‌های متفاوت استفاده شد. نتایج نشان داد که وجود آب اطراف بلوک تأثیر قابل توجهی بر پاسخ‌های واژگونی برج دارد. همچنین، مقدار تنش‌های کششی در حالت آزاد-ایستا بیش از ۵۰ درصد نسبت به حالت مهارشده کاهش یافته است[۲۱]. شریعتمدار و میرحاج به بررسی رفتار خطی لرزه‌ای برج آبگیر سد دوستی پرداختند، به طوری که تعامل برج آبگیر با مخزن و پی در تحلیل‌هایشان لحاظ شد و پاسخ‌ها تحت اثر چند زلزله مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این تحقیق با روش جرم هیدرودینامیکی افزوده مقایسه شد و نشان داد که پاسخ لرزه‌ای برج آبگیر به پارامترهای مختلفی از جمله نوع مدل‌سازی مخزن، وجود سنگ پی، نوع زلزله و محتوای فرکانسی آن وابسته است [۲۲]. راوی کومار (۲۰۱۵) برج آبگیر را با در نظر گرفتن مخزن پیرامونی و آب داخلی تحت تحلیل لرزه‌ای مورد بررسی قرار داد. نتایج این مطالعه نشان داد که وجود آب در داخل و خارج برج موجب افزایش زمان تناوب سازه می‌شود. همچنین، او نشان داد که لاغری و انعطاف‌پذیری بیشتر سازه نیز به افزایش زمان تناوب آن می‌انجامد[۲۳]. تیموری و عباسی مجموعه‌ای از مطالعات را با هدف بهینه‌سازی پاسخ‌های برج‌های آبگیر انجام دادند. در این مطالعات، مجموعه‌ای از سخت‌کننده‌های قائم و حلقوی در ترازهای مختلف برج نصب شد. نتایج نشان داد که سخت‌کننده‌های حلقوی، به ویژه زمانی که در ترازهای بالای برج قرار گیرند، تأثیر مثبتی بر کاهش مقادیر ماکزیمم پاسخ‌های برج آبگیر دارند. همچنین، این پژوهشگران نشان دادند که افزودن سخت‌کننده‌های قائم اگرچه موجب افزایش مقادیر ماکزیمم تنش‌های اصلی می شود، اما تنش در بدنه استوانه‌ای برج کاهش می‌یابد[۲۴-۲۶]. برای برج تحت بارگذاری دینامیکی، واکنش یک برج آبگیر می‌تواند به شدت تحت تأثیر تعامل آن با داخل و آب اطراف باشد. اثرات دینامیکی آب با کاهش نسبت عمق آب به ارتفاع برج کمتر می شود[۴]. چن و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای به بررسی پاسخ لرزه‌ای برج آبگیر بتن‌آرمه تحت اثر حرکات زمین نزدیک گسل با تأکید بر اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده و گام پرتابی پرداختند. در این مطالعه، ۳۰ رکورد منتخب از حرکات زمین نزدیک گسل، شامل رکوردهای ضربه‌ای و غیرضربه‌ای، به‌عنوان تحریک لرزه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور ارزیابی رفتار الاستوپلاستیک و عملکرد لرزه‌ای برج آبگیر، یک مدل سه‌بعدی اجزای محدود با در نظر گرفتن غیرخطی بودن مصالح برای یک برج آبگیر بتن‌آرمه احداث‌شده در یک پروژه هیدرولیکی ایجاد شد. نتایج عددی نشان داد که پالس‌های ناشی از اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده و گام پرتابی می‌توانند موجب ایجاد جا

ACCEPTED MANUSCRIPT

بجایی‌های گره‌ای قابل‌توجه در برج آبگیر شوند. همچنین، بیشترین انحناها در بخش پایینی سازه ایجاد شدند که بیانگر تمرکز بیشتر آسیب در این ناحیه است. نتایج همچنین نشان دادند که برج آبگیر تحت رکوردهای ضربه‌ای نزدیک گسل نسبت به رکوردهای غیرضربه‌ای آسیب شدیدتری را تجربه می‌کند[۲۷]. آقایی‌پور و عالم‌باقری (۲۰۲۱) رفتار لرزه‌ای برج آبگیر بتن‌آرمه تحت توالی زلزله اصلی و پس‌لرزه مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، برج آبگیر سد انکینو به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب و با استفاده از روش اجزای محدود مدل‌سازی شد. برای بررسی رفتار دینامیکی سازه، تحلیل تاریخچه‌ی زمانی با استفاده از رکوردهای واقعی زلزله انجام گرفت و رفتار غیرخطی بتن و میلگردهای فولادی نیز در مدل عددی لحاظ شد. همچنین، مخزن و پی به همراه اندرکنش آن‌ها با برج آبگیر در مدل‌سازی مورد توجه قرار گرفتند و سه حالت بارگذاری شامل اعمال یک مؤلفه افقی، اعمال هم‌زمان دو مؤلفه افقی و اعمال دو مؤلفه افقی به همراه مؤلفه قائم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کار آن‌ها نشان داد که توالی زلزله اصلی–پس‌لرزه می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ‌های لرزه‌ای و رفتار غیرخطی برج آبگیر داشته باشد. همچنین، نتایج بر اهمیت در نظر گرفتن اندرکنش میان برج آبگیر، مخزن و پی در تحلیل لرزه‌ای تأکید داشتند[۲۸]. اودین و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تأثیر میرایی ناشی از اندرکنش سیال و سازه بر پاسخ دینامیکی برج‌های آبگیر پرداختند. در این مطالعه، میرایی هیدرودینامیکی به‌عنوان پدیده‌ای متأثر از دو مؤلفه اصلی، شامل میرایی سیال و میرایی سازه‌ای، مورد توجه قرار گرفت. به‌منظور بررسی اثر میرایی هیدرودینامیکی، شرایط مختلف ارتفاع آب مورد مطالعه قرار گرفت و علاوه بر حالت بدون آب، شش حالت با ارتفاع‌های مختلف آب در نظر گرفته شد. همچنین، دو مقطع هندسی متفاوت برای برج آبگیر بررسی و برای هر حالت نیز دو ویژگی میرایی متفاوت در تحلیل‌ها اعمال شد. نتایج نشان داد که میرایی هیدرودینامیکی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار دینامیکی برج آبگیر داشته باشد و میزان این تأثیر به عواملی همچون ارتفاع آب و شکل هندسی برج وابسته است. آن‌ها نشان دادند که برای دستیابی به ارزیابی محافظه‌کارانه‌تر از پاسخ دینامیکی برج آبگیر، لازم است ویژگی‌های میرایی با توجه به هندسه سازه و ارتفاع آب تعیین شوند[۲۹]. مطالعات انجام گرفته نشان داده از اهمیت کم تراکم‌پذیری آب در پاسخ دینامیکی برج‌های غوطه‌ور برای برج‌های لاغر دارد[۶ و ۴ و ۳]. شوتونگ و همکاران (۲۰۲۲) روش تحلیل زمان تحمل بهبود یافته را برای ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌ای سدهای بتنی تحت حرکت‌های زمین نزدیک گسل با ویژگی پالسی مورد بررسی قرار دادند. هدف این مطالعه، استفاده از مدل پیش‌بینی نوین بود تا بتوان تقاضاهای لرزه‌ای سدهای بتنی تحت تحریک‌های پالسی نزدیک گسل را با دقت بیشتری ارزیابی کرد. در این تحقیق، یک سیستم سد بتنی وزنی–مخزن–بستر دو بعدی به عنوان مدل عددی در نظر گرفته شد. بیست رکورد زمین‌لرزه پالسی با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به اجزای فرکانس پایین و بالا تجزیه شدند تا سهم هر جزء در پاسخ دینامیکی سد تحت اندازه‌های شدت مختلف مورد تحلیل قرار گیرد. تحلیل‌ها بر اساس روش تحلیل دینامیکی افزایشی انجام شد و اثر شتاب اوج زمین (PGA) بر پاسخ‌ها نیز لحاظ گردید[۳۰]. لو و همکاران (۲۰۲۴) پاسخ لرزه‌ای سد وزنی بتنی تحت حرکات زمین پالس‌مانند نزدیک گسل را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، یک رویکرد ارزیابی منحصر به فرد برای تحلیل پاسخ‌های دینامیکی سدهای وزنی با استفاده از ترکیب مؤلفه‌های افقی و عمودی حرکت زمین پیشنهاد شد. علاوه بر این، پاسخ‌های لرزه‌ای بدنه سد تحت تحریک‌های چند پالسی چرخانده شده و مقیاس‌بندی شده مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج کار آن‌ها نشان داد که وجود رکوردهای پالس بزرگ موجب پاسخ لرزه‌ای قابل توجه سازه می‌شود. همچنین، جابجایی‌های بزرگ باقیمانده و اوج عمدتاً توسط پالس‌های سرعت ایجاد می‌شوند و حساسیت قسمت بالایی گردنه سد نسبت به جابجایی نسبی افقی به طور قابل توجهی بیشتر از قسمت پایینی است[۳۱]. سو و همکاران (۲۰۲۴) پاسخ لرزه‌ای سدهای وزنی تحت تأثیر حرکات زمین و با ویژگی‌های پالس متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، برای تحلیل لرزه‌ای سد پاین فلت، ۱۵ رکورد پالس‌مانند و ۱۵ رکورد غیرپالس‌مانند انتخاب شد که همگی به شتاب اوج زمین (PGA) یکسان مقیاس شده بودند. علاوه بر این، تحلیل‌های خطی و غیرخطی لرزه‌ای نیز انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که در شرایطی که حرکات زمین با PGA یکسان در نظر گرفته شوند، حرکات زمین پالس‌مانند در مقایسه با حرکات غیرپالس‌مانند، خطر بیشتری برای سد ایجاد می‌کنند[۳۲]. وانگ و همکاران (۲۰۲۴) ، عملکرد لرزه‌ای سدهای قوسی بلند با در نظر گرفتن اثرات پالس مانند و جهت‌داری حرکات زمین نزدیک گسل را ارزیابی کردند. در این مطالعه دو مجموعه حرکت زمین دو جهته نزدیک گسل اعم از مجموعه معمولی و پالس مانند جمع‌آوری شده‌اند. جهت‌های نرمال گسل و موازی گسل رکوردهای حرکت افقی زمین برای انعکاس اثر جهت‌دار بودن چرخانده شده‌اند. تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی برای سد قوسی بلند تحریک‌شده توسط هر دو حرکت زمین نزدیک گسل با زوایای برخورد مختلف، بیشتر اجرا شدند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که رکوردهای حرکت زمین حاوی پالس می‌توانند پاسخ دینامیکی و آسیب قابل توجه‌تری را برای سدهای قوسی بلند در مقایسه با رکوردهای

ACCEPTED MANUSCRIPT

معمولی ایجاد کنند. همچنین در مقایسه با حرکات زمین معمولی نزدیک گسل، حرکات زمین پالس مانند باعث افزایش ۴۰ درصدی حجم آسیب بتن در سدهای قوسی بلند می‌شود[۳۳]. مهدیان خلیل و نوایی‌نیا (۲۰۲۴) طی یک مطالعه به بررسی اثر متقابل برج آبگیر، پل دسترسی و مخزن بر پاسخ‌های لرزه‌ای سدهای بتنی پشت‌بنددار پرداختند. در این مطالعه، سد ویمبل‌بال در انگلستان به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد و تحلیل‌های سه‌بعدی با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار ANSYS انجام گرفت. برای این منظور، ۹ حالت مختلف از سیستم سد، مخزن، برج آبگیر و پل دسترسی مورد بررسی قرار گرفت و پاسخ‌های سازه‌ای شامل فرکانس‌های طبیعی، جابجایی تاج سد و تنش‌های ناحیه پنجه سد ارزیابی شد. نتایج کار آن‌ها نشان داد که افزایش تراز آب مخزن موجب کاهش فرکانس‌های طبیعی سیستم تا حدود ۴۰ درصد شد؛ همچنین افزایش ارتفاع برج آبگیر نیز کاهش فرکانس‌ها را تا حدود ۱۹ درصد به همراه داشت. نتایج تحلیل لرزه‌ای همچنین نشان داد که افزایش تراز آب مخزن می‌تواند موجب افزایش قابل‌توجه تنش‌های پنجه پشت‌بند میانی شود، به‌طوری‌که این افزایش تا حدود ۳۹ درصد گزارش شده است. افزون بر این، در شرایطی که تراز آب مخزن و آب داخل برج ثابت نگه داشته شود، افزایش ارتفاع برج آبگیر باعث افزایش جابه‌جایی و تنش‌های پشت‌بند میانی به‌ترتیب تا حدود ۳ و ۴۳ درصد شد[۳۴].

مطالعات پیشین عمدتاً به بررسی رفتار برج‌های آبگیر در ترازهای مختلف آب یا تحت اثر انواع زلزله به‌صورت جداگانه پرداخته‌اند. با این حال، بررسی همزمان تأثیر تغییر فرکانس و شتاب بارگذاری زلزله همراه با تغییرات تراز مخزن پیرامونی و آب داخلی، به‌ویژه در شرایط لرزه‌خیز ایران، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این خلأ پژوهشی سبب می‌شود نتایج مطالعات گذشته برای طراحی و ارزیابی ایمنی سازه‌های حیاتی همچون سدها و برج‌های آبگیر کشور کافی نباشد. از این رو، در این مطالعه ۵ تراز ارتفاعی مختلف مخزن و آب داخلی، ۴ فرکانس بارگذاری و ۴ شتاب بارگذاری مختلف در نظر گرفته شد که در مجموع ۸۰ تحلیل دینامیکی خطی را شامل می‌شود. در ادامه پنج برج آبگیر استوانه‌ای با ترکیب‌های مختلف حضور مخزن پیرامونی و آب داخلی تحت بارگذاری پالسی سینوسی با فرکانس و شتاب متغیر شبیه‌سازی و تحلیل گردید. در هر مرحله، اثر تغییر یک پارامتر در حالی بررسی شد که سایر پارامترها ثابت مانده‌اند؛ بدین ترتیب امکان تفکیک دقیق نقش هر عامل لرزه‌ای و هیدرودینامیکی فراهم گردید. مدل‌سازی با رویکرد ترکیبی اویلری–لاگرانژی انجام گرفت که در آن فشار به‌عنوان متغیر سیال و تغییرمکان به‌عنوان متغیر سازه در نظر گرفته شد. نوآوری این پژوهش در تلفیق هم‌زمان پارامترهای دینامیکی (فرکانس و شتاب زلزله) و هیدرولیکی (تراز آب داخلی و مخزن پیرامونی) و به‌کارگیری این روش مدل‌سازی برای شرایط لرزه‌ای ایران است. یافته‌های این مطالعه، شامل ارزیابی دقیق تغییرات بیشینه‌ی تغییرمکان افقی، تنش‌های اصلی و فشار هیدرودینامیک، می‌تواند به عنوان مبنای عملی برای بهبود ضوابط طراحی و افزایش ایمنی برج‌های آبگیر و دیگر زیرساخت‌های آبی کشور مورد استفاده مهندسان طراح سدسازی قرار گیرد.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- معادلات المان محدود برج و مخزن

در مطالعه حاضر از روش المان محدود جهت آنالیز سازه و نیز در نظرگرفتن اندرکنش آب و سازه استفاده شده است. از آنجایی که تنها تغییر سیال فشار می‌باشد بایستی این فشار هیدرودینامیک{P} از طریقی با بردار نیروهای وارده بر فصل مشترک برج- مخزن و مخزن- پی که همان $\{F_H\}$ می باشد مرتبط گردد که این ارتباط توسط ماتریس کوپله {Q} برقرار می‌گردد که عبارت است از :

$$[Q]\{p\} = \{F_H\} \quad (۱)$$

با استفاده از روش مانده‌های وزنی گالرکین و گسسته سازی، میدان فشار و تغییرمکان بصورت معادلات ۲ و ۳ ارائه می‌شود که در آن‌ها [N] بردار توابع شکل و $\{P\}^e$ و $\{U\}^e$ بردارهای فشار و جابجایی گرهی می‌باشند. در نهایت معادلات المان محدود حاکم بر سیستم کوپل سازه-سیال می‌تواند به شکل رابطه‌ی ۴ نوشته شود.

$$\{P\} = [N]^P \{P\}^e \quad (۲)$$

$$\{U\} = [N]^u \{u\}^e \quad (۳)$$

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$\begin{bmatrix} [M] & 0 \\ \rho_w [Q]^T & [H] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & 0 \\ 0 & [D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & -[Q] \\ 0 & [E] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_S \\ F_W \end{Bmatrix} \quad (۴)$$

در روابط بالا M، C و K به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سازه و H، D و E به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی حوزه‌ی سیال می باشند. Fs بردار نیروهای خارجی ناشی از شتاب زمین بر روی سازه بوده و Fw بردار نیروهای ناشی از حرکت زمین بر روی مرزهای اندرکنش آب و سازه و کل شتاب بر روی بقیه مرزها می‌باشد. جهت مدلسازی اندرکنش بین سازه - سیال داخلی و سازه- مخزن پیرامونی، برای سیال و سازه در رویه‌هایی از آن‌ها که با یکدیگر در تماس هستند سطوحی تعریف می‌گردد. این سطوح سازه و سیال را با مش‌بندی‌های مختلف به یکدیگر مرتبط ساخته و فشار سیال را بصورت مستقیم حرکات سازه مرتبط می‌کند. برای این منظور یک سطح اصلی برای سازه و یک سطح پیرو برای سیال اعم از سیال داخلی و پیرامونی ساخته می‌شود. مقادیر فشار بر روی سطح پیرو براساس مقادیر درونیابی شده‌ی معادل آن بر روی سطح اصلی تعیین می شوند[۳۶ و ۳۵].

