



دانشکده مهندسی مکانیک

شبیه سازی عملیات سنبه کشی (Swage) تک مرحله ای و دو مرحله ای

سعید رضایی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته
مهندسی هوافضا-سازه

استاد راهنما: حمید رضا جاهد مطلق

بهمن ۱۳۸۲



دانشکده مهندسی مکانیک

شبیه سازی عملیات سنبه کشی (Swage) تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای

سعید رضایی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته
مهندسی هوافضا-سازه

بهمن ۱۳۸۲

اتوفرتاژ^۱ یک پروسه اعمال فشار به تمام یا قسمتی از یک لوله جدار ضخیم به منظور ایجاد تنشهای بالاتر از حد الاستیک می باشد هنگام باربرداری لایه های داخلی دیواره به صورت حلقوی تحت فشار قرار می گیرند ولایه های بیرونی به صورت حلقوی (مماسی)^۲ تحت کشش باقی می ماند. این تنشهای پسماند فشاری در هسته هنگام بارگذاری در موقع استفاده مفید می باشند. این تنشها باعث می شوند بتوان فشار داخلی را قبل از اینکه مواد در داخل در اثر کشش شروع به تسلیم کنند، بالا ببرد. امتیاز دیگر این روش در لوله های توپ می باشد که باعث می شود ترکهای حاصل از حرارت در هسته رشد آهسته تری داشته باشند و طول ترک بحرانی افزایش می یابد. تغییر شکل دائمی در هسته لوله توسط روش اتوفرتاژ را می توان از طریق اعمال مستقیم فشار هیدرولیک به هسته لوله ایجاد کرد. روش دیگر فشار دادن یک سنبه^۳ بزرگتر (یا سنبه کشی^۴) از داخل هسته می باشد. در این روش جریان تنش پلاستیک به واسطه تداخل مکانیکی به وجود می آید. روش اتوفرتاژ از طریق سنبه کشی^۵ خود به دو روش تک مرحله ای^۶ و دو مرحله ای^۷ انجام می شود. در روش دو مرحله ای ابتدا یک سنبه با قطر کمتر را از داخل لوله عبور می دهند و در مرحله دوم سنبه بزرگتر را عبور می دهند.

در این پروژه ابتدا روش سنبه کشی تک مرحله ای مدلسازی شده و توزیع تنشهای پسماند مماسی بدست آمد. از منحنیهای تنش - کرنش واقعی برای رفتار بارگذاری و باربرداری ماده

¹ Autofrettage

² Hoop

³ Mandrel

⁴ Swage

⁵ Swage Autofrettage

⁶ Single

⁷ Double

استفاده گشته و تفاوت مقدار تنشهای پسماند به دست آمده از رفتار ایده‌آل ماده و رفتار واقعی آن با هم مقایسه شده است.

بدست آوردن نیروی محرک لازم برای حرکت دادن سنبه نیز از اهداف دیگر این پروژه بود. گام بعدی مدلسازی سنبه‌کشی دومرحله‌ای و مقایسه آن با روش سنبه‌کشی تک‌مرحله‌ای بود. این پروسه از سه دیدگاه توزیع تنشهای پسماند مماسی در طول شعاع سیلندر، مقدار نیروی لازم برای حرکت دادن سنبه و توزیع تنش مماسی در یک شعاع خاص از جدار سیلندر در راستای طولی مورد بررسی قرار گرفت. در انتهای پروژه مطالعات پارامتریک بر روی سنبه‌کشی دومرحله‌ای به منظور بدست آوردن ترکیب بهینه تداخل در مرحله اول سنبه‌کشی نسبت به مرحله دوم صورت گرفت.

فهرست مطالب

فصل اول- مطالعه عملیات سنبه‌کشی و بررسی تاریخچه آن

- ۱-۱- معرفی عملیات سنبه‌کشی..... ۱
- ۲-۱- تاریخچه..... ۲
- ۳-۱- روشهای تحلیل..... ۵

فصل دوم- مدلسازی عملیات سنبه‌کشی

- ۱-۲- روشهای مدلسازی..... ۷
- ۲-۲- بررسی پارامترهای مدلسازی اجزاء محدود..... ۱۱
- ۳-۲- اثرات اصطکاک در مدلسازی سنبه‌کشی..... ۱۲
- ۴-۲- تحلیل الاستوپلاستیک..... ۱۵
- ۵-۲- ارزیابی نحوه مدلسازی..... ۱۷
- ۶-۲- تحلیل با استفاده از رفتار واقعی ماده..... ۲۱

