مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1396، دوره 17، شماره 2، ص‌ص 306-314

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ارزیابی تضعیف و مسیر انتشار امواج فراصوتی ناشی از خوردگی برای سنجش قابلیت اعتماد در پایش لوله‌های پیش‌تنیده به‌روش نشر فراصوتی

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 5173818573 ، goldaran_r@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 20 آذر 1395
پذیرش: 21 دی 1395
ارائه در سایت: 25 بهمن 1395

کلید واژگان:
نشر فراصوتی
لوله پیش تنیده
رفتارسنجی
خوردگی
شناسایی خرابی

چکیده

شکست ناگهانی و فاجعه‌بار در اثر خوردگی پدیده بسیار معمول در لوله‌های بتنی پیش‌تنیده بوده که در کشور ایران نیز بـه وقـوع مـی‌پیونـدد. رفتارسنجی سلامت سازه‌ها، شناسایی و تشخیص زودهنگام با استفاده از حسگرهای فعال تعبیه شده درجا در مراحل اولیه خوردگی یکی از نکات مهم حیاتی برای جلوگیری از آسیب‌های جدی می‌باشد که در این میان روش نشر فراصوتی می‌تواند به عنوان یک تست غیرمخرب در سازه‌های بتنی به‌کار گرفته شده ولی به دلیل پدیده خوردگی و به تبع آن ترک در بتن و تغییر مشخصات مصالح یک چالش جدی در اندازه‌گیری به روش نشر فراصوتی وجود داشته که ناشی از تاثیر میکروترک‌ها روی دامنه سیگنال‌های امواج فراصوتی می‌باشـد. در ایـن تحقیـق یـک لولـه بتنـی پیش‌تنیده که در آزمایشگاه دانشکده سازه دانشگاه میدل ایست ساخته شده تحت اثر خوردگی تسریع شده قرار گرفته سپس تضعیف دامنه، مسیر انتشار امواج و پارامتر فرکانسی قبل و بعد از خوردگی با استفاده از منبع نشر سوو- نیلسن مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده آن است که با توجه به این‌که دامنه و مسیر انتشار امواج قبل و بعد از خوردگی دچار تغییرات قابل توجهی نشده و قابل صرف نظر می‌باشد روش نشر فراصوتی می‌تواند بعنوان روشی دقیق برای ارزیابی خوردگی در اینگونه سازه‌ها به‌کار رفته که مورد بحث قرار گرفته است.

Investigation of attenuation and acoustic wave propagation path caused by corrosion for reliability assessment of pre-stressed pipe monitoring using Acoustic Emission technique

Reza Goldaran[1*], Mohammad 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. 5173818573, Tabriz, Iran, goldaran_r@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 December 2016
Accepted 10 January 2017
Available Online 13 February 2017

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

ABSTRACT

Catastrophic failures due to corrosion are among the most common phenomena in pre-stressed concrete pipeline, which has been reported in Iran as well. Structural health monitoring, quick assessment and timely detection of corrosion in its early stages with active in-situ sensors could prove vital in avoiding such hazards. Acoustic emission is a non-destructive technique that can be used to give better insight on the structural state of such concrete structures. However, the interpretation of the AE measurements is quite challenging and may actually be even more difficult when the concrete is cracked, which would affect the material and structural properties of concrete pipes. The amplitude distribution of the acquired signals is very sensitive to micro-cracking. This paper presents the results of an experiment conducted in the laboratory of Middle East Technical University on pre-stressed concrete pipe for determining the amplitude attenuation and path of acoustic wave propagation and frequency spectrum before and after corrosion using Hsu-Nielsen pencil-lead break source and applying accelerated corrosion. The results from the laboratory tests indicate that since the changes in amplitude and wave propagation path is negligible before and after corrosion, the AE measurements can be used as an accurate method for tackling the problem mentioned above. Then the performed AE measurements are reported and results discussed.

1- مقدمه

تا به‌حال ثابت شده که لوله‌های بتنی پیش‌تنیده[1] یکی از پایاترین لوله‌ها برای قطرهای بالاتر است زیرا در مقابل فشار داخلی و بارهای خارجی شدید مقاومت بسیار زیادی از خود نشان می‌دهند. این لوله‌ها به‌طور گسترده در چندین نقاط دنیا مثل ایالات متحده، اروپا، خاورمیانه، استرالیا، امریکای

[1] Pre-stressed Concrete Cylinder Pipe

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, Investigation of attenuation and acoustic wave propagation path caused by corrosion for reliability assessment of pre-stressed pipe monitoring using Acoustic Emission technique, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 306-314, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.33.5]

جنوبی، آفریقای شمالی و چین برای انتقال آب و فاضلاب استفاده می‌شوند [1].

از پروژه‌های بسیار مهم در دنیا که از لوله‌های بتنی پیش‌تنیده مدفون برای انتقال آب استفاده شده، پروژه GMMR[1] در لیبی و خط انتقال شمال به جنوب[2] در چین می باشد [2]. این نوع سازه‌ها از جمله سازه‌هایی هستند که در معرض پدیده خوردگی هستند، با این وجود بزرگترین مسئله‌ای که مهندسین با آن مواجه هستند پیدا کردن بهترین روش برای شناسایی خوردگی و جلوگیری از خرابی خطوط لوله می‌باشد [3].

در طرح آبرسانی شهر تبریز از زرینه رود به طول 180 کیلومتر و دبی 5 مترمکعب بر ثانیه که یکی از بزرگ‌ترین و طولانی‌ترین خطوط انتقال آب کشور می‌باشد و از نظر اجتماعی، سیاسی و اقتصادی از اهمیت ویژه و منحصر بفردی برخوردار است، 110 کیلومتر لوله بتنی پیش‌تنیده مسلح با قطر 2000 میلی‌متر به‌کار رفته است. پس از مدت نه چندان طولانی از آغاز بهره‌برداری چند مورد ترکیدگی در بخش‌هایی از مسیر مشاهده گردید که علت آن خوردگی میلگردهای حلقوی بوده است.

در پروژه توسان واتر[3] واقع در آریزونای ایالات متحده که در شبکه آبرسانی آن از 21 مایل لوله بتنی پیش‌تنیده به قطر 48 الی 96 اینچ استفاده شده، در سال 1999 با ترکیدن یک لوله 96 اینچی 4 میلیون دلار خسارت به کشور وارد شده است [1]. همچنین دپارتمان حمل و نقل کشور انگلستان هزینه تعمیر ناشی از خوردگی در سازه‌های بتنی را سالانه 755 میلیون پوند برآورد کرده است [4].

با توجه به خسارت‌های قابل توجه وارد شده در نتیجه خوردگی ضرورت دارد که با رفتارسنجی مناسب سازه‌ها و تشخیص زودهنگام آنها خسارت‌ها را به حداقل رساند. در این زمینه از تست‌های غیرمخرب (NDT[4]) می‌توان بهره جست ولی در بسیاری از انواع این تست‌ها می‌بایست بهره‌برداری از سازه را در طول تست متوقف نمود و بعضی دیگر لزوم دسترسی به قسمت اعظم سازه را طلب نموده، همچنین اکثر این‌گونه تست‌ها امکان پایش مداوم و زمان واقعی در طول زمان را ندارند. در موارد بسیاری نیز هر کدام از این روش‌ها به‌تنهایی جوابگو نبوده و بکار بردن ترکیبی از آنها ضروری می‌باشد.

