



# اندازه‌گیری اثر تانک در روش تشخیص تغییر شکل شعاعی سیم پیچ ترانسفورماتور توسط امواج الکترومغناطیسی

مریم‌السادات اخوان حجازی، مریم صباغ‌پور آرانی

دانشکده مهندسی برق

دانشگاه کاشان

کاشان، ایران

قاسم مختاری

شرکت ابن سینا (Pty Ltd)

بریسبین، استرالیا

گئورگ قره‌پتیان

دانشکده مهندسی برق

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تهران، ایران

## ۱. مقدمه

حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت به عنوان یکی از گران‌ترین اجزاء شبکه، در برابر اتفاقات نامطلوب و خطاهای ممکن، از خروج ناخواسته ترانس و تحمیل هزینه‌های تعمیر و خاموشی جلوگیری می‌نماید. سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور یکی از نقاط بالقوه‌ی ایجاد عیوب مکانیکی و الکتریکی در ترانسفورماتور می‌باشد. لذا تشخیص، عیب‌یابی و مکان‌یابی تغییر شکل سیم‌پیچی ب خصوص در مراحل اولیه‌ی خرابی آن‌ها بسیار با اهمیت است. روش‌های مونیتورینگ برخط نسبت به روش‌های دوره‌ای مانند روش اتصال کوتاه [۱]، روش آزمایش ضربه فشار ضعیف [۲]، روش تحلیل پاسخ فرکانسی یا تابع تبدیل [۳] و استفاده از امواج مافوق صوت [۴] مزیت‌های فراوانی دارند. یکی از بهترین روش‌ها برای تشخیص عیوب مکانیکی سیم‌پیچ بصورت برخط استفاده از امواج الکترومغناطیسی می‌باشد. در مدل پیشنهادی، از امواج فرایه‌ن باند (UWB) و دو آنتن فرستنده گیرنده برای ارسال سیگنالها استفاده میشود و با تحلیل امواج برگشتی وجود عیب در سیم‌پیچ بررسی میشود. از شاخص پیشنهادی برای سیگنال دریافتی می‌توان در تشخیص جابجایی محوری و تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ ترانسفورماتور استفاده کرد.

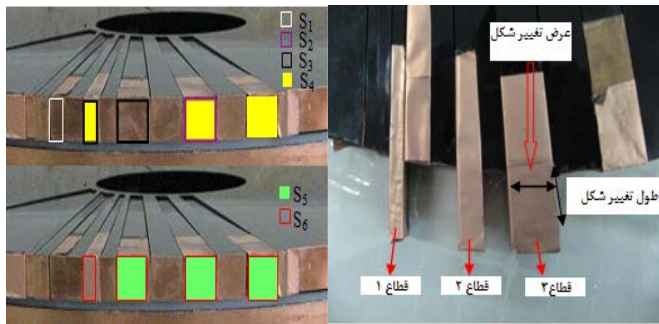
چکیده — یکی از روش‌های ارائه شده جهت مونیتورینگ برخط سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای قدرت استفاده از امواج الکترومغناطیسی می‌باشد. با توجه به اینکه تانک فلزی جزء لاینفک یک ترانسفورماتور می‌باشد، در نظرگیری اثرات آن در روش پیشنهادی به منظور مونیتورینگ برخط آن ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به فلزی بودن تانک، اثرات منفی آن روی سیگنال دریافتی آنتن گیرنده و ایجاد پدیده چند مسیری قابل پیش‌بینی است. در این مقاله از یک مدل ساده ساخته شده از سیم‌پیچ ترانسفورماتور جهت بررسی و اندازه‌گیری اثر تانک بمنظور تشخیص تغییر شکل شعاعی سیم‌پیچ ترانسفورماتور با استفاده از امواج فرایه‌ن باند (UWB) تحقیق شده است. نتایج اندازه‌گیری امکان استفاده از این روش را حتی با وجود تانک تایید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی — مانیتورینگ؛ سیم‌پیچی ترانسفورماتور؛

سنسورهای UWB؛ عیب شعاعی؛ چند مسیری؛ تانک ترانسفورماتور

برای مدل کردن تغییر شکل شعاعی در این آزمایش از ترکیب‌های مختلف قطعه‌هایی با پهنای ۰.۵، ۱ و ۲ در ۸ حجم مختلف ساخته می‌شود. شکل ۲ (الف و ب) جزئیات مدل ساخته شده را نشان می‌دهد. مشخصات ابعادی این مدل در جدول ۱ ارائه شده است.

