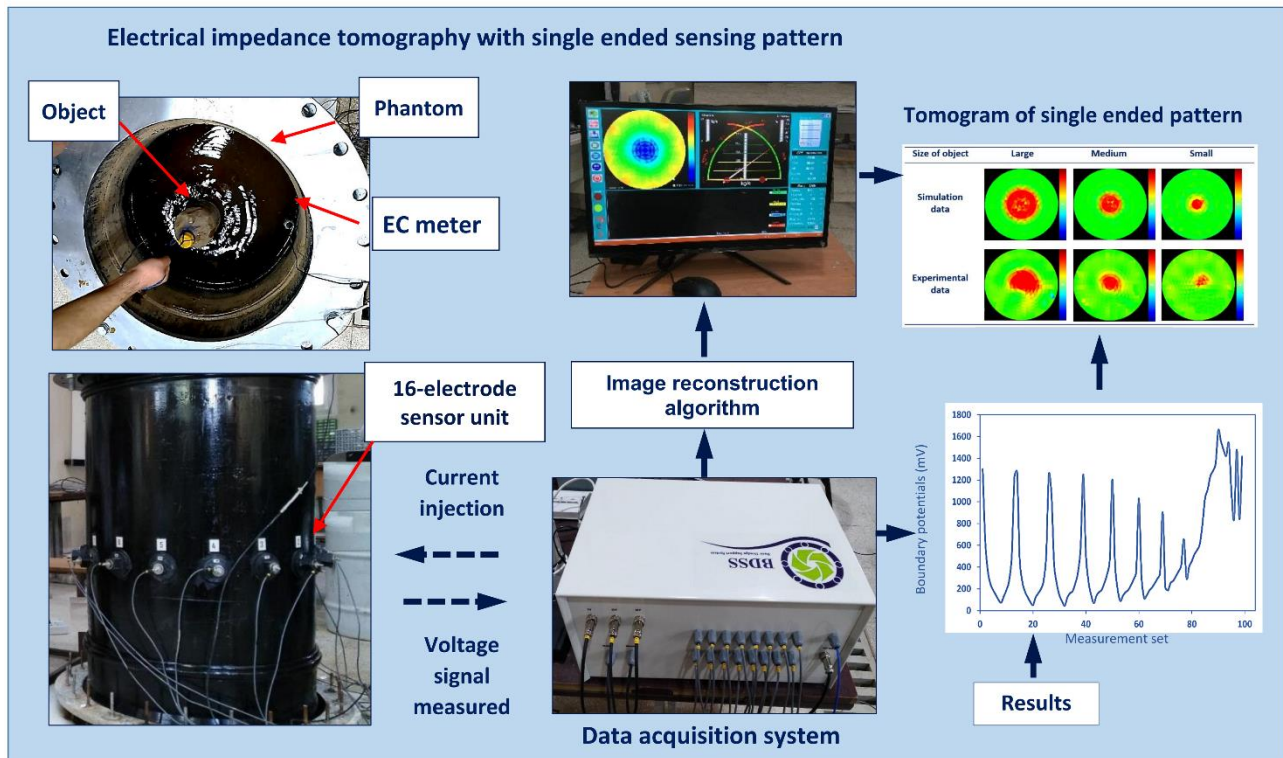


## Evaluation of Electrical Impedance Tomography System in an Innovative Sensing Strategy for Two-phase Solid-liquid Fluid Monitoring

Nazilla Tarabi<sup>1</sup>, Hossein Mousazadeh<sup>1,\*</sup>, Ali Jafari<sup>1</sup>, Jalil Taghizadeh-Tameh

1. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: Oct. 15, 2021- Revised: Feb. 16, 2022- Accepted: March. 7, 2022)



**Abstract:** Electrical impedance tomography (EIT) is a non-invasive imaging technique that measures properties of multiphase fluids such as particles distribution and volume concentration by injecting a current into a set of electrodes and reading voltages from the electrodes. A strategy of injection and signal measurement has an important role in the image reconstruction quality and measurement accuracy. In large phantoms with high-conductivity, conventional strategies such as adjacent are not able to measure the signal with suitable quality. Therefore, the purpose of this study is to construct and evaluate the EIT system under an innovative strategy for online determination of particles distribution and concentration of solid-liquid fluid in large phantoms. The sensors of this instrument consist of 16 circular electrodes. The liquid phase was water with known conductivity and solid phase was the bottle in different sizes and in three different situations. The results showed that the innovative strategy has the ability to recognize and differentiate the target in different dimensions and different positions. The signal-to-noise rate was 1.05 dB and the dynamic range of boundary potentials was 1600 mV. The sensitivity to the sides and near the electrodes was more than the sensitivity to the middle. In positions close to the electrodes, size error decreases in medium and large target. In the three sizes of the target, ringing has no negative effect on the reconstructed image quality. Therefore, it can be concluded that the innovative strategy has a desirable performance for determining the distribution of materials in the large phantom.

**Key words:** Sensing strategy, Imaging, Tomography, Concentration

## ارزیابی عملکرد سامانه توموگرافی امپدانس الکتریکی تحت استراتژی

### سنجش ابتکاری برای پایش سیال دوفازی جامد-مایع

نازیلا طربی<sup>۱</sup>، حسین موسی‌زاده<sup>۱\*</sup>، علی جعفری<sup>۱</sup>، جلیل تقی‌زاده طامه<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی،

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶)

چکیده: توموگرافی امپدانس الکتریکی (EIT)، تکنیک تصویرسازی غیرنفوذی است که توسط تزریق جریان الکتریکی به مجموعه‌ای از الکترودها و قرائت ولتاژ از الکترودها، خواص سیال چندفازی مانند توزیع ذرات و غلظت حجمی را اندازه‌گیری می‌کند. استراتژی تزریق و قرائت سیگنال از الکترودها در کیفیت بازسازی تصویر و دقت اندازه‌گیری تاثیرگذار است. در محیط‌های بزرگ و با رسانایی بالا استراتژی-های مرسوم چون مجاورتی قادر به قرائت سیگنال با کیفیت نیستند. بنابراین هدف از این پژوهش ساخت و ارزیابی سامانه EIT تحت استراتژی ابتکاری برای تعیین آنالین توزیع ذرات و غلظت مواد دوفازی جامد-مایع در محیط‌های نسبتاً بزرگ است. بدین منظور، ۱۶ الکترودها بر روی مخزن حاوی مواد نصب شدند. فاز مایع آب با رسانایی معلوم و فاز جامد بطری در اندازه‌های مختلف بود و در سه موقعیت مختلف عملکرد سامانه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استراتژی ابتکاری، قابلیت تشخیص و تمایز شیء هدف را در ابعاد مختلف و موقعیت‌های مختلف دارد. نرخ سیگنال به نویز ۱/۰۵ دسی‌بل و دامنه دینامیک پتانسیل‌های مرزی ۱۶۰۰ میلی‌ولت بود. حساسیت به کناره‌ها و نزدیک الکترودها بیشتر از حساسیت به میانه بود. ارزیابی پارامترهای کیفیت تصویر، نشان داد که در شیء هدف با اندازه متوسط و بزرگ، در موقعیت‌های نزدیک به الکترودها، خطا در اندازه کاهش می‌یابد و در هر سه اندازه شیء هدف، ایجاد حلقه به میزانی نبود که منجر به عدم کیفیت در تصویر بازسازی شده شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استراتژی ابتکاری ارائه شده، عملکرد مطلوبی برای تعیین توزیع مواد در محیط‌های بزرگ را دارد.