در این تحقیق از روش نشر فراصوتی (AE[5]) برای پایش استفاده شده که امروزه در بسیاری از صنعت‌ها از جمله گاز، نفت، هوا و فضا و... کاربرد داشته و در حال توسعه می‌باشد. یکی از مزایای این روش کنترل مداوم، پیوسته، زمان واقعی و آنلاین سازه‌ها می‌باشد، بدین صورت که به توسعه خرابی بسیار حساس بوده لذا می‌توان کل سازه را با یک‌بار تعبیه حسگرهای AE در طول زمان حتی بصورت بی‌سیم[6] و بصورت مستمر رفتارسنجی نموده و در مرحله شروع خرابی آنها را شناسایی کرد. مزیت دیگر این روش اقتصادی بودن آن بوده که پارامتر بسیار اساسی و بنیادی در تمامی پروژه‌ها می‌باشد، همچنین از این روش می‌توان برای تشخیص عیوب در حین تولید اجزاء سازه در کارخانه‌ها نیز استفاده نمود.

پایش سازه‌ها در کشور ایران در مورد لوله‌های بتنی پیش‌تنیده در مرحله آغاز می‌باشد لذا هدف از این مطالعه تعمیم رفتارسنجی با استفاده از تکنیک AE به لوله‌های مذکور بوده که در این میان استهلاک سازه به مرور زمان باعث تضعیف سیگنال‌های حاصله و همچنین تغییر مسیر انتقال امواج فراصوتی شده که تفسیر نتایج را با چالش جدی مواجه و در برخی مواقع غیرممکن می‌سازد [5]، بنابراین با پی بردن به میزان تضعیف و مسیر انتقال امواج فراصوتی در طول زمان پایش می‌توان نتایج حاصله را با دقت لازم در ارزیابی خرابی مورد استفاده قرار داد.

الگوی استفاده شده در این تحقیق لوله‌های پیش‌تنیده کارخانه شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی می‌باشد بدین صورت که نمونه مشابه لوله‌های فوق به طریق مشابه در آزمایشگاه ساخته شده و تحت خوردگی تسریع شده قرار گرفته که سیگنال‌های حاصل از خوردگی با روش AE ثبت و پردازش شده‌اند. در انتها پدیده تضعیف ناشی از خوردگی با استفاده از آزمایش PLB[7] و فاصله زمانی سیگنال‌های دریافت شده بوسیله حسگرهای پیزوالکتریک ارزیابی شده و دقت حاصله، کارامدی این روش را در لوله‌های بتنی پیش‌تنیده نشان می‌دهد.

2- مکانیسم خوردگی فولاد در بتن

در حضور اکسیژن، آب و یون کلر در بتن واکنش‌های آندی مطابق معادله‌های 1و 2، و کاتدی مطابق معادله‌های 3 و 4 بوقوع می پیوندد.

$$Fe+2Cl^- \rightarrow FeCl_2+2e^- \rightarrow Fe^{2+}+2Cl^-+2e^- \quad (1)$$

نتیجه نهایی فوق بصورت واکنش معادله 2 می‌باشد.

$$Fe \rightarrow Fe^{2+}+2e^- \quad (2)$$

معادله 3 احیای هیدروژن را نشان می‌دهد و الکترون‌هایی که در قسمت آند تولید می‌شوند با اکسیژن و آب به‌صورت معادله 4 یون هیدروکسید تولید می‌کنند.

$$2H^++2e^- \rightarrow H_2 \quad (3)$$

$$O_2+2H_2O+4e^- \rightarrow 4OH^- \quad (4)$$

مطابق معادله 5 و شکل 1 یون هیدروکسید بطرف آند حرکت کرده و با یون آهن هیدروکسید آهن تشکیل می‌دهد.

$$2Fe^{2+}+4(OH)^- \rightarrow 2Fe(OH)_2 \quad (5)$$

واکنش‌های اکسیداسیون دیگری توسط هیدروکسید آهن در حضور اکسیژن و آب می‌تواند در بتن رخ دهد که نتایج آن‌ها تشکیل اکسید آهن آب‌دار (هماتیت) ($Fe_2O_3.3H_2O$) بوده، که همان زنگ آهن شناخته شده به رنگ قرمز- قهوه‌ای و مگنتیت مشکی (Fe_3O_4) حاصله از مگنتیت هیدراته سبز ($Fe_3O_4.H_2O$) می‌باشد.

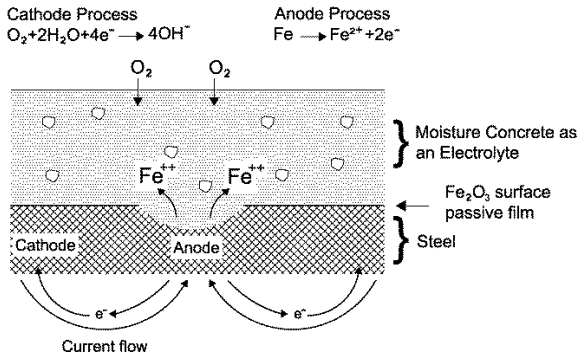

Fig. 1 Mechanism of corrosion of steel in concrete [6]

شکل 1 مکانیسم خوردگی آهن در بتن [6]

[1] Great Man Made River
[1] South-to-North Water Diversion
[3] Tucson Water
[4] Non-Destructive Test
[5] Acoustic Emission
[6] Wireless
[7] Pencil Lead Break

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.33.5]

از آنجایی‌که حجم زنگ آهن تولید شده بسیار زیادتر (حدود 4 تا 6 برابر) از آهن خالص در حالت اولیه خود بوده باعث ترک پوشش بتنی شده، همچنین به علت کاهش سطح مقطع فولاد احتمال گسیخته شدن سازه وجود خواهد داشت [6].

3- نشرفراصوتی

به انرژی الاستیک آزاد شده از مواد تحت تغییر شکل نشر فراصوتی گفته می‌شود، همچنین نشر فراصوتی موج گذرای الاستیک تولید شده در اثر آزاد شدن سریع انرژی از منابع مشخصی در درون ماده است [7]. انرژی الاستیک آزاد شده از میان اجزا و سازه عبور کرده و به سطح اجزاء، جایی که ترانسدیوسر پیزوالکتریکی در آنجا نصب شده، می‌رسد سپس این ترانسدیوسرها تغییر مکان سطح را در قسمت‌های مختلف شناسایی کرده و به یک سیگنال الکتریکی کاربردی تبدیل می‌کنند. بوسیله آنالیز موج حاصله بر اساس اطلاعاتی نظیر دامنه، انرژی و مدت زمان رسیدن که از شکل موج قابل استخراج است شدت و محل منبع AE می‌تواند ارزیابی گردد. شکل 2 به صورت شماتیک روش شناسایی در تکنیک AE [8] و شکل 3 سیستم پایش به روش AE را نشان می‌دهد [9].

