

ارزیابی عملکرد سامانه توموگرافی امپدانس الکتریکی تحت یک استراتژی سنجش ابتکاری برای پایش سیال دوفازی جامد-مایع

نازیلا طربی^۱، حسین موسی‌زاده^{۲*}، علی جعفری^۳، جلیل تقی‌زاده طامه^۴، علی کیایی^۵

۱. دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران (Tarabi99@ut.ac.ir)
۲. دانشیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران (hmousazadeh@ut.ac.ir)
۳. استاد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران (jafarya@ut.ac.ir)
۴. دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران (Taghizadeh68@ut.ac.ir)
۵. پژوهش‌گر ارشد سازمان بنادر و دریانوردی، تهران، ایران (Ali.kiapey60@gmail.com)

چکیده

توموگرافی امپدانس الکتریکی (EIT)، تکنیک تصویرسازی غیرنفوذی است که توسط تزریق جریان الکتریکی به مجموعه‌ای از الکترودها و قرائت اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی از الکترودها، خواص سیال چندفازی مانند توزیع ذرات، غلظت جرمی و حجمی را اندازه‌گیری می‌کند. استراتژی تزریق جریان و قرائت سیگنال از الکترودها نقش مهمی در کیفیت بازسازی تصویر و دقت اندازه‌گیری دارد. در محیط‌های بزرگ و با رسانایی بالا استراتژی‌های مرسوم چون مجاورتی قادر به قرائت سیگنال با کیفیت مناسب نیستند. بنابراین هدف از این پژوهش ساخت و ارزیابی سامانه EIT تحت استراتژی ابتکاری برای تعیین آنلاین توزیع ذرات و غلظت مواد دوفازی جامد-مایع در محیط‌های نسبتاً بزرگ است. بدین منظور، ۱۶ عدد الکتروود 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. دو پارامتر نرخ سیگنال به نویز و تغییرات پتانسیل‌های مرزی محاسبه شد و نتایج نشان داد که حساسیت به کناره‌ها و نزدیک الکترودها بیشتر از حساسیت به میانه است. ارزیابی پارامترهای کیفیت تصویر مانند خطا در اندازه و حلقه ایجاد شده در تصویر بازسازی شده 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.

کلمات کلیدی:

استراتژی سنجش، تصویرسازی، توموگرافی امپدانس الکتریکی، توزیع ذرات، غلظت

*نویسنده مسئول: حسین موسی‌زاده hmousazadeh@ut.ac.ir

بررسی عملکرد سامانه توموگرافی امپدانس الکتریکی تحت استراژی ابتکاری برای سنجش غلظت مواد دو فازی جامد-مایع

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 بیان‌کننده ویژگی‌هایی چون توزیع اندازه ذرات، غلظت حجمی، غلظت جرمی و سایر مشخصات است. محیط مورد بررسی که عمدتاً فانتوم^۱ نامیده می‌شود، می‌تواند ترکیبی از فازهای مختلف جامد، مایع و گاز باشد [۸، ۱۶]. 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 غیر نفوذی است و دارای هزینه پایین‌تری در مقایسه با سایر روش‌های توموگرافی مانند توموگرافی رزونانس مغناطیسی (MRI^۲) است و 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 (EIT^۳)، توموگرافی القای الکترومغناطیس (MIT^۴) و توموگرافی خازنی (ECT^۵) [۱۹].

از جمله پرکاربردترین تکنیک‌های توموگرافی الکتریکی، توموگرافی امپدانس الکتریکی است که برای تعیین مشخصات سیال‌های چندفازی با رسانایی فاز حامل از $0.1/0.1$ تا 10^6 کاربرد دارد [۱۸]. EIT در تصویربرداری پزشکی [۱۲]، صنایع نفت و گاز [۱۵] و زمین‌شناسی و اکتشاف معادن [۵] کاربرد دارد. این تکنولوژی در سال‌های اخیر وارد حوزه صنایع غذایی و کشاورزی شده است. در صنایع غذایی از EIT در بررسی کیفیت گوشت قرمز و ماهی [۲۳]، کیفیت و غلظت شیر [۱۳]، تعیین توزیع ذرات مواد و کیفیت مخلوط شدن مواد غذایی در مخازن [۱۷] استفاده شده است. در بخش کشاورزی محققان، توموگرافی امپدانس الکتریکی را برای پایش فرایند خشک شدن محصولات [۱۰]، بررسی میزان نفوذ آب در خاک و ریشه دوانی گیاه [۹، ۲۰] و تشخیص پوسیدگی درختان [۳] مورد استفاده قرار داده‌اند. یکی از مهمترین کاربردهای توموگرافی امپدانس الکتریکی، تعیین غلظت و رژیم جریان بار عبوری سیال چند فازی در مخازن و در مجاری بسته [۲۲]، تشخیص انسداد لوله و ته‌نشینی رسوبات [۶، ۴] در لوله است.

