



طراحی و ساخت مجموعه سازه آزمایش پدیده رشد سریع ترک جهت کاربرد در اندازه گیری سرعت رشد نوک ترک در لوله های خطوط انتقال

سید محمود مدنی^{۱*}، محمد رضا فروزان^۲، علیرضا صالحیان^۳

۱- مربی، گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- کارشناس، گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران

* خمینی شهر، ۱۱۹-۸۴۱۷۵، iaukhsh.ac.ir/madani یا sm_madani110@yahoo.com

چکیده

انتقال سیال بصورت مایع و یا گاز از یک نقطه به نقطه دیگر، فعالیتی معمول در صنایع انتقال نفت و گاز، نیروگاه‌ها، پتروشیمی و هسته‌های میبانشد. عموماً این انتقال در شرایط فشار بالا و در لوله‌هایی از جنس فولاد، آلومینیم و یا پلی اتیلن است. این لوله‌ها در فرآیند ساخت و عملکرد، ناشی از عواملی از قبیل خستگی و خوردگی در معرض ایجاد ریز ترک‌هایی در سطوح داخلی و خارجی لوله قرار دارند. چنانچه ترک‌های هم‌راستای محور لوله، بصورت تمام عمق درآید، پدیده رشد سریع ترک ایجاد میشود. در این حالت، ترک با سرعت بسیار زیادی به موازات محور لوله رشد خواهد نمود. در این تحقیق که برای اولین بار در کشور صورت گرفته، به طراحی و ساخت مجموعه سازه آزمایش با هدف اندازه‌گیری سرعت رشد نوک ترک با استفاده از دو روش دوربین سرعت بالا و دستگاه زمان‌سنج سیمی در لوله های بدون درز آلومینیمی از سری T5-۶۰۶۳ پرداخته شده است. نتایج بدست آمده از آزمایش با این مجموعه سازه عبارت است از: فشار ترک‌گذاری برای نمونه‌های با عمق ترک ۰/۸، ۱/۰ و ۱/۲ به ترتیب برابر ۷۰، ۶۵ و ۵۸ بار و سرعت های بدست آمده با کمک دوربین سرعت بالا و دستگاه زمان‌سنج سیمی در محدوده ۱۲۰ تا ۱۳۲ و ۱۲۰ تا ۱۲۶ متر بر ثانیه ثبت شد. نتایج کیفی بدست آمده در این تحقیق تطابق مناسبی با دیگر تحقیقات ارائه شده در دیگر منابع علمی دارد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۰ فروردین ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۷ خرداد ۱۳۹۸

ارائه در سایت: ۱۵ شهریور ۱۳۹۸

کلیدواژگان

پدیده رشد سریع ترک

سرعت رشد نوک ترک

آلومینیم سری T5-6063

خطوط انتقال انتقال نفت و گاز

دستگاه زمان‌سنج سیمی

دوربین سرعت‌بالا

مجموعه سازه آزمایش

Designing and Manufacturing of Test Set Up for Rapid Crack Propagation Test with Experimental Measurement of Tip Crack Growth Speed in Transmission pipes

S, Mahmood Madani^{1*}, Mohamad Reza Forouzan², Ali Reza Salehian³

1- Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Esfahan, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran

* P.O.B. 84175-119 khomeini shahr, Iran, madani@iaukhsh.ac.ir or sm_madani110@yahoo.com

Article Information

Original Research Paper

Received 9 April 2019

Accepted 17 June 2019

Available Online 6

September 2019

ABSTRACT

Gas and liquid transmission is a routine activity in the oil industry, powerhouses, petrochemicals and nuclear industries. This transmission occurs in high pressure conditions and in steel, aluminum and PE pipes. These pipes are exposed to micro cracks in the inner and outer surface due to factors like corrosion and fatigue in the manufacturing process. If the aligned cracks

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S, Mahmood Madani, Mohamad Reza Forouzan, Ali Reza Salehian, Designing and Manufacturing of Test Set Up for Rapid Crack Propagation Test with Experimental Measurement of Tip Crack Growth Speed in Transmission pipes, Journal of Mechanical Engineering and Vibration, Vol. 10, No. 1, pp. 14-24, 2019 (In Persian)

Keywords
Rapid Crack
Propagation(RCP)
Timing wire system
(TWS), High speed camera
(HSC), Test set up

are all over, the rapid crack growth phenomenon occurs. In this case, crack will grow at high speed along the pipe axis. In this research that has been conducted for the first time in the country, the measurement of the growth rate of the crack tip is done in two ways: High-Speed camera and timing wire system in the seamless aluminum 6063-T5 pipes. The bursting pressure of the specimens with the initial crack depth of 0.8, 1.0 and 1.2 mm are 70, 65 and 58 bar. The resulting growth rates in High-Speed camera and timing wire system is about 120 to 132 and 120 to 126 m/s. The qualitative results of this research matches well with other researches in this field in other journals.



شکل ۱ ترکیبگی در راستای محور لوله مسی انتقال آب

بطور مثال، سرعت نوک ترک در حالت شکست رفتار نرم ۱۰۰-۳۰۰ متر بر ثانیه و در حالت شکست رفتار ترد ۸۰۰-۱۰۰۰ متر بر ثانیه میباشد. وقوع این حادثه در لوله‌های کاربردی در صنعت قطعی است و فقط امکان تاخیر در ایجاد و همچنین کاهش خسارات شدید حاصل از وقوع این پدیده امکان پذیر میباشد. حجم خسارت در بروز پدیده رشد سریع ترک، در هنگامی که سیال در حالت یک فازی گاز میباشد، به شدت بیشتر از مواقعی است که لوله در حال انتقال سیال مایع میباشد. این امر به دلیل قابلیت تراکم پذیری گاز و آزاد شدن انرژی ذخیره شده در هنگام بروز این پدیده میباشد. مواردی از بروز این پدیده در صنایع مختلف در شکل ۲ نشان داده میشود.