واژه‌های کلیدی: استراتژی سنجش، تصویرسازی، توموگرافی، غلظت

## مقدمه

توموگرافی الکتریکی از جمله تکنیک‌های تصویرسازی است که می‌تواند تصویری دو بعدی یا سه بعدی از محیط مورد بررسی ارائه دهد. این تصویر که توموگرام نام دارد، حاوی اطلاعاتی از خصوصیات الکتریکی ماده یا محیط مورد آزمایش است و بیان کننده ویژگی‌هایی چون توزیع اندازه ذرات، غلظت حجمی، غلظت جرمی و سایر مشخصات است. محیط مورد بررسی که عمدتاً فانتوم<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، می‌تواند ترکیبی از فازهای مختلف جامد، مایع و گاز باشد (Marefatallah *et al.*, 2021; Thomas *et al.*, 2019). برخلاف تکنیک‌های مرسوم که به صورت تک نقطه‌ای اندازه‌گیری را انجام می‌دهند، در این روش کل مقطع هدف، مورد بررسی قرار می‌گیرد. توموگرافی الکتریکی یک روش غیرنفوذی است و دارای هزینه پایین تری در مقایسه با سایر روش‌های توموگرافی مانند توموگرافی رزونانس مغناطیسی<sup>۲</sup> (MRI) است و برخلاف اسکن توموگرافی کامپیوتری<sup>۳</sup> (CT Scan) از یک منبع غیر رادیواکتیو برای سنجش خصوصیات مواد استفاده می‌کند. تکنیک‌های توموگرافی الکتریکی به طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند: توموگرافی امپدانس الکتریکی<sup>۴</sup> (EIT)، توموگرافی القای الکترومغناطیس<sup>۵</sup> (MIT) و توموگرافی خازنی<sup>۶</sup> (ECT) (Wei *et al.*, 2016).

از جمله پرکاربردترین تکنیک‌های توموگرافی الکتریکی، توموگرافی امپدانس الکتریکی است که برای تعیین مشخصات سیال‌های چندفازی با رسانایی فاز حامل از ۰/۰۱ تا ۱۰<sup>۶</sup> میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر کاربرد دارد (Wang, 2015). EIT در تصویربرداری پزشکی (Salucci *et al.*, 2019)، صنایع نفت و گاز (Sun, 2015) و زمین‌شناسی و اکتشاف معادن (Lesparre *et al.*, 2019) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تکنولوژی در سال‌ها اخیر وارد حوزه صنایع غذایی و کشاورزی شده

است. در پژوهشی برای بررسی کیفیت گوشت قرمز و ماهی از توموگرافی امپدانس الکتریکی استفاده شده است. در این بررسی عملکرد پنج چیدمان مختلف الکترودها برای تشخیص تازگی گوشت مورد استفاده قرار گرفت. در چیدمان‌های مختلف از ۲، ۸، ۱۲ و ۲۲ الکترودها برای ارسال و دریافت سیگنال استفاده شد. داده‌های بدست آمده از روش توموگرافی امپدانس الکتریکی با اطلاعات بدست آمده از سایر تکنیک‌های تعیین کیفیت مانند سنجش رنگ، pH و ظرفیت نگهداری آب مقایسه شد و نشان دهنده عملکرد مطلوب روش توموگرافی امپدانس الکتریکی بود (Zhao *et al.*, 2017). همچنین از توموگرافی امپدانس الکتریکی برای بررسی کیفیت و غلظت شیر (Sharifi & Young, 2013)، تعیین توزیع ذرات مواد و کیفیت مخلوط شدن مواد غذایی در مخازن (Malik & Pakzad, 2018; Wahab *et al.*, 2017) استفاده شده است. در بخش کشاورزی محققان، عملکرد توموگرافی امپدانس الکتریکی را برای پایش فرایند خشک شدن محصولات (Porzuczek, 2019)، بررسی میزان نفوذ آب در خاک و ریشه دوانی گیاه (Weigand & Kemna, 2019; Mary *et al.*, 2020) مورد بررسی قرار داده‌اند. تشخیص پوسیدگی درختان توسط توموگرافی امپدانس الکتریکی با ۲۴ حسگر انجام شد. به این ترتیب که حسگرها بر روی ۲۷ تنه درخت مختلف چیده شده و تصویر از مقطع درختان بازسازی شد. سپس داده‌های بدست آمده از توموگرافی، با مقطع برش داده شده واقعی همان درختان مقایسه شد و نشان داد که توموگرافی الکتریکی به خوبی قادر به تشخیص پوسیدگی درختان در مقادیر مختلف ۱۸، ۲۵ و ۳۰ درصد است (Humplik *et al.*, 2016). یکی از مهمترین کاربردهای توموگرافی امپدانس الکتریکی، تعیین غلظت و رژیم جریان بار عبوری سیال چند فازی در مخازن و مجاری بسته (Zhang & Wang, 2010)، تشخیص انسداد لوله و ته‌نشینی

4 Electrical impedance tomography

5 Magnetic induction tomography

6 Electrical capacitance tomography

1 Phantom

2 Magnetic resonance imaging

3 Computed tomography

الکتروود تزریق جریان دارای بهترین عملکرد است ( Xu *et al.*, 2008). همچنین عملکرد دو الگوی مجاورتی و متقابل در تشخیص بافت‌های استخوان و چربی در فانتوم مرغ مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق تمام تست‌ها در جریان یک میلی‌آمپر انجام شد. گوشت مرغ در استوانه شیشه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر قرار داده شد. تکه‌هایی از بافت‌های استخوانی و چربی در بخش‌های مختلف گوشت مرغ قرار داده شدند. پارامتری چون نرخ سیگنال به نویز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که هر دو الگو قابلیت تشخیص هدف مورد نظر را دارد اما عملکرد الگوی متقابل مطلوب‌تر است (Bera & Nagaraju, 2012). در تحقیقی عملکرد سه الگوی مختلف بر روی حسگرهای قابل‌کشش مبتنی بر توموگرافی امپدانس الکتریکی مورد بررسی قرار گرفتند. پارامترهای مرتبط با کیفیت پتانسیل‌های الکتریکی مرزی مانند نرخ سیگنال به نویز و تغییرات پتانسیل‌های مرزی و پارامترهای تصویر بازسازی شده مانند خطا در اندازه، خطا در موقعیت و میزان حلقه ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که اگرچه استراتژی مجاورتی در برابر نویز تحمل کمتری دارد و دامنه دینامیکی پتانسیل‌های آن کمتر است، اما هنگامی که شیء در نزدیکی الکتروودها قرار دارد عملکرد بهتری ارائه می‌دهد (Russo *et al.*, 2017). تأثیر الگوی‌های مختلف تزریق جریان جفت الکتروودهایی که به تعداد متغیر  $m$  از هم فاصله داشته و دو استراتژی اندازه‌گیری ولتاژ دیفرانسیلی و الکتروود مشترک در یک سیستم توموگرافی امپدانس الکتریکی با ۳۲ الکتروود، در یک جریان ثابت در محیط شبیه‌سازی در پژوهشی مورد مطالعه قرار گرفت. قطر محیط شبیه‌سازی ۳۰۰ میلی-آمپر بود. در استراتژی دیفرانسیلی، اختلاف پتانسیل الکتریکی بین یک جفت الکتروود جدا شده توسط تعداد  $p$  الکتروود، اندازه‌گیری شد. بنابراین  $p$  تعداد الکتروودهای

