

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه سوادکوه

دانشکده مهندسی عمران

تحلیل دینامیکی غیر خطی مادی و هندسی برج آبگیر با احتساب اندرکنش برج - آب - سد

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی عمران گرایش سازه های هیدرولیکی

سیاوش عبدالرحیمی

استاد راهنما

دکتر جواد مرادلو

مهر ۱۳۹۱

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

و

تمامی بانیان آزادی و آبادی ایران زمین

تقدیر و تشکر

وظیفه خود می دانم از پدر و مادرم که لذت و غرور دانستنم مرهون وجود ایشان است
سپاسگزاری کنم.

از زحمات و راهنمایی های بسیار ارزنده جناب آقای دکتر جواد مرادلو استاد راهنمای
ارجمند کمال تشکر را می نمایم.ایشان با صرف وقت زیاد و شکیبائی فراوان و روحیه
والای معلمی موثرترین عامل در انجام این پایان نامه می باشند.

از هیئت محترم داوری پایان نامه،آقایان دکتر سعید عباسی و دکتر جمال احمدی
برای بررسی پایان نامه و نقطه نظرات عالمانه شان نهایت امتنان را دارا می باشم.

چکیده

تحلیل سازه های طره ای مستغرق در آب مانند برج های آبگیر، پایه پل ها، شفت قائم سرریزهای نیلوفری و ... تحت تاثیر زلزله، ملزومات خاصی را طلب می کند که در مورد سازه های ساخته شده بر روی زمین و بدون تماس با آب با آنها سروکار نداریم.

برج های آبگیر در سدها از جمله سازه هائی هستند که عملکرد سازه ای و هیدرولیکی آنها بسیار پیچیده است. ساخت این نوع سازه ها در مناطق لرزه خیز تدابیر زیادی نیاز دارد. مشخصات دینامیکی یک سازه تحت لرزش که در تماس با آب است با مشخصات همان سازه در غیاب با آب متفاوت است. لرزش سازه باعث ایجاد فشارهای هیدرودینامیکی شده و از سوی دیگر وجود سیال نیز باعث میشود که رفتار سازه تغییر کند. بنابراین هر روشی که برای تحلیل این گونه سازه ها تحت تحریکات ناشی از زلزله مورد استفاده قرار میگیرد باید نیروی دینامیکی اضافی و هم چنین تغییر خصوصیات دینامیکی سازه ای در اثر وجود آب اطراف آنها را مد نظر قرار دهد.

پاسخ لرزه ای برج های آب گیر در سالهای اخیر به صورت گسترده ای مورد بررسی قرار گرفته است. مدل های معمول تنها فشار هیدرودینامیک ناشی از آب داخل و اطراف برج آبگیر را در نظر می گیرند و در اکثر مدل ها آب اطراف با عمق یکنواخت و طول بینهایت فرض می شود در نتیجه فشارهای ناشی از تغییر مکان برج آبگیر به تنهایی در نظر گرفته شده و اثرات سازه سد لحاظ نمی شود که بایستی اندرکنش آن نیز در نظر گرفته شود. برای یک سیستم واقعی، برج آبگیر در نزدیکی سد واقع شده است و فشار ناشی از سد بر روی رفتار دینامیکی برج آبگیر تاثیر می گذارد.

هدف اصلی این پژوهش بررسی رفتار لرزه ای غیر خطی توام مادی و هندسی برج آبگیر و هم چنین بررسی این مطلب است که پاسخ لرزه ای برج آبگیر چگونه با حضور سد تحت تاثیر قرار می گیرد.

در این پایان نامه با مدل سازی برج آبگیر، رفتار لرزه ای خطی و غیرخطی مادی و هندسی آن تحت اثر زلزله های طبرس، منجیل و امپریال بررسی شده است. مدل سازی المان محدود سه بعدی برج آبگیر-مخزن با کمک نرم افزار ABAQUS صورت گرفته است که کلیه اثرات اندرکنش هیدرودینامیکی برج-مخزن را شامل می شود. نتایج بدست آمده از تحلیل های لرزه ای غیرخطی نشان می دهند که پاسخ لرزه ای غیرخطی هندسی برج - مخزن با رفتار خطی آن یکسان است در صورتیکه پاسخ لرزه ای غیرخطی مادی برج - مخزن با رفتار خطی آن متفاوت است که این امر باید بطور جدی در روند طراحی ایمن این گونه سازه ها در نظر گرفته شود. هم چنین تاثیر حضور سد و تکیه گاه با مدلسازی شرط مرزی آنها مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان دهنده تاثیر آنها بر روی رفتار دینامیکی برج آبگیر می باشد. علاوه بر این، نوع تحریک لرزه ای در ایجاد نوع پاسخ، الگوی پخش فشار هیدرودینامیکی، توزیع تنش ها و پروفیل آسیب موثر است..

واژه های کلیدی: سازه های مستغرق، برج آبگیر، فشار هیدرودینامیکی، اندرکنش دینامیکی، غیر خطی مادی و هندسی

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

امروزه بهره برداری درست و کارآمد از منابع آب در هر کشور، می تواند سهم بسزایی در رشد و شکوفایی روزافزون اقتصادی، کشاورزی، شهری و غیره در آن کشور داشته باشد. ایران نیز با تکیه بر دانش فنی متخصصان خود، یکی از کشورهای پیشرو در به کارگیری منابع آبی از راه سدسازی شده است و امروزه در زمره ده کشور برتر جهان در این امر بشمار می آید. سازه های هیدرولیکی همانند: سدها، برجهای آبگیر، کانالهای انتقال و ... از جمله " سازه های حیاتی و ویژه " بشمار می روند که نه تنها در شرایط عادی و بهره برداری باید از ایمنی بالایی برخوردار باشند، بلکه در شرایط بحرانی همچون زلزله نیز باید از انهدام موضعی و کلی آنها جلوگیری شود.

پیامدهای سنگین جانی و مالی ناشی از انهدام سدهای بزرگ و سازه های مجاور آنها، می تواند ضایعات جبران ناپذیری ایجاد کند. از اینرو، متخصصان مجبور هستند تا چنین سازه هایی را بگونه ای طراحی کنند که در مقابل زلزله های قوی بدون هیچ گونه یا کمترین آسیبی مقاومت کنند. در روند طراحی، تحلیل یکی از عمده ترین بخشهاست که بایستی با دقت هرچه بیشتر انجام گیرد. اهمیت تحلیل در مناطق لرزه خیز بیشتر رخ می نماید زیرا زلزله عاملی بسیار مهم در پدید آوردن تنش در سازه است و تاثیر مهمی بر روند طراحی می گذارد. بنابراین تحلیل لرزه ای کامل سازه های هیدرولیکی مهمی چون سدها و برجهای آبگیر در مناطق لرزه خیز و دقت هرچه بیشتر در مدل سازی و محاسبات، اهمیت بیشتری می یابد.