با توجه به مدل سیم‌پیچی ساخته شده، مشخص است که شیارهای ایجاد شده عمود بر قطر دیسک می‌باشند. بنابراین برای مدل کردن تغییر شکل شعاعی قطعه‌ها مستقیماً به سمت بیرون کشیده می‌شوند.



الف ب

شکل ۲: الف) قطعه‌های استفاده شده برای ایجاد تغییر شکل‌های شعاعی با حجم‌های مختلف ب) سطح مقطع قطعه‌های مختلف

جدول ۱: ابعاد ترکیب‌های مختلف قطعه‌های مدل‌کننده تغییر شکل شعاعی

ترکیب قطعه	ضخامت تغییر شکل × عرض تغییر شکل (cm)	مساحت (cm <sup>2</sup> )
$S_1$	$1 \times 2$	2
$S_2$	$2 \times 2$	4
$S_3$	$1 \times 2 + 2 \times 2$	6
$S_4$	$1 \times 2 + 2 \times 2 + 2 \times 2$	10
$S_5$	$2 \times 2 + 2 \times 2 + 2 \times 2$	12
$S_6$	$2 \times 2 + 2 \times 2 + 2 \times 2 + 1 \times 2$	14

طول تغییر شکل از ۰ تا ۴۰ میلی‌متر با گام‌های ۲ میلی‌متر تغییر داده شد، بنابراین ۱۲۰ حالت مختلف تغییر شکل شعاعی با حجم‌های مختلف ایجاد شد.

مدل‌سازی و اندازه‌گیری تغییر شکل سیم پیچ ترانسفورماتور در دو حالت بدون در نظرگیری تانک ترانسفورماتور و با در نظرگیری آن انجام می‌شود. نتایج ارائه شده در بخش مدل‌سازی نشان می‌دهد وجود تانک ترانس برای آشکارسازی عیب نمی‌تواند مشکل خاصی ایجاد کند، زیرا آشکارسازی بر پایه مقایسه است و در هر دو حالت سالم و معیوب اثر تانک وجود دارد و در نهایت حذف می‌شود [۵]. در این مقاله برای در نظر گرفتن اثر تانک، از صفحه‌های فلزی در هر کدام از وجه‌های مدل ساخته شده ترانس در اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌شود.

## ۲. سیستم‌های فرابهن باند (UWB)

با توجه به استانداردهای وضع شده سیستم‌های UWB، سیستم‌هایی با پهنای باند نسبی به کار گرفته شده بیشتر از یک چهارم و یا پهنای باند بیشتر از ۵۰۰ مگاهرتز تعریف می‌شود. از قابلیت‌های مهم UWB توانایی انتقال اطلاعات با سرعت خیلی بالا در مسافت‌های کم می‌باشد. سیستم‌های UWB پالس‌هایی را ارسال می‌کنند که بسیار باریک با پهنای در حدود نانو ثانیه، خیلی کوتاه با زمان صعود و نزول کم، دارای طیف خیلی وسیع و محتویات انرژی کم هستند. از ویژگی‌های این سیستم‌ها می‌توان به توانایی عبور پالس‌ها از اشیاء، عدم نیاز به پهنای باند اختصاصی، هزینه کم تجهیزات، سرعت تبادل اطلاعات بالا و توان مصرفی پایین اشاره کرد [۶].