رسوبات (Kotze *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2018) در لوله است. در یک سامانه توموگرافی امپدانس الکتریکی، حسگر مجموعه‌ای از الکتروودها است که با الگوی خاصی بر روی سطح فانتوم مورد نظر قرار داده می‌شود. توموگرام‌ها از تزریق جریان متناوب ثابت به این حسگرها و دریافت پاسخ در قالب پتانسیل‌های الکتریکی مرزی ایجاد می‌شود. ترتیب تزریق جریان به هر یک از جفت الکتروودها و نحوه قرائت اختلاف پتانسیل الکتریکی از هر یک از جفت الکتروودها را استراتژی سنجش یا استراتژی راه‌اندازی<sup>۱</sup> گویند. کیفیت تصویر به وجود آمده علاوه بر کیفیت سیگنال جریان تزریق شده به استراتژی تزریق و قرائت اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی از حسگرها بستگی دارد. استراتژی‌های مختلفی برای تزریق و دریافت پتانسیل‌های الکتریکی مرزی وجود دارد مانند استراتژی مجاورتی، استراتژی متقابل، استراتژی جریان انطباقی، استراتژی دیواره فلزی و غیره. هر یک از این استراتژی‌ها قابلیت‌های منحصربفرد خود را دارند. بطور مثال استراتژی مجاورتی در تشخیص هدف یا شیء در کناره‌ها و نزدیک حسگرها عملکرد مطلوبتری نسبت به تشخیص در وسط دارد. استراتژی مجاورتی به دلیل داشتن دقت بالا و سخت افزار ساده‌تر مورد توجه است. مشکل عمده این استراتژی پایین بودن نرخ سیگنال به نویز و دامنه دینامیک پایین پتانسیل‌های الکتریکی مرزی است (Silva *et al.*, 2016). بنابراین در اهداف بزرگ عملکرد مناسبی ندارد. تحقیقاتی در زمینه مقایسه استراتژی‌های مختلف تزریق و قرائت انجام شده است. در پژوهشی عملکرد سامانه توموگرافی امپدانس الکتریکی در سه فاصله زاویه‌ای ۲۲، ۱۵۸ و ۱۸۰ درجه بین جفت الکتروودهای تزریق در محیط شبیه‌سازی شده، بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در میان این سه استراتژی، فاصله زاویه ۱۵۸ درجه بین جفت

درصد کاهش می‌یابد (Ma et al., 2020).

همان‌گونه که اشاره شد یکی از کاربردهای عمده توموگرافی امپدانس الکتریکی تعیین خصوصیات سیال چند فازی در مخازن و لوله‌ها است. تحقیقات انجام شده در ابعاد آزمایشگاهی و با قطر فانتوم کوچک حدود ۲۰ سانتی‌متر و در رسانایی پایین ۲ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر است. الگوی مرسوم مانند الگوی مجاورتی به دلیل کم بودن دامنه دینامیک پتانسیل‌های الکتریکی مرزی قابلیت تامین پاسخ مناسب از حسگرها را ندارد. بنابراین هدف از انجام این تحقیق، ارائه استراتژی ابتکاری قرائت پتانسیل‌های الکتریکی مرزی و ارزیابی عملکرد آن در محیط‌های با قطر زیاد و رسانایی نسبتاً زیاد است. در این پژوهش ابتدا سامانه EIT مناسب برای تزریق جریان و قرائت اختلاف پتانسیل الکتریکی طراحی و ساخته شده و سپس استراتژی ابتکاری مورد نظر در آن پیاده‌سازی شد. به منظور ارزیابی عملکرد استراتژی مورد نظر، پارامترهای مرتبط با کیفیت اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی و تصویر بازسازی شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی عملکرد استراتژی سنجش مورد نظر، سامانه توموگرافی امپدانس الکتریکی با نام سامانه لایروپ‌یار بصیر (BDSS) به سفارش سازمان بنادر و دریانوردی با هدف پایش آنلاین بار عبوری از لوله‌های کشتی لایروپ، در کارگاه مکترونیک دانشگاه تهران طراحی و ساخته شد. در این بررسی فاز مایع فانتوم مورد نظر، آب شور با نرخ ۱۲/۵ گرم بر لیتر NaCl بود (این میزان شوری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد معادل رسانایی ۱۸ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر است) و فاز جامد فانتوم، بطری‌های پلاستیکی در ابعاد مختلف بودند که در ادامه به ابعاد و نحوه انتخاب آن پرداخته می‌شود. سامانه EIT ساخته شده در این پژوهش دارای سه بخش اصلی است که در شکل ۱، دیاگرام سامانه EIT ساخته

بین الکترودهای جفتی بود که اختلاف پتانسیل‌های آنها اندازه‌گیری می‌شد. در اندازه‌گیری‌های الکترودهای مشترک، در یک مرحله قرائت ولتاژ، تمام ولتاژها با توجه به یک الکترودهای مشترک، اختلاف پتانسیل‌های آنها اندازه‌گیری می‌شد. الکترودهای مشترک، الکترودی است که در مجاورت الکترودهای تزریق قرار داد. نتایج نشان می‌دهد که اندازه‌گیری‌های الکترودهای مشترک نسبت به اندازه‌گیری‌های پتانسیل الکتریکی دیفرانسیلی دارای عملکرد مطلوبتری بود. در بررسی الگوی تزریق جریان، مقادیر زوج  $m$  از مقادیر فرد  $m$  عملکرد بهتری داشتند (Silva et al., 2017). در تحقیق دیگری، عملکرد یک استراتژی ابتکاری به نام الگوی ستاره‌ای برای تشخیص حفره‌های صفحات پلیمری کربن مورد بررسی قرار گرفت. الگوی ستاره‌ای از هر ترکیب احتمالی الکترودها برای تزریق جریان استفاده می‌کند. برای یک سیستم EIT با ۱۶ الکترودها، ۲۴۰ حالت فقط برای تزریق جریان امکان پذیر است. نتایج این بررسی نشان داد که حفره‌هایی با قطر ۱۰ میلی‌متر به درستی تشخیص داده می‌شوند اما به دلیل افزایش تعداد قرائت‌ها زمان زیادی صرف می‌شود که در کاربردهای آنلاین عامل محدود کننده است (Haingartner et al., 2020). همچنین دو الگو سنجش برای بررسی توزیع امپدانس در مچ دست در حالت‌های مختلف دست مورد بررسی قرار گرفت. در یک الگو از هشت الکترودها و در الگوی دیگر از هفت الکترودها برای تزریق جریان استفاده شد. الگوی تزریق جریان از نوع مجاورتی بوده و الگوی اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل‌ها در دو حالت یکی با هشت الکترودهای مشابه الگوی ستاره‌ای بوده و دیگری الگوی جدید با هفت الکترودهای اختلاف پتانسیل بین شش الکترودهای متقابل اندازه‌گیری می‌شود. نتایج نشان داد که با ارائه الگوی جدید مصالحه‌ای بین زمان اندازه‌گیری و دقت اندازه‌گیری فراهم کردند. بطوری که استفاده از الگوی جدید موجب ذخیره زمان تا ۶۰ درصد در شرایط الگوی ستاره‌ای می‌شود. همچنین در الگوریتم‌های مختلف تصویر سازی صحت داده‌ها بین ۰/۶ درصد تا ۸

شده و پلتفرمی که حسگرها بر روی آن نصب شده‌اند نشان داده شده است:

(۱) حسگرها: در توموگرافی امپدانس الکتریکی، حسگرها، الکترودهایی هستند که باید با سیال عبوری در تماس باشند اما در جریان سیال نفوذ نکنند. مهمترین مسئله در طراحی حسگرهای EIT، جنس الکترودها و ابعاد آنها است. عوامل موثری که در انتخاب جنس الکترودها نقش دارد شامل هدایت الکتریکی، پلاریزه شدن الکتروشیمیایی، پایداری در برابر خوردگی و فرسایش، چگالی جریان ویژه (تحمل در برابر عبور جریان) و قابلیت ساخت بسته به الزامات طراحی است. از این رو می‌توان از فلزات با رسانایی بالا مانند طلا، نقره، پلاتین، پلادیوم نقره و فولاد ضد زنگ استفاده کرد. الکترودها در EIT دو وظیفه را بر عهده دارند، اولاً تزریق کردن جریان زمانی که الکترودها نقش فرستنده سیگنال را ایفا می‌کند و ثانیاً اندازه‌گیری ولتاژ هنگامی که الکترودها نقش گیرنده سیگنال را بر عهده دارد. این انتظار وجود دارد که اندازه الکترودها تزریق جریان باید تا حد مطلوبی بزرگ باشد تا افت ولتاژ بین الکترودها و الکترولیت را کاهش دهد و سیگنال قوی به محیط تزریق شود و از سوی دیگر باید تا آنجا که امکان دارد کوچک باشد تا در زمان اندازه‌گیری ولتاژ، رزولوشن فضایی حفظ شود. مطابق تحقیقات انجام شده پیشنهاد می‌شود که الکترودها ۵۰ تا ۸۰ درصد پیرامون محیط دایره‌ای فانتوم مورد نظر را پوشش دهند (Wang, 2015). با توجه به مطالب بیان شده در این سامانه حسگرها شامل ۱۶ الکترودها با مقطع دایره‌ای به قطر ۶۰ میلی‌متر هستند که پیرامون یک لوله استوانه به قطر ۶۱۰ میلی‌متر از جنس پلی اتیلن سنگین با چگالی بالا (HDPE) نصب شده‌اند. به منظور پایش عملیات لایروبی، این پلتفرم در بین خطوط لوله‌های کشتی لایروب نصب می‌شود. اما در بررسی‌های استاتیک و در آزمایشگاه یک سر آن بسته شد و آب شور و بطری‌های پلاستیکی در داخل آن قرار

داده شد.

