

Polymerization  
Quarterly, 2025  
Volume 15, Number 3  
Pages 24-30  
ISSN: 2252-0449

# Investigation of the Impact of Residual Hoop Stresses on the Lifespan of Polyethylene Pipes

Alireza Abdian<sup>1</sup>, Mohammad Reza Ebrahim Khani<sup>1</sup>, Mostafa Sheykh Samani<sup>1</sup>, and Farhad Sheykh Samani<sup>\*2</sup>

1. Kerman Province Water and Wastewater Co., Kerman, Iran

2. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Received: 17 November 2024, Accepted: 13 May 2025

## Abstract

The use of polyethylene pipes is increasingly favored due to their numerous advantages, including light weight, flexibility, high resistance to corrosion, and low production and maintenance costs. These pipes are manufactured in various types and through different methods for applications such as potable water distribution, agricultural irrigation, and industrial fluid transport. The superior properties of polyethylene pipes have played an important role in the rapid growth of their production and widespread use in various industries. However, during the production process, several factors can induce residual stresses in the pipe structure. These residual stresses, along with the stresses generated by internal pressure, create effective final stresses that affect pipe wear and, consequently, its lifespan. This study investigates the impact of residual stresses on the effective lifespan of polyethylene pipes. Initially, various types of residual stresses that may be generated during the production process are introduced, and then beneficial and detrimental residual stresses are identified and compared. Finally, the effect of these stresses on the lifespan of the pipes is assessed. The findings of this study show that low production quality and the presence of residual stress of approximately 1.1 MPa can significantly reduce pipe lifespan. Conversely, a proper design of manufacturing process that creates suitable compressive residual stresses can extend the lifespan of the pipe by up to 2.5 times.

## Key Words

pipe,  
residual stresses,  
service life,  
production process,  
wear

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: farhad.samani@uk.ac.ir

# بررسی اثر تنش‌های باقی‌مانده حلقوی بر عمر لوله‌های پلی‌اتیلن

بسپارش  
فصلنامه علمی  
سال پانزدهم، شماره ۳،  
صفحه ۳۰-۲۴، ۱۴۰۴  
ISSN: 2252-0449

علیرضا عبدیان<sup>۱</sup>، محمدرضا ابراهیم‌خانی<sup>۱</sup>، مصطفی شیخ‌سامانی<sup>۱</sup> و فرهاد شیخ‌سامانی<sup>۲\*</sup>

۱- کرمان، شرکت آب و فاضلاب استان کرمان

۲- کرمان، دانشگاه شهید باهنر، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک، کدپستی ۶۸۳۶۶-۷۶۱۸۸

دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۲۳

استفاده از لوله‌های پلی‌اتیلن به دلیل مزایای متعدد از جمله وزن سبک، انعطاف‌پذیری، مقاومت زیاد در برابر خوردگی و هزینه‌های کم تولید و نگهداری روزبه‌روز در حال افزایش است. این لوله‌ها با روش‌های مختلف و در انواع متفاوت برای انتقال آب آشامیدنی، مصارف کشاورزی و کاربردهای صنعتی تولید می‌شوند. ویژگی‌های برتر این لوله‌ها، نقش مهمی در رشد سریع تولید و استفاده گسترده از آن‌ها در صنایع مختلف ایفا کرده است. با این حال طی فرایند تولید، عوامل متعددی می‌توانند به ایجاد تنش‌های باقی‌مانده در ساختار لوله منجر شوند. این تنش‌های باقی‌مانده همراه با تنش‌های ناشی از فشار داخلی، تنش‌های نهایی مؤثری را در سطح لوله ایجاد می‌کنند که بر میزان سایش و طول عمر آن اثرگذار است. در این مقاله اثر تنش‌های باقی‌مانده در طول عمر مؤثر لوله‌های پلی‌اتیلن بررسی می‌شود. در ابتدا، انواع مختلف تنش‌های باقی‌مانده‌ای که ممکن است طی فرایند تولید ایجاد شوند، معرفی شده و سپس تنش‌های باقی‌مانده مفید و مضر شناسایی و مقایسه شده‌اند. در نهایت، میزان تأثیر این تنش‌ها بر طول عمر لوله‌ها ارزیابی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، در صورت کم بودن کیفیت تولید و وجود تنش باقی‌مانده معادل  $1/1$  MPa، طول عمر لوله به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، طراحی مناسب فرایند تولید که به ایجاد تنش باقی‌مانده فشاری مناسب منجر می‌شود، می‌تواند عمر لوله را تا  $2/5$  برابر افزایش دهد.