تحت اثر شتاب زلزله، اندرکنش سیال-سازه نیروهای هیدرودینامیکی زیادی بر سازه اعمال می کند که باید در تحلیل لرزه ای، جهت هرچه دقیق تر کردن برآورد تنش ها در محاسبات لحاظ گردند. از سوی دیگر، عوامل گوناگونی بر اندرکنش سیال-سازه تاثیر می گذارند که بررسی هر یک از این عوامل بر حل بهتر خود مساله، از دیدگاه پژوهشی نیز حائز اهمیت است و می تواند منجر به بهبود روشهای کلی تحلیل لرزه ای گردد.

از اینرو، شناخت و بررسی رفتار لرزه ای محیط های همبسته سیال- سازه و اندرکنش میان آنها، به منظور دستیابی به فشارهای هیدرودینامیکی بوجود آمده ناشی از آن و نیز مدل سازی، تحلیل و طراحی دقیق و ایمن سازه های هیدرولیکی ضروری بنظر می رسد.

۱-۲- آشنایی با انواع سازه های هیدرولیکی بتنی

سازه های هیدرولیکی بتنی در این بخش شامل سازه های بتنی حجیم است که برای مقابله با فشارهای هیدرودینامیکی وارد بر سازه های ساحلی، منظم کردن طغیان ها یا تامین آب مورد نیاز برای مصارف بهداشتی، آشامیدنی و کشاورزی؛ طراحی می شوند. این سازه های بتنی حجیم شامل سدهای بتنی وزنی و قوسی، برجهای آبگیر، اسکله ها، دیوارهای حائل ساحلی، کانالهای هدایت مسیر U-شکل و W-شکل و دیواره های در ارتباط با آنهاست.

۱-۲-۱- سدهای بتنی وزنی

سدهای وزنی بتنی سازه های هیدرولیکی بتنی حجیمی هستند که در مقابل آب و نیروهای وارد به آن اساساً توسط وزن خود مقاومت می کنند. آنها بگونه ای طراحی می شوند که هر واحد از طول آنها بطور مستقل از واحدهای مجاور، پایدار است. اگرچه نمونه سدهای وزنی معمولاً مستقیم اند، ولی گاهی بدلیل سازگاری با شرایط توپوگرافی ساختگاه و ایجاد پایداری اضافی از راه کنش قوسی، در پلان قوس داده می شوند.

معمولاً برای تحلیل یک سد وزنی، مدل ریاضی بسیار ساده ای نیاز است. این روش بر اساس این مفهوم می باشد که مقاومت در برابر نیروهای خارجی در حقیقت دوبردی است و از اینرو تنها یک برش واحد از سد که از بالا دست به پائین دست برداشته می شود، برای تحلیل کافی است. نیروهای زلزله بعنوان نتیجه ای از ضریب زلزله بیان می شد و همانند یک نیروی استاتیکی رفتار می کرد و تنها اثرات حرکات افقی زمین که در جهت بالادست به پایین دست اعمال می شوند، در نظر گرفته می شد. اما به منظور نمایش و ارائه واقعی مکانیسم مقاومت، امروزه استاندارد برای بکارگیری برخی از مدل‌های المان محدود در تحلیل استاتیکی و دینامیکی پاسخ سدهای وزنی بتنی، بوجود آمده است. روش المان محدود نه تنها مکانیسم مقاومت را واقعی تر نشان می دهد بلکه ویژگیهای دینامیکی سیستم سد-آب-پی را بخوبی ویژگیهای حرکات زلزله به حساب می آورد. مقاومت ذاتی و سختی جانبی سدهای وزنی در جهت عمود بر جریان بسیار بالاست و معمولاً هیچ نگرانی درباره پاسخ لرزه ای آن در این راستا وجود ندارد. اما پاسخ دینامیکی یک سد وزنی به مولفه قائم حرکات زلزله می تواند مشابه با پاسخ بوجود آمده ناشی از مؤلفه افقی زلزله باشد و باید در تحلیل در نظر گرفته شود.

۱-۲-۲- سدهای بتنی قوسی

سد قوسی سازه هیدرولیکی بتنی است که در پلان و یا در ارتفاع بصورت منحنی است که سهم زیادی از فشار آب و دیگر بارهای وارده را از راه فشار به تکیه گاهها (کنش قوسی) و با بکارگیری مقاومت فشاری مصالح سازنده، منتقل می کند. سدهای قوسی بیشتر به دلیل رفتار سازه ای ناشی از مقاومت مصالح بجای وزن خالص سد، دارای صلاحیت سازه ای و ساخت اقتصادی هستند.

معمولاً سدهای قوسی بصورت نازک، متوسط-ضخیم و ضخیم دسته بندی می شوند. شکل آنها بتدریج از حالت قوسهای دایره ای افقی با ضخامت ثابت و وجه بالادستی صاف تا حالات سدهای دوقوسی نازک با شعاع متغیر و ضخامت متغیر با کنسول قابل توجه تغییر می کند.

پاسخ سد قوسی به تحریک زمین مشابه با پاسخ سد وزنی است بگونه ای که در هر دو نوع، تشدید پاسخ دینامیکی با توجه به رابطه فرکانس های سد و فرکانس های زلزله صورت می گیرد. اما، بدلیل شکل پیچیده سه بعدی سد قوسی، پاسخ آن باید با ملاحظه هر سه مؤلفه ورودیهای لرزه ای در نظر گرفته شود. ازاینرو مدل سه بعدی دقیقتری از سد و پی اطراف آن باید ساخته شود تا ویژگیهای ارتعاشی که پاسخ دینامیکی را تحت اثر شتابهای ورودی کنترل می کنند، محاسبه شوند. اثرات اینرسی و میرایی آب مخزن همانطوری که برای سد وزنی عمل می کنند؛ تاثیر بسیار مهمی بر ویژگیهای ارتعاشی و پاسخ سد قوسی دارند و بنابراین باید در مدل سازی ریاضی در نظر گرفته شوند.

۱-۲-۳- برجهای آبگیر

برجهای آبگیر، برای آبگیری از مخزن سدها طراحی و اجرا می شوند. آنها اغلب با دریچه هائی به منظور منظم کردن آب ورودی و یا کاهش سطح مخزن پس از یک زلزله قوی، طرح می شوند. گسیختگی و انهدام یک برج آبگیر طی یک زلزله، می تواند تسهیلات خدمات عمومی مهم را مختل ساخته و گاهی اوقات در انهدام سد نیز مشارکت می کند. از اینرو بسیار مهم است که برجهای آبگیر در مناطق فعال لرزه ای با بکارگیری روشهای تحلیلی منطقی که بر اساس درک عمیق و جامعی از رفتار دینامیکی سیستم برج-آب-پی قرار دارد، طراحی و ارزیابی شوند.

