



Experimental and Numerical Investigation on the Reinforcement Cover to Concrete Surface Using Eddy Current

H. Esrafil¹, S. M. H. Seyedkashi¹, M. S. Safizadeh^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

² Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: Non-destructive testing is one of the techniques which is used to ensure the health in concrete structures. To reinforce a concrete column, it is necessary to know the number of embedded reinforcements in the concrete and the reinforcement cover to the concrete surface. In the present paper, the finite element method was employed to obtain the reinforcement cover to the concrete surface in a concrete column using Maxwell commercial software. Then, a measuring probe was designed and fabricated. In the presence of a coil with a ferrite core, the conductive reinforcement interacts with low-frequency electromagnetic waves. The location of the reinforcement could be estimated measuring effects of these waves on the concrete surface. The designed probe was investigated in different distances and frequencies. The reinforcement cover to the concrete surface could be estimated through variations of inductance and ohmic resistance of a coil in a constant frequency and voltage. The full factorial design of experiments method was applied to investigate influences of the reinforcement cover to concrete surface and frequency on ohmic resistance and inductance of the measurement probe and a regression model was proposed for effective parameters. Finally, a neural network was used to estimate the reinforcement cover to concrete surface based on the frequency and ohmic resistance of the measuring probe.

Review History:

Received: 20 Oct. 2018

Revised: 16 Jun. 2019

Accepted: 8 Jul. 2019

Available Online: 18 Aug. 2019

Keywords:

Reinforcement cover

Concrete surface

Measuring Probe

Eddy current

Ohmic resistance

1- Introduction

Non-destructive testing plays an important role in investigating concrete structures. These techniques are used to evaluate the structure, quality, and embedded substrates [1]. The cover meter is a device which is used to estimate the location of the reinforcement and the cover to the concrete surface [2]. Eddy current test with a low-frequency magnetic field is a well-known non-destructive testing technique which is featured well by authors [3, 4]. Using an eddy current probe and measuring ohmic resistance and inductance in a given frequency, reinforcement corrosion was evaluated in addition to the determination of reinforcement cover to the concrete surface [5]. A neural network could be used to obtain the depth and thickness of reinforcements embedded in the concrete. A wide range of reinforcement cover to concrete distance and also various reinforcement diameters were determined using neural networks [6].

2- Theory

The influence of eddy currents which are induced by the magnetic field on impedance and ohmic resistance of measuring probe could be calculated using Maxwell equations [7, 8].

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

where E is the electric field intensity (V/m), H is the magnetic field intensity (A/m), D is the electric flux density (C/m^2), B is the magnetic flux density (Wb/m^2 or T), J is the electric current density (A/m^2), ρ is the electrical charge density (C/m^3).

3- Finite Element Simulation of the Magnetic Field

In the present study, the eddy current package of the Maxwell software was used to obtain ohmic resistances and inductances of measuring probes in different reinforcement covers to the concrete surface. To simulate the experimental procedure using dominant equations of eddy current, the experiment geometry, material, and boundary condition applied to the software.

4- Experiments

Devices which were used in this study to measure reinforcement cover to the concrete surface include reinforced concrete samples, measuring probe, and electronic devices such as wave generator, digital multi-meter, oscilloscope, and LC-meter.

5- Design of Experiments

To evaluate the influences of distance and frequency on ohmic resistance and inductance of the measuring probe the full

*Corresponding author's email: safizadeh@iust.ac.ir



Table 1. Design of experiments

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Frequency (Hz)	5000	20000	50000	-
Distance (cm)	1	2	3	4

Table 2. Influences of frequency and distance on ohmic resistance of the measuring probe

Source	Sum of squares	Freedom degree	Mean of squares	Fischer number	P-value
Frequency	206224880	2	103112440	2784367.10	0.000
Distance	1218226	3	406075	10965.34	0.000
Frequency × Distance	1640182	6	273364	7381.70	0.000
Error	24	889	37		
Total	35	209084178			

factorial design of experiments with three replications was used which is presented in Table 1.

6- Results and Discussion

The influences of frequency and distance (reinforcement cover to the concrete surface) were evaluated. Considering these two parameters and also the design of experiments and replications, 36 tests were carried out in total. The outputs are ohmic resistance and inductance. It was determined that distance and frequency are not significant corresponding to the measuring probe inductance. However, considering that the P-value is lower than the significance level according to Table 2, all main effects and interactions of frequency and distance are significant corresponding to the ohmic resistance of the measuring probe.

Because the clearer results were obtained for ohmic resistance corresponding to the various distances in the frequency of 50 kHz, a quadratic regression equation with the correlation factor, R^2 , of 0.97 was proposed to estimate ohmic resistance of the measuring probe in 1, 2, 3, and 4 cm distances as follows.

$$R = 7112 - 1372d + 202.7d^2 \quad (5)$$

Where R is the ohmic resistance of the measuring probe in Ohm and d is the distance (reinforcement cover to the concrete surface).

7- Determination of Reinforcement Cover to the Concrete Surface

Evaluation of ohmic resistance of the measuring probe in different frequencies and distances which is done to predict reinforcement cover from concrete distance was simulated

Table 3. The evaluation of the neural network

Frequency (Hz)	Distance (cm)	Experimental ohmic resistance (Ohm)	ANN results for ohmic resistance (Ohm)	Error percentage (%)
500	1.5	6.2	6.42	0.22
750	3.5	4.6	4.97	0.37
1000	2.5	6	5.89	0.12
3000	4.5	8.2	8.86	0.66
10000	4.5	47	47.16	0.16
50000	3.5	4837	4836.98	0.02

numerically. Various experiments were carried out and the corresponding data were recorded which were then used to train the neural network. Totally, 140 tests were carried out using different frequencies and distance levels and the corresponding ohmic resistances of the measuring probe were recorded. The neural network structure consists of two inputs including distance and frequency and one output which was ohmic resistance of the measuring probe. The number of neurons was considered to be 1 to 30. The neural network was trained ten times for each neuron. Five experiments using various frequency and distance levels were carried out to validate the simulation. Table 3 presents some examples of the experimental data using different frequencies and distance levels and also what are get using the Artificial Neural Network (ANN) and also corresponding errors. The evaluation of errors suggests that the minimum error occurs in the case of a frequency of 50 kHz.

8- Conclusions

Various non-destructive testing methods were evaluated to investigate the reinforcement cover to the concrete surface. The Maxwell commercial software was used to simulate the measuring probe and to investigate the influences of the magnetic field which is created in the result of the presence of reinforcement in the concrete in various frequencies and distances. A measuring probe was designed and fabricated using the data obtained from this simulation. The manufactured probe was tested using eddy currents in different frequencies and distances and then, the best frequency was determined.

Frequency, distance, ohmic resistance, and inductance were optimized using the design of experiments. The results suggest that the effects of frequency and distance are not significant corresponding to the inductance while they are significant in the case of ohmic resistance of the measuring probe. In the frequency of 50 kHz, the ohmic resistance was clearer for various reinforcement covers to the concrete surface. A regression model was also proposed to estimate ohmic resistance of the measuring probe properly in different reinforcement covers to the concrete surface. The proposed model suggests that any increase in distance results in a decrease in ohmic resistance in a constant frequency. A neural network was also proposed to predict interval values of reinforcement cover to concrete surface based on frequency, ohmic resistance, and distance parameters. Comparing experimental and ANN results suggests that the minimum error percentage occurs when the frequency of 50 kHz is used.

References

- [1] ASTM C803, Penetration resistance of hardened concrete, American Society for Testing and Materials, (1998).
- [2] ACI 228.2R-98, Non-destructive test methods for evaluation of concrete in structures, American Concrete Institute (1998).
- [3] P.J. Shull, Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications, CRC press, 2002.
- [4] J. García-Martín, J. Gómez-Gil, E. Vázquez-Sánchez, Non-destructive techniques based on eddy current testing, *Sensors*, 11(3) (2011) 2525-2565.
- [5] H. Schoenekess, W. Ricken, J.-G. Liu, W.-J. Becker, Special constructed and optimised eddy-current sensors for measuring force and strain in steel reinforced concrete, *Sensors and Actuators A: Physical*, 106(1-3) (2003) 159-163.
- [6] M. Zaid, P. Gaydecki, S. Quek, G. Miller, B. Fernandes, Extracting dimensional information from steel reinforcing bars in concrete using neural networks trained on data from an inductive sensor, *NDT & E International*, 37(7) (2004) 551-558.
- [7] N. de Alcantara, F. da Silva, M. Guimarães, M. Pereira, Corrosion assessment of steel bars used in reinforced concrete structures by means of eddy current testing, *Sensors*, 16(1) (2016) 15.
- [8] M.N. Sadiku, Numerical techniques in electromagnetics, CRC press, 2000.



