

طراحی و شبیه‌سازی عملکرد سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی به منظور بازسازی تصویر از مقاطع جریان دوفازی جامد-مایع

جلیل تقی‌زاده طامه^۱، حسین موسی‌زاده^{۲*}، شاهین رفیعی^۳، نازیلا طربی^۴، علی کیاپی^۵

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

چکیده

سامانه‌های جریان چندفازی بخش مهمی از فرایندهای صنعتی هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به صنایع غذایی، دارویی، نفت و پتروشیمی و همچنین کشاورزی اشاره کرد. به منظور پایش و کنترل این سامانه‌ها درون مسیرهای بسته، تعیین مشخصه‌های آن مانند جریان جرمی مواد، غلظت جرمی، چگالی، سرعت و توزیع همگنی سیال عبوری امری ضروری است. یکی از روش‌های نسبتاً جدید پایش سیال درون لوله، توموگرافی (مقطع‌نگاری) القای الکترومغناطیسی است که به دلیل عدم تماس حسگرها با سیال مورد مطالعه از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش طراحی و شبیه‌سازی عملکرد سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی با جریان اعمالی مورد مطالعه قرار گرفت. سامانه مذکور شامل دو عدد الکتروود حلقوی در قالب حسگر فرستنده و ۱۹۶ کوئل به عنوان حسگر گیرنده می‌باشد. به منظور شبیه‌سازی عملکرد این سیستم، سه موقعیت مکانی (0R, 0.35R, 0.65R) برای شی هدف در نظر گرفته شد و بازسازی تصویر با استفاده از الگوریتم حل تکراری و روش منظم‌سازی تیخونوف انجام شد. برای بررسی کیفیت تصویر بازسازی شده پارامترهای خطای اندازه و میانگین مربعات خطا در ضرایب مختلف منظم‌سازی محاسبه شد. نتایج نشان داد که مقدار میانگین مربعات خطا با افزایش ضریب منظم‌سازی، افزایش و با نزدیک شدن شی هدف به دیواره مقطع کاهش می‌یابد. پارامتر خطای اندازه نیز با نزدیک شدن شی هدف به دیواره مقطع، کاهش می‌یابد. کمترین و بیشترین مقدار خطای اندازه محاسبه شده مربوط به موقعیت مکانی 0.65 R و موقعیت مکانی وسط بود که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۱۳٪ و ۵/۷۲٪ به دست آمد.

کلمات کلیدی:

توموگرافی القای الکترومغناطیسی، الکتروود حلقوی، کوئل، روش حل تکراری، هدایت الکتریکی

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

طراحی و شبیه‌سازی عملکرد سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی به منظور بازسازی تصویر از مقاطع جریان دوفازی جامد-مایع

مقدمه

سامانه‌های جریان چندفازی بخش مهمی از فرایندهای صنعتی هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به صنایع غذایی، دارویی، نفت و پتروشیمی و همچنین کشاورزی اشاره کرد. این سامانه‌ها حلقه واسط بین مواد اولیه و محصول نهایی هستند و به همین دلیل پردازش آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱]. به منظور پایش و کنترل جریان چندفازی درون مسیره‌های بسته، تعیین مشخصه‌های آن مانند جریان جرمی مواد، غلظت جرمی، چگالی، سرعت و توزیع همگنی سیال عبوری امری ضروری است [۲]. روش‌های متفاوتی برای تعیین غلظت سیال درون لوله (مسیره‌های بسته) وجود دارد که بسته به عواملی همچون نوع و جنس ذرات درون سیال، توزیع ذرات در مقطع لوله، قطر لوله، فشار و دمای سیال و ... از یکی از این روش‌ها استفاده می‌شود. این روش‌ها را می‌توان بر اساس نوع حسگر تقسیم‌بندی کرد که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های مکانیکی، نوری، صوتی، الکتریکی و الکترومغناطیسی اشاره کرد. در روش‌های مذکور معمولاً کل مقطع لوله مورد بررسی قرار نمی‌گیرد و صرفاً به اندازه‌گیری تک-نقطه‌ای درون لوله پرداخته می‌شود. در لوله‌های با قطر زیاد (معمولاً بیش از ۵۰ سانتیمتر)، سیال در کل مقطع لوله همگن نبوده و اندازه‌گیری به صورت تک-نقطه‌ای نمی‌تواند بر آورد مناسبی از کل سطح مقطع لوله باشد و موجب ایجاد خطاهای بزرگ می‌شود.

