



## بررسی تجربی و عددی تأثیر خرابی مواد نرم بر توانایی تحمل بار لوله های دارای فرورفتگی با فشار داخلی، ضخامت دیواره و قطر سمبه متفاوت

رضا اکبری آلاشتی<sup>1\*</sup>، ساناز جعفری<sup>2</sup>، سید جمال حسینی پور<sup>3</sup>، عبدالحمید گرجی<sup>4</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل

\*بابل، صندوق پستی 47148-71167، raalashti@nit.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 تیر 1393

پذیرش: 19 آذر 1393

ارائه در سایت: 20 دی 1393

کلید واژگان:

تست تجربی

خرابی مواد نرم

فرورفتگی

توانایی تحمل بار

آنالیز المان محدود

در این مقاله تأثیر خرابی مواد نرم بر رفتار لوله های دارای فرورفتگی تحت بارگذاری فشار داخلی به کمک روش های تجربی و عددی مورد بررسی قرار می گیرد. در روش عددی رفتار پلاستیک لوله ها تحت فرآیند ایجاد فرورفتگی با استفاده از تئوری مکانیک خرابی محیط های پیوسته و آنالیز المان محدود الاستیک-پلاستیک مدل سازی می شود. در شبیه سازی های المان محدود، از مدل خرابی پلاستیسیته پیشنهاد شده توسط ژو و ویرزیکی استفاده می شود. این مدل خرابی پلاستیسیته تأثیر چهار پارامتر مهم در پیش بینی شکست مواد نرم تحت عنوان قانون خرابی، نرمی پذیری، فشار هیدروستاتیک و زاویه لود را در بر می گیرد. عمق فرورفتگی هدف به عنوان معیار برای بررسی توانایی تحمل بار لوله تحت فرآیند ایجاد فرورفتگی توسط سمبه کروی صلب در نظر گرفته می شود. به منظور راستی آزمایی محاسبات عددی، مجموعه ای از تست های آزمایشگاهی بر روی لوله فولادی API XB با فشار داخلی اتمسفریک انجام می گیرد. بعد از مرحله راستی آزمایی، محاسبات پارامتریک برای محدوده متفاوتی از فشار داخلی، ضخامت دیواره و قطر سمبه برای لوله آلومینیومی 2024-T351 با و بدون در نظر گرفتن تأثیر خرابی انجام می گیرد و نتایج مقایسه خواهند شد. نهایتاً نشان داده می شود که خرابی نقش مهمی در پیش بینی توانایی تحمل بار لوله دارای فرورفتگی بازی می نماید. نتایج این مقاله توانایی مدل در نظر گرفته شده در پیش بینی شکست مواد نرم تحت بارگذاری های چند محوره را تأیید می کند.

## Experimental and numerical investigation of ductile damage effect on load bearing capacity of a dented pipe with different internal pressure, wall thickness and indenter diameter

Reza Akbari Alashti\*, Sanaz Jafari, Seyed Jamal Hosseinipour, Abdol Hamid Gorji

Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran

\*P.O.B. 47148-71167 Babol, Iran, raalashti@nit.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 15 July 2014

Accepted 10 December 2014

Available Online 10 January 2015

### Keywords:

Experimental test

Ductile damage

Indentation

Finite element analysis

Load bearing capacity

### ABSTRACT

In this paper, the effect of ductile damage on the behavior of a dented pipe subjected to internal pressure is investigated by experimental and numerical methods. In the numerical investigation, the plastic behavior of pipes under indentation is studied using continuum damage mechanics theory and the elastic-plastic finite element analysis. Finite element calculations are carried out using the damage plasticity model proposed by Xue and Wierzbicki (X-W). The proposed damage plasticity model incorporates effects of four parameters that play an important role in predicting the fracture initiation, namely the damage rule, the softening effect, the hydrostatic pressure and the Lode angle. The target dent depth is considered an indication of the load bearing capacity of the pipe under indentation process by a rigid spherical indenter. To validate numerical calculations, a series of experimental tests are conducted on the API XB steel pipe with atmospheric pressure. After verification, numerical calculations for different ranges of internal pressures, wall thickness and indenter diameter with and without damage effect are carried out for aluminum 2024-T351 pipe and results are compared. It is shown that damage plays an important role on the load bearing capacity of an indented pipe. Results of the present study confirm the credibility of the proposed model in predicting the ductile fracture under multi-axial state of stress loadings.

### 1- مقدمه

محل مصرف، خطوط لوله می باشند. خرابی<sup>1</sup> عموماً در اثر برخورد با اجسام

سنگین بر روی خطوط لوله ایجاد می شود و کاهش ضخامت لوله به همراه

یکی از چالش برانگیزترین اجزاء در انتقال منابع نفت و گاز از پالایشگاه ها تا

1- Damage

Please cite this article using:

R. A. Alashti, S. Jafari, S. J. Hosseinipour, A. H. Gorji, Experimental and numerical investigation of ductile damage effect on load bearing capacity of a dented pipe with different internal pressure, wall thickness and indenter diameter, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 231-242, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

قرار گرفتن در محیط های خورنده می تواند تأثیر مهمی در عملکرد بهینه لوله داشته باشد. بنابراین بررسی رفتار خطوط لوله در شرایط بارگذاری متفاوت به منظور کاهش تأثیرات خرابی امری ضروری است که این امر با در نظر گرفتن فرآیند طراحی، انتخاب مواد و روش های عملیاتی مناسب امکان پذیر خواهد بود. فرورفتگی<sup>1</sup>، به عنوان مهمترین عامل ایجاد خرابی در خطوط لوله انتقال نفت و گاز داخل یا خارج از دریا شناخته می شود. یک نمونه از فرورفتگی واقعی در شکل 1 نشان داده شده است.

در ناحیه فرورفتگی، تغییر شکل پلاستیک پایدار در سطح مقطع دایروی لوله رخ می دهد که باعث ایجاد تمرکز تنش و کرنش موضعی در آن ناحیه می شود. مطابق با شکل 2 در ناحیه فرورفتگی قطر لوله کاهش می یابد و عمق فرورفتگی ( $\delta$ ) بعنوان ماکزیمم مقدار کاهش در قطر لوله نسبت به حالت اولیه تعریف می شود [1, 2].

در کارهای تحقیقاتی پیشین از شبیه سازی های تجربی و المان محدود به شکل وسیعی برای مطالعه رفتار خطوط لوله دارای فرورفتگی استفاده شده است. اما در زمینه مدلسازی تحلیلی فرآیند ایجاد فرورفتگی در مقایسه با دو روش ذکر شده کارهای کمتری انجام گرفته است [2-17]. بررسی منابع موجود در زمینه بار بحرانی و آنالیز پلاستیک لوله های دارای فرورفتگی مشخص می کند که تاکنون تأثیر خرابی مواد نرم بر روی آنالیز توانایی تحمل بار لوله ها لحاظ نشده است. معیارهای متفاوتی برای ارزیابی رفتار فرورفتگی در خطوط لوله وجود دارد. فرورفتگی ها در خطوط لوله بر اساس شدت ضربه وارده به دیواره لوله و هندسه جسم برخورد کننده به انواع متفاوتی تقسیم می شوند [3, 4]. نتایج شبیه سازی های المان محدود نشان می دهد که در هر لحظه از بارگذاری تماس کاملی بین سمبه صلب نیمه کروی یا کروی و لوله وجود ندارد [5, 6]. بعلاوه انواع متفاوت فرورفتگی ها باعث می شوند تا استحکام استاتیکی و خستگی لوله ها کاهش یابد [2]. تأثیر بارگذاری فشاری خارجی به تنهایی [8] و ترکیبی از بارگذاری خمشی به همراه فشار داخلی [5-7] بر روی فروپاشی لوله های دارای فرورفتگی برای مقادیر متفاوتی از نسبت قطر خارجی به ضخامت دیواره لوله توسط روش های تجربی و عددی مطالعه شده است. پاسخ لوله های دارای فرورفتگی به بارگذاری خمشی وابسته به موقعیت فرورفتگی است. اگر فرورفتگی تحت فشار باشد خمش از نوع بسته شونده و اگر فرورفتگی تحت کشش باشد خمش باز شونده تعریف می شود [9]. تحقیقات نشان داده است که بار حدی لوله های دارای فرورفتگی در بارگذاری خمشی بسته شونده کمتر از نوع باز شونده می باشد [9].

خواص مواد از پارامترهای مهم در ارزیابی تغییرات تنش و بار حدی لوله های دارای فرورفتگی است [10, 12]. برای لوله هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم 6082-T6، فولاد X65 SAW و مواد الاستیک-کاملاً پلاستیک گزارش شده است که تغییرات تنش پسماند محوری و محیطی تابعی از ابعاد سمبه، مقدار فشار داخلی و موقعیت زاویه ای تکیه گاه لوله است [10, 12]. از الگوریتم های فیلترسازی برای حذف نویز و خطاهای ناشی از اندازه گیری های آزمایشگاهی در ناحیه تغییر شکل یافته و جایگزین کردن داده های غیر یکنواخت اولیه با داده های یکنواخت استفاده شده است [13, 14]. معیار کرنش موضعی ساده ای تحت عنوان معیار اوپان<sup>2</sup> برای ارزیابی تأثیر عمق فرورفتگی بر روی فشار انفجاری<sup>3</sup> خطوط لوله در نظر گرفته شده است [15]. ایشان نشان دادند که همزمان با افزایش فشار داخلی لوله معیار اوپان به مقدار مجانبی کمتر از مقدار بحرانی رسیده و نهایتاً ثابت باقی می ماند [15]. برای حذف نمودن این عیب، معیاری ترکیبی بر اساس روش حجمی<sup>4</sup> و پارامتر تنش سه محوره<sup>5</sup> برای بررسی تحمل بار خطوط لوله شامل عیوب شیاری<sup>6</sup> و فرورفتگی ارائه گردید [16]. بعلاوه، شبیه سازی های المان محدود نشان دادند که عمق فرورفتگی هدف به عنوان یک معیار حدی برای بارگذاری فشار داخلی و گشتاور خمشی درون صفحه ای در لوله های دارای فرورفتگی با حداکثر عمق برابر با 5% قطر خارجی در مقایسه با لوله سالم کاهش نمی یابد [15]. در نهایت نیز خطوط لوله ای که بر روی بستر انعطاف پذیر قرار دارند به صورت عددی و به واسطه برخورد اجسام با لوله تحت فشار بدون در نظر گرفتن تأثیر خرابی شبیه سازی شده اند [17].

از بررسی نتایج آزمایشگاهی مشخص گردیده است که خرابی نتیجه ای از انباشت تغییر شکل های پلاستیک در مواد نرمی است که نرمی پذیری<sup>7</sup> بالایی را در نواحی درگیر شده از خود نشان می دهند [18]. شکست مواد نرم در ساختارها شامل سه مرحله است: تجمع خرابی، آغاز شکست به عنوان نتیجه ای از انباشت خرابی در مواد نرم و گسترش ترک [18, 19]. برای تغییر شکل های پلاستیک در حد کم یا متوسط، می توان از تأثیر خرابی بر روی منحنی استحکام ماده صرف نظر نمود که این مطابق با فرضیات موجود در مکانیک محیط های پیوسته کلاسیک است [18, 20-26]. اما زمانی که تغییر شکل های پلاستیک بزرگ باشند مانند آنچه که در لوله ها تحت فرآیند ایجاد فرورفتگی رخ می دهد، برای اصلاح منحنی تنش-کرنش در هر لحظه از بارگذاری بایستی تأثیر خرابی در پیش بینی زوال<sup>8</sup> مواد در نظر گرفته شود [18-20, 26].

