

بررسی تاثیر مش‌بندی بر توزیع پتانسیل میدان در توموگرافی خازنی با قابلیت کاربرد در سامانه اندازه‌گیری دبی جرمی در کمباین غلات

حسین موسی زاده^{۱*}، نازیلا طربی^۱، جلیل تقی زاده طامه^۱، فرزاد محمدی^۱، علی کیاپی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- کارشناس خبره، سازمان بنادر و دریانوردی امیرآباد، بهشهر، ساری

* مسئول مکاتبه: hmousazade@ut.ac.ir

چکیده

اندازه‌گیری دبی جرمی مواد فله‌ای در بسیاری از صنایع بالاخص در سیلوها، بنادر، صنعت غذا و دارو و نفت و گاز کاربرد دارد. همچنین از حسگرهای دبی جرمی در کمباین‌های غلات به منظور تهیه نقشه عملکرد استفاده می‌شود. حسگرهای موجود روی کمباین‌ها از لحاظ هزینه، دقت، کالیبراسیون مجدد و حساسیت به شرایط محیطی مثل رطوبت دارای مشکلاتی بوده و معرفی حسگری با فناوری جدید که مشکلات فوق را نداشته باشد می‌تواند بخشی از مشکلات یاد شده را حل نماید. در این تحقیق یک حسگر دبی جرمی مبتنی بر توموگرافی خازنی ساخته شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. تعیین بهترین حالت مش‌بندی برای حل معادلات با روش المان محدود عمده‌ترین هدف این تحقیق است. بنابراین، ناحیه فانتوم با چهار روش متفاوت مش‌بندی شد و نتایج از لحاظ سرعت اجرای برنامه و همچنین دقت در ساخت تصاویر توموگرام مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده مش‌بندی ریزتر در مجاورت الکترودها و افزایش تعداد المان‌ها تا حدی که شرایط برخط بودن مساله نقض نشود و همچنین چرخاندن حلقه‌های المان‌ها، ایده‌آل‌ترین حالت مش‌بندی است. بنابراین، بیشترین تعداد المان مش‌بندی برای لوله‌ای به قطر ۲۰۰ mm به شرطی که آنلین بودن مساله نقض نشود تعداد ۲۰۴۸ عدد به دست آمد. همچنین نتیجه‌گیری شد، المان‌های ریزتر در مجاورت الکترودها تاثیر مثبتی در کیفیت تصاویر توموگرام دارد.

واژه‌های کلیدی: نرخ جریان جرمی، توموگرافی خازنی الکتریکی، پتانسیل میدان الکتریکی، مش‌بندی، روش المان محدود

How to cite:

Mousazadeh H, Tarabi N, Taghizadeh-Tameh J, Mohammadi F, Kiapei A, N. 2023. Evaluation of mechanized Mass Flow Rate Measurement Based on Electrical Capacitance Tomography with Feasibility Application in Cereal Combines and Assessment of Discretization on Field Potential. *Journal of Agricultural Mechanization* 8 (1): 23-31.

Mass Flow Rate Measurement Based on Electrical Capacitance Tomography with Feasibility Application in Cereal Combines and Assessment of Discretization on Field Potential

Hosein Mousazadeh^{1*}, Nazila Tarabi¹, Jalil Taghizadeh-Tameh¹, Farzad Mohammadi¹, Ali Kiapei²

1-Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Expert in port and maritime organization of Amirabad, Behshahr, Mazandaran.

Received: October 13, 2022

Accepted: January 5, 2023

*Corresponding author: hmousazade@ut.ac.ir

Abstract

Mass flow rate measurement has application in many industrials, e.g., silos, ports, food, drug and oil-gas industry. Mass flow sensors are used in cereal combine harvesters as well. Installed mass flow sensors on the combine harvesters faced some problems such as; cost, precision, recalibration and sensitivity for environmental conditions. So, introducing a new sensor based on a new technology would have potential for future installations. A mass flow rate measurement sensor based on electrical capacitance tomography constructed and evaluated in this research. Defining the best discretization method for solving potential equations in FEM was the main objective of this research. Therefore, four discretizing methods were compared and the results were evaluated from run-time and precision viewpoint. According to results, the finer elements near the electrodes and increasing element numbers in such a way that don't break the in-situ condition would be the best cases. The ECT system with fine elements and mesh numbers of 2048 would be applicable for mass flow rate measurement in combine harvesters.