مطالعه تجربی و شبیه سازی فاصله آرماتور از سطح بتن با استفاده از جریان گردابی

حمیدرضا اسرافیلی^۱، سیدمحمدحسین سیدکاشی^۱، میرسعید صفی زاده^۲

^۱ دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۸

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۳/۲۶

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۱۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۵/۲۷

کلمات کلیدی:

فاصله آرماتور از سطح بتن

پروب اندازه گیری

جریان گردابی

مقاومت اهمی

شبیه سازی اجزاء محدود

خلاصه: آزمون غیرمخرب یکی از تکنیک‌هایی است که جهت اطمینان از سلامت ساختمان‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت مقاوم سازی ستون‌های بتنی دانستن تعداد آرماتورهای نهفته در بتن و فواصل آن‌ها نسبت به سطح بتن ضروری می‌باشد. در این مقاله جهت بدست آوردن فاصله آرماتور از سطح بتن در ستون‌های بتنی شبیه سازی از روش اجزاء محدود و به کمک نرم افزار ماکسول انجام گردید و سپس یک نوع پروب اندازه گیری طراحی و ساخته شد. زمانی که یک رسانا مانند آرماتور در معرض یک سیم پیچ با هسته فریتی قرار می‌گیرد، آرماتور داخل بتن با امواج الکترومغناطیس فرکانس پایین اندرکنش نشان داده و با اندازه گیری تاثیرات این امواج در سطح بتن می‌توان محل آرماتور را تخمین زد. پروب طراحی شده در فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن، همچنین فرکانس‌های متفاوت مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت. فاصله آرماتور از سطح بتن با استفاده از فرکانس و ولتاژ ثابت و از طریق تغییرات اندوکتانس و مقاومت اهمی سیم پیچ قابل پیش بینی می‌باشد. به منظور بررسی پارامترهای فاصله آرماتور از سطح بتن و فرکانس بر روی مقاومت اهمی و اندوکتانس پروب اندازه گیری از طراحی آزمایش عاملی کامل با سه بار تکرار استفاده شد و یک مدل رگرسیونی از عوامل تاثیر گذار ارائه گردید. نهایتاً از شبکه عصبی جهت تخمین فاصله آرماتور از سطح بتن با پارامترهای فرکانس، فاصله آرماتور از سطح بتن و مقاومت اهمی پروب اندازه گیری استفاده شد.

۱- مقدمه

آزمون غیرمخرب به بررسی ویژگی‌های خواص بدون رسیدن به نقاط مونتاژ می‌پردازند. تلاش‌های گسترده و پیشرفت‌هایی جهت توسعه روش‌های آزمون غیرمخرب برای نشان دادن خواص مکانیکی، صوتی، شیمیایی، الکتریکی، مغناطیسی و فیزیکی مواد انجام شده است. یکی از اولین تلاش‌های مستند شده از آزمون غیرمخرب به قرن نوزدهم برمی‌گردد که با استفاده از آزمون ضربه وضعیت سلامت چرخ‌های واگن قطار مورد بررسی قرار داده شده است. روش‌های حساس، قابل اعتماد و قابل اندازه گیری آزمون غیرمخرب در سال‌های اخیر گسترش چشمگیری یافته است [۲]. روش‌های مختلف آزمون غیرمخرب در ارزیابی سازه‌های بتنی نقش بسزائی دارند. اغلب روش‌های مورد استفاده جهت ارائه اطلاعات در مورد ساختار، کیفیت و یا مواد تشکیل دهنده سازه بتنی است [۳]. در اکثر کشورها، بازدیدهای دوره‌ای به علت الزامات استاندارد ساختمان ضروری است. معمولاً، چنین آزمایش‌هایی باید بدون آسیب رساندن به سازه انجام شود. به همین دلیل روش‌های آزمون غیرمخرب برای این نوع ارزیابی‌ها

بسیاری از کشورهای جهان در سال‌های اخیر بخش عمده‌ای از بودجه‌های عمرانی خود را صرف بازسازی، تعمیر و نگهداری ساختمان‌های قدیمی نسبت به ساختمان‌های جدید نموده‌اند. روش‌های آزمون‌های غیرمخرب^۱ در صنعت مهندسی ساختمان جهت بررسی ساختمان‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش‌ها با توجه به پتانسیل، محدودیت‌ها، تکنیک‌های بازرسی و تفسیر آن‌ها مورد بررسی و استفاده در صنعت ساختمان می‌باشد. آزمون غیرمخرب به عنوان دوره بازرسی، آزمایش یا ارزیابی مواد، اجزاء سازنده یا مجموعه‌ها، بدون از بین بردن قسمتی از سیستم یا کل آن تعریف می‌شود [۱]. آزمون مخرب، مکانیسم‌های شکست را برای تعیین خواص مکانیکی مواد مانند مقاومت، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چقرمگی و چقرمگی شکست می‌سنجد. روش‌های

1 Non Destructive Test (NDT)

* نویسنده عهده دار مکاتبات: safizadeh@iust.ac.ir



استفاده شده است [۴].

برخی از روش‌های آزمون‌های غیرمخرب بتن به طور خلاصه در زیر آورده شده است:

روش سنجش سختی سطح [۵]، آزمایش بیرون کشیدن^۱ [۶]، ارزیابی کیفیت بتن با آزمایش جذب آب و نفوذپذیری^۲ [۶ و ۷]، روش سرعت امواج ضربانی ماوراء صوت^۳ [۸]، روش‌های ضربه^۴ [۹]، امواج سطحی^۵ [۷]، روش انتشار صوت^۶ [۱۰]، روش مقاومت الکتریکی [۱۱]، پتانسیل خوردگی [۱۲]، امواج رادار، پوشش سنج^۷.

جدول ۱ نمونه‌هایی از انواع روش‌های متداول آزمون غیرمخرب بتن به همراه مزایا و معایب آن‌ها را نشان می‌دهد [۱۳].

تکنولوژی رادار یکی از روش‌های بازرسی دوره‌ای آرماتور در سازه‌های بتنی است. روش امواج رادار با بهره‌گیری از انرژی الکترومغناطیسی در فرکانس‌های بین ۵۰ تا ۱۵۰ مگاهرتز جهت بررسی زیر سطح قابل استفاده است. از رادار برای تخمین ضخامت اجسام از روی سطح، موقعیت‌یابی آرماتور و کانال‌های فلزی و تخمین ضخامت بتن پوشیده شده روی سطح آن‌ها، تعیین ترکیبات مواد استفاده شده در ساختمان، تعیین تغییرات رطوبتی سازه موقعیت‌یابی و تعیین اندازه خلل و فرج، موقعیت‌یابی ترک‌ها و تخمین سازه و اندازه آرماتور استفاده شده است [۱۴-۱۷]. کمیت بازرسی غیرمخرب برای ساختمان‌های بتن آرمه در صنایع مصالح ساختمانی در ژاپن استاندارد را برای شناسایی آرماتور به وسیله روش‌های مغناطیسی منتشر کرده است. این موضوع از دو طریق مورد بررسی قرار گرفته است، یکی از این روش‌ها، کاربری استفاده از سیستم رادار برای تعیین موقعیت آرماتور و عمق پوشش بتن بر روی آرماتور است [۱۸]. به کمک رادار بازتاب آهن در بتن به خوبی قابل تشخیص است اما به دلیل این‌که امواج الکترومغناطیس به طور کامل در فلز بازتابیده می‌شود، با این روش تشخیص عیوبی که در پشت قطعه قرار دارد امکان‌پذیر نیست [۱۹].

پوشش سنج وسیله‌ای است که توسط آن محل آرماتور و ضخامت پوشش بتنی روی آرماتور قابل تخمین است [۸]. استفاده از آزمون

- 1 Pull Out Test
- 2 Penetrability Test
- 3 Test Method For Pulse Velocity Through
- 4 Impact Echo Method
- 5 Spectral Analysis Of Surface Waves (SASW)
- 6 Acoustic Emission
- 7 Covermeter

جریان گردابی با میدان‌های مغناطیسی فرکانس پایین یکی از روش‌های شناخته شده در آزمون‌های غیرمخرب است در این خصوص محققان اصول آزمون تست جریان گردابی را به خوبی در تحقیقات خود نشان داده‌اند [۲۰ و ۲۱]. در زمینه بازرسی بتن مسلح، تکنیک‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه‌ای از این تکنیک‌ها کاربرد روش جریان گردابی و ایجاد یک مدل عددی بر اساس روش المان محدود است تا اندازه میله‌های فولادی زیر بتن را تعیین و شناسایی کند [۲۲]. سنسورهای دیفراسیلی مختلفی به منظور آزمایش بر روی بتن مسلح ساخته شد. با استفاده از نتایج بدست آمده و به کمک شبکه عصبی، شناسایی موقعیت میلگردها در بتن انجام پذیرفت [۲۳].

سیستم اسکندر القائی قابل حمل برای تصویربرداری از آرماتور فولادی مدفون در بتن استفاده شد و به وسیله آن موقعیت و ابعاد آرماتور بررسی گردید. سنسور دستگاه، جریان گردابی تولید شده در آرماتور را که با ایجاد میدان مغناطیسی در بتن تشکیل شده است اندازه‌گیری کرد و در نهایت موقعیت و اندازه آرماتور را به وسیله یک پردازشگر که به رایانه متصل است نشان داد [۲۴]. با استفاده از جریان گردابی بررسی موقعیت آرماتور در سازه‌های بتنی مسلح انجام پذیرفت و از آن برای مکان‌یابی آرماتور در سازه بتنی استفاده شد [۲۵]. بوسیله یک اسکندر چند منظوره با سنسور جریان گردابی موقعیت آرماتور را در بتن به کمک یک نرم‌افزار پایه شناسایی شد. اسکندر موقعیت آرماتور را در جهات طولی و عرضی یک سازه بتنی مسلح اسکن نمود و آن را روی صفحه نمایش کامپیوتر نشان داد. با این روش علاوه بر موقعیت آرماتور قطر آرماتور نیز قابل نمایش است [۲۶].