تست AE اغلب به عنوان یک روش حساس و دقیق در بین تست‌های غیرمخرب (NDT) تلقی می‌گردد زیرا تنها روشی است که قدرت شناسایی خرابی را در هر مرحله از وقوع آن در طول زمان دارا می‌باشد.

روش نشر فراصوتی می‌تواند برای رفتارسنجی گستره وسیعی از انواع سازه‌ها و مواد مانند فلزها و غیرفلزها و تحت بارهای مختلف به کار گرفته

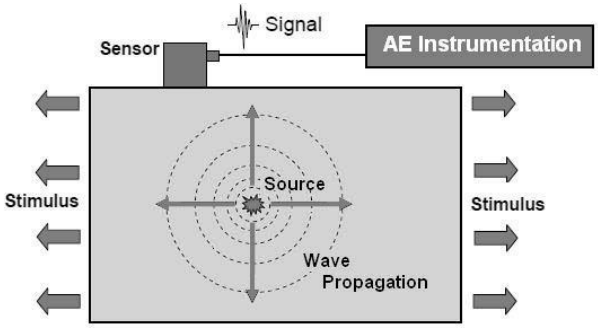

Fig. 2 Acoustic emission method [8]

شکل 2 روش نشر فراصوتی [8]

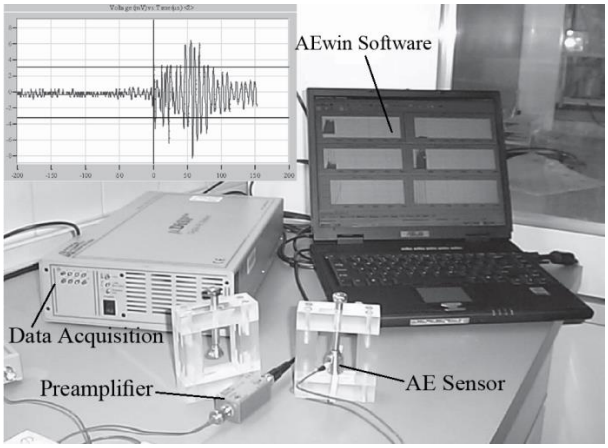

Fig. 3 Acoustic emission system [9]

شکل 3 سیستم شناسایی بوسیله نشر فراصوتی [9]

شود، دو تفاوت عمده بین روش AE و سایر روش‌های NDT وجود دارد [10,7]:

1- در روش AE انرژی مورد نیاز به منظور شناسایی از خود ماده تحت کنترل تولید می‌شود.

2- کنترل منظم فرسایش تدریجی سازه‌ها در طول زمان با این روش امکان‌پذیر است.

محدودیت روش AE شامل موارد ذیل است [10,7]:

1- قابلیت تکرار[1]: AE ناشی از تنش منحصر بفردی بوده که می‌تواند ناشی از بارگذاری‌های متفاوت باشد، لذا در یک خرابی باید بتوان پارامترهای لازم را شناسایی نمود به این دلیل که همان خرابی مجددا قابل تکرار نمی‌باشد.

2- تضعیف[2]: در طول آزمایش موج AE در اجزای سازه ممکن است تضعیف شود.

3- نویز[3]: نویزهای موجود در محیط ممکن است تست AE را تحت تاثیر قرار دهد.

اصول و پایه‌های اخیر تکنولوژی AE مربوط به تحقیقات ارزنده محقق آلمانی جوزف کایزر[4] می باشد که در سال 1950 توسط ایشان گزارش شد. پدیده برگشت‌پذیری[5] مهم‌ترین یافته ارزشمند او بوده که به اثر کایزر معروف معروف است، علاوه بر آن او توانست انتشار امواج پیوسته و ناگهانی را از هم متمایز سازد. در اوایل دهه 1960 تکنیک AE نهایتاً بعنوان روش نوین تست غیرمخرب در میان سایر روش‌های NDT قرار گرفت.

4- پارامترهای اصلی موج AE

در شکل 4 پارامترهای AE که در ادامه برخی از آن‌ها معرفی می‌شوند نشان داده شده است [11].

4-1- اتفاق یا رویداد[6]

به هریک از سیگنال‌های منابع انتشار مجزا مطابق شکل 4 که در اثر تغییر در اجزاء و مواد تولید می‌شوند اتفاق یا رویداد گفته می‌شود [7].

4-2- شمارش ضرب آهنگ[7]

تعداد دفعاتی که یک سیگنال خط آستانه[8] از پیش تنظیم شده را قطع می‌کند شمارش ضرب آهنگ گفته می‌شود که در شکل 4 نمایش داده شده و بستگی به فرکانس ترانسدیوسر، مشخصات میرایی ترانسدیوسر، مشخصات میرایی سازه و سطح خط آستانه دارد [7].

4-3- دامنه سیگنال AE

دامنه سیگنال ولتاژ پیک در شکل موج سیگنال بوده که به شدت موج انتشاری منبع AE در ماده بستگی دارد. اندازه‌گیری دامنه پیک با استفاده از آمپلی‌فایر لگاریتمی که بتواند بازه وسیعی از اندازه دامنه‌های سیگنال را تحت پوشش قرار دهد انجام می‌گیرد. واحد متداول برای اندازه گیری دامنه در سیگنال صوتی دسی بل (dB) بوده که بصورت فرمول شماره 6 بیان شده و در AE سطح مبنای صفر دسی بل بعنوان یک سیگنال یک میکرو ولتی در ترانسدیوسر قبل از هرگونه تقویتی تعریف می شود [7].

[1] Repeatability
[2] Attenuation
[3] Noise
[4] Josef Kaiser
[5] Irreversibility
[6] Hit
[7] Count
[8] Threshold

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.33.5]

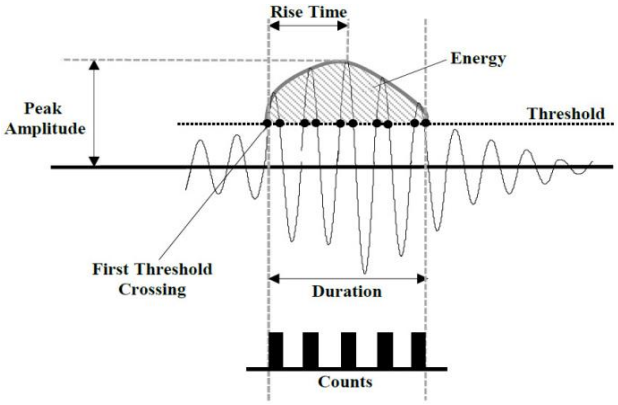

Fig. 4 Main features of AE waveform [11]

شکل 4 پارامترهای اصلی موج AE [11]

$$N_{\mathrm{dB}} = 10\log_{10}(\frac{P}{P_0}) \quad (6)$$

5- کاربرد روش نشر فراصوتی برای رفتارسنجی بتن

مهمترین کاربرد AE برای بتن در اواخر دهه 1970 شروع شد بدین صورت که این تکنیک برای فلزات توسعه یافت سپس تغییراتی در آن صورت گرفته و برای مواد ناهمگن نیز بکار برده شد. محققان متعددی نشان داده‌اند که تکنیک AE می‌تواند برای بتن‌های مسلح نظیر پل‌ها، سدها و ساختمان‌ها به‌کار رود. با استفاده از آنالیز شکل موج[1] بدست آمده که اطلاعاتی نظیر دامنه، انرژی موج و مدت زمان طی شده توسط موج را بدست می‌دهد میتوان موقعیت منبع و شدت AE را مورد ارزیابی قرار داد [10].

