دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

رساله دکتری عمران ـ گرایش سازه

موضوع رساله

توسعه مدلهای عددی برای در نظرگرفتن انعطاف پذیری و تسلیم اتصالات لوله ای سکوهای فلزی دریایی

استاد راهنما

دکتر بهروز عسگریان

دانشجو

پژمان النجری

زمان: شهریور یکهزار و سیصد و نود و یک

تقدیم به مادر، پدر و خواهر عزیزم

تشکر و قدردانی

در این پایان نامه افراد مختلفی سهم شایان توجهی داشتند که قدردانی از تمامی آنها میسر نیست. اما بدون شک سهم جناب آقای دکتر بهروز عسگریان استاد راهنمای بنده بیش از سایرین بوده است. ایشان بسیار سختکوش، تلاشگر و دارای اطلاعات به روز هستند و همواره از نظرات دانشجو استقبال می نمایند. اگر من موفقیتی در این رشته به دست آورده ام همیشه فرد سختکوشی مثل ایشان را الگوی کارخود قرار داده ام.

مادر و پدرم نیز همواره در موفقیت های من سهم عمده ای داشته اند. زندگی در شرایط کنونی در کشور ما پیچ و خم های بسیار زیادی دارد چه برسد به اینکه فرد پرتوقعی مثل من نیز مورد بررسی باشد. اما هردوی آنها همیشه در کنار من بوده اند و سنگ صبوری برای مشکلات من بوده اند. از مادر و پدر عزیزم نیز کمال تشکر را دارا می باشم.

دوستان گرانقدری نیز در این راه به من کمک کرده اند مانند آقای مهندس مهدی کیا دوست خوبم که در برنامه نویسی کمکهای ارزنده ای را به من ارائه دادند، از ایشان نیز ممنونم.

دوستانی چون مهندس حمید رحمانی سامانی دانشجوی دکتری دانشگاه خواجه نصیر و مهندس محمد ابراهیمی و سرکار خانم آناهیتا نوروزی دانشجویان فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشگاه خواجه نصیر نیز کمک شایانی را در مدلسازی به من داشته اند و از آنها نیز نهایت تشکر را دارا هستم.

از آقایان دکتر آقاکوچک، دکتر بهاری، دکتر یحیایی و دکتر زین الدینی اساتید ممتحن بنده که این پایان نامه را مطالعه فرمودند نیز متشکرم.

با تشکر پژمان النجری

چکیده

سکوهای دریایی به عنوان سازه های استراتژیک کشورهای نفت خیز در حال توسعه، از جمله سازه هایی هستند که می بایست در مقابل نیروهای محیطی از جمله بارهای ناشی از امواج، زلزله، پایداری و مقاومت کافی داشته باشند. با پیشرفت علوم مرتبط به رایانه، امروزه مدلسازی عددی سازه ها و همچنین بارهای محیطی میسر گشته است و می توان رفتار هرگونه سیستم سازه ای را با دقت کافی مدلسازی نمود اما همواره این پرسش مطرح بوده است که مدل عددی برپایه چه مفهوم ریاضی خاصی و بر اساس کدام رفتار خاص سازه انتخاب می گردد تا بتواند رفتار سازه را بدرستی شبیه سازی نماید. در این رساله مدل عددی مناسب برای درنظرگرفتن تاثیر انعطاف پذیری و تسلیم اتصالات سکوهای دریایی (سه المان مجزا؛ المان دوبعدی انعطاف پذیری و تسلیم خطی و غیرخطی، المان سه بعدی انعطاف پذیری خطی و المان دو بعدی انعطاف پذیری اندرکنشی) بر پایه مفاهیم فیزیک حاکم بر رفتار اتصالات لوله ای معرفی گردیده و در هر مرحله تئوری حاکم بر فرمولاسیون المانها به تشریح بررسی گردیده و با نتایج آزمایشگاهی و یا عددی صحت آن بررسی شده است. المانهای معرفی شده در این پایان نامه ماهیت تک محوری دارند و المانهای بسیار ساده ای هستند که می توانند با المانهای سه بعدی چند محوری پوسته ای رقابت کنند. سرعت و دقت استفاده از المانهای انعطاف پذیری اتصالات این تحقیق در مدلسازی کلی یک سکوی دریایی استفاده از آنان را بسیار مطلوب می سازد. در پایان نتیجه گیری می شود که با استفاده از المانهای معرفی شده در این تحقیق، انعطاف پذیری و تسلیم اتصالات لوله ای سکوهای دریایی به سادگی مدلسازی می شود. همچنین مواردی همچون سختی سکو، توزیع نیروها در اتصالات و پریود ارتعاشی سکو با درنظرگرفتن انعطاف پذیری سکوهای دریایی دقیق تر بدست می آید.