فصل سوم- بررسی نتایج سنبه‌کشی تک مرحله‌ای

- ۱-۳- بررسی نتایج سنبه‌کشی تک مرحله‌ای..... ۲۴
- ۲-۳- توزیع تنشهای مماسی در طول شعاع سیلندر..... ۲۴
- ۳-۳- مقدار نیروی لازم برای حرکت دادن سنبه..... ۲۶
- ۴-۳- مقایسه فشار لازم برای حرکت دادن سنبه و فشار لازم برای اتوفر تاژ هیدرولیک... ۲۶
- ۵-۳- توزیع تنش مماسی در یک شعاع خاص از جدار سیلندر در راستای طولی سیلندر..... ۲۸

فصل چهارم- پروسه سنبه‌کشی دو مرحله‌ای

- ۴-۱- پروسه سنبه‌کشی دو مرحله‌ای ۳۰
- ۴-۲- تحلیل نتایج سنبه‌کشی دو مرحله‌ای ۳۲
- ۴-۳- مقدار نیروی لازم برای حرکت دادن سنبه ۳۳
- ۴-۴- توزیع تنش مماسی در یک شعاع خاص از جدار سیلندر در راستای طولی سیلندر ۳۴

فصل پنجم- مطالعه پارامتریک عملیات سنبه‌کشی دو مرحله‌ای

- ۵-۱- مطالعه پارامتریک عملیات سنبه‌کشی دو مرحله‌ای ۳۶
- ۵-۲- کمینه کردن نیروی لازم برای حرکت دادن سنبه ۳۶
- ۵-۳- بررسی مقدار تنشهای پسماند ۳۶
- ۵-۴- بررسی یکنواخت بودن توزیع تنشهای هوپ در طول لوله ۳۹

فصل ششم- نتیجه‌گیری

- ۶-۱- نتیجه‌گیری ۴۰

پیوست ۱- روشهای مدلسازی برخورد

فهرست شکلها

- شکل (۱-۲)- ابعاد هندسه سنبه و لوله ۸
- شکل (۲-۲)- مدل المان محدود مرحله اول مدلسازی سنبه‌کشی ۸
- شکل (۳-۲)- رفتار واقعی تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش [] ۹

- شکل (۲-۴) - منحنی تنش- کرنش شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ۱۰
- شکل (۲-۵) - شکل ماکزیمم تنش مماسی بر حسب K_N ۱۲
- شکل (۲-۴) - الف - تنشهای پسماند شعاعی ۱۶
- شکل (۲-۴) - ب - تنشهای پسماند مماسی ۱۶
- شکل (۲-۵) - تنشهای پسماند مماسی ۱۷
- شکل (۲-۶) - تنشهای پسماند شعاعی ۱۷
- شکل (۲-۷) - مدل اجزا محدود صفحه سوراخدار ۱۸
- شکل (۲-۸) - تنشهای پسماند مماسی در ضخامت نمونه ۱۹
- شکل (۲-۹) - تنشهای پسماند مماسی ۱۹
- شکل (۲-۱۰) - تنشهای پسماند مماسی در سه مقطع ۲۰
- شکل (۲-۱۳) - مقایسه نتایج مقاله و نتایج حاصل از تحلیل با ANSYS ۲۰
- شکل (۲-۱۴) - انتهای عملیات بارگذاری و باربرداری ۲۱
- شکل (۲-۱۵) - تنشهای پسماند با توجه به رفتار واقعی و ایده‌آل ماده ۲۳
- شکل (۳-۱) - تنشهای پسماند در ضخامت لوله در مقطع ورودی ۲۴
- شکل (۳-۲) - تنشهای پسماند در ضخامت لوله در مقطع میانی ۲۵
- شکل (۳-۳) - تنشهای پسماند در ضخامت لوله در مقطع خروجی ۲۵
- شکل (۳-۴) - تنشهای پسماند در ضخامت لوله در سه مقطع ۲۵
- شکل (۳-۵) - نیروی محرک سنبه به جابجایی سنبه ۲۶
- شکل (۳-۶) - نیروی کل نرمال بر سطح داخلی سیلندر بر حسب جابجایی سنبه ۲۷
- شکل (۳-۷) - فشار وارد بر سطح داخلی سیلندر بر حسب جابجایی سنبه ۲۷