مبنای بررسی میزان رفتار تردی و رفتار نرمی یک فلز، مقدار چقرمگی ماده میباشد. این ویژگی با استفاده از آزمایش ضربه و رسم مقدار انرژی لازم برای شکست در برابر تغییرات درجه حرارت نمونه، قابل اندازه‌گیری است. در نمودارهای مربوطه در مراجع، مناطق رفتار ترد، رفتار نرم و منطقه رفتار انتقالی از تردی به نرمی ماده مشخص شده است. پارامترهای مختلفی از جمله جنس نمونه، نرخ کرنش یا نرخ بار گذاری بر روی نمونه، درجه حرارت

۱- مقدمه

وظیفه خطوط لوله انتقال و توزیع، انتقال سیال اعم گاز (گاز طبیعی، بخار آب و ...) یا مایع (نفت، آب، روغن و ...) از یک نقطه به نقطه دیگر از یک منطقه جغرافیایی (در خطوط انتقال گاز و نفت) یا سایت صنعتی (در نیروگاه) میباشد. با توجه به فشار سیال عبوری، دیواره لوله از طرف سیال تحت فشار داخلی قرار دارد. همچنین با توجه به فرآیندهای ساخت لوله و با نوع عملکرد لوله، ریزترک‌هایی در دیواره داخلی و یا خارجی لوله‌ها ایجاد میشود. برای افزایش راندمان خطوط انتقال و توزیع لوله، بیشترین تلاش در افزایش فشار داخلی سیال داخل لوله و در نتیجه افزایش سرعت عبور سیال میباشد، بدیهی است، در اجرای این ایده لازم است استحکام جنس لوله‌ها به مقدار قابل توجه افزایش یابد.

در اثر عوامل مختلفی از جمله خستگی ایجاد شده بر روی دیواره لوله ناشی از تغییرات فشار داخلی، خوردگی لوله ناشی از مواد خورنده عبوری در لوله، کاهش شدید درجه حرارت کاری لوله و یا دیگر عوامل، ریز ترک‌ها در راستای طول و عمق رشد کرده، تا ابعاد فیزیکی آنها (طول و عمق) به ابعاد بحرانی ترک برسد. در این حالت بطور ناگهانی، ترک تمام عمق شده و بسته به زاویه ترک نسبت به محور لوله و دیگر عوامل از جمله حجم سیال، گاز یا مایع بودن سیال و ...، ترک در راستای طول و یا محیط لوله به سرعت رشد میکند و حتی در صورت وجود عوامل آتش‌زا، قابلیت تبدیل این ترکیبگی به انفجاری مهیب وجود دارد. شکل ۱ ترکیبگی یک لوله مسی انتقال آب را نشان میدهد.

طبق تعریف، در صورت وجود ترکی تمام عمق، در راستای محور لوله حامل سیال تحت فشار، پدیده رشد سریع ترک^۱ ایجاد میشود. از جمله مهمترین عوامل موثر بر سرعت رشد ترک در این پدیده، میتوان به استحکام شکست جنس لوله، درجه حرارت منطقه انتقال شکست نرم به شکست ترد در نمودار آزمایش ضربه، قطر و ضخامت لوله، فشار کاری خط لوله و نوع سیال موجود در لوله اشاره نمود.

¹ Rapid Crack Propagation (RCP)

نمونه در مرحله آزمایش، نوع شکاف روی نمونه موثر بر نتایج نمودار آزمایش ضربه میباشند.



شکل ۲ پدیده رشد سریع ترک ناشی از ترکیدگی (الف) لوله فولادی انتقال گاز (ب) لوله فولادی انتقال نفت (ج) کپسول نیتروژن در حین شارژ (د) خط انتقال بخار در نیروگاه

بررسی پدیده رشد سریع ترک، از حدود دهه ۱۹۵۰ و به دلیل تعداد زیاد حوادثی که ناشی از بروز این پدیده در خطوط لوله‌های فولادی انتقال گاز و نفت و صنایع دیگر اتفاق افتاد، آغاز گردید [۱]. در اولین بررسی‌ها نشان داده شد، نوع شکست این لوله‌ها از نوع رفتار ترد ماده بوده و لازم است تلاش‌هایی برای افزایش منطقه رفتار نرم نمودار آزمایش ضربه انجام پذیرد تا در طیف وسیعتری از درجه حرارت، جنس لوله از خود رفتار نرم نشان دهد. لذا با عنایت به نمودار بدست آمده از آزمایش ضربه، تلاش در تهیه موادی برای ساخت لوله با منطقه شکست ترد کوچک و در دماهای بسیار پائین، منطقه انتقال کوچک و منطقه شکست نرم بزرگتر میباشند. شایان ذکر است، هر چه منطقه نرم از دماهای پائین تری شروع گردد، قابلیت مقاومت بیشتری در مقابل پدیده رشد سریع ترک را دارد.

پایین بودن استحکام جنس لوله‌ها نیز از جمله دلایل دیگر بروز این حوادث بود. لذا پس از راهکار افزایش منطقه رفتار نرم ماده،

تلاش برای افزایش استحکام مواد از جمله فولاد و آلومینیوم مورد توجه قرار گرفت [۲]. تغییرات ایجاد شده در استاندارد IP لوله‌های فولادی از IP X 42 در سال ۱۹۵۰ تا IP X 120 در سال ۱۹۹۵، موید این راهکار میباشند.

از سوی محققین، معیارهای مختلفی جهت بررسی مکانیک شکست ایجاد شده در این پدیده استفاده شده است. از آن جمله میتوان به موارد K_I ، J -Integral، $CTOD$ ^۱ و $CTOA$ ^۲ اشاره نمود. در آغاز، نظر عموم ایشان بر ارتباط این پدیده با انرژی شاری بود، لیکن در دو دهه گذشته، با توجه به رفتار غیرالاستیک دینامیکی مشاهده شده در لوله‌های فولادی خطوط انتقال، توجه خاصی به مشخصه $CTOA$ شده است. برای کاربرد این مشخصه لازم است، $CTOA$ برای حالت پایدار رشد ترک در نمونه استاندارد از ماده مورد نظر بدست آید. در این معیار برای توقف ترک شرط عددی زیر بیان میگردد [۳]:

$$(CTOA)_c > (CTOA)_{max}$$

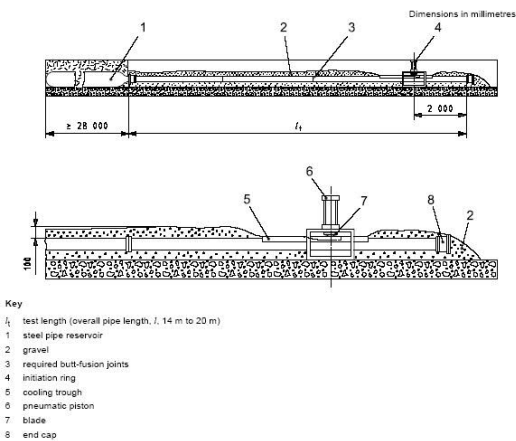
در این رابطه $(CTOA)_c$ ، مقدار مقاومت شکست ماده و $(CTOA)_{max}$ مقدار حداکثر $CTOA$ در حالت رشد سریع ترک و در حالت پایداری نیروی پیشران میباشند. این رابطه قابلیت استفاده برای رشد سریع ترک در حالت شکست رفتار نرم، حتی در لوله‌های با قطرهای زیاد و فشار بالا را دارا میباشند.