در یک سامانه EIT، حسگر مجموعه‌ای از الکترودها 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 الکترودها و نحوه قرائت اختلاف پتانسیل الکتریکی از هر یک از جفت الکترودها را استراژی سنجش یا استراژی راه‌اندازی^۶ گویند. کیفیت تصویر به وجود آمده علاوه بر کیفیت سیگنال جریان تزریق شده به استراژی تزریق و قرائت اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی از حسگرها بستگی دارد. استراژی‌های مختلفی برای تزریق و دریافت پتانسیل‌های الکتریکی مرزی وجود دارد مانند استراژی مجاورتی، استراژی متقابل، استراژی جریان انطباقی، استراژی دیواره فلزی و غیره. هر یک از این استراژی‌ها قابلیت‌های منحصر به فرد خود را دارند. بطور مثال استراژی مجاورتی در تشخیص هدف یا شیء در کناره‌ها و نزدیک حسگرها عملکرد مطلوبتری نسبت به تشخیص در وسط دارد. استراژی مجاورتی به دلیل داشتن دقت بالا و سخت افزار ساده‌تر

¹ Phantom

² Magnetic resonance imaging

³ Electrical impedance tomography

⁴ Magnetic induction tomography

⁵ Electrical capacitance tomography

⁶ Sensing or drive strategy

مورد توجه است. مشکل عمده این استراژی پایین بودن نرخ سیگنال به نویز و دامنه دینامیک پایین پتانسیل‌های الکتریکی مرزی است [۱۴]. بنابراین در اهداف بزرگ عملکرد مناسبی ندارد. تحقیقاتی در زمینه مقایسه استراژی‌های مختلف تزریق و قرائت انجام شده است. ژو و همکاران [۲۱] عملکرد سامانه EIT را در سه فاصله زاویه‌ای ۲۲، ۱۵۸ و ۱۸۰ درجه بین جفت الکترودهای تزریق در محیط شبیه‌سازی شده، بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که در میان این سه استراژی، فاصله زاویه ۱۵۸ درجه بین جفت الکترود تزریق جریان دارای بهترین عملکرد است. برا و ناگراجی [۱] عملکرد دو استراژی مجاورتی و متقابل را در تشخیص بافت‌های استخوان و چربی در فانتوم مرغ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد که هر دو الگو قابلیت تشخیص هدف مورد نظر را دارد اما عملکرد استراژی متقابل مطلوب‌تر است. روسو و همکاران [۱۱] عملکرد سه استراژی مختلف را بر روی حسگرهای فشار مورد بررسی قرار دادند. آنها پارامترهای مرتبط با کیفیت پتانسیل‌های الکتریکی مرزی و تصویر بازسازی شده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که اگرچه استراژی مجاورتی در برابر نویز تحمل کمتری دارد و دامنه دینامیکی پتانسیل‌های آن کمتر است، اما هنگامی که شیء در نزدیکی الکترودها قرار دارد عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. هاینگارتتر و همکاران [۲] عملکرد یک استراژی ابتکاری به نام الگوی ستاره‌ای را برای تشخیص حفره‌های صفحات پلیمری کربن مورد بررسی قرار دادند. الگوی ستاره‌ای از هر ترکیب احتمالی الکترودها برای تزریق جریان استفاده می‌کند. برای یک سیستم EIT با ۱۶ الکترود، ۲۴۰ حالت فقط برای تزریق جریان امکان پذیر است. نتایج این بررسی نشان داد که حفره‌هایی با قطر ۱۰ میلی‌متری به درستی تشخیص داده می‌شوند اما به دلیل افزایش تعداد قرائت‌ها زمان زیادی صرف می‌شود که در کاربردهای آنلاین عامل محدود کننده است.