## ۳. مدل آزمایشگاهی ساخته شده

همانطور که بیان شد، پالس‌های UWB توسط یک آنتن فرستنده ارسال و در آنتن گیرنده دریافت می‌شود. از آنتن ویوالدی در این آزمایش استفاده شده که از مزیت مهم این آنتن تمرکز انرژی زیاد در واحد سطح می‌باشد. و در شکل ۱ مدل آزمایشگاهی کلی را نشان می‌دهد.



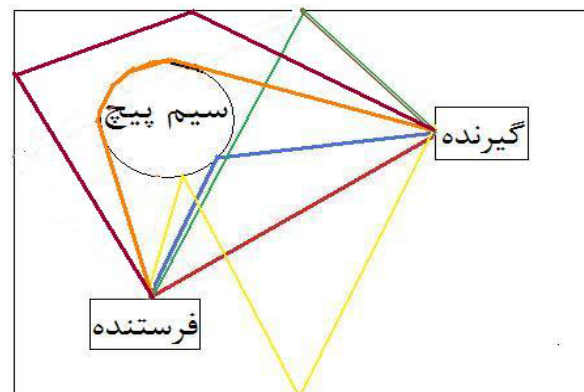
شکل ۱: نحوه قرارگیری تجهیزات اندازه‌گیری و مدل سیم پیچ و آنتن‌های ویوالدی

#### ۴. پدیده چند مسیری در مدل‌سازی تانک ترانس

برای مدل‌سازی تانک ترانسفورماتور باید این حقیقت را بپذیریم که امواج الکترومغناطیسی از سطوح رسانا عبور نمی‌کنند. بنابراین باید انتظار داشته باشیم سیگنال در گیرنده مجموعه‌ای خواهد بود از چندمسیری‌ها از سیم‌پیچ و دیواره‌های مختلف که با فاصله زمانی‌های متفاوتی در گیرنده دریافت می‌شوند و تفکیک زمانی آن‌ها مشکل خواهد بود.

لذا به طور کلی می‌توان گفت سیگنال دریافتی مجموعه‌ای از چندمسیری‌ها به صورت شکل ۳ است. این چندمسیری‌ها عبارتند از:

- ۱ - چند مسیری مسیر مستقیم آنتن به آنتن (مسیر قرمز رنگ)
- ۲ - چندمسیری مدل سیم پیچ (مسیر آبی رنگ)
- ۳ - چندمسیری محفظه که بعد از چندمسیری مدل سیم پیچ به گیرنده می‌رسد (مسیر سبز رنگ)
- ۴ - چندمسیری سیم پیچ که بعد از یک یا چند انعکاس از محفظه به گیرنده می‌رسد (مسیر زرد رنگ)
- ۵ - چندمسیری محفظه که بعد از یک یا چند بار انعکاس دیگر از محفظه به گیرنده می‌رسد (مسیر قهوه ای رنگ)



شکل ۳: مثالی از مسیرهای مختلف دریافت چندمسیری در گیرنده با حضور دیواره فلزی

#### ۵. شاخص‌های پیشنهادی جهت تشخیص عیوب

با توجه به این نکته که مکان اولین چندمسیری دریافتی از مدل سیم‌پیچ مشخص است، می‌توان به کمک ابعاد سیم‌پیچ از لحاظ شعاع و ارتفاع، محدوده چندمسیری‌های بازگشتی از سیم‌پیچها را در محور زمان مشخص نمود.