- شکل (۳-۸)- توزیع تنشهای پسماند مماسی در ضخامت 12.5 mm در طول سیلندر ۲۸.
- شکل (۳-۹)- توزیع تنشهای پسماند مماسی در ضخامت 19.1 mm در طول سیلندر ۲۸.
- شکل (۳-۱۰)- توزیع تنشهای پسماند مماسی در ضخامت 25.8 mm در طول سیلندر ۲۹.
- شکل (۳-۱۱)- توزیع تنشهای پسماند مماسی در ضخامتهای مختلف در طول سیلندر ۲۹.
- شکل (۴-۱)- مدل اجزا محدود سنبه کشی دو مرحله‌ای ۳۰
- شکل (۴-۲)- تنشهای پسماند مماسی در انتهای مرحله اول سنبه کشی ۳۱
- شکل (۴-۳)- تنشهای پسماند مماسی در انتهای مرحله دوم سنبه کشی ۳۲
- شکل (۴-۴)- تنشهای پسماند مماسی در انتهای مرحله اول سنبه کشی ۳۳
- شکل (۴-۵)- تنشهای پسماند مماسی در انتهای مرحله دوم سنبه کشی ۳۳
- شکل (۴-۶)- نیروی محرک سنبه در مرحله اول نسبت به جابجایی سنبه ۳۴
- شکل (۴-۷)- نیروی محرک سنبه در مرحله دوم نسبت به جابجایی سنبه ۳۴
- شکل (۴-۸)- توزیع تنشهای پسماند مماسی در یک شعاع خاص در طول سیلندر برای سنبه کشی تک مرحله‌ای و سنبه کشی دو مرحله‌ای ۳۵
- شکل (۵-۱)- نیروهای مرحله اول و دوم با توجه به نسبت تداخل ۳۷
- شکل (۵-۲)- تنشهای پسماند مماسی در ضخامت لوله برای نسبت تداخل ۵۰ درصد ۳۷
- شکل (۵-۳)- تنشهای پسماند مماسی در ضخامت لوله برای نسبت تداخل ۶۰ درصد ۳۷
- شکل (۵-۴)- تنشهای پسماند مماسی در ضخامت لوله برای نسبت تداخل ۸۰ درصد ۳۸
- شکل (۵-۵)- تنشهای پسماند مماسی در ضخامت لوله برای نسبت تداخلهای مختلف. ۳۸
- شکل (۵-۶)- تغییرات تنشهای ماکزیمم مماسی در مرحله اول و دوم سنبه کشی به نسبت تداخل ۳۸

- شکل (۷-۵) - تنشهای پسماند مماسی در طول لوله نسبت به درصد تداخل ۳۹
- شکل (۱) - برخورد هرتزین بین دو سیلندر ۴۳
- شکل (۲) - تماس بین دنده‌ها ۴۳
- شکل (۳) - منطقه Pinball ۴۶
- شکل (۴) - الگوی متقارن contact/target ۴۸
- شکل (۵) - حرکت صلب قبل از برخورد ۴۸
- شکل (۶) - ساخت هندسه در محل برخورد ۴۹
- شکل (۶) - استفاده از فنر ضعیف ۵۰
- شکل (۷) - کنترل با جابجایی ۵۰

فهرست جداول

- جدول (۱-۲) - نتایج حاصل از مدل‌سازی با اصطکاک و مقایسه آن با حالت بدون اصطکاک ۱۳
- جدول (۲-۲) - تنشها برای ضریب اصطکاک 0.3، 0.4، 0.5 و 0.6 ۱۴
- جدول (۳-۲) - درصد تغییرات ماکزیمم تنشها بر حسب تغییرات ضریب اصطکاک .. ۱۴
- جدول (۴-۲) - مواد اصطکاکی ۱۵

فصل اول
مطالعه عملیات سنبه کشی

۱-۱- معرفی عملیات سنبه‌کشی^۱

اتوفرتاژ^۲ یک پروسه اعمال فشار به تمام یا قسمتی از یک لوله جدار ضخیم به منظور ایجاد تنشهای بالاتر از حد الاستیک می‌باشد هنگام باربرداری لایه‌های داخلی دیواره به صورت حلقوی^۳ تحت فشار قرار می‌گیرند ولایه‌های بیرونی به صورت حلقوی تحت کشش باقی می‌مانند.

این تنشهای پسماند فشاری در داخل، هنگام بارگذاری در موقع استفاده مفید می‌باشند. این تنشها باعث بالا رفتن فشار داخلی، قبل از اینکه مواد در هسته در اثر کشش شروع به تسلیم کنند، می‌شوند. امتیاز دیگر این روش در لوله‌های توپ می‌باشد که باعث می‌شود ترکهای حاصل از حرارت در هسته رشد آهسته تری داشته باشند و طول ترک بحرانی افزایش می‌یابد. [1]

تغییر شکل دائمی درهسته لوله توسط روش اتوفرتاژ را می‌توان از طریق اعمال مستقیم فشار هیدرولیک به هسته لوله ایجاد کرد. روش دیگر فشار دادن یک سنبه^۴ بزرگتر از داخل هسته می‌باشد. در این روش جریان تنش پلاستیک به واسطه تداخل مکانیکی به وجود می‌آید. یکی از امتیازات روش سنبه‌کشی این است که فشار هیدرولیک لازم برای فشار دادن سنبه از لوله کمتر از مقداری است که در روش اعمال مستقیم فشار هیدرولیک مورد نیاز می‌باشد. لوازم و تجهیزات مورد نیاز ساده‌تری می‌باشد و نیروی محوری مورد نیاز با افزایش اندازه لوله زیاده‌تر می‌شود. بنابراین می‌توان نیروی محوری مورد نیاز را کم کرد. [1]

۲-۱- تاریخچه

مفهوم استفاده از تنشهای مماسی (حلقوی) فشاری برای بهبود استحکام و افزایش عمر خستگی

¹Swage

²Autofrettage

³Hoop

⁴Mandrel

سیلندرهای جدار ضخیم (یا مخازن تحت فشار) اولین بار توسط Thomas Jackson Rodman [2,3] افسر توپخانه ارتش آمریکا مطرح شد. پس از واماندگی یک توپ بزرگ که منجر به کشته شدن چندین نفر شد، Rodman به مطالعه ریخته‌گری لوله‌های توپ پرداخت و یک روش به نام Hollow care casting را اختراع کرده و در سال ۱۸۴۷ به نام خود به ثبت رسانید. در روش او سطح داخلی لوله توپ به وسیله جریان آب که از داخل یک لوله عبور می‌کرد، خنک شده و سطح خارجی در یک دمای بالا نگه داشته می‌شد. بدین ترتیب ابتدا سطح داخلی منجمد شده، سپس سطح خارجی شروع به انجماد کرده و به سمت داخل منقبض می‌گردد.

اگر چه Rodman اثرات این پروسه را درک نکرد ولی تنشهای مماسی (حلقوی) فشاری در نزدیک سطح داخلی تشکیل شده و لوله توپ را در یک حالت مساعد تنش و کرنش قرار می‌داد. در طی تستهایی که انجام شد، تعداد آتشیهای توپهایی که به این روش ساخته شده بود، ۵ تا ۱۳ بارنسبت به روش ساخت اولیه، بیشتر بود. [3,4]

پس از این یافته، مخازن تحت فشار جدار ضخیم طی یک پروسه به نام اتوفرتاژ هیدرولیک^۱، تحت فشار داخلی بالا قرار گرفتند. این روش نیز فوایدی شبیه به تکنیک Rodman داشت. اولین کاربرد برای لوله توپ در سال ۱۹۱۳ در فرانسه، استفاده شد. [5] در این روش فولادهای با استحکام پایتتر بدون اینکه به ناحیه پلاستیک برسند، در طی آتش توپخانه استفاده می‌شدند. وجود تنشهای پسماند فشاری مفید بر خلاف تاثیرات آن روی عمر خستگی و شکست به طور کامل درک شده بود. با توجه به تنشهای پسماند فشاری مماسی (حلقوی) بیشتر و بهتر درک شد.