۲-۲- شرایط مرزی برج، آب داخلی و مخزن پیرامونی

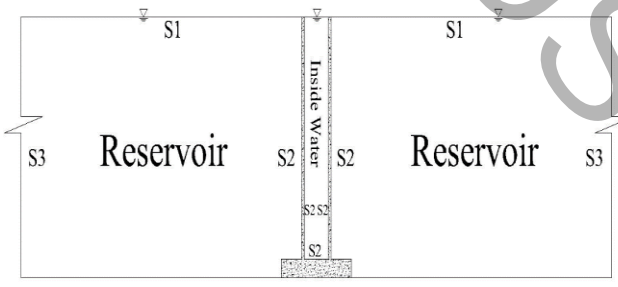
شرایط مرزی برج آبگیر با مخزن پیرامونی و آب داخلی در شکل ۱ نشان داده شده است. معادلات حاکم بر حوزه‌ی سازه بر اساس فرمولاسیون لاگرانژی و به شرح ذیل است:

$$\nabla.\sigma - \rho_s \ddot{u} = 0 \quad (۵)$$

در رابطه بالا σ ،u و ρ_s به ترتیب تانسور تنش کوشی، بردار تغییرمکان و چگالی جامد می‌باشد. معادله حاکم بر حوزه‌ی سیال از فرمولاسیون اویلری بر پایه فشار با فرض جابجایی‌های کوچک، غیرلزج بودن سیال صرفنظر از تغییرات زمانی و مکانی دانسیته‌ی آب استفاده می‌کند که به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\nabla^2.p - \frac{1}{c^2}\ddot{p} = 0 \quad (۶)$$

در رابطه بالا P فشار سیال و C سرعت صوت در سیال می‌باشد. سه شرط مرزی اصلی برای سیال در شکل ۱ نشان داده شده است که عبارت از شرط مرزی سطح آزاد سیال S1، شرط مرزی اندرکنش سازه و سیال S2 و شرط مرز دور S3 می‌باشند. برای سطح آزاد سیال با نادیده در نظرگرفتن نوسانات سطحی شرط مرزی P=0 می تواند برای مرز S1 در نظرگرفته شود. به عبارت بهتر مقادیر فشار هیدرودینامیکی برای تمامی گره‌های سطح آب صفر تعیین می‌شود. شرط مرزی در مرز S2 با درنظرگرفتن عدم جریان در محل ارتباط سیال وسازه به دلیل نفوذناپذیری سطح برج می‌باشد. این فرض منجر به شرط عدم وجود سرعت نسبی در جهت عمود بر مرز مشترک برج و سیال می‌شود که بصورت زیر بیان می‌گردد:



شکل۱. شرایط مرزی برای برج آبگیر، مخزن پیرامونی و آب داخلی

Figure 1. Boundary conditions of the intake tower, surrending reservoir, and internal water

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_F \ddot{u}_n \quad (۷)$$

ACCEPTED MANUSCRIPT

که در رابطه بالا ρ_F جرم سیال، n بردار عمود بر مرز S2 می‌باشد. شرط مرزی قطع شده در انتهای دور مخزن توسط شرط مرزی سامرفیلد که براساس فرض انتشار امواج صفحه‌ای در سیال در فوصل دور از سازه می‌باشد تعریف می‌شود. شرط مرزی سامرفیلد برای مرز دور قطع شده به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{c}\dot{p} \qquad (۸)$$

شرط مرزی جذب امواج در بستر از رابطه زیر تعیین می‌شود[۳۷]:

$$\frac{\partial p}{\partial n'} - \frac{(1-\alpha)}{c(1+\alpha)}\dot{p} = -\rho_F \ddot{u}_{n'} \qquad (۹)$$

در رابطه بالا $\boldsymbol{n}'$ و α به ترتیب بردار واحد نرمال بر سطح تماس سیال- فونداسیون و ضریب بازتاب موج که جذب کف مخزن را مشخص می‌کند می‌باشند. α به عنوان نسبت دامنه امواج فشار هیدرودینامیکی منعکس شده به امواج فشاری عمودی توسعه یافته از کف مخزن می‌باشد. که با معادله‌ی زیر نشان داده می شود:

$$\alpha = \frac{(1-q)}{(1+q)}, -1 \le \alpha \le 1 \qquad (۱۰)$$

$$q = \frac{\rho c}{\rho_r c_r} \qquad (۱۱)$$

$$c_r = \sqrt{\frac{E_r}{\rho_r}} \qquad (۱۲)$$

در روابط بالا E_r و ρ_r به ترتیب مدول یانگ و چگالی مواد کف مخزن می‌باشند. همانطوری که در معادله‌ی (۱۰) ارائه شده است $-1 \le \alpha \le 1$ می باشد که به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برای فونداسیون صلب وفونداسیون خیلی نرم می‌باشد.

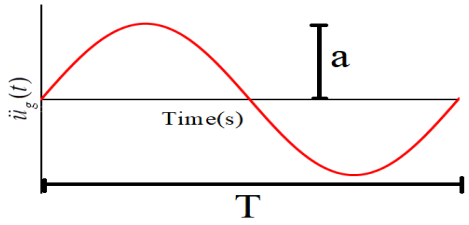
۳-مدلسازی

برج آبگیر مورد مطالعه در این تحقیق برج آبگیر استوانه‌ای با مقطع ثابت در کل تراز ارتفاعی مشابه مشخصات کار آقای عالم باقری [۱۹] می‌باشد. مشخصات مادی برج آبگیر و سیال در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق مطالعات انجام گرفته توسط محققان قبلی در نظر گرفتن طول مخزن به میزان ۱/۵ برابر ارتفاع برج آبگیر برای آنالیز لرزه‌ای کفایت می‌کند[۱۹]. اما در این مطالعه جهت بالا بردن دقت محاسبات شعاع مخزن به میزان ۱/۸ برابر ارتفاع برج آبگیر در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ نمودار شماتیک بارگذاری پالسی سینوسی ارائه شده است. در جداول ۲ و ۳ مشخصات هندسی مدل‌های مورد مطالعه و بارگذاری‌های انجام گرفته جهت آنالیز برج آبگیر برای ۵ حالت مورد مطالعه ارائه شده است. اشکال شماتیک مدل‌های برج آبگیر مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق جدول ۲ برج آبگیر برای ۵ حالت حضور و عدم حضور سیال مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. عمق فونداسیون بتنی برج به میزان ۵ متر لحاظ شده است و پس از آن فونداسیون بصورت صلب لحاظ گردیده است. از آنجا که برج‌های آبگیر، سازه‌های مرتفعی هستند، تحت اثر پریودهای بالای بارگذاری یا شتاب‌های زیاد حساس بوده و می‌توانند دچار آسیب بیشتری شوند. به همین دلیل، در این مطالعه در انتخاب پالس‌های لرزه‌ای تلاش شده است که فرکانس‌های بارگذاری پوشش مناسبی از حالات مختلف پالسی را فراهم کنند، به‌طوری که شرایط بارگذاری با پریود بالا و شتاب پایین و همچنین پریود پایین با شتاب بالا مورد ارزیابی قرار گیرد. مدت زمان پالس استفاده شده مبتنی بر معکوس فرکانس‌های بارگذاری بوده به ترتیبی که برای فرکانس‌های ۱، ۲، ۳و ۴ به ترتیب برابر با ۱، ۰/۵ ، ۰/۳۳ و ۰/۲۵ ثانیه بوده و تعداد سیکل برابر با یک می‌باشد به عبارت بهتر بارگذاری بصورت پالسی و با یک دوره‌ی تناوب می‌باشد. دلیل انتخاب این رنج از فرکانس‌ها به این دلیل بوده که این رنج انتخابی هم دارای فرکانس بارگذاری مناسب و هم پریود مناسب می‌باشد که می‌تواند در ارزیابی بهتر رفتار برج تحت بارگذاری‌های با این محدوده از فرکانس‌ها که بیش‌تر می‌تواند سبب پاسخ‌های قابل توجه در برج گردد موثر باشد. همچنین فرکانس‌های انتخابی در ارتباط با فرکانس‌های طبیعی سیستم به نحوی انتخاب شده‌اند که سازه را محدوده‌ی تشدید قرار

ACCEPTED MANUSCRIPT

ندهند. فرمول بارگذاری پالسی در رابطه (۱۳) ارائه شده است. در این رابطه a نمایانگر شتاب بارگذاری و w نمایانگر فرکاس بارگذاری است.

$$P = a\sin(wt) \quad (۱۳)$$



شکل۲. پالس سینوسی با دامنه‌یa و پریود T

Figure 2. Sinusoidal pulse with an amplitude of a and period of T

جدول۱. مشخصات مادی برج آبگیر و سیال

Table 1. Material properties of the intake tower and water

مشخصات مادی برج آبگیر		
مدول الاستیسیته	چگالی	ضریب پواسون
30GPa	2400Kg/m^3	0.15
مشخصات مادی سیال		
مدول بالک	چگالی	
2.07GPa	1000Kg/m^3	

جدول۲. مشخصات هندسی برج آبگیر

Table 2. Geometric characteristics of the intake tower

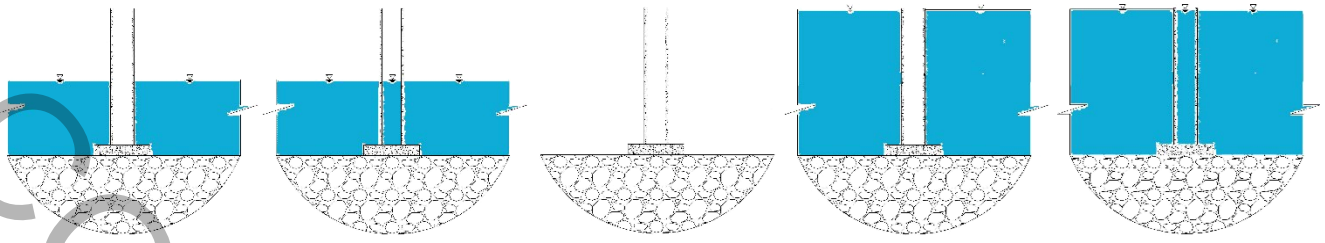
مدل	خصوصیات	تراز آب		خصوصیات هندسی برج آبگیر			
		مخزن	آب داخلی	شعاع بیرونی	شعاع داخلی	شعاع فونداسیون	ارتفاع برج
A	بدون مخزن	۰	۰	۵/۵	۴/۵	۱۲/۵	۱۰۰
B	نیمه پر	۵۰	۰	۵/۵	۴/۵	۱۲/۵	۱۰۰
C	مخزن نیمه پر-داخل نیمه پر	۵۰	۵۰	۵/۵	۴/۵	۱۲/۵	۱۰۰
D	مخزن پر – داخل خالی	۱۰۰	۰	۵/۵	۴/۵	۱۲/۵	۱۰۰
E	مخزن پر – داخل پر	۱۰۰	۱۰۰	۵/۵	۴/۵	۱۲/۵	۱۰۰

جدول ۳.شرایط بارگذاری با ماکزیمم شتاب و فرکانس متغیر

Table 3. Loading conditions with varying peak acceleration and frequency

PGA				Frequency (Hz)
0.8g	0.6g	0.4g	0.2g	
✓	✓	✓	✓	F=1
✓	✓	✓	✓	F=2
✓	✓	✓	✓	F=3
✓	✓	✓	✓	F=4

ACCEPTED MANUSCRIPT

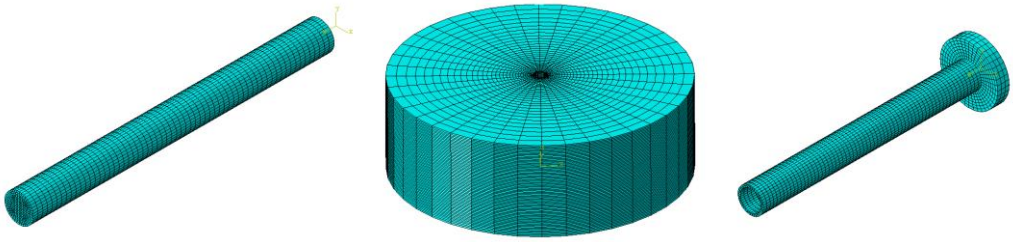


شکل۳. اشکال شماتیک مدل‌های مورد مطالعه برج آبگیر با شرایط مختلف مخرن پیرامونی و آب داخلی

Figure 3. Schematic representations of the intake tower models under different surrounding reservoir and internal water conditions.

جهت آنالیز و بررسی اثرات بارگذاری‌های مدنظر بر رفتار برج آبگیر در روند مدلسازی، اثرات مخزن پیرامونی و آب داخلی بصورت اندرکنش برج آبگیر با مخزن پیرامونی و آب داخلی منظور شده است. فونداسیون برج بصورت صلب در نظر گرفته شده است و از اندرکنش خاک و سازه صرف‌نظر شده است. آنالیز انجام گرفته شامل دو گام استاتیکی و دینامیکی و بصورت خطی بوده و بر عدم ترک‌خوردگی بتن استوار است. سیال بصورت تراکم‌ناپذیر مدل شده است و از اثرات اسلاشینگ، کاویتاسیون و رسوب‌های کف مخزن صرف‌نظر شده است. بارهای وارده در حالت استاتیکی شامل وزن برج آبگیر و نیز فشار هیدرواستاتیک ناشی از مخزن پیرامونی و آب داخلی می‌باشد. پس از بارگذاری استاتیکی، بارهای دینامیکی ارائه شده در جدول ۳ به برج اعمال می‌گردند. مدل المان محدود برج آبگیر، مخزن پیرامونی و آب داخلی در شکل ۴ ارائه شده است. المان‌های سیال از نوع المان سه بعدی ۸ گرهی خطی با انتگرال‌گیری کاهش یافته است که درجه‌ی آزادی آن‌ها فقط فشار دینامیکی می‌باشد. در این مطالعه برای آنالیزهای دینامیکی انجام گرفته گام زمانی انتخاب شده برای آنالیز برابر با ۰/۰۲ ثانیه در نظرگرفته شده است. برای شبیه‌سازی پاسخ برج آبگیر تحت بارگذاری پالسی سینوسی با فرکانس و شتاب متغیر، از روش صریح در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. روش صریح یک الگوریتم حل دینامیکی زمان‌گذرای مستقیم است که در آن پاسخ سازه در هر گام زمانی مستقیماً از مقادیر گام قبلی محاسبه می‌شود و نیازی به حل ضمنی معادلات ماتریسی بزرگ ندارد. این روش به‌ویژه برای تحلیل‌های گذرای سریع، برخورد، زلزله و سایر بارگذاری‌های دینامیکی شدید مناسب است. برای حفظ پایداری عددی، از گام‌های زمانی کوچک استفاده شد. علاوه بر این، روش صریح امکان ترکیب با روش اویلری–لاگرانژی را دارد و بنابراین می‌توان اثرات تعامل سیال و سازه، شامل فشار هیدرودینامیکی آب داخلی و مخزن پیرامونی، را به دقت مدل‌سازی کرد. استفاده از این روش امکان تحلیل دقیق تغییرمکان‌ها، تنش‌های اصلی و فشار هیدرودینامیکی برج را فراهم می‌کند و پاسخ دینامیکی سیستم تحت شرایط مختلف بارگذاری را به صورت همزمان در نظر می‌گیرد. بدنه برج ورودی با استفاده از المان C3D8 مش‌بندی شده است که یک المان هشت گره‌ای با سه درجه آزادی در هر گره است. همچنین برای مش‌بندی سیال داخلی و مخزن اطراف، از المان هشت گره‌ای آکوستیک AC3D8 استفاده شده است که دارای درجات آزادی فشار در هر گره است. همانطوری که در پیش‌تر ذکر گردید در این مطالعه از مدل آقای عالم باقری [۱۹] به عنوان مدل پایه استفاده شده است. مش‌بندی انجام گرفته در کار ایشان [۱۹] شامل المان‌های با طول ۲ متر در راستای قائم و ۴۰ المان در راستای شعاعی می‌باشد که در مطالعه حاضر، طول المان‌ها در راستای قائم برابر با ۱/۵ متر لحاظ شده و همچنین در راستای قطاعی برج به دو قسمت تقسیم شده است به نحوی که تعداد کل المان‌ها در هر مقطع عرضی برج شامل ۸۰ عدد می‌باشد که علاوه بر افزایش تعداد کل المان‌ها به بیش‌از دو برابر المان‌های مدل مرجع [۱۹]، ابعاد المان‌ها نیز کاهش داده شده است. شرایط مرزی اعمال شده شامل فشار صفر در سطح آزاد مخزن و آب داخلی، اندرکنش آب داخلی و مخزن پیرامونی با برج آبگیر و نیز جذب امواج فشاری ساطع شده از مخزن در مرز دوردست قطع شده به شعاع ۱/۸ برابر ارتفاع برج آبگیر می‌باشد همچنین شرایط اندرکنشی بین مخزن-برج و برج-آب داخل برج لحاظ شده است که در این حالت برج به عنوان رویه اصلی و سیال به عنوان رویه لغزنده لحاظ شده است. شتاب اعمالی مستقیما به فونداسیون بتنی برج اعمال می‌گردد.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۴. مدل المان محدود برج آبگیر، مخزن پیرامونی و آب داخلی

Figure 4. Finite element model of the intake tower, surrounding reservoir, and internal water

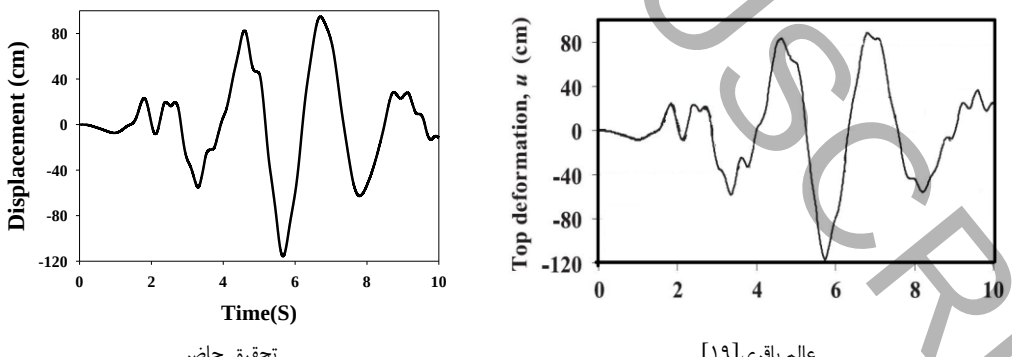
۴- اعتبار سنجی

در این قسمت به منظور صحت‌سنجی مدلسازی‌های انجام گرفته و نیز اندرکنش آب و سازه نتایج بدست آمده برای تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان افقی بالای برج و نیز ماکزیمم تنش اصلی اول برای حالت برج آبگیر با مخزن پیرامونی پر و آب داخلی پر با نتایج کار عالم باقری[۱۹] مقایسه شده است. مدل‌های مورد آنالیز تحت اثر مولفه‌ی افقی زلزله ال‌سنترو قرار گرفته است. نتایج آنالیز لرزه‌ای انجام گرفته و مقادیر اختلاف با مدل مرجع [۱۹] در جدول ۴ ارائه شده است. در اشکال۵.الف و ۵.ب به ترتیب تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان بالای برج آبگیر و ماکزیمم تنش اصلی اول برای مدل برج آبگیر با مخزن پیرامونی پر و آب داخلی پر برای کار حاضر و کار عالم باقری[۱۹] ارائه شده است. مطابق جدول ۴ و شکل ۵ مشخص می‌شود که تطابق خوبی بین نتایج کار حاضر و کار عالم باقری وجود دارد. در ادامه پس از اطمینان از درست بودن روند مدلسازی سایر مدل‌های مورد مطالعه با روش استفاده شده برای صحت سنجی، ساخته شده و مورد آنالیز و ارزیابی قرار گرفته اند.