مدل های شکست مواد نرم را می توان به سه گروه اصلی تقسیم نمود: مدل های میکرو مکانیکی<sup>9</sup> مانند مدل های فرض شده توسط گورسین [27] و تورگارد [28]. مدل های مکانیک محیط پیوسته سنتی<sup>10</sup> مانند مدل های پیشنهاد شده توسط جانسون-کوک [29] و ویلکینز و همکارانش [30] و در نهایت توسعه این نوع از مدل های خرابی تحت عنوان مدل های خرابی مکانیک محیط پیوسته<sup>11</sup> [17, 26]. از بررسی نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود که چهار پارامتر در پیش بینی درست آغاز شکست در مدل های شکست مواد نرم نقش اساسی دارند. در مدل های خرابی مواد نرم تأثیر رشد و

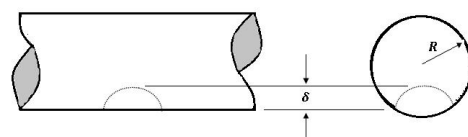
فرورفتگی در شکل 1 نشان داده شده است.

در ناحیه فرورفتگی، تغییر شکل پلاستیک پایدار در سطح مقطع دایروی لوله رخ می دهد که باعث ایجاد تمرکز تنش و کرنش موضعی در آن ناحیه می شود. مطابق با شکل 2 در ناحیه فرورفتگی قطر لوله کاهش می یابد و عمق فرورفتگی ( $\delta$ ) بعنوان ماکزیمم مقدار کاهش در قطر لوله نسبت به حالت اولیه تعریف می شود [1, 2].

در کارهای تحقیقاتی پیشین از شبیه سازی های تجربی و المان محدود به شکل وسیعی برای مطالعه رفتار خطوط لوله دارای فرورفتگی استفاده شده است. اما در زمینه مدلسازی تحلیلی فرآیند ایجاد فرورفتگی در مقایسه با دو روش ذکر شده کارهای کمتری انجام گرفته است [2-17]. بررسی منابع موجود در زمینه بار بحرانی و آنالیز پلاستیک لوله های دارای فرورفتگی مشخص می کند که تاکنون تأثیر خرابی مواد نرم بر روی آنالیز توانایی تحمل بار لوله ها لحاظ نشده است. معیارهای متفاوتی برای ارزیابی رفتار فرورفتگی در خطوط لوله وجود دارد. فرورفتگی ها در خطوط لوله بر اساس شدت ضربه وارده به دیواره لوله و هندسه جسم برخورد کننده به انواع متفاوتی تقسیم می شوند [3, 4]. نتایج شبیه سازی های المان محدود نشان می دهد که در هر لحظه از بارگذاری تماس کاملی بین سمبه صلب نیمه کروی یا کروی و لوله وجود ندارد [5, 6]. بعلاوه انواع متفاوت فرورفتگی ها باعث می شوند تا استحکام استاتیکی و خستگی لوله ها کاهش یابد [2]. تأثیر بارگذاری فشاری خارجی به تنهایی [8] و ترکیبی از بارگذاری خمشی به همراه فشار داخلی [5-7] بر روی فروپاشی لوله های دارای فرورفتگی برای مقادیر متفاوتی از نسبت قطر خارجی به ضخامت دیواره لوله توسط روش های تجربی و عددی مطالعه شده است. پاسخ لوله های دارای فرورفتگی به بارگذاری خمشی وابسته به موقعیت فرورفتگی است. اگر فرورفتگی تحت فشار باشد خمش از نوع بسته شونده و اگر فرورفتگی تحت کشش باشد خمش باز شونده تعریف می شود [9]. تحقیقات نشان داده است که بار حدی لوله های دارای فرورفتگی در بارگذاری خمشی بسته شونده کمتر از نوع باز شونده می باشد [9].



شکل 1 نمونه ای از فرورفتگی در لوله



شکل 2 ابعاد هندسی لوله دارای فرورفتگی

2- Oyane's criterion  
3- Burst pressure  
4- Volumetric method  
5- Stresstriaxiality  
6- Gouge  
7- Ductility  
8- Deterioration  
9- Micro mechanical model  
10- Conventional continuum mechanic model (CCM)  
11- Continuum damage mechanic model (CDM)

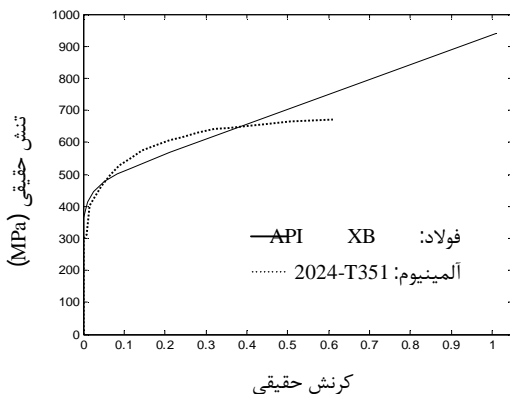
فرورفتگی را به کمک روش های عددی و تجربی مورد مطالعه قرار می دهد. در مدل ژو-ویرزیبکی قانون خرابی به صورت تابعی توانی فرض می شود تا مشخصه غیر خطی بودن را در مرحله تجمع خرابی لحاظ نماید. در شبیه سازی المان محدود مدل های شکست مواد نرم، کرنش سختی ایزوتروپیک و قانون جریان وابسته برای تعریف بخش پلاستیک از ماتریس استحکام ماده به همراه معیار تسلیم فون میزز در نظر گرفته می شود و مدل های شکست مواد نرم در فضایی مخلوط از حالت تنش-کرنش فرموله می شوند. برای ایجاد فرورفتگی در لوله، بارگذاری توسط یک سمبه کرووی و صلب انجام می شود. به منظور راستی آزمایی، نتایج شبیه سازی المان محدود برای لوله فولادی API XB با نتایج آزمایشگاهی مقایسه خواهند شد. با استفاده از مدل المان محدود راستی آزمایی شده، مطالعه پارامتریک بر اساس فشار داخلی، ضخامت دیواره و قطر سمبه متفاوت برای لوله آلومینیومی 2024-T351 با و بدون در نظر گرفتن تأثیر خرابی انجام می گیرد. برای تعریف پارامترهای خرابی برای فولاد API XB و آلومینیوم 2024-T351 از نتایج تست های آزمایشگاهی استاندارد گزارش شده در مراجع [18,25] استفاده شده است. متوسط خواص مکانیکی و منحنی تنش-کرنش حقیقی برای نمونه فولادی با استفاده از انجام تست کشش تک محوره بر اساس استاندارد ASTM-E8 توسط نویسندگان این مقاله و برای نمونه آلومینیومی از مرجع [18] به ترتیب در جدول 1 و شکل 3 آورده شده است.

## 2- مدل خرابی پلاستیسته ژو-ویرزیبکی

نتایج آزمایشات انجام شده بر روی رفتار مواد نرم نشان می دهد که برای پیش بینی بهتر رفتار مواد در طول مسیر بارگذاری باید مدل خرابی مناسبی را در تئوری پلاستیسته کلاسیک لحاظ نمود [18-26]. در مدل های مکانیک خرابی محیط پیوسته زوال مواد توسط یک متغیر داخلی به نام پارامتر خرابی تشریح می شود. فرض می شود که خرابی ایزوتروپیک باشد و مقدار آن در هر لحظه از بارگذاری توسط پارامتر عددی  $D$  تعیین شود. در فضای تنش های اصلی، فشار هیدرواستاتیک ( $p$ )، تنش معادل فون میزز ( $\sigma_{eq}$ ) و پارامتر

جدول 1 خواص مکانیکی فولاد API XB و آلومینیوم 2024-T351

خواص مواد	فولاد API XB	آلومینیوم 2024-T351
استحکام تسلیم ( $\sigma_0$ )	365 مگا پاسکال	300 مگا پاسکال
نسبت پواسان ( $\nu$ )	0/3	0/3
تنش شکست حقیقی ( $\bar{\sigma}_f$ )	940 مگا پاسکال	670 مگا پاسکال
کرنش شکست حقیقی ( $\bar{\epsilon}_f$ )	1/01	0/62
مدول الاستیک ( $E$ )	200 گیگا پاسکال	70 گیگا پاسکال
مرجع	آزمایش تجربی	[25, 18]



شکل 3 منحنی تنش-کرنش حقیقی برای فولاد و آلومینیوم

گسترش خرابی بر روی رفتار ماده به واسطه یک پارامتر اسکالر به نام متغیر خرابی ( $D$ ) بررسی می شود. با مرور کارهای تحقیقاتی انجام گرفته در زمینه مدل های شکست مواد نرم می توان متوجه شد که مهمترین بخش در ساختار این مدل ها، پیش بینی صحیح شکست بر اساس حالت تنش در ماده است که برای رسیدن به این هدف، ترکیبات خاصی از پارامترها با بیان ریاضیاتی متفاوت در هر یک از این مدل ها به کار رفته است. در بیشتر مدل های شکست، مکان هندسی کرنش شکست به نحوی تعریف می شود که تأثیر حالت تنش بر روی پیش بینی شکست به خوبی ارضاء شود. به صورت کلی مکان هندسی کرنش شکست با ترکیب مناسب توابع فشار و زاویه لود<sup>1</sup> تعریف می شود [26-18,20]. تأثیر فشار بر روی کرنش شکست می تواند به واسطه پارامتر تنش سه محوره همانند کارهای انجام گرفته توسط لیمتر، جانسون-کوک و مدل کلمب-مور اصلاح شده بیان شود و یا توسط فشار هیدرواستاتیک مانند کارهای ویلکینز و همکارانش، نوریس و همکارانش ژو و ویرزیبکی تأثیر فشار را توسط فشار هیدرواستاتیک تشریح شود. فشار هیدرواستاتیک<sup>2</sup> (نا متغیر اول تانسور تنش) و پارامتر زاویه لود (نا متغیر سوم تانسور تنش انحرافی) تأثیرات مهمی بر روی شکل مکان هندسی نقاط شکست در فضای تنش های اصلی دارند. پارامتر زاویه لود اصلاح کننده سطح مقطع مکان هندسی نقاط شکست بر روی صفحه اکتاهدرال بر اساس تنش های انحرافی جاری در ماده است و پارامتر فشار بر روی شکل مکان هندسی نقاط شکست تأثیرگذار است. علاوه بر حالت تنش، نرمی پذیری<sup>3</sup> ناشی از انباشت خرابی نیز بر روی رفتار ماده تأثیرگذار است. زمانی که خرابی رخ می دهد سطح مقطع مؤثر تحمل بار در ماده کاهش می یابد و این نرمی پذیری در تغییر شکل های پلاستیک بزرگ بیشتر اهمیت پیدا می کند. در برخی از مدل های شکست مانند ژو و ویرزیبکی [26-18,20]، جانسون-کوک بهبود یافته و لیمتر، تأثیر نرمی پذیری توسط شکل های متفاوتی از تابع زوال در نظر گرفته شده است. اما در برخی دیگر همانند مدل ارائه شده توسط ویلکینز و همکارانش [30]، جانسون-کوک سنتی [29] از تأثیر نرمی پذیری صرف نظر شده است. علاوه بر حالت تنش و نرمی پذیری، قانون خرابی<sup>4</sup> پارامتری مهم در ساختن مدل شکست است. خرابی فرآیندی تجمعی است و از قانون خرابی برای مشخص نمودن مقدار خرابی انباشته شده در طی مسیر بارگذاری استفاده می شود. در ساده ترین شکل نمو خرابی به صورت مستقیمی با نمو کرنش پلاستیک متناسب است. اما تحقیقات پیشین نشان دادند که انباشت خرابی در طی مسیر بارگذاری لزوماً به صورت خطی نسبت به کرنش پلاستیک معادل تغییر نمی نماید [26-18,20].

یکی از جدیدترین مدل های شکست در گروه مدل های خرابی مکانیک محیط پیوسته مدل ارائه شده توسط ژو و ویرزیبکی است. ژو و همکارش به خوبی توانستند قوانین پلاستیسته و خرابی را با هم ترکیب نموده و مدل خرابی پلاستیسته ای را ایجاد کنند که بتواند اهمیت در نظر گرفتن تأثیر خرابی مواد نرم در ارزیابی توانایی تحمل بار لوله های دارای فرورفتگی تحت فشار داخلی را با در نظر گرفتن چهار پارامتر مهم نرمی پذیری، قانون خرابی، زاویه لود و فشار هیدرواستاتیک نشان دهد. در این تحقیق فرض بر این است که ماکزیمم توانایی تحمل بار لوله در مرحله آغاز شکست رخ دهد و بار حدی لوله بر این اساس تعیین می شود.