یکی از روش‌های نسبتاً جدید پایش سیال درون لوله، توموگرافی (مقطع‌نگاری) الکتریکی است که به سه دسته توموگرافی امیدانس الکتریکی^۱، توموگرافی خازنی^۲ و توموگرافی القای الکترومغناطیسی^۳ تقسیم می‌شود. در روش توموگرافی بر خلاف روش‌های مرسوم، کل مقطع لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت تصویری دو بعدی یا سه بعدی از توزیع مشخصه مورد نظر سیال در مقطع لوله تشکیل می‌شود. در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی بر روی سامانه‌های توموگرافی در حوزه‌های مختلف از جمله پزشکی [۳] و صنایع نفت و پتروشیمی [۴] انجام شده و برخی پژوهش‌ها در زمینه کشاورزی و صنایع غذایی [۵، ۶، ۷] نیز صورت گرفته است.

در بین تکنیک‌های توموگرافی الکتریکی، روش توموگرافی القای الکترومغناطیسی به دلیل عدم تماس حسگرها با سیال مورد مطالعه از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در این روش از خاصیت القای الکترومغناطیس برای تعیین مشخصات مختلف مواد استفاده می‌شود. قسمت‌های اصلی این سامانه عبارتند از: (۱) حسگرهای فرستنده و گیرنده (۲) سامانه جمع‌آوری داده و (۳) رایانه برای بازسازی تصویر توموگرافی. در سیستم‌های معمولی توموگرافی القای الکترومغناطیس، حسگرها مجموعه‌ای از سیم‌پیچ‌ها هستند که با الگوی دایره‌ای بر روی محیط لوله انتقال سیال قرار می‌گیرند. در صورت افزایش قطر لوله (بیش از ۵۰ سانتیمتر)، شار مغناطیسی نمی‌تواند به خوبی از بین سیال عبور کند و توسط حسگرهای گیرنده دریافت شود. برای رفع این مشکل، به جای استفاده از سیم‌پیچ به عنوان حسگرهای فرستنده، از الکتروود استفاده می‌شود. روش کار القای الکترومغناطیس به این صورت است که سیگنال الکتریکی با فرکانس و توان مشخص به حسگر فرستنده اعمال شده و پس از آن، ولتاژ القا شده در حسگر گیرنده دریافت و

¹ Electrical impedance tomography

² Electrical capacitance tomography

³ Magnetic induction tomography

پردازش می‌شود. پژوهش‌های انجام شده در حوزه توموگرافی القای الکترومغناطیس عمدتاً بر روی محیط‌های با حداکثر قطر ۲۰ سانتیمتر بوده که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

وی و ویکینسون در سال ۲۰۱۱ به طراحی و ساخت حسگر فرستنده-گیرنده القای الکترومغناطیس پرداختند. در این پژوهش از یک حسگر فرستنده و دو حسگر گیرنده استفاده شد. حسگرهای گیرنده به ترتیب با زاویه‌های ۹۰ درجه و ۱۸۰ درجه نسبت به حسگر فرستنده قرار گرفته و فاصله حسگر فرستنده و گیرنده در زاویه ۱۸۰ درجه برابر ۲۰ سانتیمتر بود. نمونه‌های مورد آزمایش شامل محلول آب-نمک با سه غلظت ۱٪ (۱/۵۹ S/m)، ۳٪ (۴/۲۴ S/m) و ۵٪ (۶/۴۴ S/m) و همچنین صفحات فلزی از جنس آلومینیوم و فولاد بود. محلول‌های آب-نمک و صفحات فلزی در فرکانس‌های ۳ مگاهرتز و ۱۰ مگاهرتز مورد آزمایش قرار گرفتند و تغییرات دامنه و فاز سیگنال گیرنده با استفاده از دمودولاتور^۱ I/Q اندازه‌گیری شد [۸]. ما و همکاران در سال ۲۰۱۵ برای تصویر کردن فاز رسانا در سیال چندفازی، از سیستم توموگرافی القای الکترومغناطیسی استفاده کردند. سیستم 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 محیط مورد آزمایش ۱۹ سانتیمتر بود. نتایج تجربی نشان داد که در نسبت مساحت ۸/۶۹٪ (نسبت فاز رسانا به کل) این سیستم قادر به تصویر کردن رسانایی ۰/۰۶ S/m می‌باشد [۹].

سیستم‌های موجود توموگرافی القای الکترومغناطیسی برای محیط‌های با حداکثر قطر ۲۰ سانتیمتر هستند و طراحی این سیستم برای محیط‌های با قطر بیشتر امری اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین هدف از انجام این پژوهش طراحی و شبیه‌سازی عملکرد سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی به منظور بازسازی تصویر از مقاطع جریان دوفازی جامد-مایع در لوله‌های با قطر بیش از ۵۰ سانتیمتر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

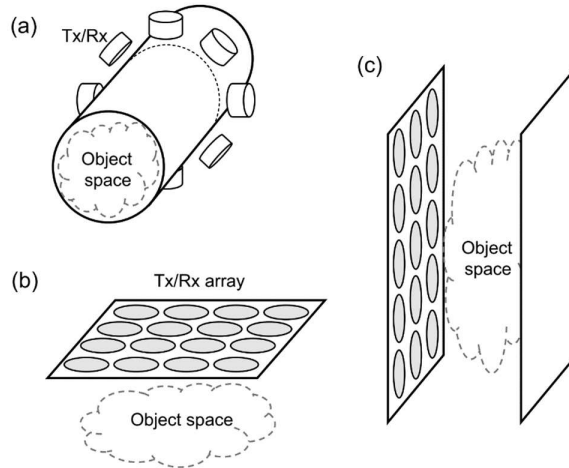
طراحی سیستم توموگرافی القای الکترومغناطیسی