(۲) سامانه تحصیل داده: در توموگرافی امپدانس الکتریکی، سیگنال تحریک یک موج سینوسی با جریان متناوب است. استفاده از جریان AC علاوه بر اینکه تاثیر پلاریزه شدن الکترودها را کاهش می‌دهد، حاوی اطلاعات فاز و دامنه است که تغییرات آن بیان کننده خصوصیات سیال عبوری است. در این پژوهش برای تولید سیگنال با جریان متناوب از سینتسایزر دیجیتال مستقیم (DDS) استفاده شد و سپس سیگنال با جریان الکتریکی ثابت بر اساس استراتژی به نوبت توسط هر یک از الکترودها به فانتوم مورد نظر تزریق می‌شود.

وظیفه تامین، ارسال و سوئیچ سیگنال جریان ثابت بین هر یک از جفت الکترودها و همچنین دریافت، فیلتر و تقویت سیگنال دریافتی از الکترودها و ارسال برای بخش پردازش برعهده سامانه تحصیل داده است. در برخی از سخت‌افزارهای سامانه EIT جریان از طریق یک جفت الکترودها تزریق می‌شود که در این‌گونه به یک منبع تامین جریان نیاز است مانند الگوهای مجاورتی و متقابل. در بعضی الگوهای سنجش، جریان از طریق چندین الکترودها به فانتوم تزریق می‌شود مانند الگوهای تطبیقی که این روش نیاز به تامین چندین منبع جریان دارد و نسبتاً پیچیده است. در این پژوهش از یک منبع تامین جریان استفاده شد.

(۳) الگوریتم بازسازی تصویر: پس از استخراج اطلاعات سیگنال دریافتی از الکترودهای گیرنده، توسط الگوریتم بازسازی تصویر از اطلاعات بدست آمده برای تصویرسازی از مقطع محیط مورد نظر استفاده می‌شود. در توموگرافی امپدانس الکتریکی هدف بازسازی تصویر و استخراج خصوصیات الکتریکی چون رسانایی الکتریکی از کل مقطع محیط توسط پتانسیل‌های مرزی بدست آمده است. معادله حاکم بر مسئله بازسازی تصویر که معروف به معادله پواسون است مطابق رابطه ۱ است (Kotze et al., 2019):

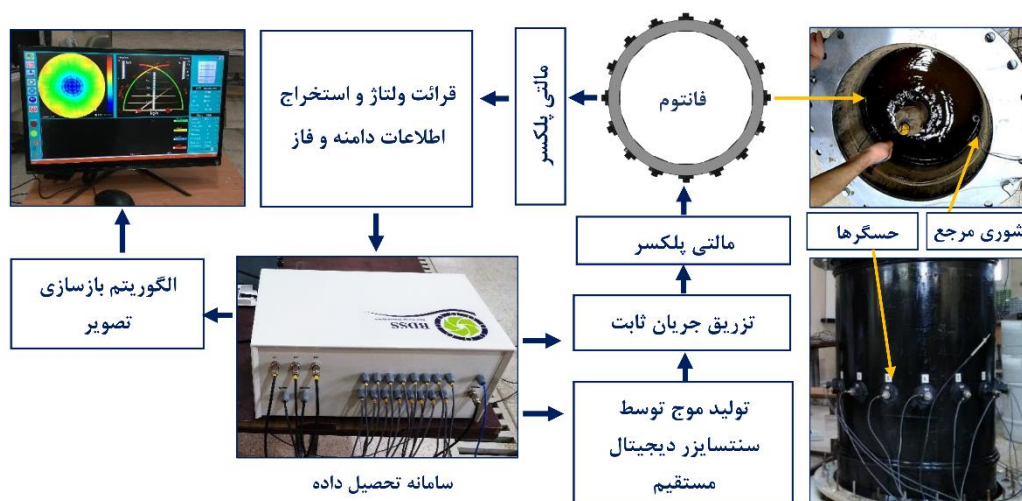
بر همین اساس، تعداد المان‌ها برابر با ۵۷۶ المان در نظر گرفته شد. با داشتن رسانایی‌های معلوم، پتانسیل‌های گره‌ها تعیین می‌شود و در حل معکوس با استفاده از الگوریتم‌ها و الگوی‌های منظم‌سازی، رسانایی هر المان توسط پتانسیل‌های مرزی تخمین زده می‌شود. از دیدگاه ریاضی مسئله حاکم بر EIT یک مسئله غیرخطی و بد رفتار است. در این مسئله، تغییرات کوچک روی اندازه‌گیری‌های مرزی می‌تواند منتج به تغییرات بزرگ بدست آوردن رسانایی شود و بالعکس تغییرات بزرگ رسانایی درونی باعث تغییرات کوچکی در اندازه‌گیری‌های مرزی می‌شود. بنابراین مسئله معکوس توموگرافی امپدانس الکتریکی ناپایدار و حساس به خطا و نویز است. این بدرفتار یا بد وضع بودن منجر به یک جواب پایدار نمی‌شود. برای غلبه بر این مشکل باید از تکنیک‌های منظم‌سازی استفاده کرد. در حل معکوس با استفاده از الگوریتم نیوتن-گوس بهبود یافته و الگوی منظم‌سازی<sup>۱</sup> نوزر، رسانایی هر المان توسط پتانسیل‌های مرزی محاسبه می‌شود. کلیه مراحل حل مستقیم و معکوس و بازسازی تصویر در برنامه نوشته شده در C#.Net انجام شد. در شکل ۲ نحوه مش‌بندی مقطع مورد نظر نشان داده شده است.

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \phi) = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

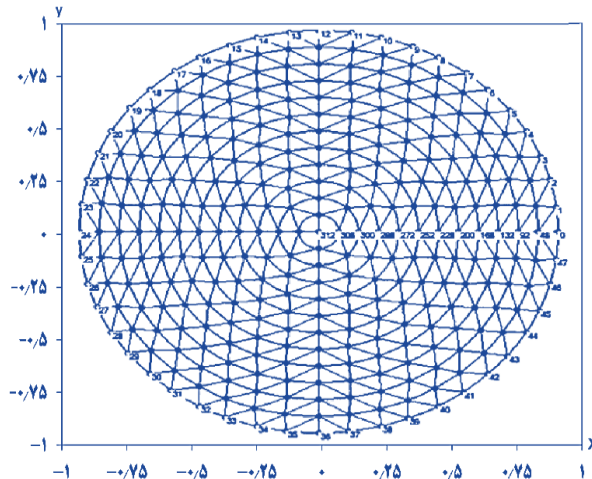
که شرایط مرزی در رابطه ۲ بیان شده است:

$$\begin{cases} \sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} = J & \text{الکتروود جریان مثبت} \\ \sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} = -J & \text{الکتروود جریان منفی} \\ \sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 & \text{سایر نقاط روی مرز} \end{cases} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در روابط فوق  $\phi$ : پتانسیل الکتریکی (میلی-ولت)،  $J$ : چگالی جریان (میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع)،  $\sigma$ : رسانایی الکتریکی (میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر) و  $n$ : بردار نرمال نسبت به محیط الکتروودها است. برای حل این معادله از روش حل مستقیم و معکوس استفاده می‌شود. مسئله مستقیم به طور عددی با استفاده از روش المان محدود قابل حل است. روش اجزای محدود یک روش حل عددی است که یک معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی را تبدیل به یک دستگاه معادلات جبری خطی کرده و به طور گسترده برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی در مسائل با هندسه‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حل مستقیم، مقطع دایره‌ای لوله، به ۵۷۶ المان تقسیم شده و دارای ۳۱۳ گره است. با افزایش تعداد المان‌ها دقت تصویر بازسازی شده افزایش پیدا خواهد کرد. اما در کاربرد آنلاین باید مصالحه‌ای بین دقت و زمان بازسازی تصویر برقرار شود.