جدول ۴.درصد خطا در مقایسه‌ی نتایج تحقیق حاضر و کار عالم باقری[۱۹]

Table 4. Percentage error between the results of the present study and those reported by Alembagheri [19].

پارامتر	مطالعه‌ی حاضر	مرجع [۱۹]	درصد اختلاف
ماکزیمم تغییرمکان افقی	۱۱۷/۵۳	۱۱۸/۲۴	۰/۶٪
ماکزیمم تنش اصلی اول	۶۰/۹۴	۶۰/۹۵	۰/۰۱۶٪



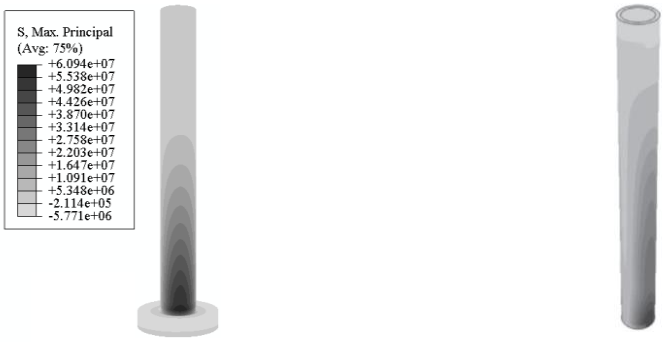
تحقیق حاضر

عالم باقری[۱۹]

شکل۵.الف. مقادیر تغییرمکان بالای برج آبگیر با مخزن پیرامونی و آب داخلی در مطالعه حاضر و مرجع [۱۹]

Figure 5a. Displacement at the top of the intake tower with a surrounding reservoir and internal water: comparison between the present study and reference [19].

ACCEPTED MANUSCRIPT



S1=60.94MPa-تحقیق حاضر S1=60.95Mpa-[۱۹] عالم باقری

شکل۵.ب. مقادیر ماکزیمم تنش اصلی اول برج آبگیر با مخزن پیرامونی و آب داخلی در مطالعه حاضر و مرجع [۱۹]

Figure 5b. Maximum first principal stress in the intake tower with a surrounding reservoir and internal water: comparison between the present study and reference [19].

۵- آنالیز فرکانسی و میرایی

در این مطالعه برای لحاظ میرایی از روش رایلی استفاده شده است. برای تعیین ضرایب میرایی آلفا و بتای رایلی فرکانس اول و فرکانسی از سازه که درصد جرم مؤثر تجمعی مدهای سازه از ۹۰٪ فراتر می‌رود استفاده شده است. در ادامه در روابط (۱۴) الی (۱۶) معادلات میرایی رایلی ارائه شده است . که در این روابط [K] و [M] به ترتیب نشانگر ماتریس‌های سختی و جرم می‌باشند و α و β نشان‌دهنده‌ی ضرایب میرایی رایلی هستند و ξ نشان‌دهنده درصد میرایی می‌باشد. همچنین ω_1 و ω_j به ترتیب نشان دهنده فرکانس اول سازه و فرکانسی از سازه که در آن درصد جرم مؤثر تجمعی مدهای سازه از ۹۰٪ فراتر می‌رود.

$$[C_s]=\alpha\,[M_s]+\beta\,[K_s] \quad (۱۴)$$

$$\alpha = 2\omega_1\xi_1-(\omega_1^2\beta_1) \quad (۱۵)$$

$$\beta = 2\frac{(\xi_1\omega_1-\xi_j\omega_j)}{(\omega_1^2-\omega_j^2)} \quad (۱۶)$$

در جدول ۵ اولین فرکانس سازه و فرکانسی از سازه که در آن درصد جرم مؤثر تجمعی مدهای سازه از ۹۰٪ فراتر می‌رود ارائه شده است که این مودها نمایانگر مودهای اصلی سازه می‌باشند. جدول ۵ همچنین روند مشخصی را نشان می‌دهد که در آن، با افزودن تدریجی آب در هر مرحله، هم فرکانس اول سازه و هم فرکانسی که در آن کل جرم مؤثر از ۹۰٪ فراتر می‌رود، کاهش می‌یابند. با توجه به جدول ۵ مشخص می‌گردد که محدوده‌ی بارگذاری پالسی و فرکانس‌های اصلی برج آبگیر در حالات مورد بررسی هم‌پوشانی ندارند و امکان رخداد تشدید برای سازه تحت بارگذاری‌های فرکانسی اعمالی مقدور نمی‌باشد. همچنین در جدول مذکور ضرایب آلفا و بتای میرایی رایلی برای هرکدام از مدل‌های مورد مطالعه باتوجه به فرکانس‌های اصلی و میرایی ۵ درصد بدست آمده، ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج آنالیز فرکانسی برای مودهای اصلی

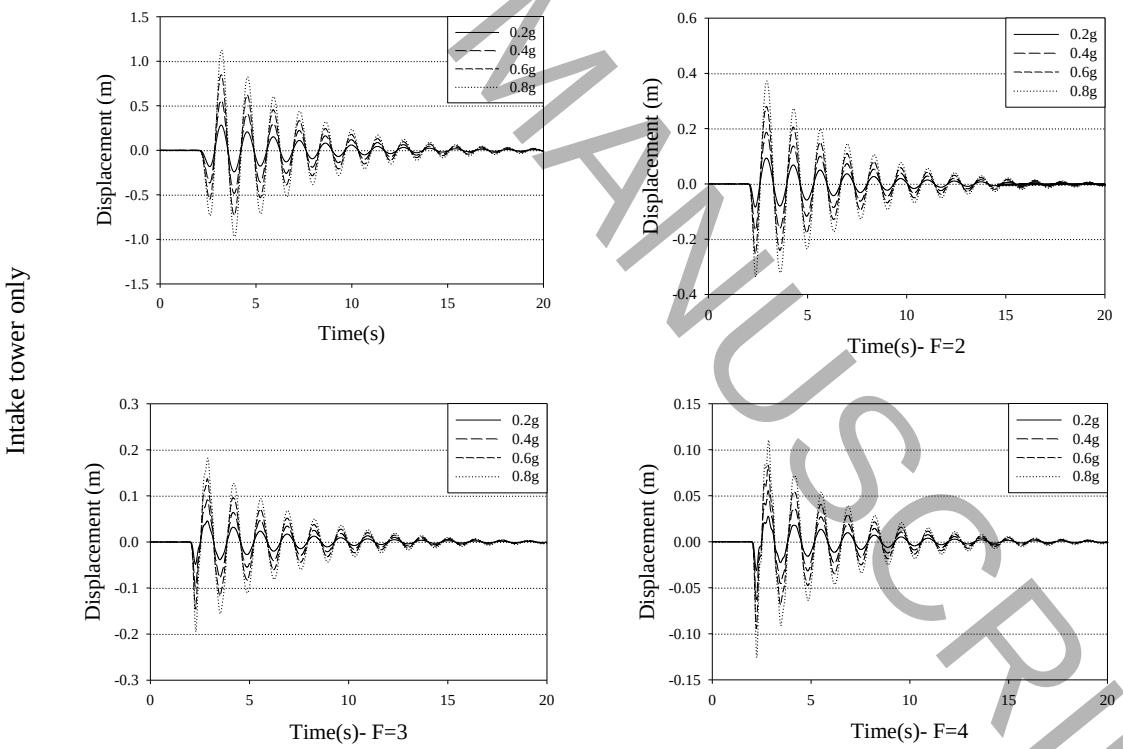
Table 5. Frequency analysis results for the dominant modes

فرکانس‌های اصلی سیستم (هرتز)	مدل A	مدل B	مدل C	مدل D	مدل E
فرکانس اول	۰/۷۴۰۶۳۴	۰/۷۲۷۵۸۴	۰/۷۱۶۶۸۹	۰/۵۲۴۹۷۶	۰/۴۴۶۱۳۹
فرکانس با مجموع جرم مؤثر بیش از ۹۰٪	۱۰/۷۰۲	۳/۶۰۶	۳/۲۵۵۲	۳/۰۳۴۶	۲/۵۸۷۳
ضریب آلفای رایلی	۰/۴۳۵۰۱۳	۰/۳۸۰۲۰۸	۰/۳۶۸۸۷۰	۰/۲۸۱۰۶۲	۰/۲۳۸۹۷۰
ضریب بتای رایلی	۰/۰۰۱۳۹	۰/۰۰۳۶۷	۰/۰۰۴۰۰	۰/۰۰۴۴۷	۰/۰۰۵۲۴

۶- نتایج آنالیزهای عددی بحث

ACCEPTED MANUSCRIPT

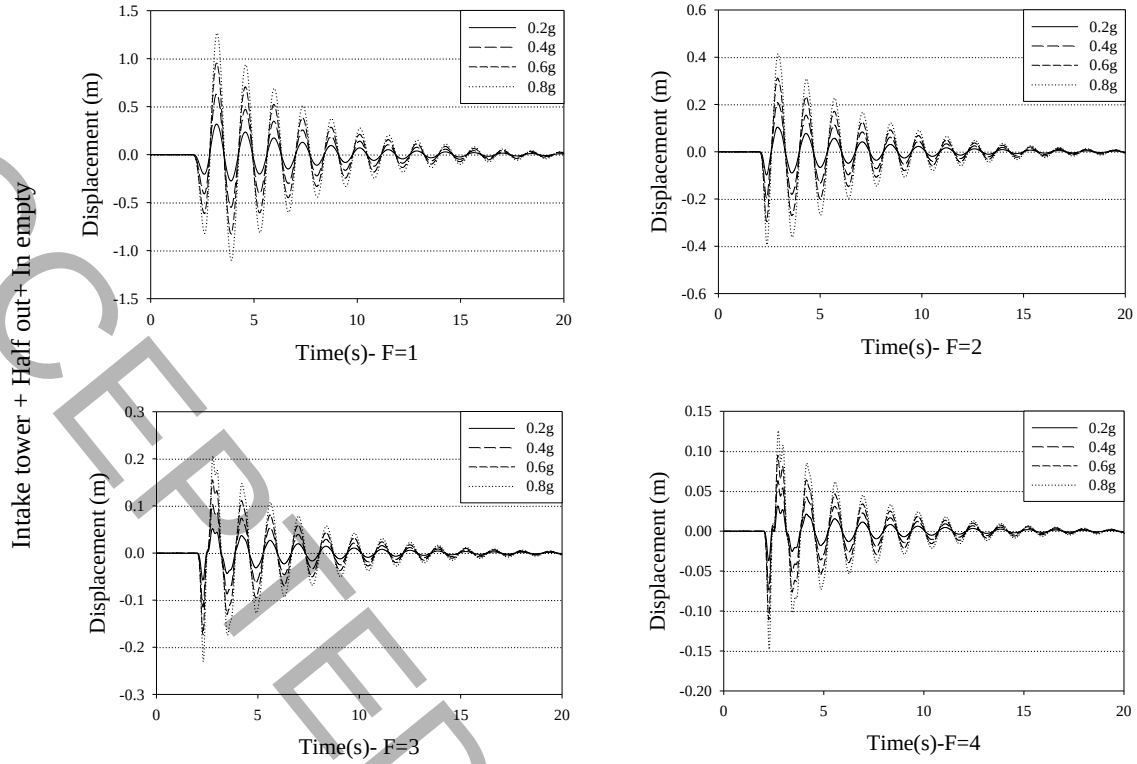
در بررسی‌های ارائه شده پاسخ‌های برج آبگیر اعم از ماکزیمم تغییرمکان‌های افقی، ماکزیمم تنش‌های اصلی کششی و فشاری و نیز ماکزیمم فشارهای هیدرودینامیک استخراج و بررسی شده است. بارگذاری‌های انجام گرفته مطابق جدول ۴ و شکل ۲ با شدت‌های مختلف اعم از 0.2g، 0.4g، 06gو 08g و نیز فرکانس‌های ۱، ۲، ۳و ۴ هرتز و مبتنی بر آنالیز خطی می‌باشد. در اشکال ۵ الی ۹ مقادیر پاسخ تغییرمکان برای ۵ مدل مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است. در ادامه مقادیر پاسخ سازه با تغییر فرکانس و ماکزیمم شتاب بارگذاری ارائه شده است. با توجه به اشکال۶ الی ۱۰ مشخص می‌شود که برای تمام مدل‌های مورد بررسی با افزایش مقدار شتاب ماکزیمم بارگذاری، مقادیر ماکزیمم تغییرمکان افزایش پیدا می‌کند. مقادیر افزایش پاسخ‌های سازه با افزایش شتاب پالس بارگذاری رابطه‌ی خطی دارد. همچنین با توجه به اشکال مزبور مشخص می‌شود که با افزودن آب در هر مرحله برخلاف برج آبگیر بدون مخزن که تقریبا در ثانیه ۲۰ میرا می‌گردد هنوز شاهد نوسانات سازه تحت اثر مخزن پیرامونی و آب داخلی وجود دارد. هرچقدر تراز آب مخزن و نیز آب داخل برج بیش‌تر باشد اثرات انرژی وارد شده به سازه بیش‌تر بوده و نشانگر دوام بیش‌تر بارگذاری وارده بر سازه بوده است و نیازمند زمان بیش‌تری برای میرا شدن می‌باشد. نتایج حاصل از آنالیز های انجام گرفته برای برج آبگیر با شرایط مختلف آب داخلی و مخزن پیرامونی نشان می‌دهد که افزایش فرکانس سازه و افزوده شدن آب داخلی و مخزن پیرامونی سبب تغییر الگوی تاریخچه زمانی ماکزیمم تغییرمکان شده است. برای تمامی مدل‌ها برای پریود بارگذاری ۱ ثانیه الگوی تغییرمکان برای کل زمان بارگذاری دارای یک شکل یکنواخت و بدون نوسان در نقاط پیک ماکزیمم و مینیمم تاریخچه زمانی می‌باشد. با افزایش فرکانس بارگذاری سازه الگوی یکنواختی شکل تاریخچه‌ی زمانی نامنظم‌تر شده و با اتمام بارگذاری و در ثانیه‌های بعدی آنالیز دوباره شکل یکنواخت و بدون نوسان در پیک‌های پاسخ را به خود می‌گیرد. همچنین با توجه به اشکال تاریخچه‌ی زمانی مشخص می‌گردد برای تمامی مدل‌ها اعم از با حضور یا عدم حضور آب داخلی و مخزن پیرامونی با افزایش فرکانس بارگذاری، پیک پاسخ ماکزیمم مقدار تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان به محل شروع بارگذاری نزدیک‌تر می‌شود. در این اشکال چگونگی تغییر محل ماکزیمم قدرمطلق پیک پاسخ از نقطه‌ی اوج دوم در تاریخچه‌ی تغییرمکان به نقطه‌ی اوج اول مشخص می‌باشد که نشانگر اهمیت اثرات فرکانس بارگذاری بر زمان رخداد ماکزیمم پاسخ برج آبگیر می‌باشد



شکل۶.تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان افقی بالای برج آبگیر با درنظرگرفتن تغییرات ماکزیمم شتاب و فرکانس بارگذاری (بدون مخزن پیرامونی)