## چکیده



علیرضا عبدیان



محمدرضا ابراهیم‌خانی



مصطفی شیخ‌سامانی



فرهاد شیخ‌سامانی

## واژگان کلیدی

لوله پلی‌اتیلن،  
تنش‌های باقی‌مانده،  
طول عمر،  
فرایند تولید،  
سایش

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:  
farhad.samani@uk.ac.ir

## مقدمه

تنش باقی مانده در لوله تولید شده است. تنش باقی مانده که به نام تنش داخلی نیز نامیده می شود، در اغلب محصولات نهایی تولیدات پلاستیکی وجود دارد [۸]. در این مطالعه، ابتدا انواع مختلف تنش های باقی مانده ایجاد شده در لوله بررسی شده است. سپس، اثر تنش باقی مانده بر سایش لوله و در نتیجه بر عمر مفید لوله مشخص و اهمیت شیوه تولید و فرایند تولید لوله شفاف شده است.

## تنش های باقی مانده در لوله های پلی اتیلن

تنش های باقی مانده در لوله های پلی اتیلن در راستای طولی یا شعاعی به وجود می آیند. تنش های طولی در امتداد محور طولی لوله به وجود می آیند. تنش باقی مانده طولی موجود در لوله ها، نیرویی در جهت کاهش طول لوله به آن وارد می کند. این تنش زمانی به وجود می آید که هنگام تولید لوله، مواد مذاب خروجی از اکسترودر به وسیله دستگاه کشنده به طرف جلو کشیده می شوند. بدین صورت که حرکت به سمت جلوی لوله در حال تولید، موجب ایجاد نیروی کششی در راستای محور طولی آن می شود. بر اساس قانون سوم نیوتن، نیرویی برابر با این نیرو، اما برخلاف جهت آن پدید می آید. این به معنی به وجود آمدن نیرویی است که در راستای طول لوله و برای انقباض آن عمل می کند. زمانی که مذاب با عبور از مخازن خلأ و خنک کننده به جامد تبدیل می شود، نیروی تراکمی در محصول باقی می ماند.

تنش های شعاعی، ناشی از عدم یکنواختی سرعت خنک کاری لایه های داخلی و خارجی لوله است و به نام تنش باقی مانده گرمایی نیز نامیده می شود. متداول ترین روش خنک کاری، استفاده از افشانک پرفشار برای پاشش آب بر سطح خارجی لوله است. خنک کاری لوله تنها از سطح خارجی از یک سو و کم بودن نسبی رسانندگی گرمایی پلی اتیلن از سوی دیگر، موجب به وجود آمدن ناهماهنگی در سرعت خنک شدن در راستای شعاعی لوله می شود. این مسئله به تشکیل نیروی انقباضی در راستای شعاع لوله در جهت لایه های خارجی آن و تنش کششی در همین راستا، اما در سمت سطوح داخلی لوله منجر می شود. به بیان دیگر در لوله دارای تنش باقی مانده شعاعی لایه های خارجی تنش فشاری شعاعی دارند، در حالی که لایه های داخلی تنش کششی شعاعی را تحمل می کنند. با توجه به این تنش ها و به منظور تأمین تعادل پایا در هر نقطه از لوله، تنش های باقی مانده حلقوی (residual hoop stress) نیز در لوله شکل می گیرند. شکل ۱، توزیع تنش های باقی مانده در لوله را با دو نوع توزیع نمایی (a) و خطی (b) نمایش می دهد. توزیع تنش های باقی مانده حلقوی را می توان از معادله (۱)، به دست آورد [۹]:

لوله های پلی اتیلن با روش های متفاوت و در انواع مختلف برای انتقال آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعتی تولید می شوند. اقبال زیادی به اندازه های مختلف لوله های پلی اتیلن به دلیل مزایای منحصر به فرد آن ها وجود دارد. مهم ترین مزایای لوله های پلی اتیلن شامل مقاومت در برابر خوردگی گالوانیکی و پوسیدگی، سایش و ضربه، انعطاف پذیری مناسب، جمع شونده گی، سبکی وزن، مقاومت عالی در برابر زمین لرزه و رانش زمین، قابلیت اتصال بسیار محکم بدون نشتی و در عین حال انعطاف پذیر، مقاومت زیاد در برابر تابش فرابنفش خورشید، دارا بودن خواص هیدرولیکی بسیار مناسب و هزینه کم تعمیر و نگهداری است [۱-۳].