¹Hydraulic Autofrettage

زراد خانه نیروی دریایی ارتش آمریکا یک روش به نام اتوفرتاژ از طریق سنبه‌کشی^۱ را برای لوله های توپ ساخته شده از فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا، ابداع کرد. از یک سنبه از جنس کاربید تنگستن^۲ با استحکام بالا، برای تغییر شکل سطح داخلی لوله استفاده شد. در این روش توزیع تنش مانند روش اتوفرتاژ هیدرولیک بود.

مدلهای تحلیلی نیز برای معین کردن حالت تنش در سیلندر جدار ضخیم توسعه پیدا کرد. اولین روش را Lamé برای یک سیلندر جدار ضخیم ایزوتروپیک و همگن که تحت فشار داخلی و خارجی قرار دارد، ارائه کرد. [6,7,8] مدلهایی که توسط Hill et al[9] ، Hodge and White[10] و Steele[11] ارائه شدند، تغییرشکلهای الاستیک و پلاستیک را با توجه به معیارهای تسلیم و قوانین تنش کرنش پلاستیک مختلف در نظر گرفتند. [12] Bland یک میدان حرارتی ثابت و فشار داخلی و خارجی را در نظر گرفت و اولین مدل ترمومکانیک را ارائه داد. وی باربرداری را نیز بدون در نظر گرفتن اثر [26] Bauschinger، مورد توجه قرار داد. بعدها. [13,14] Chen یک روش تحلیلی را با در نظر گرفتن اثر [26] Bauschinger هنگام باربرداری ارائه داد.

Venter et al[5] مطالعات تطبیقی روی سه روش تجربی برای اندازه گیری تنشهای پسماند

مماسی (حلقوی) فشاری ناشی از اتوفرتاژ هیدرولیک یا اتوفرتاژ از طریق سنبه‌کشی انجام دادند.

آنها همچنین نتایج خود را در دو مدل سخت‌شوندگی همسانگرد^۳ و سینماتیک^۴ مقایسه کرد و خطاهای قابل ملاحظه‌ای را نزدیک سطح داخلی برای اثرات [26] Bauschinger بزرگ و تسلیم

¹Swage Autofrettage

²Tungsten Carbid

³Isotropic Hardening

⁴Kinematics Hardening

برگشت قابل ملاحظه کردند. درحالی‌که هر دو مدل تسلیم برگشت را می‌توانستند نشان دهند ولی خطا در مدل سخت‌شوندگی همسانگرد به علت عدم توانایی در نظر گرفتنی اثرات Bauschinger [26] بزرگتر بود. موقعیت مرز بین ناحیه الاستیک و پلاستیک که به صورت تجربی اندازه‌گیری شده بود با موقعیت‌های بدست آمده در تئوری مطابقت داشت. [2] and O'Hara Troiano سه حل تحلیلی برای اتوفرتاژ با توجه به معیارهای مختلف تسلیم انجام داده و سه مدل اجزاء محدود با معیار تسلیم می‌سیز¹ و مدل‌های مختلف سخت‌شوندگی کرنشی را برای فولادها انجام داده و با هم مقایسه کردند. در حالی که این شش مدل نتایج مختلفی را بیان می‌کرد، ولی چندین نتیجه‌گیری را از آنها گرفته می‌شد اول اینکه مدل سخت‌شوندگی سینماتیکی تسلیم برگشت را پیش‌بینی می‌کند، بر خلاف مدل مدل سخت‌شوندگی همسانگرد. دوم موقعیت مرز بین ناحیه پلاستیک و الاستیک در تمام مدل‌ها یکسان بود. سوم روش تحلیلی نمی‌تواند تسلیم برگشت را پیش‌بینی کند. و در آخر روش مدل اجزاء محدود برای مدل سخت‌شوندگی سینماتیکی با کد ASME بخش ۳ برای بویلرها و مخازن تحت فشار، بجز در تسلیم برگشت نزدیک سوراخ مطابقت دارد.

[1] Iremonger et al. پدیده سنبه‌کشی تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای را با توجه به رفتار الاستیک - کاملاً پلاستیک برای فولادهای مقاومت بالا بررسی کرده و تنشهای پسماند یکسانی را در انتهای سنبه‌کشی تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای به دست آورده است.

[17] Bernard et al. پدیده عملیات سرد کاری روی سوراخهای اتصالات را که مشابه عملیات سنبه‌کشی است برای Al7475-T7351 بررسی کرد. وی از خواص ایده آل ماده استفاده کرده و اثرات عملیات سرد کاری را بر روی عمر خستگی بدست آورده است.

¹Von Mises

[16] Poussard et al. روش سرد کاری را برای Al2024-T351 بررسی کرده است. وی بدین منظور تستهای تک محوری را برای بدست آوردن خواص بارگذاری و باربرداری ماده انجام داده و نتیجه‌گیری کرده است که برای A2024-T351 مدل سخت شونده‌گی کینماتیک می‌تواند به منحنی‌های واقعی ماده نزدیک بوده و اثرات [26] Bauschinger را مدل کند.

[18] Chabban et al. روش پیچیده‌تری را برای مدل کردن اثرات [26] Bauschinger انجام می‌دهد. وی منحنیهای تنش و کرنش را به صورت تابعی از کرنش پلاستیک، بوسیله اعمال حرارت‌های مجازی، ایجاد می‌کند. این روش برای استفاده در نرم افزارهای اجزاء محدود طراحی شده است.

جاهد و قنبری [27] رفتار ماده NiCrMoV125 را به دست آورده و نتایج را با استفاده از رفتار واقعی ماده استخراج کرده و اختلاف بزرگی را با نتایج حاصل از مدل ایده‌آل به دست آوردند.

۱-۳- روشهای تحلیل

روشهای تحلیل اتوفرتاژ را می‌توان به دو بخش عمده زیر تقسیم کرد.

۱- روش تحلیل اتوفرتاژ از طریق سنبه‌کشی:

در این روش که هنوز مقالات برای آن منتشر می‌شود مساله به صورت تقارن محوری^۱ با مقادیر غیر صفر $\tau_{rz}, \tau_{zr}, \sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta$ برای تنش بررسی می‌شود. در این حالت تغییرات در جهت محوری بررسی شده و حالت ایده‌آل الاستیک - پلاستیک کامل بدون در نظر گرفتن اثر [26] Bauschinger در نظر گرفته می‌شود. این روش نیازمند قدرت محاسباتی و برنامه ریزی قوی می‌باشد.

۲- روش تحلیل اتوفرتاژ هیدرولیک :

در این روش مساله به صورت تقارن محوری و بدون تغییرات در جهت محوری در نظر گرفته می‌شود. اجزاء تنش $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta$ غیر صفر می‌باشند. در این روش اثرات [26] Bauschinger برای دامنه بسیار بزرگی از هندسه و کرنشهای زیاد، ارائه می‌شود. از آنجائیکه روش اتوفرتاژ از طریق سنبه‌کشی یک پروسه تقارن محوری با تغییرات در جهت محوری به دلیل حرکت محوری و تداخل سنبه می‌باشد، تنشهای پسماند نهایی مستقل از موقعیت طولی هستند. [16]

اتوفرتاژ از طریق سنبه‌کشی به دو روش تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای تقسیم می‌شود. با روش دو مرحله‌ای می‌توان نیروی محوری مورد نیاز را کمینه کرد و کانتور همگن تری از تنش‌ها بدست آورد.

فصل دوم

مدلسازی پدیده سنبه کشی

۲-۱- روش مدلسازی

پروسه سنبه کشی شامل ایجاد کرنش پلاستیک در لوله و ایجاد تغییر شکلهای دائمی در آن می‌باشد. همچنین تاثیرات سطوح متحرک سنبه کشی و لوله یک مساله برخورد^۱ مکانیکی پیچیده را ایجاد می‌کند. مسئله از چند نظر غیر خطی است: (۱) غیر خطی بودن مواد^۲ (۲) تاثیرات ناپیوسته^۳ اجزاء روی هم ناشی از تماس. ارزیابی سطوح برخورد باید با روشهای استاندارد آنالیز مهندسی به صورت خودکار در هر مرحله بررسی شود.

یکی از راههایی که برای حل این نوع مسائل به کار می‌رود روش متغیر با زمان می‌باشد که نیاز به نرم افزارهایی دارد که بتوانند، برخورد را به صورت دینامیکی مدل کنند. ولی از آنجائیکه مساله سنبه کشی اساساً شبه استاتیکی^۴ می‌باشد، می‌توان بدون استفاده از متغیر زمان به حل مساله پرداخت. برای مدلسازی از نرم افزار ANSYS 6.1 استفاده خواهد شد.

از آنجائیکه سنبه باید از طول لوله عبور کند، لذا جابجایی زیادی باید به آن اعمال گردد. لذا مساله بر اساس جابجایی^۵ حل گردید. برای ساده سازی مدلسازی از المانهای تقارن محوری استفاده شد. بدین دلیل فقط نصف یک سطح مدل شد. در محل برخورد سنبه با لوله از المانهای تماسی استفاده شده، پدیده اصطکاک نیز در المان تماسی مدل گشت. حرکت طولی سنبه در 50 مرحله وارد شده و جابجایی در سطح خروجی لوله در جهت طولی گرفته شده در سطح ورودی تمام گره‌ها در جهت طولی به هم کوپل شدند.

¹ - Contact

² - Material non – linearity

³ - Discrete

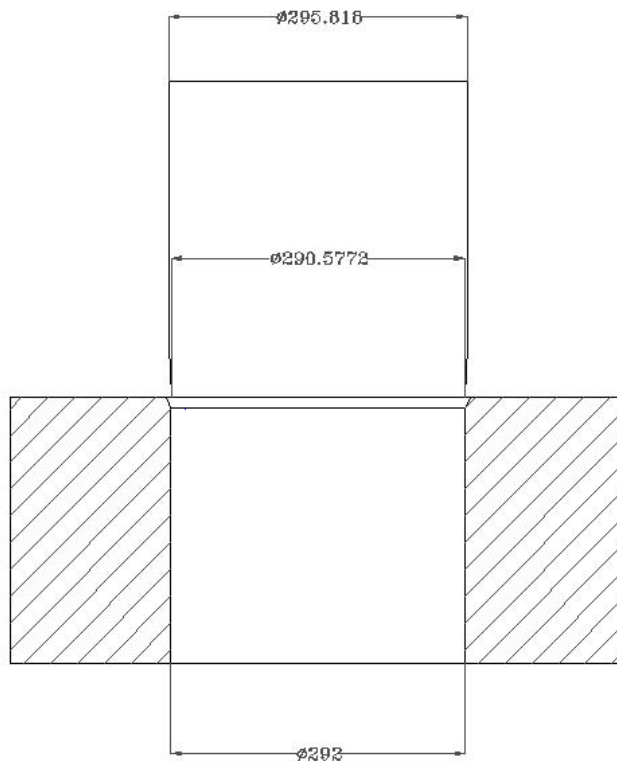
⁴ Quasi-static

⁵ Displacement-Base

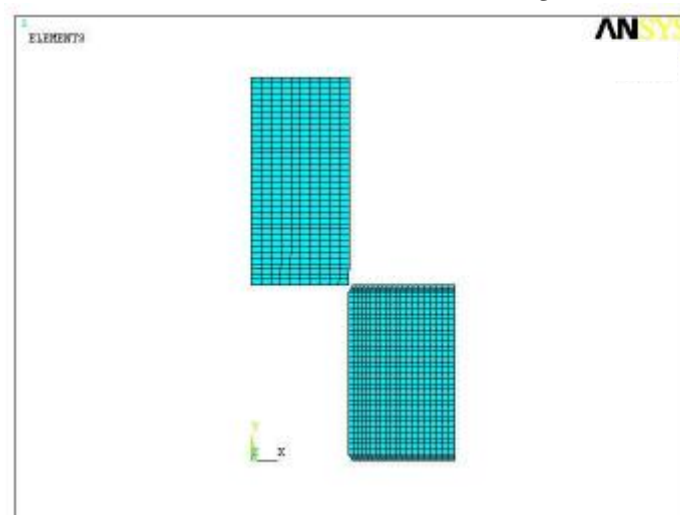
بدین ترتیب سیلندر بلند^۱ مدل گشت.

برای مدلسازی لوله از المان تقارن محوری^۲ استفاده شد و برای مدل کردن برخورد از المان

تماسی استفاده گشت. شکل المانها با توجه به هندسه سنبه و لوله را مشاهده می‌کنید.



شکل (۱-۲) - ابعاد هندسه سنبه و لوله (mm)



شکل (۲-۲) - مدل المان محدود مرحله اول مدلسازی سنبه کشی

^۱Long cylinder

^۲Axisymmetric