با توجه به پیشرفت علم و تکنولوژی در قرن اخیر، مکان‌یابی آرماتورهای نهفته در بتن از طریق روش‌های مختلف آزمایش‌های غیرمخرب، نقش بسزائی جهت مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی، از خود ایفا کرده است. یکی از مسایل به روز جهت موقعیت‌یابی آرماتور از سطح بتن استفاده از آزمون غیرمخرب به ویژه امواج الکترومغناطیس است. با تغییر فاصله آرماتور از سطح بتن تغییراتی در مقاومت اهمی و اندوکتانس سیم‌پیچ ایجاد می‌شود [۲۷]. همچنین این تغییرات با فرکانس اعمالی متناسب است. از این‌رو از تاثیرات فرکانس بر مقاومت اهمی و اندوکتانس پروب اندازه‌گیری، فاصله آرماتور از سطح بتن

Table 1. Advantage and disadvantage of different methods on non-destructive tests

جدول ۱: مزایا و معایب روش‌های مختلف آزمون غیرمخرب بتن

روش تست	مزایا	محدودیت‌ها
تست ضربه	شناسایی عیوب در بتن	تشخیص پوشش بتن در دمای پایین
	شناسایی حساسیت عناصر در بتن ساده و بتن مسلح	تشخیص مواد با گرانش بالا
	شناسایی بازتابنده‌های موج	وجود دانه‌بندی درشت جهت تفکیک مرز بین دانه‌ها
	مشخصات ترک‌های باز روی سطح مدول الاستیسیته بتن تخمین نیروی فشاری بتن خصوصیات مواد تشکیل دهنده بتن	
امواج فراصوت	اندازه‌گیری عمق عناصر ارزیابی بتن‌های معیوب	تراکم بالا در ساختار بتن زمان‌بر بودن روش وابستگی کیفیت داده‌ها به چسبندگی سنسور مورد استفاده روی سطح بتن عدم تشخیص عیوب کوچک
	آشکارسازی آرماتور در بتن	
	تشخیص ترک در عمق کم تشخیص عیوبی از قبیل لایه لایه شدن تشخیص مواد موجود در بتن شامل، بتن و میلگرد بررسی ذرات ماسه در بتن	
انتشار صوت	تشخیص آسیب در زمان واقعی نظارت از راه دور	مشکل صدای پس زمینه دشواری در تجزیه و تحلیل ساختار واقعی
	قابل اجرا برای نظارت در محل و خارج از محل تجزیه و تحلیل قابل اعتماد	عدم وجود روش استاندارد برای انواع سازه
رادار	تعیین اشیاء دفن شده تهیه نقشه‌های کنترلی	ناتوانی در جهت تصویر مستقیم قادر به شناسایی خوشه‌بندی در عرشه سازه نیست، مگر این‌که آن‌ها با پوشش اپکسی آغشته شده باشد یا پر از آب

Table 1. Advantage and disadvantage of different methods on non-destructive tests

ادامه جدول ۱: مزایا و معایب روش‌های مختلف آزمون غیرمخرب بتن

روش تست	مزایا	محدودیت‌ها
روش تست	استفاده برای ارزیابی سازه‌های مدفون	دمای پایین و سرد داده‌های جی.آر.آر ^۱ را تحت تاثیر قرار می‌دهد
	تشخیص حفره‌ها و ترک‌ها	رطوبت کاملاً یخ زده باقی خواهد ماند
	ارزیابی ضخامت سازه	رطوبت منجمد شده سیگنال به دست آمده را تحت تاثیر قرار می‌دهد
	اندازه‌گیری ضخامت پوشش بتن مشخص نمودن پیکربندی میلگرد داخل بتن	وجود نمک تاثیر گذار می‌باشد عدم تخمین خواص مکانیکی بتن مانند قدرت، مدول و ... عدم ارائه اطلاعات در مورد وجود خوردگی، نرخ خوردگی در میلگرد داخل بتن
ترموگرافی مادون قرمز	تشخیص خرابی بتن	هزینه بالا نسبت به دیگر روش‌ها
	ارزیابی خواص بتن	
	تشخیص ترک	عدم تشخیص عیوب عمیق مشکل است
	شناسایی حفره‌ها	عدم ارائه اطلاعات مربوط به عمق ترک
چکش	تغییرات مواد	تاثیر عواملی از قبیل بی‌نظمی سطحی، شرایط مرزی و دمای جوی بر نتایج
	تغییر در تراکم، هدایت حرارتی و حرارت	
	تشخیص خواص بتن	عدم استفاده در سطوح عمودی
	ارائه جزئیات اولیه برای آزمایشات بیشتر	مهارت اپراتور در شنوایی عدم شناسایی آرماتور

آرماتور نهفته در آن به وجود می‌آید قابل اندازه‌گیری است [۲۸]. با استفاده از سنسور جریان گردابی و اندازه‌گیری مقدار اندوکتانس و مقاومت اهمی در یک فرکانس مشخص علاوه بر تعیین فاصله آرماتور از سطح بتن خوردگی آرماتور در بتن تشخیص داده شد [۲۹]. شبکه عصبی برای استخراج اطلاعات مربوط به عمق و ضخامت آرماتورهای

قابل تخمین است. تغییرات مقاومت اهمی معادل، اندوکتانس معادل و امپدانس پروب اندازه‌گیری جریان گردابی^۱ تک سیم‌پیچ، تغییرات نیرو و کرنش که بر اثر اعمال بار بر یک سازه بتنی مسلح بر روی

1 Eddy Current

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

E شدت میدان الکتریکی (ولت بر متر)، H شدت میدان مغناطیسی (آمپر بر متر)، D چگالی شار الکتریکی (کولن بر مترمربع)، B چگالی شار مغناطیسی (وبر بر متر مربع یا تسلا)، J چگالی جریان الکتریکی (آمپر بر مترمربع)، ρ چگالی بار الکتریکی (کولن بر مترمکعب).
ارتباط بین پتانسیل مغناطیسی بردار A و چگالی شار مغناطیسی در رابطه (۵) بیان شده است.

$$B = \nabla \times A \quad (5)$$

A پتانسیل مغناطیسی (وبر بر متر) است. رابطه (۶) با جایگذاری رابطه (۵) در رابطه (۱) بدست آمده است.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times A) \quad (6)$$

شکل دیگر رابطه (۶) به صورت رابطه (۷) است.

$$\nabla \times \left(E + \frac{\partial A}{\partial t} \right) = 0 \quad (7)$$

رابطه (۸) ارتباط بین پتانسیل الکتریکی و میدان الکتریکی است. دو کمیت برداری داخل پرانتز در معادله (۷) بدون کرل است و به صورت یک کمیت عددی بیان شده است.

$$E = -\nabla V \quad (8)$$

در رابطه (۹) به منظور سازگاری با تعریف پتانسیل الکتریکی عددی V شکل معادله تغییر کرده است.

نهفته در بتن کاربرد دارد. استفاده از شبکه عصبی توانسته است طیف وسیعی از فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن و همچنین قطره‌های متفاوت آرماتور را آشکار سازد [۳۰].

در این تحقیق جهت تخمین موقعیت آرماتور از سطح بتن به منظور ایجاد سوراخ در ستون بتنی برای مقاوم‌سازی و یا اتصال سازه‌ها به یکدیگر یک پروب اندازه‌گیری جریان گردابی طراحی و ساخته شد. از نرم‌افزار ماکسول جهت شبیه‌سازی پروب اندازه‌گیری و تاثیرات میدان مغناطیسی حاصل از حضور آرماتور در بتن استفاده شد. همچنین فرکانس‌های متفاوت در فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن شبیه‌سازی شد، سپس پروب اندازه‌گیری طراحی و ساخته شد. پروب ساخته شده در فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن، همچنین فرکانس‌های متفاوت مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت و با استفاده از پارامترهای فاصله آرماتور از سطح بتن و فرکانس و تاثیرات آن بر روی مقاومت اهمی و اندوکتانس پروب اندازه‌گیری به بررسی فاصله آرماتور از سطح بتن پرداخته شد و با مقایسه نتایج به‌دست آمده فرکانس بهینه استخراج گردید. به منظور بررسی پارامترهای فاصله آرماتور از سطح بتن و فرکانس بر روی مقاومت اهمی و اندوکتانس پروب اندازه‌گیری از طراحی آزمایش عاملی کامل با سه بار تکرار استفاده شد و یک مدل رگرسیونی از عوامل تاثیرگذار ارائه گردید. نهایتاً از شبکه عصبی جهت تخمین فاصله آرماتور از سطح بتن با پارامترهای فرکانس، فاصله آرماتور از سطح بتن و مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری استفاده شد.

