مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 231-240

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی بر روی شناسایی خوردگی در لوله‌های بتنی پیش‌تنیده با استفاده از روش نشرآوایی

رضا گلداران[1]، محمدعلی لطف‌الهی یقین[2*]، محمدحسین امین‌فر[3]، آحمت تورر[4]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

2- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

3- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

4- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه میدل ایست، آنکارا، ترکیه

* تبریز، صندوق پستی 5166616471، lotfollahi@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 06 تیر 1395

پذیرش: 15 تیر 1396

ارائه در سایت: 20 مرداد 1396

کلید واژگان:

نشر آوایی

لوله پیش تنیده

رفتارسنجی سلامت

خوردگی تسریع شده

شناسایی خرابی

چکیده

عمده‌ترین نقاط ضعف لوله‌های بتنی پیش‌تنیده، خوردگی میلگردهای دورپیچ می‌باشد که در صورت عدم تشخیص به‌موقع موجب خرابی و شکست ناگهانی گشته و خسارت‌های فاجعه باری را به دنبال خواهد داشت. در حال حاضر این نوع لوله‌ها در کشور ایران تولید و به‌کار گرفته می‌شوند که پدیده شکست ناشی از خوردگی نیز تجربه شده است. در کار آزمایشگاهی حاضر از پایش بوسیله نشر آوایی برای ارزیابی خوردگی استفاده شده است. یک نمونه آزمایشگاهی لوله بتنی پیش‌تنیده نزدیک به مقیاس واقعی در آزمایشگاه دانشکده سازه دانشگاه میدل ایست ساخته شده و تحت بارگذاری ناشی از فشار آب داخل لوله قرار گرفته سپس خوردگی تسریع شده به نمونه اعمال و سیگنال‌های فراصوتی حاصله در طول زمان خوردگی با استفاده از حس‌گرهای پیزوالکتریک ثبت گردیده است. نمونه در طول آزمایش چندین بار تحت تر و خشک شدن قرار گرفته که نرخ فشار داخل لوله به منظور شناسایی خوردگی در حالت‌های تر و خشک در حال نوسان بوده و اثر کایزر نیز در حالت‌های مختلف بررسی گردیده است. نتایج آزمایشگاهی نشان‌دهنده آن است، لحظه‌ای که در طول زمان خوردگی فشار داخل لوله به بیش از فشار کاری لوله افزایش داده می‌شود تغییرات قابل توجهی در برخی پارامترهای نشر آوایی به‌وجود می‌آید که با استفاده از آن‌ها می‌توان پدیده خوردگی و خرابی را شناسایی کرد.

Experimental study on corrosion detection of pre-stressed concrete pipe using Acoustic Emission method

Reza Goldaran[1], Mohamad Ali Lotfollahi Yaghin[1*], Mohammad Hossein Aminfar[1], Ahmet Turer[2]

1- Department of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

2- Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey

* P.O.B. 5166616471, Tabriz, Iran, lotfollahi@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 27 June 2017
Accepted 06 July 2017
Available Online 11 August 2017

Keywords:
Acoustic Emission
Pre-stressed Pipe
Health Monitoring
Accelerated Corrosion
Damage Detection

ABSTRACT

Corrosion in spiral steel prestressed wires tensioned around a core is one of the major weaknesses of prestressed concrete pipes which can cause sudden failure and damages due to their untimely detection. To date, these kinds of pipes are used and produced in Iran and their abrupt failure due to corrosion has been experienced. In this study acoustic emission (AE) monitoring in prestressed concrete was used to investigate the corrosion. An approximately full-scale experimental sample pipe was made in the laboratory of Middle East Technical University. The pipe is loaded by internal water pressure and accelerated corrosion is applied to the sample, the resulted acoustic emission signals are recorded using piezoelectric sensors during corrosion. The sample is tested under wetting and drying cycles frequently for corrosion detection; during the experiment the pipe inside pressure fluctuated and Kaiser Effect was studied in different conditions. Experimental results show significant changes in some gained acoustic emission parameters as the pipe work pressure increases to higher amounts. It is shown that the changed AE parameters can be used for damage prediction, condition assessment and corrosion detection of prestressed concrete pipelines.

1- مقدمه

بتن پیش‌تنیده در سازه‌هایی مانند پل‌ها، ساختمان‌ها، لوله‌های بتنی، مخازن تحت فشار، سدها، پوسته‌های محافظ راکتورهای هسته‌ای، تراورس‌های راه آهن و شمع‌ها برای جبران مقاومت کششی پایین بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترک‌های کششی در این‌گونه سازه‌ها به دلیل پیش‌تنیده بودن تحت بارهای بهره‌برداری به حداقل مقدار خود می‌رسد. مقاومت فولاد به‌کار رفته در

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

R. Goldaran, M. A. Lotfollahi Yaghin, M. H. Aminfar, A. Turer, Experimental study on corrosion detection of pre-stressed concrete pipe using Acoustic Emission method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 231-240, 2017 (in Persian)

این‌گونه سازه‌ها معمولاً چهار تا پنج برابر فولاد معمولی می‌باشد. مزایای عمده سازه‌های مذکور مقاومت بالا، سبکی و عدم وجود مشکل ترک می‌باشد [1].

بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد دلیل خرابی لوله‌های بتنی پیش‌تنیده پدیده خوردگی بوده که در مدت زمان نسبتاً کوتاهی بعد از دوره ساخت به‌وقوع می‌پیوندد. بتن محصورکننده میلگردها در سازه‌های بتنی شرایطی را مهیا می‌سازد که سازه بتواند بیشتر از 50 سال عمر مفید داشته باشد [2] ، با این وجود عمر این‌گونه سازه‌ها به دلیل خوردگی میلگردها که در اثر حملات یون کلر و پدیده کربناسیون اتفاق می‌افتد بسیار کاهش می‌یابد [3].

طول کل لوله‌های بتنی پیش‌تنیده در آمریکای شمالی که از آن‌ها برای انتقال آب آشامیدنی تحت فشار و همچنین فاضلاب استفاده شده است مازاد بر 35000 کیلومتر می‌رسد که عمر بسیاری از آن‌ها بالغ بر 50 سال می‌باشد [4]، همچنین در حدود 4000 متر لوله بتنی پیش‌تنیده (PCCP[1]) با قطر داخلی 4 متر در پروژه GMMR[2] لیبی برای انتقال آب در صحرای ساهارا به مناطق ساحلی استفاده شده است [5]. علاوه بر آن از این لوله‌ها در سال‌های اخیر به طور گسترده در پروژه انتقال آب از شمال به جنوب چین استفاده شده است [6].

اگرچه عوامل بسیاری می‌تواند بر انسجام سازه لوله تأثیر گذاشته و باعث شکست و خرابی گردد ولی در این میان اصلی‌ترین عوامل در این نوع لوله‌ها خوردگی، تردی هیدروژنی، فشار داخلی و خارجی بیش ازحد می‌باشد [8,7]. در کشور ایران در یکی از خطوط انتقال آب شرب 110 کیلومتر لوله بتنی پیش‌تنیده مسلح با قطر 2000 میلی‌متر به‌کار رفته که پس از مدت نه چندان طولانی از آغاز بهره‌برداری ترکیدگی‌هایی به علت خوردگی رخ داده و موجب خسارت شده است. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع، تبعات ناگوار خرابی و ملاحظات اقتصادی، پایش مستمر این‌گونه سازه‌ها به خصوص در جاهایی که لوله در زیر زمین مدفون بوده و قابل رویت نمی‌باشد یکی از موارد اجتناب ناپذیر است.

برای شناسایی خرابی در کار آزمایشگاهی حاضر مدل فیزیکی لوله پیش‌تنیده در مقیاس آزمایشگاهی که نزدیک به مقیاس واقعی می‌باشد با استفاده از الگوی کارخانه تولید لوله‌های پیش‌تنیده متعلق به شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان‌شرقی ساخته شده و تحت شرایط خوردگی تسریع شده قرار گرفته است، همزمان با اعمال پدیده خوردگی، لوله تحت بارگذاری و باربرداری فشار آب داخل لوله قرار گرفته و سیگنال‌های ناشی از تأثیر هریک از آن‌ها با گذشت زمان توسط سیستم نشر آوایی[3] رفتارسنجی و ثبت شده و سپس پارامترهای مختلف نشر آوایی مورد تحلیل قرار گرفته است، نتایج حاصله نشان‌دهنده این واقعیت است که روش مذکور در عمل برای رفتارسنجی لوله‌های پیش‌تنیده می‌تواند بسیار کارا و موثر واقع شود. این روش در اکثر کشورهای پیشرفته دنیا در صنایع مختلف برای شناسایی خرابی انواع سازه‌ها به‌خصوص در مورد کامپوزیت‌ها در حال توسعه بوده و با توجه به این‌که در روش مذکور سیگنال‌های فراصوتی ثبت شده ناشی از انرژی، خود شکست و خرابی می‌باشد لذا مهم‌ترین مزیت آن شناسایی بصورت زمان واقعی[4] و مستمر بوده که می‌تواند به‌صورت آن‌لاین نیز صورت پذیرد.

2- مبانی خوردگی در بتن

یکی از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده بتن سیمان‌پرتلند بوده که در اثر ترکیب با آب هیدراته شده و ماده‌ای را به‌وجود می‌آورد که اجزای دیگر مثل شن و ماسه را محکم به‌هم پیوند داده و نتیجه این ترکیب یک ماده قوی و مقاوم متخلخل می‌باشد. در فرآیند هیدراتاسیون قلیایی‌های بتن که به‌صورت هیدروکسید کلسیم و مقدار کمی هیدروکسیدهای سدیم و پتاسیم می‌باشند تولید می‌شوند. در بتن‌های معمولی PH اغلب مابین 12.5 و 13.5 بوده که نشان دهنده قلیاییت بالا می‌باشد.

میلگرد داخل بتن بوسیله قلیاییت بالایی‌که در بتن وجود دارد با یک لایه محافظ غیرفعال و غیر قابل حل در آب که محیط اطراف میلگرد را در بر می‌گیرد در برابر خوردگی محافظت می‌شود. این لایه محافظ در اثر تأثیر عوامل خارجی که قلیاییت بتن را کاهش می‌دهد از بین رفته و فیلم اکسیدی به شکل یک محلول در آمده سپس پدیده خوردگی اتفاق می‌افتد. از بین رفتن قلیاییت بتن در اثر پدیده کربناسیون اتفاق افتاده سپس یونهای مهاجم نظیر کلراید به فیلم اکسیدی حمله کرده و آن را از بین می‌برند [9].

خوردگی فلز دو ظرفیتی M در یک محلول آبی در شکل شماره 1 نشان داده شده است. فرآیند خوردگی شامل یک واکنش آندی و یک واکنش کاتدی بوده که در واکنش آندی (اکسیداسیون) فلز حل شده و به صورت یون‌های M^{2+} وارد محلول می‌شود. واکنش کاتدی احیای اکسیژن می‌باشد. الکترون‌هایی که توسط واکنش آندی آزاد شده‌اند از طریق فلز به قسمت کاتدی هدایت شده تا در آنجا مصرف شوند. شرط لازم برای این فرآیند وجود الکترولیت در محیط بوده و می‌بایست با فلز در تماس باشد. این فرآیند انحلال را خوردگی تر نامیده و مکانیزم آن الکتروشیمیایی است.

همان‌طور که در شکل 1 نمایان است یون‌های فلزی M^{2+} به سمت یون‌های OH^- منتقل شده و با یکدیگر تشکیل هیدروکسید فلز داده که بر روی سطح فلز رسوب کرده و فیلم سطحی فشرده و پیوسته‌ای را نزدیک به ساختار کریستالوگرافی فلز تشکیل می‌دهند [10].

3- آزمون غیر مخرب (NDT) در شناسایی خوردگی

اخیراً روش‌های متعددی به منظور رفتارسنجی خوردگی در سازه‌های بتنی مسلح استفاده می‌شود که در 6 گروه عمده زیر تقسیم بندی می‌شوند.

بازرسی عینی[5]، روش‌های الکتروشیمیایی[6]، روش‌های امواج الاستیک[7]، روش‌های الکترومغناطیسی[8]، روش‌های حس‌گرهای نوری[9] و روش گرمانگاری زیر سرخ[10] [11].

سه روش عمده شناسایی بوسیله آزمون غیر مخرب که بر مبنای امواج الاستیک عمل می‌کنند عبارتند از روش سرعت امواج فراصوت (UPV[11])، روش ضربه اکو (IE[12]) و روش نشر آوایی (AE) که روش نشر آوایی به انرژی الاستیک آزاد شده از مواد تحت تغییر شکل و یا موج گذرای الاستیک تولید شده در اثر آزاد شدن سریع انرژی از منابع مشخصی در درون ماده اطلاق می‌شود [12].

3-1- مفاهیم بنیادی نشر آوایی

ایده اصلی نشر آوایی موج‌های الاستیک یا آکوستیک بوده که از تغییرشکل یا شکست مواد و اجزاء در اثر تنش‌های حرارتی یا مکانیکی آزاد می‌شوند.

هدف اصلی از تست AE شناسایی و موقعیت‌یابی منابع انتشار و به‌دست

[1] Pre-stressed Cylinder Concrete Pipe
[2] Great Man Made River
[3] Acoustic Emission
[4] Real-Time

[5] Visual Inspection (VI)
[6] Electrochemical Methods
[7] Elastic Wave Methods
[8] Electromagnetic Methods (EM)
[9] Optical Sensing Methods
[10] Infrared Thermography (IRT)
[11] Ultrasonic Pulse Velocity
[12] Impact Echo

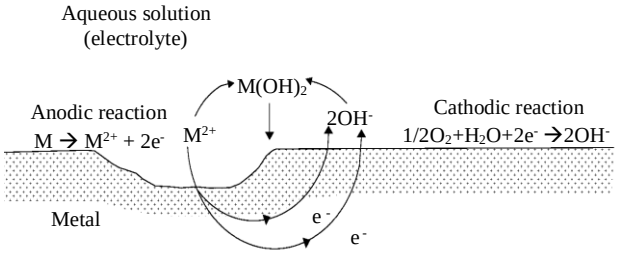

Fig. 1 Wet corrosion of divalent metal M in an electrolyte containing oxygen [10]

شکل 1 خوردگی تر فلز دو ظرفیتی M در الکترولیت حاوی اکسیژن [10]

آوردن اطلاعات لازم و کافی از آن‌ها می‌باشد. شکل موج حاصله از تست دارای اطلاعات کیفی و کمی برای شناخت ماهیت منبع می‌باشد. فاکتورهای اصلی که بر سیگنال‌های AE تأثیرگذارند عبارتند از مشخصات منبع انتشار موج، مسیر بین منبع و ترانسدیوسر، مشخصات ترانسدیوسر و سیستم اندازه گیری. انرژی الاستیک آزاد شده از منبع نشر که می‌تواند ناشی از انواع آسیب‌ها باشد از میان اجزا ماده عبور کرده و به سطح اجزاء و جایی که حس‌گر پیزوالکتریکی در آنجا نصب شده است رسیده و سپس این حس‌گر تغییر مکان سطح را در قسمت‌های مختلف شناسایی کرده و به یک سیگنال الکتریکی کاربردی تبدیل می‌کند که به‌وسیله آنالیز پارامترهای مختلف موج حاصله شدت و محل منبع AE می‌تواند ارزیابی گردد [5].

شکل 2 به صورت شماتیک شناسایی ناشی از هر گونه آسیب اعم از خوردگی یا ترک در مرز بین بتن و آرماتور در یک قطعه بتنی مسلح به‌روش AE را نشان می‌دهد. تفاوت‌های عمده‌ای که بین روش نشر آوایی و سایر آزمون‌های غیر مخرب وجود دارد یکی این است که در روش نشر آوایی انرژی مورد نیاز به منظور شناسایی از خود ماده تحت پایش تولید می‌شود و دیگری زمان واقعی بودن و امکان کنترل منظم فرسایش تدریجی سازه‌ها در طول زمان بوده که مزیت مهمی نسبت به سایر روش‌های غیر مخرب بوده و از طرف دیگر دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که عمده‌ترین آن‌ها قابلیت تکرار[1] و تضعیف[2] می‌باشد [12].

قابلیت تکرار بدین معنی می‌باشد که موج حاصل از خرابی ناشی از تنش منحصر بفردی بوده که می‌تواند در نتیجه بارگذاری‌های متفاوت به‌وقوع پیوسته که در زمان وقوع خرابی می‌بایست شناسایی گردد به دلیل اینکه همان خرابی دیگر قابل برگشت نیست. تضعیف نیز که از عمده محدودیت دیگر روش نشر آوایی به حساب می‌آید به کاهش دامنه موج با افزایش فاصله از منبع انتشار اطلاق می‌گردد که در اجزای مختلف سازه به‌وقوع می‌پیوندد [12]. چهار عامل مهم در پدیده تضعیف موثر بوده که عبارتند از گسترش

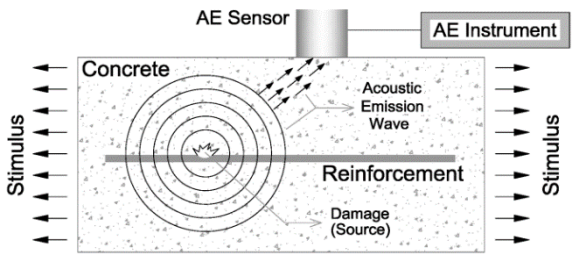

Fig. 2 Acoustic emission method

شکل 2 روش نشر آوایی

[1] Repeatability
[2] Attenuation

هندسی، اصطکاک‌داخلی، اتلاف[3] تدریجی موج در اثر نفوذ به محیط اطراف سازه، پراکندگی[4] سرعت [13].

3-1-1- اثر کایزر[5]

اثر کایزر در سال 1953 در آزمایش کشش روی فلز توسط جوزف کایزر پیشنهاد شد [14]. مطابق شکل 3 وقتی ماده‌ای تحت بارگذاری چرخه‌ای خفیف قرار می‌گیرد سیگنال‌های AE مهم و قابل توجهی از خود نشان نداده مگر آنکه تنش موجود از تنش بیشینه‌ای که قبلاً به ماده اعمال شده است فراتر رود (نقطه B)، از نقطه A تا B سیگنال‌های AE بطور پیوسته منتشر می‌شوند ولی بعد از باربرداری تا نقطه C و بارگذاری مجدد، تا نقطه B سیگنالی مشاهده نمی‌گردد مگر آن‌که از نقطه B فراتر رود. این پدیده برگشت‌پذیری[6] نام داشته که مهم‌ترین یافته ارزشمند ایشان بوده و به اثر کایزر معروف است. تا زمانی‌که بارگذاری ادامه پیدا می‌کند سیگنال‌های AE انتشار می‌یابند. زمانی‌که سیکل‌های بارگذاری به نقطه تنش بالاتر D می‌رسند ماده وارد فاز ناپایداری شده که میکروترک‌های قبلی تولید شده بطور چشم‌گیری توسعه یافته و آسیب‌های جدی به‌وقوع می‌پیوندد. سیگنال‌های AE حتی قبل از این‌که سطح تنش‌ها به نقطه D برسد قابل مشاهده بوده که به این معناست اثر کایزر در سطح تنش‌های بالاتر به سمت کاهش یافتن میل پیدا می‌کند [15].

3-1-2- روش تحلیل داده‌های نشر آوایی

برای تحلیل داده‌های AE دو روش متفاوت وجود داشته که یکی روش کلاسیک و کیفی یا تحلیل بر مبنای پارامترهای نشر آوایی بوده و دیگری روش کمی یا تحلیل بر پایه خود سیگنال می‌باشد [11].

تحلیل بر مبنای پارامتر برای شناسایی ویژگی منبع AE بسیار موثر و مفید بوده و از جمله پارامترهایی که قابلیت روش AE را در شناسایی خوردگی نشان می‌دهد می‌توان به واقعه یا رویداد[7]، شمارش ضرب آهنگ[8]، انرژی مطلق[9]، دامنه[10] و شدت سیگنال[11] اشاره نمود [11] که در ادامه به تشریح پارامترهای مذکور که در شکل 4 نمایش داده شده است پرداخته شده و در تحقیق حاضر نیز از این نوع تحلیل استفاده شده است.

3-1-2-1- واقعه و شمارش ضرب آهنگ

مطابق شکل 4 واقعه به هریک از سیگنال‌های منابع انتشار مجزا گفته شده

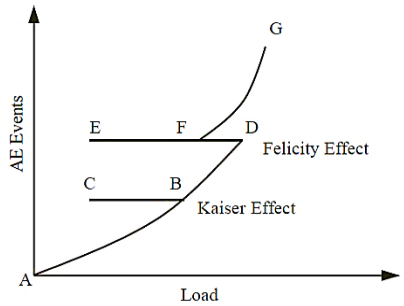

Fig. 3 Kaiser effect [15]

شکل 3 اثر کایزر [15]

[3] Dissipation
[4] Dispersion
[5] Kaiser Effect
[6] Irreversibility
[7] Hit
[8] Count
[9] Absolute (ABS) Energy
[10] Amplitude
[11] Signal Strength

که در اثر تغییر در اجزاء و مواد تولید می‌شوند و شمارش ضرب آهنگ تعداد دفعاتی است که یک سیگنال خط آستانه[1] تعریف شده را قطع می‌کند [12].

3-1-2-2- دامنه

ولتاژ پیک در شکل موج[2] سیگنال که به شدت موج انتشاری منبع نشر آوایی در ماده بستگی دارد دامنه اطلاق شده و واحد متداول برای اندازه‌گیری آن در سیگنال صوتی دسی بل[3] می‌باشد [12].

3-1-2-3- انرژی مطلق

مطابق شکل 4 مساحت ناحیه محصور شده بین منحنی پوش[4] سیگنال و خط آستانه در طول زمان استمرار سیگنال نشان‌دهنده انرژی مطلق بوده که بر حسب آتو ژول[5] بیان می‌شود [12].

3-1-2-4- شدت سیگنال

مساحت ناحیه محصور شده به‌وسیله منحنی پوش سیگنال در طول زمان استمرار که شامل قسمت مثبت و منفی سیگنال می‌شود شدت سیگنال بوده که در شکل 4 نشان داده شده و بر حسب ولت - ثانیه[6] بیان می‌شود.

4- روش نشر آوایی در شناسایی آسیب بتن و خوردگی

اولین کاربرد نشر آوایی برای پایش خوردگی توسط دوون در سال 1984 ثبت شده است که نشان‌دهنده حساسیت این روش به جریان خوردگی بوده و پیشنهاد روش مذکور برای پایش خوردگی سازه‌های بتنی می‌باشد [16] ولی عمده کاربرد روش نشر آوایی برای بتن در اواخر دهه 1970 شروع شد، بدین صورت که این روش برای فلزات به‌کار گرفته شده سپس با اعمال تغییراتی به مواد ناهمگن توسعه یافت [17].

مهم‌ترین عاملی که منجر به آسیب و خرابی آرماتورهای پیش‌تنیده در لوله‌ها می‌گردد خوردگی حفره‌ای[7] [18]، خوردگی تحت تنش[8] [19] و تردی هیدروژنی[9] [20] می‌باشد. در سال 2007 با استفاده از روش AE مراحل خوردگی میلگرد در بتن مسلح مطالعه گردید [21]. حساسیت و توانمندی

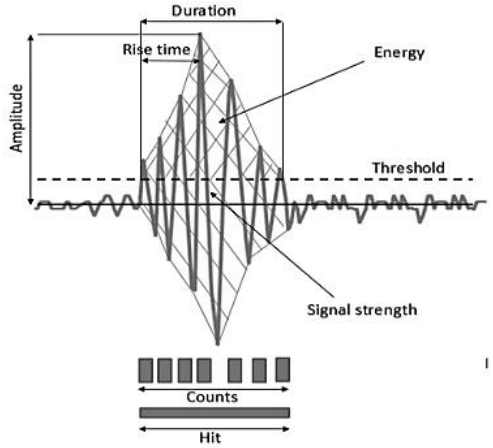

Fig. 4 Parameters reflecting of an AE waveform [11]

شکل 4 پارامترهای بیان کننده موج AE [11]

[1] Threshold
[2] Waveform
[3] dB
[4] Envelope
[5] Attojoule
[6] Volt-seconds
[7] Pitting corrosion
[8] Stress Corrosion Cracking
[9] Hydrogen Embrittlement

روش نشر آوایی برای انواع مختلف خوردگی مانند خوردگی تحت تنش [22]، خوردگی سایشی[10] [24,23]، خوردگی حبابی [25]، خوردگی شیاری (شکافی)[11] [26]، خوردگی پوسته‌ای یا ورقه‌ای[12] [27] و خوردگی یکنواخت اسیدی[13] [28] نشان داده شده است. این روش برای شناسایی ویژگی ترک‌های ناشی از خوردگی تحت تنش در مقطع فولادی توخالی و ضد زنگ به‌کار رفته [29] و برای شناسایی خوردگی سازه‌های صنعتی در زمان بهره‌برداری و نگهداری نیز استفاده شده است [30].

با استفاده از روش نشر آوایی رابطه میان میکروترک و ماکروترک‌ها در بتن شناسایی گردیده [31] و طبقه‌بندی اشکال و حالات مختلف ترک در بتن نیز مورد بررسی قرار گرفته است [32].در سال 2017 از این روش برای شناسایی محل خرابی در لوله‌های جدار نازک با قطر بالا استفاده شده [33] و خرابی بتن مسلح ناشی از خوردگی میلگردها با این روش رفتارسنجی شده است [34]، همچنین روش AE برای پایش رشد ترک ناشی از خوردگی در رویه بتنی سازه‌های بتنی مسلح به‌کار رفته [35] و خوردگی تحت تنش لوله فولادی از نوع L360NS ناشی از محیط حاوی سولفور با روش مذکور شناسایی شده است [36].

5- مطالعه آزمایشگاهی

در آزمایشگاه 3 نمونه مدل با هدف‌های متفاوت ساخته شده و آزمایش‌های لازم بر روی آن‌ها انجام گرفته که در هر بخش به طور مجزا تشریح شده است. لوله‌های بتنی پیش‌تنیده که در شکل 5 نمونه تولید شده آن در ایران مشاهده می‌گردد از سه قسمت هسته بتنی، آرماتورهای دورپیچ با مقاومت بالا[14] و رویه بتنی تشکیل شده است و با توجه به اینکه طول آرماتور دورپیچ در هر شاخه از لوله بسیار زیاد و در حدود 3000 متر می‌باشد، در صورت حفاظت کاتدیک افت جریان را به‌دنبال خواهد داشت، لذا بدین منظور و برای رفع این مشکل از یک صفحه فلزی نصب شده در زیر آرماتورها که در شکل 5 نیز نمایان است استفاده می‌شود.

5-1- سیستم سنجش نشر آوایی استفاده شده

به منظور سنجش و ارزیابی از سیستم USB-AE Node محصول شرکت میسترَس استفاده شده است، هریک از این سیتمها دارای یک کانال بوده که به سادگی با یک کابل یواس‌بی به نوت‌بوک قابل اتصال می‌باشند و 4 سیستم که دارای 4 کانال می‌باشد، می‌تواند به صورت موازی به‌کار گرفته شود. نرم‌افزار AE مورد استفاده AEwin بوده و از حس‌گرهای پیزوالکتریکی نوع PK-15I شرکت پَک با فرکانس تشدید 150 کیلوهرتز برای ثبت سیگنال‌ها استفاده شده است.

5-2- آزمایش اول؛ امکان‌سنجی نصب حس‌گر روی صفحه حفاظت کاتدیک

با توجه به این‌که افت دامنه امواج صوتی نشر شده در فلز در یک فاصله مشخص بسیار کمتر از ماده بتنی می‌باشد و از طرف دیگر طول آرماتور دورپیچ به قدری زیاد است که در صورت نصب حس‌گر روی آن می‌بایست از تعداد بسیار زیادی ترانسدیوسر پیزوالکتریکی استفاده شده که توجیه اقتصادی ندارد لذا از صفحه حفاظت کاتدیک به عنوان جمع کننده امواج

[10] Abrasion or Erosion Corrosion
[11] Crevice Corrosion
[12] Exfoliation Corrosion
[13] Uniform Acidic Corrosion
[14] High-tensile

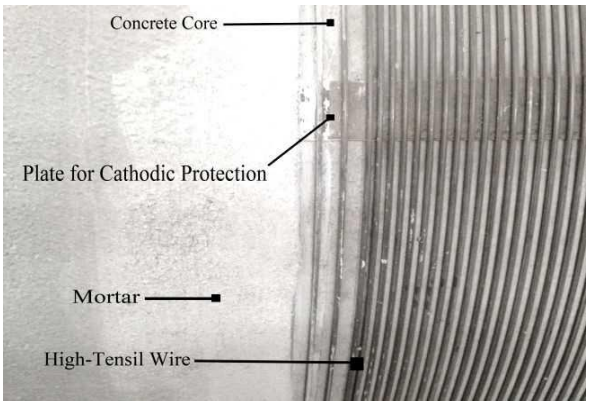

Fig. 5 Manufactured prestressed pipe

شکل 5 لوله پیش‌تنیده تولید کارخانه

فراصوتی استفاده شده است. از طرف دیگر به علت گسستگی در محل اتصال آرماتورها به صفحه فلزی قسمتی از امواج عبور کرده و قسمتی نیز برمی‌گردند لذا در دامنه امواج افت ایجاد شده و تضعیف می‌شوند. برای ارزیابی میزان تضعیف نمونه‌ای در آزمایشگاه مطابق شکل 6 که مدل واقعی و آزمایشگاهی آن نیز در شکل 7 مشاهده می‌گردد ساخته شده است. نمونه ساخته شده شامل یک میلگرد و صفحه فلزی بوده که به‌وسیله بست فلزی به یکدیگر محکم شده‌اند.

برای مشخص نمودن میزان تضعیف از منبع سوو- نیلسن[1] بدین صورت استفاده شده که دو عدد حس‌گر S1 و S2 در روی صفحه فلزی تعبیه شده و سپس آزمایش شکست نوک مداد[2] در 8 نقطه مطابق شکل 6 که 4 نقطه(m1، m2، m3 و m4) روی میلگرد و 4 نقطه دیگر (n1، n2، n3 و n4) برروی صفحه فولادی قرار دارد، انجام شده و دامنه‌های حاصله ثبت گردیده است که نتایج در جدول شماره 1 درج شده است.

5-3- آزمایش دوم؛ شناسایی سیگنال‌های ناشی از جذب آب توسط بتن

با توجه به این‌که ماهیت ماده بتنی مانند ماده فلزی نبوده و دارای خلل و فرج بسیار می‌باشد، قابلیت جذب آب را دارا است لذا این احتمال داده شده است که در اثر جذب آب توسط بتن و خروج هوا که با شکستن حباب‌های هوا همراه می‌باشد سیگنال‌های فراصوتی تولید شده و با سیگنال‌های ناشی از پدیده خوردگی که بخشی از فرآیند مذکور با شکستن حباب‌های هیدروژن همراه هست ادغام گردیده و خطاهایی در تفسیر نتایج به‌وجود آید، لذا دراین قسمت نمونه‌ای مطابق شکل 8 ساخته شده که اجزای فلزی آن مانند شکل 7 بوده ولی با این تفاوت که با عملیات بتن‌ریزی قسمت انتهایی آرماتور موجود به شکل مکعب با بتن پوشانده شده است. در این مدل نقش صفحه فلزی، آرماتور و بتن به ترتیب صفحه فلزی حفاظت کاتدیک، آرماتورهای پیش‌تنیده دورپیچ و بتن رویه در لوله‌های اصلی می‌باشد. جدول 2 تنظیمات پارامترهای AE را نشان می‌دهد.

نمونه خشک بتنی در داخل ظرفی که قسمتی از آن با آب پرشده است قرار داده شده تا آب موجود جذب بتن شود. برای ارزیابی از 2 عدد حس‌گر S1 و S2 به ترتیب روی صفحه فلزی و بتن مطابق شکل 8 استفاده شده و تنظیمات آن‌ها با توجه به این‌که روی دو ماده مختلف نصب شده است متفاوت بوده که درجدول 2 مشاهده گردید، برای هر دو حس‌گر خط آستانه

[1] Hsu-Nielsen
[2] Pencil Lead Break (PLB)

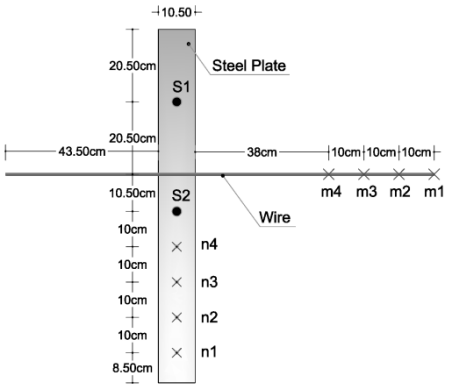

Fig. 6 Schematic view of the experimental sample for detection of attenuation

شکل 6 نمای شماتیک نمونه آزمایشگاهی به منظور شناسایی میزان تضعیف

برابر با 23 دسی‌بل، ضریب بزرگ‌نمایی سیگنال ورودی برابر با 40 دسی‌بل، طول رویداد برابر با 1k و از یک فیلتر میان‌گذر 20 کیلوهرتز الی 1 مگاهرتز استفاده شده است. شکل 9 نمودار تجمعی رخدادهای تولید شده نسبت به زمان و شکل 10 دامنه رخدادها نسبت به زمان را نشان می‌دهد.

5-4- آزمایش سوم؛ شناسایی خوردگی در لوله بتنی پیش‌تنیده

نمونه‌ای مطابق شکل 11 در آزمایشگاه مطابق با تولیدات کارخانه لوله‌سازی

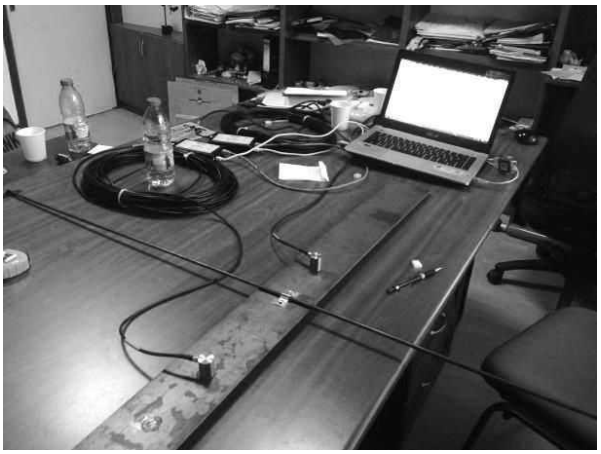

Fig. 7 Experimental sample for detection of attenuation

شکل 7 نمونه ساخته شده آزمایشگاهی به منظور شناسایی تضعیف

جدول 1 دامنه‌های ثبت شده در اثر آزمایش PLB

Table 1 Recorded amplitude caused by PLB test

شماره نقاط	n1	n2	n3	n4	m1	m2	m3	m4
دامنه ثبت شده توسط حس‌گر S2 (dB)	76	75	75	77	66	64	65	65

جدول 2 تنظیمات پارامترهای AE

Table 2 AE parameter setting

حس‌گر	PDT[3] (µs)	HDT[4] (µs)	HLT[5] (µs)	نرخ نمونه‌برداری (MSPS[6])
S1	400	800	2	5
S2	50	100	2	5

[3] Peak Definition Time
[4] Hit Definition Time
[5] Hit Lockout Time
[6] Mega Sample Per Second

Fig. 8 Experimental sample for signals detection due to water absorption of concrete

شکل 8 نمونه آزمایشگاهی ساخته شده به منظور شناسایی سیگنال‌های تولید شده در اثر جذب آب توسط بتن

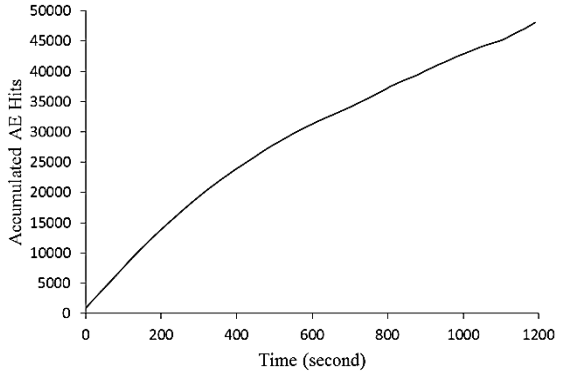

Fig. 9 Accumulated AE hits due to water absorption of concrete

شکل 9 نمودار تجمعی رخدادهای AE در اثر جذب آب توسط بتن

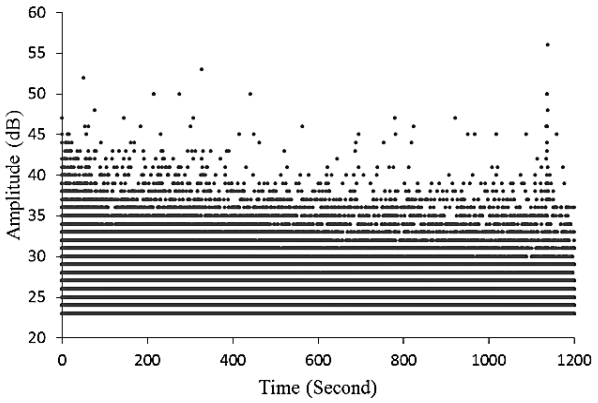

Fig. 10 Amplitude distribution during water absorption of concrete

شکل 10 توزیع دامنه AE در مدت جذب آب توسط بتن

شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی ساخته شده است، ولی به‌جای هسته بتنی مسلح از لوله بتنی غیر مسلح پیش‌ساخته ترکیه استفاده گردیده است. قطر داخلی هسته بتنی 300 و قطر خارجی آن 420 میلی‌متر می‌باشد. میلگردهای مقاومت بالا به قطر 5 میلی‌متر و با مقامت نهایی 1670 مگاپاسکال با کشش 500 مگاپاسکال در هر میلگرد دور لوله پیش تنیده شده سپس رویه بتنی با مقاومت فشاری استوانه‌ای 28 روزه 45 مگاپاسکال و به ابعاد 30*440*360 میلی‌متر روی لوله بتن‌ریزی شده است.

یک استخر مطابق شکل 11 روی رویه بتنی به منظور محل الکترولیت و اعمال خوردگی ساخته شده است. دو طرف لوله با دو صفحه فلزی بسته شده که در یکی از آن‌ها شیر تخلیه هوا و در دیگری پمپی به منظور افزایش و کاهش فشار آب داخل لوله تعبیه شده است. دو عدد از حس‌گرهای AE (S3 و S4) روی بتن و دو عدد دیگر (S1 و S2) روی صفحه فلزی که به منظور حفاظت کاتدیک در لوله‌های اصلی وجود دارد تعبیه شده است. برای کنترل نیروی پیش‌تنیدگی و داخلی میلگردها از کرنش‌سنج[1] نوع FAL-5-11 که مطابق شکل 12 روی میلگردها نصب شده، استفاده شده است.

برای اعمال خوردگی از روش تسریع شده استفاده گردیده است که برای این منظور استخر ساخته شده در روی رویه بتنی با محلول 4 درصد NaCl که بعنوان الکترولیت می‌باشد پر شده است. یک صفحه فلزی به ابعاد 3*300*40 میلی‌متر بعنوان کاتد بر روی سطح بتن رویه تکیه داده شده و از یک منبع تغذیه 12 ولتی که قطب منفی آن به صفحه فلزی (کاتد) و قطب مثبت آن به میلگردهای حلقوی (آند) متصل شده استفاده گردیده و جریانی با چگالی 2000 میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع بین آند و کاتد برقرار شده است. شکل 13 نمونه ساخته شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

6- بحث و بررسی

نتایج ناشی از آزمایش اول که در جدول 1 درج شده است نشان دهنده این است که حداکثر افت دامنه امواج فراصوتی ناشی از گسستگی در محل اتصال بین آرماتورهای دورپیچ و صفحه حفاظت کاتدیک در حدود 10 دسی‌بل بوده که تضعیف محسوسی به منظور دریافت سیگنال‌های ناشی از خوردگی به‌حساب نمی‌آید لذا می‌توان از صفحه حفاظت کاتدیک به عنوان محل نصب حس‌گرهای پیزوالکتریک استفاده کرد که مزیت بسیار مهمی محسوب می‌شود، زیرا یک حس‌گر در روی صفحه مذکور قادر است سیگنال‌های حاصل از خرابی را در هر نقطه از کل طول و محیط لوله به قطر 2000 میلی‌متر را دریافت نماید.

شکل‌های 9 و 10 که نتیجه آزمایش دوم می‌باشد نشان می‌دهد که جذب آب توسط بتن سیگنال‌های فراصوتی تولید کرده که ناشی از خروج و شکستن حباب‌های هوا می‌باشد. از طرف دیگر در قسمتی از پدیده خوردگی نیز شکست حباب‌های هیدروژن رخ داده و از آنجایی که ماهیت این دو پدیده یکسان است امواج فراصوتی ناشی از هر دو باهم ادغام شده و تفکیک آن‌ها با یکدیگر بسیار مشکل می‌باشد لذا برای تشخیص خوردگی از روش افزایش و کاهش فشار آب داخل لوله استفاده شده است.

در آزمایش سوم که به منظور شناسایی خوردگی و خرابی در لوله اصلی انجام شده است تغییرات فشار داخل لوله در 3 مرحله اساسی صورت گرفته است که مرحله اول در زمان قبل از خوردگی، مرحله دوم در حین خوردگی و رویه بتنی اشباع (استخر پر) و مرحله سوم با رویه بتنی خشک می‌باشد.

تنظیمات پارامترهای AE برای 4 حس‌گر نصب شده روی لوله در جدول 3 نشان داده شده است همچنین برای 2 حس‌گر S1 و S2 خط آستانه برابر با 23 دسی‌بل و برای حس‌گرهای S3 و S4 برابر با 33 دسی‌بل، ضریب بزرگ‌نمایی سیگنال ورودی برابر با 40 دسی‌بل ، طول رویداد برابر با 1k و از یک فیلترمیان‌گذر 23 کیلوهرتز الی 1 مگاهرتز استفاده شده است.

[1] Strain Gauge

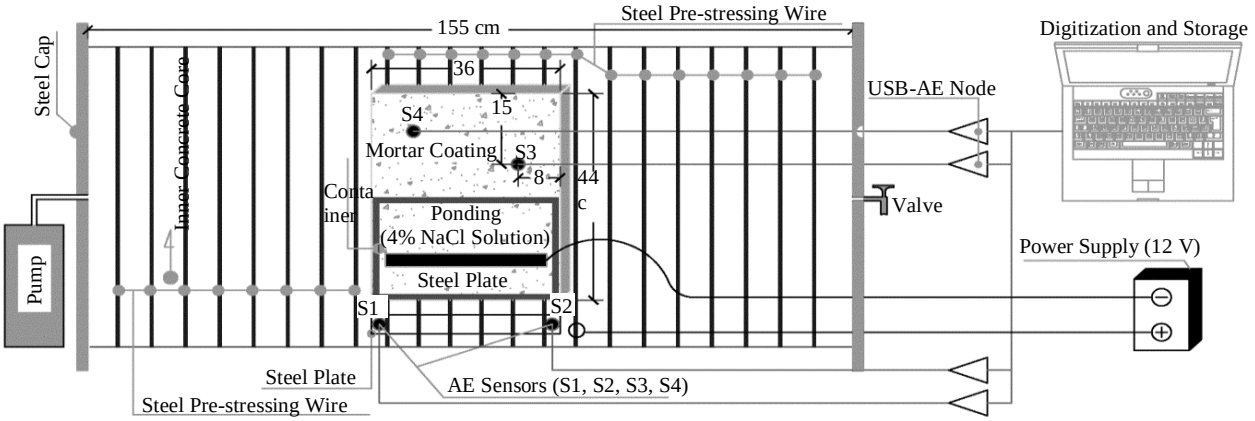

Fig. 11 Schematic overview of experimental set up

شکل 11 نمای شماتیک کلی از مدل آزمایشگاهی

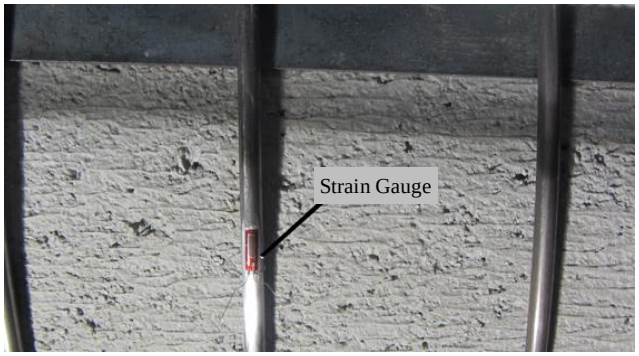

Fig. 12 Strain gauge used during the test

شکل 12 کرنش‌سنج استفاده شده در آزمایش

Fig. 13 Prestressed pipe made in laboratory

شکل 13 لوله پیش‌تنیده ساخته شده در آزمایشگاه

در ابتدای آزمایش برای حذف سیگنال‌هایی که ناشی از آسیب لوله نبوده و احتمال نشر آن‌ها از عوامل مربوط به ساخت باشد از اثر کایزر استفاده شده است، بدین صورت که فشار داخل لوله به تدریج تا 9 بار افزایش و سپس به صفر کاهش داده شده است که در این مرحله هیچ سیگنالی مشاهده نگردید زیرا لوله برای تست نشت مدتی فشار 9 بار را تجربه کرده و تمامی سیگنال‌های اضافی حذف شده بود.

6-1- مرحله اول

در این مرحله بعد از سپری شدن 3 روز از شروع آزمایش که استخر روی بتن از الکترولیت پر بوده و منبع تغذیه متصل نشده بود اقدام به افزایش تدریجی فشار داخل لوله تا 9 بار گردیده و به صفر کاهش داده شده است. بدین صورت که سیگنال‌های ناشی از جذب الکترولیت توسط بتن در طول 3 روز مذکور در حال ثبت شدن بوده که پس از گذشت آن زمان تأثیر افزایش فشار تا 9 بار روی پارامترهای AE که در بین زمان‌های 500 الی 700 ثانیه اتفاق افتاده، مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل 14 نمودار تغییرات پارامتر رخداد، شکل 15 نمودار دامنه، شکل 16 نمودار انرژی مطلق و شکل 17 نمودار شدت سیگنال نسبت به زمان را نشان می‌دهد.

همان‌طوری‌که در شکل 14 مشاهده می‌گردد شیب نمودار در کل بازه زمانی 0 الی 900 ثانیه تقریبا ثابت می‌باشد که نشان می‌دهد هیچ‌گونه سیگنال اضافی در اثر افزایش فشار که بین زمان‌های 500 و 700 ثانیه به وقوع پیوسته است وجود ندارد. از طرف دیگر در شکل‌های 15 الی 17 توزیع نقاط در طول زمان تقریبا یکنواخت بوده و تغییرات خاصی مشاهده نمی‌گردد که نشان دهنده عدم افزایش مقادیر دامنه، انرژی مطلق و شدت سیگنال‌ها در اثر بارگذاری فشاری می‌باشد.

6-2- مرحله دوم

در این مرحله خوردگی تسریع شده به مدت یک هفته اعمال شده که پس از

جدول 3 تنظیمات پارامترهای AE

Table 3 AE parameter setting

نرخ نمونه-برداری (MSPS)	HLT (µs)	HDT (µs)	PDT (µs)	حس‌گر
5	2	800	400	1
5	2	800	400	2
5	2	100	50	3

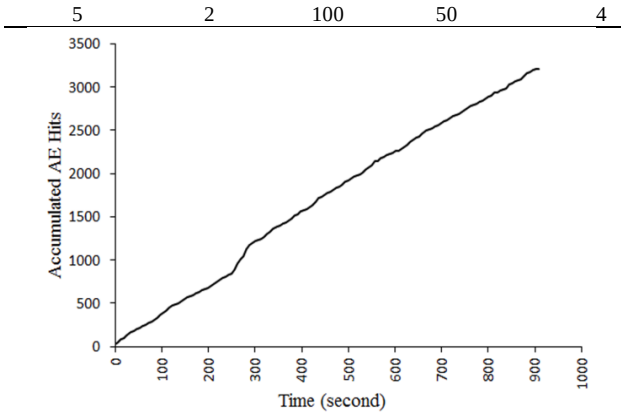

Fig. 14 Accumulated AE hits during the test before corrosion

شکل 14 نمودار تجمعی رخدادهای AE در طول آزمایش قبل از خوردگی

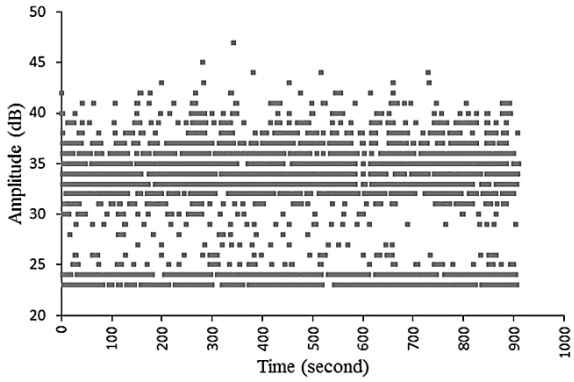

Fig. 15 Distribution of AE amplitude during the test before corrosion

شکل 15 توزیع دامنه AE در طول آزمایش قبل از خوردگی

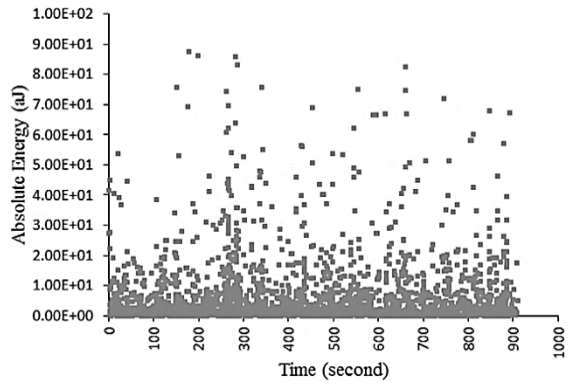

Fig. 16 Distribution of AE energy during the test before corrosion

شکل 16 توزیع انرژی AE در طول آزمایش قبل از خوردگی

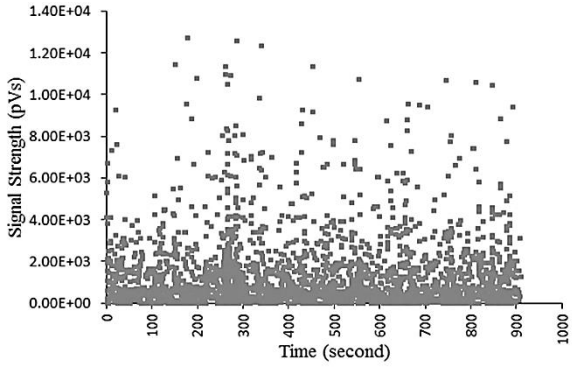

Fig. 17 Distribution of AE signal strength during the test before corrosion

شکل 17 توزیع شدت سیگنال AE در طول آزمایش قبل از خوردگی

مدت زمان مذکور فشار داخل لوله در 4 مرحله افزایش یافته است، ابتدا فشار به 2 بار، سپس به ترتیب به 4 بار، 6 بار و 8 بار افزایش داده شده و در شکل 18 که نمودار رخداد نسبت به زمان را نشان می‌دهد هر 4 ناحیه مذکورِ مربوط به تغییرات فشار داخل لوله که با یک پرش در نمودار همراه است کاملاً مشخص می‌باشد.

شکل 19 نمودار دامنه، شکل 20 نمودار انرژی مطلق و شکل 21 نمودار شدت سیگنال نسبت به زمان را نشان می‌دهد.

زمانی‌که فشار از صفر به 2 بار افزایش داده شده است ناحیه 1 در شکل‌های 19 تا 21 بصورت تشکیل قله خود را نشان داده و حاکی از این است که افزایش فشار باعث افزایش محسوس در دامنه، انرژی مطلق و شدت سیگنال شده است.

پس از آن فشار به صفر کاهش داده شده و مجدداً از صفر به 4 بار افزایش داده شده است. در این هنگام مشاهده گردیده که تا 2 بار سیگنال اضافی تولید نشده ولی بعد از گذشتن از 2 بار قله مربوط به ناحیه 2 در نمودارهای دامنه، انرژی مطلق و شدت سیگنال مطابق شکل‌های 19، 20 و 21 تشکیل یافته است. سپس مجدداً فشار به صفر کاهش داده شده است. پس از مدت زمان کم مجدداً افزایش به 6 بار و کاهش به صفر و سپس افزایش به 8 بار و باز هم به صفر کاهش داده شده است.

اثر کایزر در مورد لوله‌های پیش‌تنیده در طی بارگذاری و باربرداری‌های فشاری که در 4 مرحله مذکور انجام گرفت به‌صورت آشکار از نمودار مربوط به شکل 3 تبعیت کرده است، بدین صورت که در هر 4 مرحله بارگذاری شده تا رسیدن فشار به بارگذاری قبلی که لوله تجربه کرده بود پرشی در نمودار

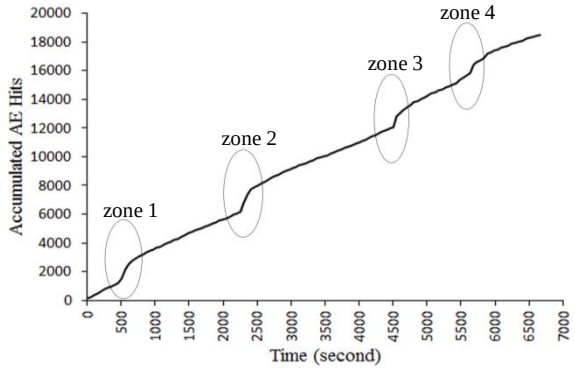

Fig. 18 Accumulated AE hits during corrosion with internal pressure fluctuation

شکل 18 نمودار تجمعی رخدادهای AE در طول خوردگی همراه با نوسانات فشار

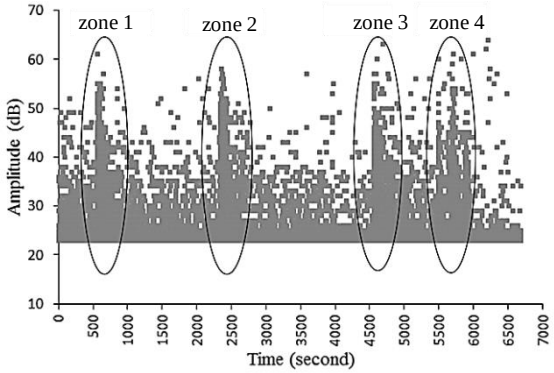

Fig. 19 Distribution of AE amplitude during corrosion with internal pressure fluctuation

شکل 19 توزیع دامنه AE در طول خوردگی همراه با نوسانات فشار

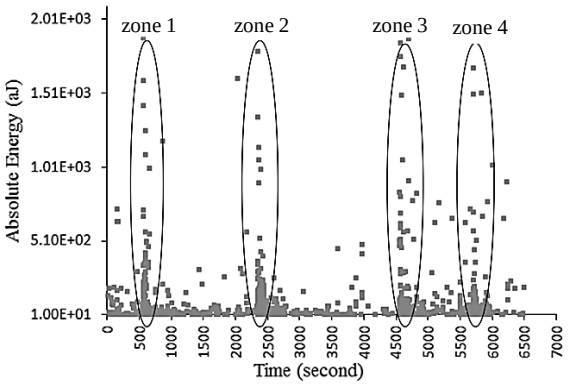

Fig. 20 Distribution of AE energy during corrosion with internal pressure fluctuation

شکل 20 توزیع انرژی AE در طول خوردگی همراه با نوسانات فشار

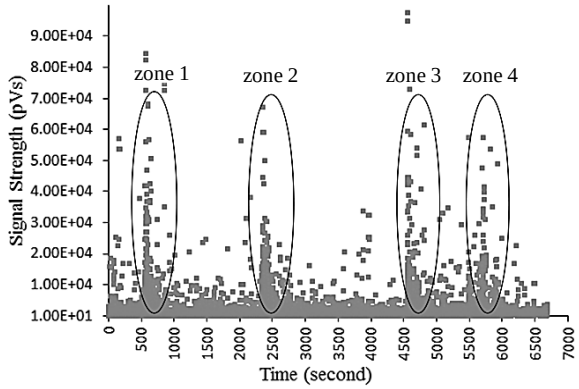

Fig. 21 Distribution of AE signal strength during corrosion with internal pressure fluctuation

شکل 21 توزیع شدت سیگنال AE در طول خوردگی همراه با نوسانات فشار

رخداد و افزایشی در دامنه، انرژی مطلق و شدت سیگنال ملاحظه نگردیده ولی با گذشتن مقدار بار از بارگذاری قبلیِ تجربه شده تغییرات بارزی در نمودارهای مذکور مشاهده می‌گردد.

3-6- مرحله سوم

در این مرحله مجدداً جریان به مدت 4 روز دیگر برقرار شده و سپس استخری که از الکترولیت پر بود به‌طور کامل خالی شده و بتن اشباع شده در مدت زمان 4 روز خشک شده است که پس از خشک شدن بتن بارگذاری لوله مشابه مرحله دوم (مرحله قبل) انجام گردیده است. تنها تفاوتی که در حالت خشک مشاهده گردیده است افزایش بارز در شدت و انرژی سیگنال‌ها نسبت به حالت تَر می‌باشد که به عنوان نمونه نمودار انرژی مطلق نسبت به زمان در شکل 22 نشان داده شده است. شکل 23 نیز خوردگی میلگردهای حلقوی در انتهای آزمایش را نشان می‌دهد که کاهش وزن 25 درصدی در میلگردها در اثر خوردگی نتیجه شده است.

7- نتیجه‌گیری

برای تمامی لوله‌ها فشار کاری مشخصی تعریف می‌گردد که این فشار کاری برای اکثر لوله‌های بتنی مسلح پیش‌تنیده استفاده شده در ایران 15 بار بوده و کرنش ناشی از تغییرات فشار داخل لوله به ازای 1 بار در حدود 35 µs در میلگردهای حلقوی می‌باشد. در کار آزمایشگاهی مذکور کرنش‌سنج‌های نصب شده روی میلگردها در هر 2 بار افزایشِ فشار، کرنشی در حدود 25 µs را نشان داده که معادل با کرنش لوله‌های واقعی در حدود 5 درصد فشار کاری آن‌ها می‌باشد لذا در خطوط لوله‌های بتنی پیش‌تنیده با افزایش فشار در حدود 5 درصد فشار کاری لوله‌ها در صورت وجود خوردگی سیگنال‌هایی با انرژی و شدت قابل توجهی تولید شده که شناسایی آسیب را به سهولت ممکن می‌سازد.

اندازه‌گیری‌های شدت جریان برقرار شده بین آند و کاتد در طول فرآیند خوردگی به‌وسیله مولتی‌متر نشان‌دهنده آن است که محلول 4 درصد NaCl که به عنوان الکترولیت به‌کار رفته است درصد بهینه بوده و بیشتر از 4 درصد تأثیری در تسریع روند خوردگی نخواهد گذاشت.

در کارهایی که توسط سایر محققان در رابطه با خوردگی میلگردها در بتن مسلح انجام شده است به سیگنال‌های ناشی از جذب آب توسط بتن اشاره‌ای نشده است، ولی در کار آزمایشگاهی حاضر مشاهده گردید که به‌دلیل وجود خلل و فرج در بتن، جذب آب توسط ماده بتنی لوله که با خروج و شکستن حباب‌های هوا همراه است سیگنال‌های صوتی تولید کرده و از آنجایی که قسمتی از فرآیند خوردگی به دلیل شکستن حباب‌های هیدروژن می‌باشد تفکیک دو پدیده خوردگی و جذب آب توسط بتن به‌علت یکسان بودن ماهیت منبع نشر بسیار مشکل بوده و چنان‌چه این مسأله مد نظر قرار نگیرد خطاهای بارزی در تفسیر نتایج به دنبال خواهد داشت.

اثر کایزر یکی از مسائلی است که در کار حاضر مورد ارزیابی قرار گرفته و مشاهده گردید با افزایش بار تا مرحله‌ای که لوله قبلاً بارگذاری شده است

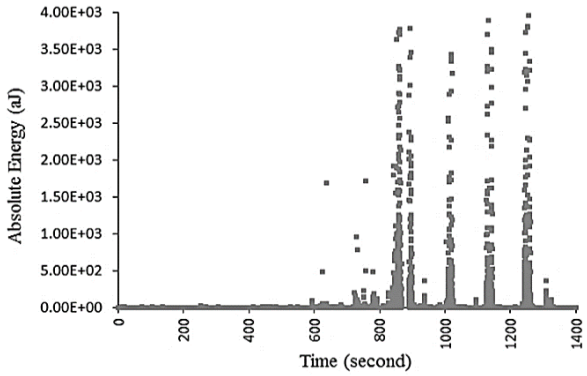

Fig. 22 Distribution of AE energy during corrosion with internal pressure fluctuation

شکل 22 توزیع انرژی AE در طول خوردگی همراه با نوسانات فشار

Fig. 23 Corroded state of post-tensioned wires

شکل 23 میلگردهای پس کشیده حلقوی پس از خوردگی

سیگنالی تولید نشده و با گذشتن از آن بار در صورت وجود هرگونه آسیب انتشار سیگنال شروع خواهد شد. یکی از نکات حائز اهمیت این است که شدت و انرژی سیگنال‌های تولیدی در نمونه اشباع با حالت خشک آن متفاوت می‌باشد بدین صورت که در حالت خشک سیگنال‌ها با شدت و انرژی به مراتب بیشتری قابل دریافت هستند.

با توجه به اینکه طول میلگردهای دورپیچ در این‌گونه لوله‌ها بسیار زیاد بوده و در لوله‌ای به طول 6 متر و به قطر 2000 میلی‌متر به 3 کیلومتر می‌رسد لذا امواج تولیدی در مسیر دچار تضعیف شده و در نتیجه برای پایش خرابی تعداد حس‌گرهای زیادی لازم بوده تا بتوان امواج را با کیفیت لازم دریافت کرد که توجیه اقتصادی نداشته لذا در کار آزمایشگاهی حاضر برای غلبه بر این مشکل 2 عدد از حس‌گرها روی صفحه حفاظت کاتدیک تعبیه شده و پدیده تضعیف مورد بررسی قرار گرفت که نشان‌دهنده افت دامنه در حدود 10 دسی‌بل می‌باشد لذا می‌توان نتیجه گرفت که با تعبیه تنها یک حس‌گر پیزوالکتریک، امواج ناشی از خرابی در هر نقطه روی کل یک شاخه لوله با کیفیت مطلوب قابل دریافت است.

8- تشکر و قدردانی

از جناب آقای پروفسور دکتر آحمت تورر[1] و دانشگاه میدل‌ایست[2] به دلیل همکاری و تأمین تجهیزات لازم تشکر و قدردانی می‌شود.

9- مراجع

[1] S. K. Singh, *Corrosion Studies on Prestressing Steel Wires*, PhD Thesis, Imperial College London (University of London), London, 2000.
[2] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedeferri, E. Redaelli, R. B. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*, Second Edittion, pp. 79-92, John Wiley & Sons, 2013.
[3] K. Ann, J. Ahn, J. Ryou, The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 1, pp. 239-245, 2009.
[4] D. L. Atherton, K. Morton, B. J. Mergelas, Detecting breaks in prestressing pipe wire, *American Water Works Association Journal*, Vol. 92, No. 7, pp. 50, 2000.
[5] H. A. Elfergani, R. Pullin, K. M. Holford, Damage assessment of corrosion in prestressed concrete by acoustic emission, *Construction and Building Materials*, Vol. 40, No. 3, pp. 925-933, 2013.
[6] J. Huang, Z. Zhou, D. Zhang, Q. Wei, A fiber Bragg grating pressure sensor and its application to pipeline leakage detection, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2013, No. 0, pp. 1-6, 2013.
[7] A. Alavinasab, Do broken prestressing wire wraps at the joint impact the safe operation of a pipe?, *Proceedings of the Pipelines Conference*, Portland, Oregon, United States: American Society of Civil Engineers, August 3-6, 2014.
[8] A. Alavinasab, E. Padewski, M. Higgins, Effects of the location of broken prestressing wires wraps in structural integrity of a damaged PCCP, *Proceedings of the Pipelines Conference*, Fort Worth, Texas, United States: American Society of Civil Engineers, June 23-26, 2013.
[9] P. Schiessl, *Corrosion of Steel in Concrete*, Report of the technical committee 60-CSC, The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, Chapman & Hall, 1988.
[10] E. Bardal, *Corrosion and Protection*, pp. 6-10, London: Springer Science & Business Media, 2007.
[11] A. Zaki, H. K. Chai, D. G. Aggelis, N. Alver, Non-destructive evaluation for corrosion monitoring in concrete: A review and capability of acoustic emission technique, *Sensors*, Vol. 15, No. 8, pp. 19069-19101, 2015.
[12] P. O. Moore, R. Miller, R. Hill, *Nondestructive Testing Handbook*, pp. 227-270, Acoustic Emission Testing, American Society for Nondestructive Testing, USA, 2005.
[13] A. A. Pollock, Classical wave theory in practical AE testing, *Progress in AE testing III, Proceedings of the 8th International AE Symposium of Japanese Society for Non-Destructive Testing*, pp. 708-721,Tokyo, November, 1986.
[14] J. Kaiser, Erkenntnisse und folgerungen aus der messung von geräuschen bei zugbeanspruchung von metallischen werkstoffen, *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, Vol. 24, No. 1-2, pp. 43-45, 1953.
[15] C. U. Grosse, M. Ohtsu, *Acoustic Emission Testing*, pp. 41-52, Heidelberg: Springer, 2008.
[16] S. Dunn, J. Young, W. Hartt, R. Brown, Acoustic emission characterization of corrosion induced damage in reinforced concrete, *Corrosion*, Vol. 40, No. 7, pp. 339-343, 1984.
[17] C. J. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation*, pp. 10.1-10.39, New York: McGraw-Hill, 2001.
[18] F. Li, Y. Yuan, C. Q. Li, Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 10, pp. 3878-3885, 2011.
[19] G. Monfore, G. J. Verbeck, Corrosion of prestressed wire in concrete, *American Concrete Institute Journal*, Vol. 57, No. 5, pp. 491-516, 1960.
[20] R. Schroeder, I. Müller, Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement susceptibility of an eutectoid steel employed in prestressed concrete, *Corrosion Science*, Vol. 45, No. 9, pp. 1969-1983, 2003.
[21] M. Ohtsu, Y. Tomoda, Corrosion process in reinforced concrete identified by acoustic emission, *Materials Transactions*, Vol. 48, No. 6, pp. 1184-1189, 2007.
[22] L. Djeddi, R. Khelif, S. Benmedakhene, J. Favergeon, Reliability of acoustic emission as a technique to detect corrosion and stress corrosion cracking on prestressing steel strands, *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 8, No. 1, pp. 8356-8370, 2013.
[23] M. M. El Rayes, H. S. Abdo, K. A. Khalil, Erosion-corrosion of cermet coating, *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 8, No. 1, pp. 1117-1137, 2013.
[24] F. Ferrer, H. Idrissi, H. Mazille, P. Fleischmann, P. Labeeuw, On the potential of acoustic emission for the characterization and understanding of mechanical damaging during abrasion–corrosion processes, *Wear*, Vol. 231, No. 1, pp. 108-115, 1999.
[25] H. Mazille, R. Rothea, C. Tronel, An acoustic emission technique for monitoring pitting corrosion of austenitic stainless steels, *Corrosion Science*, Vol. 37, No. 9, pp. 1365-1375, 1995.
[26] Y. P. Kim, M. Fregonese, H. Mazille, D. Féron, G. Santarini, Ability of acoustic emission technique for detection and monitoring of crevice corrosion on 304L austenitic stainless steel, *Independent Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 36, No. 8, pp. 553-562, 2003.
[27] F. Bellenger, H. Mazille, H. Idrissi, Use of acoustic emission technique for the early detection of aluminum alloys exfoliation corrosion, *NDT & E International*, Vol. 35, No. 6, pp. 385-392, 2002.
[28] L. Jaubert, M. Fregonese, D. Caron, F. Ferrer, C. Franck, E. Gravy, P. Labeeuw, H. Mazille, L. Renaud, On the opportunity to use non-intrusive acoustic emission recordings for monitoring uniform corrosion of carbon steel and austenitic stainless steel in acid and neutral solutions, *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 47, No. 8, pp. 465-471, 2005.
[29] W. Hwang, S. Bae, J. Kim, S. Kang, N. Kwag, B. Lee, Acoustic emission characteristics of stress corrosion cracks in a type 304 stainless steel tube, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 47, No. 4, pp. 454-460, 2015.
[30] P. Tscheliesnig, A. Jagenbrein, G. Lackner, Detecting corrosion during inspection and maintenance of industrial structures using acoustic emmision, *32nd European Conference on Acoustic Emission Testing*, Prague, Czech Republic, September 7-9, 2016.
[31] E. N. Landis, Micro-macro fracture relationships and acoustic emissions in concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 13, No. 1, pp. 65-72, 1999.
[32] D. G .Aggelis, Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters, *Mechanics Research Communications*, Vol. 38, No. 3, pp. 153-157, 2011.
[33] B. Dubuc, A. Ebrahimkhanlou, S. Salamone, Sparse reconstruction localization of multiple acoustic emissions in large diameter pipelines, *Proceedings of The Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems Conference*, Portland, Oregon, United States, March 25, 2017.
[34] W. Li, C. Xu, S. C. M. Ho, B. Wang, G. Song, Monitoring concrete deterioration due to reinforcement corrosion by integrating acoustic emission and FBG strain measurements, *Sensors*, Vol. 17, No. 3, pp. 657, 2017.
[35] A. A. Abouhussien, A. A. Hassan, STR-844: Cover crack growth monitoring in RC structures subjected to corrosion with acoustic emission sensors, *CSCE Annual Conference*, London, June 1-4, 2016.
[36] Z. Fan, X. Hu, J. Liu, H. Li, J. Fu, Stress corrosion cracking of L360NS pipeline steel in sulfur environment, *Petroleum*, doi: 10.1016/j.petlm.2017.03.006, 2017.

[1] Ahmet Turer
[2] Middle East Technical University