کلمات کلیدی: اتصالات لوله ای، انعطاف پذیری موضعی، تسلیم اتصال، اندرکنش انعطاف پذیری، معادلات انعطاف پذیری، اتصالات ضربدری لوله ای.

فهرست عناوین

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ حوزه مطالب ارائه شده در این رساله ۳

۱-۳ اهداف مورد نظر تحقیق ۳

۱-۴ بررسی سرفصل های تحقیق در یک نگاه ۴

۱-۵ پیشینه مطالعات انجام شده در زمینه اتصالات لوله ای ۵

فصل دوم: اتصالات لوله ای از دیدگاه آئین نامه ها **۱۳**

۳-۱ کلیات ۱۴

۳-۱-۱ مقاومت اتصال ۱۴

۳-۱-۱-۱ اثر هندسه و بارگذاری عضو فرعی در مقاومت ۱۶

۳-۱-۱-۲ اثر تنش در عضو اصلی در مقاومت ۱۸

۳-۱-۱-۳ اندرکنش نیروهای انتقالی از اعضاء فرعی ۱۹

۳-۱-۱-۴ دامنه صحت روابط ارائه شده در آئین نامه ها ۲۰

۳-۱-۲ طبقه بندی اتصالات ۲۱

۳-۱-۳ ارائه جزئیات طرح اتصال ۲۲

۳-۱-۳ ضرائب اطمینان ۲۲

۳-۲ آیین نامه API-RP2A-WSD ویرایش های قبل از ویرایش۲۲ - شرح کامل ۲۳

۳-۳ آئین نامهAPI-RP2Aویرایش ۲۲ ..... ۲۷

۳-۴ آئین نامه ANSI/AISC 360-05 ویرایش سال ۲۰۰۵ ..... ۳۰
۳-۴-۱ بدست آوردن ظرفیت محوری اتصال ۳۱
۳-۴-۲ بدست آوردن ظرفیت خمشی اتصال تحت خمش درون صفحه ۳۲
۳-۴-۳ بدست آوردن ظرفیت خمشی اتصال تحت خمش برون صفحه ۳۳
۳-۴-۴ رابطه اندرکنشی ۳۴
۳-۴-۵ محدوده مجاز استفاده از روابط این آئین نامه ۳۴
۳-۵ انعطاف پذیری در آئین نامه API ۳۵
فصل سوم: اتصالات لوله ای دوبعدی غیرخطی ۳۶
۳-۱ اتصالات لوله ای ۳۷
۳-۲ انواع اتصالات لوله ای ۳۷
۳-۳ انواع گسیختگی در اتصالات لوله ای ۴۱
۳-۴ فیزیک ناحیه اتصال ۴۳
۳-۵ مدلهای اتصال لوله ای ۴۵
۳-۵-۱ مدلسازی اتصالات لوله ای مرکب توسط اتصالات ساده تر ۴۷
۳-۶ رفتار غیرخطی اتصالات لوله ای تحت بارهای مونوتونیک ۴۸
۳-۷ المان اتصال لوله ای دوبعدی غیرخطی پیشنهادی این پایان نامه ۵۰
۳-۷-۱ مرحله اول: رابطه سازی براساس نرمی ۵۰
۳-۷-۲ روابط انعطاف پذیری معرفی شده توسط محققین مختلف ۵۵
۳-۷-۳ مرحله دوم: سیستم مختصات پایه ۵۶
۳-۷-۴ مرحله سوم: انتقال به سیستم مختصات کلی ۶۱