۲- مبانی تئوری

اندازه‌گیری فاصله آرماتور نسبت به سطح بتن به روش جریان گردابی نیازمند دانستن تاثیرات میدان مغناطیسی در داخل بتن و آرماتور آن می‌باشد. میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط سیم‌پیچ در آرماتور جریان‌های گردابی القایی ایجاد می‌کند که این جریان‌ها به نوبه خود میدان مغناطیسی ثانویه به وجود می‌آورند. میدان مغناطیسی ثانویه جریانی برخلاف جریان اولیه ایجاد می‌کند که باعث کاهش جریان اولیه در آرماتور می‌شود.

تاثیر جریان‌های گردابی ناشی از امواج الکترومغناطیس بر روی امپدانس و مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری را با استفاده از معادلات ماکسول قابل محاسبه است [۳۱ و ۳۲].

$$\nabla^2 A_x = -\mu_0 J \quad (۱۷) \quad \left(E + \frac{\partial A}{\partial t} \right) = -\nabla V \quad (۹)$$

$$\nabla^2 A_y = -\mu_0 J \quad (۱۸) \quad \text{رابطه (۱۰) شکل دیگر رابطه (۹) در حوزه فرکانس است.}$$

$$\nabla^2 A_z = -\mu_0 J \quad (۱۹) \quad E = -j\omega A - \nabla V \quad (۱۰)$$

هر کدام از معادلات (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) دارای جواب خواص به صورت رابطه (۲۰) است. از طرفی معادله (۲) در حوزه فرکانس در رابطه (۱۱) آورده شده است.

$$A_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{J_x}{R} dv \quad (۲۰) \quad \nabla \times H = (\sigma + j\omega\epsilon) E \quad (۱۱)$$

رابطه (۲۱) ترکیب جوابهای خاص در معادلات (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) است. رابطه (۱۲)، جایگذاری مقدار E در معادله (۱۱) است.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) = (-j\omega A - \nabla V) (\sigma + j\omega\epsilon) \quad (۱۲)$$

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{J}{R} dv \quad (۲۱)$$

رابطه (۱۳) ارتباط بین چگالی حجمی جریان و پتانسیل مغناطیسی برداری A است.

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (۱۳)$$

چگالی جریان کل برابر است با جمع چگالی جریان گردابی ناشی از میدان مغناطیسی متغیر با زمان، چگالی جریان انتقالی ناشی از میدان الکتریکی متغیر با زمان و چگالی جریان هدایتی ناشی از اختلاف پتانسیل الکتریکی در روابط (۲۲)، (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) نشان داده شده است.

با گرفتن کرل از روابط (۵) و (۱۳)، روابط (۱۴) و (۱۵) بدست آمده است.

$$\nabla \times \nabla \times A = \mu_0 J \quad (۱۴)$$

$$J_{Total} = J_s + J_c + J_d \quad (۲۲)$$

$$\nabla (\nabla \cdot A) - \nabla^2 A = \mu_0 J \quad (۱۵)$$

$$J_s = (-\sigma \nabla V) \quad (۲۳)$$

رابطه (۱۶) معادله برداری پواسون است که بعد از ساده سازی روابط (۱۴) و (۱۵) حاصل شده است.

$$J_c = (-j\omega A - \nabla V) \quad (۲۴)$$

$$\nabla^2 A = -\mu_0 J \quad (۱۶)$$

$$J_d = [j\omega A (-j\omega A - \nabla V)] \quad (۲۵)$$

شکل دیگر رابطه (۱۶) در مختصات کارتزین روابط (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) است. روابط (۲۶)، (۲۷) و (۲۸) جریانهای هدایتی، انتقالی و گردابی حاصل از میدان مغناطیسی است.

$$i = I_{peak} \cos(\omega t + \theta) \quad (34)$$

رابطه (۳۵) از انتگرال گیری رابطه (۳۴) نتیجه شده است.

$$U_{av} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_{Inst} d(\omega t) \quad (35)$$

رابطه (۳۶) از ترکیب رابطه (۳۴) و رابطه (۳۵) حاصل شده است

$$U_{av} = \left(\frac{L}{2}\right) \left(\frac{1}{2\pi}\right) \int_0^{2\pi} I_{peak}^2 [\cos(\omega t + \theta)]^2 d(\omega t) \quad (36)$$

رابطه (۳۷) مقدار متوسط انرژی است که از رابطه (۳۶) منتج شده است.

$$U_{av} = \left(\frac{L}{2}\right) I_{Rms}^2 = \left(\frac{L}{2}\right) \left(\frac{I_{peak}}{\sqrt{2}}\right)^2 = \left(\frac{L}{2}\right) I_{peak}^2 \quad (37)$$

رابطه (۳۸) مقدار اندوکتانس را نشان داده است.

$$L = \frac{4U_{av}}{I_{Peak}^2} \quad (38)$$

رابطه (۳۹) مقدار مقاومت اهمی را با استفاده از رابطه مربوط به افت اهمی (P) است.

$$P = \frac{1}{2\sigma} \int_v J \cdot J dv \quad (39)$$

افت اهمی با رابطه (۴۰) به مقاومت اهمی ارتباط داده شده است.

$$P = RI_{Rms}^2 \quad (40)$$

با جایگذاری مقدار P در رابطه (۴۰) مقاومت اهمی به دست آمده است.

$$I_s = - \int_{\omega} \frac{1}{\mu} \sigma \nabla V \cdot d\omega \quad (26)$$

$$I_c = - \int_{\omega} \frac{1}{\mu} j \omega \sigma A \cdot d\omega \quad (27)$$

$$I_d = - \int_{\omega} \frac{1}{\mu} j \omega \varepsilon A (-j \omega A - \nabla V) \cdot d\omega \quad (28)$$

رابطه (۲۹) جریان کل رسانا است.

$$I_{Total} = I_s + I_c + I_d \quad (29)$$

روابط (۳۰) و (۳۱) شکل دیگر رابطه (۲۹) است.

$$I_{Total} = \int_{\Omega} I_{Total} d\Omega \quad (30)$$

$$I_{Total} = \int_{\omega} \frac{1}{\mu} (\sigma + j \omega \sigma) (-j \omega A - \nabla V) d\omega \quad (31)$$

برای بدست آوردن مقدار اندوکتانس باید انرژی متوسط را بدست آورد که رابطه (۳۲) نشان دهنده انرژی متوسط است.

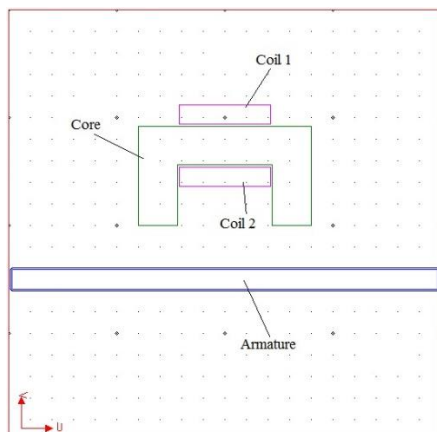
$$U_{av} = \frac{1}{4} \int_v B \cdot H d_v \quad (32)$$

انرژی لحظه‌ای با استفاده از رابطه (۳۳) به دست می‌آید.

$$U_{Inst} = \frac{1}{2} L i^2 \quad (33)$$

که در آن L اندوکتانس (هنری بر متر) است.

مقدار لحظه‌ای جریان در حوزه زمان در رابطه (۳۴) نشان داده شده است.



شکل ۱: شبیه‌سازی هندسه آزمایش در حالت دوبعدی

Fig. 1. 2-D simulation of experiment geometry

Table 2. Material selection

جدول ۲: انتخاب مواد

نام اجزاء	ماده انتخابی
کوئل ۱	مس
کوئل ۲	مس
هسته مرکزی	فريت
آرماتور	آهن ۱۰۱۰

با در نظر گرفتن درصد خطا، تعداد مش تغییر می‌کند. شکل ۳ نمودار تحلیل حساسیت به ابعاد مش را در فرکانس ۵۰۰۰ هرتز نشان می‌دهد. این فرایند در نرم‌افزار با مشخص نمودن درصد خطا به صورت خودکار قابل انجام است. بنابراین با انتخاب درصد خطای ۰/۵ درصد تعداد ۲۵۷۸ مش در مدل ایجاد شده است. به دلیل وجود شار مغناطیسی در اطراف سیم‌پیچ حامل جریان و مسیر عبور شار مغناطیسی (فک‌های هسته مرکزی پروب اندازه‌گیری) و اثر پوسته‌ای بر روی سطح آرماتور، به منظور حل دقیق‌تر مسئله با توجه به درصد خطای مورد قبول، این قسمت‌ها از حساسیت بیشتری برخوردار است و دارای مش‌بندی ریزتری است. شکل ۴ نشان می‌دهد چگالی شار مغناطیسی به دلیل وجود اثر پوسته‌ای بر روی سطح آرماتور بیشتر از اجزاء دیگر مدل است.

$$R = \frac{P}{I_{Rms}^2} = \frac{2P}{I_{Peak}^2} \quad (41)$$

در رابطه (۴۱)، L اندوکتانس (هانری بر متر)، R مقاومت اهمی (اهم) و P افت اهمی است.