مبنای شاخص‌های پیشنهادی جهت تشخیص عیوب سیم‌پیچ مقایسه سیگنال‌های بدست آمده در حالات معیوب مدل سیم‌پیچ ترانس با سیگنال مرجع می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان بخشی از موج را که مربوط به امواج برگشتی از ترانسفورماتور می‌باشد را جدا نمود ( $W'_1$  و  $W'_2$  و  $W'_3$  و  $W'_n$ ). با توجه به ثابت بودن بقیه اجزاء در محیط آزمایش به جز مدل سیم‌پیچ ترانس، بردارهای  $W'_2$  و  $W'_3$  و  $W'_n$  (امواج بدست آمده از آزمایش‌های مختلف با عیوب متفاوت) با  $W'_1$  (موج بدست آمده از حالت سالم) توسط معیار میانگین قدر مطلق فاصله  $MAD$  با هم مقایسه می‌شوند. معیار  $MAD$  به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$MAD(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=T_1/T_s}^{T_2/T_s} \left| \frac{W'_k(j) - W'_1(j)}{W'_1(j)} \right|, k=2, \dots, n \quad (1)$$

$T_1$  ابتدای پنجره زمانی و  $T_2$  انتهای آن و  $T_s$  نرخ نمونه برداری می‌باشد و  $N$  تعداد نمونه‌های دریافتی در پنجره تعریف شده است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$N = \frac{T_2 - T_1}{T_s} \quad (2)$$

با توجه به پارامترهای در نظر گرفته شده و شکل موج‌های دریافتی می‌توان محدوده‌ی تغییرات در نظر گرفته شده را برای سیم‌پیچ‌ها مشخص نمود و پنجره زمانی را مشخص کرد [۷].

#### ۶. اندازه‌گیری اثر تانک ترانسفورماتور

در این بخش برای تحلیل اثر دیواره فلزی از صفحات فلزی در هر کدام از وجه‌های ترانس در ۵ مرحله اندازه‌گیری انجام می‌شود. مشخصات ابعادی مراحل با توجه به چیدمان اندازه‌گیری شکل ۱ در جدول ۲ آورده شده است.

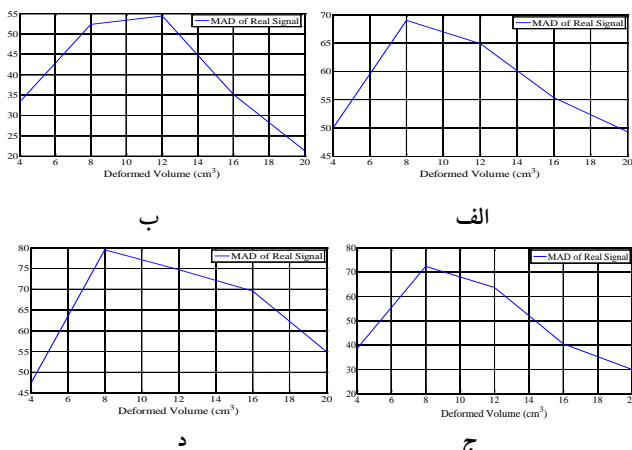
<sup>1</sup> Mean Absolute Distance

جدول ۲: مشخصات ابعادی مراحل

۸۵cm	فاصله بین آنتن فرستنده و گیرنده
۷.۳۲ cm	ارتفاع آنتن‌ها از سطح میز آزمایش
۶۰cm	فاصله مرکز مدل سیم‌پیچ ترانس از آنتن‌های فرستنده و گیرنده
۲×۴ cm <sup>2</sup>	اندازه قطاع جابجا شده

شکل‌های ۶ مقادیر MAD بر حسب حجم جابجا شده برای سیگنال دریافتی در زوایای +۴۵، -۳۰، +۳۰، +۴۵ از آزمایش را نشان می‌دهد.

با مقایسه شکل‌ها مشاهده می‌شود که اندازه مشخصه MAD برای یک عیب تغییر شکل شعاعی در سمت گیرنده بزرگتر از اندازه مشخصه MAD همان عیب در سمت فرستنده می‌باشد. این مسئله می‌تواند در تفکیک عیوب مختلف به کار گرفته شود. زیرا هنگامی که پالسی توسط فرستنده ارسال می‌شود با افزایش فاصله از فرستنده دامنه آن تضعیف می‌شود و هنگامی که تغییراتی در محیط در فاصله بیشتری از فرستنده به وجود آید روی سیگنالی که دامنه آن کاهش یافته تأثیر بیشتری خواهد داشت.



شکل ۶: مقادیر MAD سیگنال دریافتی مرحله اول برای زوایای الف) +45 (ب) +۳۰، ج) -۳۰، د) -۴۵

## ۶.۲ مرحله دوم: دیواره فلزی در سمت آنتن فرستنده

### یا گیرنده

با توجه به تقارن موجود در چیدمان دیواره فلزی در سمت آفرستنده یا گیرنده که در شکل ۷ رسم شده، می‌توان گفت دیواره طرف فرستنده یا گیرنده باعث می‌شود سیگنال ارسالی فرستنده پس از بازتاب از این دیواره و برخورد به سیم‌پیچ، در گیرنده دریافت شود. فاصله دیواره فلزی از آنتن فرستنده برای آزمایش ۲۵cm می‌باشد. مکان دیسک قطاع‌بندی شده، زاویه ۰ درجه است.

## ۶.۱ مرحله اول: دیواره فلزی در پشت مدل سیم‌پیچ

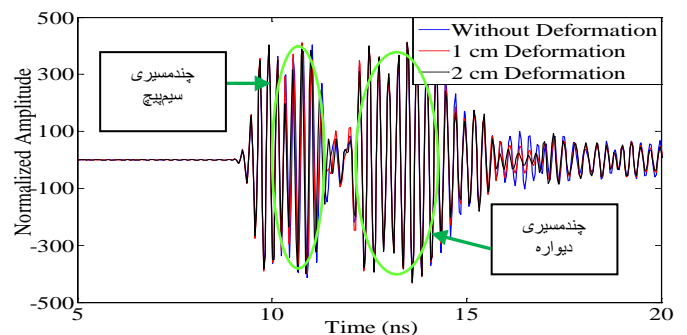
### ترانس

در این مرحله یک دیواره فلزی در پشت مدل سیم‌پیچ ترانس قرار داده شده است (شکل ۴). فاصله دیواره فلزی از مرکز مدل سیم‌پیچ ترانس ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۴: چیدمان آزمایشگاهی مرحله اول

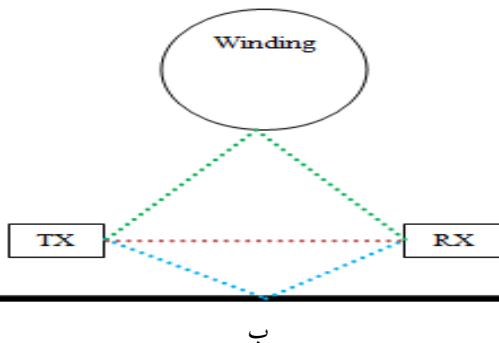
برای بررسی اثر زوایای مختلف عیب، برآمدگی دیسک را در مکان عیب و زوایای مختلف صفر، +۳۰، +۴۵، -۳۰، -۴۵ درجه قرار داده می‌شود به طور مثال شکل ۵ پالس‌های دریافتی توسط گیرنده را در حالت بدون عیب (زاویه ۰ درجه) مدل سیم‌پیچ و دو حالت جابجایی قطاع ۲×۴ cm<sup>2</sup> نشان می‌دهد.



شکل ۵: شکل موج‌های دریافتی در آزمایش اول برای حالت سالم و دو حالت معیوب مدل سیم‌پیچ



الف

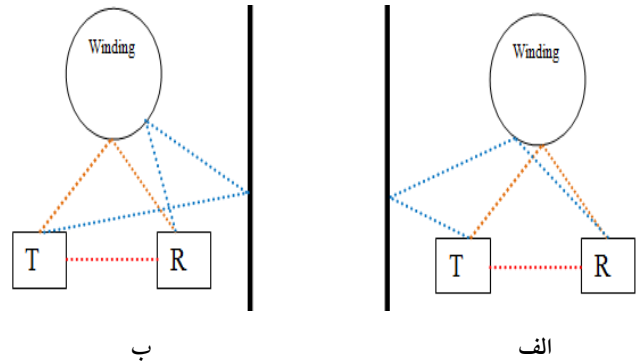


ب

شکل ۸: الف) مدل ساخته شده دیواره فلزی پشت آنتن‌های فرستنده و گیرنده  
ب) مسیرهای مختلف دریافت چندمسیری گیرنده در مرحله سوم