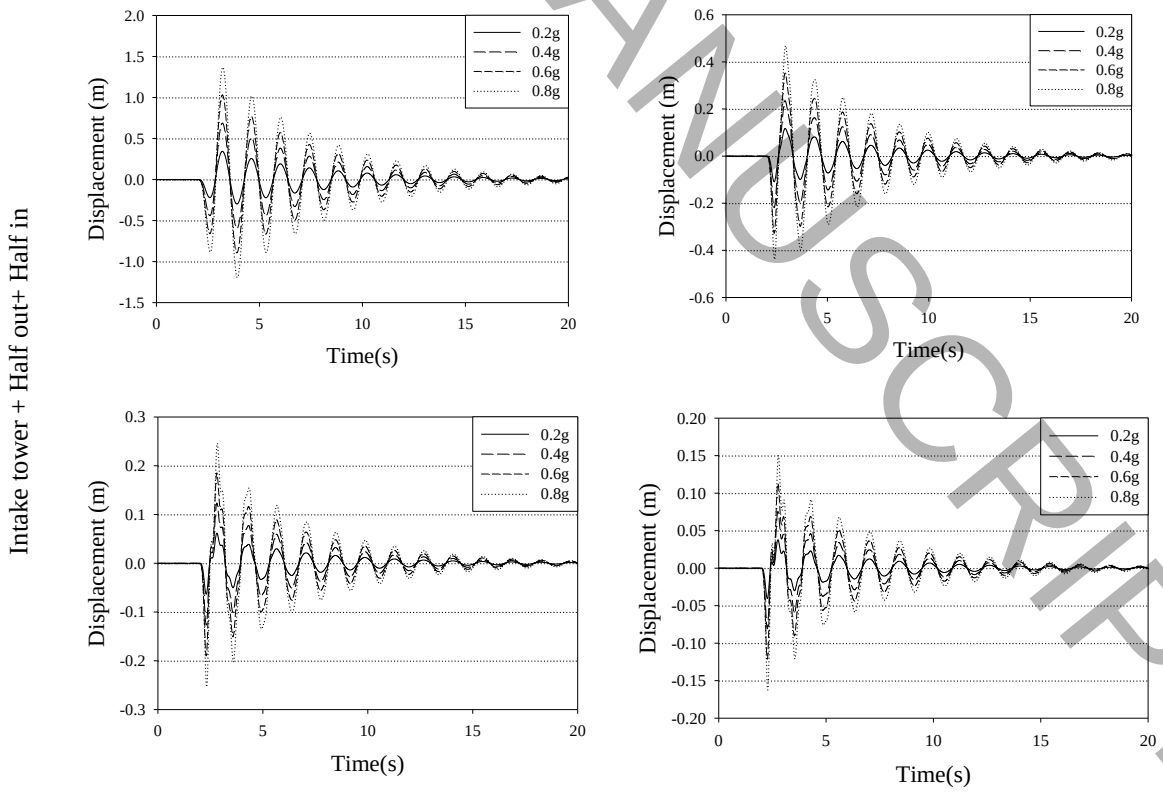
Figure 6. Time history of the horizontal displacement at the top of the intake tower under varying peak acceleration and loading frequency (without the surrounding reservoir).

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۷. تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان بالای برج آبگیر با درنظرگرفتن تغییرات ماکزیمم شتاب و فرکانس بارگذاری (در حالت حضور مخزن تا نصف تراز برج آبگیر و داخل برج خالی)

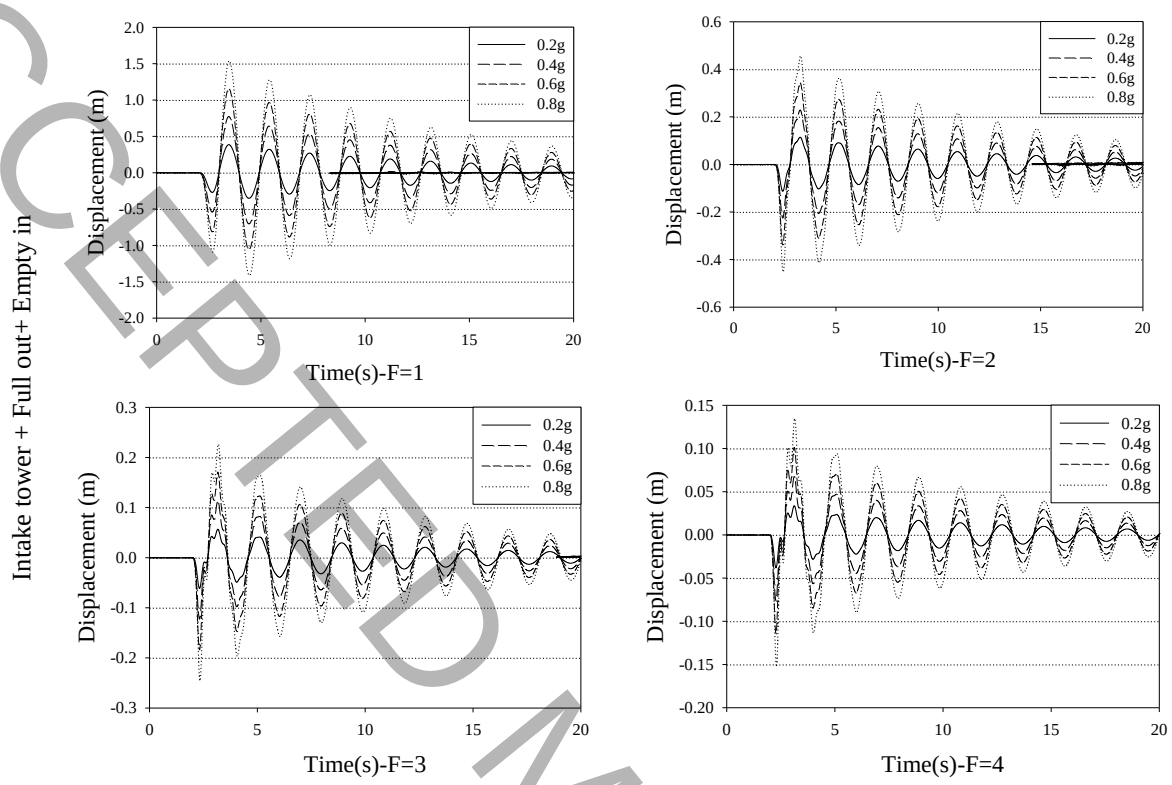
Figure 7. Time history of the horizontal displacement at the top of the intake tower under varying peak acceleration and loading frequency (surrounding reservoir filled to half the tower height, with no internal water).



ACCEPTED MANUSCRIPT

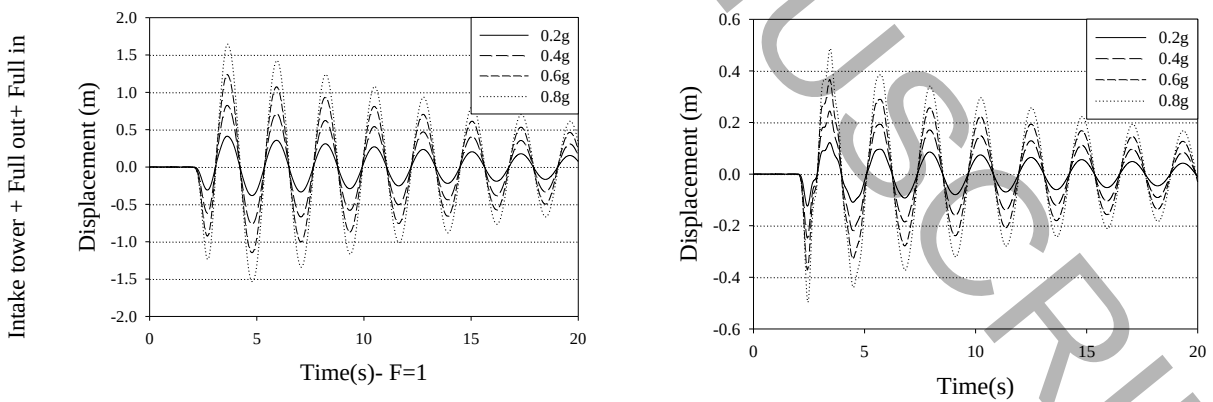
شکل۸. تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان بالای برج آبگیر با درنظرگرفتن تغییرات ماکزیمم شتاب و فرکانس بارگذاری (در حالت مخزن پیرامونی و آب داخلی تا نصف تراز برج آبگیر)

Figure 8. Time history of the horizontal displacement at the top of the intake tower under varying peak acceleration and loading frequency (surrounding reservoir and internal water filled to half the tower height).

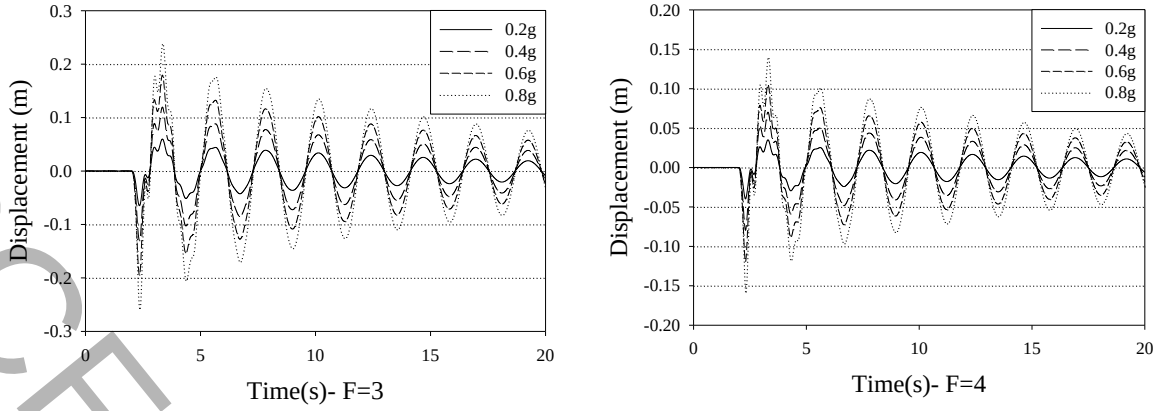


شکل۹. تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان بالای برج آبگیر با درنظرگرفتن تغییرات ماکزیمم شتاب و فرکانس بارگذاری (در حالت حضور مخزن پیرامونی تا بالاترین تراز برج آبگیر و داخل برج خالی)

Figure 9. Time history of the horizontal displacement at the top of the intake tower under varying peak acceleration and loading frequency (surrounding reservoir filled to the full height of the intake tower, with no internal water).



ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۱۰. تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان بالای برج آبگیر با درنظرگرفتن تغییرات ماکزیمم شتاب و فرکانس بارگذاری (در حالت مخزن پیرامونی تا تراز برج آبگیر و داخل برج پر)

Figure 10. Time history of the horizontal displacement at the top of the intake tower under varying peak acceleration and loading frequency (surrounding reservoir and internal water filled to the full height of the intake tower).

در جداول ۶ و ۷ و اشکال ۱۱ الی۱۵ نحوه‌ی تغییرات ماکزیمم مقدار تغییرمکان و تنش اصلی اول برای ۵ حالت برج آبگیر مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به جدول ۶ و اشکال ۱۱ تا ۱۵ مشخص می‌شود که با افزایش مقدار پیک بارگذاری مقدار ماکزیمم تغییرمکان فارغ از مقدار فرکانس به‌صورت خطی افزیش پیدا می‌کند. در مورد تنش اصلی اول روند افزایش مقدار ماکزیمم پاسخ با افزایشPGA نیز تقریبا به‌صورت خطی می‌باشد که دلیل این موضوع نحوه‌ی محاسبه ماکزیمم تنش اصلی توسط نرم‌افزار می‌باشدکه از میانگین ۷۵٪ برای محاسبه‌ی تنش بهره می‌گیرد.

برای تمامی مدل‌های برج آبگیر با توجه به جدول ۶ مشخص می شود که برای هرکدام از فرکانس‌های ۱، ۲، ۳و ۴ با افزایش مقدار PGA بارگذاری به 0.4g، 0.6g و 0.8g درصد افزایش مقدار پاسخ تغییرمکان به ترتیب برابر با ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درصد می‌باشد که این افزایش خطی مقادیر ماکزیمم تغییرمکان به دلیل خطی بودن آنالیز است. برای مدل برج آبگیر بدون مخزن با توجه به شکل ۱۱ و جدول ۶ مشخص می شود که با افزایش مقدار PGA بارگذاری به 0.4g، 0.6g و 0.8g، مقادیر افزایش ماکزیمم تنش اصلی اول برای فرکانس F=1 به ترتیب برابر با ۱۱۲، ۲۳۱و ۳۴۷ درصد برای F=2 به ترتیب برابر با ۱۶۹، ۳۳۷و ۵۰۶ درصد، برای F=3 به ترتیب برابر با ۲۸۵، ۵۴۶و ۸۶۳ درصد و در نهایت برای F=4 به ترتیب برابر با ۲۲۹، ۴۶۱و ۷۱۲ درصد می‌باشد. برای مدل برج آبگیر با مخزن نیمه پر و داخل خالی با توجه به شکل ۱۲ و جدول ۵ مشخص می شود که با افزایش مقدار PGA بارگذاری به 0.4g، 0.6g و 0.8g، مقادیر افزایش ماکزیمم تنش اصلی اول برای فرکانس F=1 به ترتیب برابر با ۱۱۴، ۲۲۸ و ۳۴۲ درصد برای F=2 به ترتیب برابر با ۱۵۲، ۳۰۵ و ۴۵۹ درصد، برای F=3 به ترتیب برابر با ۱۹۲، ۳۸۸ و ۶۷۵ درصد و در نهایت برای F=4 به ترتیب برابر با ۱۷۴، ۳۴۹ و ۵۲۵ درصد می‌باشد. برای مدل برج آبگیر با مخزن نیمه پر و داخل خالی با توجه به شکل ۱۲ و جدول ۶ مشخص می شود که با افزایش مقدار PGA بارگذاری به 0.4g، 0.6g و 0.8g، مقادیر افزایش ماکزیمم تنش اصلی اول برای فرکانس F=1 به ترتیب برابر با ۱۱۴، ۲۲۸ و ۳۴۲ درصد برای F=2 به ترتیب برابر با ۱۵۲، ۳۰۵ و ۴۵۹ درصد، برای F=3 به ترتیب برابر با ۱۹۲، ۳۸۸ و ۶۷۵ درصد و در نهایت برای F=4 به ترتیب برابر با ۱۷۴، ۳۴۹ و ۵۲۵ درصد می‌باشد. برای مدل برج آبگیر با مخزن نیمه پر و داخل نیمه پر با توجه به شکل ۱۳ و جدول ۶ مشخص می شود که با افزایش مقدار PGA بارگذاری به 0.4g، 0.6g و 0.8g، مقادیر افزایش ماکزیمم تنش اصلی اول برای فرکانس F=1 به ترتیب برابر با ۱۱۲، ۲۲۴ و ۳۳۷ درصد برای F=2 به ترتیب برابر با ۱۴۲، ۲۸۴ و ۴۲۷ درصد، برای F=3 به ترتیب برابر با ۱۵۳، ۳۱۵ و ۴۷۷ درصد و در نهایت برای F=4 به ترتیب برابر با ۱۶۱، ۳۲۱ و ۴۸۱ درصد می‌باشد. برای مدل برج آبگیر با مخزن پر و داخل خالی با توجه به شکل ۱۴ و جدول ۶ مشخص می شود که با افزایش مقدار PGA بارگذاری به 0.4g، 0.6g و 0.8g، مقادیر افزایش ماکزیمم تنش اصلی اول برای فرکانس F=1 به ترتیب برابر با ۱۱۲، ۲۲۵ و ۳۳۷ درصد برای F=2 به ترتیب برابر با ۱۴۲، ۲۸۵ و ۴۲۸ درصد، برای F=3 به ترتیب برابر با ۱۴۰، ۲۹۴ و ۴۵۱ درصد و در نهایت برای F=4 به ترتیب برابر با ۱۵۵، ۳۱۰ و ۴۶۶

ACCEPTED MANUSCRIPT

درصد می‌باشد. برای مدل برج آبگیر با مخزن پر و داخل پر با توجه به شکل ۱۵ و جدول ۶ مشخص می شود که با افزایش مقدار PGA بارگذاری به 0.4g، 0.6g و 0.8g، مقادیر افزایش ماکزیمم تنش اصلی اول برای فرکانس F=1 به ترتیب برابر با ۱۱۰، ۲۲۰ و ۳۳۱ درصد برای F=2 به ترتیب برابر با ۱۳۳، ۲۶۶ و ۴۰۰ درصد، برای F=3 به ترتیب برابر با ۱۴۰، ۲۶۲ و ۳۹۵ درصد و در نهایت برای F=4 به ترتیب برابر با ۱۴۴، ۲۸۹ و ۴۳۴ درصد می‌باشد. نتایج بیانگر آن است که با افزایش تراز ارتفاعی مخزن پیرامونی و آب داخلی، شیب رشد پاسخ سازه در هر فرکانس بارگذاری هنگام افزایش مرحله‌ای شتاب از g۰,۲ به g۰,۴، g۰,۶ و g۰,۸ کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که برج بدون مخزن بیشترین و برج با مخزن و داخلِ کاملاً پر کمترین حساسیت را به افزایش شتاب در یک فرکانس مشخص نشان می دهند. همچنین با بالا رفتن فرکانس بارگذاری، تأثیر شتاب بر میزان پاسخ در مقایسه با بارگذاری‌های کم‌شتاب برجسته‌تر می‌شود که بیانگر نقش قابل‌توجه اندرکنش سیال و ارتفاع آن است.