موفقیت روش AE برای سازه سدها در سال 1998 توسط مینمورا و همکاران [12]، سال 2000 توسط باند و همکاران [13] و سال 2006 توسط شیوتانی [14] به اثبات رسیده است، همچنین کارایی این روش در پل‌های بتنی در سال 2010 توسط نِیر [15]، 2007 توسط یویاما [16] و2011 توسط یوو [17] گزارش شده است. علاوه بر آن مراحل خرابی بتن مسلح شده با الیاف فولادی تحت خمش در سال 2011 توسط آگِلیس [18] مطالعه و طبقه‌بندی اشکال و حالات مختلف ترک در بتن [19] مورد بررسی قرار گرفته است. در سال 1999 رابطه میان میکروترک و ماکروترک‌ها به‌روش AE توسط لندیس [20] شناسایی گردیده است. در سال 2007 با استفاده از روش AE مراحل خوردگی میلگرد در بتن مسلح مطالعه گردید [22,21].

در سال 2013 از روش AE برای شناسایی خوردگی میله فولادی و کابل در داخل محلول تسریع کننده خوردگی استفاده و نشان داده شد که پنج مرحله تا گسیختگی فولاد با این روش قابل شناسایی است، مرحله اول تشکیل حباب‌های هیدروژن، مرحله دوم تشکیل فیلم اکسیدی، مرحله سوم شکست لایه اکسیدی، مرحله چهارم تشکیل مجدد حباب‌های هیدروژن و مرحله آخر گسیختگی فولاد می‌باشد [23].

در سال 2016 از تکنیک AE برای شناسایی خوردگی سازه‌های صنعتی در زمان بهره‌برداری و نگهداری استفاده شد [24]، همچنین این روش برای شناسایی ویژگی ترک‌های ناشی از خوردگی تحت تنش در مقطع فولادی توخالی و ضد زنگ نوع 304 [25] و پایش رشد ترک ناشی از خوردگی در رویه بتنی سازه‌های بتنی مسلح [26] به‌کار رفته است.

[1] Waveform

6- روش تولید لوله های پیش تنیده در کارخانه لوله سازی آذرشهر

ابتدا میلگردهای طولی در قالب جاگذاری و با نیروی تعیین شده کشیده و بعد از ثابت کردن آنها مجموعه قالب با میلگردها بر روی دستگاه اسپینینگ قرار گرفته و بتن ریزی در حین دوران قالب صورت می‌گیرد که این عمل باعث متراکم شدن بتن می‌گردد. به این عمل تراکم به روش سانتریفوژ گفته شده که سرعت دوران قالب 185 دور در دقیقه می‌باشد، بعد از اتمام بتن‌ریزی بتن تر همراه قالب به داخل اتاق بخار برای عمل آوری وکسب مقاومت لازم حمل شده و سپس لوله مذکور مطابق شکل 5 بر روی دستگاه رادیال قرار گرفته و با آرماتورهای پرکربن با مقاومت بالا با اعمال نیروی کششی بر مقطع میلگرد متناسب با فشار کارکرد خط انتقال دورپیچی می‌شود. در این مرحله بتن هسته لوله پس تنیده می‌شود.

در گام بعدی مطابق شکل 6 لوله‌ها در دستگاه پوشش بتنی قرار گرفته و برای حفاظت از خوردگی آرماتورهای دورپیچ در مقابل عوامل محیطی با ملاتی که از مصالح ریزدانه تهیه میشود پوشش داده می‌شوند.

6-1- مشخصات فنی لوله های بتنی پیش تنیده

عیار بتن هسته و پوشش بتنی به ترتیب 480 و 620 کیلوگرم سیمان در متر مکعب بوده که حداقل مقاومت فشاری 28 روزه نمونه مکعبی بتن هسته

Fig. 5 Pre-stressing of concrete pipe with spiral rebar

شکل 5 پیش تنیده کردن لوله با میلگردهای دورپیچ

Fig. 6 The pouring of mortar

شکل 6 بتن ریزی ملات رویه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.33.5]

60 مگاپاسکال و دانه بندی مصالح بتن هسته از 0 الی 20 میلی‌متر و پوشش از 0 الی 8 میلی‌متر می‌باشد.

نوع میلگردهای دورپیچ و طولی از نوع مقاومت بالا[1] با حد گسیختگی 1670 نیوتن بر میلی متر مربع بوده که میزان مصرف آن در لوله 6 متری با قطر 2000 میلی‌متر و میلگرد نمره 7 در حدود 3000 متر می‌باشد. طول مفید هر شاخه لوله بتنی پیش‌تنیده 6 متر بوده و ضخامت پوشش بتنی روی میلگردهای دورپیچ شده حداقل 250 میلی‌متر می‌باشد.

7- مدل آزمایشگاهی

7-1- ساخت مدل

نمونه‌ای مطابق شکل 7 در آزمایشگاه طبق الگوی کارخانه لوله سازی آذرشهر ساخته شده، با این تفاوت که بجای هسته بتنی مسلح از لوله بتنی غیر مسلح تولیدی کارخانه اُزلَم بتن 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 600 کیلوگرم بر مترمکعب سیمان، مقاومت فشاری استوانه‌ای 28 روزه 45 مگاپاسکال و به ابعاد 360x440x30 میلی‌متر روی لوله بتن‌ریزی شده است. برای اعمال خوردگی یک استخر مطابق شکل 7 روی رویه بتنی و 2 عدد از حسگرهای AE روی بتن و 2 عدد دیگر روی صفحه فلزی که به منظور حفاظت کاتدیک در لوله‌های اصلی وجود دارد تعبیه شده است.

7-2- سیستم اندازه‌گیری AE

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 یو- اس- بی به نوت بوک قابل اتصال می‌باشد و 4 سیستم که دارای 4 کانال بوده، می‌تواند به صورت موازی به‌کار گرفته شود. نرم افزار AE مورد استفاده AEwin بوده و از حسگرهای پیزوالکتریکی شرکت پَک از نوع PK-15I با فرکانس تشدید 150 kHz برای ثبت سیگنال‌ها استفاده شده است.

برای ارزیابی تضعیف دامنه تنها از 4 عدد حسگر S4,S3,S2,S1 مطابق شکل 7 استفاده شده که تنظیمات هریک با توجه به این‌که روی بتن یا فلز نصب می‌گردد متفاوت و مطابق جدول 1 می‌باشد، برای تمامی حسگرها خط آستانه برابر با 30 dB، ضریب بزرگ‌نمایی سیگنال ورودی برابر با 40 dB، طول رویداد برابر با 2k و از یک فیلتر میان‌گذر 20 kHz – 1 MHz استفاده شده است.