شکل ۹ الف سیگنال‌های دریافتی توسط گیرنده در حالت بدون عیب

مدل سیم‌پیچ و حالت‌های جابجایی قطاع  $2 \times 4 \text{ cm}^2$  به اندازه ۱ و ۲ سانتی‌متر نشان می‌دهد. همانطو که مشاهده می‌شود، چندمسیری دیواره قبل از چندمسیری سیم‌پیچ دریافت می‌شود که به راحتی قابل تفکیک هم نیست. بنابراین بهتر است پشت آنتن و روی بدنه ترانس از جاذب در این وجه استفاده شود. شکل ۹ ب مقادیر MAD بر حسب حجم جابجا شده را برای سیگنال دریافتی آزمایش در حالت سالم مدل سیم‌پیچ ترانس و سیگنال تخمین زده شده نشان می‌دهد. با وجود در هم آمیختگی در چندمسیری‌ها همانگونه که در شبیه‌سازی‌ها مشاهده شد، به علت مقایسه‌ای بودن روش در تشخیص بوسیله شاخص خللی وارد نشده است.



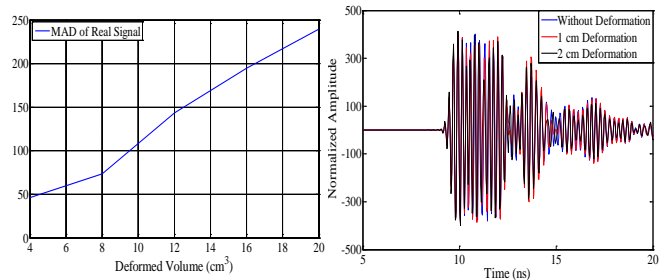
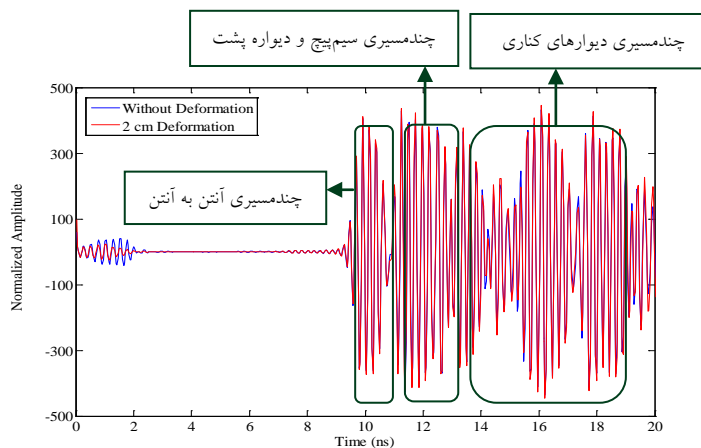
شکل ۷: الف) دیواره فلزی در سمت آنتن فرستنده ب) دیواره فلزی در سمت آنتن گیرنده

نتایج آزمایش نشان می‌دهد که چندمسیری مربوط به دیواره فلزی از چندمسیری مربوط به مدل سیم‌پیچ ترانس جدا شده و با افزایش فاصله دیواره فلزی چندمسیری مربوط به آن نیز با تأخیر بیشتری در گیرنده دریافت می‌شود.

مقادیر شاخص MAD بر حسب حجم جابجا شده برای سیگنال دریافتی آزمایش در حالت سالم مدل سیم‌پیچ ترانس و سیگنال تخمین زده شده برای تشخیص تغییر شکل شعاعی دریافت شد.