برای تمامی مدل‌های برج آبگیر با توجه به جدول ۷ مشخص می شود که برای هرکدام از شتاب‌های بارگذاری 0.2g، 0.4g، 0.6g و 0.8g با افزایش مقدار فرکانس بارگذاری ۱ به ۲، ۳و ۴ درصد افزایش مقدار پاسخ تغییرمکان به ترتیب برابر با ۶۷، ۸۳ و ۹۰ درصد می‌باشد که این افزایش خطی مقادیر ماکزیمم تغییرمکان به دلیل خطی بودن آنالیز است. با توجه به نتایج ارائه شده برای برج آبگیر بدون مخزن در جدول ۷ و شکل ۱۱ مشخص می‌گردد که برای افزایش فرکانس از ۱ به۲، ۳و ۴ برای PGA=0.2g مقادیر کاهش تنش اصلی اول به ترتیب برابر با ۷۷، ۹۲و ۹۴ درصد، برای PGA=0.4g به ترتیب ۷۱، ۸۶و ۹۱ درصد، برای PGA=0.6g به ترتیب برابر با ۶۷، ۸۴ و ۹۰ درصد و درنهایت برای PGA=0.8g ترتیب برابر با ۶۹، ۸۳ و ۸۹ درصد می‌باشد. برای برج آبگیر با مخزن نیمه پر و داخل خالی در جدول ۷ و شکل ۱۲ مشخص می‌گردد که برای افزایش فرکانس از ۱ به۲، ۳و ۴ برای PGA=0.2g مقادیر کاهش تنش اصلی اول به ترتیب برابر با ۷۳، ۸۶ و ۹۰ درصد، برای PGA=0.4g به ترتیب ۶۳، ۸۰ و ۸۷ درصد، برای PGA=0.6g به ترتیب برابر با ۶۷، ۷۸ و ۸۶ درصد و درنهایت برای PGA=0.8g ترتیب برابر با ۶۶، ۷۸ و ۸۵ درصد می‌باشد. برای برج آبگیر با مخزن نیمه پر و داخل نیمه‌پر در جدول ۷ و شکل ۱۳ مشخص می‌گردد که برای افزایش فرکانس از ۱ به۲، ۳و ۴ برای PGA=0.2g مقادیر کاهش تنش اصلی اول به ترتیب برابر با ۷۱، ۸۳ و ۸۸ درصد، برای PGA=0.4g به ترتیب ۶۷، ۷۹ و ۸۶ درصد، برای PGA=0.6g به ترتیب برابر با ۶۶، ۷۸ و ۸۵ درصد و درنهایت برای PGA=0.8g ترتیب برابر با ۶۵، ۷۷ و ۸۴ درصد می‌باشد. برای برج آبگیر با مخزن پر و داخل خالی در جدول ۷ و شکل ۱۴ مشخص می‌گردد که برای افزایش فرکانس از ۱ به۲، ۳و ۴ برای PGA=0.2g مقادیر کاهش تنش اصلی اول به ترتیب برابر با ۷۳، ۸۵ و ۹۰ درصد، برای PGA=0.4g به ترتیب ۶۳، ۸۳ و ۸۷ درصد، برای PGA=0.6g به ترتیب برابر با ۶۷، ۸۱ و ۸۷ درصد و درنهایت برای PGA=0.8g ترتیب برابر با ۶۷، ۸۰ و ۸۷ درصد می‌باشد. برای برج آبگیر با مخزن پر و داخل پر در جدول ۷ و شکل ۱۵ مشخص می‌گردد که برای افزایش فرکانس از ۱ به۲، ۳و ۴ برای PGA=0.2g مقادیر کاهش تنش اصلی اول به ترتیب برابر با ۶۹، ۸۲ و ۸۹ درصد، برای PGA=0.4g به ترتیب ۶۶، ۸۰ و ۸۷ درصد، برای PGA=0.6g به ترتیب برابر با ۶۵، ۸۰ و ۸۷ درصد و درنهایت برای PGA=0.8g ترتیب برابر با ۶۴، ۸۰ و ۸۷ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده مشخص می‌گردد که اثرات افزایش فرکانس بارگذاری در کاهش ماکزیمم پاسخ‌های برج آبگیر برای تمامی شتاب‌های مورد بررسی و در هر کدام از ۵ مدل مورد مطالعه تقریبا یکسان می‌باشد.

جدول ۶. مقادیر تغییرات ماکزیمم تغییرمکان و تنش اصلی اول برای هر فرکانس با تغییرات شتاب

Table 6. Maximum displacement and first principal stress at each frequency under varying acceleration levels.

	درصد افزایش ماکزیمم تغییرمکان نسبت به شتاب 0.2g				درصد افزایش ماکزیمم تنش اصلی اول نسبت به شتاب 0.2g			
	0.2g	0.4g	0.6g	0.8g	0.2g	0.4g	0.6g	0.8g
Intake tower only								
F=1	0	100	200	300	0	112	231	347
F=2	0	100	200	300	0	169	337	506
F=3	0	100	200	300	0	285	546	863
F=4	0	100	200	300	0	229	461	712
Intake tower+ Half out+ Empty in								
F=1	0	100	200	300	0	114	228	342
F=2	0	100	200	300	0	152	305	459
F=3	0	100	200	300	0	192	388	675
F=4	0	100	200	300	0	174	349	525

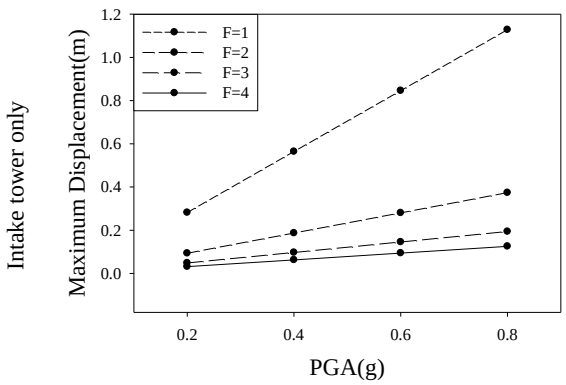
ACCEPTED MANUSCRIPT

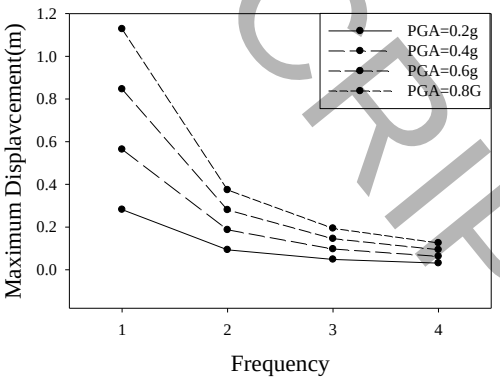
Intake tower+ Half out+ Half in								
F=1	0	100	200	300	0	112	224	337
F=2	0	100	200	300	0	142	284	427
F=3	0	100	200	300	0	153	315	477
F=4	0	100	200	300	0	161	321	481
Intake tower+ Full out+ Empty in								
F=1	0	100	200	300	0	112	225	337
F=2	0	100	200	300	0	142	285	428
F=3	0	100	200	300	0	140	294	451
F=4	0	100	200	300	0	155	310	466
Intake tower+ Full out+ Full in								
F=1	0	100	200	300	0	110	220	331
F=2	0	100	200	300	0	133	266	400
F=3	0	100	200	300	0	130	262	395
F=4	0	100	200	300	0	144	289	434

جدول ۷. مقادیر تغییرات ماکزیمم تغییرمکان و تنش اصلی اول برای هر شتاب با تغییرات فرکانس

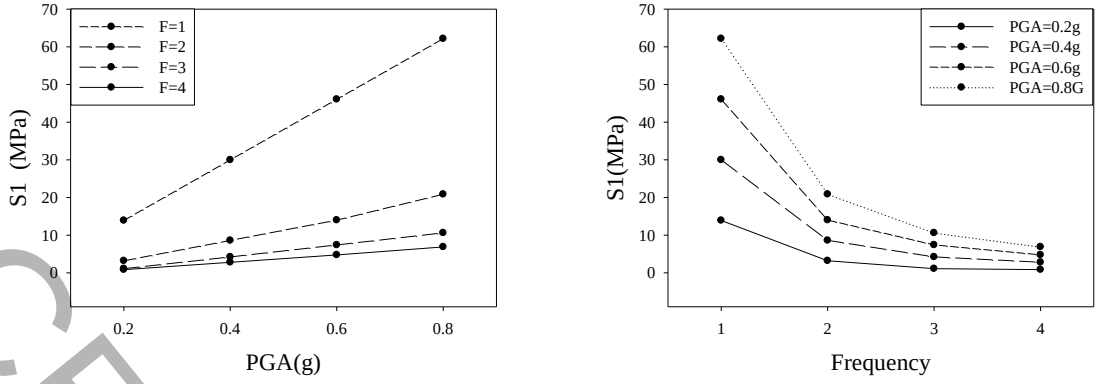
Table 7. Maximum displacement and first principal stress at each acceleration level under varying frequencies.

	درصد کاهش ماکزیمم تغییرمکان نسبت به فرکانس F=1				درصد کاهش ماکزیمم تنش اصلی اول نسبت به فرکانس F=1			
	F=1	F=2	F=3	F=4	F=1	F=2	F=3	F=4
Intake tower only								
0.2g	0	67	83	89	0	77	92	94
0.4g	0	67	83	89	0	71	86	91
0.6g	0	67	83	89	0	67	84	90
0.8g	0	67	83	90	0	69	83	89
Intake tower+ Half out+ Empty in								
0.2g	0	67	82	88	0	73	86	90
0.4g	0	67	82	88	0	63	80	87
0.6g	0	67	82	88	0	67	78	86
0.8g	0	67	82	88	0	66	78	85
Intake tower+ Half out+ Half in								
0.2g	0	66	82	88	0	71	83	88
0.4g	0	66	82	88	0	67	79	86
0.6g	0	66	82	88	0	66	78	85
0.8g	0	66	82	88	0	65	77	84
Intake tower+ Full out+ Empty in								
0.2g	0	70	84	90	0	73	85	90
0.4g	0	70	84	90	0	68	83	88
0.6g	0	70	84	90	0	67	81	87
0.8g	0	70	84	90	0	67	80	87
Intake tower+ Full out+ Full in								
0.2g	0	70	84	90	0	69	82	89
0.4g	0	70	84	90	0	66	80	87
0.6g	0	70	84	90	0	65	80	87
0.8g	0	70	84	90	0	64	80	87



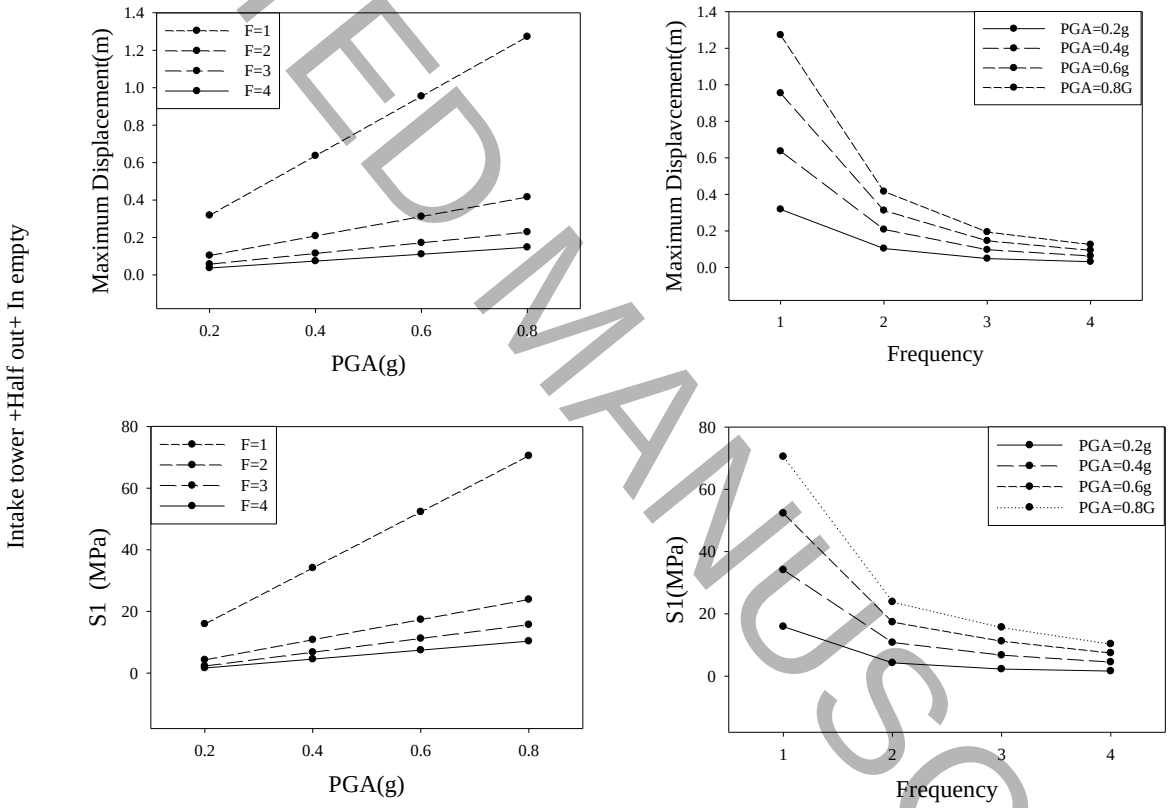


ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۱۱. نمودار تغییرات ماکزیمم تغییرمکان و تنش اصلی اول برج آبگیر با تغییرات پیک شتاب ماکزیمم و فرکانس بارگذاری (حالت بدون مخزن)

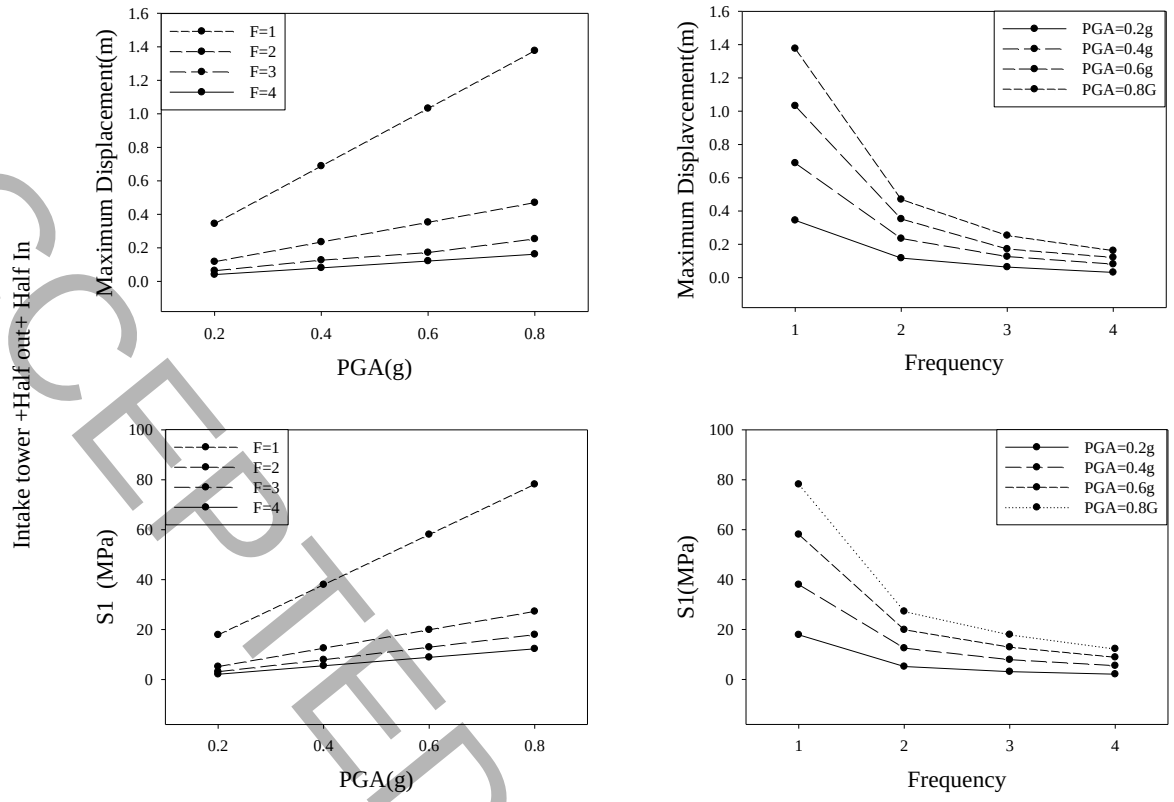
Figure 11. Variations in the maximum displacement and first principal stress of the intake tower with peak ground acceleration and loading frequency (without the surrounding reservoir).



شکل۱۲. نمودار تغییرات ماکزیمم تغییرمکان و تنش اصلی اول برج آبگیر با تغییرات پیک شتاب ماکزیمم و فرکانس بارگذاری(حالت با مخزن پیرامونی تا نصف تراز برج و داخل برج خالی)

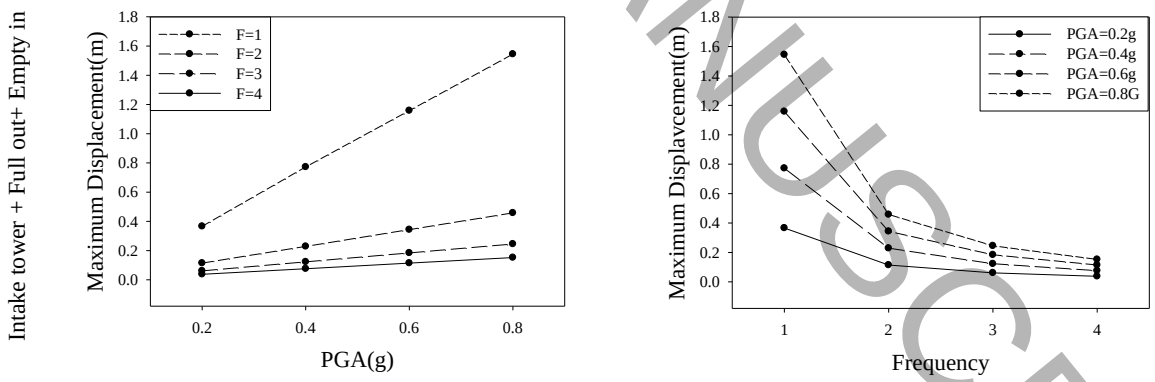
Figure 12. Variations in the maximum displacement and first principal stress of the intake tower with peak ground acceleration and loading frequency (surrounding reservoir filled to half the tower height, with no internal water).