استفاده از معیار $(CTOA)_c$ برای بررسی فرآیند رشد سریع ترک توسط افراد مختلفی از جمله کانینن [۴] پیشنهاد شده است. همچنین برای بررسی عملی این پدیده، شرکتها و مؤسسات تحقیقاتی زیادی به انجام پژوهش‌های مختلفی دست زده‌اند، که میتوان به مراکز (BCL)، (AGA)، (BGC)، (AISI) و (HSL) و چندین مرکز دیگر اشاره نمود [۱]. در تحقیقات مختلف پدیده رشد سریع ترک، از هوا، نیتروژن، گاز طبیعی و حتی آب در حالت یک فازی و دو فازی به عنوان سیال درون لوله استفاده شده است. این آزمایشات با اهداف متفاوت، از جمله بدست آوردن فشار بحرانی (فشاریکه در بالاتر از آن ترک به طور نامحدود رشد کرده و در کمتر از آن رشد ترک متوقف میشود [۹])، بررسی اثرات یخزدگی خاک، تاثیرات متوقف کنندهای ترک و بررسی تاثیر عملیتهای حرارتی و تاثیر نسبت قطر لوله به ضخامت و ... بر روی لوله‌های پلی اتیلنی و فولادی از آلیاژهای (X 52 - 60 - 70) (120 - 100 - 80) در قطرهای مختلف انجام پذیرفته است.

² Crack Tip Opening Angle

¹ Crack Tip Opening Distance

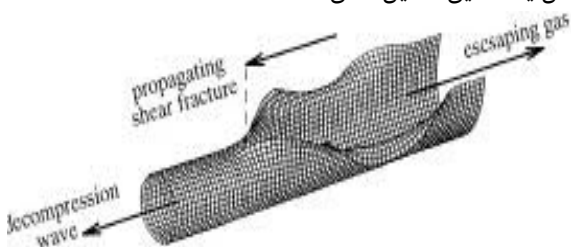
سانتیگراد سرد شده است، استفاده میشود. تصویر این آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. [۵].



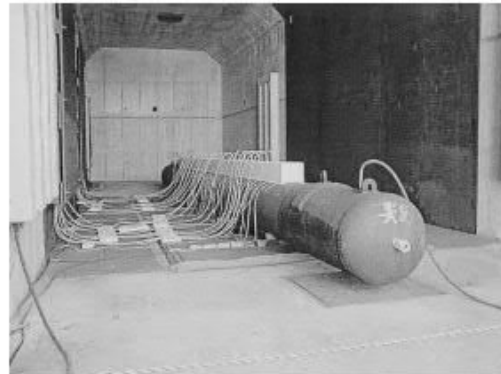
شکل ۴ آزمایش پیشنهادی در استاندارد (ISO 13478)

در سال ۲۰۰۶ تاکوچی و همکارانش [۷] اقدام به انجام آزمایشات با ابعاد کامل بر روی فولادهای X100 و X120 نمودند، در این آزمایشات، با بررسی انتشار ترک در هر دو جهت ترک اولیه با هدف پیش‌بینی چقرمگی لازم برای توقف ترک، بیشترین استفاده از امکانات به عمل آمده و همچنین به بررسی تغییر نتایج با تغییر در گرید فولاد، تغییر اثر فشار کاری از ۸۰-۶۰ درصد تنش تسلیم و ترکیب شیمیایی گاز موجود در لوله پرداخته شد.

ماکینو و همکارانش [۸] در سال ۲۰۰۱ به انجام یک سری آزمایشات بر لوله از جنس X80 با ابعاد کامل در حالت لوله با محتوی دو فاز سیال و گاز اقدام نموده و تلاش کردند، رابطه آزمایش با ابعاد کامل محتوی گاز و محتوی مایع را بدست آورند. ایشان در ادامه به بررسی اثرات مختلف از قبیل خاک موجود بر روی لوله، اثرات انواع گازها و نسبت آنها پرداختند. ایشان سپس به تحلیل عددی این مدل پرداختند که در شکل ۵ تصویر تغییر شکل یافته این تحلیل نشان داده شده است.



طبق گزارش ماکینو و همکارانش [۶]، در بین سالهای ۱۹۷۸ تا ۱۹۸۳ (ISJI) هفت آزمایش روی لوله‌هایی از جنس X70 با قطر ۴۸ اینچ و ضخامت ۱۸/۳ میلیمتر انجام شد. برای آزمایش‌های سری A و B، لوله‌ها از هوای با فشار داخلی ۱۱/۶ مگاپاسکال (۸۰٪ استحکام تسلیم) پر شده است. برای آزمایش‌های سری C، لوله‌ها از گاز طبیعی با فشار داخلی ۱۱/۶ و ۱۰/۴ مگاپاسکال (۷۲٪ استحکام تسلیم) پر شده است. در شکل ۳ نمای نمونه آزمایش را قبل و پس از انجام آزمایش نشان میدهد.



(a) before the burst test



(b) after the burst test

شکل ۳ الف) نمای نمونه آزمایش قبل از آزمایش، ب) نمای نمونه آزمایش بعد از آزمایش [۸]

در سال ۱۹۹۶، آزمایش با ابعاد کامل بر روی لوله از جنس پلی‌اتیلن و به طول ۱۴ متر در استاندارد ISO 13478 پیشنهاد گردید. این لوله توسط جریان آب خنک شده و در عمق حداقل یک متری با استفاده از سنگ ریزه با ابعاد ۲۰-۴۰ میلی متر دفن میشود. برای شبیه‌سازی طول بینهایت لوله واقعی، اتصال یک لوله فولادی با حداقل دو برابر طول لوله پلی‌اتیلنی و با قطر مشابه پیش‌بینی شده است. همچنین برای ایجاد ترک اولیه، از سقوط پره فولادی در محلی که به صورت موضعی تا ۶۰-درجه

شکل ۵ نمای مدل اجزاء محدود و تحلیل شده ماکینو و

همکارانش [۸]

تحقیق حاضر که برای اولین بار در کشور انجام میشود، اولین بخش از یک سری تحقیقات برنامه‌ریزی شده با هدف اندازه‌گیری سرعت رشد نوک ترک بر روی لوله‌های خطوط انتقال و توزیع در صنایع مختلف میباشد. از آنجا که پدیده رشد سریع ترک در ایران عمدتاً در لوله‌های خطوط انتقال نفت و گاز کاربرد دارد و انجام این آزمایشات در ابعاد اصلی بسیار خطرناک و پرهزینه میباشد، لذا هدف اصلی در گام اول تحقیق (تحقیق حاضر)، طراحی و ساخت یک مجموعه سازه آزمایش و ملحقات اضافه شده بر روی میباشد. سپس در راستای اثبات قابلیت‌های این مجموعه ساخته شده، اقدام به انجام آزمایش پدیده رشد سریع ترک بر روی یک لوله‌های بدون درز آلومینیومی از سری T5-۶۰۶۳ با قطر خارجی ۹۸ میلیمتر و ضخامت ۱/۸ میلیمتر در ابعاد کامل شده است. این مجموعه سازه آزمایش، قابلیت اندازه‌گیری سرعت رشد نوک ترک را از دو طریق دستگاه زمان سنج سیمی (طراحی و ساخته شده در همین تحقیق) و دوربین‌های سرعت بالا را دارد.

۲- روش تحقیق

انجام آزمایشات را میتوان با رده‌بندی آزمایشات با ابعاد آزمایشگاهی و آزمایشات با ابعاد میدانی تقسیم‌بندی نمود. عموماً آزمایشات پدیده رشد سریع ترک که در منابع علمی ثبت شده است، به دلیل ابعاد و قابلیت‌های تخریبی آن از جمله آزمایشات با ابعاد میدانی است. در این تحقیق تلاش شد که قابلیت‌هایی بدست آورده شود که این آزمایش در محیط آزمایشگاه و با ابعاد قابل کنترل انجام پذیرد.

آلیاژهای آلومینیوم یکی از پر کاربردترین مواد در صنایعی مانند نیروگاه‌های برق و صنایع هوایی است. از آنجا که این آلیاژها دارای مقاومت بالایی در برابر رشد ترک میباشد، لذا از جمله مواد مورد بررسی به عنوان نمونه آزمایش رشد سریع ترک میباشد.

الف) ترکیب شیمیایی، مشخصات مکانیکی و هندسه لوله

در این تحقیق به بررسی رشد سریع ترک بر روی لوله اکسترود شده بدون درز آلومینیومی از سری T5-۶۰۶۳ میپردازد. قطر خارجی و ضخامت این لوله که برای انتقال بنزین از مخازن پمپ بنزین به تلمبه بکار برده میشود، به ترتیب برابر ۹۸ میلیمتر و ۱/۸ میلیمتر میباشد. عناصر تشکیل دهنده و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم از سری T5-۶۰۶۳ در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱ درصد عناصر موجود در آلومینیوم 6063-T5

Component	W _t %
Al	97.5
Si	0.2 to 0.6
Fe	0.0 to 0.35
Cu	0.0 to 0.1
Mn	0.0 to 0.1
Mg	0.45 to 0.9
Zn	0.0 to 0.1
Ti	0.0 to 0.1
Cr	0.1 max

جدول ۲ مشخصات مکانیکی آلومینیوم 6063-T5

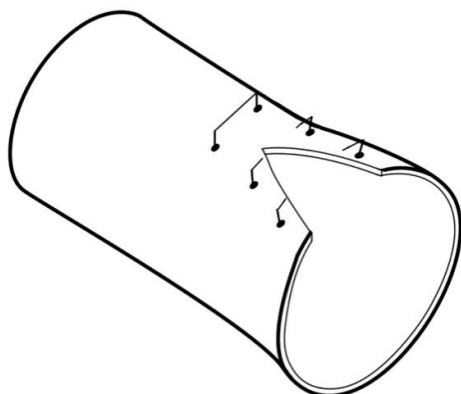
2700	ρ (Kg/m ³)
73	E (Gpa)
0.33	ν
120	σ_y (MPa)
1.6	H (mm)
48	R (mm)
1000	L (mm)

ب) ابزار و فرآیند آزمایش پدیده رشد سریع ترک

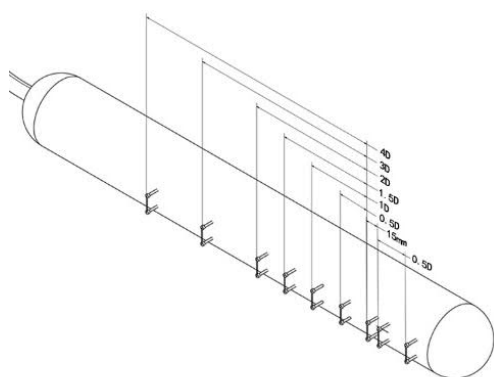
در این تحقیق، سرعت نوک ترک بصورت آزمایشی و با استفاده از دو روش استفاده از دستگاه زمان‌سنج سیمی و کاربرد دوربین‌سرعت بالا اندازه‌گیری میشود. انجام این تحقیق در چهار مرحله قابل بررسی است. این چهار مرحله عبارت است از: مرحله اول: طراحی و ساخت مجموعه سازه آزمایش رشد سریع ترک، مرحله دوم: طراحی و ساخت دستگاه زمان‌سنج سیمی، مرحله سوم: طراحی و ساخت نمونه آزمایش رشد سریع ترک و مرحله چهارم: انجام آزمایش‌های رشد سریع ترک. در ادامه، توضیحات لازم برای مراحل ذکر شده ارائه میگردد.

ب-۱) طراحی و ساخت مجموعه سازه آزمایش رشد سریع ترک

در طراحی یک مجموعه سازه آزمایش رشد سریع ترک در یک اندازه کوچک، نکات مختلفی مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این نکات عبارتند از: آماده کردن منبع فشار مورد نیاز، کاهش احتمال انفجار گاز خروجی، آبنندی نمونه و کاهش گرد و غبار ایجاد شده در هنگام فرآیند آزمایش. پس از طراحی مجموعه سازه آزمایش، اقدام به ساخت آن شد. المانهای اصلی این مجموعه



شکل ۷ پارگی نمادین سیم دستگاه زمان‌سنج سیمی

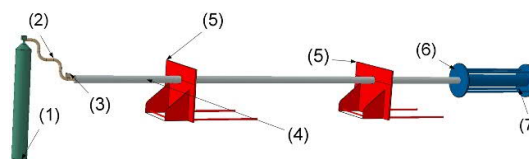


شکل ۸ موقعیت نصب سیم‌های دستگاه زمان‌سنج سیمی بر روی نمونه آزمایش

دستگاه‌های زمان‌سنج سیمی بکار رفته در تحقیقات محققین قبلی از نوع آنالوگ بوده که مدار الکتریکی آنها در شکل a-10 نشان داده شده است. در این دستگاه چندین مقاومت بصورت سری قرار دارد که هر کدام از آنها با یک مدار اتصال کوتاه بصورت موازی قرار گرفته‌اند. در واقع مدارهای اتصال کوتاه، همان سیم‌های دستگاه زمان‌سنج سیمی است. وقتی سیم پاره می‌شود، بخش سیم اتصال کوتاه از مدار الکتریکی خارج شده و مقاومت نظیر آن در سیستم اعمال می‌گردد، لذا اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت "RO" تغییر می‌کند. زمان این تغییر در پتانسیل دو سر مقاومت، توسط اسیلوسکوپ بدست می‌آید. خطای دستگاه آنالوگ در حد میلی ثانیه می‌باشد.