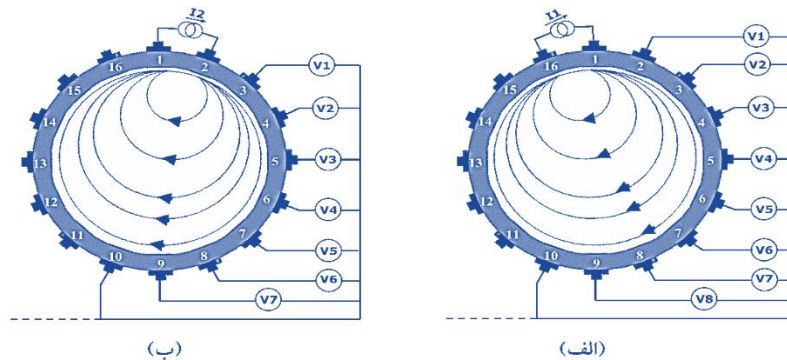
شکل ۱- بخش‌های مختلف سامانه EIT ساخته شده و پلتفرمی که حسگرها بر آن نصب شده‌اند.  
Figure 1- The EIT system parts and the platform that the sensors were installed on.



شکل ۲- مش بندی مقطع فانتوم مورد نظر.  
Figure 2- Meshing of the phantom cross section.

نظر در یک مجموعه با ۱۶ الکتروود به این صورت است که در مرحله اول تزریق، توسط الکتروودهای ۱-۱۶، جریان به فانتوم تزریق می‌شود و اختلاف پتانسیل الکتریکی از سایر الکتروودها با در نظر گرفتن الکتروود ۱۰ به عنوان الکتروود مرجع یا مشترک اندازه‌گیری می‌شود. به این صورت که اختلاف پتانسیل از الکتروودهای ۲-۱۰، ۳-۱۰، ۴-۱۰، ۵-۱۰ ... ۱۵-۱۰ اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۳- الف). در مرحله دوم، توسط الکتروود ۱-۲، تزریق جریان صورت گرفته و جفت الکتروودهای ۳-۱۰، ۴-۱۰، ۵-۱۰ ... ۱۵-۱۰ قرائت می‌شود (شکل ۳- ب). به همین ترتیب تا آخرین مرحله تزریق و اندازه‌گیری اجرا می‌شود. در این استراتژی با حذف قرائت‌های تکراری، در مجموع ۹۹ قرائت مستقل بدست می‌آید.

همان گونه که اشاره شد به ترتیب انتخاب هر یک از الکتروودها برای تزریق موج فرستنده و انتخاب الکتروود برای دریافت پاسخ ولتاژ، استراتژی یا الگوی سنجش گویند. در پژوهش حاضر، استراتژی تزریق و قرائت در الکتروودهای گیرنده، استراتژی ابتکاری با نام استراتژی تک سر است. در این استراتژی، الگوی تزریق جریان مشابه الگوی تزریق در استراتژی مجاورتی است. به این معنا که تزریق سیگنال فرستنده در هر مرحله، مطابق شکل ۳، توسط الکتروودهای مجاور هم انجام می‌شود (۱-۱۶، ۲-۳، ۳-۴، ۴-۵، ۵-۶، ۶-۷، ۷-۸، ۸-۹، ۹-۱۰ و غیره). الگوی قرائت ولتاژها، با در نظر گرفتن یک الکتروود مرجع که در تمام مراحل تزریق و قرائت ثابت است انجام می‌شود. شکل ۳ شماتیکی از نحوه تزریق جریان و قرائت ولتاژها را نشان می‌دهد. الگوی مورد



شکل ۳- تزریق جریان و ولتاژ در استراتژی تک‌سر: الف) در مرحله اول، الکتروود ۱-۱۶ فرستنده جریان و به ترتیب الکتروودهای ۲-۱۰، ۳-۱۰، ۴-۱۰، ۵-۱۰، ۶-۱۰، ۷-۱۰، ۸-۱۰، ۹-۱۰ قرائت ولتاژ را انجام می‌دهند. ب) در مرحله دوم سنجش، الکتروود ۱-۲ فرستنده جریان و سایر جفت الکتروودها قرائت ولتاژ را انجام می‌دهند.  
Figure 3. Current injection and voltage reading in the single-ended strategy: a) In the first step, the current is injected through the electrodes 16-1, and the voltages are measured successively from the electrode pairs; 2-10, 3-10 ... and 15-E10. b) In the second step of sensing, the current is injected through the electrodes 1-2, and the voltages are measured by other electrodes.



تنهایی ( $V_{\sigma 0}$ ) و فاز مایع به همراه فاز جامد ( $V_{\sigma 1}$ ) استفاده می‌شود (Russo et al., 2017).

$$BVC = \|V_{\sigma 1} - V_{\sigma 0}\| \quad (\text{رابطه ۴})$$

در بررسی کیفیت تصویر بازسازی شده دو پارامتر تصویرسازی خطای اندازه ( $SE$ ) و ایجاد حلقه ( $RNG$ ) مورد بررسی قرار گرفت. اختلاف بین اندازه واقعی شیء مورد بررسی و اندازه به دست آمده توسط سامانه EIT را خطای اندازه گویند و از رابطه ۵ محاسبه می‌شود (Russo et al., 2017):

$$SE = \left| \frac{DSO - RSO}{ACD} \right| \quad (\text{رابطه ۵})$$

در رابطه ۵،  $DSO$  اندازه محاسبه شده توسط سامانه EIT،  $RSO$  اندازه واقعی،  $ACD$  مساحت کل فانتوم مورد بررسی است که در تصویر بازسازی شده بر حسب پیکسل محاسبه می‌شود.

در توموگرافی امیدانس الکتریکی، ممکن است حلقه‌ای آبی رنگ (مخالف رنگ شیء هدف) اطراف هدف بازسازی شده ایجاد شود که تا حد ممکن باید از ایجاد آن اجتناب شود. نحوه محاسبه این پارامتر در رابطه ۶ بیان شده است (Russo et al., 2017):

$$RNG = \frac{A_{INV}}{ACD - DSO} \quad (\text{رابطه ۶})$$

در رابطه ۶،  $A_{INV}$  مساحت حلقه ایجاد شده،  $ACD$  مساحت حوزه مورد بررسی،  $DSO$  مساحت هدف شناسایی شده است.

### نتایج و بحث

شکل ۴، نمودار اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی مرزی قرائت شده از جفت الکترودها در مقابل شماره هر قرائت را طبق الگوی ابتکاری تک‌سر نشان می‌دهد. دامنه دینامیک پتانسیل‌های مرزی الگوی تک‌سر در حدود ۱۶۰۰ میلی‌ولت است.