ACCEPTED MANUSCRIPT

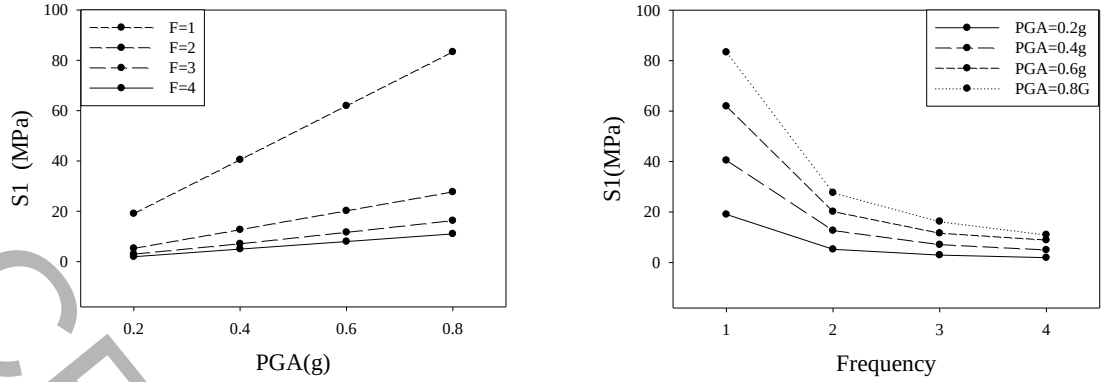


شکل۱۳. نمودار تغییرات ماکزیمم تغییرمکان و تنش اصلی اول برج آبگیر با تغییرات پیک شتاب ماکزیمم و فرکانس بارگذاری(حالت با مخزن پیرامونی و آب داخلی تا نصف تراز برج)

Figure 13. Variations in the maximum displacement and first principal stress of the intake tower with peak ground acceleration and loading frequency (surrounding reservoir and internal water filled to half the tower height).

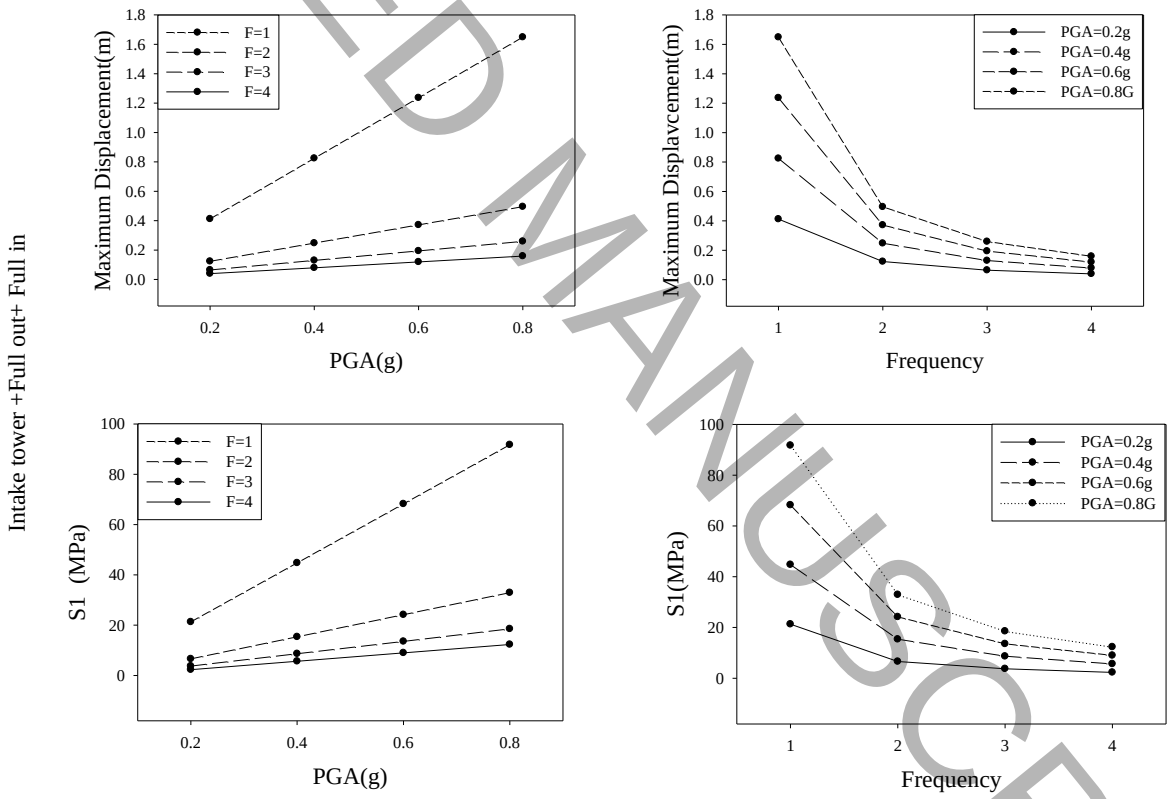


ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۱۴. نمودار تغییرات ماکزیمم تغییرمکان و تنش اصلی اول برج آبگیر با تغییرات پیک شتاب ماکزیمم و فرکانس بارگذاری(حالت با مخزن پیرامونی تا تراز برج آبگیر وداخل برج خالی)

Figure 14. Variations in the maximum displacement and first principal stress of the intake tower with peak ground acceleration and loading frequency (surrounding reservoir filled to the full height of the intake tower, with no internal water).



شکل۱۵. نمودار تغییرات ماکزیمم تغییرمکان و تنش اصلی اول برج آبگیر با تغییرات پیک شتاب ماکزیمم و فرکانس بارگذاری(حالت با مخزن پیرامونی و اب داخل تا تراز بالای برج)

Figure 15. Variations in the maximum displacement and first principal stress of the intake tower with peak ground acceleration and loading frequency (surrounding reservoir and internal water filled to the full height of the intake tower).

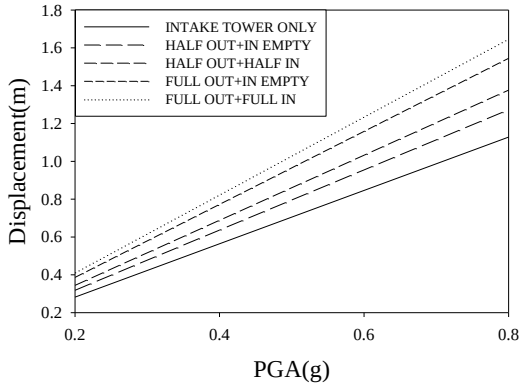
با توجه به شکل ۱۶و ۱۷ مشخص می‌گردد که برای فرکانس ۱ هرتز با افزوده شدن آب اعم از آب داخلی و مخزن پیرامونی در هرمرحله مقدار ماکزیمم تنش اصلی اول، سوم و مقدار ماکزیمم تغییرمکان افزایش نشان می‌دهد. برای سایر فرکانس‌های بارگذاری نتایج

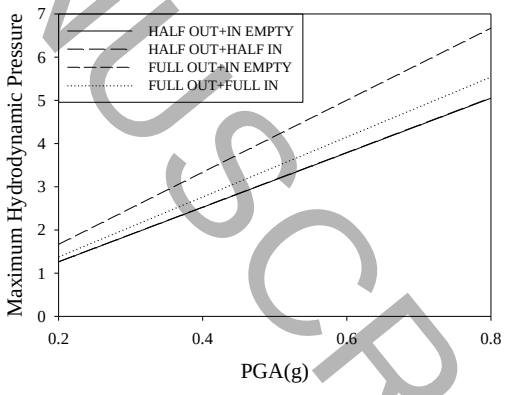
ACCEPTED MANUSCRIPT

متفاوت از فرکانس ۱هرتز در رابطه با افزوده شدن آب داخلی می‌باشد. نتایج ارائه شده در اشکال ۱۶و ۱۷ مشخص می‌کند که برای حالات عدم حضور آب داخلی و با افزایش ارتفاع مخزن پیرامونی مقدار ماکزیمم پاسخ‌ها مطابق فرکانس ۱ هرتز افزایش می‌یابد. برای زمانی که آب داخلی به مدل‌ها افزوده می‌گردد با افزایش مقدار فرکانس بارگذاری اثرات آب داخلی برای مدل برج آبگیر با مخزن نیمه‌پر و آب داخل نیمه‌پر به تدریج و با افزایش مرحله‌ای فرکانس از مقادیر ماکزیمم پاسخ‌های برج آبگیر با مخزن کامل- داخل خالی و با برج آبگیر با مخزن کامل- داخل پر بیش‌تر می‌شود. این موضوع نشانگر اهمیت بررسی تراز ارتفاعی آب داخلی برج آبگیر و اثرگذاری بیش‌تر آن بر پاسخ‌های ماکزیمم سازه با افزایش فرکانس بارگذاری می‌باشد. نتایج حاکی از این است که هرچند با افزایش مخزن پیرامونی در تمامی فرکانس‌های مورد بررسی مقادیر ماکزیمم پاسخ‌های سازه اعم از تغییرمکان، تنش اصلی اول و سوم دچار افزایش می‌گردند اما اثرات تغییرات فرکانس بارگذاری بر روی رفتار آب داخلی در مورد افزایش یا کاهش مقادیر پاسخ‌ها بسیار بیش‌ترحائز اهمیت می‌باشد و لذا اثرات آب داخلی در بررسی رفتار برج آبگیر بسیار مهم و حیاتی می‌باشد.

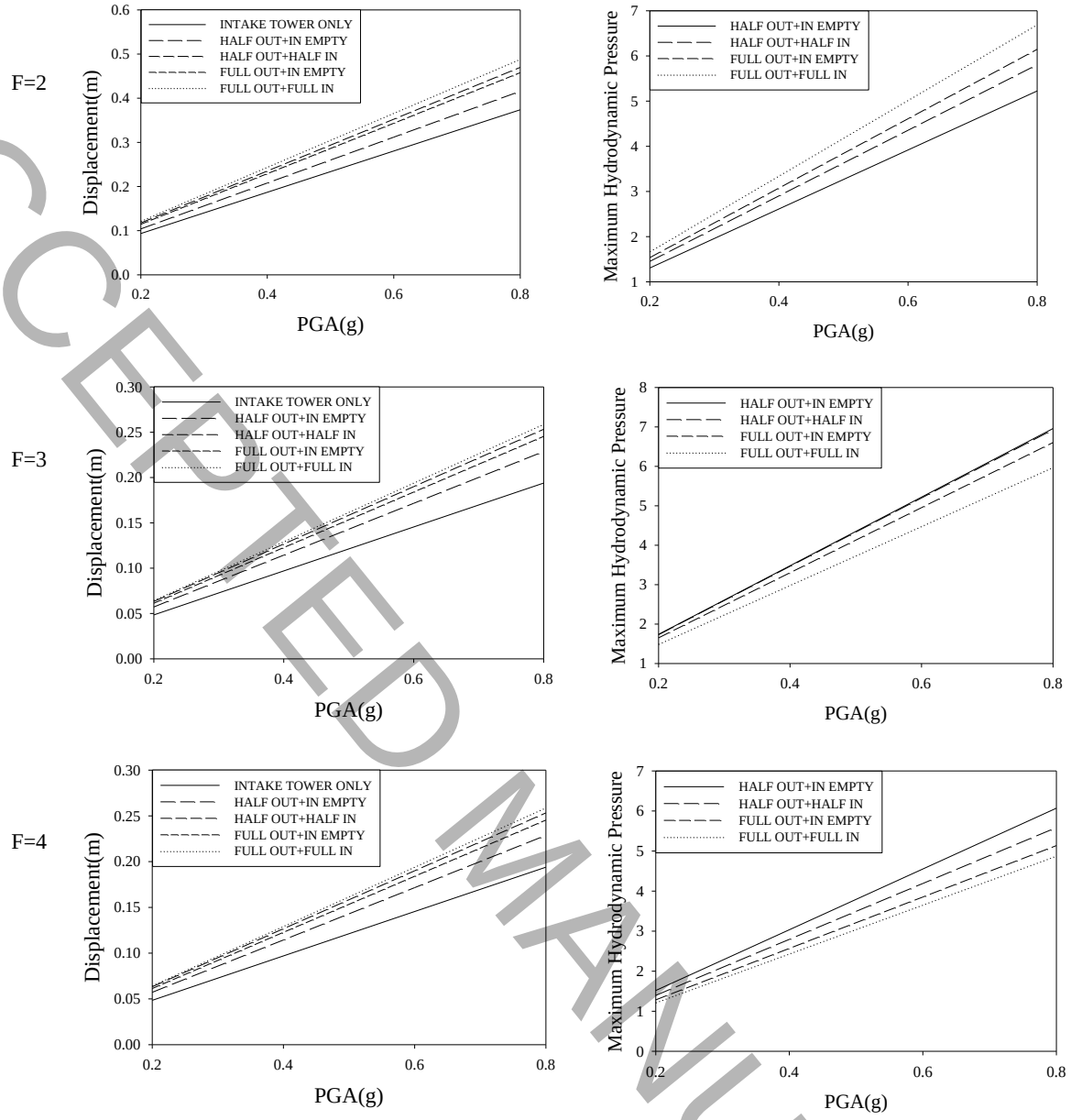
در ادامه در شکل ۱۶ که مقادیر ماکزیمم فشار هیدرودینامیکی برای ۴ فرکانس بارگذاری تحت شتاب‌های اعمالی پالسی را برای حالات B، C، Dو E ارائه شده است. با توجه به شکل مزبور مشخص می‌شود که در تمامی فرکانس‌های بارگذاری مقادیر افزایش ماکزیمم فشار هیدرودینامیکی مخزن پیرامونی با افزایش مقدار PGA به‌صورت خطی افزایش می‌یابد که این به دلیل خطی بودن آنالیز می‌باشد. همچنین با توجه شکل ۱۶ مشخص می‌گردد که در فرکانس‌های F=1,2 مقادیر ماکزیمم فشار هیدرودینامیکی مخزن برای مدل‌های برج آبگیر با مخزن پیرامونی پر- داخل خالی و برج آبگیر با مخزن پیرامونی پر- داخل پر رخ می‌دهد اما با افزایش فرکانس به F=3,4 مقادیر ماکزیمم فشار هیدرودینامیکی برای برج با مخزن پیرامونی نیمه پر- داخل خالی و مخزن پیرامونی نیمه پر- داخل پر رخ می‌دهد. دلیل این موضوع بالا بودن پریود بارگذاری در فرکانس‌های پایین بوده که با افزایش فرکانس کاهش یافته است.با توجه به شکل ۱۸ مشخص است که با افزایش فرکانس بارگذاری مکان رخداد ماکزیمم تنش اصلی اول به غیر از مدل بدون مخزن برای سایر مدل‌ها به تزاز ارتفاعی میانه برج آبگیر انتقال می‌یابد که این به دلیل اثرات کاهش بیش‌تر پریود بارگذاری دارد که باعث اثرات شتاب بالا در بازه‌های رفت و برگشتی کم می باشد و این باعث خم شدن بیش‌تر برج آبگیر در میانه‌های ارتفاع می‌گردد. از این رو جهت ارزیابی و طراحی برج‌های آبگیر بایستی باگذاری با فرکانس‌های مختلف مورد بررسی آنالیز قرار گیرد. با توجه به اشکال ۱۹ و ۲۰ مشخص می‌شود مقادیر ماکزیمم مقدار فشار هیدرودینامیکی داخلی و خارجی با افزایش شتاب بارگذاری افزایش یافته در حالیکه با افزایش فرکانس بارگذاری کاهش می یابد.