همان‌گونه که اشاره شد یکی از کاربردهای عمده توموگرافی امپدانس الکتریکی تعیین خصوصیات سیال چند فاز در مخازن و لوله‌ها است. تحقیقات انجام شده در ابعاد آزمایشگاهی و با قطر فانتوم کوچک حدود ۲۰ cm و در رسانایی پایین 2ms.cm^{-1} است. الگوی مرسوم مانند الگوی مجاورتی به دلیل کم بودن دامنه دینامیک پتانسیل‌های الکتریکی مرزی قابلیت نامین پاسخ مناسب از حسگرها را ندارد. بنابراین هدف از انجام این تحقیق، ارائه استراژی 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 استراژی ابتکاری مورد نظر در آن پیاده‌سازی شد. به منظور ارزیابی عملکرد استراژی مورد نظر، پارامترهای مرتب با کیفیت اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی و تصویر بازسازی شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

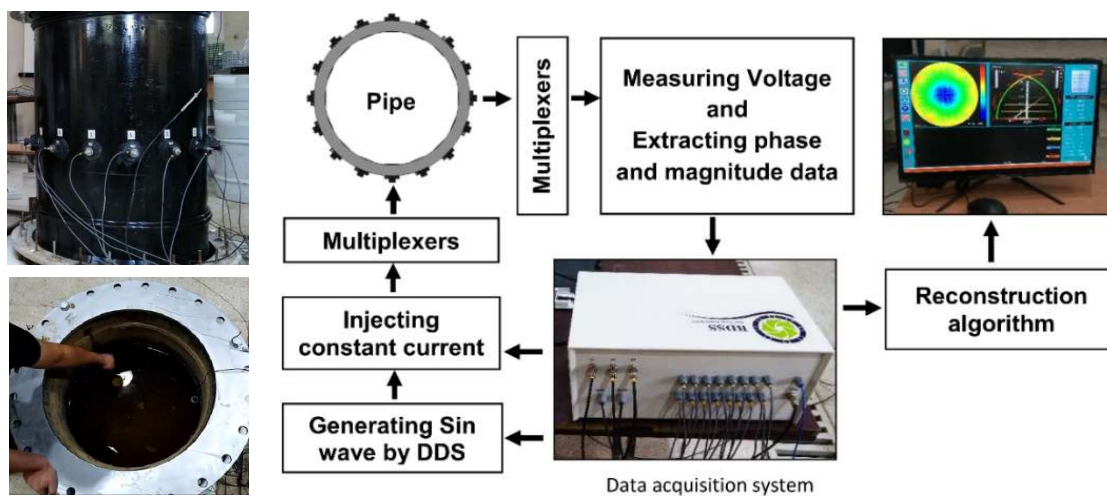
مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی عملکرد سامانه EIT در استراژی مورد نظر، سامانه توموگرافی امپدانس الکتریکی با نام سامانه لایروپ‌یار بصیر (BDSS^1) 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. این سامانه EIT دارای سه بخش اصلی است:

- حسگرها: حسگرها شامل ۱۶ الکترود با مقطع دایره‌ای به قطر ۶۰ mm هستند که پیرامون یک استوانه‌ای به قطر ۶۱۰ mm نصب شده‌اند (شکل ۱). به منظور پایش عملیات لایروپی، این پلنفرم در بین خطوط لوله‌های کشتی لایروپ نصب می‌شود.

¹ Basir dredge support system

- سامانه تحصیل داده (DAS¹): وظیفه تامین، ارسال و سوئیچ سیگنال جریان ثابت بین هر یک از جفت الکتروود و همچنین دریافت، فیلتر و تقویت سیگنال دریافتی از الکتروودها و ارسال برای بخش پردازش را برعهده دارد (شکل ۱).
 - الگوریتم بازسازی تصویر: پس از استخراج اطلاعات سیگنال دریافتی از الکتروودهای گیرنده، توسط الگوریتم بازسازی تصویر از اطلاعات بدست آمده برای تصویرسازی از مقطع محیط مورد نظر استفاده می‌شود.
- در شکل ۱-، بلوک دیاگرام سامانه EIT ساخته شده و همچنین پلتفرمی که حسگرها بر روی آن نصب شده‌اند نشان داده شده است. فاز مایع در این پژوهش آب شور با نرخ $12/5 \text{ gr.lit}^{-1}$ NaCl است (این میزان شوری در دمای 25°C معادل رسانایی 18 ms.cm^{-1} است). برای ارزیابی استراتژی تزریق جریان و قرائت اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی بین الکتروودها، فاز جامد بطری‌های پلاستیکی با ابعاد متفاوت است که به طور معلق در فاز مایع در جلو حسگرها قرار داده می‌شوند.

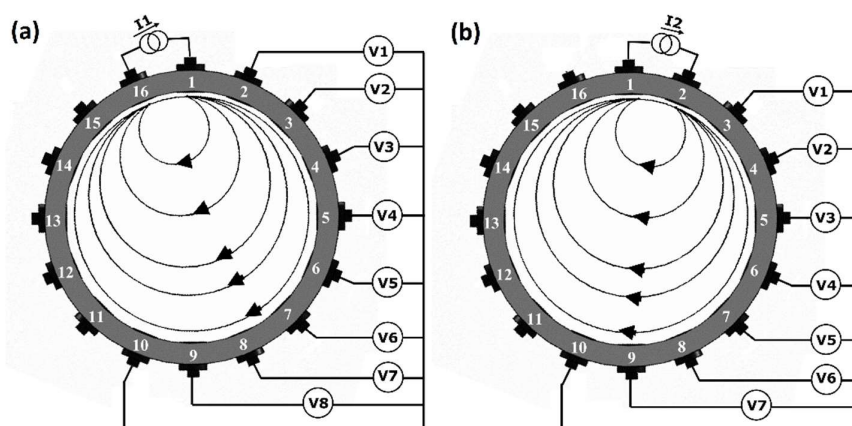


شکل ۱) بخش‌های مختلف سامانه EIT ساخته شده و پلتفرمی که حسگرها بر آن نصب شده‌اند

استراتژی تزریق و قرائت در الکتروودهای گیرنده، استراتژی ابتکاری با نام استراتژی تک سر است. در این استراتژی، الکوی تزریق جریان مشابه الکوی تزریق در استراتژی مجاورتی است. الکوی قرائت اختلاف پتانسیل‌ها، با در نظر گرفتن یک الکتروود مرجع که در تمام مراحل تزریق و قرائت ثابت است انجام می‌شود. شکل ۲- شماتیکی از نحوه تزریق جریان و قرائت اختلاف پتانسیل‌ها را نشان می‌دهد. الکوی مورد 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 ۲ا). در مرحله دوم، توسط الکتروود ۱-۲، تزریق جریان صورت گرفته و جفت الکتروودهای ۳-۱۰، ۴-۱۰، ۵-

¹ Data acquisition system

۱۰.... ۱۰-۱۵ قرائت می‌شود (شکل ۲b). به همین ترتیب تا آخرین مرحله تزریق و اندازه‌گیری اجرا می‌شود. در این استراتژی با حذف قرائت‌های تکراری، در مجموع ۹۹ قرائت مستقل به دست می‌آید.



شکل ۲) نحوه تزریق جریان و قرائت اختلاف پتانسیل‌ها در استراتژی تک‌سر

در توموگرافی امیدانس 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 [۴]:

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \phi) = 0 \quad (1)$$

که شرایط مرزی در رابطه (۲) بیان شده است:

$$\begin{aligned} \sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} &= J && \text{در الکترودهای جریان مثبت} \\ \sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} &= -J && \text{در الکترودهای جریان منفی} \\ \sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} &= 0 && \text{سایر نقاط روی مرز} \end{aligned} \quad (2)$$

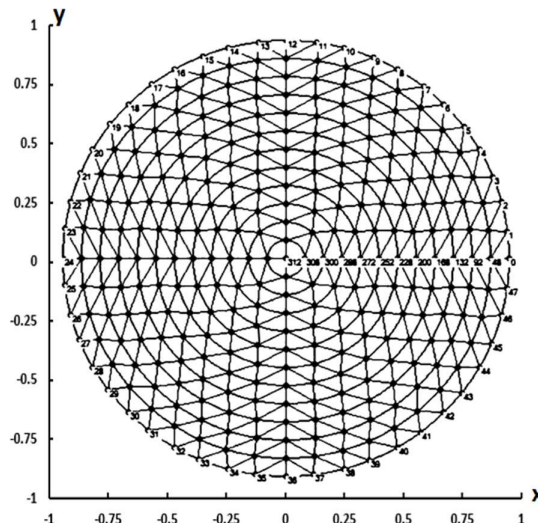
ϕ : پتانسیل الکتریکی، J : چگالی جریان، σ : رسانایی الکتریکی

برای حل این مسئله از حل مستقیم و معکوس استفاده می‌شود. در مرحله اول، مقطع مورد نظر به تعدادی المان‌های مشخص تقسیم می‌شود و با استفاده از FEM^۱، با داشتن رسانایی‌های معلوم، پتانسیل‌های گره‌ها تعیین می‌شود و در حل معکوس با استفاده از الگوریتم نیوتن-گوس بهبود یافته و الگوی منظم‌سازی^۲ NOSER، رسانایی هر

¹ Finite element method

² Style regularization

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-۳ نحوه مش بندی مقطع مورد نظر نشان داده شده است. در این مش، 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 بر همین اساس، تعداد المان‌ها برابر با ۵۷۶ المان در نظر گرفته شد.



شکل ۳) نحوه مش بندی مقطع فانتوم مورد نظر

نحوه ارزیابی عملکرد سامانه EIT ساخته شده با الگوی سنسجش معرفی شده به این ترتیب بود که سه بطری پلاستیکی در ابعاد کوچک (قطر ۸/۵cm)، متوسط (قطر ۱۶cm) و بزرگ (قطر ۳۰cm) 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. در ارزیابی عملکرد الگوی مورد نظر، ابتدا پارامترهای کیفیت پتانسیل‌های الکتریکی مرزی مورد بررسی قرار گرفت. این پارامترها شامل پارامتر نرخ سیگنال به نویز (SNR^1) و تغییرات پتانسیل‌های مرزی (BVC^2) است. پارامتر نرخ سیگنال به نویز بیان کننده 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 معادله (۳) نرخ سیگنال به نویز محاسبه می‌شود [۱]:

$$SNR_{BP} = 20 \log_{10} \frac{BP_{AVR}}{SD[V_{BP}]} \quad (3)$$

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

¹ Signal-to-Noise Ratio

² Boundary Voltage Changes

پارامتر BVC، معیاری برای بیان قابلیت تشخیص شیء هدف^۱ در استراتژی سنجش است. برای محاسبه تغییرات پتانسیل‌های مرزی طبق رابطه (۴) از نرم اختلاف بین پتانسیل‌های الکترودها در دو حالت فاز مایع به تنهایی ($V_{\sigma 0}$) و فاز مایع به همراه فاز جامد ($V_{\sigma 1}$) استفاده می‌شود [۱۱].

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

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 [۱۱]:

$$SE = \left| \frac{DSO - RSO}{A_{CD}} \right| \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، DSO اندازه محاسبه شده توسط سامانه EIT، RSO اندازه واقعی، A_{CD} مساحت کل فانتوم مورد بررسی است که در تصویر بازسازی شده بر حسب پیکسل محاسبه می‌شود.

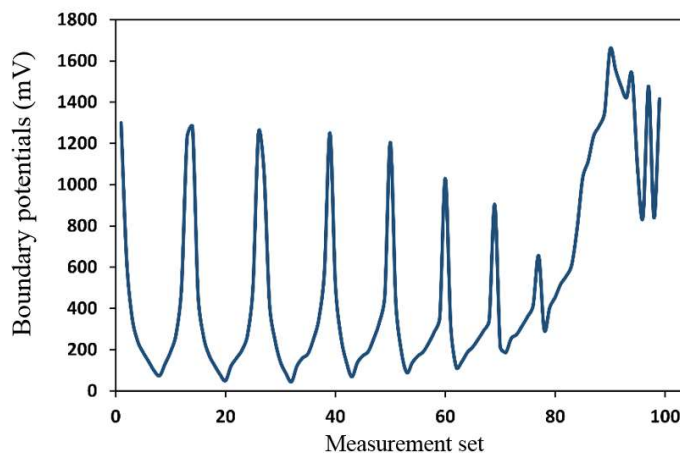
در توموگرافی امیدانس الکتریکی، ممکن است حلقه‌ای آبی رنگ (مخالف رنگ شیء هدف) اطراف هدف بازسازی شده ایجاد شود که تا حد ممکن باید از ایجاد آن اجتناب شود. نحوه محاسبه این پارامتر در رابطه (۶) بیان شده است [۱۱]:

$$RNG = \frac{A_{INV}}{A_{CD} - DSO} \quad (۶)$$

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

نتایج و بحث

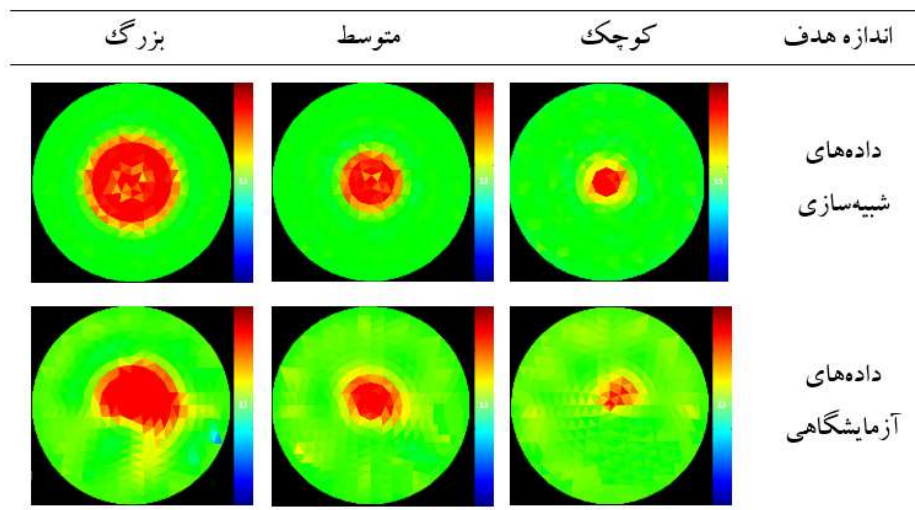
شکل-۴ پروفیل اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی مرزی قرائت شده از جفت الکترودها را طبق الگوی ابتکاری تک‌سر نشان می‌دهد. دامنه دینامیک پتانسیل‌های مرزی الگوی تک‌سر در حدود ۱۶۰۰ mV است.



¹ Target

شکل ۴) پروفیل اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی مرزی در الگوی مجاورتی- تک سر

میزان نرخ سیگنال به نویز در این الگو dB ۱/۰۵ است که نشان دهنده نویز پذیری نسبتا بالا در این الگو است. برای درک بهتر این پارامتر در شکل ۵- 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. همان گونه که در توموگرام حاصل از داده‌های شبیه‌سازی مشخص است، عملکرد استراتژی ابتکاری در شرایط شبیه‌سازی بسیار مطلوب است و کاملا هدف مورد نظر را در اندازه و شکل صحیح در اندازه مختلف 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. خصوصا با کوچک شدن ابعاد شیء هدف، توموگرام ساخته شده از کیفیت مناسبی برخوردار نیست. در جدول ۱- مقادیر BVC برای هر یک از شرایط آزمایش با اندازه مختلف شیء هدف در موقعیت‌های مختلف نشان داده شده است. هر چه 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 $77/63$ mV است و حداکثر در هنگامی که شیء هدف در کنارها قرار دارد برابر با $787/9$ mV 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 mV و 55 mV بود [۱۱].

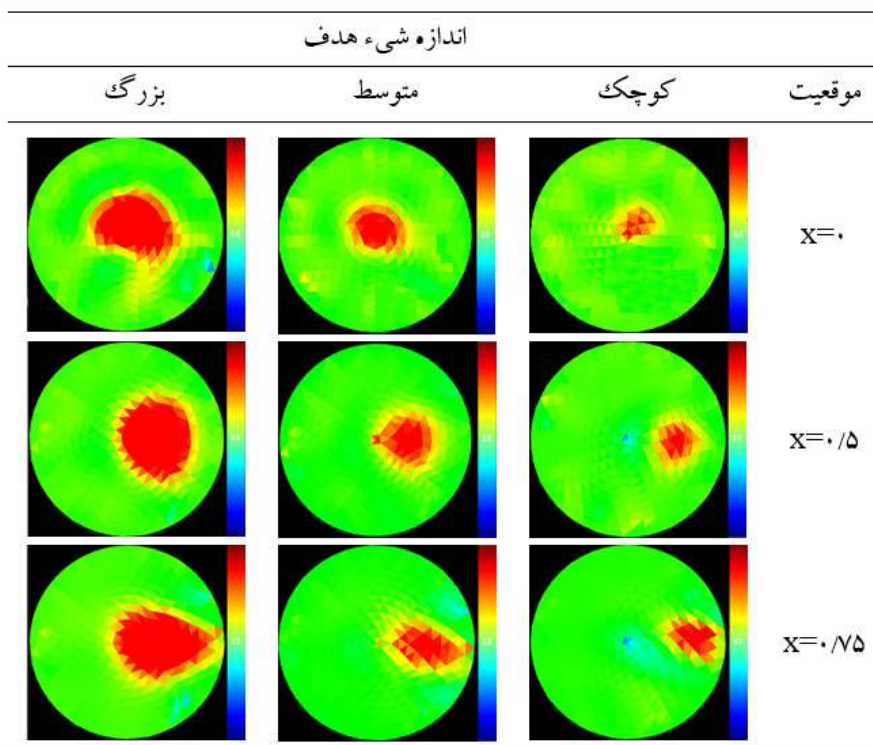


شکل ۵) توموگرام حاصل از داده‌های شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی

جدول ۱) پارامتر BVC (mV) برای ابعاد مختلف جسم هدف در سه موقعیت متفاوت

| ابعاد شیء هدف | | | موقعیت شیء هدف |
|---------------|---------|--------|----------------|
| بزرگ | متوسط | کوچک | |
| ۵۹۴/۳۸ | ۲۳۴/۸۵ | ۷۷/۶۳ | X=۰ |
| ۱۲۲۰/۶۶ | ۵۵۶/۸۵ | ۳۰۴/۷۴ | X=۰/۵ |
| ۱۵۰۳/۳۰ | ۱۲۵۲/۳۲ | ۷۸۷/۹۰ | X=۰/۷۵ |

در شکل ۶-۲ توמוگرام 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 تک سر 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 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 $SE = 6\%$ است. برای بطری کوچک زمانی که در موقعیت $x=0/5$ قرار دارد، کمترین میزان خطای اندازه به دست 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 $x=0/5$ قرار دارد در هر سه اندازه شیء، ابعاد تصویر بازسازی شده بزرگ‌تر از ابعاد واقعی است.



شکل ۶) تصویر بازسازی شده برای هدف با اندازه مختلف و در موقعیت‌های مختلف

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 روسو و همکاران [۱۱] میزان ایجاد حلقه برای استراتژی مجاورتی و متقابل در محدوده ۰/۲۹ تا ۰/۳۶ قرار داشت.

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

| پارامتر | موقعیت | ابعاد شیء هدف | | |
|----------------------|----------|---------------|-------|-------|
| | | کوچک | متوسط | بزرگ |
| خطای اندازه‌گیری (%) | $X=0$ | ۰/۹۱ | ۱/۵ | ۴/۶ |
| | $X=0/5$ | ۰/۱۶ | ۰/۲۹ | ۲/۵ |
| | $X=0/75$ | ۰/۴۱ | ۰/۳۷ | ۲/۰۵ |
| حلقه ایجاد شده | $X=0$ | ۰ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۸ |
| | $X=0/5$ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۲ |
| | $X=0/75$ | ۰/۰۴۰ | ۰/۰۲۵ | ۰/۰۱۱ |

نتیجه‌گیری

آنچه در این مطالعه انجام شد، ارزیابی سامانه توموگرافی امپدانس الکتریکی ویژه 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 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 SNR برای الگوی مربوطه برابر با ۱/۰۵ dB و حداقل BVC برای جسم کوچک برابر با ۲۷mV و حداکثر BVC برای جسم بزرگ برابر با ۱۵۰۳ mV بود. بیشترین پارامتر SE 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 استراتژی 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.

تشکر و قدردانی

این پژوهش به سفارش سازمان بنادر و دریانوردی و طرح پژوهشی-کاربردی به شماره ۳۵۲۸/س۲۰ به اجرا درآمد که بدین وسیله از مساعدت ایشان تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

منابع

1. Bera, T.K. and Nagaraju, J., 2012. Studying the resistivity imaging of chicken tissue phantoms with different current patterns in Electrical Impedance Tomography (EIT). *Measurement*, 45(4), pp.663-682.
2. Haingartner, M., Gschoßmann, S., Cichocki, M. and 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*, p.1475921720972308.
3. Humplík, P., Cermák, P. and Zid, T., 2016. Electrical impedance tomography for decay diagnostics of Norway spruce (*Picea abies*): possibilities and opportunities. *Silva Fennica*, 50(1), pp.1341-1357.
4. Kotze, R., Adler, A., Sutherland, A. and Deba, C.N., 2019. Evaluation of Electrical Resistance Tomography imaging algorithms to monitor settling slurry pipe flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 68, p.101572.
5. Lesparre, N., Robert, T., Nguyen, F., Boyle, A. and Hermans, T., 2019. 4D electrical resistivity tomography (ERT) for aquifer thermal energy storage monitoring. *Geothermics*, 77, pp.368-382.
6. Liu, L., Fang, Z.Y., Wu, Y.P., Lai, X.P., Wang, P. and 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, pp.267-276.
7. Malik, D. and 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, pp.327-343.
8. Marefatallah, M., Breakey, D. and 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, p.103348.
9. Mary, B., Peruzzo, L., Boaga, J., Cenni, N., Schmutz, M., Wu, Y., Hubbard, S.S. and 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), pp.95-114.
10. Porzuczek, J., 2019. Assessment of the spatial distribution of moisture content in granular material using Electrical Impedance Tomography. *Sensors*, 19(12), p.2807.
11. Russo, S., Nefti-Meziani, S., Carbonaro, N. and Tognetti, A., 2017. A quantitative evaluation of drive pattern selection for optimizing EIT-based stretchable sensors. *Sensors*, 17(9), p.1999.

12. Salucci, M., Oliveri, G. and 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), pp.88-96.
13. Sharifi, M. and Young, B., 2013. Towards an online milk concentration sensor using ERT: Correlation of conductivity, temperature and composition. *Journal of Food Engineering*, 116(1), pp.86-96.
14. Silva, R., Faia, P.M., Garcia, F.A.P. and 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, pp.223-242.
15. Sun, J. and Yang, W., 2015. A dual-modality electrical tomography sensor for measurement of gas-oil-water stratified flows. *Measurement*, 66, pp.150-160.
16. Thomas, A.J., Kim, J.J., Tallman, T.N. and Bakis, C.E., 2019. Damage detection in self-sensing composite tubes via electrical impedance tomography. *Composites Part B: Engineering*, 177, p.107276.
17. Wahab, Y.A., Rahim, R.A., Rahiman, M.H.F., Aw, S.R., Yunus, F.R.M., Goh, C.L., Rahim, H.A. and Ling, L.P., 2015. Non-invasive process tomography in chemical mixtures—A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 210, pp.602-617.
18. Wang, M., 2015. *Industrial tomography*. UK: Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, pp.434-438.
19. Wei, K., Qiu, C.H. and 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(2070), p.20150328.
20. Weigand, M. and Kemna, A., 2019. Imaging and functional characterization of crop root systems using spectroscopic electrical impedance measurements. *Plant and Soil*, 435(1), pp.201-224.
21. Xu, C., Dong, X., Shi, X., Fu, F., Shuai, W., Liu, R. and You, F., 2008, May. Comparison of drive patterns for single current source EIT in computational phantom. In *2008 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering* (pp. 1500-1503). IEEE.
22. Zhang, L. and Wang, H., 2010, May. Single source current drive patterns for electrical impedance tomography. In *2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings* (pp. 1477-1480). IEEE.
23. Zhao, X., Zhuang, H., Yoon, S.C., Dong, Y., Wang, W. and 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*, 2017.

Evaluation of electrical impedance tomography system in an innovative sensing strategy for two-phase solid-liquid fluid monitoring

Nazilla Tarabi^a, Hossein Mousazadeh^{b,*}, Ali Jafari^c, Jalil Taghizadeh-Tameh^a, Ali Kiapey^d

^aPh.D. Candidate, Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran, Iran

^bAssociate professor, Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran, Iran

^cProfessor, Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran, Iran

^dProfessional Researcher of Ports and Maritime Organization, Tehran, Iran

Abstract

Electrical impedance tomography (EIT) is a non-invasive image reconstruction technique that measures the properties of multiphase fluids such as particle distribution, mass and volume concentration by injecting an electric current into a set of electrodes and reading the difference in electrical potentials from the electrodes. The strategy of current injection and signal measurement from the electrodes has an important role in the image reconstruction quality and measurement accuracy. In large phantom 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 particle distribution and concentration of solid-liquid fluid in relatively large phantoms. The sensors of this instrument consist of 16 circular electrodes that are embedded around the vertical cylindrical container. The liquid phase was water with known conductivity and the solid phase was the bottle in different sizes and in three different situations the performance of the system was evaluated. The results showed that the innovative strategy has the ability to recognize and differentiate the target in different dimensions and different positions. The two-parameter signal rate to noise and boundary potential changes were calculated and the results showed that the sensitivity to the sides and near the electrodes was higher than the sensitivity to the middle. Size error parameter decreases in the target of medium and large size, in positions close to the electrodes. In the three sizes of the target, the ringing has no negative effect on the reconstructed image quality.

Key words: Sensing strategy, Imaging, Electrical impedance tomography, Particle distribution, Concentration

*Corresponding author

E-mail: hmousazadeh@ut.ac.ir