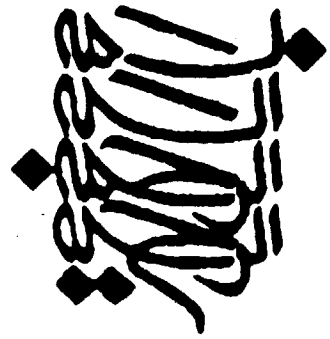


٣٤٩٣٩

۱۳۸۰ /۲/ ۱۰

بسمه تعالی

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

دانشگاه تهران
دانشکده فنی

پایان‌نامه

جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی عمران - سازه‌های دریایی

موضوع

آنالیز تفرق موج در برابر سازه‌های با تقارن محوری با استفاده از تئوری المانهای مرزی

دانشجو

کیوان محلوجی

011517

استاد راهنما

جناب آقای دکتر نورزاد

استاد مشاور

جناب آقای دکتر برگی

دانشگاه تهران
دانشکده فنی
دانشکده مهندسی عمران

اسفند ماه ۱۳۷۶

۳۴۶۳۹

موضوع

آنالیز تفرق در برابر سازه‌های با تقارن محوری با استفاده از تئوری المانهای مرزی

توسط

کیوان محلوجی

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته : سازه‌های دریایی

از این پایان‌نامه در تاریخ ..... در مقابل

هیئت داوران دفاع به عمل آمده و مورد تصویب قرار گرفت.

محل امضاء

سرپرست کمیته تحصیلات تکمیلی دانشکده :.....

مدیر گروه آموزشی :.....

نماینده تحصیلات تکمیلی گروه :.....

استاد راهنما :.....

عضو هیئت داوران :.....

عضو هیئت داوران :.....

تقدیم به پدربزرگم که خاطره‌اش هرگز فراموش نخواهد شد
روحش شاد

تشکر و قدردانی

اکنون که با یاری خدای متعال این پایان‌نامه به اتمام رسیده است، لازم می‌دانم از کلیهٔ کسانی که مرا در انجام آن یاری داده‌اند سپاسگزاری نمایم. بویژه از استاد عزیز جناب آقای دکتر اسدالله نورزاد که در تمام مراحل انجام این پایان‌نامه و همچنین در زمینه‌های دیگر مرا راهنمایی کرده و همچون برادری دلسوز مرا یاری نموده‌اند. همچنین راهنمایی‌های ارزندهٔ استاد گرامی جناب آقای دکتر خسرو برگی در مقاطع مختلف، گره‌گشای مشکلات من بوده است که بدین ترتیب مراتب تشکر خود را از ایشان ابراز می‌دارم.

در حقیقت اگر کمک و مساعدت چند تن از دوستان عزیزم بویژه آقای مهندس محمدرضا شبیری نبود، مسلماً انجام این پایان‌نامه به درازا می‌کشید و اتمام آن تا این زمان ممکن نبود. بدینوسیله از ایشان قدردانی و برای آنها آرزوی موفقیت و پیروزی می‌نمایم.

چکیده

امواج تولید شده توسط باد معمولاً بحرانی‌ترین نیروها را به سازه‌هایی که در سر راه آنها قرار گرفته وارد می‌کند (به استثناء امواج ناشی از زلزله) سازه‌هایی که در معرض اینگونه امواج قرار می‌گیرند باید قادر باشند نیروهای حاصل از بلندترین موج محتمل را، در یک زمان برگشت معقول، چه در هنگام نصب و چه در طول مدت بهره‌برداری تحمل نمایند.

امواجی که ممکن است به سازه‌ها برخورد نمایند به یکی از سه حالت زیر می‌باشند :

۱- امواج نشکسته (معمولی)

۲- امواج در حال شکست

۳- امواج شکسته

که امواج در حال شکست و شکسته معمولاً بر روی پایه‌های اسکله‌ها و سکوهایی که در اعماق کم نصب گردیده‌اند اثر می‌گذارد و امواج نشکسته بر روی سکوها و سازه‌هایی که در اعماق بیشتر قرار دارند وارد می‌گردند.

هدف از این پایان‌نامه ارائه یک برنامه کامپیوتری مبتنی بر یک روش عددی عمومی و دقیق (روش المانهای مرزی) با بازدهی مناسب جهت تعیین فشار موج وارد بر سازه‌های واقع شده در محیط دریا می‌باشد.

در این پروژه از تئوری پتانسیل استفاده شده است. ضمناً به منظور سهولت و کاهش حجم محاسبات و با توجه به ماهیت مسأله فرض می‌شود که حالت تقارن محوری برقرار بوده و بنابراین مسأله از حالت سه بعدی به حالت دو بعدی تبدیل می‌شود.

روش حل بر مبنای روش المانهای مرزی (BEM) می‌باشد. این روش در مواقعی که محیط بی‌نهایت مورد بررسی قرار می‌گیرد، بدلیل آنکه مسأله را به مرز کاهش می‌دهد بسیار کاربرد دارد و بویژه در مسائل اندرکنش آب و سازه محبوبیت و رواج بسیار زیادی یافته است.

در این پروژه تنها مرزهای سطح آب، سطح سازه و کف دریا مدل می‌شوند و با اعمال شرایط مرزی و الگوریتم ارائه شده برای روش (BEM) می‌توان مسئله را حل نمود و توزیع فشار را بر روی

سطح سازه بدست آورد.

موج وارده، هارمونیک با فرکانس خاص ω (تک‌رنگ) فرض می‌شود و بنابراین با تبدیل دامنه زمانی به دامنه فرکانسی و حل معادلات دیفرانسیل حاکم، پاسخ در دامنه فرکانسی ارائه می‌گردد. روند کلی مطالب ارائه شده در این پایان‌نامه به این ترتیب است :

در فصل اول روش المانهای مرزی معرفی می‌شود و و پس از بررسی نحوهٔ بدست آوردن معادلات انتگرال مرزی رابطه نهایی بین متغیرهای مرزی یعنی پتانسیل سرعت و مشتق نرمال آن ارائه می‌گردد. با حل این معادلات مجهولات مرزی محاسبه خواهند شد از روی این مقادیر مرزی می‌توان مجهولات را در نقاط دیگر دامنه بدست آورد.

در فصل دوم روند کلی کاربرد روش المانهای مرزی در حالتهای دو بعدی و سه بعدی با استفاده از تئوری پتانسیل بیان شده و در نهایت حالت تقارن محوری که حالت خاصی از دو حالت فوق می‌باشد بطور کامل توضیح داده می‌شود.

در فصل سوم مسئله مورد نظر (تفرق موج) به همراه روش موریسون بیان می‌شود و محدودیتهای هر دو روش و حدود کاربرد آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل چهارم آنچه در فصول ۱ تا ۳ در حالت کلی بیان شده است در مورد موضوع پروژه یعنی سازه با تقارن محوری بکارگرفته می‌شود و الگوریتم حل این سازه هنگامی که موج هارمونیک دریا به آن برخورد می‌کند بطور کامل بیان می‌شود.

در فصل پنجم چند حالت خاص با برنامه کامپیوتری ارائه شده حل می‌شود و نتایج مورد نظر ارائه می‌گردد. این نتایج با نتایج بدست آمده از فرمول موریسون، مقایسه خواهد شد.

در پیوست (الف) جداول مربوط به نقاط و وزنهای گوسی برای انتگرال عددی توسط روش گوس - لژاندر در حالت استاندارد و منفرد آورده شده است.

در پیوست (ب) در رابطه با توابع بسل و فرمولهای مورد نیاز با توجه به کاربرد آن در این رساله توضیح مختصری داده خواهد شد.

فهرست مطالب

عنوان — صفحه

فصل اول - مقدمه‌ای بر روش المانهای مرزی

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- مفاهیم اساسی ۵

فصل دوم - کاربرد روش BEM در مسائل پتانسیل

۲-۱- مقدمه ۱۲

۲-۲- کاربرد روش BEM در مسائل پتانسیل دو بعدی ۱۲

۲-۲-۱- معادلات حاکم ۱۲

۲-۲-۲- پاسخهاس اساسی ۱۳

۲-۲-۳- معادله انتگرال مرزی ۱۵

۲-۲-۴- الگوریتم حل مسأله ۱۸

۲-۲-۴-۱- المان‌بندی مرز ۱۸

۲-۲-۴-۲- انتگرال‌گیری عددی هسته‌ها ۲۰

۲-۳- کاربرد روش BEM در مسائل پتانسی سه بعدی ۲۳

۲-۴- کاربرد روش BEM در مسائل پتانسیل تقارن محوری ۲۶

۲-۴-۱- معادلات حاکم ۲۷

۲-۴-۲- پاسخهای اساسی ۲۹

۲-۴-۳- معادله انتگرال مرزی ۳۰

فصل سوم - معرفی مسأله مورد نظر (تفرق موج) و محدودیتهای روش موریسون

۳-۱- مقدمه ۳۳

۳-۲- فرمول موریسون و محدودیتهای آن ۳۳

۳-۳- تفرق موج ۳۴

۳-۳-۱- معادله حاکم ۳۵

۳-۳-۲- شرایط مرزی ۳۶

۳-۳-۳- بدست آوردن پتانسیل سرعت در نقاط گرهی ۳۸

۳-۴- ارتباط بین روش موریسون و حل عددی پدیده تفرق و محدودیتهای آنها ۳۹

فصل چهارم - الگوریتم آنالیز تفرق موج در برابر یک سازه با تقارن محوری

۴-۱- مقدمه ۴۳

۴-۲- الگوریتم آنالیز سازه با تقارن محوری ۴۳

۴-۲-۱- المان بندر مرز ۴۳

۴-۲-۲- انتگرال گیری هسته‌ها ۴۴

۴-۲-۳- محاسبه پتانسیلهای سرعت در نقاط گرهی ۴۷

فصل پنجم - بررسی پاسخ در چند حالت خاص

نتیجه گیری ۶۴

فهرست مراجع ۶۶

پیوست الف ۶۷

پیوست ب ۶۹

فصل اول

مقدمه‌ای بر روش المانهای مرزی

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

۱-۱- مقدمه

در بسیاری از مسائل مهندسی می‌توان روابط و معادلاتی بدست آورد که رفتار دقیق جزء کوچکی از جسم را بیان می‌کند و در واقع مسأله منجر به حل یک سری معادلات دیفرانسیل خواهد شد. به عنوان مثال در مسائل پتانسیل معادله دیفرانسیل حاکم، معادله لاپلاس (۱-۱) خواهد بود.

$$\nabla^2\phi=0 \qquad (1-1)$$

برای حل این معادلات، تکنیک‌های عددی مختلفی ابداع شده است که معادلات دیفرانسیل را تبدیل به دستگاه معادلات جبری خطی کرده و با حل آن جواب نهایی بدست می‌آید. در این تکنیک‌ها، کل جسم به تعداد زیادی قسمتهای بسیارکوچک تقسیم می‌شود. رفتار دقیق این قسمتهای دیفرانسیلی بسیارکوچک توسط معادله دیفرانسیل حاکم بیان می‌شود. با به کار بردن روابطی برای اتصال[1] (سرهم بندی) این قسمتها می‌توان مقادیر متغیرها مانند تنش‌ها و تغییر مکانها را با دقت مورد نظر بدست آورد. هر چه اندازه این قسمتهای کوچک، کوچکتر شود، حل عددی دقیق‌تر خواهد بود ولی زمان محاسبات و هزینه آن افزایش می‌یابد.

سه تکنیک عددی برای حل این مسائل وجود دارد.

۱) روش تفاوتهای محدود Finite Difference Method (FDM):

---

1 - Assemble

در این روش، مشتقات در معادله دیفرانسیل حاکم به شکل معادلات تفاضلی نوشته می‌شود. بنابراین برای یک دامنه دو بعدی، یک شبکه از سلولهای مربعی (یا مستطیلی) مورد نیاز است و معادله برای تمام نقاط داخلی نوشته می‌شود. این عمل منجر به یک سیستم معادلات جبری می‌شود که با ارضاء شرایط مرزی می‌توان به جوابهای یکتا[1] رسید. از آنجاکه تغییر ابعاد سلولها در یک ناحیه خاص در این روش بسیار مشکل است، این روش برای مسائلی مانند تمرکز تنش که در ناحیه خاصی متغیرها تغییرات سریع دارند مناسب نیست. همچنین در صورت پیچیده بودن هندسه[2] بکارگیری این روش بسیار دشوار است.

۲) روش اجزاء محدود Finite Element Method (FEM):

در این روش، تمام دامنه به المانهای محدود و کوچکی تقسیم می‌شود. معادله دیفرانسیل حاکم برای هر یک از این اجزاء صادق خواهد بود. این المانهای کوچک به یکدیگر متصل می‌شوند و روابط تعادل و پیوستگی بین المانهای مجاور برقرار می‌شود. با ارضاء شرایط مرزی، دستگاه معادلات جبری خطی حاصله، یک جواب یکتا نتیجه می‌دهد.

۳) روش المانهای مرزی Boundary Element Method (BEM):

در این روش معادلات دیفرانسیل حاکم به شکل انتگرالی تبدیل می‌شود که بر روی مرز قابل استفاده است. این انتگرالها بر روی مرز که به بخشهای کوچکی المان‌بندی شده (المانهای مرزی) بصورت عددی انتگرال‌گیری می‌شود. همانند روشهای عددی دیگر، با ارضاء شرایط مرزی دستگاه معادلات جبری خطی حاصله، یک جواب یکتا خواهد داد.

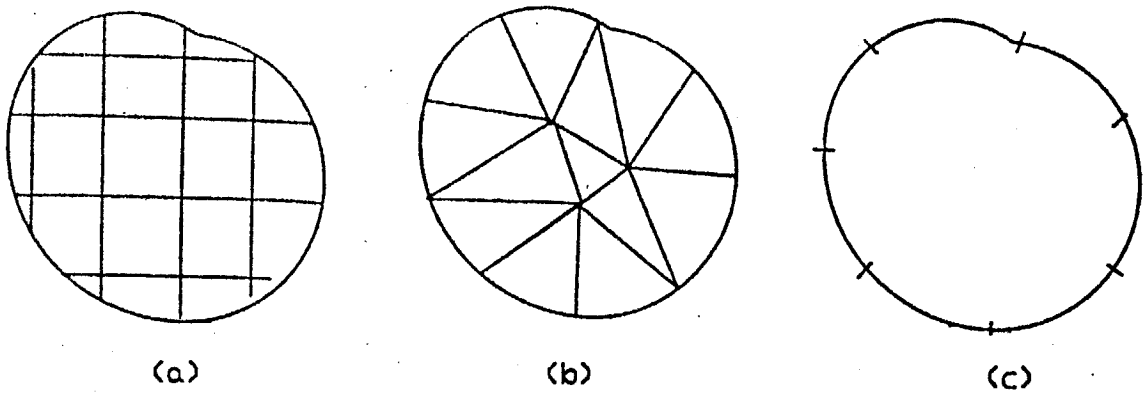
روش BEM به سادگی می‌تواند اشکال پیچیده مرز را در نظر بگیرد و از آنجاکه تمام تقریب‌ها به مرز محدود می‌شود، این روش می‌تواند ناحیه‌هایی راکه متغیرها تغییرات سریع دارند با دقتی بیشتر از

---

1 - Unique

2 - Geometry

روش FEM مدل کند.



شکل ۱-۱ : دسته‌بندی روشهای عددی

a) سلولها در روش تفاوتهای محدود

b) المان‌بندی در روش اجزاء محدود

c) المان‌بندی در روش المانهای مرزی

روش المانهای مرزی نسبت به روش المانهای محدود دارای مزایای زیر است :

الف) نیاز به اطلاعات ورودی کمتری دارد. این بدین دلیل است که تنها مرز مدل می‌شود و در نتیجه زمان کمتری برای تهیه این اطلاعات مورد نیاز است. همچنین تغییرات مجدد روی المان‌بندی قبلی، ساده‌تر است. این مزیت بویژه مسائلی که نیاز به المان‌بندی مجدد دارند مانند مطالعات طراحی اولیه، انتشار ترک و تماس اصطکاکی اهمیت زیادی می‌یابد.

ب) تنش‌ها در نقاط داخلی دامنه دقیق هستند زیرا هیچگونه تقریبی برای این نقاط بکار نرفته است. بنابراین روش BEM برای مدل کردن مسائلی با تغییرات سریع تنش مانند تمرکز تنش[۱]، مسائل شکست[۲] و تماس[۳] بسیار مناسب است.

---

1 - Stress Concentration 2 - Fracture 3 - Contact

ج) برای دقت یکسان، BEM نیاز به حافظ و وقت کمتری نسبت به FEM دارد که این بدلیل کمتر بودن تعداد المانها و گره‌ها می‌باشد.

د) این روش به سادگی برای مصالح تراکم ناپذیر قابل استفاده است ولی روش اجزاء محدود مبتنی بر تغییر مکان[1] در حالت کرنش مسطح هنگامی که ضریب پواسون برابر ۰/۵ می‌باشد، با مشکل مواجه می‌شود. بنابراین در مسائلی که شامل مواد لاستیک مانند می‌باشند، روش BEM بسیار مناسب‌تر از FEM است.

ه) در روشهای دامنه‌ای مانند FEM و FDM دامنه مسأله مدل می‌شود در حالی که در BEM تنها مرز مدل شده و مسأله یک بعد کاهش می‌یابد. بنابراین برای مسائل سه بعدی مناسب است.

و) از آنجا که در BEM تنها مرز مدل می‌شود، این روش برای محیطهای نامحدود بسیار مناسب بوده و لذا برای آنالیز موج که در محیط نامحدود دریا رخ می‌دهد بکار می‌رود.

۲-۱- مفاهیم اساسی

در هیدرومکانیک، معادلات انتگرالی به منظور ارتباط توابعی نظیر فشار و سرعت در دامنه مورد نظر بکار می‌رود. می‌توان با استفاده از تبدیلات انتگرالی مشخصی (مانند قضایای گرین) یا روش باقیمانده‌های وزنی ابعاد مسأله را یک بعد کاهش داد. در نتیجه انتگرال روی حجم (دامنه) به انتگرال روی سطح (مرز) تبدیل می‌شود. این انتگرالهای روی مرز، معادلات انتگرالی مرز[2] (BIE) نامیده می‌شود زیرا آنها متغیرهای مرزی را به هم مرتبط می‌کنند.

روشهای حصول به معادلات انتگرالی مرز (BIE) عمدتاً به سه دسته زیر تقسیم می‌شود :

---

1 - Displacement Base Finite Element

2 - Boundary Integral Equation

۱) روش غیر مستقیم[۱] : این روش بر مبنای استفاده از توابع چگالی مجازی برای فرمول‌بندی مسأله است. این توابع چگالی مجازی، مفهوم فیزیکی ندارند ولی می‌توان با انتگرال‌گیری از آنها مجهولات اصلی مسأله را بدست آورد.

۲) روش نیمه مستقیم[۲] : در این روش معادلات انتگرالی بر حسب توابع مجهولی مشابه توابع تنش در تئوری الاستیسیته یا توابع پتانسیل فرمول‌بندی می‌شود. این توابع نسبت به توابع چگالی مجازی مفهوم فیزیکی بیشتری دارند. از این توابع می‌توان مشتق یا انتگرال گرفت و تنشها یا سرعتها را بدست آورد.

۳) روش مستقیم[۳] : در این روش توابع مجهولی که در معادلات انتگرالی ظاهر می‌شوند، متغیرهای فیزیکی حقیقی مسأله هستند. بنابراین برای مثال در مسائل تئوری الاستیسیته حل چنین معادلات انتگرالی، بردارهای تنش و تغییر مکانها و در مسائل هیدرودینامیک، بردارهای سرعت را در مرز سیستم مستقیماً نتیجه می‌دهد و مقادیر درونی نیز از مقادیر مرزی با استفاده از انتگرال‌گیری عددی بدست می‌آید.

در فرمول‌بندی این پروژه از روش نیمه مستقیم (تئوری پتانسیل) استفاده شده است و در ادامه تنها این روش شرح داده خواهد شد.

به منظور آشنایی با روند کلی روش، معادله لاپلاس که یکی از معادلات بسیار رایج در مهندسی است در نظر گرفته می‌شود و نحوه حصول به معادلات انتگرالی مورد نظر بررسی می‌شود. معادله لاپلاس بصورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^{\,2}} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^{\,2}} = 0 \qquad (۱-۲-a)$$

و یا به شکل :

---

1 - Indirect Method 2 - Semi-direct Method 3 - Direct Method