F=1





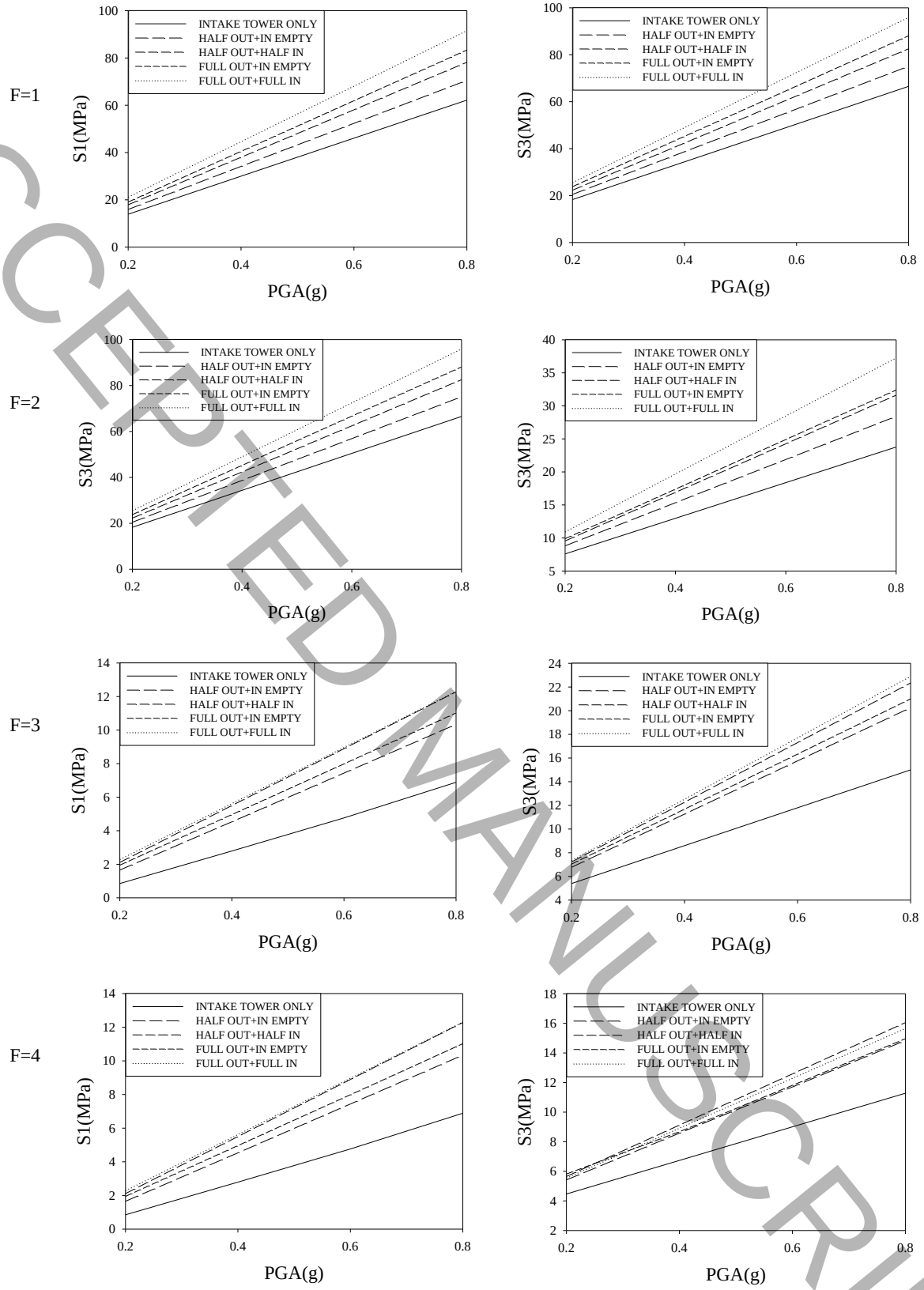
ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۱۶. روند تغییرات ماکزیمم تغییرمکان برج آبگیر و ماکزیمم فشار هیدرودینامیکی مدل با افزایش مرحله‌ای مخزن پیرامونی و آب داخلی و تغییرات فرکانس و شتاب بارگذاری

Figure 16. Variations in the maximum displacement of the intake tower and the maximum hydrodynamic pressure in the model with successive increases in the surrounding reservoir and internal water levels, under varying loading frequencies and acceleration amplitudes.

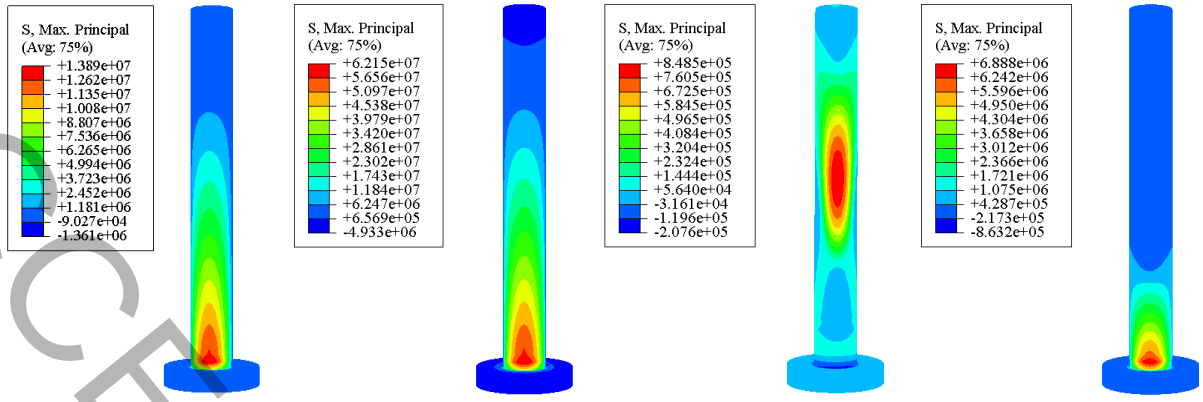
ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۱۷. روند تغییرات ماکزیمم تنش اصلی اول و سوم برج آبگیر با افزایش مرحله‌ای تراز مخزن پیرامونی و آب داخل و تغییرات فرکانس و شتاب بارگذاری

Figure 17. Variation in the maximum first and third principal stresses of the intake tower with the progressive increase in the surrounding reservoir and internal water levels, under different loading frequencies and accelerations.

ACCEPTED MANUSCRIPT

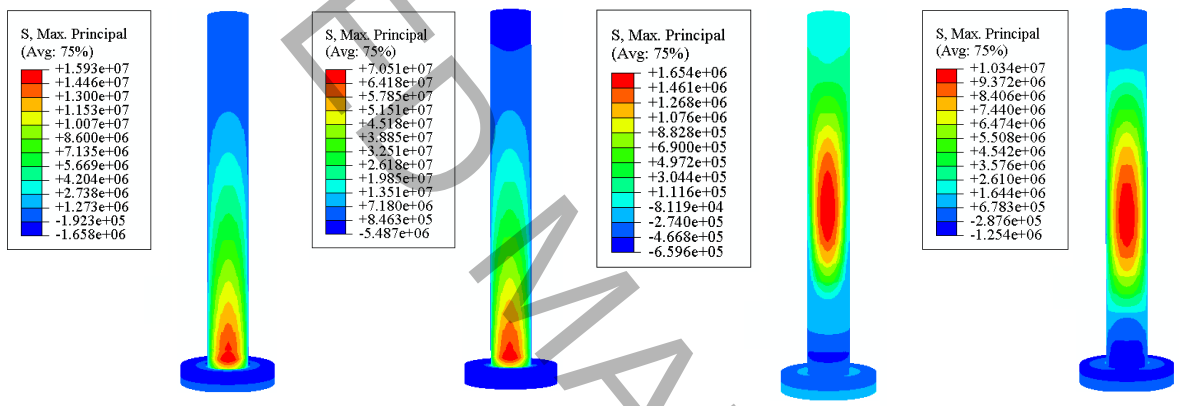


PGA =0.2g PGA =0.8g PGA =0.2g PGA =0.8g

F=1Hz F=4Hz

الف) برج آبگیر بدون مخزن

a. Intake tower without a Reservoir

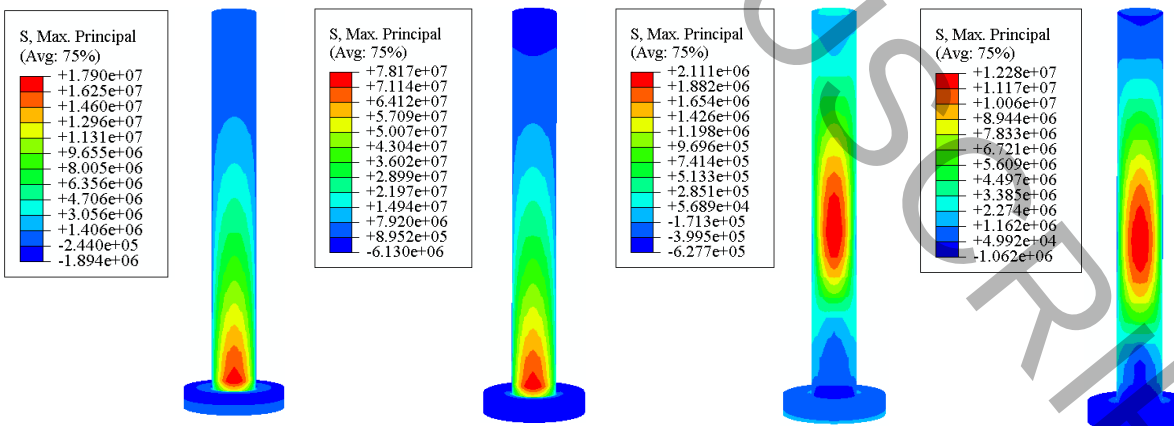


PGA =0.2g PGA =0.8g PGA =0.2g PGA =0.8g

F=1Hz F=4Hz

ب) برج آبگیر با مخزن پیرامونی تا نصف تراز برج آبگیر و داخل خالی

b. Intake Tower with the Surrounding Reservoir Filled to Half the Tower Height and No Internal Water



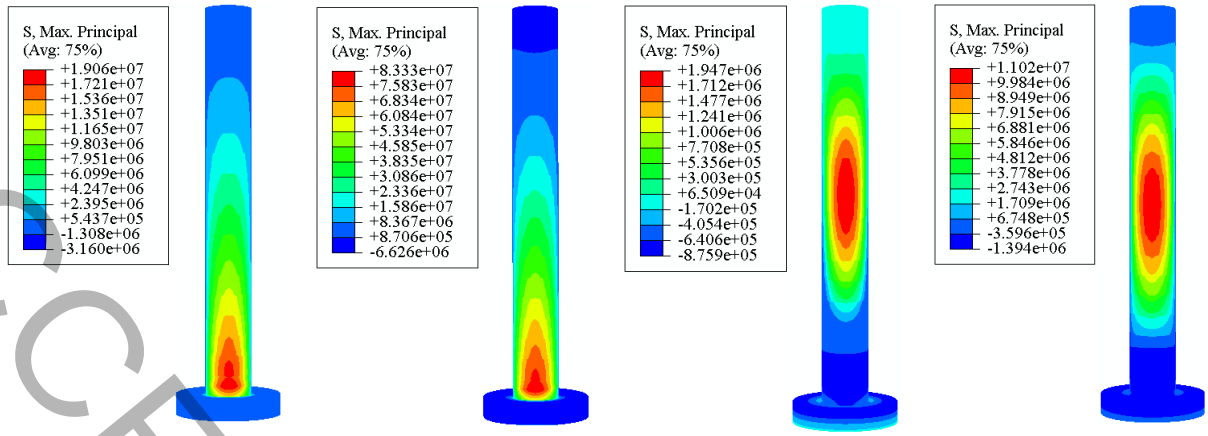
PGA =0.2g PGA =0.8g PGA =0.2g PGA =0.8g

F=1Hz F=4Hz

ج) برج آبگیر با مخزن پیرامونی و آب داخلی تا نصف تراز برج آبگیر

c. Intake Tower with Both the Surrounding Reservoir and Internal Water Filled to Half the Tower Height

ACCEPTED MANUSCRIPT

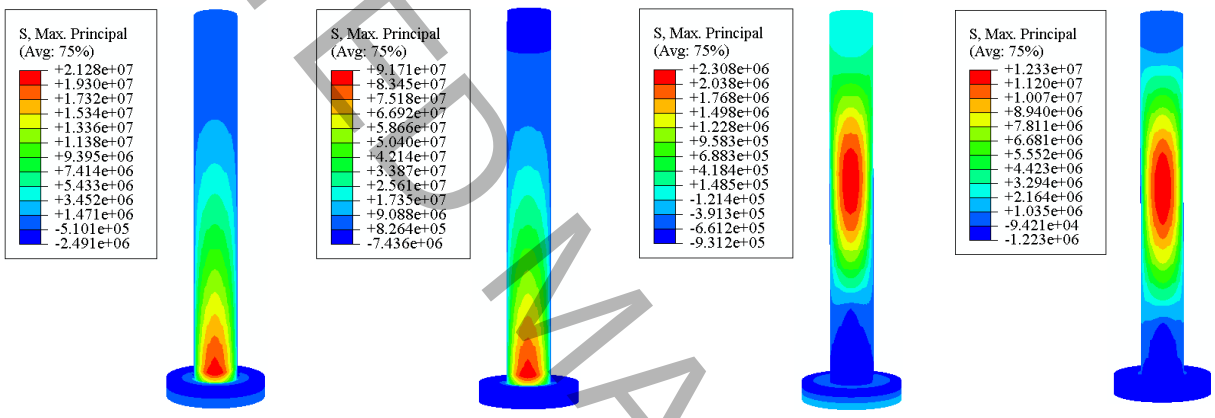


PGA =0.2g PGA =0.8g PGA =0.2g PGA =0.8g

F=1Hz F=4Hz

د) برج آبگیر با مخزن پیرامونی تراز برج آبگیر و داخل خالی

d. Intake Tower with the Surrounding Reservoir Filled to the Full Tower Height and No Internal Water



PGA =0.2g PGA =0.8g PGA =0.2g PGA =0.8g

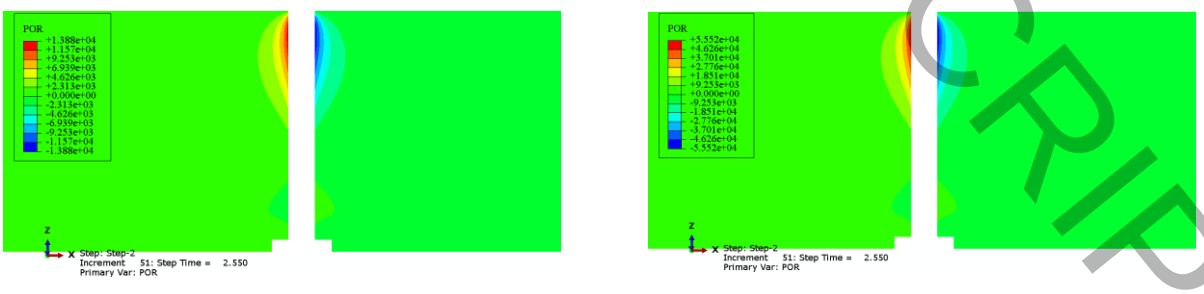
F=1Hz F=4Hz

ه) برج آبگیر با مخزن پیرامونی و آب داخلی تراز برج آبگیر

e. Intake Tower with Both the Surrounding Reservoir and Internal Water Filled to the Full Tower Height

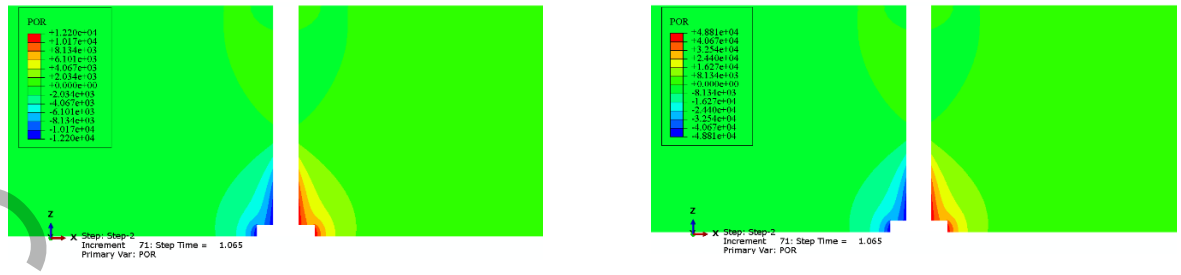
شکل ۱۸. نمونه‌هایی از پوش تنش اصلی اول برج آبگیر برای ۵ مدل مورد مطالعه

Figure 18. Examples of the First Principal Stress Contours in the Intake Tower for the Five Models Considered



a) F=1Hz and PGA=0.2g b) F=1Hz and PGA=0.8g

ACCEPTED MANUSCRIPT

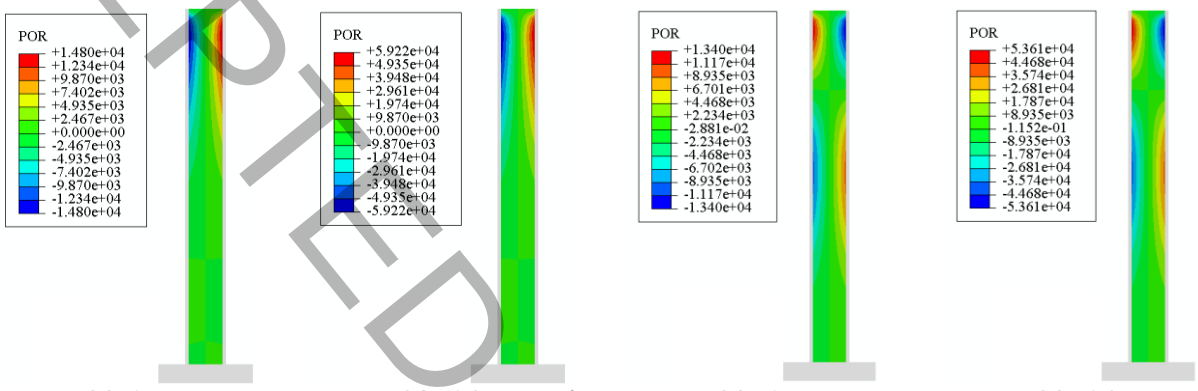


c) F=4Hz and PGA=0.2g

d) F=4Hz and PGA=0.8g

شکل۱۹. مقادیر ماکزیمم فشار هیدرودینامیکی مخزن پیرامونی برای برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل پر و فرکانس های ۱ و ۴ هرتز

Figure 19. Maximum hydrodynamic pressure in the surrounding reservoir for the intake tower with both the surrounding reservoir and internal water at their full levels, at frequencies of 1 and 4 Hz.