تحقیق حاضر رفتار الاستیک-پلاستیک لوله ها تحت فرآیند ایجاد

1- Lode angle  
2- Hydrostatic pressure  
3- Softening  
4- Damage rule

2-3- تأثیر فشار هیدرواستاتیک و زاویه لود

تأثیر پارامترهای فشار هیدرواستاتیک و زاویه لود با تعریف مکان هندسی نقاط شکست و با استفاده از روش جداسازی استوانه ای توسط توابع  $\mu_p(p)$  و  $\mu_\theta(\theta)$  در هر لحظه از بارگذاری وارد مدل خرابی ژو-ویرزبیکي خواهد شد [26-18,20]. همانطور که گفته شد پارامترهای فشار هیدرواستاتیک و زاویه لود تأثیرات مهمی بر روی شکل مکان هندسی نقاط شکست در فضای تنش های اصلی دارند. فرض می شود که توابع وابستگی به زاویه لود و فشار هیدرواستاتیک در مکان هندسی کرنش شکست مستقل از یکدیگر بوده و مکان هندسی نقاط شکست از ضرب نمودن این توابع در هم بصورت رابطه (9) بدست آید:

$$\epsilon_f = \epsilon_{f0} \mu_p(p) \mu_\theta(\theta) \quad (9)$$

که در آن  $\epsilon_{f0}$  کرنش شکست مرجع در تست کشش تک محوره بدون اعمال فشار خارجی بر روی نمونه می باشد. تعدادی تست کشش تک محوره به همراه اعمال فشار خارجی بر روی نمونه برای آلیاژهایی متفاوت توسط بریدمن انجام گردید و او توانست رابطه ای بین کرنش شکست و فشار اعمالی بر نمونه بدست آورد [31]. تابع وابستگی به فشار هیدرواستاتیکی در مدل خرابی پلاستیسیته ژو-ویرزبیکي نتیجه ای از این آزمایشات بریدمن است. در تحقیق حاضر فرم لگاریتمی تابع وابستگی به فشار هیدرواستاتیکی بصورت رابطه (10) در نظر گرفته می شود [18]:

$$\mu_p(p) = \begin{cases} 1 - q \ln\left(1 - \frac{p}{p_{Lim}}\right), & p \geq p_{Lim} \\ 0, & p < p_{Lim} \end{cases} \quad (10)$$

تابع وابستگی به زاویه لود در مدل ژو-ویرزبیکي نتیجه ای از تعریف آن در مدل ویلکینز و همکارانش بر اساس پارامتر عدم تقارن تنش  $A$  بصورت رابطه (11) است [18,30]:

$$A = \begin{cases} (1 - 2X)/(1 + X) & 0 \leq X \leq 0.5 \\ (2X - 1)/(2 - X) & 0.5 \leq X \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

در رابطه (11) بیانگر نسبت تنش های انحرافی اصلی است:

$$X = (S_2 - S_3)/(S_1 - S_3) \quad (12)$$

نوع اول تابع وابستگی به زاویه لود در مدل ژو-ویرزبیکي به صورت رابطه (13) تعریف می شود [18]:

$$\mu_\theta(\theta) = \begin{cases} \frac{\sqrt{X^2 - X + 1}}{1 + (\sqrt{3}/\gamma - 2)X} & 0 \leq X \leq 0.5 \\ \frac{\sqrt{X^2 - X + 1}}{1 + (\sqrt{3}/\gamma - 2)(1 - X)} & 0.5 \leq X \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

که در آن  $p_{Lim}$  و  $q$  ثوابت ماده می باشند و  $p$  فشار هیدرواستاتیک جاری است. مکان هندسی شکست در فضای کرنش پلاستیک-تنش متوسط در شکل 4 نشان داده شده است. خطوط پر بیانگر وابستگی به فشار هیدرواستاتیکی ماده و خطوط تو خالی وابستگی به زاویه لود را نشان می دهند. از رابطه (10) می توان نشان داد که کرنش شکست زمانی به مقدار صفر نزدیک می شود که فشار هیدرواستاتیکی به فشار کات-آف نزدیک شود:

$$p_{cut-off} = p_{Lim}(1 - \exp^{1/q}) \quad (14)$$

که در آن  $p_{Lim}$  فشار حدی است که پایین تر از آن مواد در شرایط بارگذاری تک محوره دچار خرابی نخواهند شد و  $p_{cut-off}$  فشاری است که بعد از آن شکست به دلیل کشش هیدرواستاتیک رخ می دهد. همان طور که در شکل 4 نشان داده شده است مکان هندسی نقاط شکست بین فشار حدی و فشار کات-آف قرار می گیرد و در صفحه هشت وجهی و در فشار کات-آف این مکان هندسی به یک نقطه در محورهای سه گانه تبدیل می شود. علاوه بر این

زاویه لود ( $\theta_L$ ) با ترم های  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  بعنوان تنش های اصلی ماکزیمم، متوسط و مینیمم و ترم های  $s_1, s_2, s_3$  بعنوان تنش های انحرافی اصلی ماکزیمم، متوسط و مینیمم بصورت رابطه (1) تا (3) تعریف می شوند [26-18,20]:

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2} \quad (2)$$

$$\theta_L = \tan^{-1}\left\{\frac{1}{\sqrt{3}}\left(2\frac{S_2 - S_3}{S_1 - S_3}\right) - 1\right\} \quad (3)$$

با استفاده از پارامتر خرابی مواد نرم ( $D$ ) در مدل شکست می توان معیار آغاز شکست را با استفاده از نامساوی  $D \geq D_{cr}$  تعریف نمود که در آن  $D_{cr}$  ثابت ماده می باشد. این معیار شکست عموماً در شکل بی بعد به صورت  $D/D_{cr} \geq 1$  بیان می شود. فرض می شود که در  $D = 0$  ماده سالم است و  $D = 1$  بیانگر از دست دادن کامل توانایی تحمل بار و آغاز شکست باشد [26-18]. نهایتاً، در یک مسیر بارگذاری پلاستیک اختیاری می توان پارامتر خرابی را با استفاده از انتگرال رابطه (4) به دست آورد:

$$D = \int_0^{\epsilon_c} dD \leq 1 \quad (4)$$

که در آن  $\epsilon_c$  کرنش بحرانی است که در آن شکست رخ می دهد.

2-1- قانون خرابی

کرنش شکست وابسته به مسیر بارگذاری است. بنابراین از قانون خرابی برای تعیین مقدار خرابی انباشته شده در طول مسیر بارگذاری به شکلی مناسب استفاده می شود [26-18,20]. شکل توانی قانون خرابی در مدل خرابی پلاستیسیته ژو-ویرزبیکي بصورت رابطه (5) در نظر گرفته می شود [18]:

$$D = (\epsilon_{eq}^p / \epsilon_f)^m \quad (5)$$

در حالیکه در این رابطه  $\epsilon_{eq}^p$  کرنش پلاستیک معادل انباشته شده می باشد. برای یک مقدار مشخص از  $\epsilon_f$ ، فرم نمودی قانون خرابی برای کاربرد در شبیه سازی های عددی بصورت رابطه (6) بیان می شود:

$$dD = m(\epsilon_{eq}^p / \epsilon_f)^{m-1} d\epsilon_{eq}^p / \epsilon_f \quad (6)$$

در رابطه (6)  $m$  ثابت ماده و  $\epsilon_f$  مکان هندسی کرنش شکست مؤثر است که بر اساس حالت تنش در ادامه تعریف خواهد شد [18].

2-2- تأثیر نرمی پذیری

زمانی که خرابی رخ می دهد استحکام ماده به دلیل کاهش یافتن سطح مقطع مؤثر تحمل بار کاهش می یابد [26-18,20]. همزمان با افزایش تغییر شکل های پلاستیک، ترک های کوچک ایجاد گردیده و شروع به رشد خواهند کرد. در تغییر شکل های بزرگ باید تأثیر نرمی پذیری را به کمک یک تابع کاهش مناسب وارد مدل شکست نمود [26-18,20]. این کار را می توان با در نظر گرفتن تابع عددی وابسته به پارامتر خرابی در ماتریس استحکام ماده مدلسازی کرد. بر اساس تئوری مکانیک محیط پیوسته، تابع پتانسیل تسلیم برای ماده آسیب دیده بصورت رابطه (7) بیان می شود:

$$\varphi = \sigma_{eq} - w(D)\sigma_M \quad (7)$$

شروع تغییر شکل پلاستیک مقدار تابع پتانسیل تسلیم برابر صفر است و در این زمان تابع کاهش  $w(D) = (1 - D^\beta)$  وارد رابطه (7) می شود:

$$\sigma_{eq} = (1 - D^\beta)\sigma_M \quad (8)$$

در رابطه (8)  $\sigma_M$  ماتریس استحکام ماده و  $\beta$  فاکتور کاهش می است که فرض می شود ثابتی نامنفی باشد.

شده شامل قطر میان صفحه، ضخامت دیواره لوله و قطر سمبه ایجاد می شود. ابعاد هندسی لوله فولادی API XB برای تست تجربی و لوله آلومینیومی 2024-T351 در مطالعه پارامتریک با دو ضخامت متفاوت در جدول 3 آورده شده است. برای هر دو لوله های فولادی و آلومینیومی، نسبت ضخامت دیواره به شعاع میان صفحه کمتر از 1/20 است و در نتیجه این لوله ها در محدوده ساختارهای جدار نازک قرار دارند. در تست تجربی، لوله فولادی دارای فشار اتمسفریک است اما در مطالعه پارامتریک فشارهای داخلی 0، 4، 8 و 16 مگا پاسکال به لوله آلومینیومی اعمال می شود.

بمنظور مدلسازی لوله در نرم افزار انسیس از دستگاه مختصات استوانه-ای  $(x, \theta, z)$  بترتیب در امتداد شعاعی، محیطی و محوری استفاده می شود. راستای شعاعی  $x$  عمود بر میان صفحه بوده و به سمت خارج مثبت است و مبدأ دستگاه مختصات در یک انتهای لوله در نظر گرفته شده است. نمای محیطی لوله در شکل 5 نشان داده شده است که بر اساس دستگاه مختصات انتخابی مکان اولین تماس بین سمبه و لوله در هر دو مدل تجربی و المان محدود  $z = L/2$  و  $\theta = 180^\circ$  است.

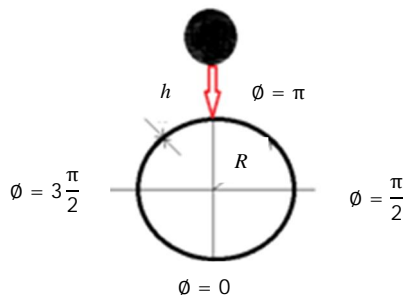
بمنظور مش بندی مدل المان محدود لوله جدار نازک در نرم افزار انسیس، از المان پوسته ای 4 گره ای به نام Shell181 با 6 درجه آزادی در هر گره استفاده می شود (3 درجه آزادی انتقالی، 3 درجه آزادی دورانی). این المان برای تحلیل های غیر خطی و کرنش های بزرگ بسیار مناسب است [32]. تعداد نهایی المان ها در لوله بعد از مش بندی و انجام تست همگرایی پاسخ ها به دست می آید.