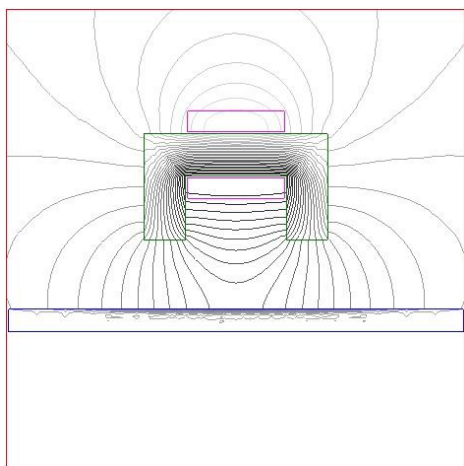
۳- شبیه‌سازی میدان مغناطیسی به روش اجزاء محدود

نرم‌افزار ماکسول یک بسته تجاری است که قابلیت مدل‌سازی و آنالیز امواج الکترومغناطیس را به روش حل اجزاء محدود با استفاده از روابط اشاره شده در بخش ۲ دارا است. محیط جریان گردابی نرم‌افزار ماکسول برای آنالیز و شبیه‌سازی تأثیرات جریان‌های متغیر با زمان مناسب است. در این محیط، توانایی مدل‌سازی جریان‌های گردابی، تأثیرات اثر پوسته‌ای، امپدانس، تلفات مقاومت اهمی، نیرو، گشتاور و شار مغناطیسی وجود دارد.

در این تحقیق برای بدست آوردن مقاومت اهمی و اندوکتانس پروب اندازه‌گیری در فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن در شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار ماکسول از بسته جریان گردابی استفاده شد. به منظور شبیه‌سازی شرایط آزمایشگاهی با استفاده از روابط حاکم بر جریان‌های گردابی، تعریف هندسه آزمایش، انتخاب مواد و اعمال شرایط مرزی در نرم‌افزار اعمال شد. الف) تعریف هندسه آزمایش: برای فراهم نمودن شرایط فیزیکی در شبیه‌سازی، هندسه شرایط واقعی در نرم‌افزار مدل‌سازی شد (شکل ۱). هندسه آزمایش شامل ابعاد هسته مرکزی سیم‌پیچ، قطر آرماتور و کوئل بود. ب) انتخاب جنس مواد: جدول ۲ جنس مواد انتخاب شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که ضریب هدایت الکتریکی بتن و هوا تقریباً یکسان است، از مدل‌سازی بتن صرف‌نظر شد.

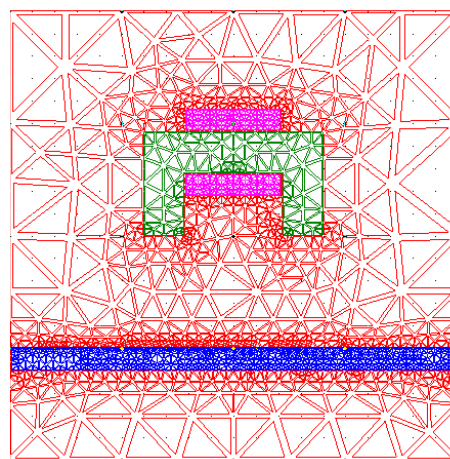
ج) اعمال شرایط مرزی: برای مشخص نمودن شرایط مرزی در شبیه‌سازی به کمک بسته جریان گردابی، مقدار جریان عبوری از کوئل ۱ و کوئل ۲ مورد نیاز بود (شکل ۱). جریان در کوئل‌ها بر اساس مجموع جریان‌های عبوری در هر رشته از سیم حامل جریان به دور هسته تعیین گردید.

با در نظر گرفتن معیار هم‌گرایی و درصد خطای مورد قبول حل مسئله، مش‌بندی اجزاء محدود به صورت تطبیقی و با المان‌های مثلثی انجام می‌شود. به منظور حل مسئله، هندسه آن به طور خودکار به عناصر کوچکتر گسسته و جهت حل دقیق‌تر، این گسستگی‌ها به مش‌بندی مثلثی تبدیل و به صورت خودکار به هم متصل شده است. شکل ۲ نحوه مش‌بندی را نشان می‌دهد.



شکل ۴: خطوط شار مغناطیسی

Fig. 4. Electromagnetic flux lines



شکل ۲: نمایشی از المان مثلثی

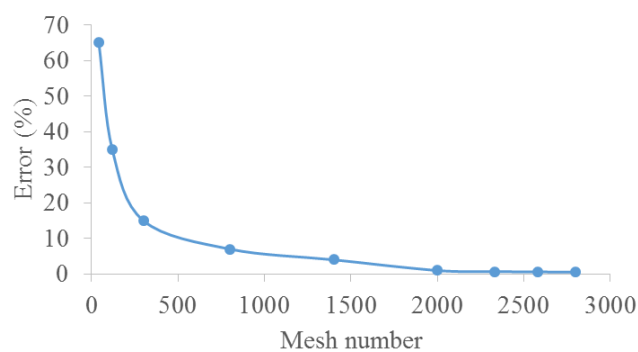
Fig. 2. Triangular elements

شد. قالب فلزی دارای پنج تکه مجزا بوده و از جنس آهن ساختمانی می‌باشد که با پیچ و مهره به یکدیگر وصل شده است. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود دو صفحه مشبک A و B فاصله آرماتورها را از سطح بتن در هنگام قالب‌گیری بلوک بتنی مشخص می‌کند. از میلگرد فولادی با قطر ۱۰ میلی‌متر و جنس آهن ساختمانی به عنوان آرماتور استفاده گردید. بعد از قرار دادن آرماتور در فاصله‌های از پیش تعیین شده، بتن ساخته شده درون قالب فلزی ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت درون قالب فلزی نگهداری شد تا بتن بتواند فرم قالب را به خود بگیرد. سپس با باز نمودن اتصالات قالب فلزی بتن مسلح از درون قالب خارج گشت تا پس از خشک شدن نهائی در آزمایشگاه مورد استفاده قرار گیرد.

۴-۲- پروب اندازه‌گیری

تجهیز دیگری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، پروب اندازه‌گیری می‌باشد، طراحی و ساخت پروب اندازه‌گیری توسط نویسندگان این تحقیق انجام پذیرفته است. پروب اندازه‌گیری از دو قسمت هسته فریتی و سیم مسی با پوشش لاک تشکیل شده است (شکل ۷).

مواردی که جهت طراحی و ساخت پروب اندازه‌گیری مورد بررسی قرار گرفته است عبارت است از: الف: هسته پروب، ب: سیم مسی با پوشش لاک، ج: تاثیرات فرکانس.



شکل ۳: نمودار تحلیل میزان حساسیت به ابعاد مش

Fig. 3. A analysis of Sensibility to mesh size

۴- آزمایش‌های تجربی

تجهیزاتی که در این تحقیق برای به‌دست آوردن فاصله آرماتور از سطح بتن مورد استفاده قرار گرفته است شامل: نمونه‌های بلوک بتنی به همراه آرماتور نهفته در آن، پروب اندازه‌گیری و تجهیزات اندازه‌گیری الکترونیکی از قبیل: دستگاه مولد موج، مولتی‌متر دیجیتال، اسیلوسکوپ و ال‌سی‌متر.

۴-۱- نمونه‌های بلوک بتنی به همراه آرماتور نهفته در آن

برای ساختن بلوک بتنی به همراه آرماتور نهفته در آن (شکل ۵) یک قالب فلزی به ابعاد $10 \times 52 \times 25$ سانتی‌متر طراحی و ساخته

الف: هسته پروب اندازه‌گیری

وقتی شار مغناطیسی متغیر با زمان، در هسته فرو مغناطیسی جریان می‌یابد، براساس قانون فارادی، یک نیروی محرک القایی نتیجه می‌شود. این نیروی القایی جریان‌های محلی را عمود بر شار مغناطیسی در هسته هادی تولید خواهد کرد. این جریان‌ها را جریان گردابی می‌نامند. جریان‌های گردابی تلفات توان اهمی تولید نموده و باعث گرم شدن محلی می‌شود. در واقع این مطلب اساس گرمایش القایی است. در هسته‌های سیم‌پیچ که برای اندازه‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرند این تلفات توان جریان گردابی، نامطلوب است و با استفاده از هسته‌های ساخته شده از موادی با نفوذپذیری بالا (μ) و رسانندگی پایین (σ) قابل کاهش است. فریت‌ها از جمله این مواد هستند. مقدار کاهش تلفات توان جریان گردابی به شکل، اندازه و سطح مقطع فریت بستگی دارد. ضریب هدایت پایین باعث می‌شود تلفات جریان گردابی در فرکانس‌های بالا محدود شود [۲۹].

با استفاده از قانون آمپر نتیجه می‌شود:

$$\oint H \cdot dL = I_{net} \quad (42)$$

که در آن I_{net} جریان (آمپر) و dL عنصر دیفرانسیلی طول در امتداد مسیر می‌باشد. اگر هسته از جنس آهن و یا فریت باشد، اساساً تمام میدان مغناطیسی تولید شده توسط جریان در درون هسته می‌ماند، در نتیجه قانون آمپر به صورت رابطه (۴۳) در می‌آید:

$$HL_C = N_i \quad (43)$$

که در آن LC طول میانگین مسیر هسته، N_i جریان گذرنده از طول مسیر انتگرال‌گیری، i حلقه‌های جریان، مسیر انتگرال‌گیری را N بار قطع می‌کنند.

ب: سیم‌پیچ:

عامل دیگری که در طراحی پروب موثر می‌باشد سیم‌پیچ حامل جریان به دور هسته است. برای طراحی سیم‌پیچ نکات زیر حائز اهمیت می‌باشد: (۱) تعداد دورهای سیم‌پیچ (۲) مقاومت اهمی سیم (۳) قطر سیم (۴) مقدار جریان عبوری از سیم



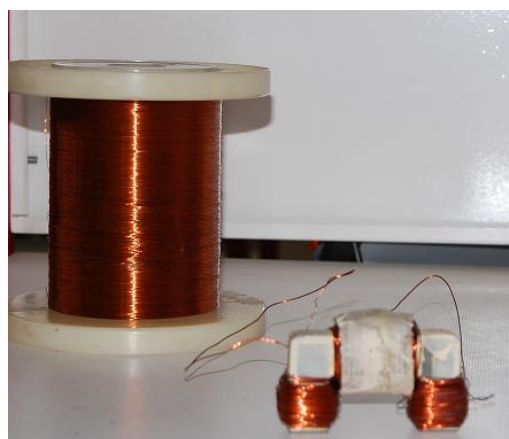
شکل ۵: بلوک‌های بتنی ساخته شده به همراه آرماتور نهفته در آن

Fig. 5. Casted concrete specimens containing steel reinforcement



شکل ۶: نمایی از قالب فلزی

Fig. 6. Metal formwork



شکل ۷: پروب اندازه‌گیری

Fig. 7. Fabricated measurement probe

تعداد دورهای سیم‌پیچ:

طبق قانون فارادی اگر از درون یک سیم شار متغیری بگذرد، ولتاژی در آن القاء می‌شود که با آهنگ زمانی تغییر شار تناسب مستقیم دارد.

$$e_{ind} = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (44)$$

که در آن e_{ind} ولتاژ القا شده در سیم پیچ و φ شار گذرنده از درون سیم می‌باشد. با فرض این که شار به‌طور یکسان از درون همه حلقه‌های سیم‌پیچ گذر کند داریم:

$$e_{ind} = -N \frac{d\varphi}{dt} \quad (45)$$

که در آن N تعداد دورهای سیم‌پیچ می‌باشد.

مقاومت اهمی سیم:

مس یکی از پر کاربردترین هادی‌ها می‌باشد که دارای ضریب هدایت $5/8 \times 10^7$ زیمنس بر متر است. با استفاده از قانون اهم می‌توان مقاومت اهمی سیم را که از یک ماده همگن با سطح مقطع یکنواخت می‌باشد را بدست آورد.

۴-۳- تجهیزات اندازه‌گیری الکترونیکی

تجهیزاتی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است شامل: دستگاه تولید موج، جهت تولید امواج سینوسی در دامنه ولتاژ ۲ تا ۸ ولت در فرکانس‌های مورد آزمایش، مولتی‌متر دیجیتال جهت اندازه‌گیری مقاومت اهمی سیم‌پیچ، ولتاژهای ورودی و خروجی، اسیلوسکوپ دو کاناله مدل آ.ا.س-۵۰۴^۱ و دستگاه ال‌سی‌متر مدل ال‌سی.آر-۸۲۱^۲ جهت اندازه‌گیری مقاومت اهمی و اندوکتانس معادل پروب اندازه‌گیری در فرکانس‌های مختلف می‌باشد.

۵- طراحی آزمایش

به منظور بررسی تاثیر پارامترهای فاصله و فرکانس بر روی مقاومت اهمی و اندوکتانس پروب اندازه‌گیری از طراحی آزمایش عاملی کامل با سه

بار تکرار جدول ۳ استفاده شده است.

۶- نتایج و بحث

همانطور که در بخش قبل مطرح شد برای بررسی نتایج، از دو پارامتر فرکانس و فاصله آرماتور از سطح بتن استفاده شده است. با در نظر گرفتن این دو پارامتر و طراحی آزمایش، تعداد ۱۲ آزمون با ۳ بار تکرار در مجموع ۳۶ آزمون انجام شد که در جدول ۴ آورده شده است. حاصل نتایج این آزمایش دو خروجی شامل مقاومت اهمی و اندوکتانس تحت تاثیر فرکانس و فاصله آرماتور از سطح بتن می‌باشد. جداول ۵ و ۶ واریانس هر کدام از آن‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، تداخل پارامترهای فرکانس و فاصله آرماتور از سطح بتن روی اندوکتانس پروب اندازه‌گیری می‌تواند بی‌معنا باشد.

مطابق جدول ۶ با توجه به این که مقدار P از سطح معناداری (۰/۰۵) کمتر است می‌توان نتیجه گرفت تمامی اثرات اصلی و متقابل فرکانس و فاصله آرماتور از سطح بتن دارای تاثیرات معنادار بر روی مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری می‌باشد.

در شکل‌های ۸ و ۹ نمودارهای اصلی پارامترهای فرکانس و فاصله آرماتور از سطح بتن روی خروجی‌های مقاومت اهمی و اندوکتانس پروب اندازه‌گیری نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود محدوده تغییرات اندوکتانس نسبت به مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری بسیار کم می‌باشد که این موضوع می‌تواند بر روی حساسیت اندازه‌گیری آزمایش تاثیرگذار باشد به عبارت دیگر می‌توان گفت به ازای تغییرات کم فاصله آرماتور از

Table 3. Design of experiment parameters

جدول ۳: پارامترهای طراحی آزمایش

پارامترها	سطوح			
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
فرکانس (هرتز)	۵۰۰	۲۰۰۰	۵۰۰۰	-
فاصله (سانتی‌متر)	۱	۲	۳	۴

1 AOS-540a

2 LCR-821

Table 4. Test results

جدول ۴: نتایج آزمایش

آزمایش	فرکانس (هرتز)	فاصله آرماتور از سطح بتن (سانتی متر)	مقاومت (اهم)	اندوکتانس (میلی هانری بر متر)
۱	۵۰۰۰	۱	۵۴/۱	۷۲/۰
۲	۵۰۰۰	۲	۲۵/۳	۷۰/۷
۳	۵۰۰۰	۳	۱۷/۹	۷۰/۳
۴	۵۰۰۰	۴	۱۵/۵	۷۰/۲
۵	۲۰۰۰۰	۱	۳۳۹/۵	۷۷/۳
۶	۲۰۰۰۰	۲	۲۳۵/۱	۷۶/۶
۷	۲۰۰۰۰	۳	۲۰۷/۶	۷۶/۴
۸	۲۰۰۰۰	۴	۱۹۹/۲	۷۶/۴
۹	۵۰۰۰۰	۱	۶۰۲۸/۰	۱۵۲/۲
۱۰	۵۰۰۰۰	۲	۵۱۳۰/۰	۱۵۱/۵
۱۱	۵۰۰۰۰	۳	۴۸۸۴/۰	۱۵۱/۳
۱۲	۵۰۰۰۰	۴	۴۸۱۱/۰	۱۵۱/۳
۱۳	۵۰۰۰	۱	۵۱/۶	۷۱/۸
۱۴	۵۰۰۰	۲	۲۵/۱	۶۹/۳
۱۵	۵۰۰۰	۳	۱۷/۶	۶۹/۰
۱۶	۵۰۰۰	۴	۱۵/۷	۶۹/۷
۱۷	۲۰۰۰۰	۱	۳۴۰/۱	۷۷/۳
۱۸	۲۰۰۰۰	۲	۲۳۴/۷	۷۵/۸
۱۹	۲۰۰۰۰	۳	۲۰۹/۰	۷۶/۳
۲۰	۲۰۰۰۰	۴	۱۹۵/۵	۷۶/۳
۲۱	۵۰۰۰۰	۱	۶۰۱۵/۸	۱۵۲/۳
۲۲	۵۰۰۰۰	۲	۵۱۱۶/۷	۱۵۱/۳
۲۳	۵۰۰۰۰	۳	۴۸۸۹/۴	۱۵۱/۸
۲۴	۵۰۰۰۰	۴	۴۸۰۸/۰	۱۵۰/۸
۲۵	۵۰۰۰	۱	۳۹/۱	۷۱/۷
۲۶	۵۰۰۰	۲	۲۴/۰	۷۰/۵
۲۷	۵۰۰۰	۳	۲۵/۲	۷۰/۰
۲۸	۵۰۰۰	۴	۱۶/۳	۶۹/۲
۲۹	۲۰۰۰۰	۱	۳۳۵/۱	۷۷/۳

Table 4. Test results

ادامه جدول ۴: طراحی آزمایش

آزمایش	فرکانس (هرتز)	فاصله آرماتور از سطح بتن (سانتی متر)	مقاومت (اهم)	اندوکتانس (میلی هانری بر متر)
۳۰	۲۰۰۰۰	۲	۲۵۵/۰	۷۶/۴
۳۱	۲۰۰۰۰	۳	۲۰۶/۸	۷۶/۲
۳۲	۲۰۰۰۰	۴	۲۰۷/۶	۷۶/۳
۳۳	۵۰۰۰۰	۱	۶۰۳۷/۱	۱۵۲/۱
۳۴	۵۰۰۰۰	۲	۵۱۱۵/۵	۱۵۱/۷
۳۵	۵۰۰۰۰	۳	۴۸۸۴/۴	۱۵۱/۵
۳۶	۵۰۰۰۰	۴	۴۸۱۱/۵	۱۵۱/۶

Table 5. Effects of frequency and reinforcement cover on probe's inductance

جدول ۵: تاثیرات فرکانس و فاصله آرماتور از سطح بتن بر اندوکتانس پروب اندازه گیری

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار فیشر	مقدار پی
فرکانس	۴۹۰۹۲/۰	۲	۲۴۵۴/۶	۱۶۵۰۲۰/۴۷	۰/۰۰
فاصله	۱۰/۹	۳	۳/۶	۲۴/۵۳	۰/۰۰
فرکانس × فاصله	۲	۶	۰/۳	۲/۲۸	۰/۰۷۰
خطا	۲۴	۳/۶	۰/۱		
مجموع	۳۵	۴۹۱۰۸/۵			

Table 6. Effects of frequency and reinforcement cover on probe's ohmic resistance

جدول ۶: تاثیرات فرکانس و فاصله آرماتور از سطح بتن بر مقاومت اهمی پروب اندازه گیری

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	عدد فیشر	مقدار پی
فرکانس	۲۰۶۲۲۴۸۸۰	۲	۱۰۳۱۱۲۴۴۰	۲۷۸۴۳۶۷/۱۰	۰/۰۰۰
فاصله	۱۲۱۸۲۲۶	۳	۴۰۶۰۷۵	۱۰۹۶۵/۳۴	۰/۰۰
فرکانس × فاصله	۱۶۴۰۱۸۲	۶	۲۷۳۳۶۴	۷۳۸۱/۷۰	۰/۰۰
خطا	۲۴	۸۸۹	۳۷ ۳۷		
مجموع	۳۵	۲۰۹۰۸۴۱۷۸			

نتایج حاصل نمود.

با توجه به این که در فرکانس ۵۰ کیلوهرتز وضوح بهتری در فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن برای مقاومت اهمی مشاهده گردید، یک مدل رگرسیونی درجه ۲ مطابق رابطه (۴۶) با ضریب همبستگی R^2 برابر با ۰/۹۷ جهت تخمین مناسب مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری در فواصل ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متری از سطح بتن به‌دست آمد.

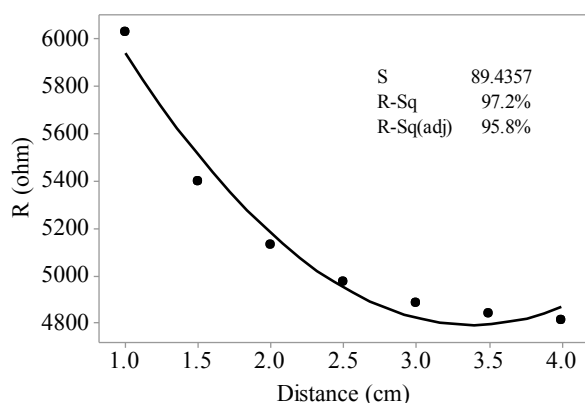
$$R = 7112 - 1372d + 202.7d^2 \quad (46)$$

که در آن R مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری (اهم) و d فاصله آرماتور از سطح بتن (سانتی‌متر) می‌باشد.

شکل ۱۰ تاثیرات فاصله آرماتور از سطح بتن در فرکانس ۵۰ کیلوهرتز بر مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. مشاهده شد تغییرات فاصله آرماتور از سطح بتن در یک فرکانس ثابت باعث کاهش مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری می‌شود و به صورت یک منحنی درجه ۲ نمایش داده می‌شود.

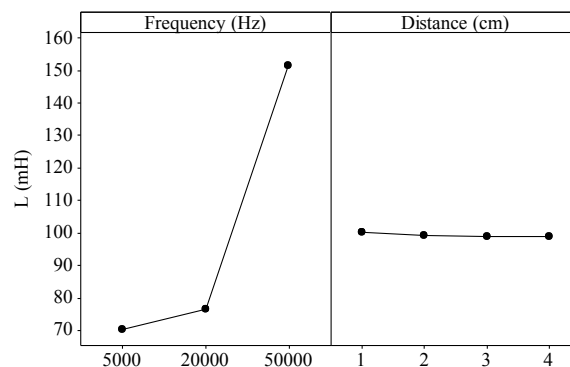
۷- تخمین فاصله آرماتور از سطح

بررسی رفتار مقاومت اهمی ایجاد شده در پروب اندازه‌گیری در فرکانس‌های متنوع و در فاصله‌های d از سطح بتن، به منظور پیش‌بینی فاصله آرماتور از سطح بتن باعث شد عملکرد سامانه با



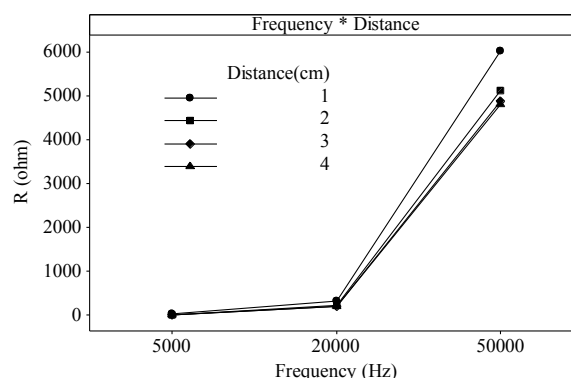
شکل ۱۰: تغییرات مقاومت اهمی در فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن در فرکانس ۵۰ کیلوهرتز

Fig. 10. Changes of ohmic resistance for different reinforcement cover in the frequency of 50 kHz



شکل ۸: تاثیرات فرکانس و فاصله آرماتور از سطح بتن بر روی اندوکتانس پروب اندازه‌گیری

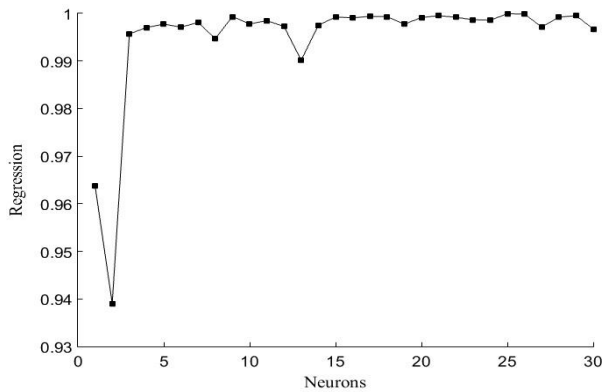
Fig. 8. Effects of the reinforcement cover and frequency on probe's inductance



شکل ۹: تاثیرات فرکانس و فاصله آرماتور از سطح بتن بر روی مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری

Fig. 9. Effects of the reinforcement cover and frequency on ohmic resistance of probe

سطح بتن مقدار اندوکتانس پروب اندازه‌گیری تغییرات کمی داشته ولی این مقدار برای مقاومت اهمی قابل توجه می‌باشد. این موضوع می‌تواند به اندازه‌گیری دقیق‌تر فاصله آرماتور از سطح بتن کمک کند. از طرف دیگر بی‌معنی بودن تداخل فرکانس و فاصله آرماتور از سطح بتن در اندوکتانس پروب اندازه‌گیری باعث می‌شود نتوان در فواصل نزدیک حساسیت پروب اندازه‌گیری را با تغییر فرکانس عوض کرد. این درحالی است که تداخل فاصله آرماتور از سطح بتن و فرکانس در مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری معنادار بوده و می‌توان زمانی که تغییر فاصله آرماتور از سطح بتن کم باشد، با افزایش فرکانس اختلاف فاصله ایجاد شده را افزایش داد و وضوح بهتری جهت به‌دست آوردن



شکل ۱۱: رگرسیون شبکه عصبی

Fig. 11. Regression of neural network

خطا مربوط به فرکانس ۵۰ کیلوهرتز می‌باشد.

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی فاصله آرماتور از سطح بتن به مطالعه روش‌های مختلف آزمون‌های غیرمخرب بتن پرداخته شد. از نرم‌افزار ماکسول جهت شبیه‌سازی پروپ اندازه‌گیری و تاثیرات میدان مغناطیسی حاصل از حضور آرماتور در بتن در فرکانس‌های متفاوت و همچنین فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن استفاده شد. با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی، طراحی و ساخت پروپ اندازه‌گیری انجام شد. پروپ اندازه‌گیری با استفاده

استفاده از مدل‌های عددی شبیه‌سازی گردد. در این تحقیق روش پیشنهادی جهت مدل‌سازی رفتار سامانه استفاده از شبکه عصبی می‌باشد. آزمایش‌های متعددی در سطوح مختلف انجام شد و داده‌های تجربی ثبت گردید، سپس از این داده‌ها برای آموزش شبکه عصبی استفاده شد. بدین منظور ۱۴۰ آزمایش با سطوح مختلف فرکانس و فاصله آرماتور از سطح بتن انجام و مقاومت اهمی پروپ اندازه‌گیری ثبت گردید.