در سال ۱۹۹۶ گروه Shell در کشور عمان ۱۹ km خط لوله فولاد کربن دار که در اثر خوردگی شدید از بین رفته بود با لوله های پلی اتیلن از نوع PE ۱۰۰ (Water/Crude) جایگزین شد. در این طرح با توجه به شرایط محیط، عمر کاری لوله های پلی اتیلنی حداقل ۱۵ سال در نظر گرفته شده است. از سال ۱۹۹۶ تاکنون هیچ گونه نقص و نشتی در این لوله ها گزارش نشده، در حالی که دوره کارکرد مفید لوله های فولادی در همان شرایط، حداکثر ۲ سال بوده است [۴-۷]. این لوله ها به علت داشتن سطح داخلی کاملاً صاف و صیقلی در مقایسه با سایر انواع لوله ها از افت هیدرولیکی کمتری برخوردارند، در نتیجه گزینه مناسبی برای انتقال حجم مشخصی از سیال در مقایسه با سایر انواع لوله ها، به ویژه برای طول انتقال بلند است.

افت ارتفاع فشاری (head) در مقایسه با لوله های فولادی، بسیار برجسته است. زیرا در لوله های فولادی برای پوشش داخلی معمولاً از یک لایه سیمانی استفاده می شود. این لایه افزودن بر کاهش سطح مقطع مؤثر لوله، باعث افزایش زبری می شود و افت فشار بیشتری ایجاد می کند. تأمین لوله های فولادی با قطر بیشتر به تنهایی می تواند بسیاری از اختلاف هزینه های خرید لوله را پوشش دهد. معمولاً لوله های پلی اتیلن در یک بازه زمانی طولانی نیاز به تعمیر ندارند و در صورت نیاز به تعمیر، این کار با هزینه نسبتاً کمی امکان پذیر است. این در حالی است که تعمیر لوله های فولادی با مشکلاتی همراه است و هزینه تعمیر و نگهداری بیشتری لازم دارند.

در فرایند تولید لوله پلی اتیلن، بسیاری از خواص فیزیکی و مکانیکی بر کیفیت محصول اثرگذارند. تحت کنترل داشتن پارامترهای مختلف از قبیل تناسب سرعت تولید و اندازه محصول در حال تولید، شرایط دمایی نواحی گرمایی و همچنین دمای خنک کاری بسیار حائز اهمیت هستند. از جمله آثار فرایند تولید،

تنش‌های حلقوی بر سطح داخلی لوله برای یک لوله تحت فشار با در نظرگیری روابط استوانه با جداره ضخیم از معادله (۲) محاسبه می‌شود:

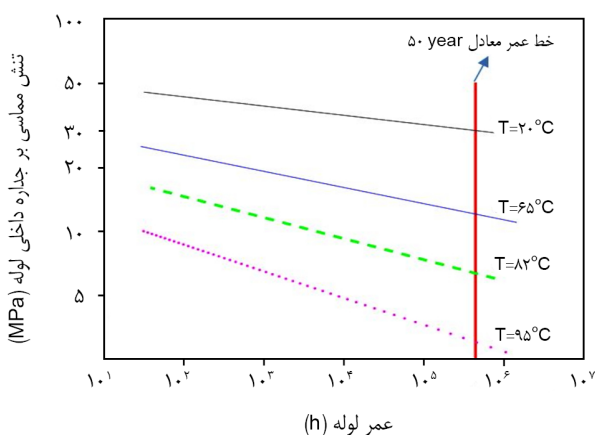
$$\sigma_t = P \times \left[ \frac{r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{r_i^2 r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2) r_i^2} \right] \quad (2)$$