از آنالیز تماسی و دستورات مربوط به آن برای ایجاد تماس بین سمبه کروی صلب و لوله استفاده می شود. تماس بین سمبه صلب و لوله از نوع تماس سطح به سطح، جسم انعطاف پذیر با جسم صلب تعریف می شود. سمبه با استفاده از شکل کروی المان Targe170 مدلسازی می شود که در فاصله ای مشخص نسبت به دیواره لوله قرار می گیرد. المان های تماسی بر روی سطح خارجی لوله با استفاده از المان Conta173 شبیه سازی خواهند شد. مقدار ضریب اصطکاک بین لوله و سمبه برابر مقدار ماکزیمم 0/3 در نظر گرفته می شود. باید توجه نمود که در تماس بین دو سطح که در ابتدا با هم

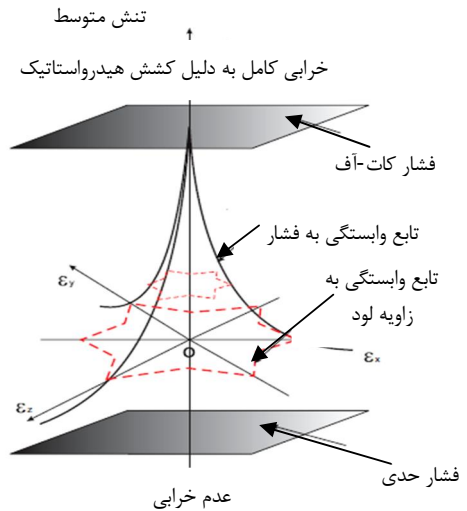
جدول 3 ابعاد هندسی لوله فولادی API XB و آلومینیومی 2024-T351

جنس لوله	طول لوله (mm)	ضخامت دیواره (mm)	قطر داخلی (mm)	قطر خارجی (mm)
فولاد API XB	1300	4/8	209/4	219
آلومینیوم 2024-T351	2000	12/5 17/5	744/5	762

سمبه کروی صلب



شکل 5 نمای محیطی از تماس بین سمبه کروی صلب و لوله



شکل 4 مکان هندسی نقاط شکست در فضای تنش متوسط-کرنش پلاستیک

شکل دایروی معیار تسلیم فون میزز با در نظر گرفتن تأثیر زاویه لود به شکلی گل مانند اصلاح می شود.

برای مجموعه معادلات در نظر گرفته شده در مدل خرابی پلاستیسیته ژو-ویرزبیک شش ثابت ماده  $\beta, m, \gamma, p_{lim}, q, \epsilon_0$  وجود دارند که برای هر ماده با استفاده از تست های آزمایشگاهی کالیبره می شوند. ژو و ویرزبیک تست های آزمایشگاهی را برای محدوده متفاوتی از تنش متوسط و زاویه لود انجام دادند و این ثوابت را برای فولاد و آلومینیوم کالیبره نمودند [18,25]. مشخصات خرابی برای این دو نوع از ماده در جدول 2 آورده شده است.

### 3- روش المان محدود

در این بخش روشی عددی بر مبنای مدلسازی المان محدود برای تخمین تأثیر پدیده خرابی بر روی توانایی تحمل بار لوله تحت فرآیند ایجاد فرورفتگی توسط سمبه کروی صلب ارائه می گردد. سمبه کروی صلب تغییر شکل هایی متقارن بر روی لوله ایجاد می کند و فرورفتگی ایجاد شده توسط آن از نوع صفحه ای نامعقد در نظر گرفته می شود. مدل المان محدود به واسطه تعریف مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک ماده و با استفاده از المان های پوسته ای بصورت سه بعدی در نرم افزار انسیس شبیه سازی می شود [32]. بمنظور مدلسازی صحیح پاسخ لوله به فرآیند ایجاد فرورفتگی روی آن، روابط مدل خرابی وارد کدهای شبیه سازی المان محدود می شود و معیار تسلیم ماده از نوع فون میزز با رفتار سختی ایزوتروپیک فرض خواهد شد.

### 3-1- مدلسازی هندسی

مدل المان محدود لوله کامل و سمبه با استفاده ابعاد هندسی در نظر گرفته

جدول 2 پارامترهای خرابی برای فولاد API XB و آلومینیوم 2024-T351

نماد	فولاد API XB	آلومینیوم 2024-T351
$(\epsilon_{f0})$	1	0/8
$(p_{lim})$	1000 مگا پاسکال	800 مگا پاسکال
$(q)$	2	1/5
$(\gamma)$	0/2	0/4
$(m)$	2	2
$(\beta)$	2	2
مرجع	[18,25]	[18,25]

شبهه سازی المان محدود بدست می آید. قبل از شروع فرآیند بارگذاری، به ازاء تمامی المان های موجود در مش بندی لوله خواص مکانیکی ماده تعریف می شود. در هر مرحله از بارگذاری مقدار تنش فون میز در هر یک از المان ها بررسی می شود. هر المانی که تنش فون میز آن از حد تسلیم ماده عبور نماید وارد مرحله پلاستیک خواهد شد و برای آن متغیر خرابی تعریف می شود. فرض می شود که حالت اولیه این مسئله غیرخطی با متغیرهای داخلی  $\epsilon_{eq,n}^p$  و  $D_n$  و حالت تنش در زمان  $t_n$  مشخص باشد. مقدار مشخصی از نمو بارگذاری به اندازه  $\Delta \epsilon$  در یک محدوده زمانی به مدل اعمال می شود. در این زمان بایستی مسئله را برای یافتن متغیرهای داخلی و حالت تنش در زمان  $t_{n+1} = t_n + \Delta t$  حل نمود.

داده های اولیه:  $\Delta \epsilon = \epsilon_{n+1} - \epsilon_n$  و  $\{\epsilon_{eq,n}^p, D_n, \sigma_n\}$  در زمان  $t_n$ .

داده هایی محاسبه شونده:  $\{\epsilon_{eq,n+1}^p, D_{n+1}, \sigma_{n+1}\}$  در زمان  $t_{n+1}$ .

**مرحله 1:** بمنظور شبهه سازی المان محدود مدل شکست ژو-ویرزیبکی، مقدار کوچکی تغییر مکان به گره مرکزی سمبه صلب به عنوان اولین مرحله از بارگذاری اعمال می شود به نحوی که در اثر تماس لوله با سمبه تغییر شکل الاستیک در آن به وجود آید که در نتیجه آن پارامتر خرابی برابر صفر است. در ادامه بارگذاری ها، تنش معادل فون میز برای هر المان در هر لحظه از بارگذاری بر روی لوله به عنوان تنش تکرار  $\sigma_{n+1}^{trail}$  محاسبه می شود. مقدار این تنش در تابع تسلیم  $\phi(\sigma_{n+1}^{trail}, D_n, \sigma_n)$  جایگذاری می شود. اگر  $\phi(\sigma_{n+1}^{trail}, D_n, \sigma_n) \leq 0$ ، تغییر شکل در محدوده الاستیک بوده و مقدار پارامتر خرابی صفر می باشد. در این صورت متغیرهای داخلی و حالت تنش بصورت (15) اصلاح می شوند:

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{trail}, \quad \epsilon_{eq,n+1}^p = \epsilon_{eq,n}^p, \quad D_{n+1} = D_n = 0 \quad (15)$$

اگر  $\phi > 0$ ، تغییر شکل در محدوده الاستیک-پلاستیک است. برای این المان ها بایستی مدل خرابی پلاستیسیته بمنظور اصلاح تنش معادل و برقراری شرایط سازگاری اعمال شود.

**مرحله 2:** برای هر المان با تغییر شکل الاستیک-پلاستیک، ابتدا نمو کرنش پلاستیک  $\Delta \epsilon_{eq}^p$  محاسبه می شود و در ادامه دو متغیر داخلی  $\epsilon_{eq}^p$  و  $D$  برای استفاده در مرحله بارگذاری بعدی اصلاح می شوند. در نهایت مقدار پارامتر خرابی در زمان  $t_{n+1}$  بر اساس معادله (5) به شکل رابطه (16) بیان می شود:

$$D_{n+1} = D_n + m \left( \frac{\epsilon_{eq,n}^p}{\epsilon_{f,n}} \right)^{m-1} \frac{\Delta \epsilon_{eq}^p}{\epsilon_{f,n}} \quad (16)$$

در این رابطه مقدار کرنش شکست  $\epsilon_f$  بصورت رابطه (17) جایگذاری می شود:

$$\epsilon_{f,n} = \epsilon_{f0} \begin{cases} \left\{ \frac{1 - q \ln \left( 1 - \frac{p_n}{p_{lim}} \right)}{\sqrt{x_n^2 - x_n + 1}} \right\} & 0 \leq x_n \leq 0.5 \\ \left\{ \frac{1 - q \ln \left( 1 - \frac{p_n}{p_{lim}} \right)}{\sqrt{x_n^2 - x_n + 1}} \right\} & 0.5 \leq x_n \leq 1 \end{cases} \quad (17)$$

کرنش پلاستیک نهایی از رابطه (18) بدست می آید:

$$\epsilon_{eq,n+1}^p = \epsilon_{eq,n}^p + \Delta \epsilon_{eq}^p \quad (18)$$

سپس فاکتور کاهش با استفاده از تابع در نظر گرفته شده برای آن تنش معادل در زمان  $t_{n+1}$  به صورت رابطه (19) اصلاح می گردد:

$$\sigma_{n+1} = w(D_{n+1}) \sigma_n = (1 - D_{n+1})^\beta \sigma_n \quad (19)$$

در این زمان تمامی متغیرهای لازم  $\{\epsilon_{eq,n+1}^p, D_{n+1}, \sigma_{n+1}\}$  در زمان  $t_{n+1} = t_n + \Delta t$  اصلاح شده اند.

تماس ندارند، بهتر است اولین مرحله بارگذاری، تماس اولیه بسیار کمی ایجاد شود تا سطوح تماس همدیگر را درک کنند و بعد بارگذاری اصلی اعمال شود.

### 3-2- شرایط مرزی

در این تحقیق شرایط مرزی زیر در شبهه سازی المان محدود با و بدون در نظر گرفتن تأثیر خرابی به لوله های فولادی و آلومینیومی اعمال می شود:

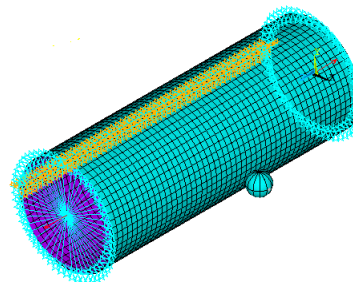
- گره های موجود در خط انتهایی لوله ها بمنظور جلوگیری از حرکت جسم صلب و شبهه سازی بستر صلیبی که لوله بر روی آن قرار دارد در تمامی جهات به طور کامل بسته می شوند ( $\theta = 0^\circ$ ).
  - بمنظور بارگذاری فشاری، دیواره داخلی لوله تحت فشار  $P$  قرار می گیرد و تنش محوری به اندازه  $(D_0^2 - D_i^2) / (D_0^2 - D_i^2) P$  برای در نظر گرفتن تأثیر کلاهک ها به مقطع ابتدایی و انتهایی لوله اعمال می شود.
  - لوله فولادی API XB : تغییر مکان گره های موجود در مقطع ابتدایی و انتهایی لوله در تمامی جهات باز نگه داشته می شود تا معادل شرایط مرزی آزاد موجود در تست های آزمایشگاهی باشد.
  - لوله آلومینیومی 2024-T351 : تغییر مکان گره های موجود در مقطع ابتدایی و انتهایی لوله در جهات شعاعی و محیطی بسته خواهند شد و در راستای محوری باز نگه داشته می شود تا امکان اعمال تنش محوری ناشی از تأثیر کلاهک ها وجود داشته باشد.
- نمونه ای از مدل اجزاء محدود مش بندی شده به همراه شرایط مرزی و سمبه کروی صلب در شکل 6 نشان داده شده است.

### 3-3- مراحل ایجاد فرورفتگی

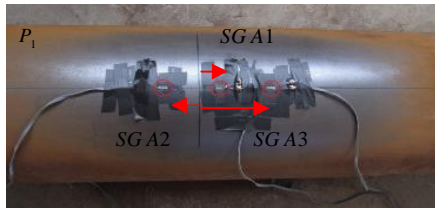
مراحل ایجاد فرورفتگی بر روی لوله با در نظر گرفتن مراحل زیر شبهه سازی می شود. در ابتدا لوله تحت بارگذاری فشار داخلی ( $P$ ) قرار می گیرد و شرایط مرزی لازم بر لوله اعمال می شود. فاصله بین لوله و سمبه برای ایجاد تماس تنظیم شده و لوله تا عمق فرورفتگی مشخص با اعمال تغییر مکان به گره مرکزی سمبه با نرخ جا به جایی کم بارگذاری می شود. بعد از اتمام بارگذاری سمبه از روی لوله برداشته شده تا پدیده بازگشت الاستیک رخ دهد. سطح تنش معادل در بخشی از هندسه لوله بر اساس عمق فرورفتگی و سطح تغییر شکل بدست آمده از تنش تسلیم ماده بیشتر شود و عمق فرورفتگی نهایی به دست می آید. نهایتاً فشار داخلی از درون لوله حذف می شود.