ساختار شبکه عصبی دارای دو ورودی شامل فاصله آرماتور از سطح بتن و فرکانس و یک خروجی شامل مقاومت اهمی پروپ اندازه‌گیری می‌باشد. تعداد نرون‌ها از ۱ الی ۳۰ عدد در نظر گرفته شد و برای هر نرون ۱۰ بار شبکه عصبی آموزش داده شد. میانگین رگرسیون در شکل ۱۱ آورده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود حداقل نرون‌های لازم برای مدل‌سازی رفتار سامانه ۱۶ عدد می‌باشد. با استفاده از ۱۶ نرون شبکه عصبی آموزش داده شد. تعداد ۵ آزمون تجربی در فرکانس‌ها و فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن انجام شد تا بتوان درستی مدل‌سازی انجام شده را ارزیابی نمود.

در جدول ۷ نمونه‌ای از داده‌های تجربی در فرکانس‌های متفاوت و فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن، شبکه عصبی مصنوعی و خطاهای شبکه عصبی مصنوعی با نتایج تجربی آورده شده است. درصد خطا در فرکانس‌های مختلف در رفتار سامانه نشان می‌دهد کمترین مقدار

جدول ۷: نتایج مدل شبکه عصبی

Table 7. Results of neural network model

فرکانس (هرتز)	فاصله آرماتور از سطح بتن (سانتی‌متر)	نتایج تجربی مقاومت اهمی (اهم)	شبکه عصبی مصنوعی (اهم)	خطا (درصد)
۵۰۰	۱/۵	۶/۲	۶/۴۲	۰/۲۲
۷۵۰	۳/۵	۴/۶	۴/۹۷	۰/۳۷
۱۰۰۰	۲/۵	۶/۰	۵/۸۹	۰/۱۲
۳۰۰۰	۴/۵	۸/۲	۸/۸۶	۰/۶۶
۱۰۰۰۰	۴/۵	۴۷/۰	۴۷/۱۶	۰/۱۶
۵۰۰۰۰	۳/۵	۴۸۳۷/۰	۴۳۳۶/۹۸	۰/۰۲

Sensors, 16(2) (2016) 234.

- [5] ASTM C803, Penetration resistance of hardened concrete, American Society for Testing and Materials, (1998).
- [6] ASTM C900, Standard test method for pullout strenght of hardened concrete, American Society for Testing and Materials, (1998).
- [7] H. Hilsdorf, J. Kropp, Performance criteria for concrete durability, CRC Press, 1995.
- [8] ACI 228.2R-98, Non-destructive test methods for evaluation of concrete in structures, American Concrete Institute (1998).
- [9] ASTM C597, Standard test method for pulse velocity through concrete, American Society for Testing and Materials, (1998).
- [10] ASTM C1383, Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates using the Impact-Echo Method,, American Society for Testing and Materials, 4 (1998).
- [11] P.J.M. Monteiro, C.Y. Pichot, K. Belkebir, Computed tomography of reinforced concrete. In: Materials Science of Concrete, Chapter 12,, American Ceramics Society, (1998).
- [12] P.J. Monteiro, F. Morrison, W. Frangos, Non-destructive measurement of corrosion state of reinforcing steel in concrete, Materials Journal, 95(6) (1998) 704-709.
- [13] S.K.U. Rehman, Z. Ibrahim, S.A. Memon, M. Jameel, Nondestructive test methods for concrete bridges: A review, Construction and Building Materials, 107 (2016) 58-86.
- [14] ASTM C876, Standard test method for half cell potentials of uncoated reinforced steel in concrete, American Society for Testing and Materials, 4 (1998).
- [15] Z. Sbartaï, S. Laurens, J. Rhazi, J. Balayssac, G.

از جریان گردابی در فرکانس‌های مختلف و در فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن مسلح آزمایش گردید و با مقایسه نتایج بدست آمده فرکانس بهینه استخراج شد. پارامترهای فرکانس، فاصله آرماتور از سطح بتن، مقاومت اهمی و اندوکتانس با استفاده از روش طراحی آزمایش بهینه‌سازی گردید و مشخص شد پارامترهای فرکانس و فاصله آرماتور از سطح بتن روی اندوکتانس پروب اندازه‌گیری می‌تواند بی‌معنا باشد، در حالی که این پارامترها برای مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری معنادار و قابل قبول است. در فرکانس ۵۰ کیلوهرتز وضوح بهتری در فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن برای مقاومت اهمی مشاهده گردید در این راستا یک مدل رگرسیونی جهت تخمین مناسب مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری در فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن پیشنهاد شد. رابطه رگرسیونی پیشنهاد شده نشان داد تغییرات فاصله آرماتور از سطح بتن در یک فرکانس ثابت باعث کاهش مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری به صورت یک منحنی درجه ۲ است. همچنین برای تخمین فاصله آرماتور از سطح بتن با استفاده از پارامترهای فرکانس، مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری و فاصله آرماتور از سطح بتن یک مدل شبکه عصبی پیشنهاد شد تا بتوان با پارامترهای مذکور فواصل میانی فاصله آرماتور از سطح بتن را تخمین زد. با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبکه عصبی مصنوعی مشاهده گردید در فرکانس ۵۰ کیلوهرتز کمترین مقدار خطا وجود دارد.

مراجع

- [1] L. Workman, P. Moore, Nondestructive Testing Handbook: Vol: 10, Overview, ASNT, Columbus, OH, (2012).
- [2] R.K. Stanley, P.O. Moore, Nondestructive Testing Handbook V. 9: Special Nondestructive Testing Methods, ASNT, 1995.
- [3] D. McCann, M. Forde, Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures, Ndt & E International, 34(2) (2001) 71-84.
- [4] B. Szymanik, P. Frankowski, T. Chady, C. John Chelliah, Detection and inspection of steel bars in reinforced concrete structures using active infrared thermography with microwave excitation and eddy current sensors,

- Destructive Testing and Condition Monitoring, 45(12) (2003) 800-804.
- [25] P. Gaydecki, I. Silva, B. Fernandes, Z. Yu, A portable inductive scanning system for imaging steel-reinforcing bars embedded within concrete, *Sensors and Actuators A: Physical*, 84(1-2) (2000) 25-32.
- [26] V. Pudov, Electromagnetic devices for assessment of the state of reinforcement elements in reinforced-concrete structures, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 42(6) (2006) 369-377.
- [27] S. Quek, P. Gaydecki, B. Fernandes, G. Miller, Multiple layer separation and visualisation of inductively scanned images of reinforcing bars in concrete using a polynomial-based separation algorithm, *NDT & E International*, 35(4) (2002) 233-240.
- [28] C.J. Lammi, D.A. Lados, Effects of residual stresses on fatigue crack growth behavior of structural materials: Analytical corrections, *International Journal of Fatigue*, 33(7) (2011) 858-867.
- [29] H. Schoenekess, W. Ricken, J.-G. Liu, W.-J. Becker, Special constructed and optimised eddy-current sensors for measuring force and strain in steel reinforced concrete, *Sensors and Actuators A: Physical*, 106(1-3) (2003) 159-163.
- [30] M. Zaid, P. Gaydecki, S. Quek, G. Miller, B. Fernandes, Extracting dimensional information from steel reinforcing bars in concrete using neural networks trained on data from an inductive sensor, *NDT & E International*, 37(7) (2004) 551-558.
- [31] N. de Alcantara, F. da Silva, M. Guimarães, M. Pereira, Corrosion assessment of steel bars used in reinforced concrete structures by means of eddy current testing, *Sensors*, 16(1) (2016) 15.
- [32] M.N. Sadiku, *Numerical techniques in electromagnetics*, CRC press, 2000.
- Arliguie, Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity, *Journal of applied geophysics*, 62(4) (2007) 361-374.
- [16] V. Barrile, R. Pucinotti, Application of radar technology to reinforced concrete structures: a case study, *NDT & e International*, 38(7) (2005) 596-604.
- [17] C. Maierhofer, S. Leipold, Radar investigation of masonry structures, *NDT & E International*, 34(2) (2001) 139-147.
- [18] M. Shaw, S. Millard, T. Molyneaux, M. Taylor, J. Bungey, Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks, *Ndt & E International*, 38(3) (2005) 203-212.
- [19] H. Hamasaki, T. Uomoto, M. Ohtsu, H. Ikenaga, H. Tanano, K. Kishi, A. Yoshimura, Identification of reinforced in concrete by electro-magnetic methods, in: *DGZfP Proceedings BB85-CD: International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 2003.
- [20] P.J. Shull, *Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications*, CRC press, 2002.
- [21] J. García-Martín, J. Gómez-Gil, E. Vázquez-Sánchez, Non-destructive techniques based on eddy current testing, *Sensors*, 11(3) (2011) 2525-2565.
- [22] G. Rubinacci, A. Tamburrino, S. Ventre, Concrete rebars inspection by eddy current testing, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 25(1-4) (2007) 333-339.
- [23] N. De Alcantara, Identification of steel bars immersed in reinforced concrete based on experimental results of eddy current testing and artificial neural network analysis, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 28(1) (2013) 58-71.
- [24] C. Kohl, M. Krause, C. Maierhofer, K. Mayer, J. Wöstmann, H. Wiggenhauser, 3D-visualisation of NDT data using a data fusion technique, *Insight-Non-*