۳-۷-۵ مرحله چهارم: انتقال از سیستم مختصات پایه به سیستم مختصات دارای ۶ درجه آزادی ۶۲
۳-۷-۶ اندرکنش لنگر خمشی و نیروی محوری و مدلسازی آن توسط المان ۶۵
۳-۷-۷ مرحله پنجم: تسلیم اتصال و بسط معادلات تسلیم اندرکنشی برای المان پیشنهادی ۶۶
۳-۷-۸ ایجاد المان توسط برنامه نویسی شئ گرا ۶۸
۳-۸ صحت سنجی نتایج حاصل از استفاده از المان پیشنهادی ۷۴
۳-۸-۱ تک اتصال تحت نیروی محوری و لنگر خمشی ۷۴
۳-۸-۱-۱ Wang and Chen ۷۴
۳-۸-۱-۲ Jubran and Cofer ۷۸
۳-۸-۱-۳ ترکیب لنگر خمشی و نیروی محوری ۸۱
۳-۸-۲ مدلسازی سکوهای دریایی ۸۵
۳-۸-۲-۱ قاب Zayas و همکاران ۸۶
۳-۸-۲-۲-قاب هنرور و همکاران ۹۳
فصل چهارم: اتصالات لوله ای سه بعدی خطی **۹۹**
۴-۱ کلیات ۱۰۰
۴-۲ انعطاف پذیری سه بعدی ۱۰۰
۴-۳ لنگر برون صفحه ۱۰۱
۴-۴ تشکیل ماتریس نرمی المان سه بعدی ۱۰۲
۴-۵ تبدیل ازسیستم مختصات پایه به سیستم مختصات کلی ۱۰۸

۴-۶ صحت سنجی المان سه بعدی انعطاف پذیری طراحی شده در این تحقیق ۱۱۰
۴-۶-۱ مدلهای اتصال ۱۱۲
۴-۶-۲ مدلهای سکو ۱۱۶
۴-۶-۲-۱ سکوی فرضی ۱۱۶
۴-۶-۲-۲ بررسی پاسخ سکوی نمونه قدیمی در منطقه خلیج فارس ۱۲۱
فصل پنجم: اتصالات لوله ای دوبعدی اندرکنشی **۱۲۷**
۵-۱ کلیات ۱۲۸
۵-۲ بحث راجع به ضرورت وجود المان انعطاف پذیری اندرکنشی ۱۲۸
۵-۳ تعریف المان اندرکنشی ۱۳۰
۵-۴ روابط انعطاف پذیری ۱۳۳
۵-۵ ماتریس سختی کلی ۱۴۳
۵-۶ تحلیل اتصالات لوله ای با استفاده از المان انعطاف پذیری اندرکنشی ۱۴۵
۵-۶-۱ صحت سنجی در مقیاس اتصال ۱۴۵
۵-۶-۲ صحت سنجی در مقیاس سازه ۱۵۰
فصل ششم: نتیجه گیری **۱۵۶**
۶-۱ نتیجه گیری ۱۵۷
۶-۲ ارائه پیشنهادات ۱۵۹
منابع و ماخذ **۱۶۳**
پیوست ۱: اثر انعطاف پذیری موضعی اتصالات لوله ای در محاسبه عمر خستگی سکوهای دریایی **۱۶۸**

پ ۱-۱ مقدمه ۱۶۹
پ ۱-۲ تعاریف ۱۶۹
پ ۱-۲-۱ منحنی‌های تنش-عمر ۱۷۰
پ ۱-۲-۲ آنالیز تعیینی خستگی ۱۷۲
پ ۱-۲-۳ آنالیز طیفی خستگی ۱۷۳
پ ۱-۳ حل معادله موج و تبدیل آن به نیروهای قابل کاربرد در نرم افزار ۱۷۸
پ ۱-۴ نتایج آنالیز مودال ۱۷۸
پ ۱-۶ نتایج آنالیز طیفی خستگی ۱۸۰
پیوست ۲: لیست برنامه های مادر المان های ایجاد شده در این تحقیق ۱۸۸
پ ۲-۱ لیست المان دو بعدی غیرخطی ۱۸۹
پ ۲-۲ لیست برنامه المان سه بعدی ۲۰۲