7-3- خوردگی تسریع شده

در کار آزمایشگاهی حاضر برای اعمال خوردگی از روش تسریع شده مطابق شکل 8 استفاده شده که برای این منظور یک استخر به ابعاد 20x36 سانتی‌متر در روی رویه بتنی ساخته شده و با محلول 4 درصد NaCl که بعنوان الکترولیت می‌باشد پر شده است. یک صفحه فلزی به ابعاد 40x300x3 میلی‌متر بعنوان کاتد بر روی سطح بتن رویه تکیه داده شده است.

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

[1] High-tensile

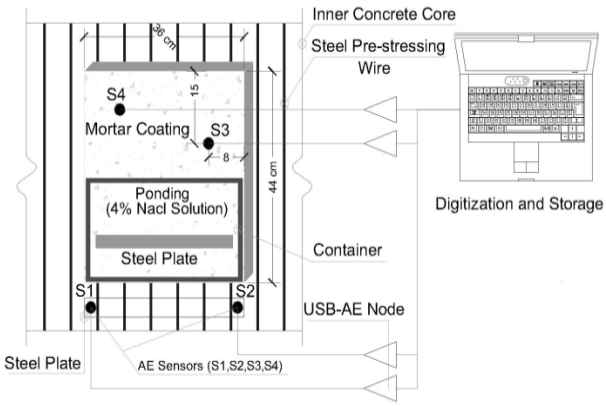

Fig. 7 Schematic view of the experimental sample

شکل 7 نمای شماتیک نمونه آزمایشگاهی

جدول 1 تنظیمات پارامترهای AE

Table 1 AE parameter setting

حسگر	PDT [2] (µs)	HDT [3] (µs)	HLT [4] (µs)	نرخ نمونه‌برداری (MSPS [5])
1	400	800	65000	1
2	400	800	65000	1
3	50	100	65000	1
4	50	100	65000	1

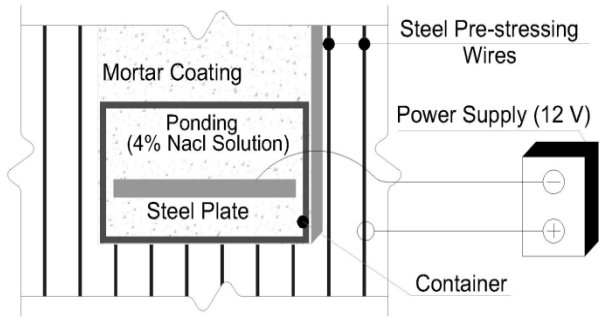

Fig. 8 Overview of applied accelerated corrosion

شکل 8 نمای کلی از اعمال خوردگی تسریع شده

جریانی با چگالی 2000 میکرو آمپر بر سانتی‌متر مربع بین آند و کاتد برقرار شده است. شکل 9 نمونه ساخته شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

7-4- فرضیات آزمایش

مقیاس مدل آزمایشگاهی نزدیک به مقیاس صنعتی بوده ولی در برخی موارد با مقیاس صنعتی متفاوت و عملکردها یکسان فرض شده که در ذیل به آن‌ها اشاره می‌شود.

الف) در واقعیت، میلگردهای رویه به‌صورت دورپیچ و با گام 2 سانتی‌متر که گام مذکور متناسب با قطر لوله تغییر می‌کند دورپیچ می‌شود ولی در مدل ساخته شده میلگردها به فواصل 6 سانتی‌متر و بصورت حلقوی و مجزا بسته شده است و با توجه به این‌که در زیر این میلگردها صفحه فلزی حفاظت کاتدیک وجود داشته و میلگردها را به‌هم متصل می‌سازد لذا از لحاظ انتقال موج تغییر چندانی وجود نخواهد داشت.

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.33.5]

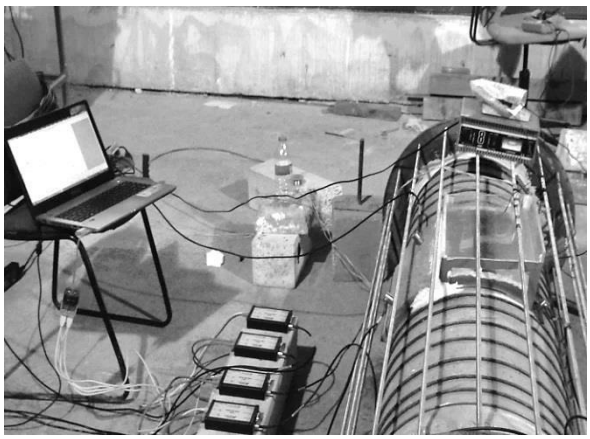

Fig. 9 The experimental sample made in laboratory

شکل 9 نمونه ساخته شده در آزمایشگاه

ب) در مقیاس صنعتی در هسته بتنی لوله میلگردهای طولی وجود داشته و با توجه به این‌که خوردگی در عمل در میلگردهای رویه به‌وقوع پیوسته و در میلگردهای هسته این پدیده صورت نمی‌گیرد در مقیاس آزمایشگاهی از این میلگردها صرف‌نظر شده است.

ج) در عمل لوله‌ها در خاک مدفون بوده ولی در مقیاس آزمایشگاهی غیر مدفون و در فضای آزاد تست شده است.

8- بحث و بررسی

در این قسمت به دو مورد از مسائل اساسی که پایش سازه به‌روش AE را در طول دوران بهره‌برداری به‌دلیل استهلاک اعضای تشکیل دهنده با چالش جدی مواجه ساخته و مورد دیگری به‌نام پارامتر فرکانسی پرداخته می‌شود. یکی از این موارد تضعیف دامنه موج‌های فراصوتی و دیگری تغییر در مسیر اولیه انتقال امواج از منبع انتشار تا حسگر در اثر استهلاک اعضاء بوده که چنان‌چه این پدیده‌ها به درستی شناسایی نگردند باعث عدم شناسایی صحیح خرابی و تخمین نادرست محل وقوع آن می‌گردد.

8-1- تغییر در مسیر انتشار امواج

قبل از اعمال خوردگی مطابق شکل 10 رویه بتنی به ابعاد 40x40 میلی‌متر شبکه‌بندی و محورهای عمود بر هم با حروف‌های A تا I و اعداد 1 الی 11

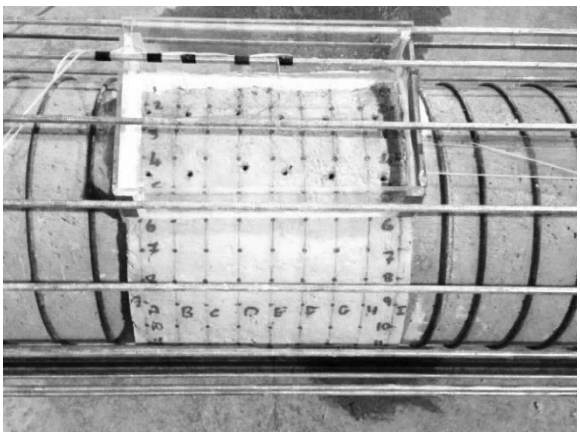

Fig. 10 gridlines on mortar surface

شکل 10 شبکه‌بندی رویه بتنی

نام‌گذاری و سپس آزمایش PLB در کل نقاط شبکه صورت گرفته است.