اغلب برجهای آبگیر سازه های خود ایستایی هستند که توسط آب محاط شده اند و پی گسترش یافته آنها در زیر مخزن و یا بطور جزئی بر روی سنگ بستر و یا خاک سخت فرو رفته اند. برخی از آنها درون سدهای خاکی مدفون شده اند و برخی دیگر بطور سازه ای به وجه بالادست سد متصل اند. حتی نوع دیگری از برجهای آبگیر وجود دارد که بر روی شیبهای سنگی متمایل اند و بطور جزئی در سنگ بستر نیز مدفون شده اند. برجهای آبگیر در سد Seven Oaks در کالیفرنیا شمالی و سد Cerrillos در پرتوریکو دو نمونه از برجهای شیبدار هستند که گروه مهندسين ارتش آمریکا آنها را طراحی کرده است. طراحی برج آبگیر سد Seven Oaks شامل مهار آن به شیروانی سنگی به منظور ایجاد مقاومت برای نیروهای لرزه ای کالیفرنیا شمالی نیز بوده است.

برجهای آبگیر گاهی تا ارتفاع زیادی توسط آب محاط می شوند و می توانند حاوی آب درونی نیز باشند. ازاینرو برجهای آبگیر تحت اثر اندرکنش آب-سازه قرار می گیرند که بطور مؤثری بر پاسخ لرزه ای آنها، اثر می گذارد. همچنین پاسخ برجهای آبگیر تحت اثر اندرکنش خاک-سازه (خاکریز، سنگ یا خاک پی) و شاید پل دسترسی، جرم تجهیزات داخلی و حتی پاسخ سد زمانی که برج به سدهای بتنی وصل است و یا در مجاورت آن می باشد نیز قرار گیرد. با توجه به پیچیدگی هندسه برج، مدلهایی با المان تیر و با جرمهای متمرکز و یا مدل سه بعدی المان محدود لازم اند تا ویژگیهای ارتعاشی و پاسخ دینامیکی آنها، بررسی شود.

در شکل (۱-۱) نمونه ای از برجهای آبیگر خود ایستا به همراه دریچه های آبیگری، اتاق کنترل و پل دسترسی نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- نمونه ای از برج آبیگر خود ایستا و پل دسترسی آن [۱].

۱-۲-۴- کانالهای هدایت مسیر U-شکل و W-شکل

کانالهای هدایت مسیر، سازه های هیدرولیکی بتنی حجیمی هستند که برای ایجاد مسیری قابل کشتیرانی در دوره های زمانی که جریان رودخانه ناکافی است؛ طراحی می شوند. قابهای U (تک خانه ای) یا قابهای W (دو خانه ای) شامل دیواره های بتنی مسلح هستند که همزمان با دال بتنی کف که بر روی دسته شمعهها قرار دارند، ساخته می شوند. در رودخانه های مهم قابل کشتیرانی، معمولاً این کانالها در تقاطع با سدهایی به همین منظور ساخته می شوند و می توانند مسیری به طول چند کیلومتر را پوشش دهند. آب در تمام طول رودخانه با دیواره های سازه های هدایت مسیر که می توانند به ارتفاع زیادی برسند، در تماس است و از اینرو آنها تحت اثر اندرکنش آب-سازه قرار دارند که می تواند در پاسخ آنها در برابر زلزله اثر داشته باشد.

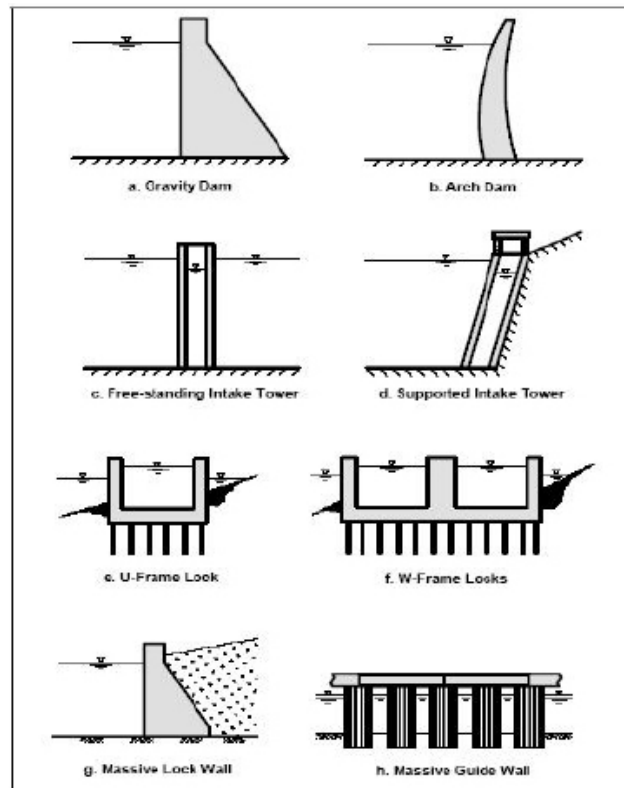
۱-۲-۵- دیواره های نگهدارنده بتنی حجیم

این سازه در مکانهایی که سنگ سخت و پایدار در دسترس باشد بر روی پی سنگی بنا می شود. این دیواره های وزنی معمولاً سطح مقطع نازکی دارند. از اینرو دیواره های رودخانه و کنار زمین بعنوان مقاطع وزنی جدا از هم در برابر بارهای وارده رفتار می کنند.

۱-۲-۶- دیواره های هدایت بتنی حجیم

دیواره های هدایت بتنی حجیم، شرایط کشتیرانی را در مناطق بالایی و پایینی سازه های نگهدارنده کنترل می کنند. هدف از این دیواره ها، هدایت رفت و آمد قایقها یا دیگر کشتیها به درون یا بیرون از لنگرگاه هاست. این دیواره ها یا بصورت میله های حفاری شده و یا دیواره های ثابت سلولی و یا دیواره هایی با پایه شناور طراحی می شوند. دیواره های هدایت ثابت، معمولاً شامل دیواره های بتنی درجایی هستند که بر روی دسته شمع هایی با سرشمع دایره ای نگهداشته شده اند. معمولاً بارهای وارده بر پی از طرف دیواره های ثابت بدلیل وجود مقدار زیاد بتن بر روی آنها، بالاست. بارهای لرزه ای بزرگ، بارهای زیاد ناشی از ضربه قایقها و بار مرده ناشی از وزن دیواره های ثابت، لازم می دارند که سرشمعها بر روی شمعهای فلزی که در پی سنگی مناسب فرورفته اند، ساخته شوند [۱].

سازه های هیدرولیکی بتنی که در بالا بدان اشاره شد، در شکل (۱-۲) نشان داده شده اند.



شکل ۱-۲. انواع سازه های هیدرولیکی بتنی [۱].

۱-۳- اهداف پایان نامه

با توجه به آنچه که در بخش قبلی بیان شد، اهمیت برجهای آبگیر که در اغلب پروژه های واقعی، سهم زیادی از بودجه را به خود و تاسیسات پایین دستی خود اختصاص می دهند، کمتر از سدهای مجاور آنها نیست. پس می توان آنها را نیز در زمره "سازه های حیاتی و ویژه" برشمرد که اثرات اندرکنش برج-آب و برج-سد در تعیین رفتار لرزه ای آنها اهمیت زیادی دارند. لذا بطور کلی، بررسی اثرات محیط اطراف برج آبگیر بر پاسخ و رفتار کلی آن تحت اثر بارهای دینامیکی لرزه ای ضروری می نماید.