Keywords: Mass flow rate, Electrical capacitance tomography, Field potential, Discretization, Finite, element method.

برخی از حسگرهای فوق به منظور اندازه‌گیری جریان جرمی غلات در کمباین‌ها تجاری سازی شده و هم اکنون برخی از کمباین‌ها غلات مجهز به این سامانه‌ها هستند. با مقایسه برخی پارامترها مثل؛ سادگی، دقت، ظرفیت اندازه‌گیری، نگهداری، قابلیت تعمیم به اکثر جریان‌ها، غیر تماسی و غیر نفوذی بودن، هزینه و مقاومت در مقابل ارتعاش، سامانه توزین نوع خازنی (توموگرافی خازنی) یکی از کاندیداهای مهم است. Hunt (۲۰۱۴) یک سامانه توزین را معرفی کرد که مبتنی بر توموگرافی خازنی الکتریکی (ECT¹) بوده و برای اندازه‌گیری جریان جرمی مواد فله‌ای در لوله‌ای به قطر ۱۲ cm مورد استفاده قرار گرفت. در این حسگر، از پارامترهای تاثیرگذار در اندازه‌گیری جریان جرمی با دقت خوب عبارت بودند از؛ شکل ذرات عبوری، محتوای رطوبت مواد و پایداری دمایی سامانه اندازه‌گیری. Mokhtar و et al (2018) جریان سنج جرمی مبتنی بر یک ECT و دو حسگر الکترواستاتیک را ساخته و معرفی نمود. براساس آزمایش‌هایی که بر روی محصول ذرت انجام گرفت، خطای کلی آزمایش‌ها زیر ۲٪ بوده و نتایج بسیار قابل قبولی به دست آمد. آنها استفاده از حسگر جریان

۱- مقدمه

در روش سنتی تحویل کالا به خریدار، عملکرد محصول با استفاده از سامانه اندازه‌گیری حجم یا وزن به صورت غیر دقیق کنترل می‌شود. به‌عنوان مثال؛ یک واگن یا یک کامیون هنگام تحویل وزن می‌شوند. با گذشت زمان، سامانه اندازه‌گیری از حجم به وزن تغییر یافته است، با یک سامانه پایش عملکرد، جریان مواد عبوری از ماشین برداشت تخمین زده می‌شود، سپس این اطلاعات با داده حسگرهای دیگر مانند؛ GPS و رطوبت‌سنج برای محاسبه عملکرد ادغام می‌شود. جریان‌های مبتنی بر سقوط آزاد در آسیاب‌ها، تغذیه دام، تخلیه مخازن، در صنعت غذا، کشاورزی، معدن و همچنین نیروگاه‌های تولید توان کاربردهای فراوانی دارند. سامانه‌های اندازه‌گیری جریان جرمی، جزو ابزارهای اساسی در صنایع فوق هستند. برخی از سامانه‌های توزین مرسوم مبتنی بر اندازه‌گیری جریان جرمی عبارتند از؛ نیروی مرکزگرا، ضربه، کوریولیس، میکروویو و خاصیت خازنی (Basu, 2019).

