

تشخیص ترک های تنش سولفیدی (SSC) با استفاده از مدل سازی تکنیک آرایه فازی

مصطفی مردانی خراط*^۱، ابولفضل متشکر^۱، غلامرضا راشد^۲

^۱ کارشناس ارشد مهندسی بازرسی فنی، دانشگاه صنعت نفت

^۲ استادیار، گروه مهندسی بازرسی فنی، دانشگاه صنعت نفت

* نویسنده مسئول: mardani.kharat@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۴/۲۲

چکیده

اهمیت انرژی حاصل از نفت و گاز، سبب شده که همواره رفتار فولادهای مورد کاربرد در خطوط انتقال نفت و گاز، به ویژه فولادهای پر استحکام، مورد توجه کشورهای نفت خیز و صنعتی قرار گیرد. خطوط لوله به کارگیری شده در محیط های ترش، دچار انواع خوردگی، به خصوص تخریب های ناشی از تردی هیدروژنی می شوند. زمانی که سولفید در محیط سرویس دهی لوله موجود باشد، پدیده ترک خوردگی تنش سولفیدی (SSC) که از انواع متداول تردی هیدروژنی است، می تواند رخ دهد. ابعاد ریز و اثرات مخرب این نوع ترک ها سبب شده که تشخیص ترک های خوردگی هیدروژنی از اهمیت خاصی برخوردار شود. یکی از روش های نوین در تشخیص این نوع ترک ها استفاده از تکنیک آرایه فازی اولتراسونیک در آزمایش های غیر مخرب می باشد. در این مقاله، آزمون اولتراسونیک آرایه فازی با استفاده از روش اجزاء محدود مدل سازی شده و چگونگی رفتار امواج اولتراسونیک در برخورد با عیوب صفحه ای مورد بررسی قرار گرفته است. سپس آزمون آرایه فازی بر روی بلوکی از جنس فولاد کربنی دارای عیب مصنوعی صفحه ای و نمونه ای از جوش جناغی یک طرفه (۷ شکل) دارای ترک تنش سولفیدی، انجام شد. نتایج آزمایشگاهی آزمون آرایه فازی، با نتایج مدل سازی مطابقت داشت و نشان داد که مدل پیشنهاد شده، راهکاری مناسب برای تشخیص ترک تنش سولفیدی می باشد.

کلمات کلیدی: خوردگی سولفیدی، آرایه فازی، روش اجزاء محدود.

Detection of Sulfide Stress Cracks (SSC) with the Use of Modeling of Phased Array Technique

Mostafa Mardani Kharat *¹, Abolfazl Moteshakker¹, Gholamreza Rashed²

1. M. Sc. in Technical Inspection, University of Petroleum Industries
 2. Assistant professor, Technical Inspection Faculty, University of Petroleum Industries
- * Corresponding Author: mardani.kharat@yahoo.com

Submission: January 22, 2012 Acceptance: July 12, 2012

Abstract

The importance energy from the oil and gas that has caused the behavior of the steels used in oil and gas pipelines, especially high-strength steels, has been considered by oil-rich and industrial countries. The deployment pipelines in sour environments are more prone to corrosion, particularly destruction caused by hydrogen brittleness. The phenomenon of sulfide stress cracking (SSC) can occur when sulfide is present in the service pipe. Small dimensions and the destructive effects of this type of crack have made that detection of the hydrogen corrosion cracks is especially important. A new method for Detection of these type cracks is use of phased array ultrasonic technique. The finite element method is used for modeling the phased array technique in a two-dimensional geometry. Ultrasonic waves are generated in samples with slit and the interactions of waves with this discontinuity are monitored. Phase array tests were carried out on carbon steel blocks with slits and and a sample of the weld that have sulfide stress crack. To investigate reliability and efficacy of the proposed approach phased array numerical results are compared with the experimental results.

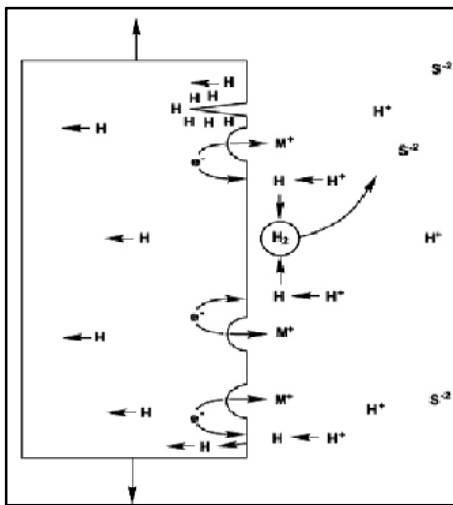
Keywords: Sulfide corrosion, Phased array, Finite element method.

۱- مقدمه

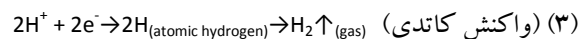
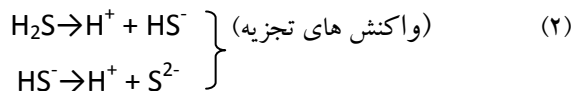
ترک خوردگی تنش سولفیدی^۱ از مهم ترین مشکلات ناشی از هیدروژن در فولادهای خطوط لوله انتقال نفت و گاز، حین سرویس دهی در محیط های ترش حاوی سولفید هیدروژن (H_2S) می باشد و سالیانه ده ها میلیون دلار برای تعویض و تعمیر این خطوط هزینه می شود [۲۰۱]. گسترش صنعت نفت و گاز، روش های جدید استخراج نفت و نیاز به عملکرد خطوط لوله در شرایط فشار بالا و محیط ترش، تمایل به استفاده از فولادهایی با استحکام تسلیم بالاتر، قابلیت جوشکاری بهتر و چقرمگی مناسب تر را افزایش داده است. این خواص با کنترل میزان ناخالصی ها، استفاده از عناصر آلیاژی مناسب، فرایندهای ترمومکانیکی ساخت لوله و استفاده از فرایند نورد کنترل شده به دست می آیند. فولادهای کم آلیاژ و پر استحکام^۲ به دلیل خواص مکانیکی مناسب، قابلیت جوشکاری و شکل پذیری، کاربرد وسیعی در صنایع نفت و گاز پیدا کرده اند. از دیگر مزایای مهم این فولادها می توان به وزن پایین، حذف عملیات پرهزینه مثل کوئنچ- تمپر و در نتیجه کاهش هزینه های ساخت اشاره کرد. این فولادها حاوی حدود ۰/۲ درصد کربن و کمتر از ۲ درصد عناصر آلیاژی می باشند. همچنین استحکام تسلیم آنها در محدوده ۲۷۵ - ۵۵۰ Mpa و استحکام کششی در حدود ۴۵۰ - ۶۵۰ Mpa است [۳۰۱]. پدیده ترک خوردگی تنش سولفیدی نوعی ترک خوردگی ترد است که در سطح مرطوب آلیاژهای حساس، در حضور H_2S رخ می دهد. فولادهای با استحکام بالاتر از ۵۵۰ Mpa و سختی بیشتر از ۲۲ HRC بیشترین حساسیت را به این پدیده دارند [۴-۶].

۱-۱- مکانیزم عملکرد هیدروژن در محیط ترش

مطابق شکل ۱، در اثر خوردگی سطح لوله فولادی در معرض محیط ترش، اتم های هیدروژن می توانند تولید شوند. هیدروژن اتمی، مطابق با واکنش های متداول ۱-۳، در محیط آبی حاوی H_2S تولید می شود [۷-۹].

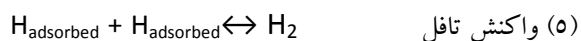


شکل ۱: شمایینک خوردگی سطح فولاد در محیط سولفیدی و ایجاد اتم هیدروژن [۷].

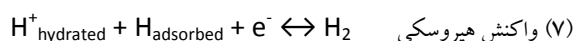
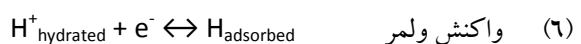


با این وجود، بسته به طبیعت فلز، دو مکانیزم مختلف برای احیای یون های هیدروژن وجود دارد [۱۰]:

الف) مکانیزم ولمر^۳ - تافل^۴ (احیای الکتروشیمیایی و پس از آن ترکیب مجدد شیمیایی):



ب) مکانیزم ولمر-هیروسکی^۵ (احیای الکتروشیمیایی و پس از آن ترکیب مجدد الکتروشیمیایی):



اتم های هیدروژن تمایل دارند برای تشکیل مولکول های گازی هیدروژن با هم ترکیب شوند. با این وجود، ترکیباتی

³ Volmer

⁴ Tafel

⁵ Heyrovsky

¹ Sulfide stress cracking (SSC)

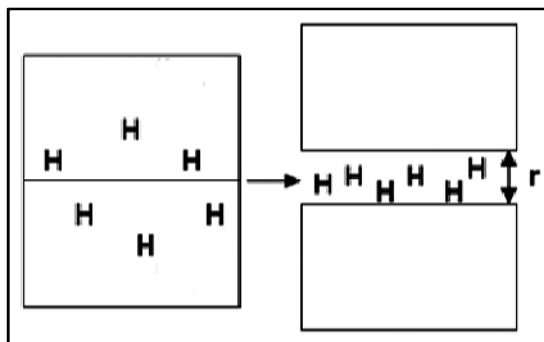
² High strength low alloy (HSLA)

که C ، x و t به ترتیب غلظت، فاصله نفوذ و زمان نفوذ است و D_{eff} ، ضریب نفوذ مؤثر و در بردارنده اثر موانع نفوذی می باشد [۱۰]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (۸)$$

مکانیزم های مختلفی برای اثر هیدروژن بر عملکرد و رفتار فلز در محیط های ترش بیان شده است که متأسفانه هیچ کدام به طور کامل نمی تواند این پدیده را توجیه کند. در ادامه دو مورد از معتبرترین و متداول ترین مکانیزم ها برای توجیه اثر هیدروژن بر رفتار فلز در محیط ترش آورده شده است [۱۰]:

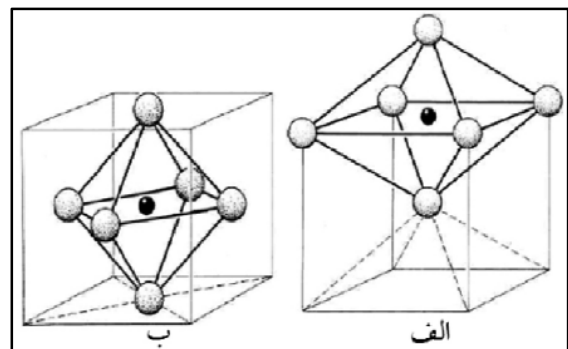
الف) تئوری تشدید ناپیوستگی (عدم چسبندگی) توسط هیدروژن (HEDE)^۲: مطابق با این تئوری که توسط تریانو^۳ ارائه شده است، هیدروژن موجود در داخل قطعه، نیروهای چسبندگی اتم های کریستال در امتداد صفحات کریستالوگرافی یا به عبارتی انرژی تشکیل سطح کلیواژ (شکست ترد) را کاهش می دهد (شکل ۳). این تئوری می تواند برای توجیه شکست بین دانه ای، در جایی که غلظت زیادی از اتم های هیدروژن در مرز دانه ها تجمع کرده اند، به کار رود. با این وجود، رفتار پلاستیسیته مشاهده شده همراه با برخی شکست ها، توسط این تئوری توجیه نمی شود [۱۰ و ۱۵].



شکل ۳: شماتیک تئوری تشدید ناپیوستگی (عدم چسبندگی) توسط هیدروژن (HEDE) [۱۰].

ب) تئوری افزایش موضعی پلاستیسیته توسط هیدروژن (HELP)^۴: این تئوری بیان می دارد که حضور هیدروژن در

مثل S^{2-} ، HS^- و H_2S مانع از ترکیب مجدد اتم های هیدروژن بر سطح فلز می شوند و نفوذ هیدروژن به داخل فلز را تسهیل می کنند. در مقابل وجود فیلم های اکسیدی بر سطح، موانعی برای جذب هیدروژن اتمی هستند [۱۳-۱۰]. بنابراین، مقداری از هیدروژن های اتمی به داخل فولاد نفوذ می کنند. اتم های هیدروژن نفوذ کرده در داخل فولاد، در مکان هایی مانند عیوب متالورژیکی و یا فصل مشترک بین آخال غیر فلزی و زمینه فولاد تجمع کرده و در آن محل گاز هیدروژن با فشار بالا تشکیل شده که سبب تمرکز تنش در آن مکان می شود. پس از آن، در صورتی که مقدار هیدروژن به مقدار بحرانی برسد، ترک می تواند ایجاد شود [۱۴]. این مکان های تجمع هیدروژن، عیوب متالورژیکی همچون آخال های غیرفلزی، رسوبات بزرگ و ریزساختارهای سخت موضعی هستند [۱۱]. همچنین، اتم هیدروژن دارای حجم کوچکی است و می تواند به راحتی در ماده نفوذ کرده و مطابق با شکل ۲، مکان های بین نشین اتمی را اشغال کند. هیدروژن بین نشین قابل برگشت است و در دمای اتاق می تواند به خارج از فلز نفوذ کند [۱۰].



شکل ۲: مکان های بین نشین اشغال شده توسط اتم هیدروژن؛ الف: ساختار کریستالی bcc، ب: ساختار کریستالی fcc [۱۰].

نیروی پیش برنده نفوذ اتم های هیدروژن در داخل فلز، شیب غلظتی هیدروژن می باشد. حضور موانع نفوذی مانند عیوب متالورژیکی و آخال، نفوذ هیدروژن را به تأخیر می اندازد. پدیده نفوذ بر اساس قانون فیک^۱ از رابطه (۸) پیروی می کند

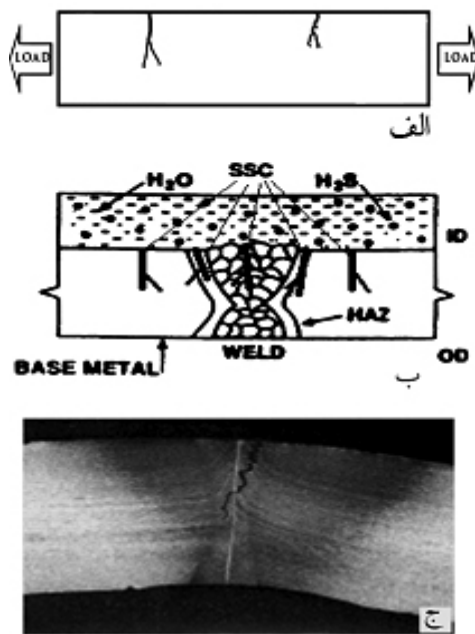
^۲ Hydrogen enhanced decohesion

^۳ Troiano

^۴ Hydrogen enhanced localized plasticity

^۱ Fick

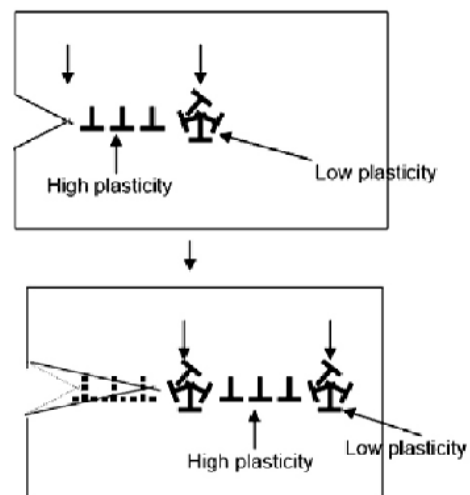
خط لوله همچون رطوبت، محصولات ترش و یا آب و خاک حاوی باکتری های احیا کننده سولفات می توانند سبب ترک خوردگی تنش سولفیدی در خطوط لوله، به ویژه در نقاط حساس و تحت تنش مانند مناطق جوشی شوند که این پدیده در شکل ۵ به صورت شماتیک نشان داده شده است [۱۷].



شکل ۵: الف) شماتیک ترک خوردگی تنش سولفیدی [۱۸]، ب) شماتیک ترک خوردگی تنش سولفیدی در یک اتصال جوشی، ج) نمایی واقعی از ترک تنش سولفیدی در فلز جوش [۱۷].

متغیرهای محیطی که ورود هیدروژن به داخل فولاد را افزایش می دهند، مانند pH پایین و فشار جزئی بالای H_2S ، تمایل به ترک خوردن را افزایش می دهند، زیرا این دو پارامتر بر نفوذ اتم های هیدروژن در فولاد اثرگذار می باشند. جوشکاری بر سطوح آلوده و چرب فلز پایه، استفاده از الکتروود جوشکاری آلوده به چربی یا مرطوب، قیود و طرح اتصال نامناسب که سبب ایجاد تنش در قطعه شده و نرخ سرد شدن بالا که سبب ایجاد ساختارهای حساس شده، سبب ترک خوردگی ناشی از هیدروژن می شود. نوع ریزساختار نیز بر پدیده تردی هیدروژنی و ترک خوردگی تنش سولفیدی تأثیرگذار است. مثلاً ساختار آستنیتی دارای حلالیت بالاتری برای هیدروژن نسبت به ساختار مارتنزیتی

محللول جامد، سبب کاهش بر هم کنش بین نابجایی ها، و بین نابجایی ها با دیگر موانع (اتم های کربن، مرزدانه) می شود، که این امر موجب افزایش تحرک نابجایی ها شده و در نتیجه سبب ایجاد مناطق با تغییر شکل موضعی زیاد می شود. هنگام حضور هیدروژن، نابجایی ها توانایی نزدیک تر شدن (فشرده شدن) به یکدیگر و به دیگر موانع را پیدا می کنند که سبب ایجاد تجمع نابجایی فشرده و متراکم می شود (شکل ۴). بنابراین مناطق میکروسکوپی با تغییر شکل زیاد (جایی که H، تحرک نابجایی ها را افزایش می دهد)، با مناطق با انعطاف پذیری کمتر (جایی که نابجایی ها بسیار متراکم هستند) احاطه شده اند. سپس تنش اعمالی بر این مناطق سخت که بخش کوچکی از مقطع عرضی هستند، متمرکز می شود. زمانی که تنش کششی در این مناطق کوچک از استحکام نهایی بیشتر می شود، شکست ماده رخ می دهد. این تئوری را «تئوری افزایش تنش سیلان» نیز می گویند که توسط بیچم^۱ ارائه شده است [۱۰ و ۱۶].



شکل ۴: شماتیک تئوری افزایش موضعی پلاستیسیته توسط هیدروژن (HELP) [۱۰].

۱-۲- عوامل مؤثر بر ترک خوردگی تنش سولفیدی

مطابق شکل ۵، مشاهده می شود که ترک خوردگی تنش سولفیدی، سبب ایجاد ترک های منفرد و صاف (بین دانه ای و میان دانه ای) در سازه می شود [۱]. عوامل داخلی یا خارجی

¹ Beachem

به طور کلی، کنترل هر یک از عوامل مؤثر بر ترک خوردگی تنش سولفیدی ذکر شده، می تواند در جلوگیری از این پدیده مخرب کارآمد باشد. ابعاد ریز و اثرات مخرب این نوع ترک ها سبب شده که تشخیص ترک های تنش سولفیدی، پیش از وقوع حادثه در صنایع مختلف به ویژه نفت، گاز و پتروشیمی دارای اهمیت باشد. آزمون اولتراسونیک و رادیو گرافی از جمله روش های پر کاربرد در آزمایش های مخرب برای بازرسی می باشند، اما به خاطر ویژگی های آزمون اولتراسونیک این آزمون عملکرد بهتری نسبت به رادیوگرافی در تشخیص عیوب صفحه ای دارد. امروزه آزمون غیر مخرب اولتراسونیک و تکنیک آرایه فازی به دلیل ویژگی هایی نظیر قابل اجرا بودن در شرایط مختلف، سرعت بالای انجام آزمون و همچنین توانایی ارائه نتایج تصویری مختلف، جایگاه ویژه ای در آزمایش های غیرمخرب، جهت تشخیص ترک پیدا کرده است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق، آزمون اولتراسونیک آرایه فازی^۱ با استفاده از روش اجزاء محدود^۲ مدل سازی شده و چگونگی رفتار امواج اولتراسونیک در برخورد با عیوب صفحه ای مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه آزمون آرایه فازی بر روی بلوکی از جنس فولاد کربنی دارای عیب صفحه ای مصنوعی و نمونه ای از جوش جناغی (۷ شکل) دارای عیب ترک تنش سولفیدی، انجام شده است و نتایج به دست آمده از روش آزمایشگاهی با روش شبیه سازی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. ترانسدیوسرهای آرایه فازی از شبکه ای از المان های پیزوالکتریک مجزا با ساختار کامپوزیتی تشکیل می شوند. اساس عملکرد ترانسدیوسرهای آرایه فازی، کنترل مستقل فعالیت هر یک از المان های پیزوالکتریک شبکه، با تأخیر فازی متفاوت نسبت به سایر المان های موجود در شبکه، در ارسال و دریافت امواج اولتراسونیک است [۲۱]. عملکرد و فاز تحریک هر المان، نسبت به سایر المان های شبکه فازی،

است. بنابراین ساختار مارتزیتی حساسیت بیشتری برای ترک خوردگی تنش سولفیدی دارد [۱۹ و ۲۰]. اثر تنش بر پدیده ترک خوردگی تنش سولفیدی به این صورت است که با کاهش تنش اعمالی برای هر نوع ریزساختار، زمان شکست افزایش می یابد. فاکتور شدت تنش آستانه (K_{IH}) مطابق با رابطه (۹) می باشد [۷]:

$$K_{IH} = F \left(\frac{a}{W} \right) \sigma_{cr} (\text{Pa})^{1/2} \quad (9)$$

$$F \left(\frac{a}{W} \right) = 1.12 - 0.23 \left(\frac{a}{W} \right) + 10.6 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 21.7 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 30.4 \left(\frac{a}{W} \right)^4$$