با نگاهی به پژوهشهای انجام گرفته بر روی مساله اندرکنش برج آبگیر-مخزن-پی-خاک، دیده می شود که اغلب آنها به روش ساده شده "جرم افزوده هیدرودینامیکی"^۱ محدود شده اند که بر فرض رفتار صلب سازه، تراکم ناپذیری آب و رفتار خطی مصالح استوار است. از طرف دیگر بیشتر روابط بدست آمده در حوزه فرکانس ارائه شده اند که دیدگاه لرزه ای کاملی را نمی توان از آن برداشت کرد. هم چنین مدلهای معمول تنها فشار هیدرودینامیک ناشی از آب داخل و اطراف برج آبگیر را در نظر می گیرند و اثرات سازه سد لحاظ نمی شود که بایستی اندرکنش آن نیز در نظر گرفته شود. علاوه بر اینها، بدلیل عدم وجود امکانات پیشرفته رایانه ها و قدرت محاسباتی بالا در دهه های گذشته، مدل سازی یک بعدی بجای مدل سازی سه بعدی پیشنهاد شده بود.

اما امروزه با توجه به پیشرفت پرشتاب رایانه ها در دو دهه اخیر و گستردگی پدیده های محیطی مؤثر بر روی برجهای آبگیر و پیچیدگی ساخت مدلهای آزمایشگاهی و یا غیر اقتصادی بودن و گاهی غیر ممکن بودن انجام آزمایشهای در محل، مدل سازی عددی به عنوان ارزانتترین و مؤثرترین ابزار در ارزیابی رفتار این سازه ها تحت اثر زلزله محسوب می شود. لذا در این پایان نامه اهداف اصلی زیر مدنظر بوده است:

۱- سه محیط برج آبگیر، آب پیرامونی و درونی به روش المان محدود و با بکارگیری از نرم افزار ABAQUS با توجه به ویژگیهای مصالح، بطور مناسب و دقیق مدل سازی سه بعدی شود.

۲- با توجه به یکی از برجهای آبگیر ساخته شده در میهن عزیزمان ایران و مدل سازی آن بصورت سه بعدی و به روش المان محدود، رفتار لرزه ای خطی و غیر خطی آن شامل: تاریخچه زمانی تغییر مکان تاج برج و مقادیر حداکثر آن، حداکثر فشار هیدرودینامیکی و الگوی پخش آن، تنشهای اصلی حداکثر، پوش آنها، پروفیل آسیب کششی و فشاری تحت اثر زلزله های گوناگون مورد ارزیابی قرار گیرد.

۳- بررسی رفتار دینامیکی غیر خطی توام مادی و هندسی برج آبگیر در اثر زمین لرزه .

۴- بررسی این مطلب که پاسخ لرزه ای برج آبگیر چگونه با حضور سد تحت تاثیر قرار می گیرد.

¹ Hydrodynamic added mass

۱-۴- ساختار پایان نامه

این پایان نامه در هفت فصل گردآوری و ارائه شده است. سعی شده است تا ترتیب ارائه فصلها و بخشها بگونه ای باشد که مطالب هر قسمت براحتی نیاز خواننده را برای درک و فهم قسمت های بعدی ارضاء کند.

در فصل اول (فصل حاضر)، نخست به منظور آشنایی بیشتر، به معرفی برخی از انواع سازه های هیدرولیکی بتنی پرداخته و وظایف آنها بیان می شود. سپس اهداف این پایان نامه که همانا تعیین کننده مسیر انجام این پژوهش است، ارائه می شود.

در فصل دوم، به عنوان پیشینه پژوهشهای گذشته، کارهای پژوهشگران بر روی مساله اندرکنش برج آبگیر- مخزن- پی- خاک مورد مطالعه قرار گرفته و تمامی مفاهیم پایه ای و روابط بدست آمده توسط آنها ارائه شده است. همچنین در این فصل، روشهای ساده شده ای برای تحلیل و طراحی لرزه ای مقدماتی برج آبگیر آمده و اثرات ناشی از ساده سازی در رفتار کلی سازه ارزیابی شده است.

در فصل سوم، مدلسازی رفتار غیر خطی مادی بتن و مفهوم مکانیک آسیب تشریح شده است. هم چنین به معرفی نرم افزار بکار رفته برای تحلیل (نرم افزار ABAQUS) و انواع گزینه های مورد استفاده برای مدل سازی رفتار غیر خطی بتن پرداخته شده است.

در فصل چهارم، مدلسازی رفتار غیر خطی هندسی در سازه های بتنی تشریح شده است. در این فصل سینماتیک حرکت و معادلات حاکم بر مساله تغییر شکل های بزرگ معرفی شده است. هم چنین معیارهای تنش و کرنش در نرم افزار ABAQUS آورده شده است. در انتهای این فصل یک مثال نمونه برای صحت سنجی رفتار غیر خطی هندسی سازه های بتنی ارائه شده است.

در فصل پنجم، اندرکنش سیال-سازه، عوامل موثر بر اندرکنش سیال-سازه و مدل های ریاضی آن و نیز روشهای مدل سازی اندرکنش دینامیکی برای تحلیل سازه های هیدرولیکی برای ایجاد پایه نظری این پژوهش بیان شده اند. در انتهای این فصل یک مثال نمونه برای کنترل و صحت سنجی اندرکنش آب و سازه و هم چنین رفتار غیر خطی مادی بتن ارائه شده است.

در فصل ششم، با مدل سازی یکی از برج های آبگیر ساخته شده در ایران، پاسخ لرزه ای خطی و غیر خطی مادی و هندسی برج آبگیر تحت اثر ۳ رکورد زلزله طیس، منجیل و امپریال بررسی شده است. هم چنین تاثیر شرط مزی سد و تکیه گاه بر روی پاسخ لرزه ای برج آبگیر مورد ارزیابی قرار گرفته است. المانهای مورد استفاده برای مدل سازی تشریح شده است. در این فصل نیز، مشخصات زلزله های طیس، منجیل و امپریال به منظور انجام تحلیل لرزه ای آمده است و بطور مختصر به علل گزینش آنها اشاره شده است. نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان تاج برج و مقادیر حداکثر آن، حداکثر فشار هیدرودینامیکی و الگوی پخش آن، تنشهای اصلی حداکثر، پوش آنها، پروفیل آسیب کششی و فشاری در سازه برای حالات گوناگون رسم شده است.