### 3-4- کاربرد مدل خرابی پلاستیسیته در شبهه سازی المان محدود

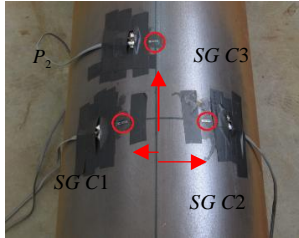
حل عددی معادلات پیوسته موجود در مدل های خرابی پلاستیسیته نیازمند تقسیم بندی زمانی بارگذاری است. در این تحقیق از روش انتگرال گیری صریح برای تبدیل فرم نرخی معادلات خرابی به حالت نموی استفاده می شود و الگوریتمی عددی برای اعمال مدل خرابی پلاستیسیته ژو-ویرزیبکی در



شکل 6 مدل اجزاء محدود به همراه شرایط مرزی و سمبه کروی صلب



الف) نمونه  $P_1$



ب) نمونه  $P_2$

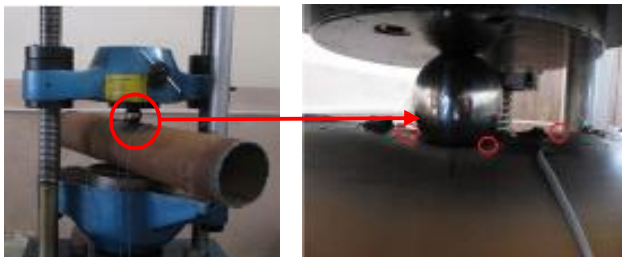
شکل 7 نامگذاری و مکان کرنش سنج های نصب شده بر روی نمونه های  $P_1$  و  $P_2$

فرورفتگی ماکزیمم  $\delta = 16.43\%D_0$  با بارگذاری می شوند. در شکل 8 فرآیند ایجاد فرورفتگی در ماشین تست یونیورسال به همراه کرنش سنج های نصب شده برای نمونه  $P_1$  نشان داده شده است. برای هر دو نمونه های  $P_1$  و  $P_2$ ، کرنش سنج SG C3 و SG A3 که در یک فاصله نسبت به مرکز لوله، اما در دو راستای محوری و محیطی نصب شده اند تا انتهای بارگذاری سالم باقی می ماند. کرنش سنج های دیگر از سطح لوله جدا شده و یا با سمبه برخورد نموده و از بین می روند.

#### 5- راستی آزمایی مدل المان محدود

مدل المان محدود ارائه شده در این تحقیق بر مبنای تحقیق اِفل و همکارانش [9] و بانک و همکارانش است [15]. آن ها بر روی لوله های فولادی API X65 تحت بارگذاری برای ایجاد فرورفتگی، بدون در نظر گرفتن تأثیر خرابی کار کردند. در این تحقیق تست همگرایی برای یافتن تعداد المان های مناسب برای مدل سازی لوله فولادی انجام گرفت و در مش بندی نهایی تعداد کل گره ها 90303 و تعداد کل المان ها برابر با 113101 به دست آمد.

بمنظور راستی آزمایی مدل المان محدود، نتایج به دست آمده بدون در نظر گرفتن تأثیر خرابی با نتایج حاصله از تست تجربی برای کرنش های کلی محوری و محیطی بر روی لوله بعد از اتمام فرآیند بارگذاری در نمونه های  $P_1$  و  $P_2$  در شکل 9 مقایسه شده است. مطابق با شکل 7-الف، برای نمونه  $P_1$ ، کرنش سنج SG A1 بسیار به محل اعمال بار نزدیک است که در آن شیب تغییر مکان و نرخ تغییرات کرنش بالا است. این کرنش سنج در عمق فرورفتگی  $\delta = 4.1\%D_0$  با سمبه برخورد می نماید و از فرآیند بارگذاری جدا می شود. این اتفاق برای کرنش سنج SG A2 در عمق فرورفتگی



الف)

ب)

شکل 8 فرآیند ایجاد فرورفتگی و لوله دارای فرورفتگی: (الف) تجهیزات تست به همراه ماشین یونیورسال برای ایجاد فرورفتگی (ب) شکل ناحیه دارای فرورفتگی

مرحله 3: نمو بارگذاری جدیدی در نظر گرفته شده و مراحل 1 تا 3 تکرار می شوند. این کار ادامه می یابد تا زمانی که معیار شکست برای المان ها برقرار شود. معیار شکست در واقع همان رسیدن مقدار بی بعد شده پارامتر خرابی به عدد یک است. در این زمان شکست آغاز می شود و محاسبات پایان می یابد. نیرو و عمق فرورفتگی مربوط به این زمان به عنوان مقادیر بحرانی برای لوله تحت فرآیند ایجاد فرورفتگی تعریف می شوند.

#### 4- تست تجربی

بمنظور راستی آزمایی مدل المان محدود، از نتایج به دست آمده از تست تجربی در محیط آزمایشگاهی استفاده می شود تا بتوان ارزیابی مناسبی از رفتار تغییر شکلی الاستیک-پلاستیک لوله داشت. جنس لوله از فولاد با درجه API XB انتخاب می گردد که خواص مکانیکی و ابعاد لوله به ترتیب در جداول 1 و 3، منحنی تنش-کرنش حقیقی در شکل 3 مشخص شده است. طول لوله بنحوی انتخاب شده است تا تأثیر شرایط مرزی بر روی ناحیه ایجاد فرورفتگی کاهش یافته و در واقع شباهت بیشتری با لوله های نفت و گاز با طول زیاد مورد استفاده در صنایع انتقال منابع داشته باشد.

نمونه های لوله ای با بارگذاری بر روی سطح خارجی توسط ابزاری کروی شکل و صلب تحت عنوان سمبه دچار فرورفتگی خواهند شد. جنس سمبه برای بارگذاری لوله و ایجاد فرورفتگی بر روی آن از نوع VCN 200 انتخاب گردید. این جنس از ماده دارای تنش تسلیم و تنش حد نهایی بسیار بالایی است بطوریکه در حالت ایده آل می توان آن را صلب فرض نمود. لوله ای توپر از جنس انتخاب شده توسط ماشینکاری به وسیله دستگاه CNC به فرمی کروی با قطر متوسط 75/3 میلی متر تبدیل شد. در نهایت از نصب کرنش سنج 1 بر روی سطح خارجی لوله برای بدست آوردن مقدار کرنش های کلی در امتداد نصب در هر لحظه از یک فرآیند بارگذاری کامل استفاده می شود.

در محیط آزمایشگاه لوله ها فشار داخلی ندارند (فشار اتمسفریک) و نمونه ها در دو انتها شرایط مرزی آزاد دارند که بر روی بستر صلب و پیوسته قرار می گیرند. دو نمونه لوله تحت عناوین  $P_1$  و  $P_2$  برای تست آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. هدف اصلی در تست های آزمایشگاهی رسیدن و ذخیره نمودن مقادیر بالایی از کرنش بدون آسیب رساندن به کرنش سنج ها است. بنابراین سه عدد کرنش سنج تک محوره بر روی نمونه  $P_1$  در امتداد محوری لوله با فواصل متفاوت از نقطه تماس سمبه با لوله ( $\theta = 180^\circ$  و  $L/2$ ) چسبانده شدند. سه عدد کرنش سنج تک محوره دیگر بر روی سطح خارجی نمونه  $P_2$  و در امتداد محیطی لوله با فواصل متفاوت نسبت به طول میانی لوله نصب می شوند. شکل 7 نمونه های  $P_1$  و  $P_2$  را به همراه شش کرنش سنج تک جهته (SG A1, SA2, SA3 و SG C1, SC2, SC3) نصب شده بر روی آن ها را نشان می دهد. تمامی داده های بدست آمده از کرنش سنج ها توسط یک دستگاه ثبت داده 2 و نرم افزار CR10X تبدیل به کرنش خواهند شد. اگر کرنش سنج ها خیلی نزدیک به ناحیه اعمال بار و فرورفتگی نصب شوند احتمال جدا شدن یا برخورد آن ها با سمبه زیاد است. بعلاوه بالا بودن نرخ کشش در نزدیکی محل اعمال بار باعث می شود تا کرنش سنج ها از سطح خارجی لوله جدا شده و در طی فرآیند بارگذاری تعدادی از آن ها از بین بروند.

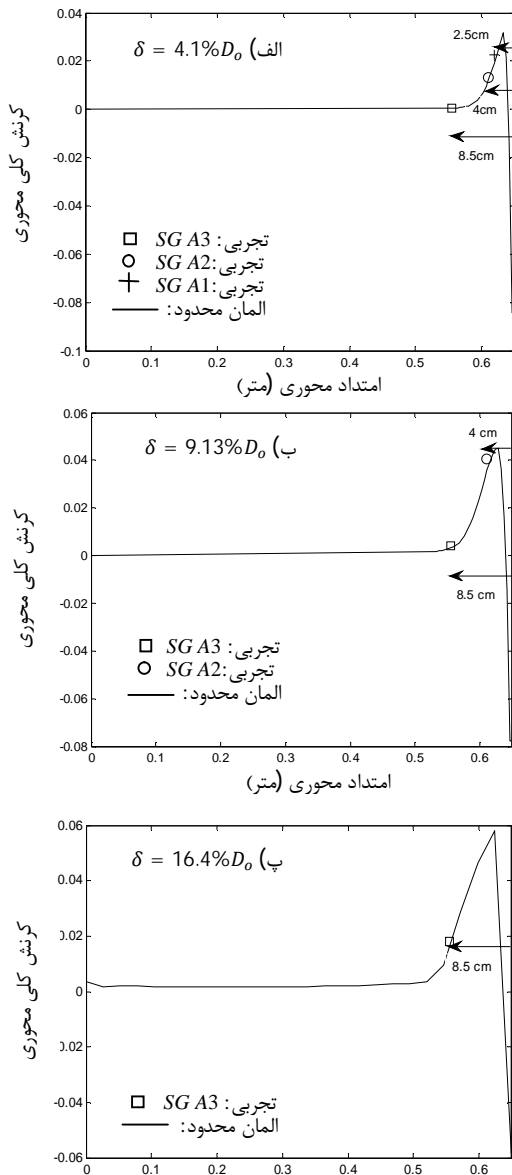
دستگاه تست مکانیکی یونیورسال DMG با قدرت اعمال نیروی حداکثری 60 Ton برای ایجاد فرورفتگی بر روی لوله فولادی استفاده می شود. هر دو نمونه های لوله ای  $P_1$  و  $P_2$  برای مقدار مشخص تغییر مکان سمبه برابر با عمق

1- Strain gauge  
2- Data logger

را می توان با مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج به دست آمده در مقالات قبلی در این زمینه مجدداً اثبات نمود [4,16,17].

مقادیر کرنش به دست آمده از کرنش سنج های SG A1, SG A2, SG A3 و SG A3 بر روی نمونه  $P_1$  در عمق فرورفتگی های مربوط به هر یک با نتایج المان محدود در شکل 10 مقایسه شده است. این مقایسه برای نتایج المان محدود در امتداد مسیر محوری عبور کننده از ماکزیمم عمق فرورفتگی نشان داده شده است. شکل سمبه و شرایط مرزی باعث می شوند تا فرورفتگی متقارن بر روی لوله ایجاد شده و در نتیجه توزیع تغییر مکان، کرنش و تنش در ناحیه فرورفتگی بر روی لوله متقارن شوند. بنابراین نتایج در شکل 10 برای نصف طول لوله ( $0 \leq z \leq L/2$ ) آورده شده اند.