در رابطه (۹)، a ، W و σ_{cr} به ترتیب عمق ترک، عرض نمونه و تنش اعمالی بحرانی می باشند. K_{IH} بالاتر، مقاومت به ترک خوردگی تنش سولفیدی بهتری دارد. هیدروژن نیز می تواند تحت شیب تنش، به سمت مکان های با تنش بالا نفوذ کند و نفوذ هیدروژن مستقیماً مرتبط با تنش اعمالی در نمونه ها باشد. تحت شرایط وجود تنش، غلظت هیدروژن بحرانی مطابق با رابطه (۱۰) می باشد [۶]:

$$C_H = C_0 \exp \left(\frac{\sigma_H V_H}{RT} \right) \quad (10)$$

C_H ، C_0 ، σ_H ، V_H ، R و T به ترتیب غلظت بحرانی هیدروژن، غلظت متوسط هیدروژن، تنش هیدرواستاتیک، حجم مولی جزئی هیدروژن، ثابت گازها و دما می باشند. مطابق با رابطه (۱۰) زمانی که غلظت هیدروژن به مقدار بحرانی می رسد، ترک خوردگی تنش سولفیدی رخ می دهد. در مکان هایی نظیر نوک ریشه ترک، حداکثر تنش کششی سه محوری وجود دارد، که اغلب در آن مکان غلظت هیدروژن، به مقدار بحرانی می رسد. همچنین، نابعایی ها مکان های مناسبی برای تجمع اتم های هیدروژن هستند. عناصری همچون نیویوم، وانادیوم و تیتانیوم سبب ایجاد کربونترید ها و قفل کردن نابعایی ها می شوند. این نوع مانع گذاری، سبب می شود که مقدار هیدروژن با تأخیر بیشتری به مقدار بحرانی برسد که این امر مقاومت به ترک خوردگی تنش سولفیدی را افزایش می دهد [۶]. عملیات حرارتی پس از جوشکاری سبب می شود که فرایند نفوذ هیدروژن سریع تر انجام شود و هیدروژن از قطعه خارج شده و غلظت آن در قطعه پایین آید.

¹ Phased array

² Finite element method

عیوب موجود در قطعه بر روی امواج اولتراسونیک، در پدیده‌های پراش و بازتابش امواج بررسی شده است. برای المانبندی مسئله، از المان دو بعدی چهار گرهی کرنش صفحه‌ای CPE4R استفاده شده است که با توجه به طول موج امواج منتشر شده در قطعه (λ)، ابعاد المان ها به منظور پایداری نتایج مدل سازی و همچنین هم‌گرایی پاسخ ها، رابطه زیر را ارضاء می نماید [۲۴]:

$$\frac{\lambda}{20} < h < \frac{\lambda}{8} \quad (11)$$

به طوری که در این رابطه h ، ابعاد المان‌های مورد استفاده و λ طول موج امواج منتشر شده در قطعه است که به صورت تابعی از فرکانس و سرعت امواج تولید شده تعریف می‌شود. مدل کردن ترنسدیوسرهای آرایه فازی شامل دو بخش مدل کردن صفحه تحریک ناشی از المان‌های پیزو کامپوزیتی ترنسدیوسر و همچنین مدل سازی کفشک^۱ و قوانین تأخیر مورد استفاده در آزمون آرایه فازی است. در حالت کلی، تحریک ناشی از ارتعاش صفحات پیزوالکتریک را می‌توان با استفاده از دو روش بارگذاری نیرویی و یا جابجایی مدل‌سازی نمود. در این تحقیق، مدل سازی تحریک ناشی از ترنسدیوسر بر اساس معادله (۱۲) و با استفاده از اعمال یک پالس نیرویی در دو سیکل و با فرکانس مرکزی ۵ MHz بر روی سطح قطعه انجام می‌شود [۲۵ و ۲۶].

$$F(t) = \begin{cases} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f}{N}\right)\right] \cos(2\pi f t), & 0 < f < \frac{N}{f} \\ 0.0, & \text{غیره} \end{cases} \quad (12)$$

در این معادله f فرکانس ترنسدیوسر و N تعداد سیکل‌های پالس اعمالی است.

در ترنسدیوسرهای آرایه فازی برخلاف ترنسدیوسرهای متداول اولتراسونیک که تابش امواج زاویه‌ای در آنها عمدتاً با استفاده از کفشک انجام می‌شود، روبش زاویه‌ای را می‌توان بدون طراحی از کفشک، با اعمال قوانین تأخیر مشخص برای هریک از المان‌های ترنسدیوسر، طوری اعمال نمود که پالس‌های نیرویی با استفاده از اصل هویگنس^۲ بر اساس یک تأخیر زمانی یکسان بر هر یک از نقاط گرهی

توسط یک پردازش گر اصلی کنترل می‌شود. استفاده از یک پردازش گر برای تولید و دریافت امواج اولتراسونیک توسط یک ترنسدیوسر آرایه فازی، امکان برنامه ریزی و کنترل شرایط تولید و دریافت موج را برای هر المان ترنسدیوسر به صورت جداگانه فراهم می‌کند که این امر قابلیت‌های ویژه و منحصر به فردی نظیر تولید امواج اولتراسونیک با زوایای مختلف، روبش الکترونیکی، تمرکز عمقی و تمرکز عمقی دینامیکی را برای این ترنسدیوسرها به وجود می‌آورد [۲۲ و ۲۳]. استفاده از روش‌های عددی در مدل سازی و شبیه‌سازی انتشار امواج اولتراسونیک تولید شده توسط ترنسدیوسرهای آرایه فازی، یکی از روش‌هایی است که امکان پیش‌بینی رفتار امواج، تفسیر نتایج به دست آمده و همچنین امکان طراحی بهینه آزمون را فراهم می‌نماید.

در این تحقیق، مدل سازی عددی انتشار امواج اولتراسونیک تولید شده توسط ترنسدیوسرهای آرایه فازی، با استفاده از روش المان محدود در محیط نرم افزار ABAQUS مدل‌سازی شده و چگونگی رفتار این امواج در برخورد با عیوب صفحه‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. سپس با انجام آزمون اولتراسونیک آرایه فازی بر روی بلوکی از جنس فولاد کربنی دارای عیب مصنوعی صفحه‌ای و نمونه‌ای از جوش جناغی یک طرفه (۷ شکل) دارای ترک تنش سولفیدی به صورت آزمایشگاهی انجام شده و نتایج حاصل از مدل سازی عددی و آزمون آرایه فازی آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شد. سپس چگونگی رفتار امواج اولتراسونیک تولید شده در آزمون آرایه فازی به منظور ارائه یک روش بهینه برای تشخیص ترک تنش سولفیدی در آزمون‌های غیرمخرب مورد مطالعه قرار گرفت.

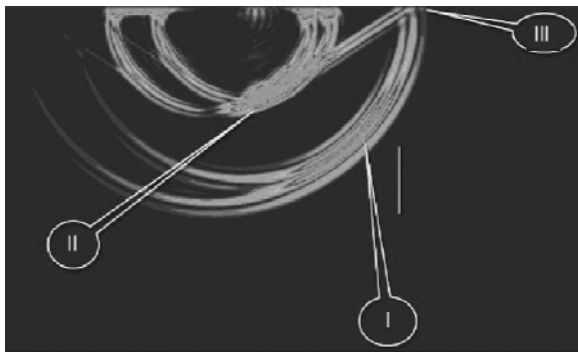
۱-۲- مدل سازی آزمون آرایه فازی با استفاده از روش المان محدود

در این بخش، به تشریح چگونگی مدل سازی انتشار امواج اولتراسونیک تولید شده توسط یک ترنسدیوسر آرایه فازی با استفاده از نرم افزار ABAQUS پرداخته شده و تأثیر متقابل

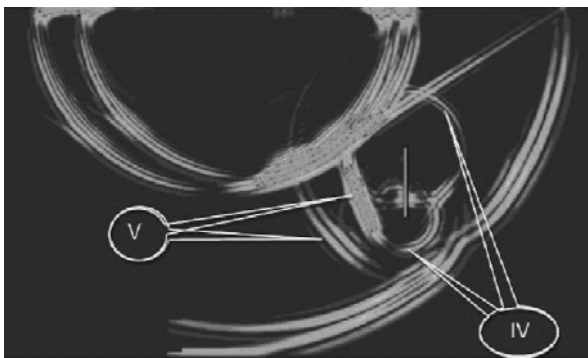
¹ Shoe

² Huyghen

داده شده است. همان گونه در شکل (۷) مشاهده می شود پس از برخورد امواج تابشی با زاویه های معین، دو دسته موج پراکندگی (V) از دو انتهای شیار منتشر می شود. در این شکل همچنین امواج تولید شده پس از برخورد موج طولی با شیار که به دلیل پدیده تبدیل مود به صورت دو موج طولی و عرضی در قطعه منتشر می شوند، قابل مشاهده است.



شکل ۶: ایجاد امواج طولی (I) و امواج عرضی (III) و امواج سطحی (III) در مدل.



شکل ۷: امواج پراکندگی پراش (IV) تولید شده از لبه های بالایی و پائینی شیار و امواج بازتابش ناشی از پدیده تبدیل مد (V).

۳-۲- نتایج آزمایشگاهی آزمون اولتراسونیک آرایه فازی

به منظور بررسی نتایج عددی حاصل از تحلیل های المان محدود انجام شده در بخش قبل، از یک دستگاه اولتراسونیک آرایه فازی مطابق شکل (۸) که دارای ۶۴ کانال از شرکت M2M و یک ترنسدیوسر آرایه فازی ۵ MHz با پهناى المان ۱۰mm، فاصله مرکز تا مرکز دو المان متوالی

مربوطه بر روی سطح قطعه اعمال شوند [۲۷] که این تاخیر زمانی با استفاده از معادله (۱۳) به دست می آید.

$$\Delta t = \frac{d \sin \theta_s}{c} \quad (13)$$

در این معادله Δt تاخیر زمانی بین دو المان متوالی، d فاصله میان المانها، θ_s زاویه روبش مطلوب و c سرعت موج در قطعه مورد آزمون است.

۳- نتایج و بحث

در این بخش به بررسی و مطالعه نتایج مدل سازی عددی و آزمایشگاهی پرداخته شده است. تحلیل نتایج مدل، با استفاده از روش تحلیل صریح^۱ انجام شده و خروجی های مدل، بر اساس مقادیر جایجایی گرهی ارائه شده است. نتایج آزمایشگاهی با انجام آزمون آرایه فازی بر روی بلوکی از جنس فولاد کربنی دارای عیب مصنوعی صفحه ای و نمونه جوش جناغی یک طرفه (۷ شکل) دارای ترک تنش سولفیدی انجام شد.

۳-۱- نتایج عددی

در این مقاله به منظور مطالعه تأثیر تابش امواج بر یک عیب صفحه ای، فرایند مدلاسیون در دو بعد و بر روی یک صفحه با ابعاد ۳۰۰×۵۰mm حاوی یک شیار به ارتفاع ۱۰mm و ضخامت ۰/۷mm در قسمت میانی صفحه، مدل سازی شده است. در این مدل، تحریک ترنسدیوسر و کفشک با استفاده از قانون اسنل^۲ [۲۸] به گونه ای اعمال شده است که امواج طولی (I) با زاویه ۴۵° و امواج عرضی (II) با زاویه ۲۲/۵° در قطعه تولید گردد. همان طور که در شکل (۶) ملاحظه می شود علاوه بر امواج طولی و عرضی، امواج سطحی (III) نیز به وجود می آیند. امواج پراکندگی پراش^۳ (IV) تولید شده از لبه های بالا و پائین شیار و امواج بازتابش ناشی از پدیده تبدیل حالت یا مد^۴ (IV) امواج طولی و عرضی در این تحلیل، پس از برخورد امواج تابشی با شیار در شکل (۷) نشان

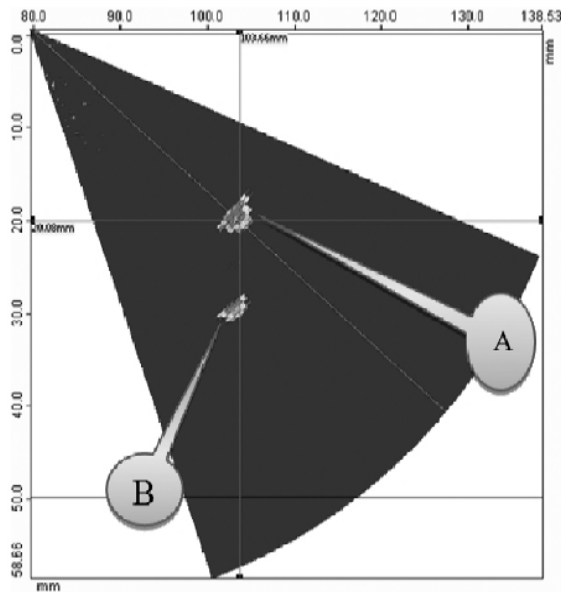
¹ Explicit

² Snell's law

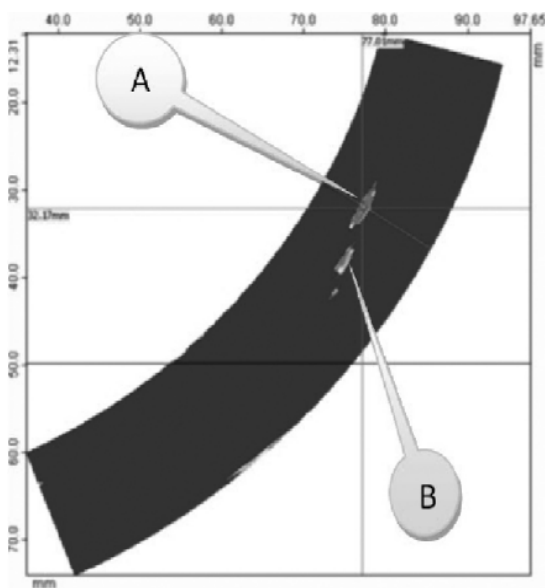
³ Diffracted wave

⁴ Mode conversion

حاصل از تحلیل المان محدود ارائه شده در شکل (۷) مطابقت می کند. آزمایش دیگر بر روی منطقه جوش دارای ترک تنش سولفیدی، انجام شده است که جنس فلز پایه فولاد پر استحکام-کم آلیاژ (API 5L X70) و فرایند جوشکاری الکتروود دستی SMAW^۲ می باشد.



شکل ۹: تصویر روبش قطاعی بلوک دارای عیب صفحه ای.



شکل (۱۰): تصویر روبش قطاعی از جوش دارای ترک.

۰/۶ mm ، فاصله بین المان ها برابر ۰/۱ mm و طول فعال ۳۸/۳ mm استفاده می شود.

با استفاده از این تجهیزات، آزمون اولتراسونیک آرایه فازی بر روی بلوکی از جنس فولاد کربنی با مشخصات مشابه مدل طراحی در تحلیل فوق، که با ابعاد ۳۰۰×۵۰×۵۰ mm حاوی یک شیار به ارتفاع ۱۰ mm و ضخامت ۰/۷ mm در قسمت میانی بلوک انجام شده است. تصویر روبش قطاعی^۱ بلوک دارای شیار در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۸: تصاویر دستگاه آرایه فازی، رایانه، پراب و کفشک.

همان گونه که مشاهده می شود در این تصویر نشانه های مربوط به امواج پراکندگی (پراش) ناشی از لبه بالایی (A) و لبه پایینی شیار (B)، تقریباً به صورت هم فاز و فقط با اختلاف فاصله ای به دلیل تفاوت در فاصله طی شده توسط این امواج از لبه های شیار تا نقطه دریافت موج توسط ترانسدیوسر دیده می شود، به طوری که طول عمودی شیار را می توان با توجه به فاصله این دو نشانه اندازه گیری و محاسبه نمود. ملاحظه می شود که نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج عددی

² Shield metal arc welding

¹ Sectorial scan

(FEM) انتشار امواج اولتراسونیک تولید شده توسط ترنسدیوسرهای آرایه فازی و تاثیر متقابل این امواج در برخورد با عیب صفحه ای مدل سازی شده است. مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی های عددی و نتایج حاصل از آزمون های اولتراسونیک آزمایشگاهی مربوطه بیانگر مطابقت نتایج عددی و آزمایشگاهی و صحت مدل سازی های انجام شده است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی به دست آمده از بلوک دارای عیب مصنوعی و نمونه ای از جوش جناغی دارای ترک تنش سولفیدی، نشان می دهد که در این قطعات، نشانه های مربوط به امواج پراکنشی (پراش) ناشی از لبه بالایی و لبه پایینی شیار، تقریباً به صورت هم فاز و فقط با اختلاف فاصله ای به دلیل تفاوت در فاصله طی شده توسط این امواج از لبه های شیار تا نقطه دریافت موج توسط ترنسدیوسر دیده می شود.

با توجه به نتایج عددی حاصل از تحلیل های المان محدود که از بررسی چگونگی انتشار و رفتار امواج اولتراسونیک بعد از برخورد با عیوب صفحه ای، به دست آمده است، با ایجاد زاویه و تمرکز مناسب باید در تصاویر روبش قطاعی نشانه هایی از موج پراش یافته شود. در شکل (۱۰) تصویر روبش قطاعی جوش دارای عیوب ترک تنش سولفیدی مشاهده می شود. در این تصویر سیگنال های پراش به وجود آمده از برخورد امواج اولتراسونیک با ترک مشاهده می شود. نشانه ایجاد موج پراش از نوک بالایی ترک (A) و نوک پایینی ترک (B) در این شکل مشاهده می شود.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، با توجه به حساس و خطرناک بودن ترک های هیدروژنی به معرفی یکی از روش های نوین در تشخیص این ترک ها پرداخته شده است. با استفاده از روش اجزاء محدود

مراجع

1. Ramirez E. " Effect of Microstructure on The Sulphide Stress Cracking Susceptibility of a High Strength Pipeline Steel", Corrosion Science 50,(2008),PP.3534-3541.
2. NACE International, 'Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for Oilfield Equipment', NACE International, Houston, TX, 2002.
3. F.J.Winsor, " Welding Of Low Alloy Steel " , Welding Vol 6 ASM, 1995.
4. Mioara Elvira Stroe, " Hydrogen Embrittlement Of Ferrous Materials " , 2006 , Belgium
5. T.V.Bruno,B.D.Crag,J.H.McHaney, " Welding Structure For Sour Service" .
6. Ming-Chun Z. " Effect Of Applied Stress and Microstructure On Sulfide Stress Cracking Resistance Of Pipeline Steels Subject to Hydrogen Sulfide " , materials Science and Engineering,(2008), A478, pp.43-47.
7. M.Adams, "Sulfide stress cracking and the commercial application of NACE MR0175-84", printed in the U.S.A./8-99, (1999).
8. Wan Keun Kim,Seong Ung Koh,Boo Young Yang,Kyoo Young Kim," Effect Of Environmental and Metallurgical Factors On Hydrogen Induced Crackig Of HSLA Steels, Corrosion Science,2008,50,pp.3336-3342 .
9. NACE committee, 'Review of Published Literature on Wet H2S Cracking of Steels through' 1989, 2003.
10. Mioara E. S. " Hydrogen Embrittlement Of Ferrous Materials " , (2006), Belgium.
11. J.L. Gonzalez, R. Ramirez, J.M. Hallen, R.A. Guzman, 'Corrosion' 53 (1997) 935.
12. A. Kawashima, K. Hashimoto, S. Shimodaira, 'Corrosion' 32 (1976) 321.
13. Z.A. Lofa, F.L. Kam, Prot. 'Met'. 20 (1974) 12.
14. H.Y. Liou, R.I. Shieh, F.I. Wei, S.C. Wang, Corrosion 49 (1993) 389.
15. A.R.Troiano, " Trans ASM" 52(1960),54 .

16. Beachem .C.D.,Metal."Trans" ,3.437(1972).
17. Bruno T.V." SSC Resistance of Pipeline Welds", Metallurgical consultants,(1988).
18. T.V.Bruno,B.D.Crag,J.H.McHaney," Welding StructureFor Sour Service" .
19. M. Kimura, Y. Miyata, Y. Yamane, T. Toyooka, Y. Nakano, F. Murase, 'Corrosion' 55 (1999) 756.
20. Y. Inohara, N. Ishikawa, S. Endo, in: 'Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference', Honolulu Hawaii, May 25–30, 2003, p. 60.
21. R/D Tech Inc, 'Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications, first edition', 2004.
22. Waltham,' Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications', Olympus NDT, 2007.
23. Vincent Lupien, "Principles of Phased Array Ultrasound for Nondestructive Testing", Materials Evaluation, pp 24-32, January, 2007.
24. R. J. Blake, "Numerical Modeling of Rayleigh Wave Scattering from Surface Features", PhD Dissertation, Department of Electronic and Electrical Engineering, University of London, London, 1988.
25. G. Baskaran, C. Lakshmana Rao and K Balasubramaniam, "Simulation of the TOFD Technique Using the Finite Element Method", 2007.
26. F. Honarvar and S. Khorasani, "Simulation of Time-of-Flight Diffraction (ToFD) Technique by Finite Element Method", September, 2010.
27. L. Azar, Y. Shi, S. C. Wooh, "Beam Focusing Behavior of Linear Phased Arrays", NDT & E International, 33, pp 189 – 198, 1999.
28. W. Spaulding and G. C. Wheeler, "ASNT Level II Study Guide Ultrasonic Testing Method", Second Edition, 2002.