در این معادله،  $\sigma_t$  تنش حلقوی بر سطح داخل لوله،  $P$  فشار داخل لوله،  $r_i$  شعاع داخلی و  $r_o$  شعاع خارجی لوله است. با توجه به سایش ناشی از جریان پرفشار درون لوله، طول عمر یک لوله پلی اتیلن تا زمان عمر مفید کارکرد را می‌توان از معادله (۳) به دست آورد [۶]:

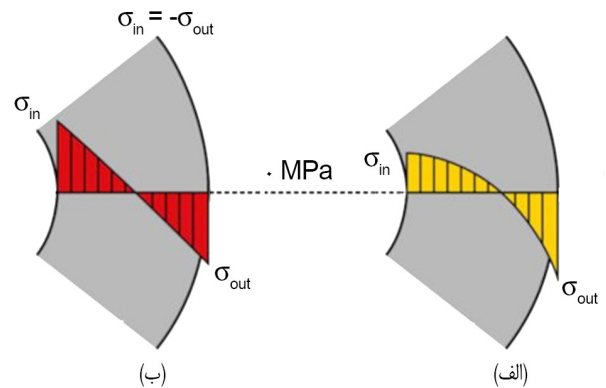
$$\text{Log}(t) = C_1 + C_2 \times \frac{1}{T} + C_3 \times \text{Log}(\sigma_t) + C_4 \times \frac{\text{Log}(\sigma_t)}{T} + e \quad (3)$$

در این معادله،  $t$  عمر مفید لوله برحسب  $h$ ،  $C_1$  تا  $C_4$  ضریب‌های ثابت قابل تعیین به‌طور تجربی،  $\sigma_t$  تنش حلقوی بر سطح داخلی لوله برحسب  $\text{MPa}$ ،  $T$  دمای سیال برحسب درجه کلون و  $e$  مقدار توزیع لاپلاس-گوسین خطاست. مطالعه حاضر برای لوله PE ۱۰۰، با مشخصه  $SDR\ 160$  انجام گرفته است. ضرایب  $C_1$  تا  $C_4$  از استاندارد BS EN ISO 9080 استخراج شده است (جدول ۱) [۸]. فشار اسمی این لوله،  $20\text{ bar}$  است و مقدار توزیع لاپلاس-گوسین خطا در این محاسبات صفر لحاظ شده است.

شکل ۳، مقدار عمر لوله را در دماهای کاری  $20^\circ\text{C}$  تا  $95^\circ\text{C}$  تحت اثر تنش‌های حلقوی متغیر ناشی از اثر فشار داخل لوله نشان می‌دهد. برای لوله تحت بررسی، فشار اسمی  $20\text{ bar}$  است که بدون تنش‌های باقی‌مانده باعث ایجاد تنش حلقوی بر سطح داخلی برابر  $10/1\text{ MPa}$  می‌شود. این بدان معناست که در نمودار شکل ۳ و در غیاب تنش‌های باقی‌مانده و شرایط دمایی  $82^\circ\text{C}$  و  $95^\circ\text{C}$  امکان



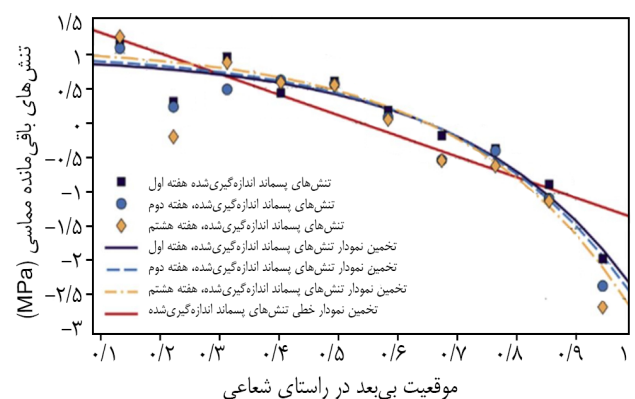
شکل ۳- عمر تخمینی لوله با توجه به دما و تنش‌های حلقوی بر سطح داخلی لوله [۹۹۹۹۹].