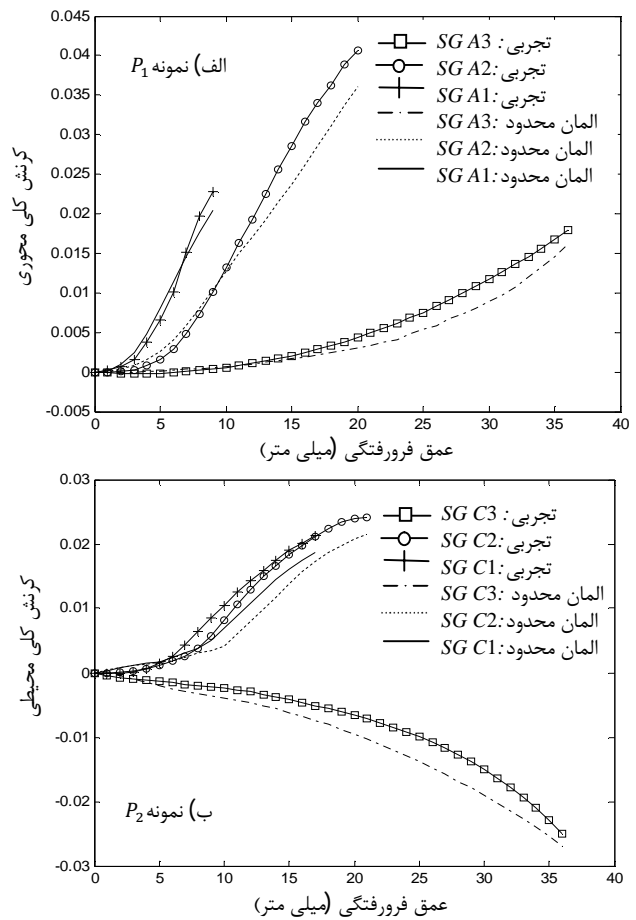
همانطور که در شکل 10 مشخص است مقادیر کرنش های کلی محوری در اطراف نقطه تماس اولیه ( $\theta = 180^\circ$  و  $L/2$ ) دارای شیب منفی است و نهایتاً در این نقطه مرکزی دارای مقدار منفی خواهد شد. همزمان با افزایش عمق فرورفتگی از شکل 10-الف تا شکل 10-پ این مقدار منفی تمایل به



شکل 10 مقایسه نتایج تجربی و المان محدود کرنش کلی محوری در امتداد محوری لوله، نمونه  $P_1$

$\delta = 9.13\%D_o$  رخ می دهد اما کرنش سنج SG A3 تا پایان فرآیند بارگذاری  $\delta = 16.4\%D_o$  سالم باقی مانده و کرنش را اندازه می گیرد. بعلاوه مطابق با شکل 9-الف، در طول مسیر محوری که کرنش سنج ها نصب شده اند مقادیر کرنش های محوری کلی مثبت است و در این مسیر حداکثر عمق فرورفتگی وجود دارد. برای نمونه  $P_2$ ، کرنش سنج SG C1 بسیار به محل اعمال بار نزدیک بوده و در عمق فرورفتگی  $\delta = 8.09\%D_o$  از سطح لوله جدا می شود. این اتفاق برای کرنش سنج SG C2 در عمق فرورفتگی  $\delta = 10\%D_o$  رخ می دهد و کرنش سنج SG C3 تا انتهای بارگذاری  $\delta = 16.4\%D_o$  در فرآیند اندازه گیری کرنش باقی می ماند. همان طور که در شکل 9-ب نشان داده شده است مقدار کرنش های کلی محیطی در طول مسیر در امتداد محیطی لوله با حداکثر عمق فرورفتگی مثبت است اما برای کرنش سنج SG C3 در مکانی دورتر نسبت به این صفحه چسبانده شده است مقادیر کرنش منفی می شوند.

به طور کلی دقت خوبی بین نتایج کرنش های تجربی و المان محدود در شکل 9 بدست آمده است. این سازگاری نتایج در عمق فرورفتگی هایی با تغییر شکل الاستیک و حتی تغییر شکل های پلاستیک با عمق فرورفتگی کمتر از  $\delta = 10\text{mm}$  مشهود است. این نتایج ثابت می کنند که تعریف مناسب آیتم های مهم در مدل سازی المان محدود مسئله مانند انتخاب المان، مش بندی، اعمال شرایط مرزی و بارگذاری و تعریف خواص مواد منجر به شبیه سازی صحیح توزیع تغییر مکان، کرنش و تنش در لوله شده است. این عبارت



شکل 9 مقایسه نتایج المان محدود و تجربی برای کرنش های محوری و محیطی کلی بر روی عمق فرورفتگی، نمونه های  $P_1$  و  $P_2$ .



هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر مدل های خرابی مواد نرم در پیش بینی توانایی تحمل بار لوله ها و یا در واقع همان عمر مفید لوله ها است. در بخش بعدی مدل خرابی ژو-ویرزیکی وارد شبیه سازی های المان محدود شده و مطالعه پارامتریک با و بدون در نظر گرفتن تأثیر خرابی برای فشار داخلی، قطر سمبه و ضخامت دیواره متفاوت در لوله آلومینیومی انجام می گیرد.

### 6- مطالعه پارامتریک با در نظر گرفتن تأثیر خرابی

این قسمت بر بررسی پارامتریک تأثیر فشار داخلی، ضخامت لوله و قطر سمبه در توانایی تحمل بار لوله های دارای فرورفتگی با و بدون در نظر گرفتن تأثیر پدیده خرابی متمرکز است. در شبیه سازی ها بدون در نظر گرفتن تأثیر خرابی، برنامه المان محدود تا جاییکه تغییر مکان ها در داخل لوله ناپایدار شوند ادامه خواهد یافت. از طرفی دیگر مقدار بار قابل تحمل توسط لوله در زمان ایجاد فرورفتگی که بار خرابی نامیده می شود به شکل مستقیم توسط نرم افزار انسیس قابل محاسبه نیست. این عیوب را می توان با در نظر گرفتن مدل خرابی مناسب بر طرف نمود و به پیش بینی بهتری از آغاز شکست در مواد رسید. در این تحقیق از هر دو پدیده خرابی و پلاستیسیته برای تخمین توانایی تحمل بار لوله تحت فرآیند ایجاد فرورفتگی استفاده شده است. عمق فرورفتگی هدف به عنوان معیاری از توانایی تحمل بار در حین بارگذاری اعمالی به لوله در نظر گرفته می شود.

بر اساس تئوری مکانیک خرابی محیط های پیوسته، آغاز شکست در لوله زمانی اتفاق می افتد که مقدار بی بعد شده پارامتر خرابی برابر با یک شود. از معادله (5) می توان نتیجه گرفت که مقدار پارامتر خرابی مستقیماً وابسته به مقدار کرنش پلاستیک انباشته شده در ماده است. بر اساس تحقیقات پیشین می توان گفت که لوله با ماکزیمم مقدار فشار داخلی اولیه، بیشترین مقدار تغییر شکل و در نتیجه کرنش پلاستیک انباشته را در ناحیه فرورفتگی تجربه می کند [15]. از معادله (8) مشخص می شود که اگر تأثیر خرابی در شبیه سازی ها در نظر گرفته شود استحکام ماده به دلیل تابع زوایی که در آن وجود دارد کاهش خواهد یافت. مطمئناً تأثیر کاهشی ایجاد شده بر روی استحکام ماده منجر به افزایش کرنش کلی ماکزیمم به ازاء شرایط بارگذاری یکسان نسبت به حالت بدون خرابی خواهد شد. بنابراین شکل توزیع و مقدار نهایی تنش و کرنش پلاستیک معادل در هر عمق فرورفتگی وابسته به مقدار پارامتر خرابی در آن عمق است. فشار حد فون میززی برای یک لوله سالم به صورت رابطه (21) تعریف می شود:

$$P_{LP} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \ln \left( \frac{D_o}{D_i} \right) \quad (21)$$

مقدار این فشار فون میززی بر اساس معادله (21) و ابعاد اسمی و خواص مواد برای لوله آلومینیومی در جدول های 2 و 3 محاسبه شده و مقادیر فشار داخلی لوله 0، 4، 8، 16 مگاپاسکال انتخاب می شود. دو نوع ضخامت متفاوت (12/5 و 17/5 میلی متر) برای دیواره لوله آلومینیومی در نظر گرفته شده است. علاوه دو مقدار متفاوت 80 و 160 میلی متر، به عنوان قطر سمبه برای ایجاد فرورفتگی بر روی لوله آلومینیومی فرض می شود.

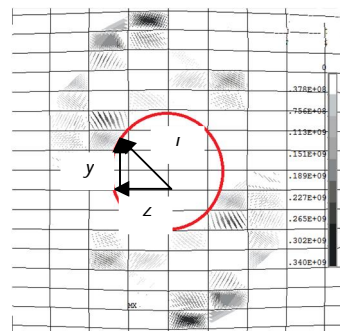
جدول 4 مقدار عمق فرورفتگی هدف برای فشارهای داخلی، ضخامت دیواره و قطر سمبه های متفاوت از شبیه سازی المان محدود را نشان می دهد. برای هر قطری از سمبه، کمترین مقدار عمق هدف برای لوله با ماکزیمم فشار داخلی بدست آمده است. همزمان با افزایش یافتن قطر سمبه، مقدار عمق فرورفتگی هدف به ازاء فشارهای داخلی یکسان افزایش می یابد. دلیل

مثبت شدن دارد. در مراحل اولیه ایجاد فرورفتگی بر روی لوله، تماسی بین لوله و سمبه در نقطه مرکزی وجود ندارد و تماس از نقاطی به فاصله شعاعی  $r$  از این نقطه مرکزی آغاز می شود. در این ناحیه مرکزی، تغییر شکل ها در لوله فشاری است و در نتیجه مقادیر کرنش ها منفی می شوند. بلافاصله بعد از این فاصله شعاعی  $r$ ، طبیعت تغییر مکان ها به دلیل ایجاد تماس مثبت شده و به دنبال آن کرنش ها مثبت می شوند. همزمان با افزایش عمق فرورفتگی، فاصله شعاعی  $r$  کاهش می یابد تا جاییکه در عمق فرورفتگی های بسیار بزرگ تماس کامل می شود و نهایتاً مقادیر کرنش ها در این ناحیه مرکزی مثبت خواهد شد. فرض عدم تماس کامل بین سمبه و لوله را می توان با استفاده از توزیع تنش های تماسی در المان به واسطه شبیه سازی المان محدود اثبات نمود. اگر المانی با سمبه در تماس باشد برای آن المان تنش تماسی تعریف می شود و در هر لحظه که تماس بین سمبه و المان از بین برود مقدار تنش تماسی برابر با صفر خواهد شد. بر این اساس در شکل 11 توزیع تنش های تماسی بر روی لوله فولادی در عمق فرورفتگی مربوط به شکل 11-پ نشان داده شده است. متغیرهای تعریف شده در شکل 11 بر اساس ابعاد مشخصی ایجاد شده در امتداد محورهای  $\theta$  و  $\phi$  در صورت زیر تعریف می شوند و نهایتاً شعاع آغاز تماس بین سمبه و لوله ( $r$ ) به صورت رابطه (20) محاسبه می شود:

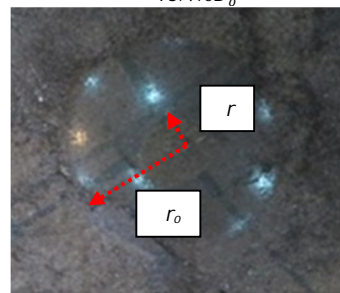
$$z = \Delta z, \quad y = 2\Delta\phi R \frac{\pi}{180}, \quad r = \sqrt{z^2 + y^2} = 6.3\text{mm} \quad (20)$$

به علاوه سطح تماس بین سمبه و لوله از نمای نزدیک برای نمونه تجربی  $P_1$  با بارگذاری  $\delta = 16.4\% D_o$  در شکل 12 نشان داده شده است. در نمونه تجربی شعاع های آغاز و پایان تماس سمبه با لوله در عمق مربوطه به ترتیب  $r = 6.43\text{mm}$  و  $r_o = 13.25\text{mm}$  اندازه گیری شده است. همانطور که مشخص است سازگاری مناسبی بین شعاع پیش بینی شده در تست تجربی با نمونه المان محدود شکل 11 وجود دارد.

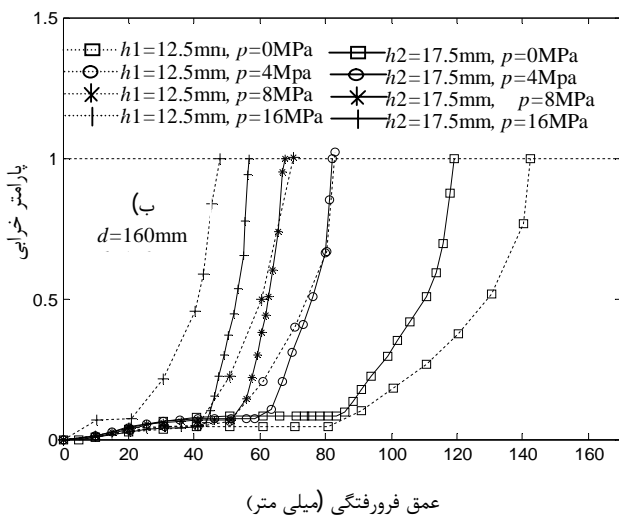
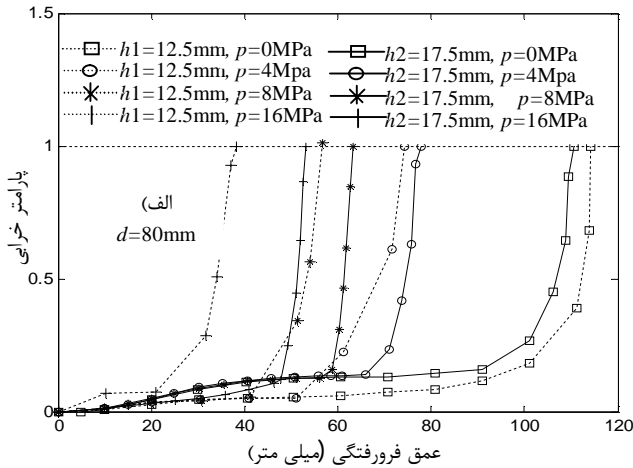
با در نظر گرفتن نکات بیان شده، مجدداً می توان دقت مناسب مدل المان محدود ارائه شده برای آنالیز توانایی تحمل بار لوله های جدار نازک تحت فرآیند ایجاد فرورفتگی توسط سمبه کرووی صلب مورد تأیید قرار داد.



شکل 11 توزیع تنش های تماسی بر روی لوله در عمق فرورفتگی  $\delta = 16.4\% D_o$



شکل 12 سطح تماس بین سمبه و لوله از نمای نزدیک در عمق فرورفتگی  $\delta = 16.4\% D_o$



شکل 13 نمودار پارامتر خرابی بر روی عمق فرورفتگی در المان با ماکزیمم مقدار پارامتر خرابی با فشار داخلی، ضخامت دیواره و قطر سمبه متفاوت

بیشتر می‌شود. برای هر قطری از سمبه، لوله با فشار داخلی ماکزیمم، کمترین مقدار عمق فرورفتگی هدف را دارد. همزمان با کاهش ضخامت لوله در شبیه سازی‌های بدون خرابی، مقادیر نیروی لازم برای ایجاد فرورفتگی، تنش معادل فون میززی و کرنش پلاستیک معادل کاهش خواهد یافت.

جدول 5 نیروی لازم برای ایجاد فرورفتگی با و بدون در نظر گرفتن تأثیر خرابی

فشار داخلی (MPa)	قطر سمبه (mm)	نیرو (kN)			
		شبیه سازی بدون خرابی		شبیه سازی با خرابی	
		$h_1 = 12/5$	$h_2 = 17/5$	$h_1 = 12/5$	$h_2 = 17/5$
16	80	700/31	965/9	861/6	601/1
8	80	599/8	879/4	809/3	584/2
4	80	610/8	883/5	782/8	594/5
0	80	577/8	896/8	801/1	542/8
16	160	1004/6	1196/4	1144/2	967/7
8	160	868/9	1050/6	1008/7	863/4
4	160	781/1	1031/1	1010/2	766
0	160	742/8	1025/8	1012/2	731/8

اصلی این اتفاق مربوط به تأثیر پدیده تمرکز تنش است. تمرکز تنش بالا در ناحیه ایجاد فرورفتگی توسط سمبه هایی با قطر کوچک ایجاد می شود که در نتیجه آن کرنش پلاستیک و پارامتر خرابی به سرعت افزایش می یابد.

در مورد تأثیر ضخامت دیواره لوله می‌توان گفت که با کاهش ضخامت، مقدار عمق فرورفتگی هدف به عنوان معیاری از توانایی تحمل بار برای لوله با فشار اتمسفریک افزایش می‌یابد. اما برای لوله‌هایی با فشار داخلی، همزمان با کاهش ضخامت دیواره لوله عمق فرورفتگی هدف نیز کاهش خواهد یافت. این پدیده را می‌توان به نحوه دخالت ضخامت در محاسبه تنش های محوری و محیطی در لوله‌های با فشار داخلی ارتباط داد. زمانی که لوله تحت تأثیر فشار داخلی است کاهش ضخامت بر روی مقدار تنش های اولیه در لوله اثر گذاشته و باعث می‌شود که سطح تنش‌ها با افزایش فشار داخلی به سرعت افزایش یابد. در نتیجه در بارگذاری های بعدی کرنش پلاستیک افزایش یافته و نهایتاً مقدار پارامتر خرابی در عمق کمتری برابر با یک خواهد شد.

تغییرات پارامتر خرابی بر روی عمق فرورفتگی برای مقادیر متفاوتی از فشار داخلی، ضخامت دیواره و قطر سمبه در شکل 13 آورده شده است. این نتایج مربوط به اولین المانی است که در طی فرآیند بارگذاری حداکثر پارامتر خرابی ( $D = 1$ ) را داراست. همانطور که مشخص است برای هر قطر سمبه، توزیع پارامتر خرابی در طول عمق فرورفتگی متفاوت است. برای عمق فرورفتگی هایی کمتر از مقدار هدف، لوله با فشار داخلی کمتر، مقدار بیشتری از کرنش پلاستیک معادل و در نتیجه پارامتر خرابی را دارد. با افزایش بارگذاری و رسیدن به یک مقدار خاص، کرنش پلاستیک با نرخ بالایی افزایش می‌یابد و پارامتر خرابی به سرعت برابر با یک می‌شود. بعلاوه، با کاهش ضخامت در لوله با فشار داخلی، نرخ رشد پارامتر خرابی نیز بیشتر می شود.

جدول‌های 5، 6 و 7 مقدار نیروی لازم برای ایجاد فرورفتگی، تنش معادل فون میززی و کرنش پلاستیک انباشته معادل مربوط به المان با حداکثر مقدار پارامتر خرابی ( $D = 1$ )، در مجاورت عمق فرورفتگی هدف برای لوله دارای فرورفتگی تحت فشارهای داخلی، ضخامت دیواره و قطر سمبه متفاوت متفاوت با و بدون خرابی ارائه می کند. در آخرین مرحله از بارگذاری لوله، مقدار تنش به سرعت و برای مقدار کمی از نمو بار ( $\Delta \approx 5\text{mm}$ ) به سمت صفر میل می نماید و در نتیجه پارامتر خرابی به مقدار حدی ( $D = 1$ ) رسیده و توانایی تحمل بار لوله کاملاً از دست می رود.

برای هر ترکیبی از فشار داخلی با دیگر پارامترها، تنش فون میززی کمتر و کرنش پلاستیک معادل بیشتر از حالتی است که از تأثیر خرابی در شبیه سازی ها صرفنظر می شود. نیروی لازم برای ایجاد فرورفتگی بر روی لوله در حالت با خرابی کمتر از حالت بدون خرابی است و با افزایش فشار داخلی

جدول 4 عمق فرورفتگی هدف برای فشار داخلی، ضخامت دیواره و قطر سمبه

قطر سمبه (mm)	فشار داخلی (MPa)	پارامتر خرابی ( $D$ )	عمق فرورفتگی هدف (mm)	
			$h_1 = 12/5$	$h_2 = 17/5$
80	16	1	38/3	51
80	8	1	56/8	61/5
80	4	1	73/4	75/5
80	0	1	114/1	108/8
160	16	1	48	55/5
160	8	1	65/4	66
160	4	1	82/9	81
160	0	1	142/5	118

جدول 6 تنش معادل فون میزری با و بدون در نظر گرفتن تأثیر خرابی

فشار داخلی (MPa)	قطر سمبه (mm)	تنش معادل فون میزری (MPa)			
		شبه سازی بدون خرابی		شبه سازی با خرابی	
		$h_1 = 12/5$	$h_2 = 17/5$	$h_1 = 12/5$	$h_2 = 17/5$
16	80	606/4	631/1	207/4	189/9
8	80	613/7	641/3	429/6	203/3
4	80	617/3	642/1	398/5	88/2
0	80	601/8	639/2	387/2	191/1
16	160	602/5	614/9	193/9	83/64
8	160	616/5	626/6	373/2	68/81
4	160	614/1	630/8	350/1	182/02
0	160	612/5	623/1	264/5	162/4

جدول 7 کرنش پلاستیک معادل با و بدون در نظر گرفتن تأثیر خرابی

فشار داخلی (MPa)	قطر سمبه (mm)	کرنش پلاستیک معادل			
		شبه سازی بدون خرابی		شبه سازی با خرابی	
		$h_1 = 12/5$	$h_2 = 17/5$	$h_1 = 12/5$	$h_2 = 17/5$
16	80	0/213	0/283	0/343	0/366
8	80	0/233	0/324	0/281	0/404
4	80	0/242	0/329	0/309	0/469
0	80	0/202	0/313	0/234	0/386
16	160	0/203	0/236	0/325	0/327
8	160	0/24	0/269	0/278	0/365
4	160	0/234	0/282	0/288	0/360
0	160	0/229	0/287	0/315	0/378

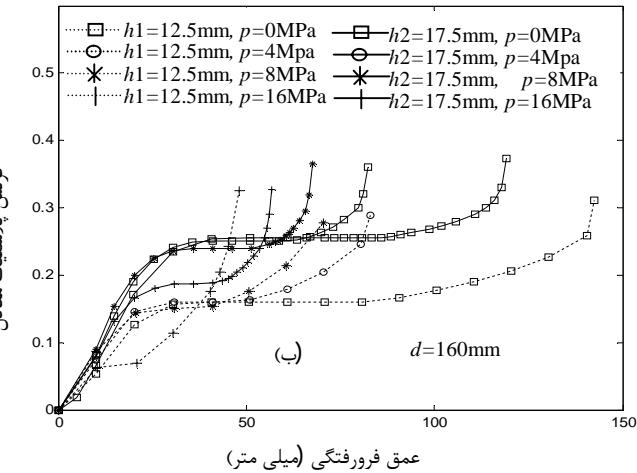
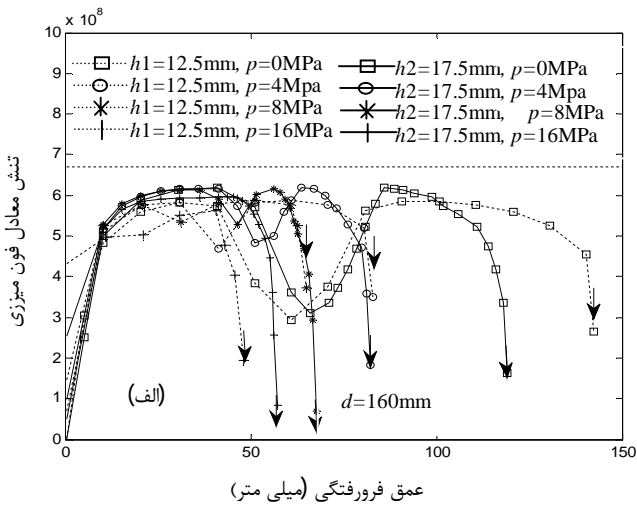
افزایش می یابد. در عمق فرورفتگی های اولیه لوله با مقادیر بالاتری از فشار داخلی مقدار کمتری از کرنش پلاستیک معادل را دارد. به طور کلی لوله با ضخامت کمتر سطح پائین تری از کرنش های پلاستیک و تنش معادل را دارد.