### ۶.۳. مرحله سوم: دیواره فلزی در پشت آنتن‌های فرستنده و گیرنده

در این آزمایش دیواره فلزی پشت آنتن‌های فرستنده و گیرنده قرار دارد. موقعیت مدل سیم‌پیچ ترانس و آنتن‌های فرستنده و گیرنده در شکل ۸ الف مدل‌سازی آزمایشگاهی و ۸ ب امواج چندمسیری ایجاد شده را نشان می‌دهد. فاصله دیواره فلزی از خط واصل بین فرستنده و گیرنده ۲۰ cm و مکان دیسک قطاع‌بندی شده، زاویه ۰ درجه است.



الف ب

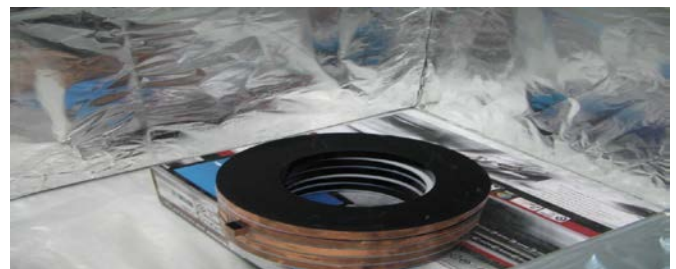
شکل ۹: الف) شکل موج‌های دریافتی مرحله سوم برای حالت سالم و دو حالت عیب مدل سیم پیچ ترانس (ب) اندازه MAD بر حسب حجم جابجا شده

### ۶.۴. مرحله چهارم: تانک فلزی کامل در چهار طرف

#### مدل سیم پیچ

شکل ۱۰ مدل سیم پیچ را داخل تانک فلزی نشان می‌دهد. مشخصات ابعادی ستاپ در جدول ۳ ارائه شده است.

با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری اثر هر یک از دیواره‌ها، موج دریافتی قابل تفسیر می‌باشد. چند مسیری‌های مختلف در این شکل ۱۱ از هم تفکیک شده‌اند.



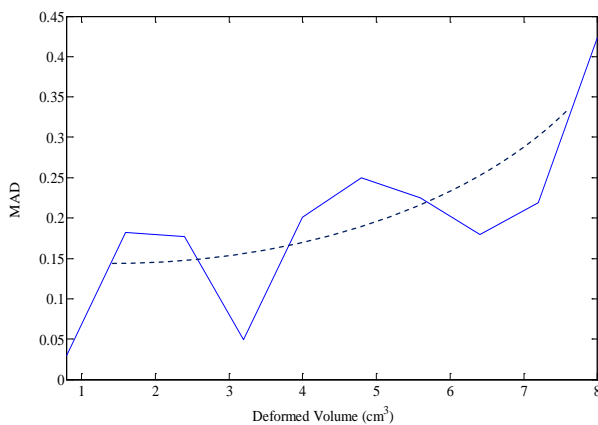
شکل ۱۰: مدل ساخته شده سیم پیچ ترانسفورماتور داخل تانک فلزی

#### جدول ۳: مشخصات ابعادی مرحله

۴۷ cm	فاصله بین آنتن فرستنده و گیرنده
۲۴.۵ cm	ارتفاع آنتن‌ها از سطح میز آزمایش
۱۲.۵ cm	ارتفاع مدل سیم پیچ ترانس از سطح میز آزمایش
۵۵ cm	فاصله مرکز مدل سیم پیچ ترانس از آنتن‌های فرستنده و گیرنده
۲۵ cm	فاصله دیوار فلزی از مرکز مدل سیم پیچ ترانس
۲×۲ Cm <sup>2</sup>	اندازه قطاع جابجا شده

شکل ۹: شکل موج‌های دریافتی برای حالت سالم و یک حالت عیب مدل سیم پیچ ترانس در مرحله نهایی

شکل ۱۰ اندازه MAD بر حسب حجم جابجا شده را برای سیگنال اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: اندازه شاخص MAD بر حسب حجم جابجا شده برای سیگنال اندازه‌گیری شده در مرحله نهایی

با توجه به اندازه‌گیری اثر هر یک از دیواره‌ها، موج دریافتی قابل تفسیر می‌باشد. چند مسیری‌های مختلف در این شکل از هم تفکیک شده‌اند. این شاخص نشان می‌دهد با وجود دیواره‌های فلزی در اطراف سیم پیچی ترانس شاخص با افزایش جابجایی قطاع‌ها افزایش پیدا می‌کند.