فهرست جداول:

جدول ۲-۱- مقادیر ضریب Q_u در آیین نامه های مختلف ۱۴

جدول ۲-۲- مقادیر ضریب Q_f در آئین نامه های مختلف ۱۶

جدول ۲-۳ روابط اندرکنشی نیروی محوری و لنگرهای خمشی در آئین نامه های مختلف ۱۸

جدول ۲-۴- دامنه صحت روابط ارائه شده در آئین نامه ها ۱۹

جدول ۲-۶- مقادیر ضریب C_1 تا C_3 ..... ۲۷

جدول ۲-۷- مقادیر ضریب Qu ۲۷

جدول ۳-۱-مقایسه نتایج آزمایشگاهی Wang and Chen ونرم افزار OpenSees ۷۵

جدول ۳-۲- مشخصات نمونه های آزمایشگاهی Jubran & Cofer ۷۷

جدول ۳-۳ مقایسه نتایج فرمولهای API ،Billington و بار کمانش مهاربندیهای سکوی Zayasو همکاران ۸۹

جدول ۳-۴- مقایسه نتایج فرمولهای API،Billington و بار کمانش مهاربندی های سکوی هنرور و همکاران ۹۴

جدول ۴-۱- مقایسه مدلسازیهای مختلف در بار گذاری محوری عضو فرعی ۱۱۰

جدول ۴-۲- مقایسه مدلسازیهای مختلف در بار گذاری خمشی درون صفحه عضو فرعی ۱۱۲

جدول ۴-۳- مقایسه مدلسازیهای مختلف در بار گذاری خمشی برون صفحه عضو فرعی ۱۱۳

جدول ۴-۴- مقایسه پریود اول ارتعاشی و سختی چهارمدل ساخته شده از سکوی نمونه ۱۱۶

جدول ۴-۵- مقایسه پریود ارتعاش طبیعی بدست آمده توسط نرم افزارهای SACS و OpenSees ۱۲۳

جدول ۴-۶- مقایسه سختی جانبی دو سازه با دو نوع مدل اتصال مختلف ۱۲۳

جدول ۴-۷- مقایسه سختی جانبی دو سازه با دو نوع مدل اتصال مختلف (بادرنظر گرفتن محافظ اتصال) .. ۱۲۴
جدول (۵-۱)- دامنه کاربرد روابط انعطاف پذیری پیشنهادی ۱۳۵
جدول پ۱ : حد خستگی و پارامترهای منحنی S-N آئین نامه API2A-WSD ۱۶۳
جدول پ۲: مشخصات مصالح مورد کاربرد در مدل‌سازی سکوهای مورد بررسی ۱۶۷
جدول پ۳- مشخصات اعضای مورد کاربرد در مدل‌سازی سکوهای مورد بررسی ۱۶۸
جدول پ۴- مقایسه پریودهای سکوی ۷۰ متری ۱۷۱
جدول پ۵- مقایسه پریودهای سکوی ۹۰ متری ۱۷۱
جدول پ۶- مقایسه پریودهای سکوی ۱۲۰ متری ۱۷۱
جدول پ۷-مقایسه پریودهای سکوی ۱۵۰ متری ۱۷۲
جدول پ ۸- جدول حالت‌های دریا ۱۸۷
جدول پ ۹- نتایج خستگی طیفی برای اتصال شماره ۷ در سکوی A ۱۸۹

فهرست اشکال:

شکل ۱-۱ سکوی دریایی مدل شده توسطBoukamp وهمکاران (۱۹۸۰) ۵

شکل ۱-۲- مدلهای عددی تولید شده برپایه اصل تقارن توسط Van der vegte ۸

شکل ۱-۳ .قاب نمونه تحلیل شده در نرم افزار SACS در راهنمای Collapse ۱۱

شکل ۱-۴ .خرپای ۳ بعدی سقف یک ورزشگاه در چین ۱۰

شکل ۲-۱ معرفی پارامتر های لازم جهت طراحی براساس آئین نامهAPI و ویرایش های قبل از سال۲۰۰۵