شکل ۱- توزیع تنش‌های باقی‌مانده در لوله: (سمت راست) توزیع خطی و (سمت چپ) توزیع نمایی [۹۹۹۹].

$$\sigma_{tRES}(x) = c_1 + c_2 e^{3.2x} \quad (1)$$

در این معادله،  $\sigma_{tRES}(x)$  تنش‌های باقی‌مانده حلقوی،  $x$  پارامتر مکان در راستای شعاع لوله بوده که در سطح داخلی برابر صفر و بر سطح خارجی برابر یک است.  $c_1$  و  $c_2$ ، ثابت‌های تعیین تنش‌های باقی‌مانده هستند که به‌طور تجربی تعیین می‌شوند. شکل ۲، نحوه تغییرات تنش‌های باقی‌مانده حلقوی متغیر را نسبت به شعاع نمایش می‌دهد [۱۰]. مقدار صفر، نقطه‌ای بر سطح داخلی و مقدار یک، نقطه‌ای بر سطح خارجی لوله را نشان می‌دهند. در این شکل، نتایج تجربی به‌صورت نقاطی با شکل‌های مختلف و تخمین‌های توزیع این تنش‌های باقی‌مانده به‌شکل خطوط پیوسته نشان داده شده است. این تنش‌ها برای یک لوله PE ۱۰۰ با قطر اسمی  $160\text{ mm}$  و ضخامت دیواره  $14/6\text{ mm}$  ( $SDR\ 160$ ) نمایش داده شده است.



شکل ۲- نتایج تجربی و تخمینی توزیع تنش‌های باقی‌مانده حلقوی متغیر نسبت به راستای شعاعی. مقدار موقعیت بی‌بعد در راستای شعاعی: ۰ سطح داخلی لوله و ۱ سطح [۹۹۹۹۹].

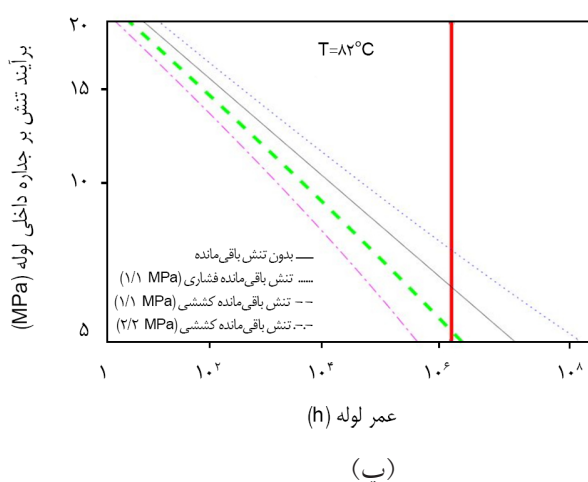
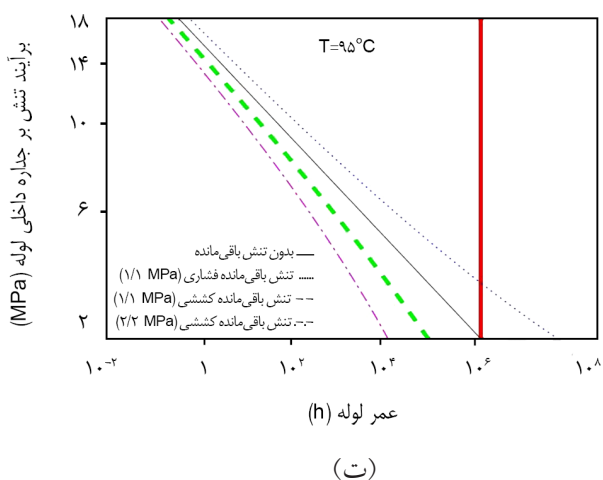
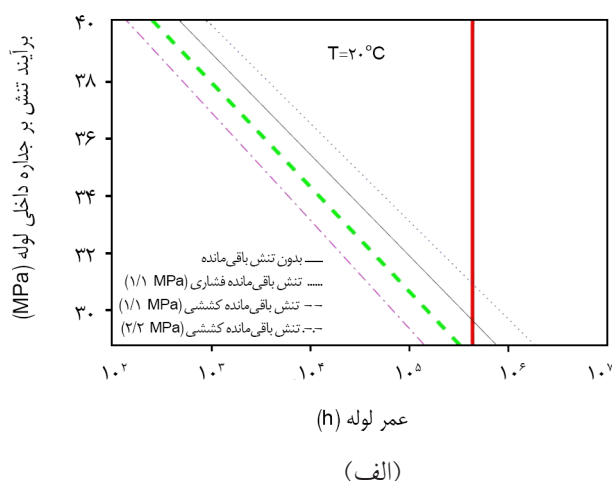
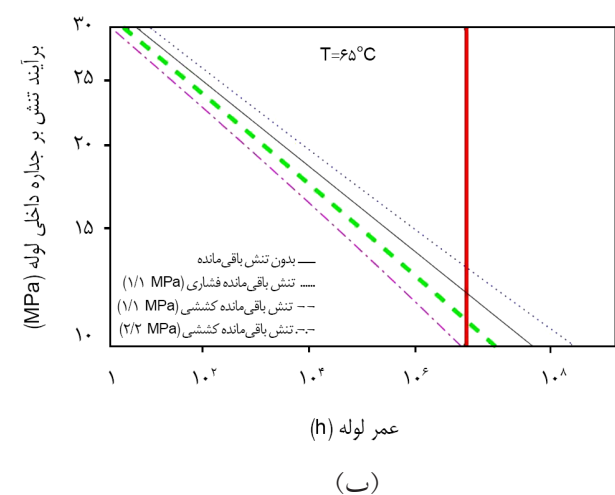
جدول ۱- ضرایب ثابت تجربی برای تخمین عمر لوله [۴۴۴۴].