در این تحقیق، مبنای طراحی دستگاه زمان‌سنج سیمی بر اساس یک میکروپروسور دیجیتال با چندین ورودی می‌باشد.

عبارتند از: (۱) منبع گاز با فشار بالا، (۲) شلنگ‌های اتصال برای انتقال گاز با تحمل فشار بالا، (۳) شیر تخلیه، (۴) لوله با گاز فشار بالا، (۵) سیستم سپرهای محافظ (۶) فونداسیون مجموعه سازه آزمایش، (۷) نمونه آزمایش پدیده رشد سریع ترک و همچنین سیستم شبیه‌سازی شده از سیم بکسل‌های فولادی بجای فونداسیون الاستیک پیوسته که در شکل ۶ نشان داده نشده است. برای از بین بردن احتمال انفجار گاز خروجی از نمونه آزمایش در فرآیند آزمایش، از گاز نیتروژن استفاده شده است. شکل ۶ المان‌های اصلی این مجموعه را نشان می‌دهد.



شکل ۶ المان‌های اصلی مجموعه سازه آزمایش پدیده رشد سریع ترک

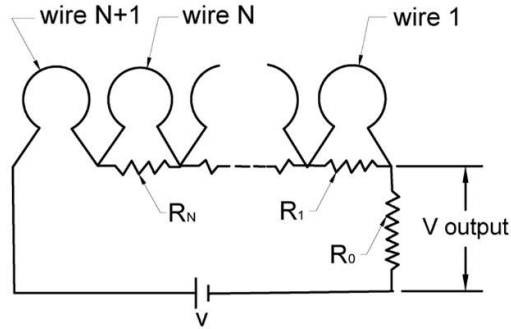
ب-۲) طراحی و ساخت دستگاه زمان‌سنج سیمی

از مهمترین بخش‌های این تحقیق، طراحی و ساخت دستگاه زمان‌سنج سیمی برای ثبت داده‌های زمانی است. زمان‌های لازم به ثبت عبارتند از: زمان تمام عمق شدن ترک و آغاز پدیده رشد سریع ترک و زمان رسیدن نوک ترک به نقاط مورد نظر (زمان پاره شدن سیم‌های دستگاه زمان‌سنج سیمی).

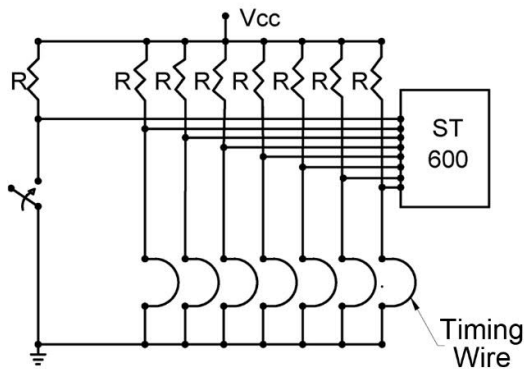
عموما در آزمایش رشد سریع ترک، مسیر رشد ترک قابل پیش‌بینی است. این مسیر در امتداد ترک اولیه و به تعبیر دیگر در راستای محور لوله می‌باشد. لذا سیم‌های دستگاه زمان‌سنج-سیم، در امتداد ترک اولیه و به موازات محور لوله در نقاط مشخص و فواصل مورد نظر نصب می‌شوند. هنگامی که نوک ترک به نقطه مورد نظریکه سیم در آن محل نصب شده است می‌رسد، سیم در اثر کشش ایجاد شده ناشی از بازشدگی دهانه ترک لوله، تحت کشش قرار گرفته و پاره می‌شود. شکل ۷، پارگی سیم را بصورت شماتیک نشان می‌دهد.

موقعیت سیم‌های نصب شده بر روی دستگاه زمان‌سنج سیمی در شکل ۸ نشان داده شده است. سیم‌های نصب شده روی نمونه و المان‌های اصلی دستگاه زمان‌سنج-سیم در شکل ۹ نشان داده شده است. با ثبت زمان پارگی دو سیم نصب شده متوالی (t_i و t_{i-1}) معلوم بودن فاصله بین دو سیم نصب شده (d)، سرعت رشد نوک ترک از رابطه ($V = d / (t_i - t_{i-1})$) قابل محاسبه می‌باشد.

در این تحقیق، سرعت رشد نوک ترک با استفاده از دو روش دوربین سرعت بالا از نوع Casio EX-F1 با ۱۲۰۰ فریم بر ثانیه و دستگاه زمان‌سنج سیمی اندازه‌گیری می‌شود.

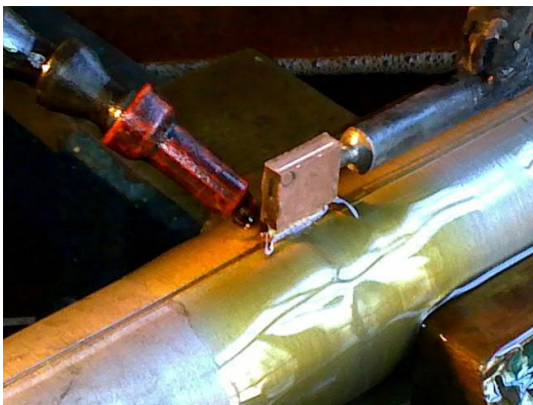


(a)



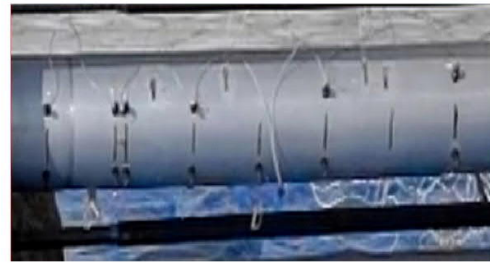
(b)

شکل ۱۰ مدار الکتریکی دستگاه‌های زمان‌سنج سیمی، (الف) مدار الکتریکی دستگاه نوع آنالوگ، (ب) مدار الکتریکی دستگاه نوع دیجیتال

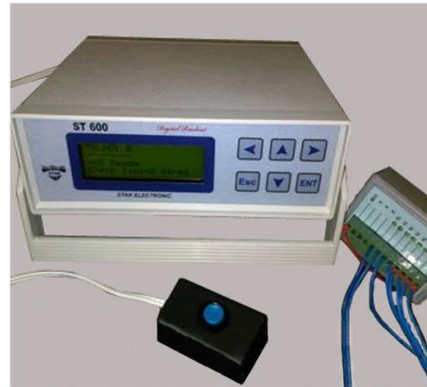


شکل ۱۱ فرآیند آماده سازی ترک اولیه در نمونه با کمک دستگاه

EDM



(a)



(b)

شکل ۹ نمای سیم‌های نصب شده روی نمونه و المان‌های اصلی دستگاه زمان‌سنج سیمی

شکل b-۱۰ مدار الکتریکی این دستگاه زمان‌سنج سیمی را نشان می‌دهد. بر حسب این شکل، $\Delta V = 0$ و $\Delta V = V_{CC}$ نشان داده می‌شود. خطای دستگاه دیجیتال در حدود ۲۰ میکروثانیه می‌باشد.

