

## بررسی اثرسخت کننده ها درکمانش خط لوله تقویت شده

فرهاد ریاحی<sup>۱</sup>، میثم سروش<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه \_ دانشکده فنی دانشگاه ارومیه

f.riyahi@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک \_ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

Meisam.sorouh@gmail.com

### خلاصه

دراین مقاله، اثر سخت کننده های حلقوی بر مقاومت کمانشی خط لوله مورد بررسی قرار می گیرد. مدل سازی با استفاده از نرم افزار ABAQUS و تحلیل کمانش، به روش غیر خطی که دقیق ترین روش برای تعیین ظرفیت کمانشی سازه ها است، انجام می پذیرد. در این روش برای تعیین بار بحرانی کمانش، بارگذاری بصورت نموی و تدریجی اعمال می شود و تغییر شکل نمونه ها و مدهای کمانشی ایجاد شده در لوله مورد ارزیابی قرار می گیرند. افزودن رینگ به نمونه ها مقاومت کمانشی خط لوله را افزایش می دهد که این مطلب بیانگر این است که می توان از لوله های دارای رینگ با ضخامت کمتر و شعاع بیشتر در فشار های بالاتر استفاده نمود به شرط اینکه از لحاظ ایمنی، ترک خوردگی و پوسیدگی ناشی از شرایط محیطی مورد بررسی قرار گیرند. نتایج این ایده سبب کاهش هزینه های هنگفت ساخت خط لوله در صنعت نفت، صنایع دریایی و هسته ای خواهد شد.

کلمات کلیدی: خط لوله تقویت شده، سخت کننده حلقوی، مود کمانش، ABAQUS.

### مقدمه:

کاربرد خطوط لوله از نیاز های اساسی صنعت مدرن محسوب می شود و در اغلب حرفه های مهندسی مانند ساخت مخازن، سازه های دریایی و زیرزمینی و مهندسی هسته ای کاربرد فراوانی دارد. بررسی مسایل پایداری و نا پایداری خطوط لوله از این نظر اهمیت دارد که نسبت ضخامت به ابعاد در اینگونه سازه ها بسیار کم است، بنابراین افزایش ضخامت جداره لوله یکی از روش های متداول برای افزایش مقاومت و ایمنی خطوط لوله محسوب می گردد. اما افزایش ضخامت سبب مشکلاتی از قبیل: ساخت، نصب و خصوصاً جوشکاری در خط لوله می گردد. لذا استفاده از سخت کننده هایکی از روش های پیشنهادی برای افزایش کارایی و بهره وری در اینگونه سازه ها می باشد. کارهای قابل توجهی در زمینه ی تحلیل استوانه با سخت کننده های تقویتی در معرض فشار هیدرواستاتیک توسط "Salemo و Levine" انجام گرفت. "Nash" مطالعاتی در زمینه ی پوسته های استوانه ای بدون ناکاملی تحت فشار یکنواخت هیدرواستاتیکی انجام داد، او فرض کرد که سخت کننده های حلقوی دارای سختی بینهایت هستند و سطح مقطع آنها مستطیلی است [1]. "Pegg" (۱۹۸۹) به روش آزمایشگاهی مقدار بار خرابی یک استوانه با سخت کننده های حلقوی را که در معرض فشار یکنواخت بیرونی قرار داشت را محاسبه نمود. این آزمایش در پی بررسی میزان صحت پیش بینی های عناصر محدود در زمینه ی رفتار کمانشی و بار خرابی سازه صورت پذیرفت. "Roorda و Seleim" (۱۹۸۵) رفتار پس کمانشی یک استوانه با تقویت کننده را در معرض فشار جانبی یکنواخت مورد مطالعه قرار دادند [2]. "Bryan" (۱۸۸۸) رفتار یک استوانه به طول بینهایت را تحت فشار جانبی یکنواخت مورد مطالعه قرار داد. او با استفاده از مینیمم سازی انرژی پتانسیل، رابطه ای را بر حسب نسبت ضخامت جداره به شعاع استوانه و تعداد مود های محیطی آن ارائه کرد. "Ansourian و Showkati" (۱۹۹۵) شرایط مرزی اولیه برای کمانش پوسته های استوانه ای را بررسی نمودند [3]. "شوکتی" (۱۳۷۶-۱۳۸۱-۱۳۸۲) رفتار کمانشی و پس کمانشی های جدار نازک را تحت فشار یکنواخت بیرونی با در نظر گرفتن نا کاملی هندسی مورد بررسی قرار داد [4, 5, 6]. "شوکتی، شاهده، ریاحی و فاطمی" (۱۳۸۷) رفتار اعوجاجی سخت کننده های حلقوی در کمانش خط لوله تقویت شده به روش آزمایشگاهی را بررسی نموده اند [7].

در این مقاله به بررسی تاثیر رینگهای حلقوی در رفتار کمانشی خطوط لوله دریایی و رفتار کمانشی سخت کننده ها در مود کمانشی لوله ها پرداخته شده است تا بتوان امکان استفاده از خطوط لوله با ضخامت کمتر و شعاع بیشتر بررسی گردد. نتایج این ایده سبب کاهش هزینه های هنگفت ساخت خط لوله در صنعت نفت و صنایع دریایی خواهد شد.

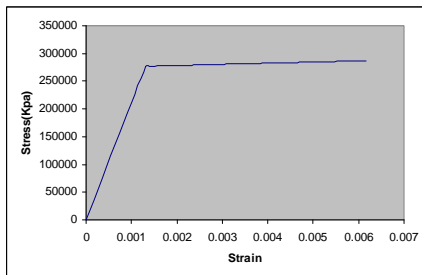
هدف از این مدل سازی ارائه یک مدل صحیح ومنطقی از لوله های تقویت شده می باشد تا مبنایی جهت پیش بینی صحیح فشار انتشار کمانش برای خطوط لوله آبهای عمیق باشد تا طراحی این خطوط با فاکتورهای ایمنی مناسب تر و تکنیک های قابل اعتماد تر ارائه گردد.

### تئوری مسئله:

#### تعریف هندسه لوله وسخت کننده های حلقوی

نمونه های مورد بررسی در این تحقیق در سه ردیف طبقه بندی شده اند که نامگذاری مدلها با حرف P (لوله) شروع شده سپس طول لوله بر حسب میلی متر و پس از آن حرف T (شکل سطح مقطع رینگ حلقوی) و در آخر تعداد سخت کننده های حلقوی نصب شده با فواصل مساوی بر روی خط لوله آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی نمونه ها بر حسب میلی



شکل ۱: منحنی تنش-کرنش

نمونه	طول نمونه	قطر نمونه	ضخامت جداره	تعداد رینگ (با فواصل یکسان)	ضخامت رینگ	قطر داخلی رینگ	قطر خارجی رینگ
P2.46T0	2460	102	0.25	0	-	-	-
P2.46T2	2460	102	0.25	2	122	102	122
P2.46T4	2460	102	0.25	4	122	102	122

#### تعریف مشخصات مصالح در مدل سازی

مشخصات فولاد مصرفی:

فولاد مورد استفاده در این تحلیل دارای سخت شوندگی یک درصد است، و رفتار پلاستیک ماده از روابط زیر بدست می آید و می توان نمودار تنش-کرنش فولاد را بصورت سخت شونده به نرم افزار معرفی کرد. دیاگرام مشخصات فولاد مورد استفاده در نرم افزار در شکل (۱) آمده است.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \sigma \leq \sigma_0 \quad (1)$$

$$\sigma = (1 - \delta)\sigma_0 + \delta \cdot E \cdot \varepsilon \quad \sigma \geq \sigma_0 \quad (2)$$

$$\text{reduction factor} = 0.01$$

$$\sigma_0 = 277e^6 \quad E = 211e^9$$

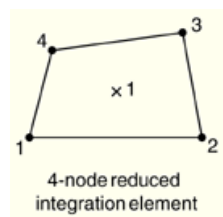
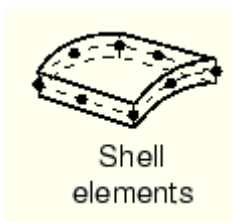
$$\nu = 0.3$$

$$\Rightarrow \sigma = 274.23e^6 + 2.1e^9 \cdot \varepsilon \quad (3)$$

#### تشریح جزئیات مدل سازی عناصر محدود:

معرفی المان های بکاررفته:

برای مش بندی طولی وشعاعی از المان چهار ضلعی، ۴ گرهی استفاده گردید که شکل المان Quad و المان مورد استفاده از خانواده ی المانهای shell استاندارد با نام S4R می باشد. این المان دارای ۴ ضلع منحنی نازک بوده و هر گره المان دارای ۶ درجه آزادی می باشد. این نوع المان که در شکل (۲) نشان داده شده قابلیت بارگذاری در دستگاه مختصات مستوانه ای را دارد.



شکل ۲: نوع المانهای بکاربرده شده در مدلها

### نحوه مدل سازی شرایط مرزی و اعمال بارگذاری نمونه ها:

شرایط مرزی در رفتار کمانشی خطوط لوله نقش تعیین کننده ای دارد. شرایط مرزی بصورت مفصلی ساده وبستن گره های المان در راستای شعاع استوانه بوده و برای اعمال بارگذاری، ابتداسیستم دستگاه مختصات برای گره المان های پوسته، استوانه ای در نظر گرفته می شود. و بارگذاری بصورت فشار یکنواخت بیرونی در راستای شعاع به سطح لوله اعمال می گردد. که در شکل ۳ نشان داده شده:



شکل ۳: بارگذاری نمونه ها

### نحوه مدل سازی نمونه ها:

مدل سازی خط لوله:

برای ساخت مدل لوله ها از اکستروود کردن یک shell دایره ای شکل به قطر ۱۰۲ میلی متر و به طول ۲۴۶۰ میلی متر استفاده شده است.

مدل سازی سخت کننده حلقوی:

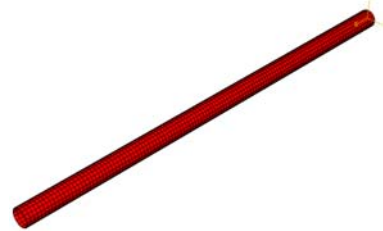
سخت کننده حلقوی به وسیله ی چرخش یک سطح از نوع shell ایجاد شده که پس از مونتاژ روی لوله با خود لوله یکی<sup>۱</sup> می شود اینکار باعث می شود در مش بندی کمی خطا داشته باشیم که اگر اندازه ی مش را بطور مناسب انتخاب کنیم خطا کمتر می شود.

### نحوه دستیابی به مش بندی بهینه در مدل سازی عناصر محدود:

برای دستیابی به مش بندی بهینه در مدل سازی پوسته های استوانه ای " شوکتی وانصاریان" روابطی برای تعداد المان های پوسته نسبت به موج های کمانش پیشنهاد کردند، بدین صورت که، اگر هر نیم موج کمانش به چهار المان تقسیم شود، خطای ناشی از این نوع مش بندی به کمترین درصد می رسد، بدیهی است که با افزایش تعداد موج های کمانشی تعداد المان های مدل افزایش می یابد [8]. همچنین برای کنترل تعداد درست المان ها از روش آزمون و خطا نیز استفاده گردید، به این صورت که با ریزتر کردن المان ها و مقایسه نتایج با اندازه مش اولیه و تکرار این فرایند اندازه مناسب المان ها بدست آمده است. لازم به یادآوری است که تعداد مشهای طولی مدلهای تأثیر زیادی در مقدار فشار کمانشی نمونه ندارند. ولی مش بندی محیطی از اثر فوق العاده ای برخوردار است. زیرا هنگامی که برای کاهش زمان تحلیل مدلهای، مدلسازی با مش های بزرگتر انجام گرفت خطای زیادی را در نتایج مشاهده کردیم، لذا با افزایش تعداد المانهای محیطی این مشکل بر طرف گردید.



شکل ۵: مش بندی رینگها



شکل ۴: مش بندی لوله ها

### نحوه مدل سازی ناکاملی در مدل سازی عناصر محدود:

با توجه به این که ناکاملی ناشی از نقص هندسی، شرایط مرزی و شرایط بار گذاری تأثیر زیادی بر رفتار کمانشی لوله دارد، این عامل در مدل سازی عناصر محدود در نظر گرفته شده است. ناکاملی هندسی ناشی از ساخت که سبب فرورفتگی یا برآمدگی موضعی نمونه ها می گردد از مهمترین ناکاملی ها می باشد که به صورت کامل در مختصات نمونه ها مد نظر قرار گرفته است [9]. در واقعیت لوله های مورد استفاده برای انتقال سیالات دایره کامل نیستند و برای واقعی تر شدن شبیه سازی، این نکته در مدلسازی مد نظر بوده و البته این ناکاملی تأثیر بسیار مهمی در کمانش دارد.

<sup>1</sup> merge

### آنالیز المان محدود:

به منظور شبیه سازی عددی در این تحقیق از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS/Standard نسخه ی 1-6.7 استفاده شده است. همچنین به علت جابجایی چندین برابر پوسته نسبت به ضخامت لوله از تحلیل استاتیکی غیر خطی استفاده گردیده و برای همگرایی آنالیز مدلها از روش Specify dissipated energy fraction استفاده شده است. تحلیل کمانش غیر خطی دقیق ترین روش برای تعیین ظرفیت کمانشی سازه ها می باشد و برای طرح یا ارزیابی سازه های واقعی پیشنهاد می شود. در این روش برای تعیین بار بحرانی کمانش، بارگذاری بصورت نموی و تدریجی اعمال می شود و تغییر شکل نمونه ها و مدهای کمانش ایجاد شده در لوله مورد بررسی قرار گرفت [10].

### محاسبه بار بحرانی کمانش پوسته های استوانه ای:

برای تخمین بار کمانش پوسته های استوانه ای از رابطه پیشنهادی زیر استفاده گردید، این رابطه به صورت آزما یشگاهی و مقایسه با روش اجزای محدود برای پوسته استوانه ای ایده آل وبدون ناکاملی توسط "شوکتی" (۱۳۸۲) ارائه گردید [4].

$$q_a = \gamma E (R/L)^\alpha (t/R)^\beta \quad (۴)$$

$$\alpha = 1.02$$

$$\beta = 2.51$$

$$\gamma = 1.033$$

از رابطه فوق مقدار بار بحرانی برای نمونه بدون رینگ برابر:  $E = 2.0 \times 10^8$  می گردد و برای نمونه با جنس فولادی مقدار آن برابر  $66/۶۶$  kpa بدست می آید. مقدار بدست آمده در نمونه ها با آنالیز المان محدود مطابق جدول زیر می باشد.

جدول (۲): مقدار بار کمانش نمونه ها

نمونه ها	رابطه شوکتی	P2.46T0	P2.46T2	P2.46T4
مقدار بار کمانش kpa	6.66	5.9	9.84	12.8

از نتایج فوق می توان بیان نمود که علت کاهش مقدار بار کمانش در نمونه بدون رینگ نسبت به رابطه پیشنهادی، اعمال ناکاملی سازه های واقعی در نمونه می باشد. افزودن رینگ به نمونه ها مقاومت کمانشی خط لوله را افزایش می دهد که این مطلب بیانگر این است که می توان از لوله های دارای رینگ با ضخامت کمتر در فشار های بالاتر استفاده نمود به شرط اینکه از لحاظ ترک خوردگی و پوسیدگی ناشی از شرایط محیطی مورد بررسی قرار گیرند.

### بررسی مدهای کمانش محیطی و طولی نمونه ها :

پس از بارگذاری مدل، با رسیدن فشار وارده به یک مقدار معین نمونه کمانش می کند در این قسمت نمودارهای فشار-تغییر مکان بدست آمده از نقاط مختلف نمونه، نشان می دهند که منحنی بصورت نرم شونده صعود می کند تا به نقطه کمانش برسد. به عبارت دیگر، با کمترین تغییر در مقدار فشار، تغییر شکلهای بزرگی حاصل می شود. این روند در تمامی تحلیل ها مشاهده شده است، بنابراین نتایج نشان دهنده رژیم خاص خرابی پوسته در این نوع سازه ها می باشد. آنچه که از مقایسه نمونه ها بدست می آید این است که با افزایش تعداد رینگها تغییر مکانها نیز به شدت کاهش می یابند. بعبارت دیگر کمانش و به تبع آن قسمت پس کمانش و در نتیجه خرابی خط لوله بصورت ناگهانی اتفاق می افتد بطوری که طول ناحیه پس کمانشی منحنی، به شدت کاهش می یابد. نکته قابل توجه این است که نتایج از المان هایی استخراج می شود، که تحت فشار فرو رفته اند، نه المان هایی که تحت کشش، برآمده شده اند. پس از کمانش مدلها، شکل مقطع لوله به حالتی در آمده است که قسمتی از سطح جداره بصورت فرورفته و قسمتی نیز بصورت برآمده تغییر شکل داده است، که در اشکال زیر مشاهده می گردد.

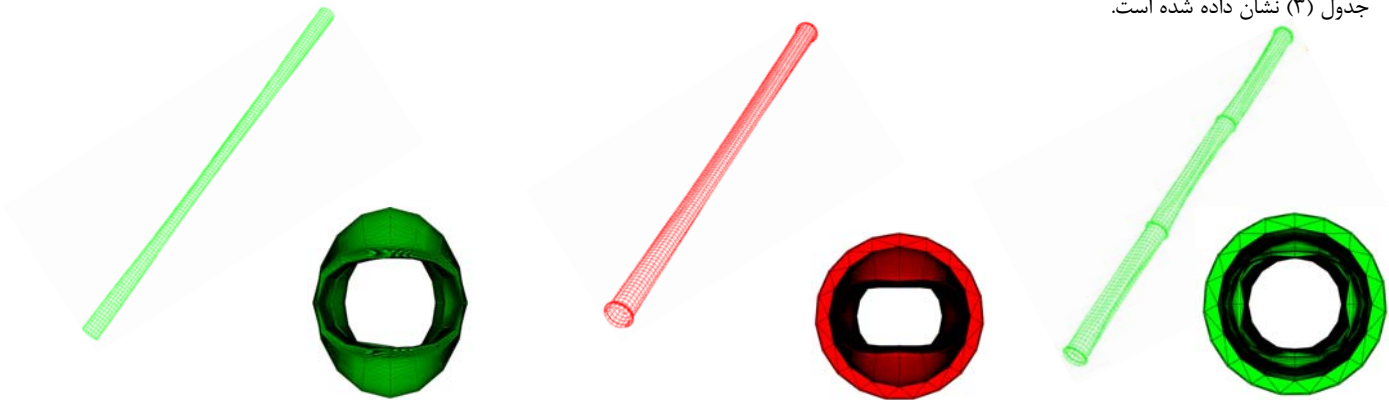
### محاسبه تعداد موج های ناشی از کمانش پوسته استوانه ای:

برای تخمین تعداد موج های ناشی از کمانش پوسته های استوانه ای از رابطه پیشنهادی زیر استفاده گردید، این رابطه برای پوسته استوانه ای ایده آل وبدون نا کاملی ارایه گردیده است. تعداد موج های بدست آمده از این رابطه از مقدار واقعی بیشتر است.

$$n = 2.47 \left( \sqrt{(R/L)} \sqrt{\sqrt{R/T}} \right)$$

$n$ : تعداد موج های ناشی از کمانش پوسته های استوانه ای

از رابطه فوق تعداد موج های سینوسی برای نمونه بدون رینگ برابر ۱/۴۹ بدست می آید. مقایسه موجهای محیطی در نمونه ها و نتایج حاصل از آنالیز در جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۱: مد کمانشی لوله بدون رینگ

شکل ۱۰: مد کمانشی لوله با ۲ رینگ

شکل ۹: مد کمانشی لوله با ۴ رینگ

جدول (۳): مقایسه موجهای محیطی در نمونه ها

نمونه ها	رابطه پیشنهادی	P2.46T0	P2.46T2	P2.46T4
تعداد موج های سینوسی	1.49	1	2	3

تفاوتی که بین نمونه ها مشاهده می شود این است که تعداد موجهایی که به فرم سینوسی هستند در نمونه ها متفاوت می باشد، علت اصلی این پدیده ، تعداد و فاصله سخت کننده ها است زیرا تمام مشخصات نمونه ها مشابه هم هستند بنابراین در این سری از آنالیزها می توان علت اصلی تعداد موجهای تشکیل شده را به همین مشخصه هندسی مربوط دانست بطوریکه با کاهش فاصله رینگها تعداد موجهای سینوسی بیشتر می شود ولی تغییر شکل ها در راستای شعاعی کاهش می یابد و در حالت ایده آل با افزایش تعداد رینگ ها دیگر لوله کمانش نمی کند.

### نتایج:

در این مقاله اثر سخت کننده ها بر خط لوله تقویت شده با سخت کننده های حلقوی به روش عناصر محدود مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین نتایج بدست آمده به قرار زیر می باشد:

- ۱- کمانش اولیه با پیدایش تعدادی از موج های کمانشی در بخشی از جداره لوله و در باری کمتر از بار بحرانی لوله بدون ناکاملی (ایده آل) اتفاق می افتد.
- ۲- در نتایج لوله بدون رینگ بعد از کمانش در حدود ۲ میلیمتر پس کمانش داریم که مقدار پس کمانش در لوله با دو رینگ نسبت به حالت قبل کمتر (در حدود یک و نیم میلیمتر) می باشد
- ۳- ملاحظه می شود که با زیاد کردن تعداد رینگها مقاومت کمانشی خط لوله افزایش یافته که با توجه به آنالیزهای انجام شده، بر روی نمونه ها، مقدار افزایش مقاومت نسبت به مقاومت اولیه چشمگیر می باشد.

- ۴- افزایش تعداد رینگها همراه با کاهش طول لوله بدون تقویت سبب می شود کمانش اولیه در نمونه ها سریعتر اتفاق بیفتد.
- ۵- تسلیم جداره لوله از نواحی وسط و انتهایی لوله آغاز می شود و محل دقیق این نواحی بستگی به ناکاملی هندسی دارد.
- ۶- مقدار تغییر مکانها به سمت داخل جداره لوله نسبت به تغییر مکانها به سمت خارج، در نواحی میانی خیلی بیشتر و در حدود ۵ برابر است.
- ۷- پس از کمانش نمونه انتشار کمانش در دو جهت طولی و شعاعی در نمونه اتفاق می افتد.
- ۸- با افزایش تعداد موجهای محیطی، مقاومت نمونه بیشتر می شود پس می توان راهکاری اندیشید که مود کمانشی لوله به سمت افزایش موجهای محیطی پیش برود.
- ۹- ملاحظه می شود که با زیاد کردن تعداد رینگ ها هم مقاومت لوله بالا می رود و هم کمانش لوله از بین می رود.
- ۱۰- استفاده از رینگهای تقویتی بجای افزایش ضخامت نمونه برای افزایش مقدار فشار کمانشی نمونه بسیار مفیدتر و اقتصادی تر می باشد.
- ۱۱- مقادیر منفی و مثبت تغییر مکان و کرنش در نمودارهای مذکور به ترتیب فرورفتگی و برآمدگی هندسه جداره لوله را نشان می دهد.
- ۱۲- با افزایش طول لوله، مقدار ظرفیت کمانشی کاهش و تغییر شکل نهایی ناشی از کمانش جداره لوله افزایش می یابد.

مراجع:

1. Batdorf, B. (1947) "A simplified method of elastic stability analysis for thin cylindrical shell, Modified equilibrium equation" NACATN 1342, June
2. Seleim, S. S., Roorda, J. (1985) "Theoretical and experimental results on the post-buckling of ring-stiffened cylinders" Journal of structural engineering.
- ۳- شوکتی، ح. (۱۳۸۱) «مطالعه آزمایشگاهی رفتار کمانشی و پس کمانشی پوسته های استوانه ای با شرایط مرزی کلاسیک» اولین کنفرانس سازه های جدار نازک، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه.
- ۴- شوکتی، ح. (۱۳۸۲) «رفتار غیر خطی هندسی پوسته های استوانه ای تحت اثر فشار یکنواخت بیرونی» ششمین کنفرانس بین المللی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- ۵- شوکتی، شاهنده، ریاحی، حسینی فاطمی. (۱۳۸۷) «بررسی آزمایشگاهی رفتار اعوجاجی سخت کننده های حلقوی در کمانش خط لوله تقویت شده» چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- ۶- شوکتی، ح. (۱۳۷۶) «رفتار کمانشی پوسته های استوانه ای در شرایط مرزی مختلف» چهارمین کنفرانس بین المللی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
7. Showkati, H., Ansourian, H. (1995) "Influence of primary boundary conditional on the buckling of shallow cylindrical shells" Constructional steel research, vol. 36, no. 1, pp. 53-75
8. Adaptive methods for non-linear finite element analysis of shell structures, K. M. Okstad, 1994:66, ISBN 82-7119-670-7, ISSN 0802-3271
9. Validation of Numerical Collapse Behaviour of Thin-Walled Corrugated Panels, Håvar Ilstad, 1999:101, ISBN 82-471-0474-1, ISSN 0802-3271
10. Capacity Assessment of Titanium Pipes Subjected to Bending and External Pressure, Arve Bjørset, 1999:100, ISBN 82-471-0473-3, ISSN 0802-3271.
11. F. P. Gao, X. Y. Gu, D. S. Jeng. "Physical modeling of untrenched submarine pipeline instability." J. Ocean Engineering. 30 (2003) P. 1283-1304.
12. M. Kashani, R. Young. "Installation load consideration in ultra-Deepwater pipeline sizing." J. Transportation Eng. (2005) 131: 8(632).
13. S.W. Gong, K.Y. Lam, C. Lu. "Structural analysis of a submarine pipeline subjected to underwater shock." J. Pressure vessels and piping. 77 (2000) 417-423.
14. J.F. Chen, J. M. Rotter. "Effective cross sections of asymmetric rings on cylindrical shells. J. Structural Eng. (1998) P. 1074-1080.