### 7- نتیجه گیری

در این مقاله رفتار خرابی مواد نرم برای لوله دارای فرورفتگی با استفاده از تست های تجربی و آنالیز المان محدود الاستیک-پلاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. در شبیه سازی های المان محدود از مدل خرابی ژو- ویرزبیکس برای بدست آوردن تغییرات بار حدى و عمق فرورفتگی هدف به ازاء مقادیر متفاوتی از فشار داخلی، ضخامت دیواره و قطر سمبه استفاده شده است. مدل خرابی پلاستیسیتیه ژو-ویرزبیکس در بردارنده چهار پارامتر تأثیرگذار نرمی پذیری، فشار هیدرواستاتیک، زاویه لود و قانون خرابی غیر خطی برای پیش بینی شکست مواد نرم است. کاربرد عددی و فهم فیزیکی مدل خرابی ژو- ویرزبیکس ساده و روابط آن الگوریتم پذیر است. مقایسه نتایج تجربی و المان محدود برای عمق فرورفتگی ها در محدوده تغییر شکل های الاستیک و حتی برای تغییر شکل های پلاستیک در محدوده  $\delta \leq 10\text{mm}$  سازگاری خوبی را نشان می دهد. این دقت از نتایج ثابت می کند که مدل المان محدود به واسطه

بعنوان نمونه در شکل 14-الف تغییرات تنش فون میزری بر روی عمق فرورفتگی برای مقادیر متفاوتی از فشار داخلی و ضخامت دیواره و برای قطر سمبه 160 میلی متر در المانی با حداکثر مقدار پارامتر خرابی را ( $D = 1$ ) نشان می دهد. مقدار نهایی تنش فون میزری در هر عمق فرورفتگی وابسته به مقدار پارامتر متغیر خرابی مرتبط با آن عمق است. مطابق با جدول 5، نقاط شکست تخمین زده شده برای تمامی فشارهای داخلی با فلش سیاه رنگ مشخص شده اند. در این عمق ها، بلافاصله با افزایش عمق فرورفتگی تنش فون میزری به صفر رسیده و توانایی تحمل بار کاملاً از بین می رود. در مقادیر اولیه از عمق فرورفتگی، المان مورد نظر با سمبه تماس دارد. اما، با افزایش عمق فرورفتگی تماس بین المان و سمبه کاهش یافته و آزادسازی تنش رخ خواهد داد. در مراحل بعدی بارگذاری تنش مجدداً افزایش یافته تا اینکه در عمق فرورفتگی هایی نزدیک به عمق هدف کاهش یافته و نهایتاً صفر خواهد شد. این پدیده در هر دو ضخامت کاملاً مشهود است. انتظار می رود که در عمق فرورفتگی هایی که آزاد سازی تنش رخ می دهد مقدار کرنش پلاستیک معادل ثابت باقی بماند. فرآیند آزادسازی تنش در لوله با فشار داخلی اتمسفریک بیشتر از دیگر فشارها مشهود است.

شکل 14-ب تغییرات کرنش پلاستیک معادل بر روی عمق فرورفتگی برای مقادیر متفاوتی از فشار داخلی و ضخامت دیواره و قطر سمبه 160 میلی متر در المانی با حداکثر مقدار پارامتر متغیر خرابی ( $D = 1$ ) را نشان می دهد. مشخص است که توزیع کرنش پلاستیک معادل نیز تابعی از مقدار پارامتر متغیر خرابی در هر عمق فرورفتگی است. به دلیل آزادسازی تنش در برخی از عمق فرورفتگی ها مقدار کرنش پلاستیک معادل ثابت باقی می ماند و در عمق های بعدی با بر قرارى مجدد تماس، کرنش پلاستیک معادل



شکل 14 نمودار الف: تنش معادل فون میزری، ب: کرنش پلاستیک معادل بر روی عمق فرورفتگی در المان با ماکزیمم مقدار پارامتر خرابی با فشار داخلی و ضخامت دیواره متفاوت

- [10] T.H. Hyde, R. Luo, A.A. Becker, Prediction of force-deflection behavior of pressurized pipes subjected to axially long radial indentation, *Int. J. Pressure Vessels Piping*, 82, 625-637, 2005b.
- [11] T.H. Hyde, R. Luo, A.A. Becker, Elastic-plastic analysis of offset indentations on unpressurized pipes, *International Journal of Solids and Structures*, 44, 399-418, 2007.
- [12] T. H. Hyde, R. Luo, A. A. Becker, Analysis of stresses in pipes indented by long external indentations and subsequent stress variations due to pressure fluctuations, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86, 428-434, 2009.
- [13] M. J. Rosenfeld, P. C. Porter, J. A. Cox. Strain estimation using VETCO deformation tool, *Data international pipeline conference*, vol. 1, ASME, 1998.
- [14] M. H. Hojjati, S.A. Lukasiewicz, Filtering algorithm for radial displacement measurements of a dented pipe, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 85, 344-349, 2008.
- [15] J. Baek, Y. Kim, W. Kim, J. Koo, Ch. Seok, Load bearing capacity of API X65 pipe with dent defect under internal pressure and in-plane bending, *Materials Science and Engineering A*, 540, 70-82, 2012.
- [16] M. Allouti, C. Schmitt, G. Pluvinage, Assessment of a gouge and dent defect in a pipeline by a combined criterion, *Engineering Failure Analysis*, 36, 1-13, 2014.
- [17] M. Zeinoddini, H. Arabzadeh, M. Ezzati, G.A.R. Parke, Response of submarine pipelines to impacts from dropped objects: Bed flexibility effects, *International Journal of Impact Engineering*, 62, 129-141, 2013.
- [18] L. Xue, *Ductile Fracture Modeling - Theory, Experimental Investigation and Numerical Verification*, PHD thesis, Massachusetts institute of technology, 2007.
- [19] J. Lemaitre, A continuous damage mechanics model for ductile fracture. *Journal of Engineering Materials and Technology - Trans. of the ASME*, 107, 83-89, 1985.
- [20] L. Xue, Tomasz Wierzbicki, Numerical simulation of fracture mode transition in ductile plates, *International Journal of Solids and Structures*, 46, 1423-1435, 2009.
- [21] L. Xue, Tomasz Wierzbicki, Ductile fracture characterization of aluminum alloy 2024-T351 using damage plasticity theory, *International Journal of Applied Mechanics*, 2, 267-304, 2009.
- [22] L. Xue, Tomasz Wierzbicki, Ductile fracture initiation and propagation modeling using damage plasticity theory, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 3276-3293, 2008.
- [23] L. Xue, Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading, *International Journal of Solids and Structures*, 44, 5163-5181, 2007.
- [24] L. Xue, Ted Belytschko, Fast methods for determining instabilities of elastic-plastic damage models through closed-form expressions, *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 84, 1490-1518, 2010.
- [25] L. Xue, Hongcheng Huang, Prediction of slant ductile fracture using damage plasticity theory, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86, 319-328, 2009.
- [26] L. Xue, Stress based fracture envelope for damage plastic solids, *Engineering Fracture Mechanics*, 76, 419-438, 2009.
- [27] A. L. Gurson, Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *Journal of Engineering Materials and Technology - Trans. of the ASME*, 99, 2-15, 1977.
- [28] V. Tvergaard, Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions, *International Journal of Fracture*, 17, 389-407, 1981.
- [29] G. R. Johnson, W. H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21, 31- 48, 1985.
- [30] M. L. Wilkins, R. D. Streit, J. E. Reaugh, Cumulative-strain-damage model of ductile fracture: Simulation and prediction of engineering fracture tests. *Technical Report UCRL- 53058, Lawrence Livermore National Laboratory*, October 1980.
- [31] Bridgman, P. W. *Studies in large plastic flow and fracture*. McGraw-Hill Inc. (1952).
- [32] Ansys engineering analysis system: ver. 12. ANSYS, Inc.

المان های پوسته ای به درستی تغییر شکل دیواره لوله را شبیه سازی می نماید و می تواند تخمین درستی از عمر مفید لوله ارائه دهد.

در شبیه سازی های شامل مدل خرابی، پارامتر خرابی از انباشته شدن کرنش های پلاستیک در ناحیه فرورفتگی به دست می آید و توسط متغیرهای فشار داخلی، ضخامت دیواره و قطر سمبه تحت تأثیر قرار می گیرد. توزیع تنش معادل فون میززی و کرنش پلاستیک معادل در طول عمق فرورفتگی متناسب با توزیع پارامتر خرابی است. برای عمق فرورفتگی ها در محدوده ضخامت لوله، مقدار پارامتر خرابی کوچک بوده و تأثیر خرابی قابل صرف نظر کردن است. در عمق فرورفتگی ها کمتر از مقدار هدف بدون توجه به قطر سمبه، لوله با فشار داخلی کمتر مقادیر بالاتری از پارامتر خرابی داراست. با افزایش بارگذاری کرنش پلاستیک در مجاورت عمق هدف به سرعت افزایش می یابد و پارامتر خرابی به مقدار حدی یک می رسد. تأثیر خرابی باعث می شود تا در المان های با تغییر شکل الاستیک-پلاستیک مقدار تنش معادل فون میززی کاهش و مقدار کرنش پلاستیک افزایش یابد. کاهش ضخامت لوله بر رفتار لوله های با فشار داخلی تأثیر گذار است و باعث کاهش عمق فرورفتگی هدف در آن ها می شود. اگر قرار است که لوله در شرایط بارگذاری فشاری داخلی استفاده شود، با در نظر گرفتن سایر محدودیت ها و معیارهای طراحی و بر اساس شرایط مرزی و بارگذاری حاکم باید تا حد امکان ضخامت دیواره لوله را بزرگتر انتخاب کرد. در نهایت می توان نتیجه گرفت که مدل المان محدود به همراه مدل خرابی در نظر گرفته شده با موفقیت مسئله لوله با عیب از نوع فرورفتگی را تحلیل می نماید و می توان آن را به بارگذاری های ترکیبی و چند محوره گسترش داد.

## 8- مراجع

- [1] T.H. Hyde, R. Luo, A.A. Becker, Elastic-plastic response of unpressurized pipes subjected to axially-long radial indentation, *International Journal of Mechanical Sciences*, 47, 1949-1971, 2005.
- [2] A. Cosham, P. Hopkins, The effect of dents in pipelines-guidance in the pipeline defect assessment manual, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 81, 127-139, 2004.
- [3] C. R. Alexander, Review of experimental and analytical investigations of dented pipelines, Houston, Texas: *Stress Engineering Services, Inc*, 1999.
- [4] M. Allouti, C. Schmitt, G. Pluvinage, J. Gilgert, S. Hariri, Study of the influence of dent depth on the critical pressure of pipeline, *Engineering Failure Analysis*, 21, 40-51, 2012.
- [5] J. Blachut, I. B. Iflefel, Collapse of pipes with plain or gouged dents by bending moment, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 84, 560-571, 2007.
- [6] J. Blachut, I. B. Iflefel, Experimental and Numerical Investigation of Plain and Gouged Dents in Steel Pipes Subjected to Pressure and Moment Loading, *ASME*, Vol. 130, 2008.
- [7] J. Blachut, I. B. Iflefel, Analysis of plain and gouged dents in steel pipes subjected to pressure and moment loading, *Proceedings of the PVP2006-ICPVT-11 conference on design and analysis*, vol. 3, p. 1-9, 2007.
- [8] T. D. Park, S. Kiryakids, on the collapse of the dented cylinders on the external pressure, *international of mechanical science*, 38, 557-578, 1996.
- [9] I.B. Iflefel, D.G. Moffat, J. Mistry, The interaction of pressure and bending on a dented pipe, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 82, 761-769, 2005.