..... ۲۱

شکل ۲-۲- طبقه بندی اتصال از دیدگاه آئین نامه API-RP2A ویرایش سال ۲۰۰۰ ..... ۲۳

شکل ۳-۱ نمونه هایی از اتصالات لوله ای ۳۵

شکل ۳-۲- اتصالات چند صفحه ای ۳۶

شکل ۳-۳- پارامتر های بدون بعد اتصال لوله ای ۳۷

شکل ۳-۴ استفاده از تقویت کننده های داخلی در اتصالات لوله ای ۳۸

شکل ۳-۵- اتصالات لوله ای تقویت شده ۳۹

شکل ۳-۶- انواع اشکال خرابی در اتصالات لوله ای ۴۰

شکل ۳-۷- انعطاف پذیری اتصالات و حرکت صلب مهار بند ناشی از آن ۴۱

شکل ۳-۸ انعطاف پذیری و تغییر شکل پلاستیک یک اتصال ۴۲

شکل ۳-۹ تفاوت اتصال صلب و اتصال مدل شده با المان انعطاف پذیری اتصالات در یک مدل عددی سکوی

دریایی ۴۵

شکل ۳-۱۰- مدل سازی اتصالات لوله ای با استفاده از اتصال T,Y ۴۶

شکل ۳-۱۱- منحنی نیرو – تغییر مکان اتصال تحت بار محوری کششی و فشاری ۴۷

شکل ۳-۱۲- ماتریس نرمی اتصال Y ۴۹
شکل ۳-۱۳ فرضیات مورد استفاده جهت محاسبه نرمی ۵۱
شکل۳-۱۴- سیستم مختصات پایه برای المان تیر-ستون دو بعدی ۵۵
شکل ۳-۱۵- شمای کلی المان Nonlinear Tubular Joint ۵۶
شکل ۳-۱۶- معرفی سیستم مختصات پایه برای المان اتصال لوله ای غیرخطی ۵۷
شکل ۳-۱۷ ارتباط نیروهای برشی گرهی به لنگرهای انتهایی ۶۰
شکل ۳-۱۸- ارتباط نیروهای برشی گرهی به لنگرهای انتهایی ۶۱
شکل ۳-۱۹ اعمال بارواحد به درجات آزادی باز و بدست آوردن عکس العملها در درجات آزادی غیرفعال
..... ۶۲
شکل ۳-۲۰- تفاوت ساختار نرم افزار شی گرا و نرم افزار های متداول ۶۹
شکل ۳-۲۱- اجزاء مختلف نرم افزار OpenSees و رابط آن با کاربران و برنامه نویسان ۷۰
شکل ۳-۲۲- سازه خرپایی سقف ورزشگاه چین ۷۳
شکل ۳-۲۳- بارگذاری محوری نمونه آزمایشگاهی Wang and Chen ۷۴
شکل ۳-۲۴- بارگذاری خمشی نمونه آزمایشگاهیWang and Chen ۷۵
شکل ۳-۲۵- مدل عددی استفاده شده برای اتصالات T توسط : Jubran & Cofer..... ۷۶
شکل ۳-۲۶ مقایسه نتایج آزمایشگاهی محوری توسط: Jubran & Cofer ومدل پیشنهادی این رساله
..... ۷۸
شکل ۳-۲۷ مقایسه نتایج آزمایشگاهی خمشی توسط Jubran & Cofer و مدل پیشنهادی این رساله ۷۸
شکل ۳-۲۸- مدل ساخته شده توسط نرم افزار Ansys ۸۰
شکل ۳-۲۹- اثر وجود لنگر خمشی بر مقاومت محوری اتصال – مقایسه مدلسازی توسط دو نرم افزار Ansys
وOpenSees ۸۱

شکل ۳-۳۰ -تطابق جوابهای مدلسازی توسط دو نرم افزار AnsysوOpenSees و عددگذاری در رابطه آئین نامه API ویرایش جدید..... ۸۲
شکل۳-۳۱- سکوی Zayas و همکاران و شماره گذاری اتصالات ۸۵
شکل ۳-۳۲- مقایسه رفتار چرخه ای حاصل از مدلسازی پیشنهادی رساله و نتایج آزمایشگاهی Zayas و همکاران ۸۶
شکل ۳-۳۳- مقایسه بیشینه بار قابل تحمل توسط مدلهای محققین مختلف و نتایج آزمایشگاهی ۸۷
شکل ۳-۳۴ مقایسه رفتار جانبی مدل صلب، انعطاف پذیر و مرکز به مرکز در یک آنالیز بار فزاینده آزمایشی ۸۸
شکل ۳-۳۵- مقایسه رفتار جانبی مدل تضعیف شده انعطاف پذیر و فنری در آنالیز بار فزاینده ۹۱
شکل ۳-۳۶ قاب هنرور و همکاران ۹۲
شکل ۳-۳۷ نتایج حاصل از بارگذاری چرخه ای مدل عددی مرکز به مرکز النجری و همکاران و مدل پیشنهادی این رساله ۹۳
شکل ۳-۳۸- نتایج حاصل از بارگذاری چرخه بار فزاینده قاب هنرور و همکاران توسط مدلهای کامل و تضعیف شده ۹۵
شکل ۳-۳۹ مقایسه رفتار جانبی مدل تضعیف شده انعطاف پذیر و فنری در آنالیز بار فزاینده در قاب هنرور و همکاران ۹۶
شکل ۴-۱- انعطاف پذیری های موضعی اتصال لوله ای در ۳ جهت مستقل ۹۹
شکل ۴-۲- مشخصه سازی المان سه بعدی انعطاف پذیری به همراه درجات آزادی مرتبط ۱۰۱
شکل ۴-۳- حالت کلی قرار گیری المان ۳ بعدی در فضا ۱۰۲
شکل ۴-۴- تبدیل سیستم درجات آزادی کلی به سیستم مختصات پایه ۱۰۳

شکل ۴-۵- سازگارسازی درجات آزادی لنگر برون محورتعریف شده توسط فسلر و همکاران و این تحقیق ۱۰۵
شکل ۴-۶- ایجاد ماتریس انتقال بین سیستم مختصات پایه و سیستم کلی دارای ۱۲ درجه آزادی ۱۰۷
شکل ۴-۷- ابعاد و مدلسازی سکوی انتخابی توسط نرم افزار OpenSees ۱۱۵
شکل ۴-۸- تغییرشکل پیچشی در سکوهای مدل شده بعد از اعمال بار استاتیکی به یکی از پایه های سکو در تراز عرشه ۱۱۷
شکل ۴-۹- نتایج مقایسه ای آنالیز تاریخچه زمانی خطی ۱۱۸
شکل ۴-۱۰- نقشه های از روبروی سکوی قدیمی در منطقه خلیج فارس ۱۱۹
شکل ۴-۱۱- مدل ساخته شده توسط نرم افزار SACS ۱۲۰
شکل ۴-۱۲- مدل ساخته شده توسط نرم افزار OpenSees ۱۲۱
شکل ۴-۱۳-وزن های (جرم) مستخرج از نرم افزار SACS ۱۲۲
شکل ۵-۱- تغییر مکان موضعی در مهاربند با قطر بزرگتر در اثر بار محوری در مهاربند با قطر کوچکتر ۱۲۷
شکل ۵-۲- شمای کلی المان اندرکنشی انعطاف پذیری با ۹ درجه آزادی ۱۲۹
شکل ۵-۳- المان اندرکنشی درسیستم مختصات پایه ۱۳۰
شکل ۵-۴- تعریف درجات آزادی درجهت محور عضو فرعی و عمود بر آن برای تعریف روابط انعطاف پذیری. ۱۳۳
شکل ۵-۵- تعریف درجات آزادی درجهت محور عضو فرعی و عمود بر آن برای تعریف روابط انعطاف پذیری توسط Chen و Hu ۱۳۴
شکل ۵-۶- نتایج تحلیل برای f_{33} ۱۳۷
شکل ۵-۷- نتایج تحلیل برای f_{31} ۱۳۸