¹ Electrical capacitance tomography

تغییرات حجم را اندازه می گیرند (Shannon, et al., 2018). اندازه گیری مبتنی بر ECT یک روش مبتنی بر برآورد حجمی بوده که تصاویر ممتد از سطح مقطع لوله را ارائه کرده که می توان با تخمین سرعت سقوط مواد فله ای یا سرعت حرکت مواد در داخل لوله مقدار غلات برداشته شده (q) بر حسب m^3/s ، در هر نقطه از مزرعه را از رابطه (۱) محاسبه نمود.

$$q_i(t) = V_i(t) \cdot C_i(t) \cdot A_i \quad (1)$$

که در آن V سرعت مواد جامد بر حسب m/s و C درصد پرشدگی مقطع توسط مواد جامد و A مساحت مقطع بر حسب m^2 است. وقتی دبی حجمی مواد فله ای با استفاده از رابطه (۱) و بر حسب m^3/s مشخص شد، با استفاده از چگالی ظاهری که برای مثال برای گندم حدود 670 kg/m^3 هست، می توان مقدار برداشت را بر حسب kg/s تعیین نمود. در صورتیکه اندازه گیری دبی جرمی در حالت سقوط آزاد مد نظر باشد، سرعت حرکت یا ریزش مواد فله ای توسط روابط مشخصی تعیین می شود. در غیر اینصورت با اندازه گیری دور پولی محرک الواتور بالا بر یا سامانه تخلیه وابسته به محل نصب حسگر می توان سرعت را به دست آورد. مهمترین بخش رابطه فوق اندازه گیری درصد پرشدگی سطحی است که می توان برای تعیین آن از ECT بهره برد. مطابق شکل ۱ یک حسگر ECT از تعدادی حسگر (معمولاً کمتر از ۱۶ عدد) در پیرامون مقطع مورد نظر تشکیل شده که با اندازه گیری خاصیت خازنی بین الکترودها، ضریب گذردهی الکترواستاتیک (ε) را محاسبه نموده و مواد موجود در داخل حسگر را مبتنی بر ضریب گذردهی دسته بندی می کند. معمولاً فضای داخل حسگر که پتانسیل الکتریکی آن محاسبه می شود را فانتوم^۵ می گویند. بر اساس شکل ۱ ولتاژ مورد نظر به الکتروود اول اعمال شده و ظرفیت خازنی در بقیه الکترودها قرائت می شود. سپس ولتاژ به حسگر دوم اعمال شده و ظرفیت خازنی الکترودهای بعد از الکتروود دوم قرائت می شود. این فرایند تا یک الکتروود مانده به آخر انجام می گیرد. فرکانس ولتاژ اعمال شده معمولاً در محدوده مگاهرتز بوده و به خاطر حساسیت به نویزهای محیطی از یک پوشش^۶ در محیط حسگر استفاده می شود. ولتاژ اعمال شده می تواند هم AC باشد و هم به صورت DC باشد. وابسته به نوع ولتاژ اعمال شده، تزریق جریان به هر یک از الکترودها و قرائت جریان خروجی از سایر الکترودها نیازمند مدارات الکترونیکی خاصی است که هدف این مقاله نیست. بخش نرم افزاری سامانه های ECT از دو قسمت مهم تحت عنوان الگوریتم جلوسو^۷ و الگوریتم معکوس^۸ تشکیل شده

جرمی مبتنی بر یک حسگر ECT و دو حسگر الکترواستاتیک را توصیه نمودند.

به هر حال، یکی از روش هایی که کمتر در اندازه گیری جریان جرمی کمباین غلات مورد توجه قرار گرفته است استفاده از توموگرافی خازنی الکتریکی است. این روش غیرنفوذی و غیرتماسی^۱ بوده، امکان جبران رطوبت محصول وجود داشته و هزینه و همچنین نگهداری کمتری دارد. توموگرافی صنعتی بر اساس فناوری CT اسکن بوده و همزمان با توسعه کامپیوتر و حسگرها، توسعه یافته است. توموگرافی فرایندی^۲، روش نوینی را برای نمایش رفتار داخلی فرایندهای صنعتی فراهم می آورد. این روش مبتنی بر اندازه گیری خواص الکتریکی مثل ظرفیت خازنی (ECT)، امپدانس (EIT^۳) و القایی (MIT^۴) است (Shafquet, 2011). ایده توموگرافی فرایندی در سال ۱۹۸۰ مطرح شد (Zhang & Wang, 2009). فناوری ECT مشابه سایر کاربردهای توموگرافی بین رشته ای بوده و در صنایع و زمینه های مختلفی کاربرد دارد (Marashdeh, 2006). در واقع ECT یک روش اندازه گیری غیرنفوذی برای ایجاد تصویری از سطح مقطع جریان، بر اساس خاصیت دی الکتریک جریان های چند فازی است (Zheng, et al., 2018). روش ECT یک فناوری توموگرافی نسبتاً ارزان قیمت، با سرعت بالا، مقاوم، غیرتماسی و غیرنفوذی است. برخی از جریان هایی که می توان با فناوری ECT مورد پایش قرار داد عبارتند از (۱) ترکیب دو سیال (مختلف، ۲) سیال با گاز (۳) آب و روغن (۴) جریان مواد جامد و گاز (Shaib, et al., 2011).