همانطور که قبلاً اشاره شد اصول کار سیستم توموگرافی القای الکترومغناطیسی بر مبنای قانون القای مغناطیسی است. قسمت‌های اصلی این سیستم شامل حسگرهای فرستنده و گیرنده، سیستم جمع‌آوری داده و رایانه برای بازسازی تصویر توموگرافی می‌باشد. عوامل اصلی در طراحی این سیستم شامل هدایت الکتریکی سیال، فاصله حسگرهای فرستنده و گیرنده، فرکانس سیگنال الکتریکی، نحوه چیدمان حسگرها و ظرفیت القای مغناطیسی حسگرها می‌باشد. نحوه چیدمان حسگرها با توجه به محیطی که تصویرسازی بر روی آن انجام می‌شود، تعیین شده و سه مدل از مهمترین الگوی چیدمان حسگرها شامل الگوی دایره‌ای، صفحه‌ای یک‌طرفه و صفحه‌ای دوطرفه می‌باشد (شکل-۱). در این پژوهش با توجه به اینکه جریان دوفازی از درون لوله عبور می‌کند و محیط تصویرسازی به صورت دایره‌ای می‌باشد، از الگوی دایره‌ای برای چیدمان حسگرها استفاده شد. فرکانس سیگنال الکتریکی با توجه به قطر محیط تصویرسازی و همچنین میزان نفوذ شار مغناطیسی تعیین می‌شود. معادله (۱) رابطه بین هدایت الکتریکی سیال، میزان نفوذ شار مغناطیسی و فرکانس سیگنال الکتریکی را نشان می‌دهد.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f\mu\sigma\pi}} \quad (1)$$

¹ In phase and quadrature demodulator

که در آن δ عمق نفوذ شار، f فرکانس سیگنال الکتریکی، σ هدایت الکتریکی سیال و μ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی می‌باشد.



شکل-۱) انواع آرایش حسگرها در سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی: (a) الگوی دایره‌ای، (b) الگوی صفحه‌ای یک طرفه، (c) الگوی صفحه‌ای دو طرفه

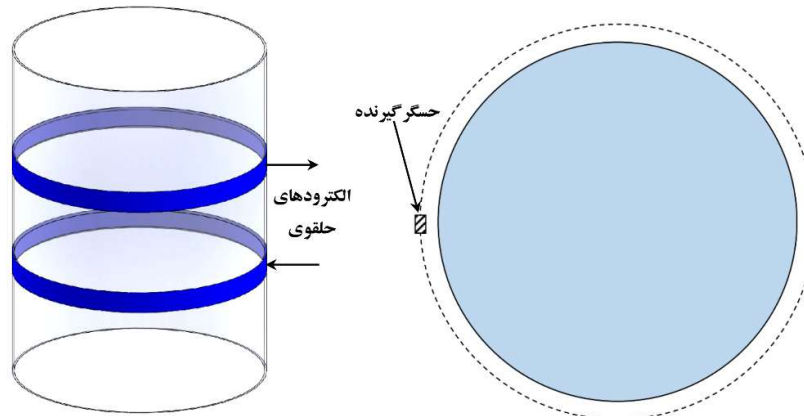
در یک سامانه توموگرافی معمولی حسگرهای فرستنده و گیرنده مجموعه‌ای از کوئل‌ها هستند که پیرامون محیط تصویرسازی قرار می‌گیرند. در سیستم‌هایی که قطر محیط تصویرسازی نسبتاً بزرگ است (بیش از ۵۰ سانتیمتر)، شار مغناطیسی توانایی عبور از درون سیال را ندارد و لذا قدرت تفکیک‌پذیری سیستم نیز کاهش پیدا می‌کند. در این پژوهش نیز قطر محیط تصویرسازی ۶۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد و به جای استفاده از کوئل به عنوان حسگر فرستنده، از یک جفت الکتروود حلقوی استفاده شد. نحوه کار بدین صورت است که سیگنال الکتریکی متناوب در فرکانس و دامنه مشخص به الکتروود حلقوی پایین اعمال شده و این سیگنال مطابق با قانون بیو-ساوار (رابطه (۲)) موجب به وجود آمدن میدان مغناطیسی می‌شود.

$$B(r') = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} J(r) \times \frac{r - r'}{|r - r'|^3} dv \quad (2)$$

که در آن $r - r' = (r_x - r'_x, r_y - r'_y, r_z - r'_z)$ فاصله بین منبع جریان $J(r)$ و حسگرهای اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی $B(r')$ بوده و μ_0 ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در خلا می‌باشد. حسگرهای گیرنده که شامل تعدادی کوئل (۱۹۶ کوئل) می‌باشند پیرامون محیط قرار دارند و ولتاژ ناشی از میدان مغناطیسی ایجاد شده طبق رابطه (۳) در آن‌ها القا می‌شود.

$$V = -nA \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

که در آن V ولتاژ القا شده، n تعداد حلقه‌های کویل، A مساحت سطح کویل، B چگالی شار مغناطیسی و t زمان می‌باشد. با اندازه‌گیری این ولتاژ می‌توان برخی از خصوصیات الکتریکی ماده مانند هدایت الکتریکی را اندازه‌گیری کرد. شکل (۲) شماتیک سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی با جریان اعمالی را نشان می‌دهد.



شکل-۲) نمایی از سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی با جریان اعمالی

شبیه‌سازی عملکرد سیستم توموگرافی القای الکترومغناطیسی

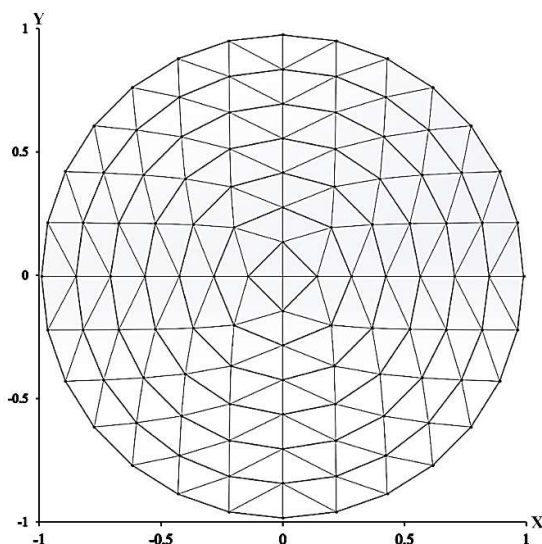
در این بخش شبیه‌سازی عملکرد سیستم توموگرافی القای الکترومغناطیسی با جریان اعمالی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد در این سیستم سیگنال الکتریکی با فرکانس و توان مشخص به الکترود حلقوی اعمال شده و موجب ایجاد میدان مغناطیسی می‌شود. این میدان مغناطیسی ولتاژ را در حسگرهای گیرنده که شامل تعدادی کویل دور تا دور محیط تصویرسازی هستند، القا می‌کند. محیط تصویرسازی مقطع دایره‌ای شکل به قطر ۶۰ سانتیمتر بوده و حاوی سیال با هدایت الکتریکی مشخص می‌باشد. به منظور حل معادله حاکم بر این سامانه در ابتدا مقطع دایره مطابق با شکل (۳) مش بندی شده و به ۱۹۶ پیکسل تقسیم شد. با استفاده از معادله ماکسول و همچنین قانون اهم، معادله لاپلاس حاکم بر این سامانه طبق رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (4)$$

با اعمال شرط مرزی نیومن چگالی جریان الکترودها بر اساس معادله (۵) محاسبه می‌شود:

$$-\sigma \frac{\partial V}{\partial n} = J_l \quad \text{on } \Omega \quad (5)$$

که در آن σ و V به ترتیب هدایت الکتریکی و ولتاژ توزیع شده در محیط Ω ، n بردار نرمال یکه و J_1 چگالی جریان مرزی می‌باشد.



شکل-۳) محیط تصویرسازی سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی به صورت مش بندی شده

برای بازسازی تصویر از برنامه نوشته شده در نرم افزار Microsoft C#.net استفاده شد، بدین منظور رابطه یو-ساوار که مدلی از انتگرال فردهلم^۱ نوع اول است، تبدیل به یک معادله خطی شد (رابطه (۶)) و ماتریس حساسیت بر مبنای این معادله استخراج شد:

$$Fj = b \quad (6)$$

که در آن F ماتریس حساسیت، j چگالی جریان پیکسل‌ها و b چگالی شار مغناطیسی است. معادله (۶) یک معادله از نوع بدرفتار^۲ بوده و تغییرات بسیار جزئی در چگالی شار مغناطیسی (طرف دوم معادله) موجب ایجاد خطاهای زیاد در محاسبه چگالی جریان (i) می‌شود. معادله‌های با این ویژگی قابلیت حل به صورت مستقیم را ندارند و برای حل آن‌ها از روش‌های حل تکراری^۳ استفاده می‌شود. در این پژوهش نیز از روش حل تکراری و همچنین الگوی منظم‌سازی تیخونوف^۴ استفاده شد. سپس با اعمال شرایط مرزی، چگالی جریان و همچنین هدایت الکتریکی پیکسل‌ها محاسبه شد و در نهایت تصویری دوبعدی از توزیع هدایت الکتریکی به دست آمد. به منظور شبیه‌سازی عملکرد سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی هدایت الکتریکی سیال در مقطع تصویرسازی برابر با $1/5 \text{ S/m}$ در نظر گرفته شد. شی هدف نیز از نوع دایره‌ای شکل با هدایت الکتریکی 0.3 S/m و نسبت مساحت 35% انتخاب شد و در سه ناحیه از مقطع تصویرسازی شامل وسط (شی هدف و مقطع تصویرسازی هم‌مرکز)، $0.35 R$ (مرکز شی هدف به اندازه 35% شعاع مقطع تصویرسازی از مرکز مقطع فاصله دارد) و $0.65 R$ (مرکز شی هدف به

¹ Fredholm integral

² Ill-posed

³ Iterative solution method

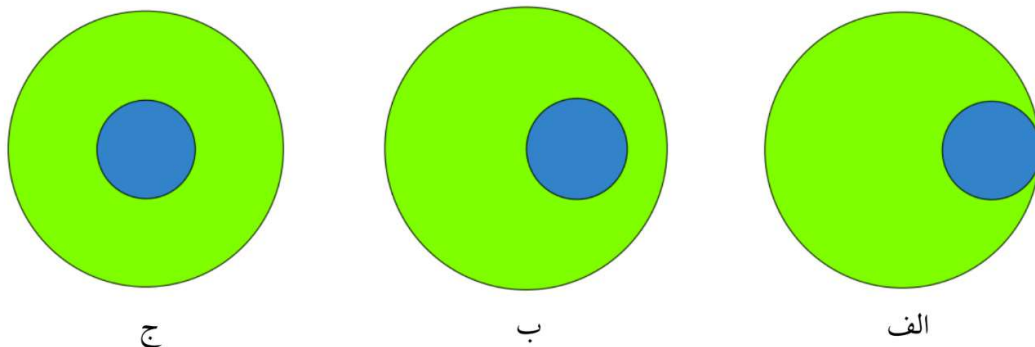
⁴ Tikhonov regularization

اندازه ۶۵٪ شعاع مقطع تصویرسازی از مرکز مقطع فاصله دارد) قرار گرفت (شکل-۴). پس از آن، معادله با استفاده از الگوریتم حل تکراری و الگوی منظم‌سازی تیخونوف حل شد و پارامترهای خطای اندازه^۱ (رابطه (۷)) و میانگین مربعات خطا^۲ (رابطه (۸)) در ضرایب مختلف منظم‌سازی (λ) و همچنین تعداد تکرارهای مختلف الگوریتم حل تکراری محاسبه شد.

$$SE = \left| \frac{DSO - RSO}{A_{CD}} \right| \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_R - \sigma_P)^2}{n}} \quad (7)$$

که در آن DSO اندازه محاسبه شده توسط سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی، RSO اندازه واقعی، A_{CD} مساحت کل مقطع تصویرسازی، σ_R مقدار واقعی هدایت الکتریکی و σ_P مقدار هدایت الکتریکی محاسبه شده توسط سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی می‌باشد.



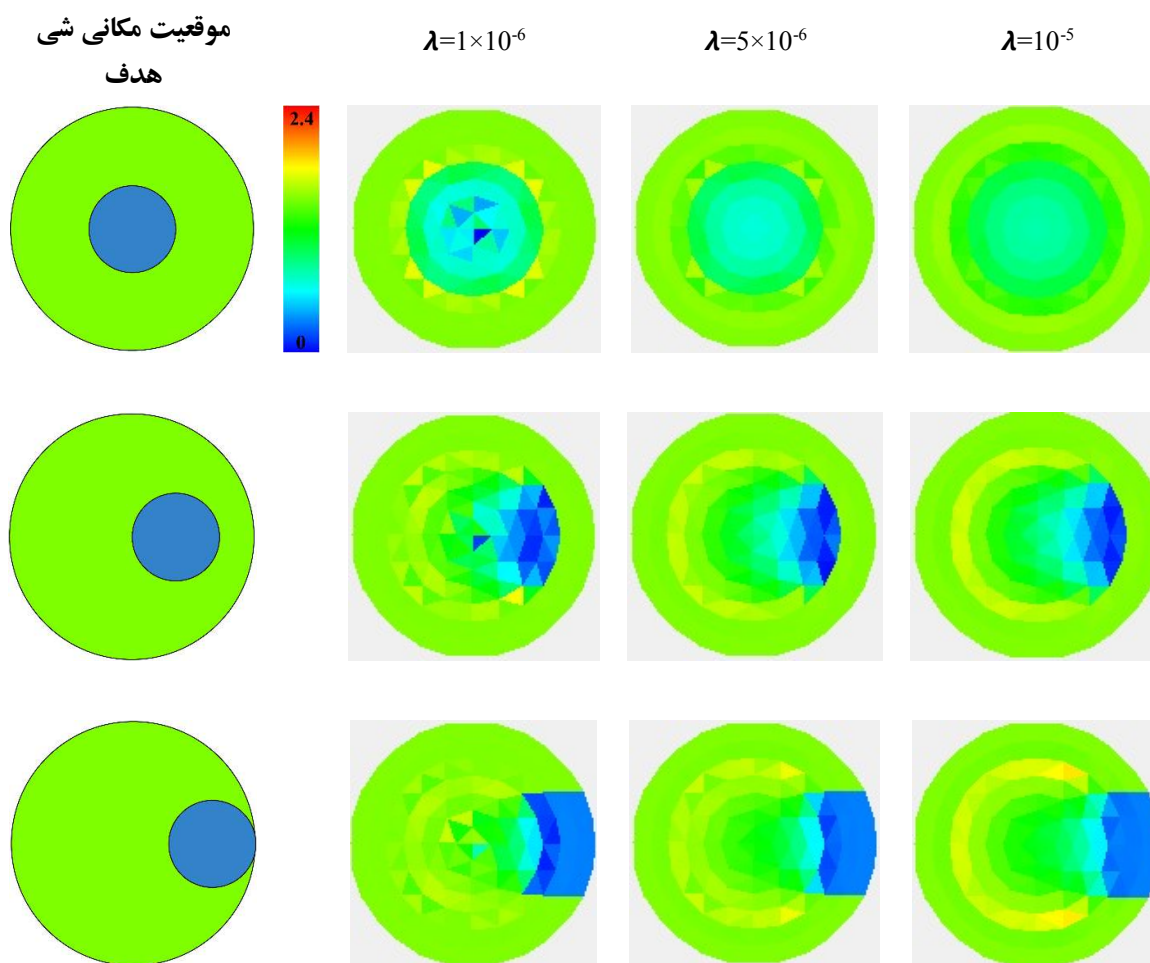
شکل-۴) موقعیت شی هدف در محیط تصویرسازی سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی (الف- R ۰/۶۵، ب- R ۰/۳۵، ج- وسط هم- مرکز)

¹ Size error

² Root Mean Square Error (RMSE)

نتایج و بحث

بازسازی تصویر در سیستم توموگرافی القای الکترومغناطیسی با استفاده از حل معادله حاکم بر آن انجام شد. برای حل معادله از الگوریتم حل تکراری و الگوی منظم‌سازی تیخونوف استفاده شد. در این پژوهش برای هر مرحله از حل معادله، ۱۰ تکرار^۱ در نظر گرفته شد. همچنین از ۱۰ ضریب منظم‌سازی در بازسازی تصویر استفاده شد. به منظور ارزیابی سیستم شی هدف در سه موقعیت مکانی مختلف قرار داده شد و سپس بازسازی تصویر در هر موقعیت انجام شد (شکل-۵).



شکل-۵) بازسازی تصویر سیستم توموگرافی القای الکترومغناطیسی در سه موقعیت مکانی شی هدف و سه ضریب منظم‌سازی

برای بررسی کیفیت تصویر بازسازی شده دو پارامتر میانگین مربعات خطا و همچنین خطای اندازه محاسبه شد (جدول-۱). نتایج نشان داد که هر چه شی هدف از مرکز مقطع فاصله بگیرد مقدار میانگین مربعات خطا کاهش پیدا

¹ Iteration

می‌کند. همچنین با افزایش ضریب منظم‌سازی، مقدار میانگین مربعات خطا در هر سه موقعیت مکانی افزایش پیدا می‌کند.

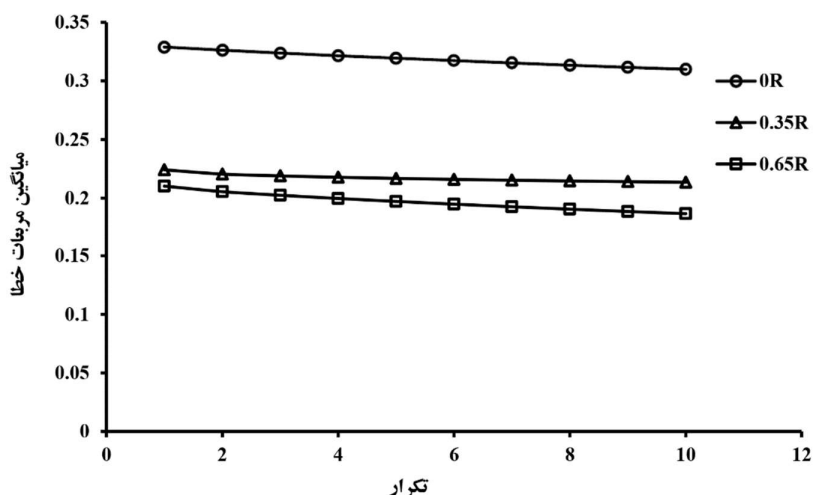
جدول (۱) پارامترهای کیفیت تصویرسازی سیستم توموگرافی القای الکترومغناطیسی در موقعیت‌های مکانی مختلف شی هدف و همچنین ضرایب مختلف منظم‌سازی.

خطای اندازه (%) (Size Error)	مقدار میانگین مربعات خطا (RMSE)	مقدار ضریب منظم- سازی $(\lambda) (10^{-1} \times)$	موقعیت مکانی شی هدف
۱/۸۷۲	۰/۲۷۳	۱	
۲/۰۲۸	۰/۲۶۹	۲	
۲/۵۱۷	۰/۲۷۱	۳	
۳/۰۰۷	۰/۲۷۵	۴	
۳/۵۴۲	۰/۲۸۲	۵	
۴/۰۹۶	۰/۲۸۹	۶	وسط
۴/۶۳۱	۰/۲۹۵	۷	
۵/۱۲۰	۰/۳۰۱	۸	
۵/۶۰۹	۰/۳۰۶	۹	
۵/۷۲۷	۰/۳۱۰	۱۰	
۰/۳۱۳	۰/۱۹۰	۱	
۰/۴۸۹	۰/۱۹۶	۲	
۰/۶۷۸	۰/۱۹۸	۳	
۱/۰۰۴	۰/۲۰۱	۴	
۱/۰۶۹	۰/۲۰۵	۵	0.35 R
۱/۵۵۹	۰/۲۰۷	۶	
۲/۰۱۵	۰/۲۰۹	۷	
۲/۳۴۱	۰/۲۱۱	۸	
۲/۶۶۷	۰/۲۱۲	۹	
۳/۲۶۸	۰/۲۱۳	۱۰	
۰/۱۳۶	۰/۱۴۷	۱	
۰/۴۶۳	۰/۱۴۰	۲	
۰/۹۵۲	۰/۱۴۳	۳	
۱/۴۴۱	۰/۱۴۸	۴	
۱/۹۳۰	۰/۱۵۶	۵	0.65 R
۲/۴۷۸	۰/۱۶۴	۶	
۳/۰۱۳	۰/۱۷۱	۷	
۳/۵۴۸	۰/۱۷۷	۸	
۴/۰۹۶	۰/۱۸۲	۹	
۴/۶۱۸	۰/۱۸۶	۱۰	

بیشترین مقدار میانگین مربعات خطا برابر با $0/31$ محاسبه شد که مربوط به موقعیت مکانی وسط بوده و ضریب منظم‌سازی آن نیز برابر با 10^{-5} بود. همچنین کمترین مقدار میانگین مربعات خطا مربوط به موقعیت مکانی $0.65 R$ و ضریب منظم‌سازی 10^{-1} بود و مقدار آن برابر با $0/14$ به دست آمد.

یکی دیگر از پارامترهای تصویرسازی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت خطای اندازه شی هدف بود. نتایج نشان داد که با افزایش ضریب منظم‌سازی پارامتر خطای اندازه در هر سه موقعیت مکانی افزایش پیدا می‌کند. کمترین مقدار خطای اندازه محاسبه شده مربوط به موقعیت مکانی $0.65R$ با ضریب منظم‌سازی 10^{-6} و بیشترین مقدار خطای اندازه مربوط به موقعیت مکانی وسط و ضریب منظم‌سازی 10^{-5} بود که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر با 0.13% و 0.22% به دست آمد.

همانطور که قبلاً اشاره شد در این پژوهش بازسازی تصویر با استفاده از الگوریتم حل تکراری انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش تکرارها در حل الگوریتم میانگین مربعات خطا کاهش پیدا می‌کند. شکل (۶) روند کاهش مقدار میانگین مربعات خطا در سه موقعیت مکانی مختلف و ضریب منظم‌سازی 10^{-6} را نشان می‌دهد.



شکل ۶- مقدار میانگین مربعات خطا در بازسازی تصویر سیستم توموگرافی القای الکترومغناطیسی در سه موقعیت مکانی شی هدف (0R, 0.35R, 0.65R) و سه ضریب منظم‌سازی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش طراحی و شبیه‌سازی عملکرد سامانه توموگرافی القای الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت. در این سامانه به دلیل بزرگ بودن قطر مقطع تصویرسازی (۶۰ سانتیمتر) از یک جفت الکتروود حلقوی به منظور اعمال سیگنال الکتریکی استفاده شد. حسگرهای گیرنده شامل ۱۹۶ کوئل بودند که در اطراف محیط تصویرسازی قرار

گرفتند. به منظور شبیه‌سازی عملکرد این سامانه، هدایت الکتریکی سیال در مقطع تصویرسازی برابر با $1/5 \text{ S/m}$ در نظر گرفته شد. شی هدف نیز از نوع دایره‌ای شکل با هدایت الکتریکی 0.3 S/m و نسبت مساحت 35% انتخاب شد و در سه ناحیه از مقطع تصویرسازی شامل وسط، $R = 0.35$ و $R = 0.65$ قرار گرفت. بازسازی تصویر با استفاده از الگوریتم حل تکراری و روش منظم‌سازی تیخونوف انجام شد و پارامترهای میانگین مربعات خطا و خطای اندازه محاسبه شد. نتایج نشان داد که مقدار میانگین مربعات خطا با افزایش ضریب منظم‌سازی، افزایش و با نزدیک شدن شی هدف به دیواره مقطع کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار میانگین مربعات خطا برابر با 0.31007 محاسبه شد که مربوط به موقعیت مکانی وسط بوده و ضریب منظم‌سازی آن نیز برابر با 10^{-6} بود. پارامتر خطای اندازه نیز با نزدیک شدن شی هدف به دیواره مقطع، کاهش می‌یابد. کمترین و بیشترین مقدار خطای اندازه محاسبه شده مربوط به موقعیت مکانی $R = 0.65$ و موقعیت مکانی وسط بود که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر با 0.136986% و 0.5227332% به دست آمد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش به سفارش سازمان بنادر و دریانوردی و طرح پژوهشی-کاربردی به شماره $20/3528$ در آزمایشگاه مکترونیک دانشگاه تهران به اجرا درآمد که بدین وسیله از همکاری ایشان تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

منابع

1. Wang, M. (Ed.). 2015. *Industrial tomography: systems and applications*. Elsevier.
2. Lay-Ekuakille, A., Vergallo, P., Griffio, G., & Morello, R. 2014. Pipeline flow measurement using real-time imaging. *Measurement*, 47:1008-1015.
3. Durlak, W. and Kwinta, P., 2013. Role of electrical impedance tomography in clinical practice in pediatric respiratory medicine. *International Scholarly Research Notices*, 2013.
4. Jia, J., Wang, M., Faraj, Y. and Wang, Q., 2015. Online conductivity calibration methods for EIT gas/oil in water flow measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, 46, pp.213-217.
5. Grossi, M. and Riccò, B., 2017. Electrical impedance spectroscopy (EIS) for biological analysis and food characterization: A review. *Journal of sensors and sensor systems*, 6(2), pp.303-325.
6. van Treeck, S.C., Kemna, A., Budler, J., Weigand, M. and Huisman, J.A., 2019, January. Quantification of Root Length Density at the Field Scale with Electrical Impedance Tomography: A Numerical Feasibility Study based on Laboratory and Field Data. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 21).
7. Gnecci, J.G., Chávez, A.G.T., Campos, G.C., Peregrino, V.O. and Pineda, E.M., 2012. Soil water infiltration measurements using electrical impedance tomography. *Chemical engineering journal*, 191, pp.13-21.
8. Wei, H. Y., & Wilkinson, A. J., 2011. Design of a sensor coil and measurement electronics for magnetic induction tomography. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 60(12), pp.3853-3859.



سیزدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک
بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران
(مکانیک بیوسیستم ۱۴۰۰)
۲۶-۲۴ شهریور ۱۴۰۰



-
9. Ma, L., Hunt, A., & Soleimani, M., 2015. Experimental evaluation of conductive flow imaging using magnetic induction tomography. *International Journal of Multiphase Flow*, 72, pp.198-209.

Design and performance simulation of electromagnetic induction tomography system for image reconstruction of solid-liquid two-phase flow

Jalil Taghizadeh-Tameh^a, Hossein Mousazadeh^{b,*}, Shahin Rafiee^c, Nazilla Tarabi^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

Multiphase flow systems are an important part of industrial processes, including the food, pharmaceutical, oil and petrochemical industries and agriculture. In order to monitor and control these systems, it is necessary to determine its characteristics such as mass flow of materials, mass concentration, volumetric concentration, density, velocity and homogeneity distribution of the fluid. Magnetic induction tomography is one of the new methods of monitoring fluid in the pipelines, which has a special place due to the lack of contact of the sensors with the fluid. In this research, design and performance simulation of applied current magnetic induction tomography (AC-MIT) system was studied. The system included two annular electrodes as a transmitter sensor and 196 coils as a receiver sensor. In order to performance simulation of system, three locations (0R, 0.35R, 0.65R) were considered for the target object and the image reconstructed using iterative solution algorithm and Tikhonov regularization method. To evaluation of the quality of the reconstructed image, Size Error (SE) and Root Mean Square Error (RMSE) were calculated in different regularization coefficients. The results showed that the RMSE increases with increasing regularization coefficient and decreases when the target object approaches the cross-sectional wall. The size error parameter decreases as the target object approaches the cross-sectional wall. The minimum and maximum values of the calculated size error were related to 0.65 R and middle location, which were equal to 0.13 % and 5.72%, respectively.

Key words: Magnetic induction tomography, Annular electrodes, Coil, Iterative solution method, Electrical conductivity

*Corresponding author

E-mail: hmousazadeh@ut.ac.ir