ب-۳) طراحی و آماده سازی نمونه آزمایش

برای ایجاد ترک اولیه در راستای محور لوله از دستگاه وایر-کات (EDM) با الکترود مسی با شکل نیم بیضی و ضخامت ۰/۲ میلی‌متر استفاده شد. آزمایشات متعددی با ابعاد متفاوت ترک‌های اولیه انجام شد. طول و عمق ترک‌های اولیه در آزمایشات انجام شده به ترتیب برابر ۱۵ میلی‌متر و ۰/۸-۱/۲ میلی‌متر یعنی حدود ۴۴-۶۶ درصد ضخامت لوله بود. فرآیند آماده سازی ترک اولیه در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

ب-۴) انجام آزمایش رشد سریع ترک

در شکل ۱۲ مجموعه سازه آزمایش رشد سریع ترک به همراه کلیه اجزاء مربوطه که بر روی آن نصب شده است نشان داده شده است.

در نهایت، نتیجه حاصل از آزمایش‌های اولیه، به بهینه شدن مجموعه سازه آزمایش انجامید و طرح نهایی برای آزمایشات بدست آمده و ساخته شد.

۳- نتایج

هدف از این تحقیق، طراحی و ساخت مجموعه سازه آزمایش رشد سریع ترک و اندازه‌گیری سرعت رشد نوک ترک میباشد. این سرعت از دو طریق اندازه‌گیری شده است. روش اول با استفاده از دوربین‌سرعت‌بالا (۱۲۰۰ فریم بر ثانیه) و در روش دوم با استفاده از دستگاه زمان‌سنج سیمی است. بطور کلی چهار رده آزمایش انجام شد، در رده پیش‌آزمایش، هدف بررسی قابلیت‌ها و بهینه‌سازی مجموعه سازه‌ای آزمایش و در سه رده آزمایش بعدی، اندازه‌گیری سرعت رشد نوک ترک مورد نظر میباشد. نتایج بدست آمده در این تحقیق به بخش‌های زیر قابل تقسیم‌بندی و ارائه میباشد.

الف) بهینه‌سازی مجموعه سازه آزمایش در آزمایش‌های اولیه

در این سری آزمایش‌ها، با انجام آزمایش‌ها به بررسی موارد مورد نظر پرداخته شد. به عنوان مثال، راهکارهای مورد بررسی برای آبندی درپوش‌ها نسبت به لوله آزمایش، روش جوشکاری و استفاده از تک اورینگ و اورینگ دابل بود. با انجام چندین آزمایش، نتایج بدست آمده از غیر ایمن بودن روش جوشکاری به دلیل ضخامت کم لوله و نشستی گاز در حالت تک اورینگ حکایت داشت. لذا در مجموعه سازه آزمایش با توجه به نتیجه مناسب آزمایش، از روش اورینگ دابل استفاده شد. با هدف تعیین تکلیف دیگر موارد لازم جهت ساخت مجموعه سازه آزمایش، آزمایش‌های دیگری انجام و موارد در طراحی مجموعه سازه آزمایش لحاظ گردید.

ب) فشار ترکیدگی

گاز نیتروژن در داخل لوله نمونه آزمایش تزریق گردید. با افزایش تدریجی فشار داخل لوله، گاز داخل لوله متراکم شده و مقدار تنش کششی هوپ در جداره لوله افزایش یافته و باعث ایجاد تمرکز تنش بر ترک اولیه نمونه میگردد. لذا ترک اولیه که به شکل نیم بیضی بود، در راستای طول و عمق خود شروع به رشد کرده تا ابعاد آن به ابعاد بحرانی ترک برسد. فشاری که ابعاد ترک را به ابعاد بحرانی رسانده، فشار ترکیدگی نامیم. با افزایش جزئی فشار در این نقطه، رشد ترک، حالت پایداری خود را از دست داده و در راستای عمق بصورت تمام عمق شده و ترکیدگی لوله اتفاق می‌افتد. با باز شدن یک مجرا در لوله، خروج گاز از داخل لوله آغاز و



شکل ۱۲ مجموعه سازه آزمایش رشد سریع ترک به همراه کلیه اجزاء مربوطه نصب شده

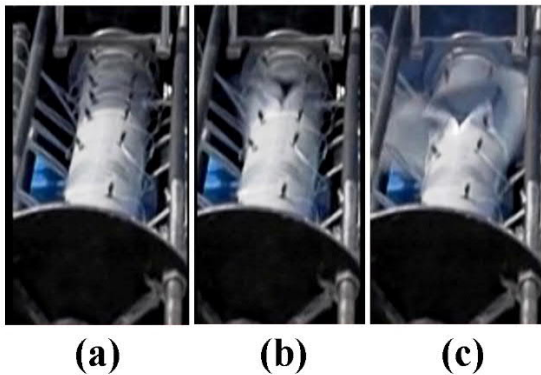
به غیر از آزمایشات اولیه که با هدف بررسی قابلیت مجموعه سازه آزمایش انجام شد، سه رده آزمایش شماره یک، دو و سه با طول ترک‌های اولیه ۱۵ میلیمتر و عمق ۰/۸، ۱/۰ و ۱/۲ میلیمتر انجام شد. شایان ذکر است، با توجه به پیش‌بینی‌های خطرات احتمالی در این آزمایش و با هدف بررسی طرح‌های مختلف آبندهای طراحی شده و ابعاد مناسب ترک ایجاد شده، آزمایشات متعددی بصورت هیدرولیک و پنوماتیک انجام پذیرفت. در نهایت، نمونه‌های آماده شده بر روی مجموعه سازه آزمایش نصب گردیدند. با تزریق آرام گاز نیتروژن تحت فشار از منبع تامین فشار به داخل نمونه، فشار داخلی نمونه به آرامی افزایش یافت که نهایتاً نمونه در فشار بحرانی ترکید. در مرحله اولیه از آزمایشات، اهداف زیر مورد نظر بودند:

- ۱) بررسی عملکرد و صحت سنجی مجموعه سازه آزمایش و تجهیزات متعلقه
- ۲) بررسی عوامل ریسک کاربرد مجموعه سازه آزمایش و ایجاد ایمنی لازم
- ۳) بررسی راهکار مناسب آبندی نمونه آزمایش به مجموعه سازه آزمایش
- ۴) بررسی راهکار مناسب برای تصویر برداری مناسب
- ۵) بررسی عملکرد و صحت سنجی دستگاه زمان‌سنج سیمی

د-۱) سرعت رشد نوک ترک با استفاده از دوربین سرعت بالا

برای اندازه‌گیری سرعت رشد نوک ترک از دوربین سرعت بالا از نوع Casio EX-F1 با ۱۲۰۰ فریم بر ثانیه و زمان بین هر دو فریم متوالی برابر ۰/۸۳ میلی ثانیه استفاده شده است. شکل ۱۴ سه فریم متوالی از تصویربرداری انجام شده را نشان می‌دهد. این تصاویر به ترتیب، آخرین فریم قبل از ترکیدگی، اولین و دومین فریم پس از ترکیدگی را نشان می‌دهد. با توجه به زمان بین هر دو فریم متوالی (t) و اندازه‌گیری محل قرارگیری نوک ترک در هر فریم (d)، سرعت رشد نوک ترک از رابطه $v = d/t$ بدست می‌آید. مقادیر بدست آمده از آزمایشات برای سرعت رشد نوک ترک، در سه رده نمونه با افزایش عمق ترک اولیه از ۰/۸، ۱ و ۱/۲ میلیمتر به ترتیب برابر ۱۳۲، ۱۲۰ و ۱۲۲ متر بر ثانیه بدست آمد. در خصوص نتایج سرعت رشد نوک ترک بدست آمده از روش فوق‌الذکر نکات زیر قابل توجه می‌باشد:

- ۱) دقت مناسب زمان بین هر دو فرم در روش دوربین-سرعت بالا وجود دارد.
- ۲) محل قرارگیری نوک ترک در هر فریم در روش دوربین-سرعت بالا بصورت تقریبی اندازه‌گیری می‌شود.
- ۳) سرعت بدست آمده از روش دوربین-سرعت بالا دارای دقت مناسبی می‌باشد.



شکل ۱۴ سه فریم متوالی از تصویربرداری انجام شده توسط دوربین-سرعت بالا از نوع Casio EX-F1 با ۱۲۰۰ فریم بر ثانیه و زمان، (الف) آخرین فریم قبل از ترکیدگی نمونه، (ب) اولین فریم پس از ترکیدگی نمونه، (ج) دومین فریم پس از ترکیدگی نمونه

د-۲) سرعت رشد نوک ترک با استفاده از دستگاه زمان‌سنج سیمی

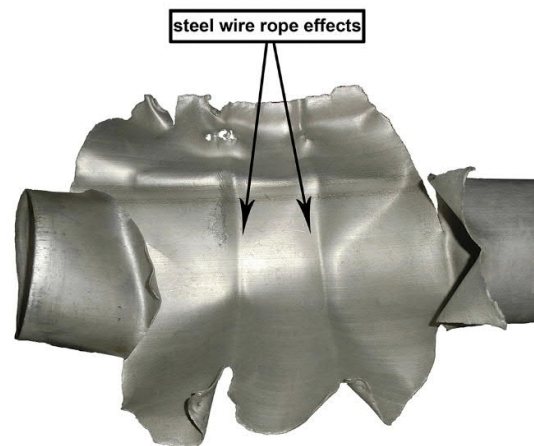
انبساط گاز متراکم به دیواره‌های دو لبه ترک، نیروی لازم برای باز شدگی و زمینه رشد هر چه سریعتر ترک را فراهم می‌نماید. فشار ترکیدگی ثبت شده در سه رده آزمایش با عمق ترک‌های اولیه ۰/۸، ۱/۰ و ۱/۲ میلیمتر و طول ۱۵ میلیمتر به ترتیب مقادیر ۷۰، ۶۵ و ۵۸ بار می‌باشد. با بررسی مشاهده می‌شود که، تغییرات فشار ترکیدگی بر حسب عمق ترک اولیه با افزایش عمق ترک اولیه، فشار ترکیدگی کاهش می‌یابد.

ج) مسیر رشد ترک

شکل ۱۳ بصورت کیفی، نمای مسیر رشد ترک را در همه آزمایشات نشان می‌دهد. نکات قابل استنتاج از این تصویر عبارتند از:

- ۱) رشد ترک در دو سوی محل ترک اولیه اتفاق می‌افتد.
- ۲) مسیر رشد ترک به موازات محور لوله می‌باشد.
- ۳) با رسیدن ترک به درپوش انتهایی لوله، ترک تغییر مسیر داده و از مسیر طولی لوله به مسیر محیط لوله حرکت می‌کند.

مشاهدات انجام شده از نتایج آزمایشات این تحقیق، تطابق کاملی از آزمایشات با ابعاد بسیار بزرگتر از جمله آزمایشات ماکینو و همکارانش که در شکل ۳ نشان داده شده، دارد.



شکل ۱۳ نمای مسیر رشد ترک در آزمایش پدیده رشد سریع ترک

د) مقادیر سرعت رشد نوک ترک

در این تحقیق، اندازه‌گیری سرعت رشد نوک ترک با دو روش استفاده از دوربین سرعت بالا (۱۲۰۰ فریم بر ثانیه) و دستگاه زمان-سنج سیمی بصورت انتخابی و یا همزمان انجام پذیرفت. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد.

سرعت رشد نوک ترک (m/s) با روش	دوربین پر سرعت ۱۲۰۰ FPS	فشار ترکیبگی (Bar)	ترک اولیه ثابت ۱۵ میلیمتر و عرض متغیر (mm)	دسته تست	ردیف
---	---	---	متغیر	پیش-تست	۱
کنده شدن پایه	۱۳۲	۷۰	۰/۸	اول	۲
۱۲۶	۱۲۰	۶۵	۱/۰	دوم	۳
۱۲۰	۱۲۲	۵۸	۱/۲	سوم	۴

لذا اعتبار سنجی نتیجه آزمایش با استفاده از نتایج آزمایش‌های با ابعاد بزرگ که بر روی نمونه‌های آلومینیومی و فولادی انجام شده است مورد بررسی قرار داده میشود. سرعت رشد ترک در لوله‌های تحت فشار برای شکست رفتار نرم ۱۰۰ - ۳۰۰ متر بر ثانیه و در حالت شکست رفتار ترد ۶۰۰ - ۱۰۰۰ متر بر ثانیه میباشد [۱۱]، همچنین در [۱۱] آزمایش با ابعاد کاملی برای لوله‌های فولادی انجام شده که سرعت رشد ترک در این لوله برابر ۱۲۵ متر بر ثانیه محاسبه شده است. حال با توجه به رفتار نرمی شکست در هر دو حالت لوله‌های فولادی و آلومینیومی، نتیجه به دست آمده قابل توجیه میباشد.

۵- سپاسگزاری

این تحقیق با پشتیبانی مادی و معنوی لازم در دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی انجام گردید. قبل از این همکاری کمال قدردانی و تشکر را دارم.

۶- مراجع

- [1]. Yu-Hsing Chao "A Propagation Fracture Model for A Pressurized Pipeline" Phd Theses in University of Washington 1987
- [2]. Norman Pokutyłowicz "The Simulation of Dynamic Ductile Failure in Pipelines" Phd thesis McGill University Montreal Canada 2000
- [3]. J.H. Jackson, A.S. Kobayashi and S.N. Atluri "An Experimental-Numerical Evaluation of the $T^* \epsilon$ Integral for a Three-dimensional Crack Front" Experimental Mechanics Vol. 44, No. 2, April 2004 p 207-213
- [4]. Kanninen & Popelar "Advanced Fracture Mechanics" Oxford University Press 1985
- [5]. INTERNATIONAL STANDARD ISO 13478
- [6]. MAKINO, KUBO, SHIWAKU, ENDO, INOUE, KAWAGUCHI, MATSUMOTO and MACHIDA

در کاربرد روش دستگاه زمان‌سنج سیمی برای اندازه‌گیری سرعت رشد نوک ترک، با توجه به محل نصب پایه‌های سیم‌ها بر روی لوله نمونه (d) و زمان‌های ثبت شده هر دو سیم متوالی پاره شده (t)، سرعت رشد نوک ترک از رابطه ($V = d / t$) بدست می‌آید. مقادیر بدست آمده از آزمایشات برای سرعت رشد نوک ترک در دو رده نمونه با افزایش عمق ترک اولیه از ۱ و ۱/۲ میلیمتر به ترتیب برابر ۱۲۶ و ۱۲۰ متر بر ثانیه بدست آمد. شایان ذکر است، به علت کنده شدن پایه سیم در آزمایش نمونه با عمق ترک اولیه ۰/۸ میلیمتر، مقدار عددی بدست نیامده است.

در خصوص نتایج سرعت رشد نوک ترک بدست آمده از روش فوق‌الذکر نکات زیر قابل توجه میباشد:

- (۱) دقت مناسب زمان بین هر دو فرم در روش دستگاه زمان‌سنج سیمی وجود دارد.
- (۲) با توجه به محل نصب پایه‌های سیم‌ها، دقت بالای اندازه‌گیری محل قرارگیری نوک ترک در روش دستگاه زمان‌سنج سیمی وجود دارد.
- (۳) دقت سرعت بدست آمده از روش دستگاه زمان‌سنج سیمی نسبت به روش دوربین سرعت بالا بیشتر است.

۴- نتیجه گیری و بحث :

این تحقیق به عنوان اولین بخش از یک سری تحقیقات برنامه‌ریزی شده با هدف اندازه‌گیری سرعت رشد نوک ترک بر روی لوله‌های خطوط انتقال و توزیع در صنایع مختلف میباشد. هدف این تحقیق، طراحی و ساخت مجموعه سازه آزمایش رشد سریع ترک در ابعاد آزمایشگاهی و سپس اندازه‌گیری سرعت رشد نوک ترک از طریق کاربرد دوربین سرعت بالا (۱۲۰۰ فریم بر ثانیه) و دستگاه زمان‌سنج سیمی میباشد. پس از طراحی و ساخت مجموعه سازه آزمایش، چهار رده آزمایش با تقسیم‌بندی رده پیش‌آزمایش با هدف بررسی قابلیت‌ها و بهینه‌سازی مجموعه سازه آزمایش و سه رده آزمایش با هدف اندازه‌گیری سرعت رشد نوک ترک و تاثیر عمق ترک اولیه انجام پذیرفت. نتایج بدست آمده برای سه رده آزمایش در جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به بررسی‌های به عمل آمده، تحقیقی به صورت مشابه برای محاسبه سرعت رشد ترک در لوله‌های آلومینیومی بدست نیامد و عمده فعالیت‌های انجام شده بر این فلز بر روی محاسبه مقدار CTOA و تاثیر ضخامت در این ویژگی میباشد.

جدول ۳ نتایج آزمایشات رشد سریع ترک برای سرعت رشد نوک

ترک با استفاده از روش فیلمبرداری با دوربین پر سرعت و دستگاه

زمان سنج سیمی

- "Prediction for Crack Propagation and Arrest of Shear Fracture in Ultra-High Pressure Natural Gas Pipelines" ISIJ International, Vol. 41 (2001), No. 4, pp. 381-388
- [7]. Izumi TAKEUCHI, Hiroyuki MAKINO, Shuji OKAGUCHI, Nobuaki TAKAHASHI, Akio YAMAMOTO "CRACK ARRESTABILITY OF HIGH-PRESSURE GAS PIPELINES BY X100 OR X120" 23rd World Gas Conference, Amsterdam 2006
- [8]. Hiroyuki MAKINO, Izumi TAKEUCHI, Masatoshi TSUKAMOTO and Yoshiaki KAWAGUCHI "Study on the Propagating Shear Fracture in High Strength Line Pipes by Partial-gas Burst Test" ISIJ International, Vol. 41 (2001), No. 7, pp. 788-794
- [9]. C. J. GREENSHIELDS, G. P. VENIZELOS AND A. IVANKOVIC "A FLUID - STRUCTURE MODEL FOR FAST BRITTLE FRACTURE IN PLASTIC PIPES" Journal of Fluids and Structures (2000) 14, 221-234
- [10]. Yoshiaki KAWAGUCHI, Izumi TAKEUCHI, Akira Masatoshi TSUKAMOTO, Yoshio SUMITOMO, YAMASHI TA, Yoshihiro NARA "Study on the Propagating Shear Fracture of Line Pipes by The Partial-gas Burst Test * Transactions ISIJ, Vol. 22, 1982 P 617-623
- [11] Melvine F. Kanninen & Carl H. Popelar "Advanced Fracture Mechanics" Oxford University Press 1985
- [12] P. E. O'Donoghue, M. F. Kanninen, C. P. Leung, G. Demofonti, S. Venzi "The development and validation of a dynamic fracture propagation model for gas transmission pipelines" International Journal of Pressure Vessels and Piping 70 (1997) 11-25