## ۷. نتیجه‌گیری

هدف تحلیل‌های انجام شده در این مقاله، تشخیص وجود عیب شعاعی با وجود تانک ترانسفورماتور می‌باشد. برای داشتن بهترین کیفیت تشخیص بهتر است که در برخی قسمت‌های جدار داخلی تانک از جاذب‌های صفحه‌ای استفاده شود. اندازه‌گیری‌ها به وسیله دستگاه PulsON 220 انجام می‌شود. برای حذف داده‌های نامناسب از دو فیلتر برای سیگنال‌های اندازه‌گیری شده استفاده شده است. سپس تأخیر بین داده‌های حذف و داده‌ها همزمان می‌شوند. میانگین سیگنال‌های بدست آمده از هر آزمایش به عنوان نماینده هر حالت مدل سیم‌پیچ ترانس در نظر گرفته شدند. سپس چندمسیری‌های مربوط به مدل سیم‌پیچ ترانس از بقیه داده‌ها جدا شد. برای تحلیل داده‌های اندازه‌گیری معیار  $MAD$  برای چندمسیری مربوط به مدل سیم‌پیچ ترانسفورماتور به کار گرفته شد. افزایش شاخص با افزایش عیوب در هر مرحله آزمایش بیانگر این است که وجود تانک ترانس برای آشکارسازی عیب نمی‌تواند مشکل خاصی ایجاد کند، زیرا آشکارسازی بر پایه مقایسه است و در هر دو حالت سالم و معیوب اثر تانک وجود دارد و در نهایت حذف می‌شود. بنابراین استفاده از نتایج اندازه‌گیری روش امواج مغناطیسی بر مانتورینگ برخط سیم‌پیچ ترانس قابل انجام می‌باشد.

## منابع

- [1] D.K.Xu and Y.M.Li, "A Simulating Research on Monitoring of Winding Deformation of Power Transformer by On-line Measurement of Short-Circuit Reactance," in Proc. International Conference on Power System Technology, 1998.
- [2] M. Wang, A.J. Vandermaar, K.D. Srivastava "Condition monitoring of transformers in service by the low voltage impulse test method," in Proc. 11th International Symposium on High Voltage Engineering, 1999.
- [3] S.Naiqiu, Z.Can, H.Fang, L.Qisheng and Z.Lingwei, "Study on Ultrasonic Measurement Device for Transformer Winding Deformation", IEEE, 2002, pp.1401-1404.
- [4] S. Naiqiu, Z. Can, H. Fang, L. Qisheng, Z. Lingwei, "Study on ultrasonic measurement device for transformer winding deformation," in proc. International Conference on Power System Technology, pp. 1401-1404, 2002.
- [5] G. Mokhtari, G. B. Gharehpetian, R. Faraji-Dana and M. A. Hejazi, "Modelling of Tank Effect in Transformer Winding Radial Deformation Monitoring Using UWB Sensors", 19th Iranian Conference on Electrical Engineering, Tehran, Iran, 17-19 May 2011.
- [6] FCC, "Revision of part 15 of the commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission" First Report & order, Et Pocket 98-153, FCC 02-8, Adopted/Released Feb/Apr. 2002.

[۷] م. اخوان حجازی، "اندازه‌گیری جایجایی محوری و شعاعی سیم‌پیچ ترانسفورماتور به کمک امواج الکترومغناطیسی بر روی یک مدل آزمایشگاهی" رساله دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شهریور ۱۳۹۰، تهران، ایران.