آزمایش PLB (شکست نوک مداد) در روی نقاط شبکه 3 بار تکرار شده و با توجه به این‌که نتایج بسیار به‌هم نزدیک بوده‌اند از میانگین آن‌ها برای ارزیابی استفاده گردیده است.

به منظور ارزیابی مسیر انتشار امواج از روش TOA[1] استفاده شده است، بدین طریق که زمان رسیدن سیگنال ناشی از PBL به هریک از حسگرها ثبت شده و تفاضل زمان دو به دوی سه حسگر S1 و S2 و S3 قبل و بعد از خوردگی در 3 نقطه C2 ، G2 و E4 که در شکل 10 نیز نمایان است در جدول 2 نشان داده شده است.

با توجه به جدول 2 مشاهده می‌گردد اختلاف زمانی که حسگرها قبل و بعد از خوردگی در دریافت یک سیگنال از منبع مشخص دارند بسیار نزدیک به‌هم می‌باشند لذا می‌توان نتیجه گرفت که مسیر انتشار امواج در طول استهلاک سازه دچار تغییر قابل توجه نشده و می‌توان با روش‌های متداول منشاء خرابی را شناسایی و مکان‌یابی کرد.

8-2- تغییر در دامنه امواج

بعد از اعمال خوردگی تسریع شده که کاهش 20 درصدی در وزن میلگردها را به دنبال داشته است بطوری‌که گسیختگی در یکی از میلگردهای حلقوی بسیار نزدیک بود، بار دیگر آزمایش PLB در کل نقاط تکرار و نتایج دو محور 2 و 3 حاصل از حسگرهای شماره 1 و 3 (که به‌ترتیب بر روی فلز و بتن نصب شده‌اند) در اشکال 11 الی 14 نشان داده شده است.

با توجه به اشکال 11 الی 14 در رابطه با دامنه امواج ملاحظه می‌گردد که تغییرات بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر می‌باشد لذا می‌توان نتیجه گرفت که تا مرحله خرابی لوله‌ها سیگنال‌ها با همان شدت و انرژی قابل دریافت می‌باشند.

8-3- تغییر در فرکانس

طیف فرکانس سیگنال‌های ناشی از منبع سوو- نیلسن (PLB) قبل و پس از خوردگی با استفاده از تبدیل فوریه (FFT[2]) در نرم‌افزار متلب در تمامی نقاط شبکه روی سطح بتنی که نقاط مذکور در شکل 10 نیز دیده می‌شود به دست آمده و برای نقطه A2 در اشکال 15 تا 16 برای حسگر نصب شده بر روی صفحه فلزی (شماره 1) و برای همان نقطه در اشکال 16 تا 18 برای حسگر نصب شده بر روی رویه بتنی (شماره 3) نشان داده شده است.

همان‌طوری‌که در اشکال 15 و 16 ملاحظه می‌گردد حسگری که بر روی صفحه فلزی نصب شده است تغییر و کاهش در فرکانس غالب را در حدود 100 kHz نشان داده به طوری‌که فرکانس غالب قبل از خوردگی حوالی 150 kHz و پس از خوردگی میلگردها 50 kHz می‌باشد.

با دقت در اشکال 17 و 18 ملاحظه می‌گردد حسگری که بر روی سطح بتنی نصب شده است تغییرات در فرکانس غالب در حد قابل صرف‌نظر را نشان می‌دهد به طوری‌که فرکانس غالب قبل از خوردگی حوالی 50 kHz بوده که پس از خوردگی نیز در همان مقدار باقی مانده است.

9- نتیجه‌گیری

کار آزمایشگاهی حاضر تاثیر استهلاک لوله‌های بتنی پیش‌تنیده در اثر خوردگی با گذشت زمان را روی دامنه، مسیر انتشار و فرکانس امواج فراصوتی نشان می‌دهد. در سازه‌های بتنی غیر پیش‌تنیده که یک سازه

[1] Time of Arrival
[2] Fast Fourier Transform

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.33.5]

جدول 2 تفاضل زمان رسیدن سیگنال‌ها به حسگرها

Table 2 Time difference of arrival between sensors

شماره حسگر	S1 و S2	S1 و S3	S2 و S3	S1 و S2	S1 و S3	S2 و S3	S1 و S2	S1 و S3	S2 و S3
شماره گره	C2	C2	C2	G2	G2	G2	E4	E4	E4
تفاضل زمان رسیدن قبل از خوردگی (μs)	52	6	46	76	29	46	33	13	45
تفاضل زمان رسیدن بعد از خوردگی (μs)	50	7	43	73	26	48	36	11	41