در فصل هفتم نیز، ضمن جمع بندی مطالب عنوان شده در فصل های قبل، نتایج بدست آمده از این پژوهش به همراه پیشنهادهایی جهت ادامه مطالعات در آینده، ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر ادبیات موضوع و تاریخچه پژوهش

۲-۱- پژوهش های چوپرا و گوپال [۲] و [۳]

۲-۱-۱- مقدمه

تحلیل لرزه ای سازه های برجی کنسولی مانند برج های آبگیر، از پیچیدگی خاصی نسبت به سازه های معمولی بویژه زمانی که مسائل اندرکنش یک محیط (پی یا سیال) مجاور سازه مطرح باشد، برخوردار است. در تحلیل پاسخ لرزه ای چنین سازه هایی باید نیروهای اندرکنشی و ویژگیهای ارتعاشی ناشی از آب پیرامونی و داخلی در نظر گرفته شود. بنابراین، درست همانند سدهای وزنی بتنی، اثرات اندرکنش آب-سازه بایستی در گسترش روش های تحلیل برای برج های آبگیر، در نظر گرفته شوند. پیشرفتهایی که در تحلیل سدهای بتنی بدست آمده اند، می توانند در گسترش این روش ها بکار روند.

پژوهشهای پیشین بر روی تحلیل لرزه ای برج های آبگیر متقارن محوری (پلان دایره ای با تغییرات دلخواه شعاع در ارتفاع) منجر به اهمیت موارد زیر در طرح لرزه ای این سازه های ویژه شده است :

✓ روندی کلی برای تحلیل پاسخ خطی با در نظر گرفتن اثرات هیدرودینامیکی و چشمپوشی از اثرات اندرکنش برج-پی-خاک [۴] و [۵].

✓ درک درست از چگونگی تاثیرات آب پیرامونی در ویژگیهای ارتعاشی و پاسخ لرزه ای برج ها [۵] و [۶].

✓ تطابق نتایج تحلیل با داده های تجربی بدست آمده از آزمونهای ارتعاش اجباری در محل [۷] و

✓ روشی برای طراحی مقاوم لرزه ای برج های آبگیر [۸] و [۹] که گروه مهندسين ارتش آمریکا نیز این روش طراحی را در آئین نامه های خود گنجانده اند [۱۰].

بنابراین، بسیاری از کارهای موجود که با دقت زیادی اثرات اندرکنش برج-آب را در نظر می گیرند، به برج های با تقارن محوری

یعنی برج های با پلان دایره ای با تغییرات دلخواه شعاع در ارتفاع که بر روی سنگ پی صلب بنا می شوند، محدود شده است.

به منظور تحلیل پاسخ لرزه ای برج های آبدی با مقطع غیر دایره ای و ابعادی متغیر در ارتفاع، برج بایستی در سیستمی مجزا همانند روش المان محدود، مدل سازی شود. المانهای پوسته ای سه بعدی برای مدل سازی سازه منشوری توخالی که بطور جزئی در آب فرو رفته است؛ بکار برده می شوند [۱۱]. اما این ایده آل سازی بصورت غیرضروری پیچیده به نظر می رسد مگر آنکه انتظار رود سطح مقطع برج تمایل به تغییر شکلهای مهم درون صفحه ای دارد که البته این چنین تغییرشکلهایی عموماً در برج های بتنی مسلح گسترش نمی یابند. بنابراین، این چنین سازه ای بطور موثری می تواند بصورت مجموعه ای از المانهای تیر یک بعدی با تغییرشکلهای خمشی و برشی به همراه ممان اینرسی چرخشی، مدل سازی شود [۱۲]. تغییرشکلهای برشی برای تحلیل دقیق برج های کوتاه و چاق در نظر گرفته می شوند. گونه ساده تر این چنین روشی در تحلیل پاسخ دینامیکی دودکشیهای بلند کاربرد دارد [۱۳].

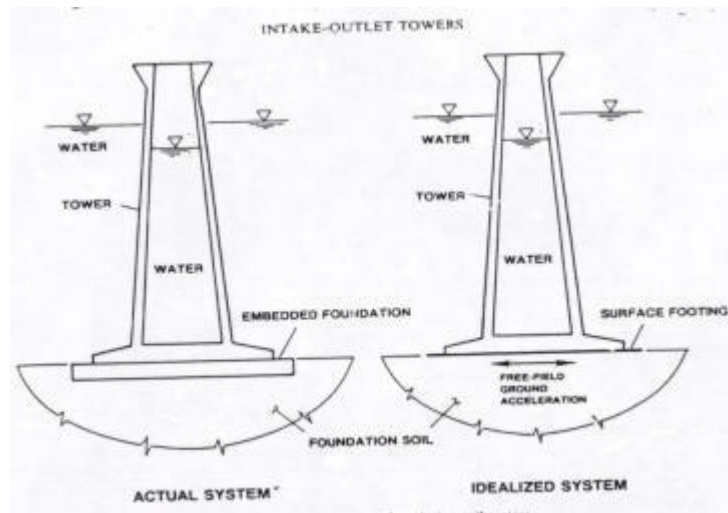
عبارات هیدرودینامیکی در معادلات المان محدود برای برج با حل مناسب مقادیر مرزی برای آب پیرامونی و داخلی، تعیین می شوند. به دلیل آنکه اثرات امواج سطحی و تراکم پذیری آب بر پاسخ دینامیکی برج ها ناچیز است [۶]، عبارات هیدرودینامیکی با حل معادله لاپلاس ساده شده بر روی حوزه سیال مدل سازی شده با شرایط مرزی مناسب، تعیین خواهد شد.

چوپرا و گوپال [۲] تکنیکی موثر و قابل اعتماد برای تحلیل لرزه ای پاسخ برج های آبدی با هندسه دلخواه ولی دارای دو محور تقارن با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش برج-آب و اندرکنش برج-پی-خاک ارائه کرده اند. ارائه این روش تحلیل به همراه نتایج تحلیل لرزه ای یک برج آبدی انتخابی، کارایی آن را در حل مسایل عملی بیان می کند.

۲-۱-۲- شرح مدل ها و حرکات زمین

سیستم در نظر گرفته شده متشکل از یک برج آبدی بتن مسلح تو خالی که به طور جزئی در آب فرو رفته است و بر پی صلبی روی سطح افقی خاک انعطاف پذیر نگه داشته می شود (شکل ۲-۱). آب پیرامونی بوسیله حوزه سیال با عمق ثابت که در جهت شعاعی تا بی نهایت گسترش یافته است، ایده آل سازی می شود. برج توخالی نیز به طور جزئی از آب پر شده است، برج با سطح مقطع دلخواه دارای دو محور تقارن است. این محدودیت اجازه می دهد که فشارهای هیدرودینامیکی ناشی از مولفه افقی حرکت زمین در صفحه تقارن، بر سطوح داخلی و خارجی برج بصورت نیروهای جانبی معادل و ممانهای خارجی پخش شده در ارتفاع که در سرتاسر این صفحات عمل می کند، نمایش داده شوند. سیستم با فرض رفتار خطی برای بتن برج، آب داخلی و پیرامونی و خاک پی، تحلیل شده است.