میزان نرخ سیگنال به نویز در این الگو ۱/۰۵ دسی-بل است که نشان دهنده نویز پذیری نسبتاً بالا در این الگو است. برای درک بهتر این پارامتر در شکل ۵

نحوه ارزیابی عملکرد سامانه توموگرافی امیدانس الکتریکی ساخته شده با الگوی سنجش معرفی شده به این ترتیب بود که سه بطری پلاستیکی در ابعاد کوچک (قطر ۸/۵ سانتی‌متر)، متوسط (قطر ۱۶ سانتی‌متر) و بزرگ (قطر ۳۰ سانتی‌متر) در سه منطقه  $x=0$ ،  $x=0/5$  و  $x=0/75$  (به ترتیب در وسط فانتوم، یک دوم شعاع و مجاورت حسگرها) قرار داده شده و رفتار توموگرام مورد بررسی قرار گرفت. نحوه انتخاب ابعاد کوچکترین بطری بر حسب مساحت یک المان در مش‌بندی نشان داده شده در شکل ۲ است. به طور میانگین مساحت هر المان برابر با ۵ سانتی‌متر مربع است. برای بررسی عملکرد در قطرهای دیگر به نسبت تقریباً دو برابر قطر بطری‌ها افزایش داده شد. در ارزیابی عملکرد الگوی مورد نظر، ابتدا پارامترهای کیفیت پتانسیل‌های الکتریکی مرزی مورد بررسی قرار گرفت. این پارامترها شامل پارامتر نرخ سیگنال به نویز<sup>۱</sup> ( $SNR$ ) و تغییرات پتانسیل‌های مرزی<sup>۲</sup> ( $BVC$ ) است.

پارامتر نرخ سیگنال به نویز بیان‌کننده کیفیت سیگنال و دقت در اندازه‌گیری است. به منظور محاسبه نرخ سیگنال به نویز، زمانی که در محیط مورد بررسی، هیچ گونه ناهمگنی وجود ندارد (بدون فاز جامد)، اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی مرزی قرائت می‌شوند و توسط رابطه ۳ نرخ سیگنال به نویز محاسبه می‌شود (Bera & Nagaraju, 2012):

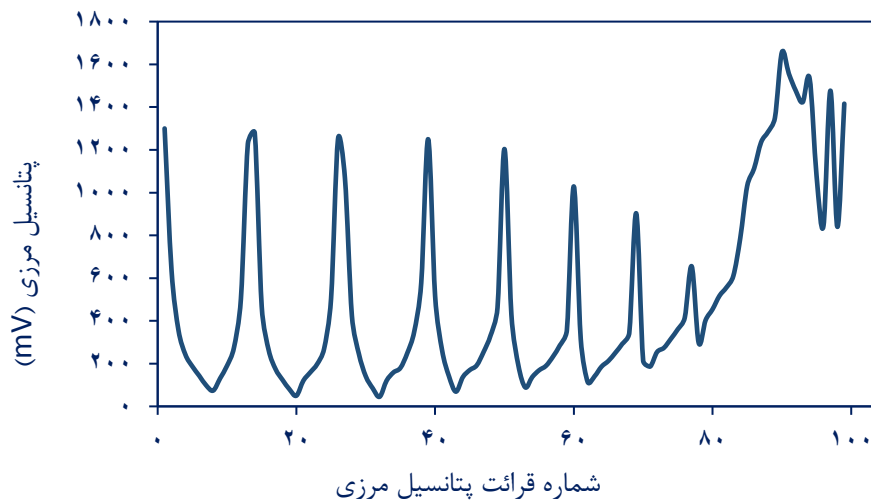
$$SNR_{BP} = 20 \log_{10} \frac{BP_{AVR}}{SD[V_{BP}]} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در رابطه ۳،  $BP_{AVR}$  میانگین اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی مرزی،  $SD[V_{BP}]$  انحراف معیار پتانسیل‌های الکتریکی مرزی است.

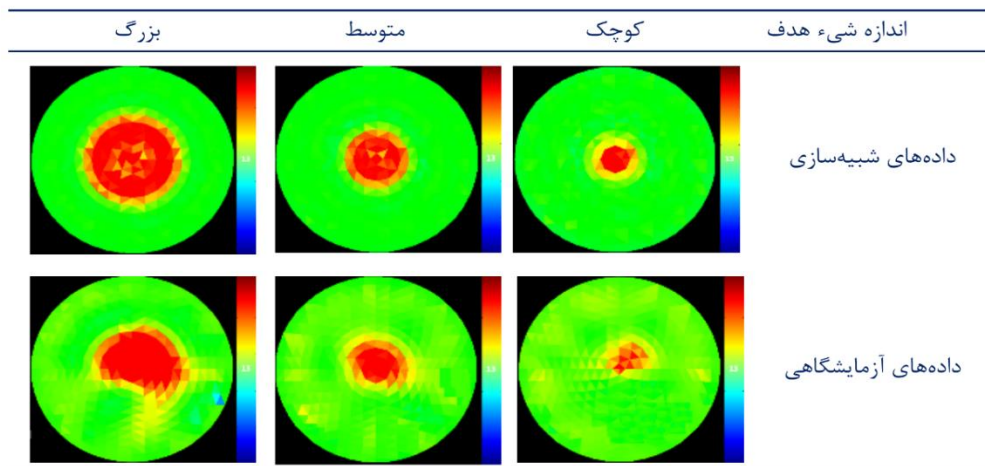
پارامتر  $BVC$ ، معیاری برای بیان قابلیت تشخیص شیء هدف<sup>۳</sup> در استراتژی سنجش است. برای محاسبه تغییرات پتانسیل‌های مرزی طبق رابطه ۴ از نرم اختلاف بین پتانسیل‌های الکترودها در دو حالت فاز مایع به

*BVC* برای هریک از شرایط آزمایش با اندازه مختلف شیء هدف در موقعیت‌های مختلف نشان داده شده است. هرچه *BVC* بیشتر باشد عملکرد سامانه مطلوب‌تر خواهد بود. نتایج نشان داده که استراتژی تک‌سر در مجاورت الکترودها دارای مقادیر بیشتری *BVC* نسبت به میانه فانتوم مورد نظر است. حداقل مقدار *BVC* برای شیء کوچک در مرکز برابر با  $77/63$  میلی‌ولت است و حداکثر در هنگامی که شیء هدف در کنارها قرار دارد برابر با  $787/9$  میلی‌ولت است. این در حالی است که در سایر تحقیقات با الگوی مجاورتی، حداقل و حداکثر *BVC* با نسبت مشابه اندازه شیء هدف به کل محیط، به ترتیب  $16$  میلی‌ولت و  $55$  میلی‌ولت بود (Russo et al., 2017).

مقایسه‌ای بین تصویر بازسازی شده از داده‌های شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی (داده‌های واقعی) زمانی که هدف با قطرهای مختلف در وسط فانتوم قرار دارد نشان داده شده است. همان‌گونه که در توموگرام حاصل از داده‌های شبیه‌سازی مشخص است، عملکرد استراتژی ابتکاری در شرایط شبیه‌سازی بسیار مطلوب است و کاملاً هدف مورد نظر را در اندازه و شکل صحیح در اندازه مختلف شیء هدف بازسازی کرده است. اما در توموگرام حاصل از داده‌های آزمایشگاهی به دلیل نرخ پایین سیگنال به نویز، بخشی از تصویر به درستی بازسازی نشده و تحت تاثیر نویز قرار گرفته است. خصوصاً با کوچک شدن ابعاد شیء هدف، توموگرام ساخته شده از کیفیت مناسبی برخوردار نیست. در جدول ۱ مقادیر



شکل ۴- اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی مرزی در الگوی مجاورتی- تک‌سر.  
Figure 4- The boundary potential differences in the adjacent-single ended pattern.



شکل ۵- توموگرام حاصل از داده‌های شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی.  
Figure 5- The tomogram from the simulation and the experimental data.

جدول ۱- تغییرات پتانسیل مرزی (میلی‌ولت) برای ابعاد مختلف جسم هدف در سه موقعیت متفاوت.