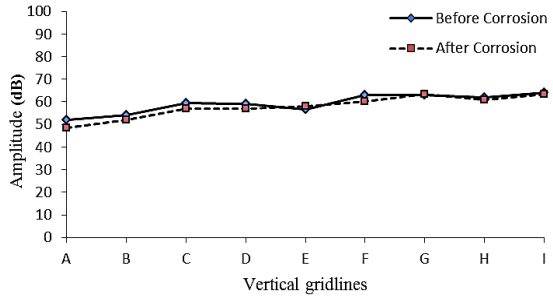

Fig. 11 The amplitude of PLB test on axis 2 recorded by sensor 1

شکل 11 دامنه‌های PLB روی نقاط محور 2، ثبت شده توسط حسگر 1

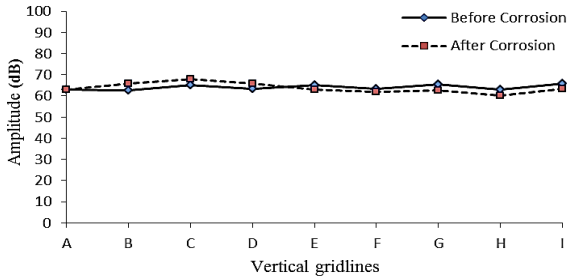

Fig. 12 The amplitude of PLB test on axis 2 recorded by sensor 3

شکل 12 دامنه‌های PLB روی نقاط محور 2 ، ثبت شده توسط حسگر 3

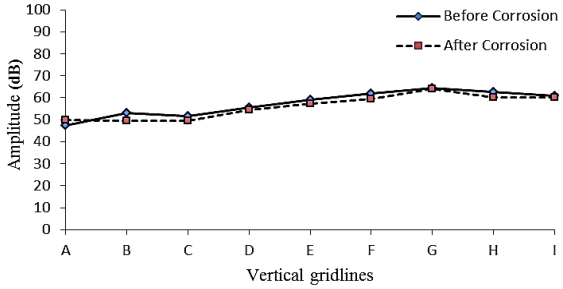

Fig. 13 The amplitude of PLB test on axis 3 recorded by sensor 1

شکل 13 دامنه‌های PLB روی نقاط محور 3 ، ثبت شده توسط حسگر 1

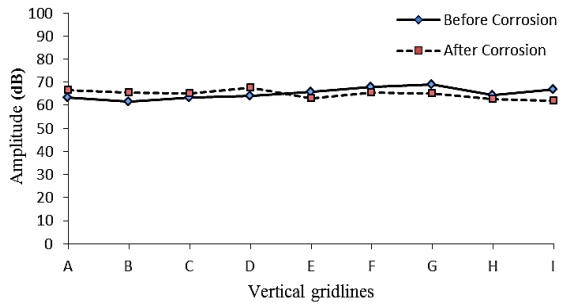

Fig. 14 The amplitude of PLB test on axis 2 recorded by Sensor 3

شکل 14 دامنه‌های PLB روی نقاط محور 3 ، ثبت شده توسط حسگر 3

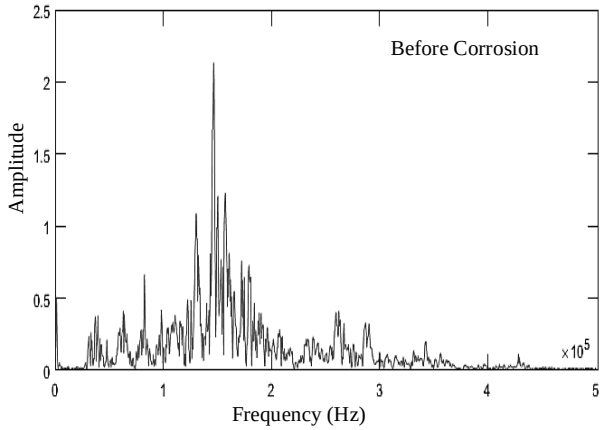

Fig. 15 Frequency spectrum of PLB on node A2 recorded by sensor 1

شکل 15 طیف فرکانسی ثبت شده توسط حسگر 1 ناشی از PLB در گره A2

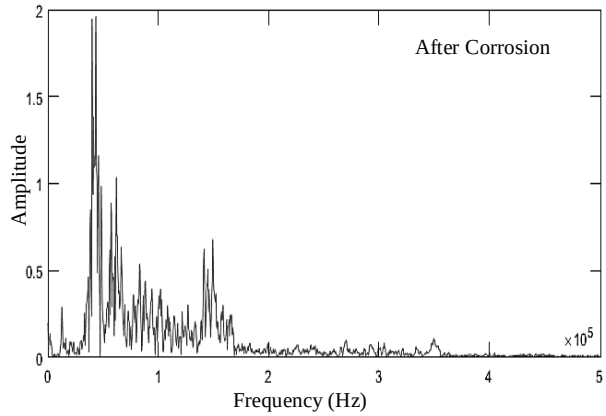

Fig. 16 Frequency spectrum of PLB on node A2 recorded by sensor 1

شکل 16 طیف فرکانسی ثبت شده توسط حسگر 1 ناشی از PLB در گره A2

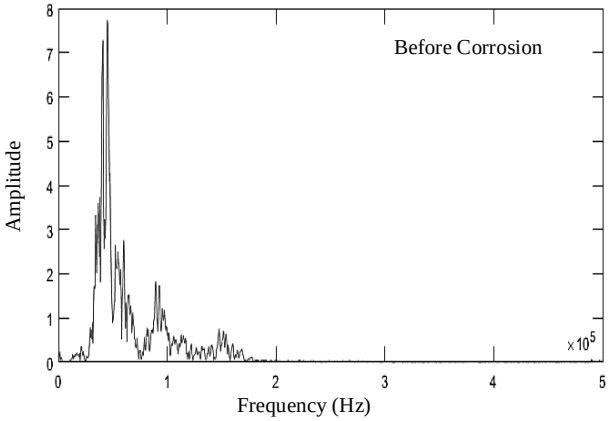

Fig. 17 Frequency spectrum of PLB on node A2 recorded by sensor 3

شکل 17 طیف فرکانسی ثبت شده توسط حسگر 3 ناشی از PLB در گره A2

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.33.5]

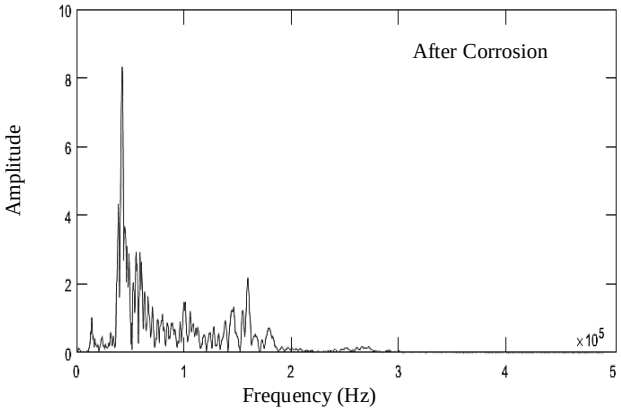

Fig. 18 Frequency spectrum of PLB on node A2 recorded by sensor 3

شکل 18 طیف فرکانسی ثبت شده توسط حسگر 3 ناشی از PLB در گره A2

ترکیبی از بتن و میلگرد می‌باشد در اثر خوردگیِ میلگرد، رویه بتنی ترک برداشته لذا با رشد ترک‌ها دامنه و مسیر امواج، همچنین تعداد رویدادهای نشر فراصوتی دچار تغییرات شده و تفسیر نتایج را با مشکلی جدی مواجه می‌سازد، ولی چیزی که لوله‌های پیش‌تنیده را با سایر سازه‌های بتنی معمولی متمایز می‌سازد یکی مقاومت تسلیم و نهایی بسیار بالای میلگرد، قطر کم میلگرد و همچنین وجود نیروی پیش‌تنیدگی بالا در این میلگردها می‌باشد که در نتیجه با ایجاد حفره، شکاف و ترک بسیار ریز در میلگرد باعث گسیختگی می‌شود.

مقایسه دامنه و مسیر انتشار امواج فراصوتی قبل و بعد از پدیده خوردگی نشان دهنده این واقعیت است که تغییرات در پارامترهای مذکور در طول زمان استهلاک سازه قابل صرف‌نظر می‌باشند، همچنین تا لحظه گسیختگی میلگرد بر خلاف سایر سازه‌های بتنی معمول ترکی در رویه بتنی مشاهده نگردیده لذا تا لحظه آسیب جدی به لوله می‌توان سیگنال‌های ناشی از خرابی را با کیفیت و کمیت لازم و مورد انتظار دریافت کرد، همچنین با استناد به عدم تغییر در مسیر انتشار امواج می‌توان در طول مدت بهره‌برداری از سازه محل خرابی را با روش تفاضل زمان رسیدن (TDOA[1])، روش‌های هوش مصنوعی و یا سایر روش‌های ممکن مکان‌یابی کرد ولی چنان‌چه مسیر انتشار امواج دچار تغییر می‌شد، به تبع آن قابلیت اعتماد به مکان‌یابی محل خرابی نیز از بین می‌رفت.