برج بصورت تیر تیموشنکو یک بعدی شامل اثرات اینرسی چرخشی و تغییر شکل‌های برشی مدل سازی می شود که شامل تغییر شکل‌های برشی برای ایجاد تحلیل دقیق برج های چاق می باشد. به دلیل آنکه اثرات امواج سطحی و تراکم پذیری آب بر پاسخ دینامیکی برج بر روی بازه گسترده ای از نسبت لاغری^۲ ناچیز است [۶] ، نیروهای هیدرو دینامیکی جانبی و ممانهای هیدرو دینامیکی خارجی، با حل معادله لاپلاس بر روی حوزه های سیال سه بعدی (پیرامونی و داخلی) با شرایط مرزی مناسب تعیین می شوند.



شکل ۲-۱. سیستم برج-آب-پی-خاک [۲]

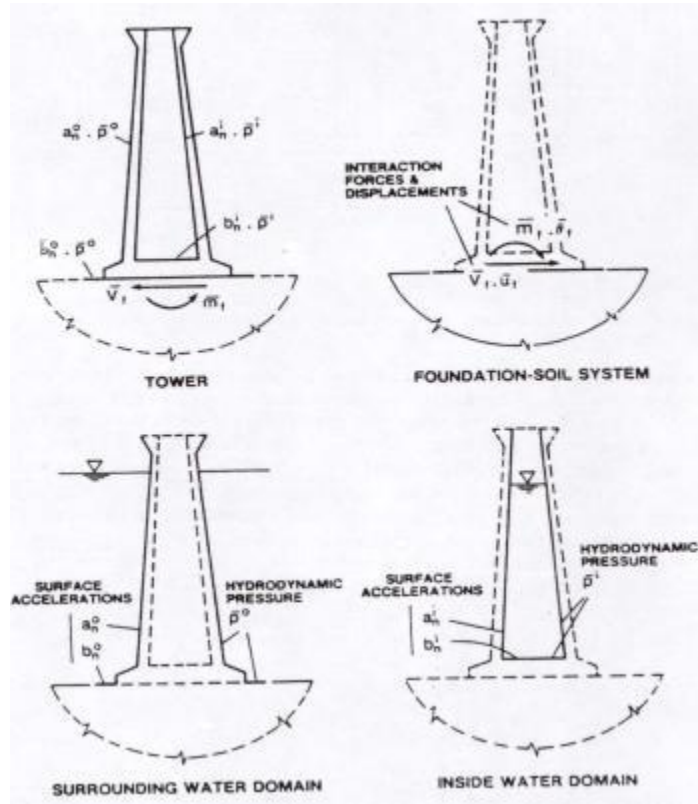
قسمتی از پی که روی سطح زمین قرار دارد، همانند قسمت صلبی از برج رفتار می کند و قسمت باقیمانده در زیر سطح زمین بصورت پی صلبی از فضای نیمه بی نهایت که بر روی سطحی از نیم فضای ویسکوالاستیک همگن نگه داشته می شود، ایده آل سازی می شود. فرض می شود که بین پی و خاک زیر آن چسبندگی کامل وجود دارد.

تحریک لرزه ای برای سیستم برج-آب-پی-خاک با دو مولفه افقی شتاب آزاد زمین تعریف می شود. فرض بر این است که مولفه عمودی حرکت زمین تاثیر کمی بر پاسخ برج دارد و بنابراین در این بررسی در نظر گرفته نشده است. حرکت زمین در همه نقاط پایه افقی برج یکسان فرض می شود. روند تحلیل برای یک مولفه افقی حرکت زمین در صفحه تقارن ارائه شده است. پاسخ دینامیکی برج برای هر مولفه افقی حرکت زمین می تواند بطور جداگانه ارزیابی شود و برای تعیین پاسخ کل برهم نهاده شوند.

² Slenderness ratio

۲-۱-۳- معادلات حوزه فرکانس

معادلات حرکت حاکم بر برج شامل اثرات اندرکنش برج-آب و اندرکنش برج-پی-خاک به راحتی با تبدیل فوریه در حوزه فرکانس نوشته می شود زیرا که توابع امیدانس برای پی قرار گرفته بر نیم فضا به فرکانس تحریک بستگی دارند. سیستم از چهار زیرسازه تشکیل یافته است: برج، پی و خاک نگه دارنده، حوزه آب پیرامونی و حوزه آب داخلی. (شکل ۲-۲).



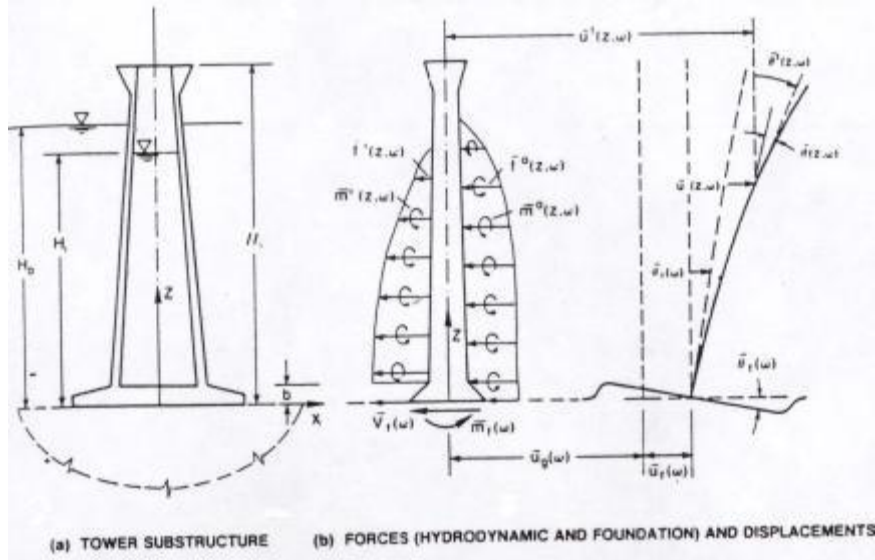
شکل ۲-۲. نمایش زیرسازه های برج-آب-پی-خاک [۲]

معادلات حاکم در حوزه فرکانس برای این زیرسازه ها در ادامه روند تحلیل کلی بر اساس " روش زیرسازه " در قسمت بعدی ارائه می شوند. معادلات حرکت برای ارتعاش درون صفحه ای برجی که بصورت " تیر تیموشنکو " ایده آل سازی شده و تحت شتاب هارمونیک (شکل ۲-۳) قرار گرفته است، در حوزه فرکانس بصورت دو معادله دیفرانسیل جزئی همبسته^۳ نوشته می شوند:

$$m_s(z)\ddot{u}^t(z, \omega) - (1 + i\eta_s) \frac{\partial}{\partial z} \left[G_s k(z) A(z) \left[\frac{\partial}{\partial z} \bar{u}(z, \omega) - \bar{\theta}(z, \omega) \right] \right] = -\bar{f}^o(z, \omega) - \bar{f}^i(z, \omega) \quad (۱-۲)$$

³ Coupled partial differential equation

$$I_s(z)\bar{\bar{\theta}}^t(z,\omega) - (1+\eta_s)\left[\frac{\partial}{\partial z}\left[E_s I(z)\frac{\partial}{\partial z}\bar{\theta}(z,\omega)\right] + G_s k(z)A(z)\left[\frac{\partial}{\partial z}\bar{u}(z,\omega) - \bar{\theta}(z,\omega)\right]\right] = -\bar{m}^o(z,\omega) - \bar{m}^i(z,\omega) \quad (2-2)$$



شکل ۲-۳. ایده آل سازی یک بعدی (سمت چپ) و نیروهای اندرکنش و تغییر مکانهای برج (سمت راست) [۲].

