دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد زلزله

عنوان

تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی در محدوده فرکانس بادرنظرگرفتن المان نیمه بینهایت سیال بهینه

نگارش:

مریم حجتی

استاد راهنما:

دکتر وحید لطفی

پاییز ۱۳۸۷

بسمه تعالی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی عمران

توجه: این قسمت در زمان تصویب پروژه تکمیل شده و در صفحه اول کلیه نسخ پایان‌نامه گنجانده می‌شود.

عنوان، اهداف و روش تحقیق این پروژه کارشناسی ارشد مطابق با مشخصات زیر در تاریخ ۱۳۸۶/۳/۲۱ شورای تحصیلات تکمیلی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر به تصویب رسید.

عنوان پروژه:

تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی در محدوده فرکانس بادرنظرگرفتن المان نیمه بینهایت سیال بهینه

اهداف و روش تحقیق: در تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی، معمولاً از المان نیمه بینهایت سیال، برای مدل کردن قسمت نامحدود مخزن استفاده می‌شود روشی که معمولاً برای محاسبه ماتریس امپدانس المان نیمه بینهایت سیال دو بعدی استفاده می‌شود، منجر به حل مسئله مقادیر ویژه مختلط به ازای هر فرکانس گردیده که زمان قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد. این پایان نامه به پیشنهاد یک روش بهینه اختصاص یافته و با ساده سازی روند ذکر شده در تحلیل المان نیمه بینهایت سیال دو بعدی، به طرز چشمگیری، زمان محاسبات کاهش می‌یابد. به همین منظور یک برنامه کامپیوتری نوشته شده و دقت این روش برای تمام حالات بررسی گردیده است. در انتها نیز صحت نتایج حاصله برای سد Pine Flat، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

نام و امضای دانشجو	**نام و امضای استاد راهنما**	**امضای مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده**
مریم حجتی	دکتر وحید لطفی	

توجه: این قسمت در زمان ارائه پروژه تکمیل شده و همراه با قسمت فوق در صفحه اول پایان‌نامه گنجانده می‌شود.

اینجانب دکتر وحید لطفی استاد راهنمای پروژه گواهی می‌نمایم که کلیه قسمتهای مندرج در این پایان‌نامه توسط دانشجو، آقای/خانم مریم حجتی به انجام رسیده و محتوای آن مطابق با عنوان، اهداف و روش تحقیق فوق می‌باشد.

امضای استاد راهنما:

تاریخ: ۱۳۸۷/۸/۱

اعضاء هیات داوران پس از بررسی کامل کار انجام شده از نظر کیفی، نوآوری، احاطه به موضوع و نحوه ارائه، رای نهایی خود را بدین صورت اعلام می‌نمایند:

نام استاد راهنما: دکتر لطفی	**نام داور:** دکتر خوشنودیان	**نام داور:** دکتر قائمیان
امضاء:	**امضاء:**	**امضاء:**

توجه: اعضاء محترم هیات داوران می‌توانند نظرات تکمیلی خود را در پشت همین برگه مرقوم فرمایند.

آموختن روند دشواری است که قدم برداشتن در آن بی راهنما ممکن نیست. قدردانی صمیمانه از اساتید محترم به ویژه جناب آقای دکتر لطفی استاد راهنمای محترم، ادای دین کوچکی است برای همراهیهای صادقانه و صبورانه ایشان.

تقدیم به:

اسوه های ایثار و تلاش

قلبهای صادق و مهربان

دستهای پاک و زحمتکش

به انسانهای برگزیده

پدر و مادر عزیزم

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

چکیده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان : تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی در محدوده فرکانس بادرنظرگرفتن المان نیمه بینهایت سیال بهینه

ارائه شده توسط مریم حجتی **شماره دانشجویی** ۸۵۱۲۴۰۱۴ **گرایش** زلزله

استاد راهنما : دکتر وحید لطفی

تاریخ تحویل : ۱۳۸۷/۸/۱

پاسخ سدهای بتنی به طور قابل ملاحظه ای تحت تاثیر اثرات اندرکنش با محیط اطراف خود می‌باشد. روش‌های متنوعی برای تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وجود دارد. با فرض صلب بودن پی، معمولاً تحلیل سیستم سد و مخزن در محدوده فرکانس، بر اساس روش المان محدود - المان نیمه بینهایت (*Finite Element-Hyper Element*) انجام می‌شود. در این روش، سد با کمک المان‌های جامد محدود جزءبندی شده و مخزن به دو بخش مجزا ی نزدیک و دور تقسیم می‌شود. بخش نزدیک مخزن، ناحیه ای محدود از آب مخزن، که در مجاورت سد است، معمولاً شکل نامنظمی‌داشته و با کمک المان‌های محدود سیال تقسیم بندی می‌شود. در عین حال ناحیه دور مخزن برای مدل کردن طول نیمه بینهایت مخزن به کار می‌رود. معادلات حاکم بر سیستم در محدوده فرکانس، به روش مستقیم یا زیر سازه حل می‌گردند. با انتخاب هر یک از روش‌های نامبرده، مشاهده می‌شود سهم عمده از زمان سپری شده در محاسبات عددی، ناشی از حل مساله مقادیر ویژه مختط مرتبط با المان نیمه بینهایت سیال است. جهت محاسبه ماتریس امپدانس مربوط به المان نیمه بینهایت سیال، باید این مساله مقادیر ویژه مختلط به ازای هر فرکانس حل گردد.

این مطالعه به معرفی یک روند بهینه جهت محاسبه ماتریس امپدانس مربوط به المان نیمه بینهایت سیال دو بعدی می‌پردازد. با بکارگیری این روند، به طرز چشمگیری، زمان لازم جهت محاسبات کاهش می‌یابد. در این روش نیاز به حل مساله مقادیر ویژه به ازای همه فرکانس‌ها نمی‌باشد، تنها به ازای یک فرکانس مساله مقادیر ویژه حل شده و بدین ترتیب مدت زمان تحلیل کاهش می‌یابد. دقت این روش برای تمام حالات امتحان شده، و به صورت قابل توجه ای، تحت همه شرایط عملی، به جواب قابل قبول دست یافته است. در این پایان نامه، ابتدا روند معمول، برای محاسبه معادلات مربوط به سیستم، بر اساس روش المان محدود- المان نیمه بینهایت ارائه شده و پیش زمینه اولیه جهت محاسبه ماتریس امپدانس المان نیمه بینهایت سیال دو بعدی، شرح داده می‌شود. در ادامه روند بهینه معرفی و فرمولاسیون مربوط به آن ارائه خواهد شد، سپس با بهره گیری از برنامه کامپیوتری که بر اساس این روش ارتقاء یافته، پاسخ سد مثلثی وزنی برای شرایط گوناگون را بدست آورده و در انتها صحت نتایج حاصله برای سد *Pine Flat* که در آمریکا واقع شده، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی : تحلیل دینامیکی، سدبتنی وزنی،محدوده فرکانس،المان نیمه بینهایت سیال بهینه

فهرست

۱-پیشگفتار ۱

۱-۱-مقدمه ۱
۱-۲-مرور کارهای گذشتگان ۲
۱-۲-۱-بررسی‌های تجربی اولیه ۲
۱-۲-۲-بررسی رفتار سد در اندر کنش با مخزن و پی ۳
۱-۲-۳-بررسی اثر رسوبات کف مخزن بر پاسخ دینامیکی سد ۷
۱-۲-۴-روش‌های حل معادلات بدست آمده ۸
۱-۲-۵-بهینه سازی ماتریس‌های امپدانس مخزن نیمه بینهایت و پی ۹
۱-۳-مطالب ارائه شده در این پایان نامه ۹

۲-تحلیل سیستم سد بتنی با مخزن محدود در محدوده فرکانس ۱۱

۲-۱-مقدمه ۱۱
۲-۲-مدلسازی اجزاء محدود و معادلات حاکم بر سد ۱۲
۲-۳-معادلات حاکم بر مخزن ۱۳
۲-۳-۱-حل تحلیلی معادلات حاکم بر مخزن ۱۴
۲-۳-۲-حل عددی معادلات حاکم بر مخزن به روش اجزا محدود ۱۶
۲-۴-ترکیب معادلات سد و مخزن محدود ۲۱
۲-۴-۱-تکنیک شبه متقارن ۲۳
۲-۵-تحلیل در حوزه فرکانس و تبدیلات فوریه ۲۵

۳-تحلیل سیستم سد بتنی با مخزن نامحدود در محدوده فرکانس ۲۷

۳-۱-مقدمه ۲۷
۳-۲-مدل سازی سد با مخزن نا محدود ۲۸
۳-۳-المان نیمه بینهایت سیال ۲۸
۳-۴-المان نیمه بینهایت بهینه سیال ۳۶
۳-۵-المان نیمه بینهایت بهینه اصلاح شده ۴۱
۳-۶-ترکیب معادلات سد و مخزن نامحدود ۴۶

۴-مدل‌های تحلیل شده و ارائه نتایج ۴۷

۴-۱-مقدمه ۴۷
۴-۲-مدل‌های تحلیل شده و پارامترهای اصلی ۴۸

۴-۲-۱-مدل‌های تحلیل شده ۴۸
۴-۲-۲-پارامترهای اصلی ۵۷
۴-۲-۳-مشخصات نمودارهای رسم شده ۵۷
۴-۳-تحلیل سیستم و ارائه نتایج ۵۸
۴-۳-۱-بررسی تاثیر شکل مخزن در نیروهای وارده برای سیال تراکم ناپذیر ۵۸
۴-۳-۲-بررسی دقت کاربرد شرط مرزی سامرفیلد ۶۲
۴-۳-۳-بررسی دقت کاربرد روش المان نیمه بینهایت بهینه ۷۷
۴-۳-۴-بررسی دقت کاربرد روش المان نیمه بینهایت بهینه اصلاح شده ۸۸
۵-آنالیز دینامیکی سد *PINE FLAT* ۹۹
۵-۱-مقدمه ۹۹
۵-۲-مشخصات هندسی، مصالح و فرضیات در نظر گرفته شده برای سد *PINE FLAT* ۱۰۰
۵-۳-مدل اجزا محدود ۱۰۲
۵-۴-بارگذاری ۱۰۳
۵-۴-۱-شتاب زلزله اعمال شده ۱۰۳
۵-۵-تحلیل دینامیکی سد بتنی *PINE FLAT* در محدوده فرکانس ۱۰۵
۵-۶-انتقال نتایج تحلیل دینامیکی سد بتنی *PINE FLAT* به محدوده زمان ۱۰۸
۵-۶-۱-نتایج تحلیل استاتیکی ۱۰۸
۵-۶-۲-تحلیل مستقیم سد با مخزن خالی ۱۱۲
۵-۶-۳-تحلیل مستقیم سد با مخزن پر ۱۱۵
۵-۷-بررسی صحت نتایج ۱۲۱
۶-نتیجه گیری ۱۲۵
۶-۱-مقدمه ۱۲۵
۶-۲-بررسی دقت کاربرد شرط مرزی سامرفیلد ۱۲۶
۶-۳-بررسی دقت استفاده از المان نیمه بینهایت بهینه ۱۲۶
۶-۴-بررسی دقت استفاده از المان نیمه بینهایت بهینه اصلاح شده ۱۲۷
۷-مراجع ۱۲۹

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱- مقدمه

سرزمین پهناور ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه خشک قرار گرفته و توزیع ناموزون جریان‌های سطحی، محدودیت عمده‌ای را در امر استفاده بهینه از آب به وجود آورده است. به علاوه، قسمت اعظم این جریان‌ها، هنوز مهار نشده اند.
از آنجایی که تامین آب همواره نیاز اساسی بشر برای استفاده‌های کشاورزی، صنعتی و آب شرب شهرها بوده است، لذا مهار سیلاب‌ها و آب جاری از طریق احداث سد، از کارهای اساسی و زیربنایی محسوب می‌شود.
این نیاز از دیرباز در کشورمان مورد توجه بوده و آثار بی شماری از سدهای قدیمی با قدمت چند هزار ساله در گوشه و کنار این سرزمین، گواه بارزی بر این مدعا هستند. آثاری که در این باره به دست آمده است، نشان می‌دهد که نیاکان ما از قرن‌ها پیش با دانش و فن سد سازی، آشنایی کامل داشته اند. سد کریت طبس قدیمی ترین سد قوسی جهان به ارتفاع ۶۰ متر، حدود ۶۵۰ سال پیش با استفاده از مصالح بنایی احداث گردید و تا اوایل قرن بیستم، بلندترین سد قوسی جهان بود.

سدها از جمله سازه‌هایی هستند که باید در تحلیل، طراحی و ساخت آن‌ها دقت مضاعفی جهت ایمن بودن هر چه بیشتر طرح به کار برده شود. از سوی دیگر، با توجه به حجم عملیات این گونه سازه‌ها، چنانچه فقط ایمنی مد نظر قرار گیرد، طرح غیر اقتصادی و در مواردی غیر عملی خواهد شد. بنابراین به منظور تامین هر دو مسئله ایمنی و اقتصاد به طور همزمان باید مبادرت به انتخاب مدل هرچه دقیق تر برای تحلیل و طراحی کرد.

یکی از مهم ترین مسائلی که در پیش بینی رفتار دقیق سدها با آن مواجه هستیم، مسئله اندرکنش سد با آب مخزن می‌باشد. از آن‌جایی که سدهای زیادی در مناطق با زلزله خیزی بالا ساخته شده است این مسئله اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

بخش اول این فصل به مرور مختصر کارهای گذشتگان و برخی مطالعات انجام شده اختصاص یافته است. در بخش دوم سر فصل مطالب مربوط به این پایان نامه تشریح می‌گردد.

۱-۲- مرور کارهای گذشتگان

همان طور که گفته شد نیاز به احداث سد از دیرباز وجود داشته، در این بخش به توضیح مختصر روند تکاملی نظریه و تئوری‌های گوناگون ارائه شده در رابطه با تحلیل دینامیکی سدهای بتنی می‌پردازیم.

۱-۲-۱-بررسی‌های تجربی اولیه

در محاسبات سنتی سدهای بتنی اثر بار دینامیکی زلزله به صورت نیروی افقی و درصدی از وزن سد به طور یکنواخت در ارتفاع سد در نظر گرفته می‌شد. در عین حال علاوه بر نیروی هیدرواستاتیکی آب به دیواره سد، نیروی دیگری به شکل $P_{hyd} = C\alpha\gamma_w H$ که در آن H ارتفاع مخزن، γ_w وزن مخصوص آب، α ضریب زلزله (عددی بین ۵٪ تا ۱۵٪) و C ضریب هیدرودینامیکی مخزن است که توسط وسترگارد (*Westergaard*) مقدار آن روی سطح آب صفر و در عمق آب ۷٪ پیشنهاد شده است، در محاسبات وارد می‌شد.

تخمین فشار هیدرودینامیکی وارد بر دیواره سد، اولین بار طی یک روش تحلیلی در دامنه فرکانس در سال ۱۹۳۳ توسط وسترگارد (*Westergaard*) بر اساس روش جرم افزوده صورت گرفت[۱].

با این وجود جرم افزوده بر مبنای مشاهدات فردی به نام دوبوات است. او در قرن نوزدهم می‌زیست و در طی انجام آزمایشاتش مشاهده کرد که زمان تناوب طبیعی پاندول در آب بیشتر از زمانی است که پاندول در هوا نوسان می‌کند. وی نتیجه گرفت که تاثیر آب مشابه با افزایش جرم پاندول است.

وسترگارد اقدام به محاسبه فشار هیدرودینامیکی‌ای کرد که از سوی آب تراکم پذیر مخزن بر یک سد در حال ارتعاش وارد می‌شود. او پیشنهاد کرد که نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر سد، معادل تاثیر جرم افزوده در نظر گرفته شود. بطوری که نیروی اینرسی این جرم افزوده برابر با نیروی هیدرودینامیکی وارد بر سد باشد. فرضیات او عبارتند از، سد و پی صلب، سیال تراکم پذیر، کف مخزن افقی، وجه بالادست سد قائم و طول مخزن بی نهایت باشد. اما چنین فرضیاتی منطبق بر واقعیات نمی‌باشد و در عمل سد سازه‌ای تغییر شکل پذیر می‌باشد. در عین حال، وی نتایج خود را برای حالتی که فرکانس ارتعاش کوچکتر از فرکانس طبیعی اول مخزن فرض گردد، ارائه داد.

۱-۲-۲-بررسی رفتار سد در اندر کنش با مخزن و پی

زنگار و هائفی(*Zangar & Haefei*) در سال ۱۹۵۲ با فرض آب تراکم ناپذیر به تعیین فشارهای هیدرودینامیک وارد بر سد پرداختند[۲]. آن‌ها مقادیر فشار هیدرودینامیکی وارد بر سدهای بتنی با وجه بالا دست مایل را بررسی کردند. زنگار همچنین مدل خود را برای حالتی که وجه بالادست از دو صفحه تشکیل شده باشد مورد بررسی قرار داد.

زینکوویچ و ناث (*Zienkiewicz & Nath*) به مطالعه آزمایشگاهی فشارهای هیدرودینامیکی وارد بر سد پرداختند[۳]. آنان در مطالعه خود آب را تراکم ناپذیر فرض کردند.

در سال ۱۹۶۷ چاپرا (*Chopra*) با حل یک مدل دو بعدی، تحلیلی از سیستم آب تراکم پذیر و سد صلب قائم ارائه نمود و نشان داد که با صرف نظر کردن از تراکم پذیری آب، خطای زیادی وارد محاسبات می‌شود[۴]. وی در سال ۱۹۶۸ مدل تحلیلی خود را به یک سیستم آب تراکم پذیر و سد انعطاف پذیر توسعه داد.

ایجاد و تکامل ابزارهای محاسباتی قوی و تکامل روش‌های عددی، تحول عظیمی در نحوه بررسی موضوعات مختلف ایجاد کرد که مسئله آنالیز لرزه‌ای سد نیز از این مورد تبعیت می‌کند. با تکامل روش‌های عددی مانند اجزاء محدود، این امکان برای محققین فراهم شد که پارامترهای گسترده‌تری را بررسی کنند و این امر به بررسی همه جانبه مسئله و مشخص شدن اثر پارامترهای مختلف و در نهایت ایجاد تئوری‌های جامع‌تر منجر شد از طرف دیگر با ایجاد و گسترش کامپیوترها دانشمندان توانستند حجم زیادی از محاسبات را در زمان کوتاه‌تری انجام دهند. بدین ترتیب مطالعات عددی زیادی بر روی رفتار دینامیکی سدهای بتنی انجام گرفته است.

در سال ۱۹۷۳ چاپرا و چاکراباتی(*Chopra & Chakrabarti*) به تحلیل دینامیکی سد در محدوده فرکانس در اندرکنش با آب مخزن و سنگ پی پرداختند[۵]. آن‌ها با به کارگیری روش زیرسازه، سازه را به قسمت‌های مختلف تقسیم بندی کردند به صورتی که در بعضی از مرزها با یکدیگر نقاط مشترک داشته باشند.

آن‌ها جهت تحلیل سدهای بتنی، بدنه سد و محیط آب مخزن را هر کدام یک زیرسازه و خاک را به عنوان زیرسازه سوم در نظر گرفتند و با مش بندی هرقسمت به تحلیل آن‌ها پرداختند.

در سال ۱۹۸۲ چاپرا و هال(*Chopra & Hall*) به تحلیل دینامیکی خطی سد بتنی وزنی در محدوده فرکانس با در نظر گرفتن المان نیمه نهایت سیال پرداختند [۶] و در یک مدل نیمه تحلیلی اثر مخزن نامحدود را در مدل لحاظ کردند و بدین ترتیب عملاً در دامنه فرکانس امکان در نظر گرفتن اندرکنش میان سد و آب را به صورت کاملاً دقیق فراهم کردند.

در سال ۱۹۸۲، کو(*Kuo*) نیز به تحلیل دینامیکی سدها به روش جرم افزوده پرداخت[۷]. وی پاسخ خطی و غیر خطی سد و مخزن را به وسیله اضافه کردن تعدادی جرم به معادله حرکت سد، تقریب زد.

در سال ۱۹۸۵، فنوس و چاپرا (*Fenves & Chopra*) آثار میرایی کف مخزن را بررسی کردند[۸]. آن‌ها از شرایط مرزی تقریبی برای مدل کردن جذب انرژی توسط رسوبات کف مخزن، استفاده کردند و به تأثیر قابل توجه آن بر پاسخ سد بتنی وزنی پی بردند.

در سال ۱۹۸۷، لطفی و همکارانش با استفاده از روش اجزاء محدود، مدلی را ارائه نمودند که در آن تمام اندرکنش‌ها به صورت دقیق در نظر گرفته شده است[۹]. در این مطالعه امکان احتساب اندرکنش آب و سنگ پی، به صورت کاملاً دقیق،

فراهم شد. علاوه بر این تغییرات مشخصات سنگ پی در جهت قائم به راحتی در مدل لحاظ شده که برای مطالعه اثرات رسوب کف مخزن نیز بسیار مناسب است. آن‌ها رسوب را به عنوان یک جامد خطی ویسکوالاستیک مدل کردند و در تحلیل خود از المان‌های نیمه بینهایت، جهت در نظر گرفتن تمام اندرکنش‌های موجود در سیستم بهره گرفتند و بدین نتیجه رسیدند که تأثیر رسوبات کف مخزن در پاسخ سد، قابل توجه است.

تا این زمان، امکان تحلیل در دامنه فرکانس با احتساب اندرکنش میان آب، سازه و سنگ پی، فراهم شد و به دلیل محدودیت‌های این روش، امکان تحلیل غیر خطی سیستم وجود نداشت در حالی که سیستم سد و مخزن در زلزله، حتی اگر مصالح در محدوده الاستیک باقی بماند، به دلیل لغزش در درزهای انقباض یا پایه سد، تمایل به رفتار غیرخطی دارند. بدین ترتیب در اواخر دهه هشتاد که یافتن پاسخ غیر خطی سد حائز اهمیت شد، مطالعات فراوانی در زمینه تحلیل در دامنه زمان، آغاز گردید. در سال ۱۹۴۹، سامرفیلد(*Sommerfeld*) از شرط مرزی انعکاسی برای انتهای دور، استفاده کرد[۱۰]، ولی با توجه فرضیات این شرط مرزی و تقریبی بودن آن، نیاز به استفاده از تعداد قابل توجهی المان در تحلیل بود که باعث افزایش زمان و هزینه می‌شد.

در سال ۱۹۸۷، شاران(*Sharan*) به تحلیل اجزاء محدود در دامنه زمان پرداخت[۱۱]، او در مطالعات اولیه خود با استفاده از روش تحلیلی، توزیع فشار هیدرودینامیکی تحت فرکانس معینی را در مقطعی با فاصله دور از سد برای مخزن دو بعدی، تعیین کرد و سپس بر مبنای این مطالعات، یک شرط مرزی در دامنه زمان را توسعه داد. وی در معادله موج در دامنه زمان، تغییرات دوم فشار نسبت به فاصله از پی را با مقداری تخمینی که از توزیع فشار پیشنهادی اش حاصل می‌شد جایگزین کرد. با استفاده از شرایط مرزی شاران طول مدل مخزن نسبت به شرایط سامرفیلد در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد کوچکتر شده و این خود در کاهش زمان موثر بود. مدل شاران برای مدل سه بعدی نیز قابل استفاده است.

از آنجا که روش‌های مبتنی بر انتگرال کانولوشن بسیار ناکارآمد هستند در سال ۱۹۹۰، تیسای و همکارانش(*Tsai*) با ارائه روشی مبنی بر ساده سازی انتگرال کانولوشن امکان شرایط نیمه تحلیلی دقیق، برای مخزن نامحدود را فراهم ساختند[۱۲]. آن‌ها به جای آنکه تک تک درایه‌های ماتریس امپدانس مربوط به مخزن نامحدود در انتگرال کانولوشن را حساب کنند، تنها برای چند مد اول این کار را انجام دادند و بدین ترتیب در دقت آن هم تغییری حاصل نشد. آن‌ها با

استفاده از یک الگوی گسسته سازی، زمان پاسخ هر لحظه را به پاسخ گام قبلی مرتبط ساختند و بدین ترتیب مشکل ناکارآمدی کانولوشن تا حدودی برطرف شد. این روش به دلیل چشم پوشی از تحریک کف مخزن و میرایی آن توانایی تحلیل دقیق را نداشت.

آنتس و استارف (*Antes & Estorff*) در سال ۱۹۸۷ از فرمولاسیون محدوده زمان به همراه المان مرزی استفاده کردند[۱۳]. در مدل آن‌ها اثر تحریک قائم، میرایی و جذب کف مخزن نیز لحاظ شده بود.

در سال ۱۹۹۴، وبر با کمک سیستم تبدیل خطی، معادلات در محدوده فرکانس را به محدوده زمان منتقل کرد. در این روش ماتریس‌های منتقل شده که نسبت به زمان گسسته اند با کمک تبدیلات لازم به یک سیستم پیوسته مبدل می‌شوند. این روش در صورتی مؤثر است که کاربر تا حدودی به روند تحلیل واقف باشد و برای استفاده از این شرایط مرزی در مسائل مختلف احتیاج به توسعه استانداردی تجربی وجود دارد.

درهمان سال، فنوس و چاوز نیز مدلی جهت تحلیل دینامیکی غیر خطی یک سد بتنی ارائه کردند. در مدل آن‌ها تنها عاملی که مساله را غیرخطی می‌کرد لغزش سد روی پی بود که در دامنه زمان مورد مطالعه قرار می گرفت. اما مدلسازی اندرکنش سد و مخزن در دامنه فرکانس انجام می‌شد. آن‌ها برای مدل کردن پی از روش نیم صفحه استفاده نمودند. از آن‌جا که لغزش سد را به واسطه طبیعت غیرخطی، در محدوده فرکانس نمی‌توان مدل کرد آن‌ها به یک مدل تحلیلی دوگانه روی آوردند.

در سال ۱۹۸۸ هومار و جابلونسکی(*Hummar & Jablonski*) با به کارگیری فرمولاسیون المان مرزی راه حلی را در دامنه فرکانس ارائه نمودند که در آن تحریک قائم و میرایی کف مخزن هم مدل شد[۱۴]. آن‌ها سیال نزدیک سد و خود سد را با کمک اجزای مرزی مدل کردند ولی محدوده سیال بی نهایت را با کمک اجزاء محدود مدل سازی نمودند. نتایج بدست آمده مشابه با آنچه لطفی و همکارانش[۹] در سال ۱۹۸۷ بدست آوردند، بود.

وپت(*Wept*) نیز در همان سال با استفاده از روش کانولوشن بر مبنای راه حلی در دامنه فرکانس، به حل مسأله اندرکنش پرداخت[۱۵]، و نتیجه گیری کرد که جذب امواج فشاری در انتهای مخزن از عوامل مهمی است که بر مقدار فشار هیدرودینامیک سد اثرگذار است.

در سال ۱۹۹۵، تن و چاپرا(*Tan & Chopra*) اثر اندرکنش سد، مخزن و فونداسیون را با در نظر گرفتن جرم و میرایی برای فونداسیون مورد بررسی قرار دادند[۱۶]. آن‌ها ضرایب امپدانس فونداسیون را در چند فرکانس انتخابی محاسبه کرده و برای سایر فرکانس‌ها توسط توابع درجه سوم درون یابی کردند.

۱-۲-۳-بررسی اثر رسوبات کف مخزن بر پاسخ دینامیکی سد

جذب امواج فشاری در کف مخزن فاکتور مهمی است که می‌تواند در بزرگی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر سد، اثر مهمی داشته باشد. فنوس و چاپرا در سال ۱۹۸۴ اثر مواد رسوبی ته نشین شده در ته مخزن را بر روی پاسخ سد بررسی کردند[۸]. آن‌ها در مطالعه خود از روابط تقریبی برای مدل کردن شرایط مرزی که توانایی جذب انرژی را داشته باشد بهره جستند و بدین نتیجه رسیدند که رسوبات کف مخزن تأثیر قابل توجه بر پاسخ سد بتنی وزنی خواهد داشت.

لطفی و تسولاس(*Tassoulas*) در سال ۱۹۸۶ به بررسی اثر رسوب در پاسخ سد پرداختند[۱۷]. آن‌ها مواد رسوبی را به صورت ویسکو الاستیک خطی مدل کردند. تحلیل آن‌ها با کمک اجزاء محدود و المان نیمه بینهایت سیال بود و در آن تمام اندرکنش‌های موجود در سیستم لحاظ شده بود. آنان نیز تاثیر رسوبات بر پاسخ سد را قابل توجه دانستند.

در سال ۱۹۸۶ چنگ (*Chang*) اثر رسوبات پوروالاستیک را بر نیروهای هیدرودینامیکی سد صلب مورد تحقیق قرار داد[۱۸]. مدینا(*Medina*) و همکارانش در سال ۱۹۹۰ محاسباتی با استفاده از روش المان مرزی انجام داده و به نتایج مشابه رسیدند[۱۹].

در سال ۱۹۹۱، بوگاچا و تسولاس(*Bougacha & Tassoulas*) رسوبات کف مخزن را به عنوان یک محیط پیوسته متخلخل با دانه‌های الاستیک در نظر گرفتند[۲۰]. در روش آن‌ها نیاز به اطلاعاتی نسبتاً کامل از لایه بندی کف سد از قبیل اندازه دانه‌ها، تخلخل و نفوذ پذیری آن است. از لحاظ محاسباتی نیز حجم محاسباتی زیادی را می‌طلبد.

۱-۲-۴-روش‌های حل معادلات بدست آمده

روش‌های گوناگونی جهت بدست آوردن پاسخ سیستم سد، مخزن و سنگ پی وجود دارد. از تحلیل مدی به عنوان یک تحلیل رایج می‌توان نام برد. در این روش با کاهش درجات آزادی، حجم عملیات ریاضی و حافظه مورد نیاز برای ذخیره نتایج کاسته می‌شود. در تحلیل مدی، شکل مدها و فرکانس‌های طبیعی مدل از حل مسأله مقدار ویژه مربوطه بدست می‌آید و با ترکیب خطی شکل مدها پاسخ سیستم حاصل می‌شود. مطالعات بسیاری در زمینه تحلیل به روش مودال انجام گرفته است. در سال ۲۰۰۳، لطفی روشی ارائه نمود که در آن به حل همزمان سیستم آب و سد بر مبنای حالت غیر وابسته می‌پردازد[۲۲]. روش به کار رفته در سیستم‌های خطی به کار رفته و هماهنگ با روش انتگرال گیری مستقیم و مودال است.

یکی از مشکلات تحلیل دینامیکی در محدوده زمان متقارن نبودن ماتریس‌های جرم و سختی می‌باشد. با استفاده از درجات آزادی سرعت به جای درجه آزادی فشار می‌توان این ماتریس‌ها را متقارن نمود. اما تمایل به استفاده از متغیر فشار به جای سرعت، منجر به توسعه برخی راه حل‌ها شد که یکی از آن‌ها روش نوسانی است.

این روش در سال ۱۹۹۸ توسط قائمیان و قبارا(*Ghobarah*) برای حل اندرکنش سد با درجه آزادی تغییر مکان و مخزن با درجه آزادی فشار ارائه شد[۲۱]. این روش با اتکا به روشی که فیلیپا در سال ۱۹۸۰ بنا نهاد بر مبنای حل غیرهمزمان معادلات سد و آب مخزن ارائه شد که در آن معادله ماتریسی مستقیماً حل نمی‌شود بلکه با فرض یک توزیع فشار در فصل مشترک سد و مخزن، پاسخ سد تعیین می‌شود. با استفاده از این پاسخ توزیع فشار تا رسیدن به یک همگرایی مناسب ادامه می‌یابد. زمان این محاسبات در این روش نسبت به حل در محدوده فرکانس کمتر است. این روش برای حل مسائل خطی و غیر خطی قابل استفاده است. البته از آنجا که متکی بر روش تکرار می‌باشد استفاده از آن برای مسائل خطی چندان کاربردی نیست.

۱-۲-۵-بهینه سازی ماتریس‌های امپدانس مخزن نیمه بینهایت و پی

در سال۱۹۸۱، تاجیریان(*Tajirian*) در تز دکتری خود جهت بهینه کردن ماتریس امپدانس سنگ پی روشی به کار برد که باعث کاهش زمان لازم برای محاسبات مربوطه گردید[۲۳]. بعد از آن در سال ۱۹۸۶، فوک و چاپرا (*Fok & Chopra*) از این تکنیک برای بهینه کردن زمان در حل مساله مقدار ویژه مختلط، به منظور محاسبه ترم‌های هیدرودینامیکی بهره گرفتند[۲۴]. در ادامه این روند لطفی در سال ۲۰۰۶، با استفاده از المان نیمه بینهایت بهینه راه حلی برای کاهش زمان محاسبات مساله مقدار ویژه مختلط در سد بتنی قوسی ارائه کرد[۲۵]. روش بدست آمده در اکثر مواقع از دقت خوبی برخوردار است، ولی در موارد خاص با خطا مواجه می‌شود. در سال ۲۰۰۷، آفتابی و لطفی با اصلاح روش پیشین و پیشنهاد روند بهینه اصلاح شده برای المان نیمه بینهایت سیال در سد بتنی قوسی به تکمیل روش قبل پرداختند[۲۶]. در این پایان نامه به بررسی امکان بهره گیری از این روش‌ها در سد بتنی وزنی می‌پردازیم.

۱-۳- مطالب ارائه شده در این پایان نامه

در این پایان نامه رفتار دینامیکی سدهای بتنی وزنی در محدوده فرکانس مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انجام این پایان نامه ارائه روشی بهینه می‌باشد که با کمک آن مدت زمان لازم جهت تحلیل کاهش یابد. یک برنامه کامپیوتری تهیه شده که قادر به تحلیل سدهای بتنی وزنی به روش مستقیم در محدوده فرکانس می‌باشد. فرضیات حاکم بـر روابـط ارائـه شده به شرح زیر است:

- از اثر امواج سطحی صرف نظر شده است.
- بتن بدنه سد، خطی، همگن و ویسکوالاستیک فرض می‌گردد.
- آب مخزن یک سیال غیر ویسکوز، غیر چرخشی و تراکم پذیر در نظر گرفته شده است.
- تکیه گاه‌ها و پی سد صلب می‌باشند.
- اثرات مربوط به جذب انرژی امواج توسط رسوبات کف مخزن در محاسبات وارد شده است.

- اثرات مربوط به خروج انرژی امواج از انتهای مخزن در محاسبات لحاظ شده است.

کلیه مطالب گرد آوری شده در ۶ فصل به شرح زیر می‌باشد:

فصل حاضر به مرور مختصر کارهای گذشتگان و برخی مطالعات انجام شده اختصاص داشت.

فصل دوم به تشریح روش مستقیم در تحلیل سیستم سد بتنی با مخزن محدود می‌پردازد.

تئوری مربوط به المان نیمه بینهایت جهت تحلیل سیستم سد بتنی با مخزن نامحدود در فصل سوم توضیح داده شده است. همچنین در این فصل روابط مربوط به المان نیمه بینهایت سیال بهینه ارائه می‌گردد.

فصل چهارم، ابتدا به معرفی مدل‌های تحلیل شده می‌پردازد، سپس در بخش دوم، با توجه به تئوری‌های ارائه شده در فصل‌های دوم و سوم، نتایج مربوط به آنالیز مدل‌های نامبرده سد و مخزن در حالت‌های مختلف ارائه و کارآمدی روش‌های معرفی شده بررسی می‌شود.

در فصل پنجم، نتایج حاصل از برنامه نوشته شده برای سد *Pine Flat* تحت اثر زلزله *Taft*، ارائه شده است.

نتایج این تحقیق برای هر قسمت در فصل ششم به طور مختصر ارائه می‌گردد.

فصل دوم

تحلیل سیستم سد بتنی با مخزن محدود در محدوده فرکانس

۲-۱- مقدمه

در تحلیل سدهای بتنی جهت بررسی دقیق تر، رفتار سد در اندرکنش با محیط‌های مرتبط با آن، از قبیل مخزن یا سنگ پی تعیین می‌شود.

در این فصل معادلات حاکم بر ناحیه سد و مخزن معرفی شده و سپس به روش مستقیم و در محدوده فرکانس حل می‌گردند. از آن‌جا که خطای ناشی از کاهش درجات آزادی در روش مستقیم وجود ندارد، این روش در مقایسه با روش مودال به عنوان روش دقیق شناخته می‌شود.

در کنار قابلیت اطمینان، این روش از معایبی نیز برخوردار است که از آن میان می‌توان به حجم بالای عملیات ریاضی اشاره کرد.

معادلات برای دو حالت کلی سد و مخزن مطرح خواهد شد، در این فصل روابط مربوط به سد و مخزن محدود بررسی شده است که در بالادست، مخزن به یک مرز صلب یا شرط مرزی سامرفیلد *(Sommerfeld B.C.)* منتهی می‌شود. در انتهای فصل نیز روابط مربوط به انتقال مقادیر عکس العمل، از حوزه فرکانس به حوزه زمان ارائه شده است.

۲-۲- مدلسازی اجزاء محدود و معادلات حاکم بر سد

سازه سد با کمک المان‌های محدود جامد صفحه‌ای (دو بعدی) جزء بندی شده و با به کار گیری روش اجزاء محدود معادلات دینامیکی حاکم بر سد به صورت زیر بدست می‌آید[۲۷]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{r}} + \mathbf{K}\mathbf{r} = -\mathbf{M}\mathbf{J}\mathbf{a}_g + \mathbf{F} \qquad (۱-۲)$$

$\mathbf{M}$، $\mathbf{C}$ و $\mathbf{K}$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی، $\mathbf{r}$ بردار تغییر مکان نسبی گرهی و $\mathbf{F}$ بردار نیروهای هیدرودینامیک است. همچنین $\mathbf{a}_g$ و $\mathbf{J}$ بردار مولفه‌های شتاب زمین و ماتریس مربوط به ایجاد حرکات صلب زمین در راستای افق و قائم هستند که به صورت زیر معرفی می‌شوند:

$$\mathbf{a}_g = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_g^x \\ \mathbf{a}_g^y \end{bmatrix} \qquad (۲-۲\text{- الف})$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \dots \end{bmatrix}^T \qquad (۲-۲\text{-ب})$$

در تحریک هارمونیک زمین($a_g(t) = a_g(\omega)e^{i\omega t}$ با فرکانس ω)، تغییر مکان نیز رفتاری هارمونیک داشته و معادله حرکت سد در حوزه فرکانس به صورت زیر در می‌آید:

$$\left(-\omega^2\mathbf{M}+i\,\omega\mathbf{C}+\mathbf{K}\right)\mathbf{r}(\omega)=-\mathbf{M}\mathbf{J}\mathbf{a}_g(\omega)+\mathbf{F}(\omega) \qquad (۲-۳-\text{الف})$$

$$\mathbf{C}=\frac{2\beta_d}{\omega}\mathbf{K} \qquad (۲-۳-\text{ب})$$

در این مطالعه میرایی سد از نوع هیسترتیک فرض شده و β_d ضریب میرایی مربوطه است. با توجه به روابطه (۲-۳-الف) و (۲-۳-ب) استفاده از میرایی هیسترتیک سبب می‌شود که نیروی استهلاک تابعی از فرکانس نباشد. بنابراین، رابطه (۲-۳-الف) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\left(-\omega^2\mathbf{M}+\left(1+2\beta_d i\right)\mathbf{K}\right)\mathbf{r}(\omega)=-\mathbf{M}\mathbf{J}\mathbf{a}_g(\omega)+\mathbf{F}(\omega) \qquad (۴-۲)$$

بدین ترتیب در صورتیکه از نیروهای هیدرودینامیک صرف نظر نمائیم (مخزن خالی)، با در نظر گرفتن بردار شتاب هارمونیک واحد در جهت افقی یا قائم، می‌توان تابع انتقال *(Transfer Function)* مربوط به هر گره سد من جمله تاج سد را به ازای فرکانس‌های مختلف به راحتی محاسبه و ترسیم کرد. البته در حالات مخزن پر، نیروهای هیدرودینامیک $\mathbf{F}(\omega)$ نیز باید لحاظ گردد که خود تابعی از شتاب‌های وجه بالا دست بدنه سد و کف مخزن می‌باشد.

۲-۳- معادلات حاکم بر مخزن

معمولاً سیال مخزن، محیطی همگن، ایزوتروپ، غیر ویسکوز، غیر چرخشی و تراکم پذیر در نظر گرفته می‌شود. از طرفی با توجه به اینکه مدول ارتجاعی حجمی آب عدد بزرگی است و تغییرات جرم حجمی آن تحت فشارهای هیدرودینامیکی متعارفی که هنگام وقوع زلزله در مخازن سدهای بزرگ به وجود می‌آید، بسیار کوچک است، لذا از اثر تغییرات زمانی و مکانی جرم حجمی سیال صرف نظر می‌گردد. با توجه به این فرضیات، معادله دیفرانسیل حاکم بر محیط سیال، معادله موج (*wave equation*) خواهد بود[۲۸]: