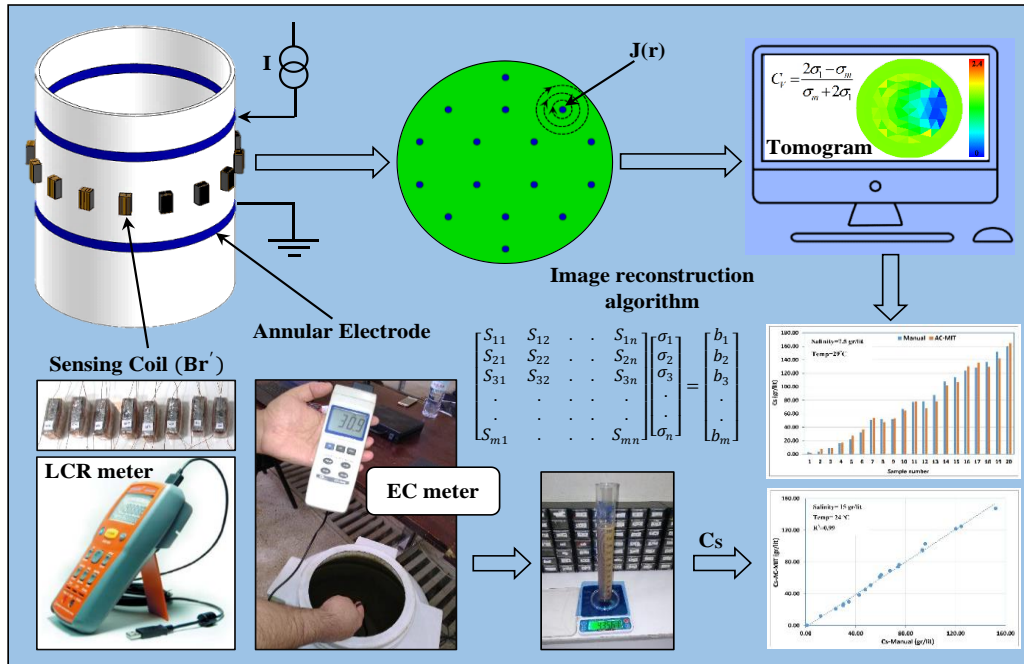


## Introducing an innovative magnetic induction tomography system for measuring multiphase flow density

Jalil Taghizadeh Tameh<sup>1</sup>, Hosein Mousazadeh<sup>1\*</sup>, Shahin Raefiee<sup>1</sup>, Nazila Tarabi<sup>1</sup>

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

(Received: Apr. 12, 2022- Revised: Dec. 3, 2022- Accepted: Dec. 20, 2022)



**Abstract:** Multiphase flows are a major part of many industrial processes, and therefore their monitoring and control is importance. Density is one of the most important characteristics of fluid and its online measurement is essential for the fluid monitoring and control. In this research, an applied current magnetic induction tomography (AC-MIT) system was designed and constructed to measure the density of multiphase flow in pipeline. The main components of the AC-MIT system include the transmitter and receiver sensors, data acquisition system and problem solving algorithm. In AC-MIT system, innovative transmitter sensors were used, which include two annular electrodes and mounted on the wall of the media. Receiver sensors include a number of coils that are installed around the media. Iterative Gauss-Newton algorithm with Tikhonov regularization method was used to solve the inverse problem. To evaluate performance of the AC-MIT system, Saline water and soil-sand mixture were used as the liquid and solid phase, respectively. The effect of temperature and salinity levels (Five different temperature and salinity levels) was investigated using the response surface method and ANOVA. The results showed that there is a linear relationship between the mass concentrations measured in the two modes (manual measurement and measured by AC-MIT system) with an acceptable coefficient of determination ( $R^2$  in the range of 0.98 to 0.99). The results of statistical analysis showed that different levels of temperature and salinity of the carrier phase as well as the interaction of temperature and salinity did not have a significant effect on system performance.

**Keywords:** Annular electrodes, Iterative Gauss-Newton algorithm, Biot-Sawart law, Ill-posed problem.

\*Corresponding Author's Email: hmousazade@ut.ac.ir

## معرفی یک سامانه ابتکاری توموگرافی القای الکترومغناطیسی برای اندازه‌گیری چگالی سیال چندفازی

جلیل تقی‌زاده طامه<sup>۱</sup>، حسین موسی‌زاده<sup>۱\*</sup>، شاهین رفیعی<sup>۱</sup>، نازیلا طربی<sup>۱</sup>

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

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

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۹/۲۹)

چکیده: سیال‌های چندفازی، بخش اصلی بسیاری از فرایندهای صنعتی هستند و به همین دلیل پایش و کنترل آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چگالی یکی از مهمترین مشخصه‌های سیال بوده و اندازه‌گیری برخط آن برای پایش و کنترل سیال امری ضروری است. در این پژوهش یک سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی با جریان اعمالی (AC-MIT) برای اندازه‌گیری چگالی سیال چندفازی درون لوله طراحی و ساخته شد. بخش‌های اصلی این سامانه شامل حسگرهای فرستنده و گیرنده، سامانه تحصیل داده و الگوریتم حل مسئله می‌باشد. در این سامانه از حسگرهای فرستنده ابتکاری استفاده شد که شامل دو الکتروود حلقوی بوده و بر روی دیواره محیط نصب می‌شوند. حسگرهای گیرنده شامل تعدادی کویل هستند که دورتادور محیط موردنظر و با فاصله یکسان قرار می‌گیرند. حل مسئله معکوس در سامانه AC-MIT با استفاده از الگوریتم حل تکراری گوس-نیوتن و روش منظم‌سازی تیخونوف انجام شد. در ارزیابی عملکرد سامانه از آب شور به عنوان فاز حامل و مخلوط خاک و ماسه به عنوان فاز جامد استفاده شد. تاثیر تغییرات دما و شوری بر روی چگالی اندازه‌گیری شده توسط سامانه در پنج سطح مختلف با استفاده از روش سطح پاسخ و تجزیه واریانس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که بین غلظت‌های جرمی اندازه‌گیری شده در دو حالت اندازه‌گیری دستی (به عنوان شاهد) و اندازه‌گیری توسط سامانه AC-MIT یک رابطه خطی با ضریب تعیین قابل قبول (بازه ۰/۹۸ تا ۰/۹۹) وجود دارد. نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد که سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل و همچنین اثر متقابل آن‌ها، تاثیر معنی‌داری بر عملکرد سامانه ندارد.

واژه‌های کلیدی: الکتروود حلقوی، الگوریتم حل تکراری گوس-نیوتن، قانون بیوت-ساواریت، مسئله بدرفتار.

## مقدمه

سیال‌های چندفازی، عناصر اصلی در بسیاری از فرایندهای صنعتی از جمله صنایع غذایی، دارویی، نفت و پتروشیمی، کشاورزی و لایروبی هستند (Wang, 2015) و به همین دلیل پایش و کنترل آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای پایش و کنترل سیال چندفازی درون مسیرهای بسته، تعیین مشخصه‌های آن مانند جریان جرمی مواد، چگالی، سرعت و توزیع همگنی سیال عبوری امری ضروری است (Lay-Ekuakille et al., 2014). چگالی و جریان جرمی یکی از مهمترین مشخصه‌های سیال بوده و اندازه‌گیری برخط آن موجب استفاده بهینه از انرژی و مواد اولیه می‌شود (Zheng et al., 2011). روش‌های متفاوتی برای تعیین چگالی سیال‌های چندفازی درون لوله وجود دارد که از متداول‌ترین آن‌ها می‌توان به چگالی‌سنج‌های هسته‌ای اشاره کرد. روش کار این چگالی‌سنج‌ها بر مبنای اندازه‌گیری تضعیف پرتو گاما در حین عبور از میان سیال بوده که متناسب با میزان چگالی سیال است (Van Eeten, 2011). این چگالی‌سنج‌ها دارای معایبی از جمله خطر تشعشع مواد رادیواکتیو، تاثیرات مخرب زیست محیطی، محدودیت در استفاده و همچنین هزینه تعمیر و نگهداری بالا می‌باشد. استفاده از انگشتی‌های ارتعاشی یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری چگالی سیال درون لوله است (Raza & Chaudhari, 2015). از مهمترین معایب این روش نفوذی بودن چگالی‌سنج است که موجب ایجاد اختلال در حرکت سیال می‌شود. از دیگر روش‌های اندازه‌گیری چگالی سیال درون لوله می‌توان به چگالی‌سنج‌های مبتنی بر اختلاف فشار (Remiorz et al., 2015)، چگالی‌سنج‌های پیچشی (کوریولیس<sup>۱</sup>) (Tombs et al., 2018; Garcia-Berrocal et al., 2019) و همچنین چگالی‌سنج‌های مبتنی بر امواج فراصوت (Minghua et

al., 2008) اشاره کرد. روش‌های ذکر شده دارای معایبی از جمله عدم امکان استفاده برای لوله‌های با قطر بزرگ (بیش از ۵۰ سانتی‌متر) و همچنین ناتوانی در اندازه‌گیری چگالی سیال‌های با غلظت بالا هستند. همچنین تمامی این روش‌ها، اندازه‌گیری چگالی را صرفاً به صورت نقطه‌ای و یا خطی انجام داده و در لوله‌های با قطر بزرگ، برآورد مناسبی از چگالی کل سیال عبوری از مقطع لوله را نداشته و موجب ایجاد خطاهای بزرگ می‌شوند. در بین روش‌های پایش سیال‌های چندفازی، فناوری توموگرافی<sup>۲</sup> به دلیل ویژگی‌هایی مانند غیرمخرب و غیرنفوذی بودن، عدم محدودیت در میزان غلظت سیال و قابلیت بررسی کل مقطع لوله از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

توموگرافی یک روش تصویرسازی است که در آن خصوصیات فیزیکی کل مقطع ماده یا محیط مورد آزمایش در قالب تصویر دوبعدی یا سه‌بعدی نمایش داده می‌شود. این تصویر توموگرام<sup>۳</sup> نام دارد و در سیال‌های چندفازی بیان‌کننده ویژگی‌هایی چون چگالی سیال، غلظت جرمی، غلظت حجمی و توزیع اندازه ذرات است. محیط مورد بررسی که عمدتاً فانتوم<sup>۴</sup> یا مدیا<sup>۵</sup> نامیده می‌شود، می‌تواند ترکیبی از فازهای مختلف جامد، مایع و یا گاز باشد (Marefatallah et al., 2021). توموگرافی دارای زیرمجموعه‌های مختلفی مانند توموگرافی کامپیوتری (CT<sup>۶</sup> Scan)، تصویرسازی روزنانس مغناطیسی (MRI<sup>۷</sup>) و توموگرافی الکتریکی است. تکنیک‌های توموگرافی الکتریکی به طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند: توموگرافی خازنی<sup>۸</sup> (ECT)، توموگرافی امپدانس الکتریکی<sup>۹</sup> (EIT) و توموگرافی القای الکترومغناطیسی<sup>۱۰</sup> (MIT). در سال‌های اخیر فناوری توموگرافی وارد حوزه کشاورزی و صنایع غذایی نیز شده است. در بخش کشاورزی، توموگرافی الکتریکی برای بررسی خشک

6 Computerized Tomography

7 Magnetic resonance imaging

8 Electrical capacitance tomography

9 Electrical impedence tomography

10 Magnetic induction tomography

1 Coriolis

2 Tomography

3 Tomogram

4 Phantom

5 Media

شدن محصولات کشاورزی (Porzuczek, 2019)، نفوذ کردن آب در خاک و ریشه‌دهی گیاه (Mary et al., 2020) (Weigand & Kemna, 2019)؛ و تشخیص پوسیدگی درختان (Humplík et al., 2016) مورد استفاده قرار گرفته است. در صنایع غذایی نیز برای تعیین کیفیت گوشت قرمز (Zhao et al., 2017) و غلظت شیر (Babu & Amamcharla, 2021) از توموگرافی الکتریکی استفاده شده است.

توموگرافی القای الکترومغناطیسی از پدیده‌های نوظهور روش‌های توموگرافی الکتریکی بوده و بر خلاف توموگرافی امپدانس الکتریکی، به دلیل ویژگی‌هایی مانند غیرتماسی و غیر نفوذی بودن، توجه محققین را به خود جلب کرده است. این روش محدودیت توموگرافی خازنی در سنجش محیط با رسانایی بالا را نداشته و قابلیت ساخت تصویر از نمونه‌های با رسانایی پایین (مانند بافت‌های بیولوژیکی و آب یونیزه شده) تا رسانایی بسیار بالا ( $10^7$  S/m) (Ma et al., 2015; Watson et al., 2008) را دارد. از دیگر کاربردهای MIT می‌توان به پایش جریان فلزات (Ma et al., 2008; Yin et al., 2011) و همچنین تست غیر مخرب (Yin and Peyton, 2006) اشاره کرد.

اصول کار سامانه MIT مبتنی بر اندازه‌گیری القای متقابل است، بطوریکه جریان الکتریکی به کوئل<sup>۱</sup> فرستنده تزریق شده و به دلیل ایجاد میدان مغناطیس اولیه، پتانسیل الکتریکی در سایر کوئل‌ها (حسگرهای گیرنده) القا می‌شود. حال اگر جسمی بین حسگر فرستنده و گیرنده قرار گیرد، سیگنال جریان گردابی القایی (میدان مغناطیس ثانویه) نیز توسط کوئل گیرنده دریافت می‌شود. بنابراین ولتاژ القایی تابعی از توزیع رسانایی / نفوذپذیری مغناطیسی مواد موجود بین حسگرهای فرستنده و گیرنده است (Wei et al., 2016) و تغییرات آن متناسب با مشخصه فیزیکی محیط مورد

بررسی مانند غلظت و چگالی سیال است. مطالعاتی در زمینه اندازه‌گیری جریان سیال‌های چندفازی با استفاده از روش توموگرافی القای الکترومغناطیسی انجام شده است، برای مثال در پژوهشی برای تصویر کردن توزیع مواد فاز رسانا در سیال چندفازی، از سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی استفاده شده است. سامانه مورد استفاده شامل ۱۶ حسگر بود، ۸ حسگر فرستنده که با ولتاژ ۱۵ ولت در فرکانس ۱۳ مگاهرتز راه‌اندازی می‌شد و همچنین از ۸ حسگر به عنوان گیرنده استفاده شد. قطر داخلی و خارجی محیط مورد آزمایش به ترتیب برابر با ۱۹ و ۲۰ سانتی‌متر بود. نتایج تجربی نشان داد که در نسبت مساحت  $8/69$  درصد (نسبت فاز رسانا به کل)، این سامانه قادر به تصویر کردن رسانایی  $0/06$  زیمنس بر متر می‌باشد (Ma et al., 2015). در پژوهش دیگری از ترکیب توموگرافی القای الکترومغناطیسی و توموگرافی سرعت الکترومغناطیسی برای تعیین دبی حجمی آب در سیال چندفازی استفاده شد. در این پژوهش از روغن سیلیکون با هدایت الکتریکی ۳۵ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر استفاده شد. سرعت سطحی آب برابر با  $0/055$  متر بر ثانیه و سرعت سطحی روغن در بازه  $0/028 - 0/008$  متر بر ثانیه متغیر بود. نتایج نشان داد که مقدار خطای نسبی بین دبی آب محاسبه شده و دبی آب مرجع از حدود یک درصد برای جریان تک‌فاز تا ۱۲ درصد برای جریان چندفاز متغیر است (Ma et al., 2017). توموگرافی امپدانس الکتریکی نیز یکی از روش‌های تعیین غلظت سیال دوفازی است و در پژوهشی از سامانه EIT برای تعیین غلظت سیال دوفازی استفاده شد. اصول کار این غلظت‌سنج مبتنی بر تغییرات امپدانس الکتریکی بوده و حسگرهای فرستنده و گیرنده در آن از نوع الکتروود تماسی هستند. در این نوع غلظت‌سنج جریان الکتریکی در فرکانس و توان مشخص توسط حسگر

شور دریا همراه با مخلوط ماسه و خاک انتخاب شد. فاز حامل این سیال، آب شور با هدایت الکتریکی ۳۰-۱۰ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر و فاز جامد آن مخلوط خاک و ماسه در غلظت‌های مختلف است. قطر مدیا نیز با توجه به قطر لوله‌های کشتی لایروب برابر با ۶۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

اصول کار سامانه AC-MIT ساخته شده بر مبنای قانون القای الکترومغناطیس است. در شکل (۱)، قسمت‌های اصلی این سامانه شامل حسگرهای فرستنده و گیرنده، سامانه تحصیل داده و رایانه برای بازسازی تصویر توموگرافی، نشان داده شده است. حسگرهای فرستنده در سامانه AC-MIT شامل دو الکتروود حلقوی ابتکاری بوده که در محیط لوله عبور سیال نصب می‌شوند. در ابتدا جریان متناوب الکتریکی با فرکانس مشخص به الکتروودهای حلقوی اعمال شده و با عبور از میان سیال حامل، موجب ایجاد شار مغناطیسی می‌شود. شار مغناطیسی ولتاژ را در حسگرهای گیرنده که تعدادی کوئل دورتا دور محیط تصویرسازی هستند، القا می‌کند. با تغییر ویژگی‌های الکتریکی سیال حامل (مانند هدایت الکتریکی)، دامنه و فاز ولتاژ القا شده در حسگرهای گیرنده تغییر می‌کند و با استفاده از الگوریتم بازسازی تصویر، ویژگی‌های الکترومغناطیسی سطح مقطع محیط موردنظر که متناسب با خصوصیات فیزیکی آن (مانند چگالی) است، به صورت تصویر دوبعدی نمایش داده می‌شود. در ادامه به طراحی و ساخت این سامانه پرداخته می‌شود.

#### طراحی و ساخت چگالی‌سنج (AC-MIT)

استفاده از کوئل‌های الکترومغناطیس به عنوان فرستنده در پیرامون مدیا، در شرایطی که قطر مدیا زیاد بوده و ثابت گذردهی الکترومغناطیس فاز حامل بسیار کم می‌باشد، عملکرد مناسبی ندارد. زیرا سیگنال ارسال شده به سختی به حسگرهای گیرنده رسیده و در نتیجه نسبت سیگنال به نویز ( $SNR^2$ ) بسیار پایین است.

فرستنده به درون سیال تزریق شده و ولتاژ بین حسگرهای گیرنده (الکتروودهای تماسی) توسط مدار گیرنده قرائت می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که سامانه EIT قادر به اندازه‌گیری غلظت مواد جامد در محیط‌های با قطر بزرگ بوده و نرخ سیگنال به نویز در این سامانه ۶/۶۱ دسی‌بل ذکر شد که نشان دهنده عملکرد مطلوب این سامانه است. از معایب عمده این سامانه می‌توان به در تماس بودن حسگرهای گیرنده با سیال و همچنین عدم عملکرد مطلوب سامانه در صورت وجود هوا در سیال اشاره کرد (Tarabi et al., 2021).

همانگونه که اشاره شد، در یک سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی، حسگرهای فرستنده و گیرنده از نوع سیم‌پیچ (کوئل) بوده که دورتادور مدیا قرار می‌گیرند. در محیط‌های تصویرسازی با قطر زیاد (بیش از ۵۰۰ میلی‌متر)، سیگنال شار مغناطیسی عبوری از میان سیال بسیار ضعیف بوده و در این‌گونه موارد، تصاویر بازسازی شده توسط سامانه MIT از کیفیت مطلوب برخوردار نیست. بنابراین هدف از انجام این پژوهش توسعه و معرفی یک سامانه ابتکاری غیرهسته‌ای و غیر نفوذی توموگرافی القای الکترومغناطیسی برای استفاده به عنوان چگالی‌سنج سیال چندفازی است. در سامانه مذکور به دلیل قطر بالای محیط تصویرسازی (۶۳۰ میلی‌متر) از حسگر فرستنده ابتکاری استفاده شد و این سامانه ابداعی، سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی با جریان اعمالی (AC-MIT) نامیده شد. از دیگر اهداف این پژوهش می‌توان به ارزیابی عملکرد سامانه در سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل اشاره کرد.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش با توجه به اعلام نیاز سازمان بنادر و دریانوردی برای اندازه‌گیری چگالی سیال چندفازی درون لوله‌های کشتی لایروب، سیال مورد مطالعه آب



نسبت به زمان می‌باشد (رابطه ۲):

(رابطه ۱)

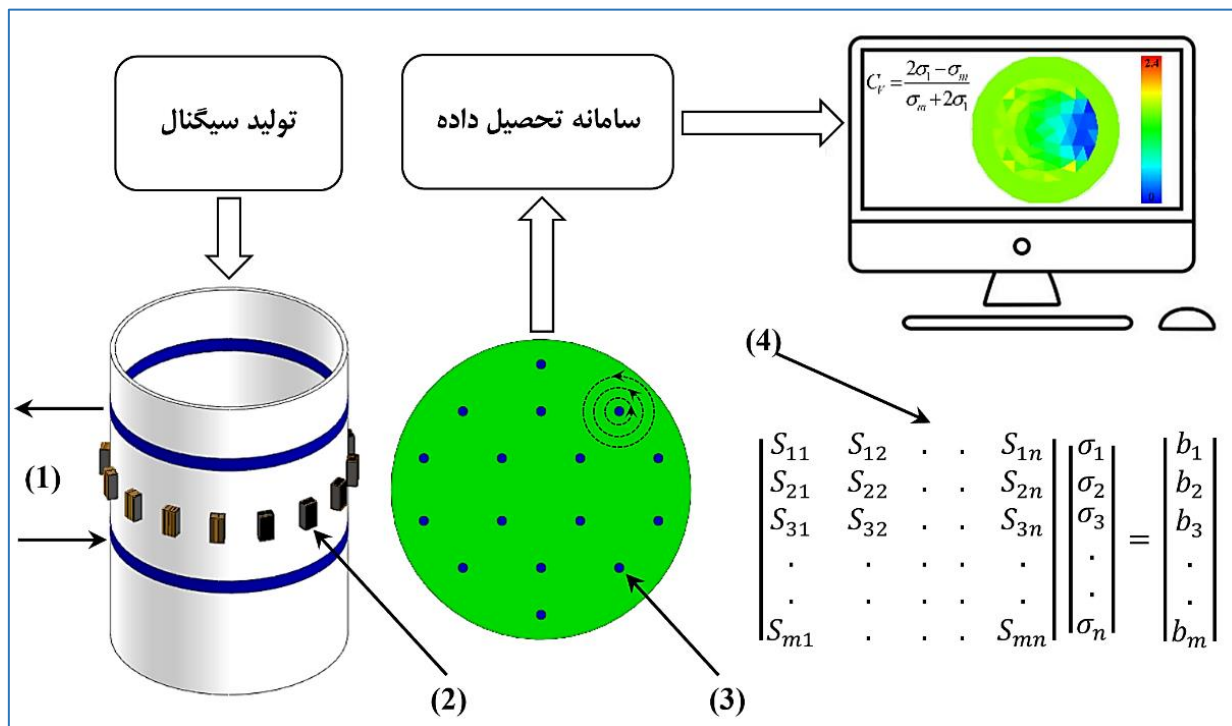
$$B(r') = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} J(r) \times \frac{r-r'}{|r-r'|^3} dv$$

(رابطه ۲)

$$V = -nA \frac{dB}{dt}$$

فاصله بین المان‌های منبع چگالی جریان  $J(r)$  و حسگرهای اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی  $B(r')$  بر حسب متر است.  $\mu_0$  ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در خلا است.  $(4\pi \times 10^{-7})$  هانری بر متر،  $n$  تعداد حلقه‌های سیم پیچیده شده دور هسته حسگرهای گیرنده،  $A$  سطح مقطع کویل‌ها (متر مربع) و  $B$  چگالی شار مغناطیسی (و بر بر مترمربع) می‌باشد.

همانگونه که بیان شد، در سامانه AC-MIT، که یک سامانه ابتکاری می‌باشد حسگرهای فرستنده شامل دو الکتروود حلقوی هستند که دور مقطع لوله نصب شده است. مطابق شکل (۱)، جریان الکتریکی ثابتی در فرکانس مشخص به الکتروودهای حلقوی اعمال شده و پس از عبور از میان سیال، از الکتروود بالایی خارج می‌شود. حسگرهای گیرنده شامل ۱۶ عدد کویل با ابعاد  $20 \times 30 \times 60$  میلی‌متر هستند که دورتادور محیط تصویرسازی و با فاصله یکسان نصب می‌شوند. مطابق با قانون بیوت-ساوارت (رابطه ۱)، اعمال جریان الکتریکی به حسگرهای فرستنده و عبور آن از میان سیال موجب ایجاد شار مغناطیسی در محل نصب حسگرهای گیرنده (دورتادور مدیا) شده و ولتاژ را در این حسگرها القا می‌کند (William and Hayt, 2020). این ولتاژ متناسب با تعداد حلقه‌های سیم پیچیده شده دور کویل‌ها، مساحت سطح مقطع کویل و تغییرات چگالی شار مغناطیسی



شکل ۱- شماتیک سامانه اندازه‌گیری چگالی سیال چندفازی مبتنی بر توموگرافی القای الکترومغناطیسی، (۱) الکتروودهای حلقوی (۲) حسگرهای گیرنده (۳) چگالی جریان (۴) الگوریتم بازسازی تصویر.

Figure 1- Schematic of multiphase fluid density measurement system based on magnetic induction tomography, 1) Annular electrode 2) Receiver sensors 3) Current density 4) Image reconstruction algorithm

چگالی جریان، هدایت الکتریکی و پتانسیل الکتریکی بر اساس رابطه (۶) بیان می‌شود:

(رابطه ۶)

$$J = -\sigma \nabla V$$

معادله حاکم بر سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی شامل دو مسئله است که عبارتند از: مسئله مستقیم<sup>۲</sup> و مسئله معکوس<sup>۳</sup>، و حل معادله حاکم بر سامانه در گرو حل این دو مسئله می‌باشد. در ادامه روش حل این دو مسئله به طور کامل بررسی می‌شود.

مسئله مستقیم عبارت است از محاسبه سیگنال‌های مربوط به مجموعه حسگرهای فرستنده/گیرنده، در صورتی که توزیع و خواص الکترومغناطیسی مربوط به جسم مشخص باشد. در این سامانه با حل مسئله مستقیم، اختلاف فاز بین سیگنال دریافت شده از حسگر گیرنده و سیگنال رفرنس بر مبنای چگالی شار مغناطیسی و همچنین چگالی جریان، محاسبه شد. در ادامه، حل مسئله مستقیم به صورت مرحله به مرحله بیان می‌شود.

در ابتدا با اعمال جریان الکتریکی ثابت و با فرکانس مشخص به الکترودهای حلقوی، میدان مغناطیسی تولید شده مطابق با قانون بیوت-ساواریت محاسبه شد (رابطه ۱). میدان مغناطیسی تولید شده (میدان مغناطیسی اولیه) پس از عبور از میان سیال، ولتاژ را در حسگرهای گیرنده القا می‌کند (رابطه ۲)، در ادامه تغییرات میدان مغناطیسی ( $\Delta B$ ) توسط حسگرهای گیرنده اندازه‌گیری می‌شود. بخش حقیقی<sup>۴</sup> تغییرات میدان مغناطیسی  $\text{Re}(\Delta B)$  توسط جابجایی جریان ایجاد می‌شود و مربوط به ثابت دی‌الکتریک است و بخش موهومی<sup>۵</sup> این تغییرات  $\text{Im}(\Delta B)$  توسط جریان گردابی تولید می‌شود و به تغییرات رسانایی بستگی دارد (Griffiths, 2001). با توجه به مطالب ذکر شده تغییرات رسانایی موجب ایجاد تغییر

حل مسئله حاکم بر سامانه AC-MIT

همانطور که قبلاً اشاره شد در سامانه AC-MIT جریان الکتریکی متناوب در فرکانس مشخص به الکترودهای حلقوی مرزی ( $\Omega$ ) که با سیال در ارتباط هستند، اعمال می‌شود. با استفاده از معادله ماکسول و همچنین قانون اهم، معادله لاپلاس حاکم بر این سامانه طبق رابطه (۳) به دست آمد (Liu et al., 2018):

(رابطه ۳)

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \text{ in } \Omega$$

با اعمال شرایط مرزی نیومن<sup>۱</sup>، چگالی جریان الکترودها مطابق با رابطه (۴) محاسبه شد:

(رابطه ۴)

$$-\sigma \frac{\partial V}{\partial n} = J_I \text{ on } \Omega$$

که در آن  $\sigma$  و  $V$  به ترتیب هدایت الکتریکی (زیمنس بر متر) و ولتاژ (ولت) توزیع شده در محیط  $\Omega$ ،  $n$  بردار نرمال یکه و  $J_I$  چگالی جریان مرزی (آمپر بر مترمربع) می‌باشد. با فرض اینکه هر نقطه از الکترودها مانند یک منبع جریان رفتار می‌کنند، شرایط مرزی نیومن را می‌توان به صورت رابطه (۵) نوشت (دو شرط اول):

(رابطه ۵)

$$\frac{\partial V}{\partial n} = \begin{cases} I/A_+ \sigma & \text{on current entrance electrode} \\ -I/A_- \sigma & \text{on current exit electrode} \\ I/A_{Media} & \text{on cross section of media between electrodes} \end{cases}$$

که در آن  $A_+$  و  $A_-$  به ترتیب مساحت سطح الکترودها هستند که جریان الکتریکی به آن وارد و از آن خارج می‌شود و  $A_{Media}$  مساحت سطح مقطع مدیا در فاصله بین الکترودهای حلقوی است. دو شرط اول در رابطه (۵) مربوط به سامانه MIT مرسوم بوده و شرط سوم مختص سامانه AC-MIT است. در نهایت رابطه بین

4 Real Part  
5 Imaginary Part

1 Neumann boundary condition  
2 Forward problem  
3 Inverse problem

مش بندی شد و رابطه بیوت-ساوارت که مدلی از انتگرال فردهلم<sup>۱</sup> نوع اول است (Ireland et al., 2004)، تبدیل به یک رابطه خطی شد و ماتریس حساسیت (رابطه ۱۰) بر اساس رابطه (۱)، رابطه (۲) و همچنین روابط (۶) تا (۹) استخراج شد:

(رابطه ۱۰)

$$S\sigma = b$$

که در آن S ماتریس حساسیت بوده و رابطه بین هدایت الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی را نشان می دهد.

مسئله معکوس حاکم بر سامانه AC-MIT یک مسئله از نوع بد-رفتار<sup>۲</sup> است، به عبارت دیگر با ایجاد تغییر جزئی در طرف دوم معادله (چگالی شار مغناطیسی)، تغییرات شدیدی در طرف اول معادله ایجاد می شود. این معادله قابلیت حل به صورت مستقیم را ندارد و برای حل آن از الگوریتم حل تکراری گوس-نیوتن<sup>۳</sup> به همراه الگوی منظم سازی تیخونوف<sup>۴</sup> استفاده شد. در ادامه مراحل حل مسئله معکوس در سامانه AC-MIT با استفاده از الگوریتم حل تکراری گوس-نیوتن توضیح داده می شود.

الگوریتم حل مسئله معکوس

برای حل مسئله معکوس در سامانه AC-MIT از الگوریتم حل تکراری گوس-نیوتن استفاده شد. حل این الگوریتم دارای چند مرحله است که عبارتند از:

۱- در ابتدا با توجه به اینکه معادله حل معکوس در نهایت به صورت رابطه  $S\sigma = b$  در آمد، یک مقدار تقریبی اولیه برای هدایت الکتریکی  $\sigma_0$  حدس زده شد (حدس اولیه).

۲- در مرحله دوم، حل مسئله مستقیم برای تعیین مقادیر شبیه سازی انجام شد (بر اساس رابطه (۱)، رابطه (۲) و همچنین روابط (۶) تا (۹)).

فاز شده و توسط رابطه (۷) محاسبه می شود (Griffiths et al., 1999):

(رابطه ۷)

$$\Delta B/B = Q\omega\mu_0[\omega\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1) - i\sigma] + R(\mu_r - 1)$$

که در آن  $\omega$  فرکانس سیگنال،  $\sigma$  هدایت الکتریکی،  $\varepsilon_r$  ضریب گذردهی نسبی و  $\mu_r$  ضریب نفوذپذیری نسبی است.  $\varepsilon_0$  و  $\mu_0$  به ترتیب ضریب گذردهی و ضریب نفوذپذیری خلا می باشد. همچنین Q و R نیز پارامترهای ثابت و مربوط به حسگرهای گیرنده است.

تغییرات میدان مغناطیسی را می توان مطابق با رابطه (۸) متناسب با تغییرات ولتاژ در نظر گرفت. همچنین با افزایش فرکانس سیگنال الکتریکی، دامنه  $\varepsilon_r$  کاهش پیدا کرده و بخش مربوط به  $\varepsilon_r$  در رابطه (۷) بسیار کمتر از  $\sigma$  می شود و می توان آن را نادیده گرفت. بنابراین رابطه بین زاویه فاز  $\theta$ ، هدایت الکتریکی و فرکانس سیگنال الکتریکی به صورت رابطه (۹) در می آید و عملاً تغییر فاز با تغییر فرکانس و تغییر هدایت الکتریکی متناسب می شود (Griffiths, 2001).

(رابطه ۸)

$$\Delta V/V = \Delta B/B$$

(رابطه ۹)

$$\theta \propto \omega\sigma$$

مسئله معکوس برعکس مسئله مستقیم بوده و شامل تخمین خواص الکترومغناطیسی شی یا محیط و توزیع آن به واسطه اندازه گیری اندوکتانس های متقابل بین حسگرهای فرستنده و گیرنده است. در این پژوهش اولین گام در حل مسئله معکوس، استفاده از قانون بیوت-ساوارت برای بازسازی توموگرافی چگالی جریان الکتریکی درون سیال از اندازه گیری های چگالی شار مغناطیسی است. بدین منظور محیط تصویرسازی



مختلف رسوب با اضافه کردن فاز جامد به سیال ایجاد شد. در هر تیمار آزمایشی تعداد ۲۰ نمونه از سیال برداشته شده و داخل استوانه مدرج ریخته شد و با قرائت حجم نمونه توسط استوانه مدرج و جرم نمونه توسط ترازو، چگالی نمونه اندازه‌گیری شد (شکل ۲). غلظت حجمی نمونه‌ها نیز با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه شد:

(رابطه ۱۳)

$$C_{v-manual} = \frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_s - \rho_w}$$

که در آن  $C_{v-manual}$  غلظت حجمی است که به نسبت حجم مواد جامد در حجم مشخصی از مخلوط فاز جامد-مایع اتلاق می‌شود (متر مکعب بر متر مکعب)،  $\rho_f$  چگالی سیال (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $\rho_w$  چگالی فاز مایع (کیلوگرم بر متر مکعب) و  $\rho_s$  چگالی فاز جامد (برابر با ۲۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) است.

همزمان با نمونه‌گیری آزمایشگاهی (دستی)، داده‌های سامانه AC-MIT نیز در کامپیوتر ذخیره شد و غلظت حجمی سیال توسط توزیع رسانی (تصاویر بازسازی شده) بدست آمده از سامانه AC-MIT و با استفاده از معادله ماکسول (رابطه ۱۴) محاسبه شد (Wang, 2015):

(رابطه ۱۴)

$$C_{v-AC-MIT} = \frac{2\sigma_1 - 2\sigma_m}{\sigma_m + 2\sigma_1}$$

که در آن  $\sigma_1$  هدایت الکتریکی فاز مایع،  $\sigma_m$  هدایت الکتریکی به دست آمده توسط سامانه AC-MIT و  $C_{v-AC-MIT}$  غلظت حجمی اندازه‌گیری شده به وسیله سامانه AC-MIT است.

در نهایت غلظت جرمی نمونه‌ها در دو حالت اندازه‌گیری دستی و اندازه‌گیری توسط سامانه AC-MIT با استفاده از رابطه (۱۵) محاسبه شد. غلظت جرمی به نسبت جرم مواد جامد در حجم مشخصی از سیال

۳- پس از حل مسئله مستقیم، تغییرات هدایت الکتریکی بر اساس رابطه (۱۱) محاسبه شد:

(رابطه ۱۱)

$$\Delta\sigma = (S^T S + \lambda R^T R)^{-1} S^T b$$

که در آن  $S$  ماتریس حساسیت ( $S^T$  ترانهاده  $S$  می‌باشد)،  $\lambda$  ضریب منظم‌سازی و  $R$  ماتریس منظم‌سازی است (در روش منظم‌سازی تیخونوف  $R=I$  است).

۴- پس از محاسبه تغییرات هدایت الکتریکی، مقدار هدایت الکتریکی مرحله قبل با این تغییرات جمع شده و هدایت الکتریکی مرحله بعد محاسبه شد (رابطه ۱۲):

(رابطه ۱۲)

$$\sigma_{K+1} = \sigma_K + \Delta\sigma$$

۵- در این مرحله برای توقف الگوریتم، شرط گذاشته می‌شود، این شرط می‌تواند شامل توقف بعد از تکرار مشخص باشد و یا اینکه توقف بعد از زمانی باشد که اختلاف بین مقادیر ولتاژ شبیه‌سازی شده با ولتاژ اندازه‌گیری شده از یک حد آستانه کمتر شود ( $\varepsilon \leq V_{measured} - V_{simulated}$ ).

۶- در صورت عدم توقف برنامه، الگوریتم وارد مرحله ۲ شده و این تکرارها تا زمان رسیدن به نتیجه مطلوب انجام می‌شود.

ارزیابی سامانه AC-MIT

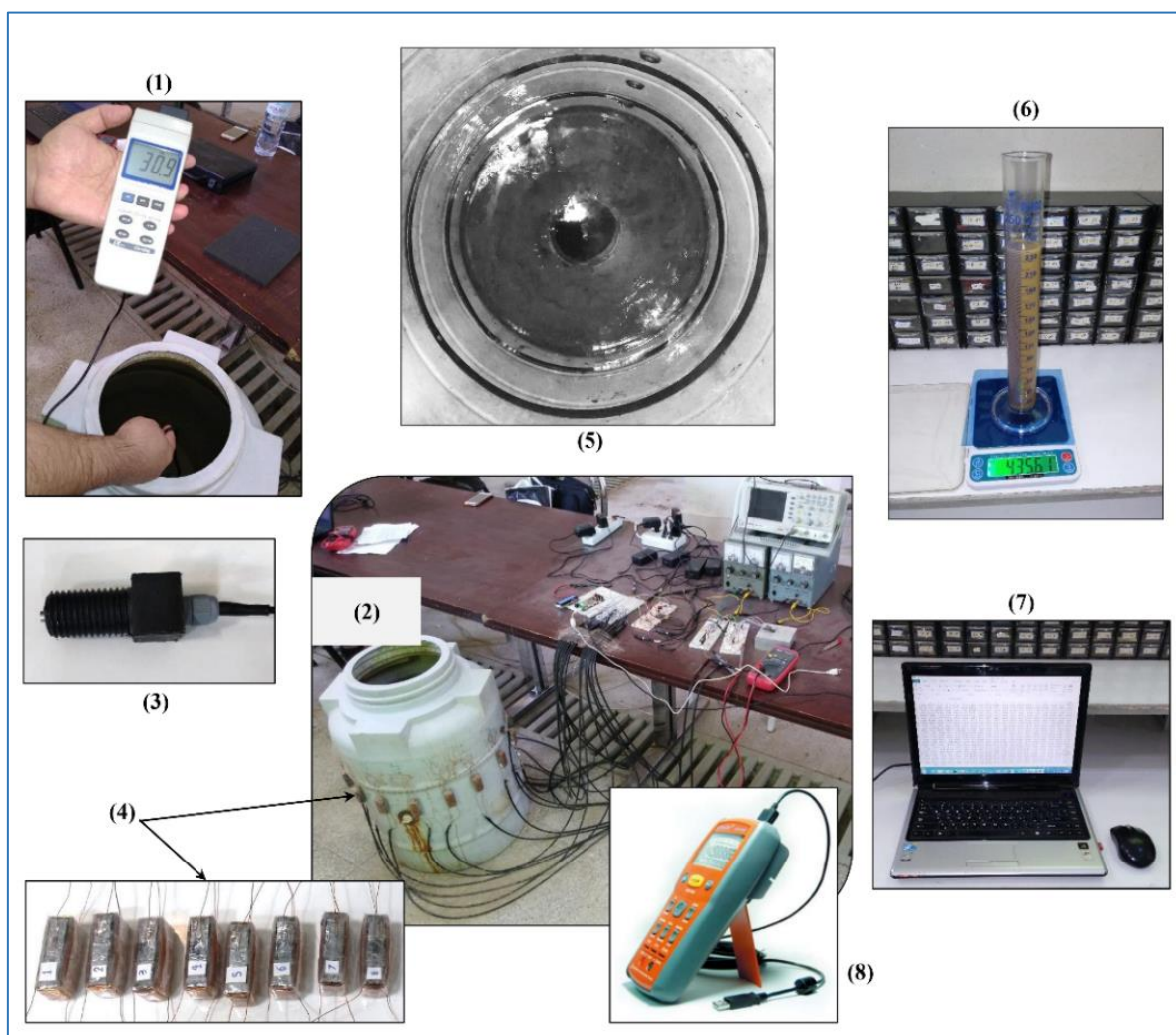
ارزیابی عملکرد سامانه AC-MIT ساخته شده، در آزمایشگاه مکترونیک گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تهران انجام شد. به منظور ارزیابی سامانه، محیط تصویرسازی (مخزن با قطر ۶۳۰ میلی‌متر) از آب-نمک (فاز حامل) پر شد (شکل ۲). فاز جامد شامل مخلوط خاک و ماسه بود که در مقادیر مختلف به سیال اضافه می‌شد. ارزیابی سامانه در غلظت‌های مختلف رسوب از یک گرم بر لیتر تا ۲۰۰ گرم بر لیتر انجام شد. روش انجام آزمایش بدین صورت بود که غلظت‌های

سلسیوس، به ترتیب منجر به هدایت الکتریکی ۱۳/۰۵، ۱۷/۰۲، ۲۰/۸۹، ۲۴/۶۹ و ۲۸/۴۲ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر شد. برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی فاز مایع از شوری‌سنج لوترن (LUTRON CD4306) استفاده شد (شکل ۲). این شوری‌سنج هدایت الکتریکی را در بازه صفر تا ۲۰۰ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر و با تفکیک‌پذیری ۰/۱ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌کند. سطوح مختلف دما نیز شامل ۵ سطح دمایی ۱۹، ۲۴، ۲۹، ۳۴ و ۳۹ درجه سلسیوس بود.

دوفازی جامد-مایع اتلاق می‌شود و با  $C_s$  نشان داده شده و واحد آن گرم بر لیتر است.  
(رابطه ۱۵)

$$C_s = \rho_s \cdot C_v$$

به منظور بررسی تاثیر سطوح مختلف دما و شوری سیال بر عملکرد سامانه AC-MIT از روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> و نرم‌افزار دیزاین-اکسپرت<sup>۲</sup> استفاده شد. سطوح مختلف شوری شامل ۵ سطح ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵ و ۱۷/۵ گرم بر لیتر غلظت نمک بود که در دمای ۲۵ درجه



شکل ۲- سامانه AC-MIT به همراه اجزای تشکیل‌دهنده آن (۱) متر EC (۲) سامانه AC-MIT (۳) حسگر دما (۴) حسگرهای گیرنده (۵) الکترودهای حلقوی (۶) تعیین چگالی به روش آزمایشگاهی (۷) واحد پردازش و نمایش داده LCR (۸) متر.

Figure 2- The AC-MIT System with components 1) EC Meter 2) AC-MIT System 3) Temperature sensor 4) Receiver sensors 5) annular electrodes 6) Density measurement in laboratory 7) Data processing and display unit 8) LCR Meter.

اندازه‌گیری شده توسط سامانه با غلظت نمونه شاهد مقایسه و عملکرد آن صحت سنجی می‌شود، همچنین نتایج بدست آمده با سایر تحقیقات مشابه مقایسه و نقاط قوت و ضعف آن بیان خواهد شد. عملکرد سامانه AC-MIT در غلظت‌های مختلف فاز جامد، در ۵ سطح مختلف شوری فاز حامل (۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵ و ۱۷/۵ گرم بر لیتر غلظت نمک) و ۵ سطح مختلف دما (۱۹، ۲۴، ۲۹، ۳۴ و ۳۹ درجه سلسیوس) مورد بررسی قرار گرفت. برای هر تیمار ۳ تا ۶ تکرار در نظر گرفته شد و در هر تکرار ۲۰ نمونه از سیال در غلظت‌های مختلف مواد جامد گرفته شد. جدول (۱) مقادیر پارامتر RMSE و میانگین خطای اندازه‌گیری سامانه AC-MIT برای ۲۰ نمونه گرفته شده در غلظت‌های مختلف را در سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بدست آمده مقادیر RMSE در بازه ۳/۱۸ تا ۵/۹۶ گرم بر لیتر قرار دارند. همچنین بیشترین مقدار میانگین خطا برابر با ۶/۰۸ درصد بود که در شوری ۱۰ گرم بر لیتر و دمای ۳۴ درجه سلسیوس اتفاق افتاد. کمترین مقدار میانگین خطا برای ۲۰ نمونه گرفته شده نیز مربوط به شوری ۱۵ گرم بر لیتر و دمای ۲۴ درجه سلسیوس بود و مقدار آن برابر با ۳/۷۴ درصد بدست آمد.

برای مقایسه غلظت نمونه‌گیری آزمایشگاهی (دستی) و همچنین غلظت اندازه‌گیری شده توسط سامانه AC-MIT، از پارامتر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد (رابطه ۱۶) و غلظت‌ها در هر دو روش اندازه‌گیری با یکدیگر مقایسه شد. مقدار خطا بر حسب درصد نیز با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه شد. (رابطه ۱۶)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \hat{C}_i)^2}{n}} \quad \text{(رابطه ۱۷)}$$

$$Error = \left| \frac{C_i - \hat{C}_i}{C_i} \right| \times 100$$

که در آن  $\hat{C}_i$  غلظت جرمی نمونه‌ها بوده و توسط سامانه AC-MIT اندازه‌گیری شده و  $C_i$  غلظت‌های جرمی اندازه‌گیری شده به صورت دستی است.

### نتایج و بحث

در این بخش نتایج بررسی تاثیر تغییرات غلظت مواد جامد، دما و شوری فاز حامل بر روی عملکرد سامانه AC-MIT ساخته شده مورد بحث قرار می‌گیرد. غلظت

جدول ۱- مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطا (Error) سامانه AC-MIT در سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل.

Table 1- RMSE and Error of AC-MIT system at different level of temperature and salinity of carrier phase.

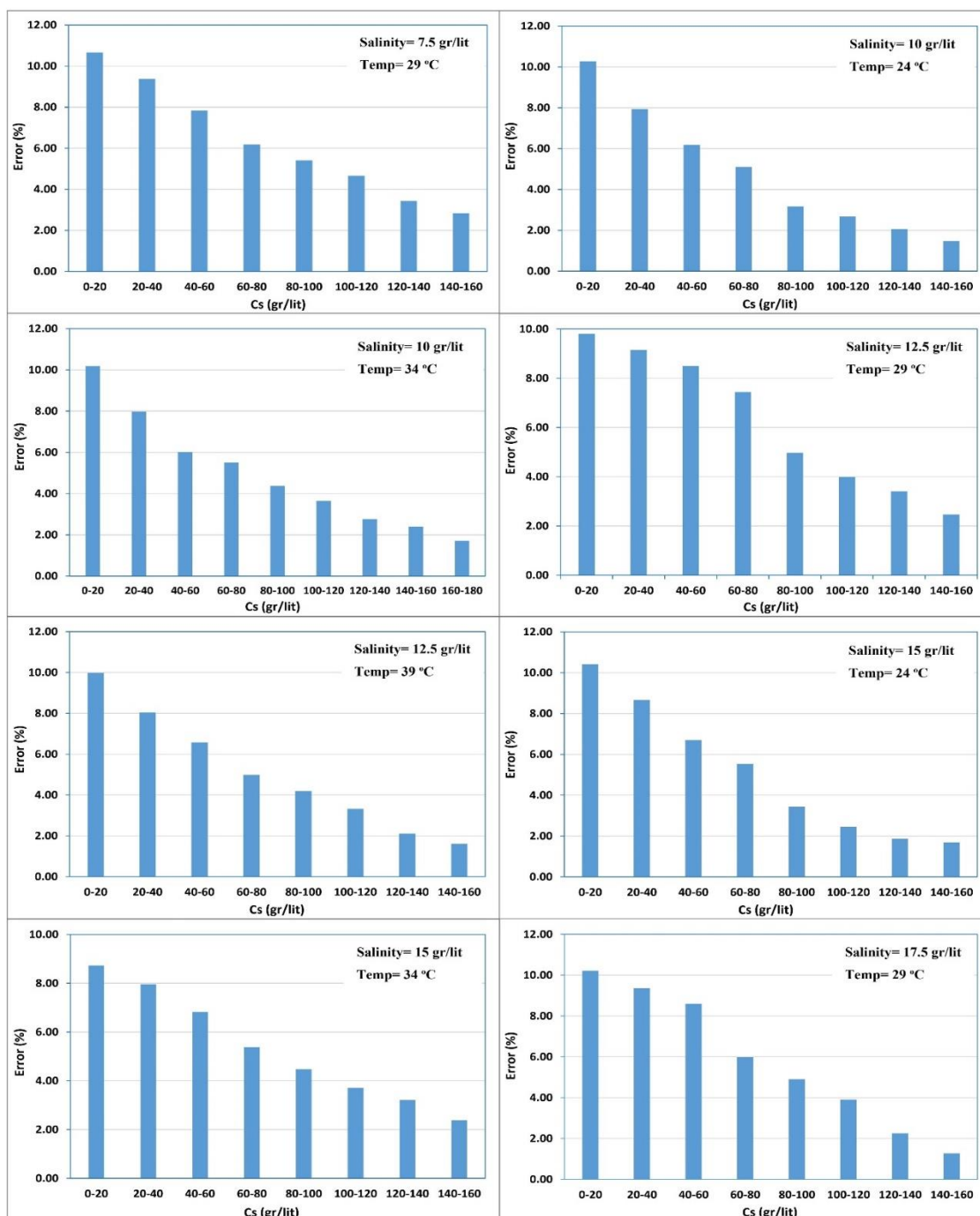
شوری (gr/lit)	۷/۵	۱۰	۱۲/۵	۱۵	۱۷/۵
دما (°C)	۲۹	۲۴	۳۴	۲۴	۲۹
RMSE (gr/lit)	۵/۶۲	۵/۲۱	۵/۹۶	۴/۳۵	۳/۷۰
Error (%)	۵/۸۷	۵/۶۷	۶/۰۸	۴/۷۱	۴/۳۰

است. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که خطای اندازه‌گیری سامانه به تفکیک بازه‌های مختلف غلظت سیال در محدوده یک درصد تا ۱۱ درصد قرار دارد. بر اساس این نتایج در غلظت‌های پایین سیال، خطای اندازه‌گیری بیشتر بوده (حدود ۱۰ درصد) و با افزایش غلظت سیال،

در شکل ۳، پارامتر خطای اندازه‌گیری غلظت فاز جامد برای مقادیر مشخص دما و شوری نشان داده شده است. غلظت فاز جامد از صفر تا ۲۰۰ گرم بر لیتر متغیر بود. آنچه در این نمودار به وضوح مشخص است تاثیر تغییرات غلظت فاز جامد بر خطای اندازه‌گیری سامانه

گرفته شده در سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل در شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، با افزایش غلظت، اختلاف بین دو روش اندازه‌گیری (روش آزمایشگاهی و روش AC-MIT) افزایش نیافته و به همین دلیل، خطای اندازه‌گیری سامانه AC-MIT کاهش یافته و به حدود یک درصد نیز می‌رسد.

خطای اندازه‌گیری کاهش می‌یابد (حدود یک درصد) و این رفتار در سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل وجود دارد. به منظور نمایش بهتر اختلاف بین غلظت‌های اندازه‌گیری شده در دو حالت آزمایشگاهی و اندازه‌گیری توسط سامانه AC-MIT، نمودار نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت جرمی مواد جامد برای ۲۰ نمونه



شکل ۳- خطای اندازه‌گیری سامانه AC-MIT در بازه‌های مختلف غلظت جرمی مواد جامد و سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل.  
 Figure 3- Measurement error of AC-MIT system in different ranges of solid mass concentration and different levels of temperature and salinity of the carrier phase.

قادر به اندازه‌گیری چگالی سیال‌های با غلظت بالا می‌باشد و با افزایش غلظت سیال، خطای اندازه‌گیری سامانه نیز کاهش می‌یابد. همچنین در مقایسه با چگالی‌سنج‌های هسته‌ای مبتنی بر پرتو گاما، خطای این چگالی‌سنج‌ها در اندازه‌گیری غلظت مواد شبه‌رسوب ۱۰ درصد گزارش شده است که با افزایش غلظت رسوب خطای اندازه‌گیری افزایش می‌یابد (Maučec and Denijs, 2009). در صورتی که در سامانه AC-MIT علاوه بر خطای کمتر در غلظت بالا، معایب و محدودیت‌های استفاده از امواج مضر رادیواکتیو وجود ندارد. به منظور بررسی آماری تأثیر معنی‌داری تغییرات دما و هدایت الکتریکی فاز حامل بر عملکرد سامانه AC-MIT از روش تجزیه واریانس استفاده شد که برخی از نتایج آن در جدول (۲) نشان داده شده است. سطوح دمای سیال شامل ۵ سطح دمایی ۱۹، ۲۴، ۲۹، ۳۴ و ۳۹ درجه سلسیوس و سطوح شوری فاز حامل شامل ۵ سطح ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵ و ۱۷/۵ گرم بر لیتر غلظت نمک بود. نتایج بدست آمده نشان داد که تغییرات سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل، اثر معنی‌داری بر عملکرد سامانه AC-MIT ندارد. علت این مسئله خنثی کردن تأثیر دما و شوری توسط بکارگیری یک EC<sup>۱</sup> متر مرجع در سامانه است. از آنجایی که تغییرات دما و شوری فاز حامل بر هدایت الکتریکی آن تأثیر می‌گذارد و در سامانه ساخته شده هدایت الکتریکی فاز حامل به وسیله EC متر اندازه‌گیری شده و در الگوریتم حل مسئله اعمال می‌شود، بنابراین تغییرات دما و شوری تأثیر معنی‌داری بر عملکرد سامانه AC-MIT ندارد.

برای بررسی خطای بدست آمده، به مقایسه این نتایج با برخی تحقیقات انجام شده پرداخته می‌شود. در پژوهشی که در آن از چنگال‌های ارتعاشی برای تعیین چگالی سیال دوفازی استفاده شده بود، خطای اندازه‌گیری حدود ۴ درصد گزارش شد (Viana, 2016). این درحالی است که سامانه AC-MIT ساخته شده در این پژوهش در مقایسه با چگالی‌سنج چنگال ارتعاشی، علاوه بر مزیت غیرنفوذی بودن و عدم ایجاد مانع در سر راه عبور مواد، دارای خطای قابل قبولی است. نتایج پژوهش‌های دیگر برای اندازه‌گیری دبی جرمی سیال با استفاده از غلظت‌سنج‌های تراسونیک نیز نشان داد که خطای اندازه‌گیری این غلظت‌سنج‌ها حدود ۵ درصد بوده (Silva, 2022) و با افزایش غلظت مواد جامد، مقدار خطا تا ۱۲/۵ درصد افزایش می‌یابد (Rychagov et al., 2002). از مهمترین معایب غلظت‌سنج‌های تراسونیک در مقایسه با سامانه AC-MIT می‌توان به این نکته اشاره کرد که غلظت‌سنج‌های تراسونیک قادر به اندازه‌گیری چگالی سیال‌های با غلظت بالا (بیش از ۵۰ گرم بر لیتر غلظت رسوب) نیستند، زیرا با افزایش غلظت سیال، امواج تراسونیک قادر به عبور از میان سیال نبوده و عملاً از این غلظت‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری چگالی سیال‌های با غلظت پایین استفاده می‌شود. این امر در مورد غلظت‌سنج‌های مبتنی بر فناوری امواج نوری و لیزر نیز صدق می‌کند و در این غلظت‌سنج‌ها نیز افزایش غلظت مواد جامد یکی از محدودیت‌های اصلی به شمار می‌رود (Minella et al., 2008) (Bayram et al., 2012). درحالی که سامانه AC-MIT ساخته شده در این پژوهش

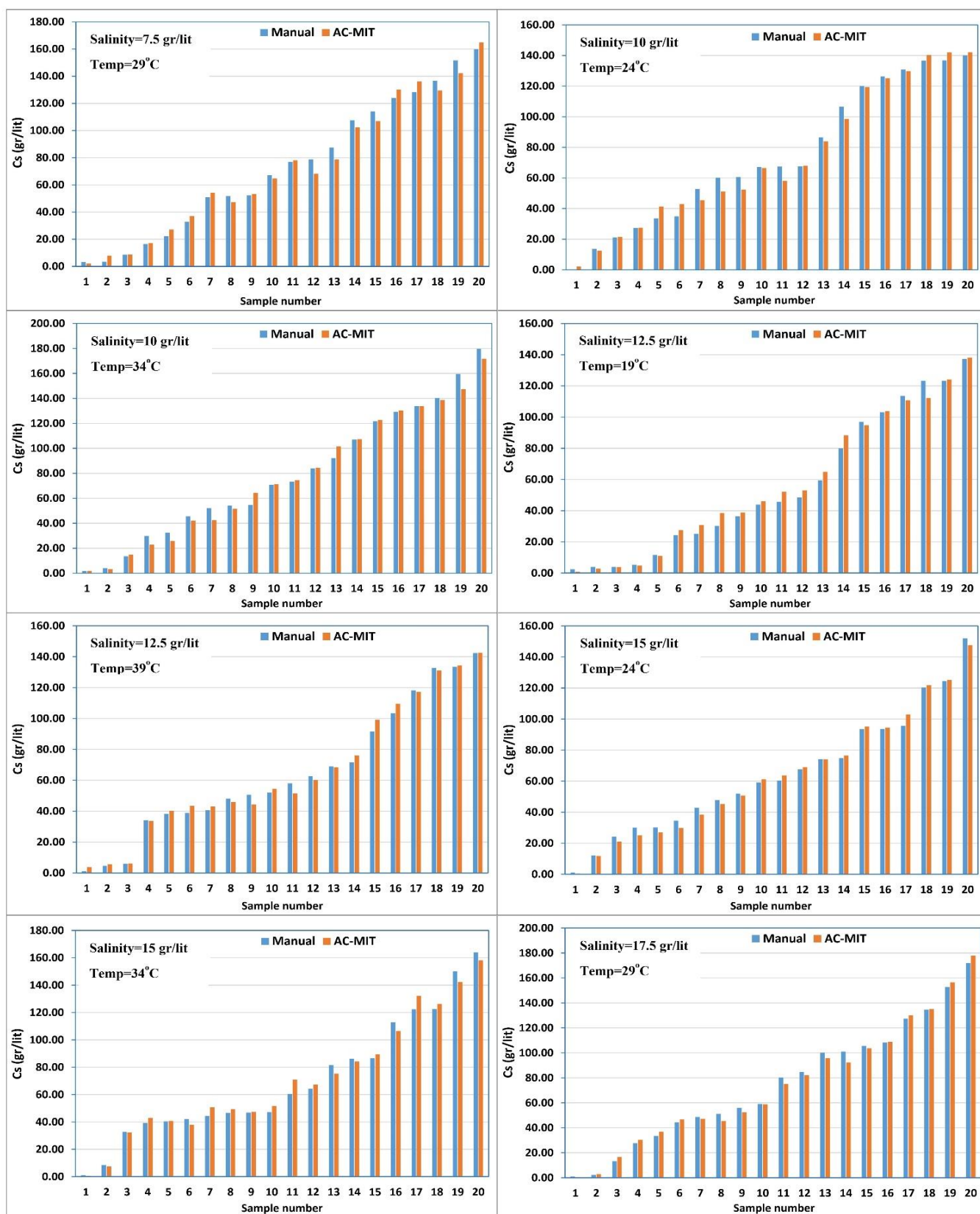
جدول ۲- نتایج حاصل از تحلیل واریانس در بررسی تأثیر دما و شوری فاز حامل بر عملکرد سامانه AC-MIT.

Table 2- ANOVA Results for assessment the effect of temperature and salinity of carrier phase on performance of AC-MIT system.

F_value	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	پارامترها
۸/۷۰ <sup>ns</sup>	۸۹/۴۱	۳۵۷/۶۳	۴	شوری (gr/lit)
۲/۳۸ <sup>ns</sup>	۲۴/۵۵	۹۸/۱۹	۴	دما (°C)
۵/۹۸ <sup>ns</sup>	۶۱/۴۵	۹۸۳/۲۲	۱۶	شوری × دما
	۱۰/۲۷	۴۸۸۱/۱۸	۴۷۵	خطا
			۵۰۰	مجموع

ns معنی‌دار نیست، \* معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵، \*\* معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۱.



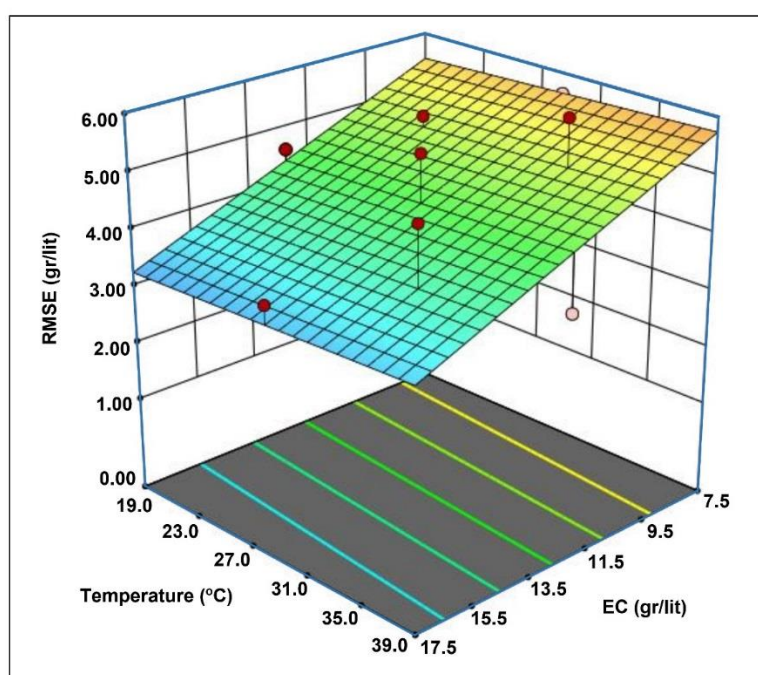


شکل ۴- غلظت جرمی مواد جامد (گرم بر لیتر) در دو حالت اندازه‌گیری دستی (آزمایشگاهی) و اندازه‌گیری شده توسط سامانه AC-MIT در سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل.

Figure 3- Solid mass concentration (in gr/lit) measured by AC-MIT system and manual measurement in different levels of temperature and salinity of carrier phase.

غلظت‌های جرمی اندازه‌گیری شده در دو حالت اندازه‌گیری دستی و اندازه‌گیری توسط سامانه AC-MIT را نمی‌توان به عنوان تابعی از دما و شوری فاز حامل سیال در نظر گرفت که این امر یکی از ویژگی‌های این سامانه محسوب می‌شود. به عبارت دیگر، این سامانه قابلیت اندازه‌گیری غلظت سیال در سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل را دارد و تغییرات سطوح دما و شوری فاز حامل، عملکرد سامانه را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد.

همچنین نتایج حاصل از بررسی اثر متقابل تیمارها نشان داد که اثر متقابل دما و شوری فاز حامل نیز اثر معنی‌داری بر عملکرد سامانه AC-MIT ندارد. شکل (۵) نمودار مدل پیش‌بینی مقادیر RMSE بر مبنای شوری و دمای فاز حامل سیال را نشان می‌دهد. با توجه به معنی‌دار نبودن اثر دما و شوری فاز حامل بر عملکرد سامانه AC-MIT، مدل مذکور از همبستگی مناسبی برخوردار نیست. در واقع مقادیر RMSE مربوط به



شکل ۵- نمودار مدل پیش‌بینی مقادیر RMSE بر مبنای هدایت الکتریکی و دمای فاز حامل سیال.

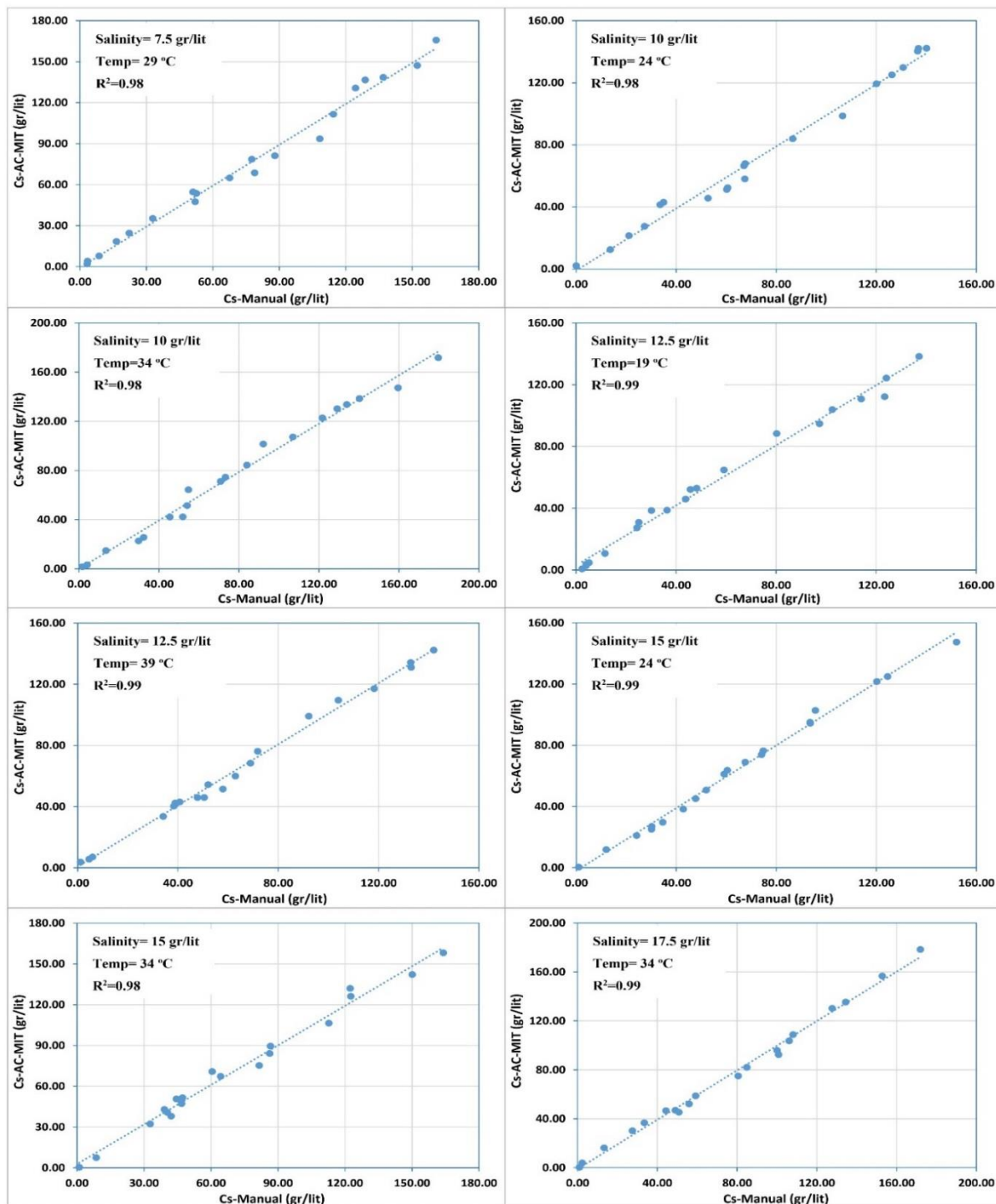
Figure 4- RMSE prediction model based on electrical conductivity and temperature of the fluid carrier phase.

مقادیر غلظت جرمی مواد جامد سیال بیان دیگری از چگالی سیال است که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۶) همبستگی بین غلظت جرمی مواد جامد سیال در دو حالت اندازه‌گیری آزمایشگاهی (شاهد) و اندازه‌گیری توسط سامانه AC-MIT را در برخی از تیمارهای مختلف آزمایشی نشان می‌دهد. تغییر غلظت‌های جرمی مواد جامد در بازه یک گرم بر لیتر تا ۲۰۰ گرم بر لیتر بود. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که بین غلظت‌های جرمی اندازه‌گیری شده در دو حالت اندازه‌گیری آزمایشگاهی و اندازه‌گیری توسط سامانه AC-MIT یک رابطه خطی با ضریب تعیین ( $R^2$ ) قابل

قبول وجود دارد. ضریب تعیین در تیمارهای مختلف آزمایشی در بازه ۰/۹۸ تا ۰/۹۹ قرار داشت و تغییرات دما و شوری فاز حامل تاثیر معنی‌داری بر روی مقدار ضریب تعیین نداشت. این رابطه خطی که از نقاط قوت سامانه محسوب می‌شود در سایر پژوهش‌های مرتبط نیز مورد توجه بوده و به وجود مقادیر ضریب تعیین بالا در این پژوهش‌ها اشاره شده است. به طور مثال، در پژوهشی مشابه برای اندازه‌گیری غلظت حجمی مواد جامد از روش توموگرافی امپدانس الکتریکی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بین غلظت‌های حجمی اندازه‌گیری شده در دو حالت اندازه‌گیری

تضعیف نور لیزر استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که بین نرخ جریان جرمی اندازه‌گیری شده به صورت آزمایشگاهی و پاسخ حسگرهای لیزر یک رابطه خطی با ضریب تعیین بالا وجود دارد (Zheng et al., 2007).

آزمایشگاهی و اندازه‌گیری توسط سامانه EIT یک رابطه خطی با ضریب تعیین مناسب (در بازه ۰/۹۷ تا ۰/۹۹) وجود دارد (Tarabi et al., 2021). ژنگ و همکاران نیز در پژوهشی دیگر برای اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی از



شکل ۶- همبستگی بین غلظت جرمی مواد جامد (gr/lit) در دو حالت اندازه‌گیری دستی و اندازه‌گیری شده توسط سامانه (AC-MIT) در سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل.

Figure 5- Correlation between solid mass concentration (in gr/lit) measured by AC-MIT system and manual measurement in different levels of temperature and salinity of carrier phase.

## نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه نوین اندازه‌گیری چگالی سیال چندفازی مبتنی بر توموگرافی القای الکترومغناطیسی با جریان اعمالی مورد بررسی قرار گرفت. قسمت‌های اصلی این سامانه شامل حسگرهای فرستنده و گیرنده، سامانه تحصیل داده و رایانه برای بازسازی تصویر توموگرافی می‌باشد. حسگرهای فرستنده شامل دو الکتروود حلقوی ابتکاری بوده که دور مقطع لوله نصب شده و با سیال در ارتباط هستند. حسگرهای گیرنده شامل ۱۶ عدد کوئل هستند که دورتادور محیط تصویرسازی و با فاصله مشخص نصب می‌شوند. با توجه به بد-رفتار بودن مسئله حاکم بر سامانه AC-MIT، برای بازسازی تصویر در این سامانه از الگوریتم حل تکراری گوس-نیوتن به همراه الگوی منظم‌سازی تیخونوف استفاده شد. ارزیابی عملکرد سامانه AC-MIT در سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل با استفاده از روش سطح پاسخ و تجزیه واریانس انجام شد. سطوح مختلف شوری شامل ۵ سطح ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵ و ۱۷/۵ گرم بر لیتر غلظت نمک بوده و سطوح مختلف دما نیز شامل ۵ سطح دمایی ۱۹، ۲۴، ۲۹، ۳۴ و ۳۹ درجه سلسیوس بود. نتایج حاصل از بررسی آماری تاثیر دما و هدایت الکتریکی فاز حامل بر عملکرد سامانه AC-MIT نشان داد که سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل، اثر معنی‌داری بر عملکرد سامانه ندارد. نتایج ارزیابی غلظت‌های جرمی نشان داد که بین غلظت‌های جرمی مواد جامد اندازه‌گیری شده در دو حالت اندازه‌گیری آزمایشگاهی و اندازه‌گیری توسط سامانه AC-MIT یک رابطه خطی با ضریب تعیین قابل قبول (در بازه ۰/۹۸ تا ۰/۹۹) وجود دارد. نتایج حاصل از ارزیابی خطای اندازه‌گیری نشان داد که خطای اندازه‌گیری سامانه به تفکیک بازه‌های غلظت سیال در محدوده یک درصد تا ۱۱ درصد قرار دارد. بر اساس این نتایج در غلظت‌های پایین سیال، خطای اندازه‌گیری بیشتر بوده (حدود ۱۰ درصد) و با افزایش غلظت سیال

خطای اندازه‌گیری کاهش می‌یابد (حدود یک درصد) و این رفتار در سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل وجود دارد. برخی از ویژگی‌های سامانه AC-MIT نسبت به سایر روش‌های تعیین چگالی سیال‌های چندفازی عبارتند از توانایی اندازه‌گیری چگالی سیال‌های با غلظت بالا، استفاده برای لوله‌های با قطر زیاد به دلیل پایش کل مقطع لوله، عدم تماس حسگرهای گیرنده با سیال، هزینه پایین ساخت و تعمیر و نگهداری. بررسی‌ها نشان داد که سامانه ساخته شده در جریان الکتریکی و فرکانس انتخاب شده از عملکرد مناسبی برخوردار است. مستقل بودن سامانه از تغییرات دما و شوری فاز حامل و همچنین نرخ سیگنال به نویز مطلوب در شرایط مختلف سیال (سطوح مختلف دما و شوری فاز حامل) از دیگر ویژگی‌های این سامانه است. به عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده می‌توان از این سامانه برای پایش سیال‌های مختلف از جمله سیال‌های مربوط به حوزه صنایع غذایی، دارویی، نفت و پتروشیمی استفاده کرد.

## سپاس‌گزاری

این پژوهش به سفارش سازمان بنادر و دریانوردی و در قالب طرح پژوهشی-کاربردی به شماره ۳۰/۳۵۲۸ در آزمایشگاه مکترونیک دانشگاه تهران به اجرا درآمد که بدین وسیله از همکاری ایشان تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

## نمادها

توموگرافی القای الکترومغناطیسی با جریان اعمالی	AC-MIT
توموگرافی کامپیوتری	CT
تصویرسازی رزونانس مغناطیسی	MRI
توموگرافی خازن الکتریکی	ECT
توموگرافی امپدانس الکتریکی	EIT
چگالی شار مغناطیسی ( $wb/m^2$ )	B



زاویه فاز (درجه)	$\Theta$	ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در خلا	$\mu_0$
ماتریس حساسیت	S	$(4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m})$	
غلظت حجمی اندازه‌گیری شده به روش آزمایشگاهی ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	$C_{v\text{-manual}}$	چگالی جریان الکتریکی ( $\text{A/m}^2$ )	J
غلظت حجمی اندازه‌گیری شده توسط سامانه AC-MIT ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	$C_{v\text{-AC-MIT}}$	جریان الکتریکی (A)	I
چگالی سیال ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_f$	فاصله بین المان‌های منبع چگالی جریان و حسگرهای اندازه‌گیری	R
چگالی فاز مایع ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_w$	چگالی شار مغناطیسی (m)	V
چگالی فاز جامد ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_s$	اختلاف پتانسیل (v)	V
هدایت الکتریکی فاز مایع (S/m)	$\sigma_1$	سطح مقطع کویل‌ها ( $\text{m}^2$ )	A
غلظت جرمی (gr/lit)	$C_s$	هدایت الکتریکی (S/m)	$\sigma$
هدایت الکتریکی بازسازی شده توسط سامانه AC-MIT (S/m)	$\sigma_m$	ثابت طراحی کویل‌ها	Q
غلظت جرمی نمونه‌ها (gr/lit)	$C_i$	فرکانس سیگنال الکتریکی	$\omega$
ریشه میانگین مربعات خطا	RMSE	ثابت طراحی کویل‌ها	R
خطا (درصد)	Error	ضریب نفوذپذیری در خلا	$\epsilon_0$
		ضریب نفوذپذیری نسبی	$\epsilon_r$
		ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی	$\mu_r$
		(H/m)	

## REFERENCES

- Babu, K. S., & Amamcharla, J. K. (2021). Rehydration characteristics of milk protein concentrate powders monitored by electrical resistance tomography. *JDS Communications*, 2(6), 313-318.
- Bayram, A., Kankal, M., & Önsöy, H. (2012). Estimation of suspended sediment concentration from turbidity measurements using artificial neural networks. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(7), 4355-4365.
- García-Berrocal, A., Montalvo, C., Carmona, P., & Blázquez, J. (2019). The Coriolis mass flow meter as a volume meter for the custody transfer in liquid hydrocarbons logistics. *ISA Transactions*, 90, 311-318.
- Griffiths, H. (2001). Magnetic induction tomography. *Measurement science and technology*, 12(8), 1126-1131.
- Griffiths, H., Stewart, W. R., & Gough, W. (1999). Magnetic induction tomography: a measuring system for biological tissues. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 873(1), 335-345.
- Hayt Jr, W. H., Buck, J. A., & Akhtar, M. J. (2020). *Engineering Electromagnetics (SIE)*. McGraw-Hill Education.
- Humplík, P., Čermák, P., & Žid, T. (2016). Electrical impedance tomography for decay diagnostics of Norway spruce (*Picea abies*): possibilities and opportunities. *Silva Fennica*, 50(1), 1341-1357.
- Ireland, R. H., Tozer, J. C., Barker, A. T., & Barber, D. C. (2004). Towards magnetic detection electrical impedance tomography: data acquisition and image reconstruction of current density in phantoms and in vivo. *Physiological Measurement*, 25(3), 775-796.
- Lay-Ekuakille, A., Vergallo, P., Griffio, G., & Morello, R. (2014). Pipeline flow measurement using real-time imaging. *Measurement*, 47, 1008-1015.
- 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.



- Ma, L., Hunt, A., & Soleimani, M. (2015). Experimental evaluation of conductive flow imaging using magnetic induction tomography. *International Journal of Multiphase Flow*, 72, 198-209.
- Ma, L., McCann, D., & Hunt, A. (2017). Combining magnetic induction tomography and electromagnetic velocity tomography for water continuous multiphase flows. *IEEE Sensors Journal*, 17(24), 8271-8281.
- Ma, X., Peyton, A. J., Higson, S. R., & Drake, P. (2008). Development of multiple frequency electromagnetic induction systems for steel flow visualization. *Measurement Science and Technology*, 19(9), 40-48.
- 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(10), 33-48.
- 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.
- Maučec, M., & Denijs, I. (2009). Development and calibration of a  $\gamma$ -ray density-meter for sediment-like materials. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(10), 1829-1836.
- Minella, J. P., Merten, G. H., Reichert, J. M., & Clarke, R. T. (2008). Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(12), 1819-1830.
- Minghua, X., Mingxu, S., & Xiaoshu, C. (2008). The experimental study on measurement of density of two phase flow with ultrasonic multiple echo reflection method. *Journal of Engineering Thermophysics*, 29(8), 1343-1346.
- Porzuczek, J. (2019). Assessment of the Spatial Distribution of Moisture Content in Granular Material Using Electrical Impedance Tomography. *Sensors*, 19(12), 2807.
- Raza, S., & Chaudhari, R. P. (2015). Liquid Density Measurement using Tuning Fork. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 5(1), 499-502.
- Remiorz, L., & Ostrowski, P. (2015). An instrument for the measurement of density of a liquid flowing in a pipeline. *Flow Measurement and Instrumentation*, 41, 18-27.
- Rychagov, M. N., Tereshchenko, S., Masloboev, Y., Simon, M., & Lynnworth, L. C. (2002). Mass flowmeters for fluids with density gradient. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1, 465-470.
- Silva, R. C. (2022). Experimental Characterization Techniques for Solid-Liquid Slurry Flows in Pipelines: A Review. *Processes (MDPI)*, 10(3), 597.
- Tarabi, N., Mousazadeh, H., Jafari, A., Taghizadeh-Tameh, J., & Kiapey, A. (2021). Developing and evaluation of an electrical impedance tomography system for measuring solid volumetric concentration in dredging scale. *Flow Measurement and Instrumentation*, 80, 101986.
- Tombs, M., Zhou, F., & Henry, M. (2018). Two-phase coriolis mass flow metering with high viscosity oil. *Flow Measurement and Instrumentation*, 59, 23-27.
- Van Eeten, M. J. C. (2011). Radio-frequency slurry-density measurement for dredging pipelines. Ph. D. dissertation, Eindhoven University of Technology. Eindhoven.
- Viana, S. (2016). Measurement of Overflow Density in Spiral Classifiers Using a Vibrating Fork Densitometer with Accuracy Evaluation. *Brazilian Journal of Instrumentation and Control*, 3(1), 10-17.
- Wang, M. (Ed.). (2015). *Industrial tomography: systems and applications*. Elsevier.
- Watson, S., Williams, R. J., Gough, W., & Griffiths, H. (2008). A magnetic induction tomography system for samples with conductivities below 10 S m<sup>-1</sup>. *Measurement Science and Technology*, 19(4), 045501. From DOI:10.1088/0957-0233/19/4/045501.
- 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(2070), 20150328.
- 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.

- Yin, W., & Peyton, A. J. (2006). A planar EMT system for the detection of faults on thin metallic plates. *Measurement Science and Technology*, 17(8), 21-30.
- Yin, W., Chen, G., Chen, L., & Wang, B. (2011). The design of a digital magnetic induction tomography (MIT) system for metallic object imaging based on half cycle demodulation. *IEEE Sensors Journal*, 11(10), 2233-2240.
- 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*, 2017.
- Zheng, Y., & Liu, Q. (2011). Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids. *Measurement*, 44(4), 589-604.
- Zheng, Y., Li, Y., & Liu, Q. (2007). Measurement of mass flow rate of particulate solids in gravity chute conveyor based on laser sensing array. *Optics & Laser Technology*, 39(2), 298-305.