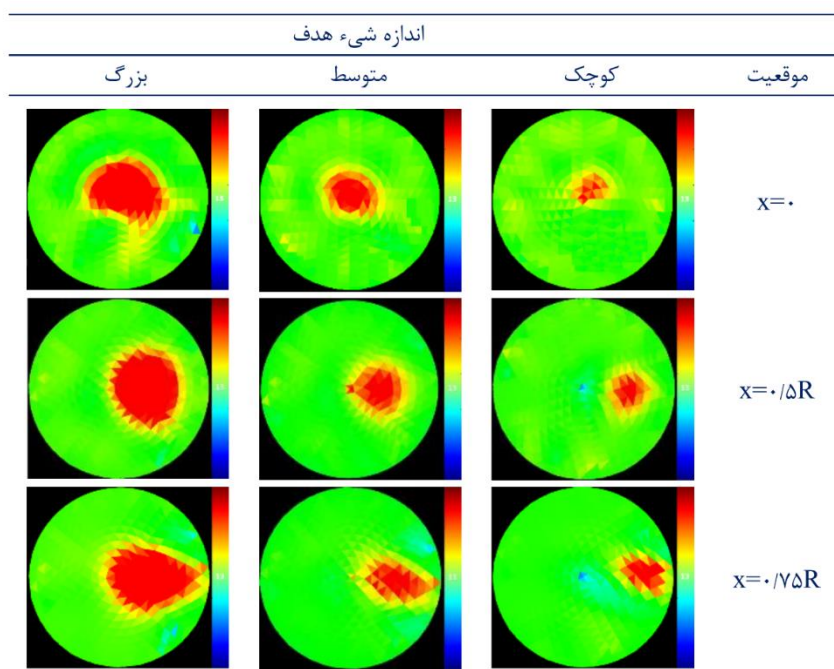
Table 1- Changes in the boundary potential (mV) for the different sizes of the object at three different positions.

ابعاد شیء هدف			موقعیت شیء هدف
بزرگ	متوسط	کوچک	
۵۹۴	۲۳۵	۷۸	$X=0$
۱۲۲۱	۵۵۷	۳۰۵	$X=0.5R$
۱۵۰۳	۱۲۵۳	۷۸۸	$X=0.75R$

X: فاصله بین مرکز شیء هدف از مرکز محیط موردنظر یا فانتوم (سانتی‌متر) ، R: شعاع فانتوم یا محیط موردبررسی (سانتی‌متر).

بازسازی شده در جدول ۲ پارامترهای خطای اندازه و حلقه ایجاد شده، نشان داده شده است. طبق جدول ۲، برای دو شیء هدف متوسط و بزرگ، با نزدیک شدن شیء هدف به مجاورت الکترودها، میزان SE کاهش می‌یابد. بیشترین خطای اندازه مربوط به بطری بزرگ با ۴/۶٪ است. برای بطری کوچک زمانی که در موقعیت  $x=0.5R$  قرار دارد، کمترین میزان خطای اندازه بدست می‌آید. نتایج بررسی‌ها نشان داد در موقعیت  $x=0$  ابعاد تصویر بازسازی شده از شیء هدف کوچک‌تر از ابعاد واقعی است. اما در شرایطی که شیء هدف در موقعیت  $x=0.5R$  قرار دارد در هر سه اندازه شیء، ابعاد تصویر بازسازی شده بزرگ‌تر از ابعاد واقعی است.

در شکل ۶ توموگرام ساخته شده تحت الگوی تزریق مجاورتی و قرائت تک سر برای سه موقعیت مختلف شیء هدف در اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ نشان داده شده است. آنچه مشخص است و از نقاط قوت استراتژی ابتکاری تک‌سر وجود دارد، قابلیت تشخیص اختلاف در اندازه جسم هدف و موقعیت‌های مختلف است. در استراتژی‌های با تزریق مجاورتی به دلیل پایین بودن دامنه دینامیک پتانسیل‌های مرزی، تشخیص هدف در مرکز بسیار اندک است اما در استراتژی حاصل با اصلاح الگوی قرائت می‌توان علاوه بر تشخیص کناره‌های فانتوم، تصویر در مرکز را نیز بازسازی کرد. البته در شیء هدف با ابعاد کوچکتر، خطا در بازسازی تصویر بیشتر است. برای بررسی کمی تصاویر



شکل ۶- تصویر بازسازی شده برای ابعاد مختلف و در موقعیت‌های مختلف، X: فاصله بین مرکز شیء هدف از مرکز محیط موردنظر یا فانتوم (سانتی‌متر) ، R: شعاع فانتوم یا محیط موردبررسی (سانتی‌متر).

Figure 6- Reconstructed image for the objects in the different sizes and positions, X: Distance between center of the object and center of the phantom (cm), R: the phantom radius (cm).

تصویر بازسازی شده برای شیء هدف با سه اندازه مختلف کوچک، متوسط و بزرگ و در سه موقعیت  $x=0$ ،  $x=0/5$  و  $x=0/75$  مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این الگو قابلیت تشخیص و تفکیک اندازه شیء در موقعیت‌های مختلف را دارد. نتایج ارزیابی دو پارامتر مرتبط با پتانسیل الکتریکی مرزی نشان داد که نرخ سیگنال به نویز برای الگوی مربوطه برابر با  $1/0.5$  دسی-بل و حداقل تغییرات پتانسیل‌های مرزی برای جسم کوچک برابر با  $77$  میلی‌ولت و حداکثر تغییرات پتانسیل‌های مرزی برای جسم بزرگ برابر با  $15.3$  میلی‌ولت بود. بیشترین پارامتر خطا در اندازه برای هر سه اندازه در موقعیت  $x=0$  بود و با نزدیک شدن به کناره‌ها خطای اندازه در هر سه اندازه کاهش می‌یابد. ارزیابی پارامتر حلقه ایجاد شده در این استراتژی نشان داد که حلقه‌های آبی به طور معنی‌داری در این استراتژی ایجاد نمی‌شوند و از نقاط قوت این استراتژی‌ها است. در نهایت می‌توان با مقایسه با سایر استراتژی‌ها که الگوی تزریق جریان آن از نوع مجاورتی است، این استراتژی از عملکرد مطلوبی برخوردار است.

### سپاسگزاری

این پژوهش به سفارش سازمان بنادر و دریانوردی و طی طرح پژوهشی-کاربردی به شماره ۲۰/س/۳۵۲۸ به اجرا درآمد که بدین وسیله از مساعدت این سازمان تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

در جدول ۲ پارامتر حلقه ایجاد شده برای سه موقعیت و سه اندازه شیء هدف نشان داده شده است. زمانی که شیء هدف در مرکز و در موقعیت  $x=0/5$  قرار دارد تقریباً حلقه آبی ایجاد شده بسیار اندک است و با نزدیک شدن هدف به کناره‌ها و مسدود کردن مسیر عبور جریان، تا حدی حلقه ایجاد شده افزایش می‌یابد به طوری که برای هر سه اندازه کوچک متوسط و بزرگ، بیشترین میزان حلقه‌های ایجاد شده در مجاورت الکترودها است. اما در مجموع میزان حلقه ایجاد شده در این استراتژی در مقایسه با سایر استراتژی‌ها اندک است. به طوری که در بررسی Russo et al. (2017) میزان ایجاد حلقه برای استراتژی مجاورتی و متقابل در محدوده  $0/29$  تا  $0/36$  قرار داشت.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای کیفیت تصویر برای ارزیابی الگوی تک-سر در سه موقعیت و سه اندازه شیء هدف.

Table 2- Data for the quality parameters of the image to evaluate the single ended pattern for the different sizes of the object at three different positions.

پارامتر	ابعاد شیء هدف			موقعیت
	متوسط	کوچک	بزرگ	
SE	1/5	0/91	4/6	$x=0$
	0/29	0/16	2/5	$x=0/5R$
	0/37	0/41	2/05	$x=0/75R$
RNG	0/1	0	0/8	$x=0$
	0/1	0/7	0/2	$x=0/5R$
	2/5	0/40	1/1	$x=0/75R$

X: فاصله بین مرکز شیء هدف از مرکز محیط مورد نظر یا فانتوم (cm)، R: شعاع فانتوم یا محیط مورد بررسی (cm)، SE: خطا در اندازه تشخیص داده شده (%). RNG: میزان حلقه ایجاد شده (%).

### نمادها

توموگرافی امپدانس الکتریکی	EIT
توموگرافی القای مغناطیسی	MIT
توموگرافی خازن الکتریکی	ECT
القای رزونانس مغناطیسی	MRI
رسانایی الکتریکی ( $mS.cm^{-1}$ )	$\sigma$
پتانسیل الکتریکی (mV)	$\emptyset$
چگالی جریان ( $mA.cm^{-2}$ )	$J$

### نتیجه‌گیری کلی

آنچه در این مطالعه انجام شد، ارزیابی سامانه توموگرافی امپدانس الکتریکی برای محیط‌های با ابعاد بزرگ و تحت یک استراتژی ابتکاری در شرایط آنلاین است. در این استراتژی، برای جبران دامنه پایین پتانسیل‌های الکتریکی مرزی برای قرائت پتانسیل‌ها، از الگوی ابتکاری تک‌سر استفاده شد. در این الگو تعداد پتانسیل‌های مرزی مستقل ۹۹ عدد بود. در این پژوهش کیفیت

اندازه هدف محاسبه شده توسط سامانه EIT	$DSO$	بردار نرمال نسبت به محیط الکترودها	$n$
اندازه واقعی شیء هدف (تعداد پیکسل)	$RSO$	نرخ سیگنال به نویز (dB)	$SNR$
مساحت کل فانتوم (تعداد چیکسل)	$A_{CD}$	خطا در اندازه (%)	$SE$
مساحت حلقه ایجاد شده (تعداد پیکسل)	$A_{INV}$	حلقه ایجاد شده (%)	$RNG$
شعاع فانتوم یا محیط مورد بررسی (سانتی-متر)	$R$	تغییرات پتانسیل‌های مرزی (mV)	$BVC$
فاصله بین مرکز شیء هدف از مرکز محیط موردنظر (سانتی‌متر)	$x$	میانگین اختلاف پتانسیل‌های مرزی (mV)	$BP_{AVR}$
		انحراف معیار پتانسیل‌های مرزی	$SD [V_{BP}]$
		اختلاف پتانسیل فاز حامل (mV)	$V_{\sigma 0}$
		اختلاف پتانسیل سیال مایع-جامد (mV)	$V_{\sigma 1}$

## REFERENCE

- Bera, T. K. & Nagaraju, J. (2012). Studying the resistivity imaging of chicken tissue phantoms with different current patterns in Electrical Impedance Tomography (EIT). *Measurement*. 45(4). 663-682.
- Haingartner, M., Gschoßmann, S., Cichocki, M. & Schagerl, M. (2020). Improved current injection pattern for the detection of delaminations in carbon fiber reinforced polymer plates using electrical impedance tomography. *Structural Health Monitoring*. 25. 147-158.
- Humplík, P., Cermák, P. & Zid, T. (2016). Electrical impedance tomography for decay diagnostics of Norway spruce (*Picea abies*): possibilities and opportunities. *Silva Fennica*. 50(1). 1341-1357.
- Kotze, R., Adler, A., Sutherland, A. & Deba, C. N. (2019). Evaluation of Electrical Resistance Tomography imaging algorithms to monitor settling slurry pipe flow. *Flow Measurement and Instrumentation*. 68. 101572.
- Lesparre, N., Robert, T., Nguyen, F., Boyle, A. & Hermans, T. (2019). 4D electrical resistivity tomography (ERT) for aquifer thermal energy storage monitoring. *Geothermics*. 77. 368-382.
- Liu, L., Fang, Z. Y., Wu, Y. P., Lai, X. P., Wang, P. & Song, K. I. (2018). Experimental investigation of solid-liquid two-phase flow in cemented rock-tailings backfill using Electrical Resistance Tomography. *Construction and Building Materials*. 175. 267-276.
- Malik, D. & Pakzad, L. (2018). Experimental investigation on an aerated mixing vessel through electrical resistance tomography (ERT) and response surface methodology (RSM). *Chemical Engineering Research and Design*. 129. 327-343.
- Marefatallah, M., Breakey, D. & Sanders, R. S. (2021). Experimental study of local solid volume fraction fluctuations in a liquid fluidized bed: Particles with a wide range of stokes numbers. *International Journal of Multiphase Flow*. 135. 103348.
- Ma, G., Hao, Z., Wu, X. & Wang, X. (2020). An optimal Electrical Impedance Tomography drive pattern for human-computer interaction applications. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*. 14(3). 402-411.
- Mary, B., Peruzzo, L., Boaga, J., Cenni, N., Schmutz, M., Wu, Y. & Cassiani, G. (2020). Time-lapse monitoring of root water uptake using electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse: a vineyard infiltration experiment. *Soil*. 6(1). 95-114.
- Porzuczek, J. (2019). Assessment of the Spatial Distribution of Moisture Content in Granular Material Using Electrical Impedance Tomography. *Sensors*. 19(12). 2807.
- Russo, S., Nefti-Meziani, S., Carbonaro, N. & Tognetti, A. (2017). A quantitative evaluation of drive pattern selection for optimizing EIT-based stretchable sensors. *Sensors*. 17(9). 1999.
- Salucci, M., Oliveri, G. & Massa, A. (2019). Real-time electrical impedance tomography of the human chest by means of a learning-by-examples method. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*. 3(2). 88-96.
- Sharifi, M. & Young, B. (2013). Towards an online milk concentration sensor using ERT: Correlation of conductivity, temperature and composition. *Journal of Food Engineering*. 116(1). 86-96.
- Silva, R., Faia, P. M., Garcia, F. A. P. & Rasteiro, M. G. (2016). Characterization of solid-liquid settling suspensions using Electrical Impedance Tomography: A comparison between numerical, experimental and visual information. *Chemical Engineering Research and Design*. 111. 223-242.
- Sun, J. & Yang, W. (2015). A dual-modality electrical tomography sensor for measurement of gas-oil-water stratified flows. *Measurement*. 66. 150-160.
- Thomas, A. J., Kim, J. J., Tallman, T. N. & Bakis, C. E. (2019). Damage detection in self-sensing composite tubes via electrical impedance tomography. *Composites Part B: Engineering*. 177. 107276.
- Wahab, Y. A., Rahim, R. A., Rahiman, M. H. F., Aw, S. R., Yunus, F. R. M., Goh, C. L. & Ling, L. P. (2015). Non-invasive process tomography in chemical mixtures—A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 210. 602-617.
- Wang, M. (2015). Industrial tomography. *UK: Elsevier*.

- Wei, K., Qiu, C. H. & Primrose, K. (2016). Super-sensing technology: Industrial applications and future challenges of electrical tomography. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 374(1). 201-218.
- Weigand, M. & Kemna, A. (2019). Imaging and functional characterization of crop root systems using spectroscopic electrical impedance measurements. *Plant and Soil*. 435(1). 201-224.
- Xu, C., Dong, X., Shi, X., Fu, F., Shuai, W., Liu, R. & You, F. (2008). Comparison of drive patterns for single current source EIT in computational phantom. In: *2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*. pp. 1500-1503.
- Zhang, L. & Wang, H. (2010). Single source current drive patterns for electrical impedance tomography. In: *2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings*. pp. 1477-1480.
- Zhao, X., Zhuang, H., Yoon, S. C., Dong, Y., Wang, W. & Zhao, W. (2017). Electrical impedance spectroscopy for quality assessment of meat and fish: A review on basic principles, measurement methods, and recent advances. *Journal of Food Quality*. 207. 637-653.