یکی از پارامترهای مهم، مطالعه روی فرکانس ناشی از امواج حاصله از تست PLB در دو مرحله قبل و بعد از خوردگی میلگردها می‌باشد. سیگنال‌های حاصله از تمامی نقاط شبکه روی سطح بتن در نرم‌افزار متلب با استفاده از تبدیل فوریه از حوزه زمان به حوزه فرکانس تبدیل شده و فرکانس غالب آن‌ها شناسایی گردیده است.

نتایج نشان‌دهنده آن است که کاهش فرکانس در حسگرهای نصب شده روی صفحه فلزی کاملا محسوس بوده به طوری‌که فرکانسی که قبل از خوردگی و در لحظه شروع آزمایش حوالی 150 kHz بوده است به 50 kHz تقلیل یافته است ولی در حسگرهای نصب شده روی بتن فرکانس غالب در هر دو مرحله قبل و بعد از خوردگی میلگردها حوالی 50 kHz بوده و تغییری حاصل نگردیده است و این پدیده نشان می‌دهد امواجی که از محل خوردگی عبور می‌کنند از لحاظ فرکانسی دچار تغییر می‌شوند ولی حسگرهایی که در روی سطح بتن نصب شده‌اند امواج برای رسیدن به آن حسگرها می‌بایست یک مسیر در ماده بتنی را طی کرده و از آنجایی که بتن ماده‌ای پر از خلل و فرج ریز بوده و موجب پراکندگی امواج می‌شود عملکرد آن مانند فلز نبوده و فرکانس امواج مجدداً در خود بتن دچار تغییر می‌شوند.

از مطالعه پارامتر فرکانسی می‌توان به محل مناسب برای نصب حسگرها نیز پی برد به‌این صورت که برای شناسایی خوردگی با استفاده از تغییرات پارامتر فرکانسی می‌بایست از حسگر نصب شده بر روی صفحه فلزی که این صفحات در لوله‌ها به منظور حفاظت کاتدیک جاگذاری می‌شوند استفاده نمود.

10- فهرست علایم

N_{dB} دامنه سیگنال (dB)

P توان اندازه‌گیری شده (Nms^{-1})

P_0 توان مبنا (Nms^{-1})

11- تشکر و قدردانی

مراتب سپاسگزاری و قدردانی از دانشگاه میدل‌ایست به علت تامین تجهیزات و آزمایشگاه و همچنین آقای پروفسور دکتر آحمت تورر به خاطر راهنمایی‌های بسیار و مساعدت‌های بی‌شائبه اعلام می‌گردد.

12- مراجع

[1] J. Elliott, J. Stieb, M. Holley, An integrated dynamic approach to PCCP integrity management, *Proceedings of the 2006 Pipeline Division Specialty Conference*, Chicago, Illinois, United States, July 30 - August 2, 2006.

[2] H. Xiong, P. Li, Q. Li, FE model for simulating wire-wrapping during prestressing of an embedded prestressed concrete cylinder pipe, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 18, No. 5, pp. 624-636, 2010.

[3] S. K. Singh, *Corrosion studies on prestressing steel wires*, PhD Thesis, Imperial College London (University of London), London, 2000.

[4] 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.

[5] P. Van Hemert, S. Fennis-Huijben, D. Hordijk, Application of acoustic emission measurements in the evaluation of prestressed cast in-between decks, *15th European Bridge Conference*, London, United Kingdom, July 8-9, 2014.

[6] P. Schiessl, Corrosion of Steel in Concrete: Report of the Technical Committee 60 CSC, RILEM *(the International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures)*: Chapman & Hall, 1988.

[7] P. O. Moore, R. Miller, R. Hill, *Nondestructive Testing Handbook*, Volume 6, Acoustic Emission Testing, American Society for Nondestructive Testing, Inc., USA, 2005.

[8] H. A. Elfergani, R. Pullin, K. M. Holford, Damage assessment of corrosion in prestressed concrete by acoustic emission, *Construction and Building Materials*, Vol. 40, pp. 925-933, 2013.

[9] S. Rosner, Acoustic detection of cavitation Events in water conducting element of NORWAY spruce sapwood, *Journal of acoustic emission*, vol. 22, pp. 110-118, 2004.

[10] C. J. Hellier, *Handbook of nondestructive evaluation*, pp. 10.1-10.39, New York: McGraw-Hill, 2001.

[11] M. Ercolino, A. Farhidzadeh, S. Salamone, G. Magliulo, Detection of onset of failure in prestressed strands by cluster analysis of acoustic emissions, *Structural Monitoring and Maintenance*, Vol. 2, No. 4, pp. 339-355, 2015.

[12] O. Minemura, N. Sakata, S. Yuyama, T. Okamoto, K. Maruyama, Acoustic emission evaluation of an arch dam during construction cooling and grouting, *Construction and Building Materials*, Vol. 12, No. 6-7, pp. 385-392, 1998.

[13] L. J. Bond, W. F. Kepler, D. M. Frangopol, Improved assessment of mass concrete dams using acoustic travel time tomography,

[1] Time difference of arrival

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.33.5]

13,No. 1-2, pp. 65-72, 1999.

[21] Y. Kawasaki ,M. Kitaura, Y. Tomoda, M. Ohtsu, Corrosion process in reinforced concrete identified by acoustic emission, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. E2 (Materials and Concrete Structures), Vol. 67,No. 3, pp. 384-395, 2011.

[22] M. Ohtsu, Y. Tomoda, Corrosion process in reinforced concrete identified by acoustic emission, *Materials transactions*, Vol. 48, No.6, pp. 1184-1189, 2007.

[23] 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 Sciencei*, Vol. 8, No. 6, pp. 8356-8370, 2013.

[24] 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, 2016.

[25] 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.

[26] 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.

Construction and Building Materials, Vol. 14, No. 3, pp. 133-146, 2000.

[14] T. Shiotani, Evaluation of repair effect for deteriorated concrete piers of intake dam using AE activity, *Advanced Materials Research*, Vols. 13-14, pp. 175-180, 2006.

[15] A. Nair, C. Cai, Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case studies, *Engineering Structures*, Vol. 32,No. 6, pp. 1704-1714, 2010.

[16] S. Yuyama, K .Yokoyama, K. Niitani, M. Ohtsu, T. Uomoto, Detection and evaluation of failures in high-strength tendon of prestressed concrete bridges by acoustic emission, *Construction and Building Materials*, Vol. 21,No. 3, pp. 491-500, 2007.

[17] J. Yu, P. Ziehl, B .Zárate, J. Caicedo, Prediction of fatigue crack growth in steel bridge components using acoustic emission, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67,No. 8, pp. 1254-1260, 2011.

[18] D. Aggelis, D. Soulioti, N. Sapouridis, N. Barkoula, A. Paipetis, T. Matikas, Acoustic emission characterization of the fracture process in fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 25,No. 11, pp. 4126-4131, 2011.

[19] D. G. Aggelis, Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters, *Mechanics Research Communications*, Vol. 38,No. 3, pp. 153-157, 2011.

[20] E. N. Landis, Micro–macro fracture relationships and acoustic emissions in concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.33.5]