که در آن $I_s(z)$ و $m_s(z)$ بترتیب جرم و ممان اینرسی چرخشی در ارتفاع واحد برج، η_s ضریب میرایی هیسترتیک ثابت و $E_s I(z)$ و $G_s k(z)A(z)$ ، سختی سطح مقطع برج بترتیب در برش و خمش خالص برای ارتفاع Z بالاتر از پی است. در این معادلات، $\bar{u}(z,\omega)$ ، تابع پاسخ فرکانسی مختلط برای تغییر مکان جانبی ناشی از تغییرشکل‌های خمشی و برشی برج و $\bar{\theta}(z,\omega)$ تابعی مشابه برای شیب خمشی محور برج و $\bar{\bar{u}}^t(z,\omega)$ و $\bar{\bar{\theta}}^t(z,\omega)$ توابع پاسخ به ترتیب برای شتابهای جابجایی کلی (تغییر شکل خمشی به همراه انتقال و چرخش پی) و چرخش کلی هستند. در معادله (۲-۱)؛ $\bar{f}^o(z,\omega)$ و $\bar{m}^o(z,\omega)$ توابع پاسخ برای نیروهای جانبی معادل و ممانهای خارجی وارد بر سرتاسر ارتفاع برج در صفحه ارتعاش ناشی از فشارهای هیدرودینامیکی در سطح بیرونی و $\bar{f}^i(z,\omega)$ و $\bar{m}^i(z,\omega)$ توابع متناظر ناشی از فشارهای هیدرودینامیکی در سطح درونی هستند. توابع پاسخ برای ممانهای هیدرودینامیکی خارجی $\bar{m}^o(z,\omega)$ و $\bar{m}^i(z,\omega)$ ، فقط برای برج‌های غیریکنواخت، غیر صفراند.

علاوه بر معادلات (۲-۱) و (۲-۲)، تعادل کلی نیروهای افقی به معادله زیر منجر می‌شود:

$$\int_0^{H_s} [m_s(z)\bar{\bar{u}}^t(z,\omega) + \bar{f}^o(z,\omega) + \bar{f}^i(z,\omega)] dz + \bar{V}_f(\omega) = 0 \quad (3-2)$$

به طور مشابه، تعادل کلی ممانها حول پایه برج، معادله زیر را نتیجه می دهد:

(۴-۲)

$$\int_0^{H_s} z[m_s(z)\bar{u}^t(z, \omega) + \bar{f}^o(z, \omega) + \bar{f}^i(z, \omega)]dz + \int_0^{H_s} [I_s(z)\bar{\theta}^t(z, \omega) + \bar{m}^o(z, \omega) + \bar{m}^i(z, \omega)]dz + \bar{m}_f(\omega) = 0$$

در این معادلات تعادل، $\bar{V}_f(\omega)$ و $\bar{m}_f(\omega)$ ، به ترتیب توابع پاسخ برای نیروی برشی و ممان خمشی در پایه برج هستند و H_s ارتفاع برج است. با فرض تغییرمکانها و چرخشهای کوچک، توابع پاسخ فرکانسی^۴ برای شتابهای جانبی و چرخشی کلی در ارتفاع می توانند به شکل زیر بیان شوند:

$$\bar{u}^t(z, \omega) = 1 - \omega^2 \bar{u}(z, \omega) - \omega^2 \bar{u}_f(\omega) - \omega^2 z \bar{\theta}_f(\omega) \quad (۵-۲)$$

$$\bar{\theta}^t(z, \omega) = -\omega^2 \bar{\theta}(z, \omega) - \omega^2 \bar{\theta}_f(\omega) \quad (۶-۲)$$

که $\bar{u}_f(\omega)$ و $\bar{\theta}_f(\omega)$ توابع پاسخ فرکانسی مختلط بترتیب برای تغییرمکان جانبی و چرخشی پی نسبت به حرکت آزاد زمین هستند. فرکاس های طبیعی و اشکال مودی برج بدون آب بر روی پایه ثابت، با حل مساله مقادیر ویژه مربوط به معادله (۱-۲) بدست می آیند [۲]. شکل مود nام بطور کامل با دو تابع $\Phi_n(z)$ و $\Psi_n(z)$ که تغییرمکانهای جانبی و چرخش محور برج را توصیف می کنند؛ توصیف می شود [۲]. روند حل عددی برای ارزیابی این توابع با حل مساله مقادیر ویژه مربوط در مرجع [۳] ارائه شده است. تغییر مکانهای جانبی و چرخش برج، $\bar{u}(z, \omega)$ و $\bar{\theta}(z, \omega)$ می توانند بصورت ترکیب خطی مودهای ارتعاشی طبیعی با پایه ثابت، بیان شوند:

$$\bar{u}(z, \omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(z) \bar{Y}_n(\omega) \quad (۷-۲)$$

$$\bar{\theta}(z, \omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \Psi_n(z) \bar{Y}_n(\omega) \quad (۸-۲)$$

که $\bar{Y}_n(\omega)$ تابع پاسخ فرکانسی برای مختصات مودال تعمیم یافته مربوط به مود ارتعاشی nام است.

معادلات حرکت برج با جایگزینی معادلات (۵-۲) و (۶-۲) و (۷-۲) و (۸-۲) در معادله (۱-۲) و با بکارگیری اصل کار مجازی و تعامد مودهای طبیعی به مختصات مودال تبدیل می شود. بطور مشابه، معادلات تعادل کلی برای نیروهای افقی و ممانها، با جایگزینی معادلات (۵-۲) و (۶-۲) و (۷-۲) و (۸-۲) در معادلات (۳-۲) و (۴-۲) با بکارگیری ویژگی تعامد مودهای طبیعی به مختصات مودال تبدیل می شوند. این امر منجر می شود به:

⁴ Frequency response function

$$M_n[-\omega^2 + (1 + i\eta_s)\omega_n^2]\bar{Y}_n(\omega) - \omega^2 L_n^h \bar{u}_f(\omega) - \omega^2 L_n^r \bar{\theta}_f(\omega) = -L_n - \bar{l}_n^o(\omega) - \bar{l}_n^i(\omega) \quad (9-2)$$

$$-\omega^2 \sum_{n=1}^{\infty} L_n^h \bar{Y}_n(\omega) - \omega^2 m_t \bar{u}_f(\omega) - \omega^2 L_o^r \bar{\theta}_f(\omega) = -m_t - \bar{l}_h^o(\omega) - \bar{l}_h^i(\omega) - \bar{V}_f(\omega) \quad (10-2)$$

$$-\omega^2 \sum_{n=1}^{\infty} L_n^r \bar{Y}_n(\omega) - \omega^2 L_o^r \bar{u}_f(\omega) - \omega^2 I_t \bar{\theta}_f(\omega) = -L_o^r - \bar{l}_r^o(\omega) - \bar{l}_r^i(\omega) - \bar{m}_f(\omega) \quad (11-2)$$

که در آن ω_n نشان فرکانس طبیعی مود ارتعاشی \mathbf{n} ام برج با پایه ثابت و بدون آب است. جرم تعمیم یافته M_n ، جمله تحریک تعمیم یافته L_n و جملات تحریک تعمیم یافته L_n^r, L_n^h بترتیب مربوط به جابجایی و چرخش پی، از معادلات زیر بدست می آیند:

$$M_n = \int_0^{H_s} m_s(z) [\Phi_n(z)]^2 dz + \int_0^{H_s} I_s(z) [\Psi_n(z)]^2 dz \quad (12-2)$$

$$L_n = L_n^h = \int_0^{H_s} m_s(z) \Phi_n(z) dz \quad (13-2)$$

$$L_n^r = \int_0^{H_s} z m_s(z) \Phi_n(z) dz + \int_0^{H_s} I_s(z) \Psi_n(z) dz \quad (14-2)$$

بطور مشابه، جرم کل برج، m_t ، برابر است با:

$$m_t = \int_0^{H_s} m_s(z) dz \quad (15-2)$$

و ممان اینرسی جرمی کل برج حول پایه، I_t ، برابر است با:

$$I_t = \int_0^{H_s} z^2 m_s(z) dz + \int_0^{H_s} I_s(z) dz \quad (16-2)$$

و جرمی که میان حرکت جانبی و چرخشی پی همبستگی ایجاد می کند، بصورت زیر ارائه می شود:

$$L_o^r = \int_0^{H_s} z m_s(z) dz \quad (17-2)$$

برای برج صلبی که بر روی خاک شکل پذیر بوسیله پی صلبی نگه داشته می شود؛ L_o^r, I_t, m_t می توانند به عنوان جملات جرم

تعمیم یافته برای حرکات جانبی و چرخشی پی تفسیر شوند.

جملات هیدرودینامیکی در معادلات (9-2)، (10-2) و (11-2) از معادلات زیر به دست می آیند:

$$\bar{l}_n^\alpha = \int_0^{H_\alpha} \Phi_n(z) \bar{f}^\alpha(z, \omega) dz + \int_0^{H_\alpha} \Psi_n(z) \bar{m}^\alpha(z, \omega) dz \quad \alpha = o, i \quad (18-2)$$

$$\bar{l}_h^\alpha(\omega) = \int_0^{H_\alpha} \bar{f}^\alpha(z, \omega) dz \quad \alpha = o, i \quad (19-2)$$

$$\bar{l}_r^\alpha(\omega) = \int_0^{H_\alpha} z \bar{f}^\alpha(z, \omega) dz + \int_0^{H_\alpha} \bar{m}^\alpha(z, \omega) dz \quad \alpha = o, i \quad (20-2)$$

که در آن $\alpha = o, i$ بترتیب برای تعریف جملات آب پیرامونی و داخلی بکار رفته اند و $(\alpha = 0, H_\alpha)H_o$ و $(\alpha = i, H_\alpha)H_i$ ، عمق آب پیرامونی و داخلی است.

توابع پاسخ فرکانسی $\bar{f}^o(z, \omega)$ و $\bar{m}^o(z, \omega)$ نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از فشار آب بر سطح بیرونی برج، بعداً با تحلیل زیر سازه حوزه آب پیرامونی بر حسب شتاب های مختصات مودال $\bar{Y}_n(\omega)$ ، تغییر مکانهای جانبی $\bar{u}_f(\omega)$ و چرخش $\bar{\theta}_f(\omega)$ مربوط به پی، بیان خواهد شد. به طور مشابه، این توابع یعنی $\bar{f}^i(z, \omega)$ و $\bar{m}^i(z, \omega)$ برای آب داخلی نیز بر حسب $\bar{Y}_n(\omega)$ ، $\bar{u}_f(\omega)$ ، $\bar{\theta}_f(\omega)$ با تحلیل حوزه آب داخلی بیان می شوند. همچنین توابع پاسخ برای نیروهای اندرکنش برج-پی-خاک، $\bar{V}_f(\omega)$ و $\bar{m}_f(\omega)$ ، بر حسب توابع پاسخ برای تغییر مکانهای اندرکنشی $\bar{u}_f(\omega)$ و چرخش $\bar{\theta}_f(\omega)$ با تحلیل پی بر روی نیم فضای ویسکوالاستیک، بیان خواهد شد.

آشکار است که بزرگی L_n^r, L_n^h, L_n با شماره مود ارتعاشی n کاهش می یابد که دلالت بر کاهش مودهای بالاتر در پاسخ برج تحت اثر حرکت افقی زمین دارد. در نتیجه، تنها N مود اول برج لازم است که در پاسخ دینامیکی آن در نظر گرفته شوند. از اینرو، در آنچه که در ادامه می آید، معادلات (۹-۲) تا (۱۱-۲) فقط شامل $n=1, 2, \dots, N$ است و تنها N جمله در مجموع بی بنهایت این معادلات در نظر گرفته شده است. برای یک فرکانس تحریک مشخص (ω) معادلات (۹-۲) تا (۱۱-۲) به تعداد $N+2$ معادله جبری مختلط همزمان با مجهولات $\bar{Y}_n(\omega)$ با $n=1, 2, \dots, N$ ، $\bar{u}_f(\omega)$ و $\bar{\theta}_f(\omega)$ ارائه می دهد.

۲-۱-۴- زیر سازه پی-خاک

معادلات حاکم برای پی صلبی که تحت اثر حرکت آزاد زمین $\ddot{u}_g(t) = e^{i\omega t}$ و نیروهای اندرکنشی هارمونیکی $m_f(t) = \bar{m}_f(\omega)e^{i\omega t}$ و $V_f(t) = V_f(\omega)e^{i\omega t}$ (شکل ۴-۲) قرار می گیرد، عبارتند از :

$$-\omega^2 m_f \bar{u}_u(\omega) + K_{VV}(\omega) \bar{u}_f(\omega) + K_{VM}(\omega) \bar{\theta}_f(\omega) = -m_f + \bar{V}_f(\omega) \quad (21-2)$$

$$-\omega^2 I_f \bar{\theta}_f(\omega) + K_{MV}(\omega) \bar{u}_f(\omega) + K_{MM}(\omega) \bar{\theta}_f(\omega) = \bar{m}_f(\omega) \quad (22-2)$$