ضریب مقدار	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
	-۱۰۷/۸۲۴	۴۳۱۷۴/۰۰۲	۵۰/۶۸۰	-۲۱۵۸۵/۷۵۳

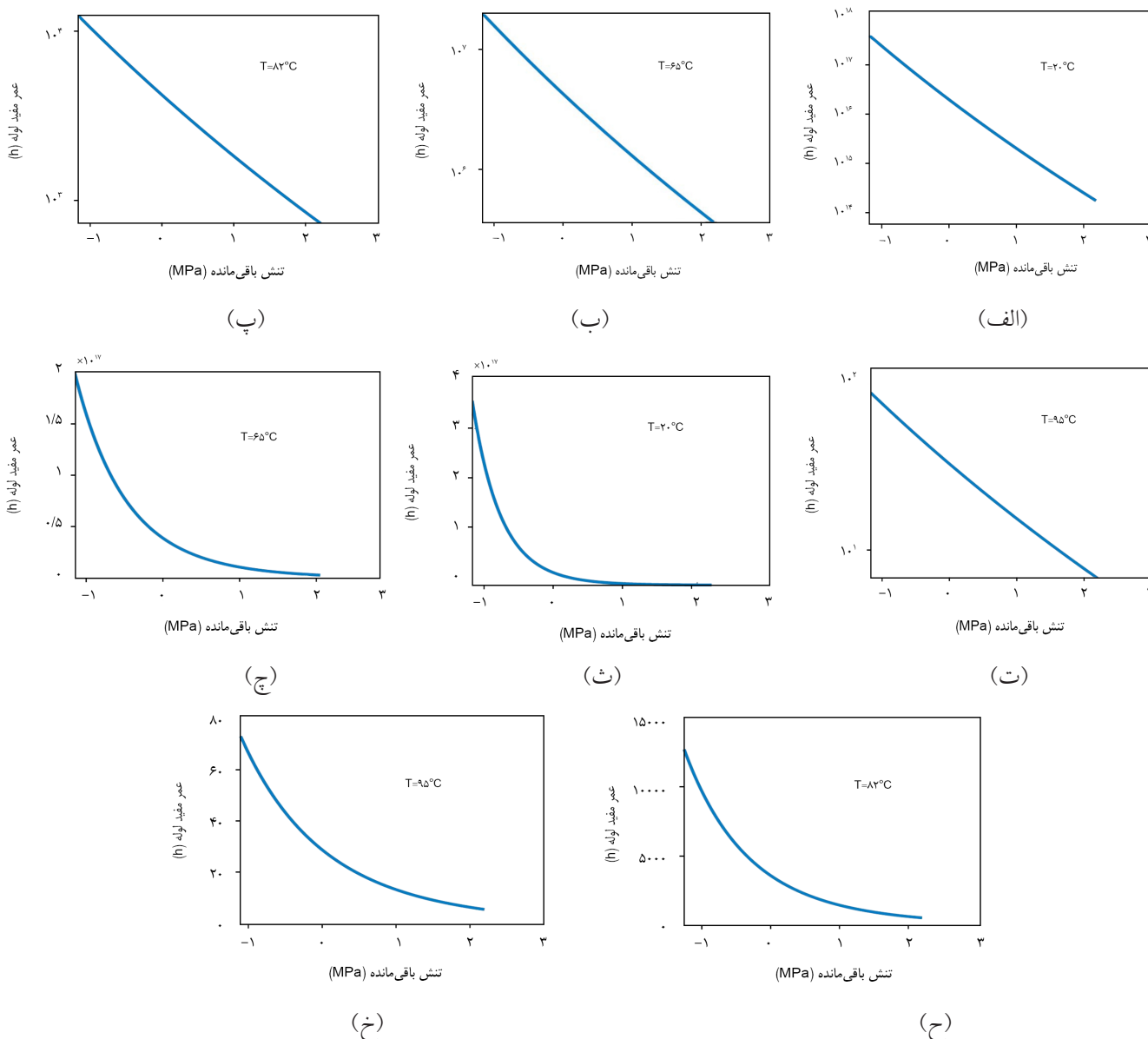
باقی مانده حلقوی فشاری می‌تواند باعث کاهش تنش حاصل نهایی و در نتیجه افزایش عمر مفید لوله شوند. برای ایجاد تنش‌های فشاری می‌توان فرایندی مشابه با فرایند اتوفرتاژ (autofrettage) در صنایع نظامی را به مراحل تولید اضافه کرد. برای ساخت لوله‌های با کالیبر بزرگ (توپ‌ها)، فرایند اتوفرتاژ موجب ایجاد تنش‌های باقی مانده محیطی در لوله می‌شود. این فرایند با استفاده از فشار هیدرولیک زیاد در لوله انجام می‌گیرد. فشار هیدرولیک باید تا حدی تنظیم شود که ماده لوله وارد ناحیه رفتار پلاستیک شود، ولی موجب ایجاد ترک موین در لوله نشود. پس از حذف فشار هیدرولیک، تنش‌های محیطی فشاری که مفید هستند در لوله باقی می‌مانند.