PGA=0.2g PGA =0.8g PGA =0.2g PGA =0.8g

F=1Hz F=4Hz

شکل ۲۰. مقادیر ماکزیمم فشار هیدرودینامیک آب داخلی برای برج آبگیر با مخزن پیرامونی و داخل پر و فرکانس‌های ۱ و ۴هرتز

Figure 20. Maximum hydrodynamic pressure in the internal water of the intake tower with both the surrounding reservoir and internal water at their full levels, at frequencies of 1 and 4 Hz.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه رفتار برج آبگیر تحت اثر بارگذاری پالسی و تغییرات ماکزیمم شتاب و فرکانس بارگذاری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور برج آبگیر استوانه‌ای با مقطع ثابت در کل ارتفاع برج آبگیر برای ۵ حالت مختلف از تراز مخزن پیرامونی و آب داخلی مدلسازی و آنالیز شده است.

۱. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی مدل‌ها و در هر PGA مورد بررسی با افزایش مقدار فرکانس مقادیر ماکزیمم تغییرمکان و تنش اصلی اول و سوم کاهش پیدا می‌کند که این به دلیل کاهش مقدار پریود بارگذاری سازه می‌باشد.

۲. با افزایش تراز آب مخزن و نیز آب داخل برج اثرات انرژی وارده به سازه بیش‌تر بوده و زمان لازم برای میرا شدن سازه بیش‌تر می‌گردد.

۳. با افزایش فرکانس بارگذاری شکل تاریخچه‌ی زمانی بارگذاری نامنظم‌تر شده و نیز افزایش فرکانس بارگذاری سبب می‌گردد زمان رخداد پیک ماکزیمم تغییرمکان به شروع بارگذاری نزدیک‌تر گردد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۴. نتایج نشان داد که اثرات فرکانس برای افزایش و کاهش ماکزیمم تنش اصلی به‌صورت قابل ملاحظه‌ای با تراز مخزن پیرامونی و آب داخلی در ارتباط می‌باشد. بطوریکه برای مدل‌های برج آبگیر بدون مخزن پیرامونی و برج آبگیر با مخزن نیمه‌پر و داخل برج خالی درصد افزایش ماکزیمم تنش اصلی اول برای هر PGA نسبت به بارگذاری با PGA=0.2g در فرکانس ۲ نسبت به فرکانس ۱ و در فرکانس ۳ نسبت به فرکانس ۲ افزایش می‌یابد اما برای فرکانس ۴ نسبت به فرکانس ۳ این مقادیر کاهش می‌یابد. برای سایر مدل‌ها با افزایش هر مرحله‌ای فرکانس بارگذاری درصد افزایش ماکزیمم تنش اصلی اول برای هر PGA و در هر فرکانس نسبت به همان PGA در فرکانس قبلی افزایش می‌یابد که نشاگر اهمیت حضور آب داخلی و تراز مخزن پیرامونی می‌باشد.

۵. در PGA ثابت با افزایش فرکانس درصد کاهش مقادیر ماکزیمم تغییرمکان افقی و تنش اصلی اول افزایش می‌یابد. درصد کاهش مقدار ماکزیمم تغییرمکان با افزایش فرکانس و برای تمامی شتاب‌های بارگذاری در هر مدل از برج آبگیر دارای روند کاهشی یکسان می‌باشد. این کاهش خطی تغییرمکان با افزایش PGA برای هر مدل در هر فرکانس به دلیل خطی بودن آنالیز است. برای ماکزیمم تنش اصلی اول مشخص می‌گردد که مقادیر کاهش مقدار ماکزیمم در هر مدل از ۵ مدل برج آبگیر مورد مطالعه برای PGA ثابت با افزایش فرکانس بیش‌تر می‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش PGA روند اثرات کاهشی افزایش فرکانس بارگذاری بر ماکزیمم مقدار تنش اصلی اول کم‌تر می‌گردد. شایان ذکر است که با افزوده شدن آب پیرامونی و آب داخلی مقدار کاهش ماکزیمم تنش اصلی اول کم‌تر می‌گردد.

۶. برای فرکانس ۱ هرتز با افزوده شدن آب اعم از آب داخلی و مخزن پیرامونی در هرمرحله مقدار ماکزیمم تنش اصلی اول، سوم و مقدار ماکزیمم تغییرمکان افزایش می‌یابد. برای سایر فرکانس‌های بارگذاری نتایج متفاوت از فرکانس ۱هرتز در رابطه با افزوده شدن آب داخلی می‌باشد. برای حالات عدم حضور آب داخلی و با افزایش ارتفاع مخزن پیرامونی مقدار ماکزیمم پاسخ‌ها مطابق فرکانس ۱ هرتز افزایش می‌یابد. برای زمانی که آب داخلی به مدل‌ها افزوده می‌گردد با افزایش مقدار فرکانس بارگذاری اثرات آب داخلی برای مدل برج آبگیر با مخزن نیمه‌پر و آب داخل نیمه‌پر به تدریج و با افزایش مرحله‌ای فرکانس از مقادیر ماکزیمم پاسخ‌های برج آبگیر با مخزن کامل- داخل خالی و با برج آبگیر با مخزن کامل- داخل پر بیش‌تر می‌شود. نتایج حاکی از این است که هرچند با افزایش مخزن پیرامونی در تمامی فرکانس‌های مورد بررسی مقادیر ماکزیمم پاسخ‌های سازه اعم از تغییرمکان، تنش اصلی اول و سوم دچار افزایش می‌گردند اما اثرات تغییرات فرکانس بارگذاری بر روی رفتار آب داخلی در مورد افزایش یا کاهش مقادیر پاسخ‌ها بسیار بیش‌ترحائز اهمیت می‌باشد.

۷. در تمامی فرکانس‌های بارگذاری مقادیر افزایش ماکزیمم فشار هیدرودینامیکی مخزن پیرامونی با افزایش مقدار PGA به‌صورت خطی افزایش می‌یابد که این به دلیل خطی بودن آنالیز می‌باشد. همچنین در فرکانس‌های F=1,2 مقادیر ماکزیمم فشار هیدرودینامیکی مخزن برای مدل‌های برج آبگیر با مخزن پر-داخل خالی و برج آبگیر با مخزن پر-داخل پر رخ می‌دهد اما با افزایش فرکانس بارگذاری به F=3,4 مقادیر ماکزیمم فشار هیدرودینامیکی برای برج با مخزن پیرامونی نیمه پر-داخل خالی و مخزن پیرامونی نیمه پر-داخل پر رخ می‌دهد. دلیل این موضوع بالا بودن پریود بارگذاری در فرکانس‌های پایین بوده که با افزایش فرکانس کاهش یافته است.

۸. نتایج به‌صورت کلی بیانگر نشان داد که با افزایش PGA بارگذاری برای تمامی مدل‌های برج آبگیر شاهد افزایش ماکزیمم مقدار پاسخ‌ها می‌باشیم در حالی که افزایش فرکانس بارگذاری در هرمدل سبب کاهش پاسخ‌ها برای همان مدل نسبت به فرکانس کم‌تر می گردد.

۹. در نهایت نتایج آنالیز و بررسی‌های انجام گرفته در این مطالعه نشان داد که افزوده شدن مخزن پیرامونی و آب داخلی و افزایش ارتفاع آن‌ها فارغ از فرکانس بارگذاری همیشه مقادیر ماکزیمم پاسخ‌ها را نسبت به برج آبگیر بدون مخزن و آب داخلی افزایش می‌دهد. اما اثرات آب داخلی و تراز ارتفاعی آن وابستگی شدیدی به فرکانس بارگذاری داشته و در فرکانس بالا اثرات تشدیدی بر پاسخ سازه دارد و با افزایش فرکانس بارگذاری آب داخلی با تراز ارتفاعی نیمه‌پر اثرات تشدیدی بیش‌تری از زمانی که داخل برج پر است دارد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۷-فهرست علائم

علا ئم انگلیسی

a شدت پالس(m/s^2)

E مدول یانگ(N/m^2)

H ارتفاع(m)

P پارمتر فرکانسی(rad/s)

T زمان تناوب(S)

علائم یونانی

α ضریب بازتاب موج

σ تنش نرمال(N/m^2)

u بردار تغییرمکان (m)

ρ_s چگالی (kg/m^3)

مراجع

[1] M.J. Hammer, Water and Wastewater Technology –SI Version, 2ndEdition., John Wiley and Sons,(1986).

[2] G. Tchobanoglous, F.L. Burton, H.D. Stensel, Metcalf, Eddy, Wastewater Engineering, Treatment and Reus. 4th Edition., Tata McGraw Hill Edition, Tata McGraw HillPublishing Co. Ltd, (2003).

[3] C.Y. Liaw, A.K. Chopra, Earthquake analysis of axisymmetric towers partially submerged in water, Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 3 (1974) 233–248.

[4] C.Y. Liaw, A.K. Chopra, Dynamics of towers surrounded by water, Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 3 (1974) 33–49.

[5] A. Goyal, A.K. Chopra, Simplified evaluation of added hydrodynamic mass for intake towers, Proceedings of ASCE, Journal of Engineering Mechanics, 115(7) (1989) 1393- 1412.

[6] A. Goyal, A.K. Chopra, Earthquake analysis of intake–outlet towers including tower–water–foundation–soil interaction, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 18(3) (1989) 325-334

[7] A. Goyal, A.K. Chopra, Hydrodynamic and foundation interaction effects in dynamics of intake towers: frequency response functions, Journal of Structural Engineering, 115(6) (1989) 1371-1385.

[8] A. Goyal, A.K. Chopra, Hydrodynamic and foundation interaction effects in dynamic of intake towers: earthquake responses, Journal of Structural Engineering, 115(6) (1989) 1386-1395.

[9] A. Goyal, A.K. Chopra, Earthquake response spectrum analysis of intake–outlet towers, Journal of Engineering Mechanics,115(7) (1989) 1413-1433.

[10] W.E. Daniell, C.A. Taylor, Full-scale dynamic testing and analysis of a reservoir intake tower, Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 23(11) (1994) 1219-1237.

[11] C.C. Spyrakos, C. Xu, Soil–structure–water interaction of intake–outlet towers allowed to uplift, Soil Dynamic and Structural Engineering, 16(2) (1997) 151–159.

[12] W.E. Daniell, C.A. Taylor, Developing a numerical model for a UK intake tower seismic assessment, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water and Maritime Engineering, 156(1) (2000) 63-72.

[13] Zh. Xaoxi, W. Zongmin, The application of ANSYS software to the static and dynamic stress analysis of high intake tower, Water power, 31(3) (2005) 72-83.

[14] M.A. Millan, Y.L. Young, J.H. Prevost J. H, Seismic Response of Intake Towers Including Dam – Tower Interaction. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 38(3) (2009) 307-329.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[15] Ch. Gong, A.L. Huaw, J.Zhang, Study on Dynamic Properties of the Intake Tower with Finite Element Method, Applied Mechanics and Materials, 501 (2014) 1888-1891.

[16] Y.X. Jiang, J.C. Yue, L.M. Ye, Static and dynamic analysis of intake tower structure, Applied Mechanics and Materials, 445 (2014) 912-915.

[17] M. Alembagheri, Dynamics of submerged intake towers including interaction with dam and foundation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 84 (2016) 108–119.

[18] M. Alembagheri, Frequency domain analysis of submerged tower-dam dynamic interaction, Soil Mechanics and Foundation Engineering, 54(4) (2017) 264-275.

[19] M. Alembagheri, Earthquake response of solitary slender freestanding intake towers, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 90 (2016) 1-14.

[20] M. Alembagheri, R. Hajirezaei, Overturning response analysis of free-standing intake tower subjected to seismic pulses, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 52(7) (2020) 443-446.(In Persian)

[21] P. Prihadi, M. Alembagheri, The influence of bridge–tower interaction on the dynamic behavior of intake–outlet towers, SN Applied Sciences, 16 (2019).

[22] H. Shariatmadar, A. MirHaj, Modeling of intake tower-reservoir-foundation interaction subjected to earthquake, Journal of modeling in Engineering, 3(18) (2009) 67-80.(In Persian)

[23] Ravikumara, A study on daynamic analysis of dam intake tower and foundation, National Institute of Technology Karnataka, India, 4(7) (2015) 180-184.

[24] E. Teymouri, S. Abbasi, A.J. Moradloo, Influence of Stiffeners and their arrangement on frequency and seismic response of intake tower during construction, Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE), 8(2) (2021) 380-401.(In Persian)

[25] E. Teymouri, S. Abbasi, 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, Modares Civil Engineering journal, 21(3) (2021) 61-73. (In Persian)

[26] E. Teymouri, S. Abbasi, Seismic Evaluation of Intake Tower Behavior with Different Types of Concrete Collars, Journal of Vibration Engineering & Technologies, 10 (2022) 3037-3058.

[27] X. Chen, Y. Liu, B. Zhou, D. Yang, Seismic response analysis of intake tower structure under near-fault ground motions with forward-directivity and fling-step effects, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 132 (2020) 1-13.

[28] M. Aghaeipoor, M. Alembagheri, Seismic damage of submerged intake tower under the sequence of mainshocks and aftershock , Journal of Earthquake Enginneering, 13(13) (2022) 6893-6917.

[29] Md. Ikram Uddin, T. Tasnim Nahar, D. Kim, K. Kim, Dynamic behavior of intake tower considering hydrodynamic damping effect, Structural Engineering and Mechanics, 82(3) (2022) 355-367.

[30] Sh. Xu, Q. Xu , J. Chen, J. Li, Improved endurance time analysis for seismic responses of concrete dam under near-fault pulse-like ground motions, Engineering Structure, 270(1) (2022).

[31] Q. Lu, G. Zhang, Z. Li, Z. Ji, Seismic Response Analysis of Concrete Gravity Dam under Near-Fault Velocity Pulse-Like Ground Motions, International Journal of Geomechanics, ASCE, 24(12) (2024).

[32] W.Su, X.C. Wang, Y.J. Xu, J.T. Wang, Seismic response of gravity dams suffering spectrum-matched ground motions with different pulse characteristics, Structures, 69 (2024).

[33] G. Wang, S.D. Yan, D.Q. Li, W. Du, Seismic performance assessment of high arch dams considering the pulse-like and directionality effects of near-fault ground motions, Engineering Structures, 321 (2024).

[34] A. Mahdian Khalil, B. Navayi Neya, Seismic analysis of concrete buttress dam considering intake tower and reservoir, Journal of Rehabilitation in Civil Enginneering, 13(1) (2025) 130-150.

[35] Abaqus version 4.-6.14, Abaqus user's manual, dassault systemes, simulia, (2014).

[36] M. Alembagheri, M. Seyedkazemi, Numerical Modeling of Concrete Gravity Dams by ABAQUS. Simaye Danesh Publications, (2013). (InPersian)

ACCEPTED MANUSCRIPT

[37] S. Kucukarslan, Time-domain dynamic analysis of dam-reservoir-foundation interaction including the reservoir bottom absorption, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 28(9) (2004) 963-98

ACCEPTED MANUSCRIPT

Analysis and investigation of the response of free-standing intake tower under the effect of seismic pulses with variable frequencies and accelerations

Ehsan teymouri[a], Saeed Abbasi[b2], Mohtasham Mohebbi[c]

[a] PhD grauated, University of Zanjan, Zanjan, Iran
[b] Associated Professor, University of Zanjan, Zanjan, Iran
[c] Professor, University of Mohaghagh ardabili, Adabil, Iran

ABSTRACT

The main purpose of this study was to examine how frequency and loading intensity affect the behavior of the intake tower, the peripheral reservoir, and the water inside the tower, and consequently their combined influence on the tower's overall response. To evaluate the tower's behavior more comprehensively, five different models were developed and analyzed, representing various conditions of the presence or absence of the peripheral reservoir and internal water. All 80 ABAQUS simulations were performed as linear simulations under different pulse-loading conditions with variable acceleration and frequency. The analyses consisted of two steps static and dynamic and the time-history method was applied. Modeling of the intake tower and its interaction with the surrounding reservoir and internal water was carried out using an Eulerian–Lagrangian approach. The results show that, for each model, increasing loading acceleration causes the structural responses to increase, while increasing loading frequency tends to decrease them. Adding the peripheral reservoir and internal water at all accelerations and loading frequencies increases the structural response and also lengthens the damping time of the intake tower. The influence of internal water and its height on the tower's response is strongly dependent on loading frequency. At some frequencies, a tower with semi-full internal water experiences more critical conditions than a tower that is fully filled. For a frequency of 1 Hz, adding water both inside the tower and in the surrounding reservoir at each stage increases the first and third principal stresses and the maximum displacement. For other loading frequencies, the effect of internal water differs from the 1 Hz case. When internal water is absent, increasing the surrounding-reservoir height produces response trends similar to those at 1 Hz. When internal water is added and the loading frequency exceeds 1 Hz, the influence of internal water on a tower with a half-full reservoir becomes greater than that on a tower with a full reservoir but either empty or fully filled internal water. Overall, the analyses show that adding the surrounding reservoir and internal water, and increasing their heights, always raises the maximum structural responses compared with a tower without surrounding or internal water, regardless of loading frequency. However, the effects of internal water and its elevation are strongly frequency-dependent and at higher frequencies further intensify the structural response. Therefore, to accurately evaluate intake towers, their behavior should be assessed across a range of internal-water levels and both low- and high-frequency excitations.

KEYWORDS

Intake tower, Seismic pulse, Water-Structure interaction, Frequency effects, Effects of water height.

[2] Corresponding Author: Email: Saeed.Abbasi@znu.ac.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT