۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران ـ گرایش سازه‌های دریایی

تحلیل دینامیکی غیرخطی سکوهای دریائی نوع جاکت به کمک روش زمان - دوام با به کارگیری تئوری موج NewWave

توسط:

حمید متین نیکو

استاد راهنما:

دکتر مصطفی زین الدینی

(دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی)

استاد مشاور:

دکتر همایون استکانچی

(دانشگاه صنعتی شریف)

بهمن ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تأییدیّه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه ~~خانم~~ / آقای: حمید متین نیکو

را با عنوان: تحلیل دینامیکی غیرخطی سکوهای دریائی نوع جاکت به کمک روش زمان دوام با به کارگیری تئوری موج **NewWave**

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی/ کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر مصطفی زین الدینی	دانشیار	
۲- استاد مشاور	دکتر همایون استکانچی	استاد	
۳- استاد ممتحن خارجی	دکتر محمد سعید سیف	استاد	
۴- استاد ممتحن داخلی	دکتر محمدرضا ذوالفقاری	استادیار	
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمدرضا ذولفقاری	استادیار	

تقدیم به:

پدر هدایتگرم،

مادر مهربانم،

استاد راهنمای بزرگوارم

و

او که امید بخش زندگی من است.

تشکر و قدردانی

بی تردید انجام این تلاش کوچک بدون عنایت و رهنمودهای استاد ارجمند جناب آقای دکتر مصطفی زین الدینی میسّر نمی گردید، بر خود واجب می دانم از زحمات و راهنمائیهای بی شائبه ایشان تشکر و قدردانی نمایم. از درگاه الهی برای ایشان سلامتی و توفیق روز افزون مسئلت می نمایم.

همچنین از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر همایون اسکانچی که همواره در طول انجام این پایان نامه از نظرات حکیمانه و ارزنده ایشان بهره مند شدیم، کمال سپاس را دارم.

از دوستان عزیزم آقایان مهندس مهدی کشیری، وحید مجبی امیرحسینی، سید مهدی اندرامی، امین امیرپور، سید عباس خیری و محسن بشارت که هریک به نوعی ما را در انجام این تحقیق یاری داده اند، تشکر می نمایم.

حمید متین نیکو

زمستان ۱۳۹۰

چکیده

هدف این پایان‌نامه معرفی روشی نوین با عنوان تحلیل موج دوام (EWA)[1] و کاربرد آن در تحلیل، طراحی و ارزیابی دینامیکی غیرخطی انواع سازه‌های دریایی در برابر نیروی ماهیتاً پیچیده و تصادفی امواج می‌باشد. این روش الهام‌گرفته از رویکرد تحلیل زمان دوام (ETA) [2] می‌باشد که در مطالعات لرزه‌ای ساختمان‌ها مورد استفاده می‌گیرد. در این روش سازه در معرض توابع قطار موج افزایشی (IWTF)[3] از پیش طراحی‌شده که به نحو مناسبی با شرایط امواج ساختگاه همپوشانی دارند، قرار می‌گیرد. این توابع طوری طراحی شده‌اند که هر زمان مشخص در آن، معرف یک وضعیت دریایی معلوم می‌باشد. همچنین در این توابع، ارتفاع موج به وقوع پیوسته در زمان هدف[4] (زمان دلخواه)، می‌تواند منطبق با موج طرح حاکم بر وضعیت دریایی[5] منطقه باشد. با شروع تحلیل، مقادیر شاخص خرابی و یا هر پارامتر دلخواه دیگر، از مرحله رفتار الاستیک تا مرحله فروریزش کامل سازه، به طور مستقیم برحسب پارامتر زمان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. صحت و یا عدم عملکرد صحیح سازه را می‌توان بر اساس متغیرهای ارتفاع موج دوام (EWH)[6] و یا زمان دوام متناظر با آن مورد قضاوت قرار داد. قابلیت ورود مفاهیم طیفی و درنظر گرفتن تأثیر امواج با فرکانس و ارتفاع‌های مختلف، لحاظ نمودن تأثیرات تصادفی بودن امواج، امکان درنظر گرفتن اثر پدیده موج‌برعرشه[7] در نتایج، کوتاه بودن زمان تحلیل ـ علیرغم مطالعه دقیق رفتار سازه ـ و قابلیت ورود هر پارامتر دلخواه نیاز به عنوان پارامتر هدف از ویژگی‌های بارز و مشخص روش تحلیل موج دوام خواهد بود. این روش علاوه بر توانایی تحلیل سکوهای جدید، قابلیت ارزیابی سکوهای موجود و تحلیل فروریزش[8] انواع سکوهای دریایی را به نحو شایسته‌ای خواهد داشت. نتایج بدست آمده حاکی از کارآمدی روش تحلیل موج دوام در مطالعه رفتار دینامیکی غیرخطی سازه‌های دریایی در معرض نیروی موج و قابلیت بکارگیری آن در پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی می‌باشد.

کلید واژه: سازه‌های دریایی، امواج تصادفی نامنظم، توابع قطار موج افزایشی، روش تحلیل موج دوام، ارتفاع موج دوام.

[1] Endurance Wave Analysis
[2] Endurance Time Analysis
[3] Incremental Wave Trains Function
[4] Target Time
[5] Sea State
[6] Endurance Wave Height
[7] Wave in Deck
[8] Collapse Analysis

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... د
فهرست شکل‌ها ..... ه

فصل ۱- کلیات ۱
۱-۱- مقدمه ۱
۱-۲- روش انجام تحقیق ۳
۱-۳- ساختار پایان‌نامه ۴

فصل ۲- مروری بر ادبیات فنی ۵
۲-۱- مقدمه ۵
۲-۲- بارگذاری محیط دریا ۵
۲-۳- بارگذاری نیروی امواج ۵
۲-۳-۱- ضرایب درگ و اینرسی ۶
۲-۳-۲- بار باد ۷
۲-۳-۳- نیروی ناشی از جریان ۷
۲-۴- پارامترهای عدم قطعیت در مطالعات فراساحل ۸
۲-۵- روش تحلیل بار افزون (پوش‌آور) ۸
۲-۵-۱- معرفی ۸
۲-۵-۲- مشخصات نمودار تحلیل بار افزون ۸
۲-۵-۳- نسبت مقاومت ذخیره ۱۰
۲-۵-۴- تحلیل دینامیکی بار افزون ۱۱
۲-۶- روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) ۱۳
۲-۶-۱- الگوریتم تحلیل دینامیکی افزایشی ۱۵
۲-۶-۲- تعیین ظرفیت سازه از روی منحنی تحلیل دینامیکی افزایشی ۱۶
۲-۶-۳- تحلیل دینامیکی افزایشی (بار افزون دینامیکی) در مقابل تحلیل بار افزون استاتیکی ۱۷
۲-۷- روش تحلیل موج افزایشی (IWA) ۱۹
۲-۸- روش تحلیل زمان دوام (ETA) ۲۲
۲-۸-۱- توابع شتاب زمان دوام ۲۴
۲-۸-۲- منحنی زمان دوام ۲۶
۲-۸-۳- برخی مطالعات انجام شده با روش تحلیل زمان دوام ۲۶

فصل ۳- حل کوتاه‌شده امواج نامنظم در دامنه زمان ۲۷

۳-۱- مقدمه ۲۷
۳-۲- مدل موج شبه قطعی (QD) ۲۷
۳-۲-۱- تئوری اول شبه قطعی ۲۸
۳-۲-۱-۱- تئوری اول شبه قطعی خطی (مرتبه اول) ۲۸
۳-۲-۱-۲- تئوری اول شبه قطعی غیرخطی (مرتبه دوم) ۲۹
۳-۲-۲- تئوری دوم شبه قطعی ۳۱
۳-۳- مدل موج‌نو (NewWave) ۳۳
۳-۴- نیمرخ محتمل‌ترین موج (MLW) ۳۵
۳-۵- مدل موج‌نو مقیدشده (CNW) ۳۶
۳-۶- کاربرد روش‌های کوتاه‌مدت مقیدشده در تحلیل سازه‌های فراساحل ۳۷
فصل ۴- مبانی مدل‌سازی عددی و نحوه اعمال بارهای محیطی دریا ۴۲
۴-۱- مقدمه ۴۲
۴-۲- بارهای وارده به سکوهای دریایی ۴۲
۴-۲-۱- بارهای مرده ۴۲
۴-۲-۲- بارهای زنده ۴۲
۴-۲-۳- بارهای محیطی ۴۳
۴-۲-۴- بارهای حین ساخت ۴۳
۴-۲-۵- بارهای ناشی ازخارج سازی و نصب مجدد سکو ۴۳
۴-۲-۶- نیروهای دینامیکی ۴۳
۴-۲-۷- بارهای تصادفی ۴۳
۴-۳- بارگذاری محیطی در محیط نرم‌افزار المان محدود ۴۴
۴-۳-۱- بارگذاری درگ ۴۴
۴-۳-۲- بارگذاری اینرسی ۴۴
۴-۳-۲-۱- نیروی فرود کریلوف ۴۵
۴-۳-۲-۲- نیروی جرم افزوده ۴۵
۴-۳-۳- معرفی زیربرنامه Abaqus/Aqua ۴۶
۴-۳-۴- تعریف خواص سیال و جریان محیط ۴۶
۴-۳-۵- تعریف امواج ۴۶
۴-۳-۵-۱- زیربرنامه تعریف تئوری موج دلخواه ۴۷
فصل ۵- روش تحلیل موج افزایشی به‌کمک امواج نامنظم ۵۱
۵-۱- مقدمه ۵۱
۵-۲- ارزیابی سکوهای دریایی ۵۱
۵-۳- حدود شاخص‌های نهایی ۵۲
۵-۴- مدل‌سازی ۵۳
۵-۵- رویکرد احتمالاتی پیشنهاد شده برای بدست آوردن ظرفیت نهایی سکوهای دریایی ۵۴

۵-۶- روش‌های تحلیل ۵۶
۵-۶-۱- تحلیل موج افزایشی با استفاده از شبیه‌سازی‌های امواج نامنظم بلندمدت (۳ ساعته) ۵۷
۵-۶-۲- تحلیل موج افزایشی با استفاده از شبیه‌سازی‌های امواج نامنظم کوتاه‌شده ۶۸
۵-۶-۳- تحلیل موج افزایشی با به‌کارگیری تئوری امواج منظم ۷۵
۵-۶-۴- روش تحلیل بار افزون مرسوم ۷۶
۵-۷- مقایسه نتایج ۷۶
۵-۷-۱- مقایسه نتایج متعین ۷۶
۵-۷-۲- مقایسه نتایج حاصل از رویکرد احتمالاتی ۷۸
۵-۷-۲-۱- منحنی ظرفیت حاصل از صدک ۱۶٪ ۷۸
۵-۷-۲-۲- منحنی ظرفیت حاصل از صدک ۵۰٪ ۷۹
۵-۷-۲-۳- منحنی ظرفیت حاصل از صدک ۸۴٪ ۸۰
فصل ۶- معرفی روش تحلیل موج دوام ۸۱
۶-۱- مقدمه ۸۱
۶-۲- مبانی و کاربرد روش تحلیل موج دوام در ارزیابی سکوهای دریایی ۸۲
۶-۲-۱- مفهوم روش تحلیل موج دوام ۸۲
۶-۲-۲- توابع قطار موج افزایشی ۸۴
۶-۲-۳- ارزیابی سکوهای دریایی به کمک روش تحلیل موج دوام ۸۶
۶-۲-۴- مثال دیگری از کاربرد روش تحلیل موج دوام ۹۴
۶-۳- مقایسه نتایج روش‌های تحلیل موج افزایشی (IWA) و موج دوام (EWA) ۹۹
فصل ۷- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات ۱۰۴
۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۴
۷-۲- پیشنهاد برای مطالعات آتی ۱۰۵
لیست مقالات ارائه شده ۱۰۶
واژه نامه فارسی به انگلیسی ۱۰۷
فهرست مراجع ۱۱۲

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: مقادیر C_D, C_M پیشنهاد آئین‌نامه API-RP2A ۷
جدول ۲-۲: نیمرخ جریان در منطقه پارس جنوبی در نزدیکی عمق ۶۰ متر [۶]. ۸
جدول ۳-۱: مقایسه نتایج مدل موج‌نو و شبیه‌سازی بلندمدت حوزه زمانی [۳۵]. ۳۷
جدول ۳-۲: مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های استوکس مرتبه ۵، CNW و سه شبیه‌سازی ۳ ساعته [۵۴]. ۴۱
جدول ۴-۱: نیروهای جرم افزوده و فرود کریلوف وارد بر اجسام غوطه‌ور. ۴۵
جدول ۵-۱: مشخصات هندسی اعضاء ۵۴
جدول ۵-۲: مشخصات خاک بستر ۵۴
جدول ۵-۳: نتایج آزمون نکوئی برای پاسخ جابه‌جایی عرشه در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته. ۶۱
جدول ۵-۴: نتایج آزمون نکوئی برای مقادیر برش پایه در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته. ۶۳
جدول ۵-۵: خلاصه نتایج ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی به‌کمک امواج تصادفی ۳ ساعته. ۶۴
جدول ۵-۶: نتایج ظرفیت نهایی سکوی مورد نظر با رویکرد احتمالاتی برای امواج نامنظم ۳ ساعته، شامل مقادیر صدک ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪. ۶۷
جدول ۵-۷: خلاصه نتایج ۲۰ سری تحلیل موج افزایشی به‌کمک مدل موج‌نو مقیدشده. ۶۹
جدول ۵-۸: انحراف معیار مقادیر ظرفیت گزارش شده در پایان ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی ۳ ساعته و ۲۰ سری تحلیل موج‌نو مقیدشده. ۷۰
جدول ۵-۹: نتایج آزمون نکوئی برای پاسخ جابه‌جایی عرشه در مقابل امواج موج‌نو مقیدشده. ۷۱
جدول ۵-۱۰: نتایج آزمون نکوئی برای پاسخ‌های برش پایه در مقابل امواج موج‌نو مقیدشده. ۷۴
جدول ۵-۱۱: خلاصه نتایج تحلیل موج افزایشی به‌کمک مدل امواج منظم ایری و استوکس مرتبه ۵. ..... ۷۶
جدول ۵-۱۲: مقادیر متعین ظرفیت نهایی سکوی مورد نظر با رویکردهای متفاوت. ۷۷
جدول ۵-۱۳: مقادیر ظرفیت احتمالاتی صدک ۱۶٪ و سایر روش‌ها. ۷۸
جدول ۵-۱۴: مقادیر ظرفیت احتمالاتی صدک ۵۰٪ و سایر روش‌ها. ۷۹
جدول ۵-۱۵: مقادیر ظرفیت احتمالاتی صدک ۸۴٪ و سایر روش‌ها. ۸۰
جدول ۶-۱: مشخصات هندسی اعضای سکوهای J2D1، J2D2 و J2D3 (میلیمتر). ۸۷
جدول ۶-۲: ترتیب گسیختگی‌های به‌وقوع پیوسته در سکوهای J2D1، J2D2 و J2D3. ..... ۹۳
جدول ۶-۳: نتایج روش تحلیل موج دوام برای سکوهای J2D1، J2D2 و J2D3. ..... ۹۳
جدول ۶-۴: مقایسه مودهای ارتعاش طبیعی مدل با مقادیر واقعی. ۹۴
جدول ۶-۵: زمان محاسبات انجام شده با روش‌های مختلف. ۱۰۳

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: پاسخ معمول سکوهای فراساحل در تحلیل بار افزون [۱۰]. ۹
شکل ۲-۲: نمودار بار افزون استاتیکی سکوی مورد مطالعه [۱۴]. ۱۲
شکل ۲-۳: تأثیر میرایی بر تغییر شکل جانبی سکو [۱۴]. ۱۳
شکل ۲-۴: a) منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی برای ساختمان ۵ طبقه فولادی با پریود ۱.۸ ثانیه در برابر ۳۰ رکورد زمین‌لرزه و b) مقادیر صدک ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ آن در مقیاس لگاریتم [۱۵]. ۱۶
شکل ۲-۵: دو معیار تعیین ظرفیت نهایی سازه برای یک ساختمان ۳ طبقه با قاب خمشی با پریود ۱.۳ ثانیه. a) معیار DM بر اساس $C_{DM} = 0.08$ و b) معیار IM بر اساس معیار شیب ۲۰٪ [۱۵]. ۱۸
شکل ۲-۶: نمودار بار افزون استاتیکی در مقابل نمودار IDA برای a) ساختمان ۲۰ طبقه قاب خمشی، $T_1 = 4\,\text{sec}$ با اتصالات شکل‌پذیر و اثرات $P-\Delta$ و b) ساختمان ۵ طبقه با قاب مهاربندی شده، $T_1 = 1.8\,\text{sec}$ [۱۵]. ۱۹
شکل ۲-۷: مراحل استخراج منحنی ظرفیت و مقادیر متناظر با ظرفیت نهایی سکوی مورد نظر به‌کمک روش تحلیل موج افزایشی [۷، ۱۱]. ۲۰
شکل ۲-۸: منحنی‌های نواری تحلیل دینامیکی موج افزایشی؛ بر حسب جابه‌جایی عرشه (چپ) و ارتفاع موج (راست) [۱۱]. ۲۱
شکل ۲-۹: منحنی خطر برش پایه بدست آمده از تحلیل استاتیکی (چپ) و دینامیکی (راست) موج افزایشی [۱۱]. ۲۱
شکل ۲-۱۰: آزمایش فرضی زمان دوام [۲۳]. ۲۳
شکل ۲-۱۱: آزمایش تست ورزش. ۲۳
شکل ۲-۱۲: تاریخچه زمانی شتاب زمان دوام (ETA20a01) [۲۳]. ۲۴
شکل ۲-۱۳: طیف پاسخ ETA20a01 در زمان‌های مختلف [۲۳]. ۲۵
شکل ۲-۱۴: رویکرد تحلیل زمان دوام در بررسی عملکرد سازه‌ها [۲۵]. ۲۵
شکل ۲-۱۵: منحنی زمان دوام حاصل از سه تابع شتاب افزاینده و مقدار میانگین آن [۲۴]. ۲۶
شکل ۳-۱: مقایسه نیمرخ موج شبه قطعی مرتبه اول و مرتبه دوم. $\overline{\eta}_1$ مولفه مرتبه اول، $\overline{\eta}_2$ مولفه مرتبه دوم و $\overline{\eta} = \overline{\eta}_1 + \overline{\eta}_2$ نیمرخ مجموع [۳۷]. ۳۰
شکل ۳-۲: نیمرخ موج تئوری دوم شبه قطعی [۳۴]. ۳۱
شکل ۳-۳: نیمرخ مولفه مرتبه اول $\overline{\eta}_1$، مولفه مرتبه دوم $\overline{\eta}_2$ و مجموع $\overline{\eta} = \overline{\eta}_1 + \overline{\eta}_2$. با به کارگیری طیف جان سوآپ در آب عمیق [۳۶] ۳۱
شکل ۳-۴: جزئیات دقیق‌تر از شکل ۳-۳، نیمرخ مولفه مرتبه اول $\overline{\eta}_1$ و مجموع $\overline{\eta} = \overline{\eta}_1 + \overline{\eta}_2$ [۳۶]. ۳۲
شکل ۳-۵: (a) نیمرخ مدل‌های اول و دوم شبه قطعی. (b) مولفه نیروی اینرسی در رابطه موریسون. (c) مولفه نیروی درگ در رابطه موریسون. (d) نیروی کل موریسون [۳۹]. ۳۲

شکل ۳-۶: نیمرخ موجنو بر حسب زمان. ۳۴
شکل ۳-۷: مقایسه نیمرخ‌های MLW و NewWave و استوکس مرتبه۵ [۴۰]. ۳۵
شکل ۳-۸: نمونه تاریخچه زمانی موجنو و موجنو مقیدشده. ۳۷
شکل ۳-۹: مقایسه نیمرخ سرعت موج در تئوری‌های NewWave، MLW استوکس مرتبه ۵ [۴۰]. ۳۸
شکل ۳-۱۰: مقایسه نتایج شبیه‌سازی امواج بلندمدت حوزه زمانی و مدل CNW [۴۳]. ۳۸
شکل ۳-۱۱: مقایسه احتمال وقوع پاسخ، با و بدون در نظر گرفتن زمینه تصادفی موج، سمت چپ: با حضور باد و جریان و سمت راست: بدون حضور باد و جریان [۴۶]. ۳۹
شکل ۳-۱۲: مدل ساخته شده از یک FPSO به منظور مطالعه نیروی ضربه موج و پاسخ دینامیکی متناظر [۴۹]. ۴۰
شکل ۴-۱: پیش فرض موقعیت موج در زمان $t = 0$ [۵۷]. ۴۷
شکل ۵-۱: مشخصات هندسی و نحوه مدل خاک اطراف شمع سکوی مورد مطالعه. ۵۳
شکل ۵-۲: پروسه اتخاذشده در این مطالعه به منظور استخراج احتمالاتی منحنی ظرفیت سکوهای دریایی. ۵۵
شکل ۵-۳: مقادیر پاسخ جابه‌جایی عرشه سکو در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته و توابع لگاریتم نرمال ۲ و ۳ پارامتری در سطح شدت $H_s = 14m$. ۵۹
شکل ۵-۴: مقادیر پاسخ جابه‌جایی عرشه سکو در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته و توابع گاما و گامبل در سطح شدت $H_s = 14m$. ۶۰
شکل ۵-۵: مقادیر پاسخ جابه‌جایی عرشه سکو در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته و تابع ویبول در سطح شدت $H_s = 14m$. ۶۰
شکل ۵-۶: توابع احتمالاتی برازش داده شده به مقادیر جابه‌جایی عرشه در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته (راست) و منحنی P-P (چپ) در سطح شدت $H_s = 14m$. ۶۱
شکل ۵-۷: مقادیر پاسخ برش پایه سکو در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته و توابع توزیع برازش داده شده در سطح شدت $H_s = 14m$. ۶۲
شکل ۵-۸: توابع احتمالاتی برازش داده شده به مقادیر برش پایه در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته (راست) و منحنی P-P (چپ) در سطح شدت $H_s = 14m$. ۶۳
شکل ۵-۹: منحنی‌های ظرفیت بدست آمده از ۱۰ سری تحلیل موج افزایشی با استفاده از امواج تصادفی ۳ ساعته و استخراج مقادیر متناظر با حد عملکردی CP ۶۴
شکل ۵-۱۰: منحنی‌های ظرفیت استخراج شده با رویکرد تحلیلی بر روی امواج تصادفی بلندمدت ۳ ساعته. ۶۶
شکل ۵-۱۱: منحنی ظرفیت حاصل از نکوترین توابع توزیع حاکم بر جابه‌جایی عرشه و برش پایه در مقابل امواج نامنظم ۳ ساعته؛ صدک ۱۶٪ چپ، صدک ۵۰٪ وسط و صدک ۸۴٪ راست. ۶۸
شکل ۵-۱۲: منحنی‌های ظرفیت بدست آمده از ۲۰ سری تحلیل موج افزایشی با استفاده از مدل موجنو مقیدشده و استخراج مقادیر متناظر با حد عملکردی CP ۶۹

شکل ۵-۱۳: مقادیر ۲۰ سری تحلیل چندگانه نواری به کمک مدل موج‌نو مقیدشده افزایشی حاصل از ۱۷×۲۰ تحلیل. ۷۱
شکل ۵-۱۴: مقادیر پاسخ جابه‌جایی عرشه سکو در مقابل امواج موج‌نو مقیدشده و توابع توزیع برازش داده شده در سطح شدت $H_s = 8.6m$. ۷۲
شکل ۵-۱۵: توابع احتمالاتی برازش داده شده به مقادیر جابه‌جایی عرشه در مقابل امواج کوتاه‌مدت مقیدشده (راست) و منحنی P-P (چپ) در سطح شدت $H_s = 8.6m$ ۷۲
شکل ۵-۱۶: مقادیر برش پایه سکو در مقابل امواج موج‌نو مقیدشده و توابع توزیع در سطح شدت $H_s = 8.6m$. ۷۳
شکل ۵-۱۷: توابع احتمالاتی برازش داده شده به مقادیر پاسخ برش پایه در مقابل امواج کوتاه‌مدت مقیدشده (راست) و منحنی P-P (چپ) در سطح شدت $H_s = 8.6m$ ۷۳
شکل ۵-۱۸: منحنی‌های ظرفیت استخراج شده با رویکرد تحلیلی بر روی ۲۰ سری تحلیل موج‌نو مقید شده افزایشی. ۷۴
شکل ۵-۱۹: منحنی‌های نواری تحلیل موج افزایشی با استفاده از تئوری امواج منظم ایری و استوکس ۵. ۷۵
شکل ۵-۲۰: منحنی ظرفیت بدست آمده از تحلیل موج افزایشی به استفاده از امواج منظم. ۷۵
شکل ۵-۲۱: منحنی ظرفیت تحلیل بار افزون مرسوم. ۷۶
شکل ۵-۲۲: منحنی‌های ظرفیت بدست آمده با رویکرد احتمالاتی صدک ۱۶٪ برای امواج تصادفی، منظم و بار افزون مرسوم. ۷۸
شکل ۵-۲۳: منحنی‌های ظرفیت بدست آمده با رویکرد احتمالاتی صدک ۵۰٪ برای امواج تصادفی، منظم و بار افزون مرسوم. ۷۹
شکل ۵-۲۴: منحنی‌های ظرفیت بدست آمده با رویکرد احتمالاتی صدک ۸۴٪ برای امواج تصادفی، منظم و بار افزون مرسوم. ۸۰
شکل ۶-۱: مقایسه آزمایش تست ورزش، روش تحلیل زمان دوام و تحلیل موج دوام. ۸۳
شکل ۶-۲: قرارگیری سیستم‌های سازه‌ای در برابر توابع قطار موج افزایشی و مفهوم روش تحلیل موج دوام. ۸۴
شکل ۶-۳: نیمرخ موج‌نو مقیدشده افزایشی جهت انجام تحلیل موج دوام (چپ) و تابع شتاب افزایشی جهت انجام تحلیل زمان دوام (راست) [۲۴]. ۸۶
شکل ۶-۴: سکوهای نمونه مورد مطالعه؛ J2D1 (چپ)، J2D2 (وسط) و J2D3 (راست). ۸۷
شکل ۶-۵: تاریخچه زمانی موج‌نو مقیدشده افزایشی جهت انجام تحلیل موج دوام. ۸۸
شکل ۶-۶: تاریخچه زمانی پاسخ جابه‌جایی عرشه سکوهای J2D1 (چپ)، J2D2 (وسط) و J2D3 (راست). ۸۸
شکل ۶-۷: منحنی موج دوام سکوهای J2D1 (چپ)، J2D2 (وسط) و J2D3 (راست) بر حسب جابه‌جایی عرشه. ۸۹

شکل ۶-۸: مقادیر شتاب جابه‌جایی عرشه سکوهای J2D1 (چپ)، J2D2 (وسط) و J2D3 (راست) در مقابل توابع قطار موج افزایشی. ۹۰
شکل ۶-۹: منحنی موج دوام سکوهای J2D1، J2D2 و J2D3 بر اساس جابه‌جایی عرشه (چپ) و برش پایه (راست). ۹۰
شکل ۶-۱۰: منحنی ظرفیت حاصل از تحلیل موج دوام برای سکوهای J2D1 (چپ)، J2D2 (وسط) و J2D3 (راست). ۹۱
شکل ۶-۱۱: پوش منحنی ظرفیت حاصل از تحلیل موج دوام برای سکوهای J2D1 (چپ)، J2D2 (وسط) و J2D3 (راست). ۹۱
شکل ۶-۱۲: ظرفیت سکوهای مورد مطالعه بر حسب ارتفاع موج. ۹۲
شکل ۶-۱۳: منحنی‌های اتلاف انرژی ناشی از پلاستیک شدن رفتار سیستم برای سکوهای مورد مطالعه. ۹۲
شکل ۶-۱۴: وضعیت سکوهای J2D1، J2D2 و J2D3 در زمان‌های بحرانی. ۹۳
شکل ۶-۱۵: سکوی Judy و تصویر سه‌بعدی مدل عددی آن. ۹۴
شکل ۶-۱۶: نیمرخ موج‌نو مقیدشده افزایشی بر اساس طیف جان سوآپ. ۹۷
شکل ۶-۱۷: نمای سه‌بعدی از سکوی Judy در لحظه شکست نهایی (چپ) و منحنی ظرفیت (راست). ۹۷
شکل ۶-۱۸: منحنی جابه‌جایی عرشه بدست آمده از تحلیل موج دوام بر حسب زمان. ۹۸
شکل ۶-۱۹: نسبت برش پایه موج‌نو مقیدشده افزایشی به برش پایه ظرفیت سکو. ۹۸
شکل ۶-۲۰: منحنی ظرفیت روش تحلیل موج دوام و روش تحلیل موج افزایشی (موج ایری). ۹۹
شکل ۶-۲۱: منحنی ظرفیت روش تحلیل موج دوام و روش تحلیل موج افزایشی (موج استوکس مرتبه ۵). ۹۹
شکل ۶-۲۲: منحنی ظرفیت روش تحلیل موج دوام و روش تحلیل موج افزایشی (امواج تصادفی ۳ ساعته)، صدک ۱۶٪. ۱۰۰
شکل ۶-۲۳: منحنی ظرفیت روش تحلیل موج دوام و روش تحلیل موج افزایشی (امواج تصادفی ۳ ساعته)، صدک ۵۰٪. ۱۰۰
شکل ۶-۲۴: منحنی ظرفیت روش تحلیل موج دوام و روش تحلیل موج افزایشی (امواج تصادفی ۳ ساعته)، ۸۴٪. ۱۰۱
شکل ۶-۲۵: منحنی ظرفیت روش تحلیل موج دوام و روش تحلیل موج افزایشی (موج‌نو مقیدشده)، صدک ۱۶٪. ۱۰۱
شکل ۶-۲۶: منحنی ظرفیت روش تحلیل موج دوام و روش تحلیل موج افزایشی (موج‌نو مقیدشده)، صدک ۵۰٪. ۱۰۲
شکل ۶-۲۷: منحنی ظرفیت روش تحلیل موج دوام و روش تحلیل موج افزایشی (موج‌نو مقیدشده)، صدک ۸۴٪. ۱۰۲
شکل ۶-۲۸: منحنی ظرفیت روش تحلیل موج دوام و روش بار افزون مرسوم. ۱۰۳

فصل ۱– کلیات

۱–۱– مقدمه

برآورد و تخمین درست بارهای محیطی، مهمترین عامل تعیین‌کننده در طراحی بهینه یک سازه دریایی در طول عمر بهره‌برداری آن می‌باشد. در طراحی سکوهای دریایی، بارهای محیطی شامل بار امواج و بارهای وارد شده در مراحل مختلف ساخت، حمل و نصب نقش غالب را دارند. در مورد سازه‌های قرارگرفته در اعماق محدود و در شرایطی که پریود غالب موج به مراتب بالاتر از ارتعاش طبیعی سازه باشد، می‌توان بار امواج را به صورت استاتیکی معادل بر سازه اعمال نمود. با این وجود، نیروی حاصل از برخورد امواج به سازه ماهیت دینامیکی دارد و با افزایش عمق آب و انعطاف‌پذیر شدن رفتار سیستم، تحلیل‌های تاریخچه زمانی ضرورت یافته و عموماً به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و نزدیک به واقعیت، انجام تحلیل دینامیکی برای تمامی سکوهای دریایی الزامی خواهد بود.

روش‌های مختلفی به منظور ارزیابی رفتار انواع سازه‌های دریایی در برابر نیروی امواج معرفی شده‌اند. تحلیل بار افزون (پوش‌آور[1]) مرسوم، تحلیل استاتیکی غیرخطی افزاینده است که در آن بارگذاری جانبی با شرایط حالت طراحی به سازه اعمال می‌شود. گام به گام با افزایش شدت بارگذاری، سازه تحلیل می‌شود تا اینکه آسیب وارده به سازه به حد معینی برسد یا اینکه سازه دچار فروریزش گردد. در نظر نگرفتن پدیده موج‌برعرشه[2]، بزرگتر بودن حدود دوره بازگشت امواج عامل خرابی از مقدار ۱۰۰ ساله و پنهان ماندن رفتار سازه در مقابل سطوح مختلف خطر موج[3] از عمده‌ترین کمبودهای روش بار افزون می‌باشد. همچنین در این تحلیل از اثرات دینامیکی شامل محتوای فرکانسی و مدت زمان بار اعمالی نیز چشم‌پوشی می‌شود.

اخیراً روشی با عنوان تحلیل استاتیکی و یا دینامیکی موج افزایشی (SIWA, DIWA)[4] به منظور ارزیابی عملکرد سکوهای دریایی در برابر نیروی امواج پیشنهاد شده است که مبنای آن روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)[5] می‌باشد. در این روش مجموعه‌ای از ارتفاع امواج منظم با نرخ افزایشی در گام‌های محاسباتی متعدد به صورت منفرد و تک‌تک به سازه اعمال می‌شود تا مرحله‌ای که گسیختگی نهایی در سیستم سازه‌ای مشاهده شود. نزدیک بودن شرایط بارگذاری به الگوی واقعی بار امواج، در نظرگرفتن پدیده موج‌برعرشه و برقراری ارتباط با سطوح مختلف خطر موج از ویژگی‌های برجسته روش تحلیل موج افزایشی می‌باشد.

با این وجود، بدلیل استفاده از امواج منظم در روش تحلیل موج افزایشی ارائه شده، همچنان بر روی نتایج آن جای بحث وجود خواهد داشت. استفاده از تئوری امواج منظم، ماهیت تصادفی بودن امواج و

[1] Push-over
[2] Wave-in-Deck
[3] Wave Hazard Levels
[4] Static or Dynamic Incremental Wave Analysis
[5] Incremental Dynamic Analysis

تأثیر امواج با پریودهای مختلف بر روی پاسخ سازه پنهان می‌ماند. در واقع، حداکثر پاسخ دینامیکی یک سازه دریایی تحت اثر امواج برخوردی، همیشه با وقوع حداکثر تراز آب (موج) همزمان نخواهد بود. پاسخ حداکثر، عمیقاً به تأثیر قله موج بیشینه و زمینه نامساعد ذخیره‌شده در حافظه سازه در اثر امواج کوتاه‌تر قبلی و با تواترهای مختلف، وابسته می‌باشد. به بیان دیگر، بارهای محیطی دریا ماهیت تصادفی دارند و جهت دستیابی به نتایج قابل اطمینان، انجام تحلیل‌های احتمالاتی بر روی نتایج ضروری خواهد بود.

بنابراین دقت مناسب نتایج در رویکرد فعلی روش تحلیل موج افزایشی که پاسخ سازه صرفاً در مقابل برخورد یک موج واحد که به صورت آنی شکل‌گرفته است، مورد تردید خواهد بود. با توجه به موارد ذکر شده، مطلوب به نظر می‌رسد که اثر پیشینه و سیر شکل‌گیری و تکامل ارتفاع امواج ورودی بر روی نتایج تحلیل موج افزایشی مورد تحقیق قرار گیرد. برای این هدف، تولید و شبیه‌سازی امواج نامنظم طیفی بلندمدت (حدود ۳ ساعت) الزامی خواهد بود.

در مقابل، به‌منظور شبیه‌سازی دقیق طبیعت امواج و لحاظ شدن اثر همه حالت‌های ممکن بارگذاری، به‌کارگیری تعداد زیادی تاریخچه‌های زمانی نامنظم تراز سطح آب و روش حل مستقیم معادلات حرکت در دامنه زمان توصیه می‌شود که امری زمان‌بر، پرهزینه و تفسیر نتایج خروجی نیز به لحاظ حجم بالای داده‌های آن دشوار خواهد بود. به همین دلیل، تلاش‌هایی جهت معرفی مدل‌های کوتاه‌مدت در طی سال-های گذشته انجام شده است که این مدل‌های پیشنهادی معمولاً بر تحلیل‌های حوزه زمانی استوار بوده‌اند. ویژگی اصلی این مدل‌ها اینست که اولاً محتوی امواج با ارتفاع‌های مختلف و فرکانس‌های متفاوت هستند، ثانیاً با مدت زمان‌هایی در حدود ۶۰ تا ۶۰۰ ثانیه، کوتاه‌مدت تلقی شده و موجب کاهش قابل توجه در هزینه و زمان محاسبات خواهند شد. ثالثاً در برگیرنده ارتفاع بیشینه مورد انتظار نیز می‌باشند. تئوری موج‌نو[1] و موج‌نو مقیدشده[2] نمونه‌ای از تاریخچه‌های امواج کوتاه‌مدت تصادفی می‌باشند.

به عنوان یکی از اهداف این پایان‌نامه، تأثیر تصادفی بودن نیمرخ تراز سطح آب در نتایج روش تحلیل موج افزایشی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا، به‌منظور انجام تحلیل تصادفی امواج نامنظم افزایشی، علاوه بر شبیه‌سازی بلندمدت (۳ ساعته) امواج نامنظم، تحلیل‌های مشابه‌ای با استفاده از مدل موج‌نو مقیدشده انجام شده است تا کفایت مدل‌های کوتاه‌مدت مقیدشده نیز در تحلیل موج افزایشی مورد ارزیابی قرار گیرد.

از سوی دیگر، یکی از رویکردهای نوین که برای ارزیابی سازه‌ها در برابر تحریکات دینامیکی زلزله ارائه شده است، روش تحلیل زمان دوام (ETA)[3] می‌باشد. تحلیل زمان دوام نوعی تحلیل تاریخچه زمانی است که در زمان‌های مشخص (زمان‌های هدف)، طیف پاسخ آن برابر با طیف طرح متناظر با سطح خطر مورد نظر خواهد بود. در این روش، سازه در معرض یک تابع شتاب فزاینده مصنوعی قرار گرفته و در طول تحلیل مقادیر شاخص خرابی و یا هر پارامتر نیاز مهندسی[4] دیگر (مانند برش پایه، جابه‌جایی نسبی

[1] NewWave Theory
[2] Constrained NewWave Theory
[3] Endurance Time Method
[4] Engineering Demand Parameter (EDP)

طبقات و مقادیر مجاز تنش و کرنش اعضاء) را می‌توان برحسب متغیر زمان مورد مطالعه قرار داد. این روش هیچگونه محدودیتی به‌لحاظ پیچیدگی‌های مدل‌سازی نداشته و به کمک آن می توان ضوابط مختلف طراحی را با صرف زمان و هزینه محاسباتی کمتر مورد مطالعه قرار داد.

به عنوان هدفی دیگر در این پایان‌نامه، سعی شده است با رویکردی نسبتاً مشابه با مفاهیم روش تحلیل زمان دوام و تولید توابع قطار موج افزایشی[1] متناسب با طیف امواج محل، روشی مؤثر با عنوان تحلیل موج دوام (EWA)[2] به‌منظور تحلیل، طراحی و ارزیابی سازه‌های دریایی در برابر تحریکات تصادفی ناشی از نیروی امواج معرفی گردد.

۱-۲- روش انجام تحقیق

به‌منظور دستیابی به اهداف مورد نظر پایان‌نامه، دو سکوی دریایی با مشخصات نزدیک به سکوهای دریایی مستقر در خلیج فارس و دریای شمال[3] مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. برای مدل‌سازی عددی سکوهای اشاره شده از نرم‌افزار المان محدود Abaqus استفاده شده است. دارا بودن زیر برنامهٔ Abaqus/Aqua با قابلیت مدل کردن شرایط دریایی از قبیل بارگذاری موج، جریان، باد و شناوری به صورت استاتیکی و دینامیکی، و نیز امکان برنامه‌نویسی و الحاق زیربرنامه‌های[4] مورد نظر دلایل ترغیب به استفاده از این نرم‌افزار بوده است. برای مدل اعضاء سازه‌ای از المان‌های Beam21 و Beam31، با مقطع Pipe استفاده شده است. قابلیت اعمال بارگذاری شرایط دریایی و نیز امکان استفاده آن در تحلیل‌های خطی و غیرخطی از خصوصیات این المان می‌باشد.

برای انجام تحلیل بار افزون استاتیکی، از مدول Static Riks در Abaqus استفاده شده است. در این تحلیل رفتار کمانشی اعضاء و نیز اثرات غیرخطی هندسی و مصالح در نظر گرفته می‌شود. بارگذاری جانبی در این تحلیل، بیشینه بار استاتیکی ناشی از گذر موج در یک پریود به‌اضافه بار ناشی جریان در نظر گرفته شده است.

به منظور انجام تحلیل‌های مورد نیاز در بخش تحلیل موج افزایشی و معرفی روش تحلیل موج دوام، از تحلیل دینامیکی غیرخطی Dynamic/implicit استفاده شده و در آن اثرات غیرخطی هندسی منظور شده است. همچنین جهت تولید امواج کوتاه‌مدت مقیدشده و توابع قطار موج افزایشی تعداد زیادی زیر-برنامه به زبان FORTRAN تدوین شده است که قابلیت الحاق و پردازش موازی با ماشین محاسباتی Abaqus را خواهد داشت

[1] Intensifying Wave Train Functions (IWTFs)
[2] Endurance Wave Analysis (EWA)
[3] North sea
[4] Subroutine

۱-۳- ساختار پایان نامه

این پایان‌نامه در هفت فصل گردآوری شده است که به ترتیب از فصل دوم تا فصل هفتم معرفی می-شوند:

در فصل دوم ابتداء بارهای محیط دریا شامل بار امواج، جریان و باد معرفی می‌شوند. پس از مرور مختصری بر مبانی امواج منظم و نامنظم طیفی، تئوری‌های موریسون[۱]، فرود کریلوف[۲] و تفرق[۳] به منظور محاسبه بار امواج تشریح می‌شوند.

در ادامه این فصل به معرفی مفاهیم و تحقیقات انجام شده در رابطه با تحلیل تحلیل بار افزاینده (Push-over)، تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)، تحلیل موج افزایشی (IWA) و روش زمان دوام (ETA) پرداخته شده است. در این فصل در مورد الگوریتم انجام هر یک از این تحلیل‌ها توضیح داده شده است.

در فصل سوم مبانی امواج کوتاه‌مدت تصادفی و کاربرد آن‌ها در تحلیل سازه‌های دریایی فراساحل معرفی می‌شوند. با به‌کارگیری این تئوری امواج، می‌توان نتایجی نزدیک به آنچه از شبیه‌سازی‌های بلند مدت امواج نامنظم بدست می‌آید، دست یافت.

با توجه به ضرورت شناخت و آشنایی با توانایی‌های نرم‌افزار المان محدود Abaqus، در فصل چهارم ابتداء به معرفی و شناخت المان‌های مورد استفاده در مدل‌سازی سازه‌های فراساحل در مقابل بارگذاری امواج شامل المان Beam، Spring و Mass پرداخته شده است. در ادامه، جزئیات زیربرنامه مورد استفاده جهت مدل‌سازی امواج طیفی تصادفی و مدل‌های کوتاه‌مدت مقیدشده تشریح شده است.

انجام روش تحلیل موج افزایشی با به‌کارگیری تئوری امواج تصادفی بلندمدت و کوتاه‌مدت در فصل پنجم آمده است. به منظور ارائه نتایج غیر متعین، یک رویکرد جدید احتمالاتی برای استخراج منحنی ظرفیت سکوهای دریایی پیشنهاد شده است.

در فصل ششم با الهام از روش تحلیل زمان دوام در مطالعات لرزه‌ای، روشی جدید با عنوان تحلیل موج دوام معرفی می‌شود. این روش را می‌توان برای طراحی و ارزیابی سازه‌های دریایی در برابر نیروی امواج استفاده نمود.

نهایتاً در فصل هفتم نتایج مطالعات انجام شده در پایان‌نامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در قسمت آخر نیز نتیجه‌گیری‌های کلی و پیشنهاد برای ادامه تحقیقات ارائه شده است.

[1] Morison Equation Theory
[2] Froud-Krylov Theory
[3] Diffraction Theory

فصل ۲– مروری بر ادبیات فنی

۲–۱– مقدمه

۲–۲– بارگذاری محیط دریا

نیروهای محیطی در اثر پدیده‌های طبیعی به یک سازه دریایی وارد می‌شوند که شامل بارهای باد، جریان، موج، زلزله، برخورد برف، یخ و حرکات زمین می‌باشند. تغییر در نیروهای هیدرواستاتیک و شناوری در اثر تغییرات سطح تراز آب را نیز می توان جزء این دسته از بارها دانست.

۲–۳– بارگذاری نیروی امواج

نیروی حاصل از برخورد امواج به سازه‌های دریایی، ماهیت دینامیکی دارد اما در مورد سازه‌های قرار گرفته در اعماق محدود و سازه‌هایی که پریود طبیعی پایینی (حدود کمتر از سه ثانیه) دارند، این امکان وجود دارد که این بار را به صورت استاتیکی معادل بر سازه اعمال نمود [۲،۱]. نیروی ناشی از موج بر روی سازه سکو به سه روش قابل محاسبه است [۳]:

الف) استفاده از رابطه موریسون[۱].

ب) استفاده از تئوری فرود-کریلوف[۲].

ج) استفاده از تئوری تفرق[۳].

رابطه موریسون نیروی کل را از جمع خطی دو نیروی درگ[۴] و اینرسی[۵] بدست می‌آورد. رابطه موریسون زمانی معتبر خواهد بود که ابعاد عضو نسبت به طول موج برخوردی کوچک باشد. در شرایطی که نیروی اینرسی حاکم است اما ابعاد سازه به نسبت کوچک است، تئوری فرود-کریلوف کاراتر و دقیق‌تر خواهد بود. برتری این روش نسبت به تئوری تفرق این است که رابطه نیرو برای اجسام با اشکال مشخص و متقارن، به‌صورت یک رابطه بسته[۶] قابل محاسبه خواهد بود و محاسبه ضرائب ثابت آن در حالت کلی ساده می‌باشد. چنانچه ابعاد سازه به نسبت طول موج برخوردی بزرگ باشد، وجود سازه سبب ایجاد تغییر در میدان موج در ناحیه همسایگی سازه خواهد شد. در این حالت تفرق نقش مهمی در تعیین نیروی وارد بر سازه دارد. در این شرایط از تئوری تفرق برای محاسبه نیروی وارده استفاده می‌شود که برای حالات

[1] Morison Equation
[2] Froud-Krylov Theory
[3] Diffraction Theory
[4] Drag Force
[5] Inertia Force
[6] Close Form

ساده رابطه‌های بسته‌ای وجود دارد اما در حالت کلی معادله لاپلاس بدست آمده از این تئوری به همراه شرایط مرزی باید بصورت عددی حل گردد [۳].

در عمل، در صورتیکه نسبت قطر عضو به طول موج D/L کمتر از ۰/۱ باشد، رابطه موریسون معتبر می‌باشد [۳]. در سازه‌های دریایی با المان‌های استوانه‌ای و لاغر مانند سکوها، معمولاً شرایط استفاده از رابطه موریسون برقرار است. در برخی از آیین‌نامه‌ها مانند DNV-RP-C205 حد D/L را برای استفاده از رابطه موریسون ۰/۲ در نظر می‌گیرند [۴].

رابطه موریسون در حالت کلی و با لحاظ کردن پارامترهای ثابت به‌صورت رابطه (۲-۱) بیان می‌شود [۵].

$$f = \frac{1}{2} C_D \rho D u|u| + C_M \frac{\pi}{4} \rho D^2 \dot{u} \qquad (۲-۱)$$

f : نیرو در واحد طول عضو.

C_M: ضریب اینرسی.

C_D: ضریب درگ.

u: سرعت ذرات آب.

$\dot{u}$: شتاب ذرات آب.

D: قطر عضو.

ρ: چگالی آب.

منابع فراوانی برای مقادیر C_M و C_D وجود دارد که برحسب شکل مقطع، نوع جریان و جنس استوانه روابط متنوعی را ارائه می‌کنند.

رابطه (۲-۱) نیرو در واحد طول عضو استوانه عمودی را خواهد داد، در حالت کلی نیرو و لنگر کل وارد شده بر عضو، بصورت روابط (۲-۲) و (۲-۳) محاسبه می‌شود [۵].

$$F = \int_{y_1}^{y_2} f(y)\, dy \qquad (۲-۲)$$

$$M = \int_{y_1}^{y_2} y\, f(y)\, dy \qquad (۲-۳)$$

۲-۳-۱- ضرایب درگ و اینرسی

عوامل زیادی بر روی مقدار ضرایب C_M و C_D مؤثر می‌باشند، از جمله این عوامل می‌توان به زبری نسبی سطح[1] $e = k/D$، عدد رینولدز[2] $R_m = U_m D/\upsilon$، عدد کلوگن کارپنتر[3] $K = U_m T/D$، نسبت

[1] Relative Surface Roughness
[2] Reynolds Number
[3] Keulegan-Carpenter Number