



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

حمیدرضا اسرافیلی^۱، سیدمحمدحسین سیدکاشی^۱، میرسعید صفی‌زاده^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 اندازه‌گیری

جریان گردابی

مقاومت اهمی

شبیه‌سازی اجزاء محدود

خلاصه: آزمون غیرمخرب یکی از تکنیک‌هایی است که جهت اطمینان از سلامت ساختمان‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت مقاوم‌سازی 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 شبیه‌سازی از روش اجزاء محدود و به کمک نرم‌افزار ماکسول انجام گردید و سپس یک نوع پروب اندازه‌گیری طراحی و ساخته شد. زمانی که یک رسانا مانند آرماتور در معرض یک سیم‌پیچ با هسته فریتی قرار می‌گیرد، آرماتور داخل بتن با امواج الکترومغناطیس فرکانس پایین اندرکنش نشان داده و با اندازه‌گیری 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 سیم‌پیچ قابل پیش‌بینی می‌باشد. 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 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 اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری 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 عهده‌دار 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 سایز و اندازه آرماتور استفاده شده است [۱۷-۱۴]. کمیته 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 اسکنر القایی 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 اسکنر چند منظوره با سنسور جریان گردابی موقعیت آرماتور را در بتن به کمک یک نرم‌افزار پایه شناسایی شد. اسکنر 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 گرانروی 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
	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 ...
	توانایی تشخیص حساسیت	عدم ارائه اطلاعات در مورد وجود خوردگی، نرخ خوردگی در میلگرد داخل بتن
	تشخیص خرابی بتن ارزیابی خواص بتن	هزینه بالا نسبت به دیگر روش‌ها
ترموگرافی مادون قرمز	تشخیص ترک	عدم تشخیص عیوب عمیق مشکل است
	شناسایی حفره‌ها	عدم ارائه اطلاعات مربوط به عمق ترک
	تغییرات مواد	تاثیر عواملی از قبیل بی‌نظمی سطحی، شرایط مرزی و دمای جوی بر نتایج
	تغییر در تراکم، هدایت حرارتی و حرارت	
چکش	تشخیص خواص بتن ارائه جزئیات اولیه برای آزمایشات بیشتر	عدم استفاده در سطوح عمودی 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 قطرهای 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 به دست 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 آزمایشی 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].

$$\nabla^2 A_x = -\mu_0 J \quad (17)$$

$$\nabla^2 A_y = -\mu_0 J \quad (18)$$

$$\nabla^2 A_z = -\mu_0 J \quad (19)$$

هر کدام از معادلات (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) دارای جواب خاص به صورت رابطه (۲۰) است.

$$A_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{J_x}{R} dv \quad (20)$$

رابطه (۲۱) ترکیب جواب‌های خاص در معادلات (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) است.

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{J}{R} dv \quad (21)$$

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.

$$J_{Total} = J_s + J_c + J_d \quad (22)$$

$$J_s = (-\sigma \nabla V) \quad (23)$$

$$J_c = (-j \omega A - \nabla V) \quad (24)$$

$$J_d = [j \omega A (-j \omega A - \nabla V)] \quad (25)$$

روابط (۲۶)، (۲۷) و (۲۸) جریان‌های هدایتی، انتقالی و گردابی حاصل از میدان مغناطیسی است.

$$\left(E + \frac{\partial A}{\partial t} \right) = -\nabla V \quad (9)$$

رابطه (۱۰) شکل دیگر رابطه (۹) در حوزه فرکانس است.

$$E = -j \omega A - \nabla V \quad (10)$$

از طرفی معادله (۲) در حوزه فرکانس در رابطه (۱۱) آورده شده است.

$$\nabla \times H = (\sigma + j \omega \epsilon) E \quad (11)$$

رابطه (۱۲)، جایگذاری مقدار E در معادله (۱۱) است.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) = (-j \omega A - \nabla V) (\sigma + j \omega \epsilon) \quad (12)$$

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

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (13)$$

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

$$\nabla \times \nabla \times A = \mu_0 J \quad (14)$$

$$\nabla (\nabla \cdot A) - \nabla^2 A = \mu_0 J \quad (15)$$

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

$$\nabla^2 A = -\mu_0 J \quad (16)$$

شکل دیگر رابطه (۱۶) در مختصات کارتزین روابط (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) 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.

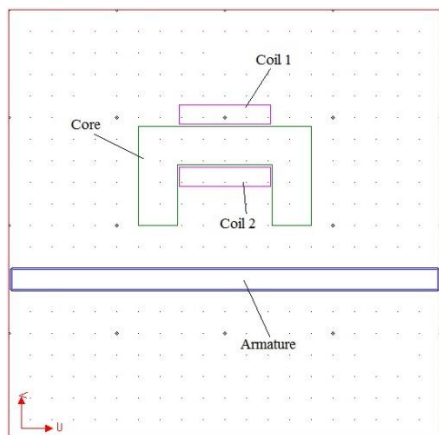
$$U_{av} = \frac{1}{4} \int_v B \cdot Hd_v \quad (32)$$

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
کویل ۱	مس
کویل ۲	مس
هسته مرکزی	فریت
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.

$$R = \frac{P}{I_{Rms}^2} = \frac{2P}{I_{Peak}^2} \quad (۴۱)$$

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

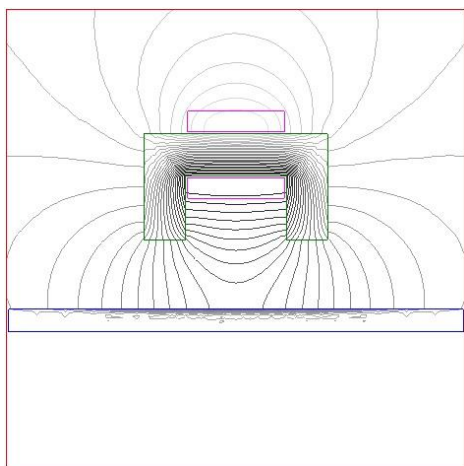
۳- شبیه‌سازی میدان مغناطیسی به روش اجزاء محدود

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 تاثیرات جریان‌های متغیر با زمان مناسب است. در این محیط، توانائی مدل‌سازی جریان‌های گردابی، تاثیرات 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 کویل بود.

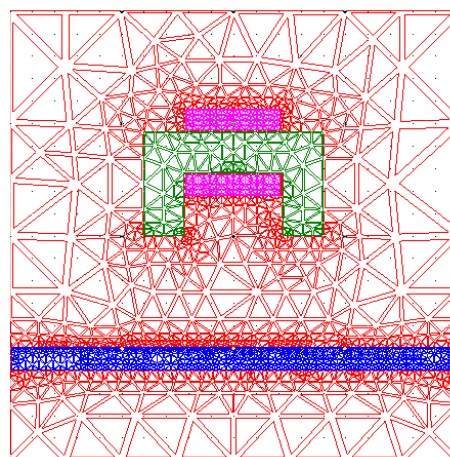
ب) انتخاب جنس مواد: جدول ۲ جنس مواد انتخاب شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که ضریب هدایت الکتریکی بتن و هوا تقریباً یکسان است، از مدل‌سازی بتن صرف‌نظر شد. ج) اعمال شرایط مرزی: برای مشخص نمودن شرایط مرزی در شبیه‌سازی به کمک بسته جریان گردابی، مقدار جریان عبوری از کویل ۱ و کویل ۲ مورد نیاز بود (شکل ۱). جریان در کویل‌ها 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

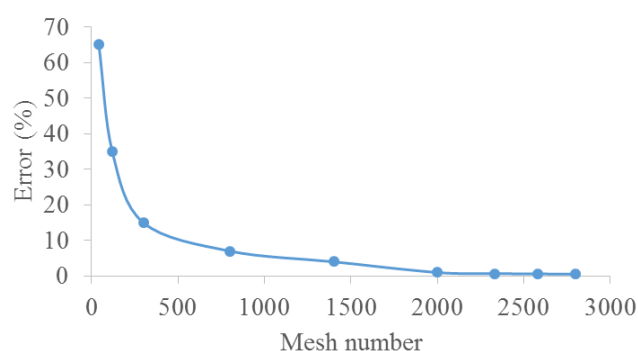
Fig. 2. Triangular elements

شد. قالب فلزی داری 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 $25 \times 52 \times 10$ 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



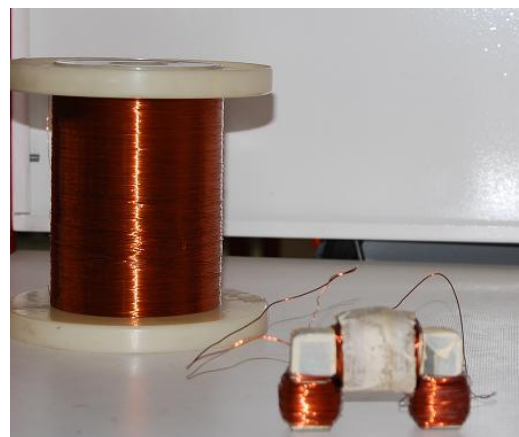
شکل ۵: بلوک‌های بتنی ساخته شده به همراه آرماتور نهفته در آن

Fig. 5. Casted concrete specimens containing steel reinforcement



شکل ۶: نمائی از قالب فلزی

Fig. 6. Metal formwork



شکل ۷: پروب اندازه‌گیری

Fig. 7. Fabricated measurement probe

تعداد دورهای سیم پیچ:

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.

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

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

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

که در آن N تعداد دورهای سیم پیچ 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.

۳-۴ 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 سیم پیچ، ولتاژهای ورودی و خروجی، اسیلوسکوپ دو کاناله مدل آ.ا.س-۵۰۴^۱ و دستگاه ال‌سی متر 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

1 AOS-540a

2 LCR-821

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
فرکانس (هرتز)	۵۰۰۰	۲۰۰۰۰	۵۰۰۰۰
فاصله (سانتی‌متر)	۱	۲	۳

Table 4. Test results

جدول ۴: نتایج آزمایش

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

Table 4. Test results

ادامه جدول ۴: طراحی آزمایش

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

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 به دست آمد.

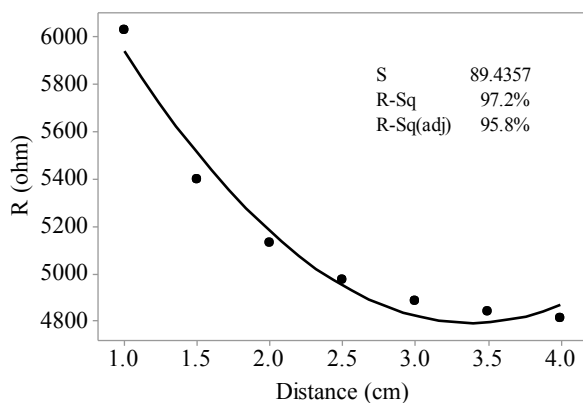
$$R = 7112 - 1372d + 202.7d^2 \quad (46)$$

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.

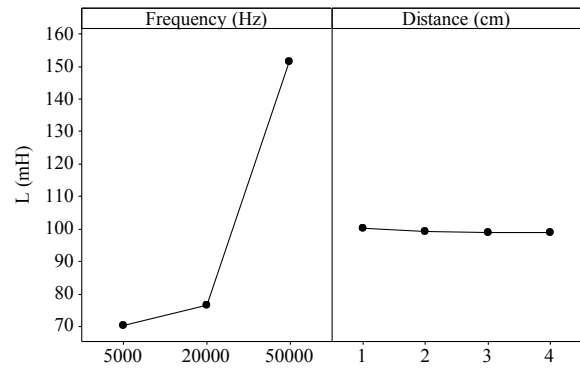
۷- تخمین فاصله آرماتور از سطح

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



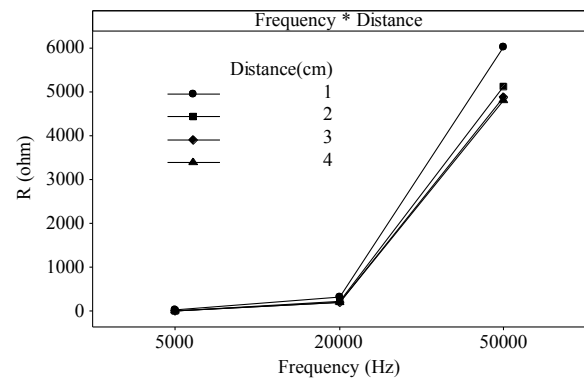
شکل ۱۰: تغییرات مقاومت اهمی در فواصل مختلف آرماتور از سطح بتن در فرکانس ۵۰ کیلوهرتز

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

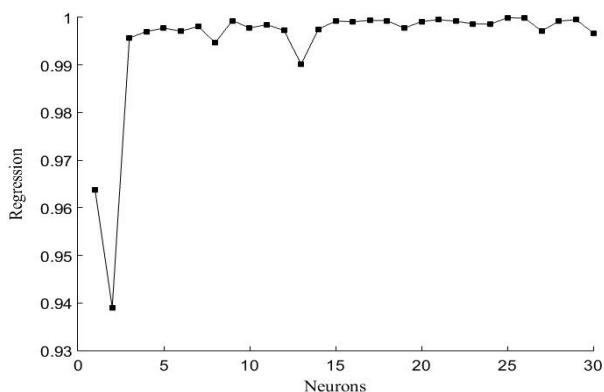
Fig. 8. Effects of the reinforcement cover and frequency on probe's inductance



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 به دست 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 آرما تور از سطح بتن به مطالعه روش‌های مختلف آزمون‌های غیرمخرب بتن پرداخته شد. از نرم‌افزار ماکسول جهت شبیه‌سازی پروب اندازه‌گیری و تاثیرات میدان مغناطیسی حاصل از حضور آرما تور در بتن در فرکانس‌های متفاوت و همچنین فواصل مختلف آرما تور از سطح بتن استفاده شد. با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی، طراحی و ساخت پروب اندازه‌گیری انجام شد. پروب 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 آرما تور از سطح بتن انجام و مقاومت اهمی پروب اندازه‌گیری ثبت گردید.

ساختار شبکه عصبی دارای دو ورودی شامل فاصله آرما تور از سطح بتن و فرکانس و یک خروجی شامل مقاومت اهمی پروب 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 آرما تور 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 آرما تور 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

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

- 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 strength 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-*