شکل ۵-۸- صحت سنجی روابط انعطاف پذیری پیشنهادی و دیگر مقالات، حالتی که قطر مهاربندیها یکسان باشد؛ مقایسه برای اقطار مختلف مهاربندی ۱۴۰
شکل ۵-۹- صحت سنجی روابط انعطاف پذیری پیشنهادی و دیگر مقالات، مقایسه برای مقادیر مختلف گپ ۱۴۱
شکل ۵-۱۰- ارتباط سیستم مختصات پایه و سیستم کلی در المان مثلثی ۱۴۲
شکل ۵-۱۱- صحت سنجی نتایج المان اندرکنشی پیشنهادی و المان مرکزبه مرکز، انعطاف پذیری معمولی و المان پوسته ۱۴۵
شکل ۵-۱۲- صحت سنجی نتایج المان اندرکنشی پیشنهادی با روابط انعطاف پذیری Chen و Hu و المان مرکزبه مرکز، انعطاف پذیری معمولی و المان پوسته ۱۴۷
شکل ۵-۱۳- سکوی نمونه Zayas و همکاران ۱۴۸
شکل ۵-۱۴- نحوه مش زنی اتصالات سکو ۱۴۹
شکل ۵-۱۵- مدل سکوی زایاس و همکاران ساخته شده در نرم افزار Ansys ۱۵۰
شکل ۵-۱۶- بررسی اثر گپ در اتصالات یک سکوی دریایی توسط المانهای انعطاف پذیری اندرکنشی ۱۵۲
شکل ۵-۱۷- بررسی اثر گپ در اتصالات یک سکوی دریایی توسط المانهای انعطاف پذیری اندرکنشی نوشته شده توسط روابط انعطاف پذیری Chen و Hu ۱۵۳
شکل پ ۱- یک بارگذاری واقعی وارد بر سازه ۱۶۱
شکل پ ۲- منحنی‌های S-N آئین نامه API2A-WSD [۲۹] ۱۶۳
شکل پ۳- مراحل آنالیز تعیینی خستگی[۴۰] ۱۶۵
شکل پ ۴- نمایش موج در حوزه زمان و فرکانس[۴۰] ۱۶۶
شکل پ۵- نمای سه بعدی سکوهای مورد بررسی ۱۶۹
شکل پ ۶- روند انجام آنالیز خستگی طیفی ۱۸۵

شکل پ ۷- تغییرات بازه تنش در ناحیه ملتهب در مهاربند۱ از اتصال ۱ در سکوی A ۱۸۸
شکل پ ۸- تغییرات بازه تنش در ناحیه ملتهب در مهاربند۲ از اتصال ۱ در سکوی A ۱۸۸
شکل پ ۹-تغییرات بازه تنش در ناحیه ملتهب در مهاربند۱ از اتصال ۳ در سکوی A ۱۸۸

فهرست علائم:

M : نیروهای عضو فرعی در محل اتصال

$P_{\mathrm{u}}, \mathrm{M}_{\mathrm{u}}$: مقاومت میانگین عضو فرعی در محل اتصال

φ :ضریب مقیاس مقاومت

δ : تغییرشکلهای اتصال

θ : چرخش های اتصال بر حسب رادیان

D : ضخامت عضو اصلی

A : ثابتی که هندسه اتصال و نوع بارگذاری وابسته است

B : ثابت ابعادی بر حسب مگا پاسکال که به هندسه اتصال و نوع بارگذاری وابسته است

$\zeta = \frac{g}{\mathrm{D}}$: فاصله بین دو پای اتصال مجاور یکدیگر.

F_{y} : تنش تسلیم مصالح اتصال

$\emptyset$: زاویه بین مهاربند و عضو اصلی

Q'_{B} : ضریب نسبت ضخامت در روابط Billington

β : ضریب قطر

γ : ضریب لاغری عضو اصلی

τ : ضریب ضخامت

D : قطر عضو اصلی

d : قطر عضو فرعی

T : ضخامت عضو اصلی

t : ضخامت عضو فرعی

g : فاصله دو پای عضو فرعی روی عضو اصلی