تأمین عمر کاری مورد انتظار، ۵۰ سال، فراهم نمی‌شود. در مجموع می‌توان گفت بدون وجود تنش‌های باقی مانده، این لوله تا دمای  $70^{\circ}\text{C}$  امکان تأمین عمر تا ۵۰ سال را خواهد داشت.

شکل ۴، اثر تنش‌های باقی مانده حلقوی بر عمر لوله را نشان می‌دهند. تنش‌های کششی  $1/1$  و  $2/2$  MPa و تنش‌های فشاری برابر با  $1/1$  MPa ( $-1/1$  MPa) در این شکل بررسی شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشخص است، تنش‌های باقی مانده کششی مضر هستند و باعث کاهش عمر مفید لوله می‌شوند. این تنش‌ها معمولاً به‌طور ناخواسته با توجه به فرایند تولید و تنش‌های گرمایی ناشی از گرم و سرد شدن لوله ایجاد می‌شود. در مقابل، تنش‌های



شکل ۴- اثر تنش‌های باقی مانده حلقوی بر سطح داخلی و عمر لوله در دماهای مختلف: (الف)  $20^{\circ}\text{C}$ ، (ب)  $65^{\circ}\text{C}$ ، (پ)  $82^{\circ}\text{C}$  و (ت)  $95^{\circ}\text{C}$  (خط قرمز عمودی نمایشگر عمر ۵۰ سال است) [۴۴۴۴].



شکل ۵- نمودارهای عمر مفید لوله با توجه به میزان تنش‌های باقی‌مانده حلقوی بر سطح داخلی در مقیاس‌های: (الف تا ج) خطی و (ب تا ح) لگاریتمی [۴۴۴۴].

### نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر وجود تنش‌های باقی‌مانده حلقوی بر عمر لوله‌های پلی‌اتیلن تحت فشار داخلی و دماهای کاری مختلف بررسی شده است. با توجه به نحوه توزیع تنش در لوله، تنش‌های باقی‌مانده حلقوی بر سطح داخلی اثر اساسی بر میزان سایش و در نتیجه عمر لوله دارند. تنش‌های باقی‌مانده کششی اثر مخرب بر میزان سایش و عمر لوله دارند. با توجه به فرایند تولید لوله،

شکل ۵، مقدار عددی اثر تنش‌های باقی‌مانده را در دماهای کاری مختلف نمایش می‌دهد. با توجه به تغییرات شدید عمر مفید (محور عمودی)، این نمودارها در دو مقیاس خطی و لگاریتمی ارائه شده‌اند. میزان کاهش و افزایش عمر مفید لوله در دماهای مختلف تحت اثر تنش‌های باقی‌مانده مختلف در جدول ۲ جمع‌بندی شده است. در این جدول، عمر مبنای شرایط بدون تنش باقی‌مانده به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شده و اثر تنش باقی‌مانده کششی و فشاری بر عمر لوله نسبت به میزان مرجع به‌صورت درصد بیان شده است.

جدول ۲- درصد اثر تنش باقی مانده کششی و فشاری بر عمر لوله [۴۴۴۴].

تنش باقی مانده (MPa)	۱/۱ (کششی)	۲/۲ (کششی)	۱/۱ (فشاری)
دما (°C)	اثر تنش باقی مانده (%)		
۲۰	-۹۰/۷	-۹۸/۹	+۱۳۱۰
۶۵	-۷۴/۳	-۹۲/۵	+۳۵۵
۸۲	-۶۴/۸	-۸۶/۳	+۲۲۰
۹۵	-۵۶/۰	-۷۹/۱	+۱۵۰

در صورت وجود فقط MPa ۱/۱ تنش باقی مانده کششی، عمر لوله حداقل ۵۶٪ کاهش می یابد. از سوی دیگر، در صورت طراحی فرایند تولید، به گونه ای که تنش باقی مانده حلقوی فشاری در تمام نقاط لوله به طور یکنواخت ایجاد شود؛ عمر لوله می تواند حداقل ۲/۵ برابر شود. این مسئله به منزله افزایش ۱۵۰٪ عمر لوله است.

وجود مقداری تنش باقی مانده حلقوی کششی در سطح داخلی لوله، ممکن است اجتناب ناپذیر باشد. در صورتی که فرایند تولید، همانند برخی از لوله های فولادی تولیدی برای تحمل فشار داخلی، به نحوی طراحی شود که امکان ایجاد تنش های باقی مانده فشاری در سطح داخلی لوله فراهم شود، می تواند اثر محسوسی بر افزایش عمر لوله های پلی اتیلن داشته باشد. نتایج این پژوهش نشان می دهد،

## مراجع

1. Khaleghi Moghadam M. and Shabanian M., An Overview on Evolution of Polyethylene Pipes: Production Methods, *Polymerization (Persian)*, **5**, 84-91, 2016.
2. Zha S., Lan H., and Huang H., Review on Lifetime Predictions of Polyethylene Pipes: Limitations and Trends, *Int. J. Pres. Ves. Pip.*, **198**, 104663, 2022.
3. Brömstrup H., PE 100 Pipe Systems, Vulkan-Verlag, Essen, 21-30, 2009.
4. Frank A., Hutar P., and Pinter G., Numerical Assessment of PE 80 and PE 100 Pipe Lifetime Based on Paris-Erdogan Equation, *Macromol. Symp.*, **311**, 112-121, 2012.
5. Lancioni N., Parlapiano M., Sgroi M. et al., Polyethylene Pipes Exposed to Chlorine Dioxide in Drinking Water Supply System: A Critical Review of Degradation Mechanisms and Accelerated Aging Methods, *Water Res.*, **238**, 120030, 2023.
6. Esfandiari N. and Zareinezhad R., A Review of the Application of Polymers to Drag Reduction in Horizontal Pipelines, *Polymerization (Persian)*, **10**, 3-12, 2019.
7. Pars Ethylene Kish, <https://www.parsethylene.com>, available in 15 April 2025.
8. Poduška J., Hutař P., Kučera J. et al., Residual Stress in Polyethylene Pipes, *Polym. Test.*, **54**, 288-295, 2016.
9. Poduška J., Kučera J., Hutař P. et al., Residual Stress Distribution in Extruded Polypropylene Pipes, *Polym. Test.*, **40**, 88-98, 2014.
10. Plastics Piping and Ducting Systems—Determination of the Long-Term Hydrostatic Strength of Thermoplastics Materials in Pipe form by Extrapolation, ISO 9080:2012.