بنابراین، هدف کلی این تحقیق طراحی، شبیه سازی و ساخت یک سامانه اندازه گیری جریان جرمی مواد فله ای مبتنی بر ECT و امکان سنجی نصب آن در کمباین های غلات به منظور اندازه گیری آنلاین جرم دانه های برداشت شده است. تمرکز این تحقیق بر روش های مختلف مش بندی سطح مقطع لوله ریزش دانه های برداشت شده به منظور به دست آوردن مناسب ترین تصویر توموگرام و افزایش دقت نهایی حسگر است.

۲- مواد و روش ها

روش های مختلفی برای تخمین غیرمستقیم دبی جرمی مواد برداشت شده وجود دارد. نوع پایش عملکرد اساساً به نوع محصول برداشت شده بستگی دارد. دو نوع اصلی حسگر جریان جرمی عبارتند از حسگرهایی که مقدار ضربه را اندازه گیری می کنند یا آنهایی که

¹ Non-invasive and non-intrusive

² Process tomography

³ Electrical impedance tomography

⁴ Magnetic induction tomography

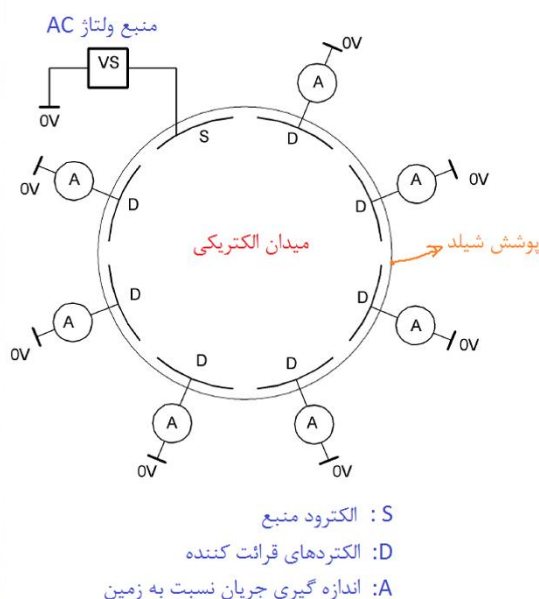
⁵ Phantom

⁶ Shield

⁷ Forward

⁸ Inverse algorithm

شدیدا کاهش یافته و نیازمند دقت بیشتر در طراحی مدارت فرستنده و گیرنده است. با توجه به حساسیت بسیار زیاد سامانه های ECT به نویز محیطی، مطابق شکل برای جلوگیری از تاثیرات نویز محیطی بر سامانه اندازه گیری، یک پوشش مسی تحت عنوان شیلد دور الکترودها کشیده شده و اتصال زمین (ارت) می شود. اطلاعات کامل ساختار حسگرها، تعداد الکترودهای فعال و غیر فعال و ساختار سخت افزار در قالب مقالات دیگری منتشر می شود. به منظور ارزیابی حسگر از گندم نمونه استفاده شد.



شکل ۱- طرحواره عملکرد ECT (سمت راست) و حسگر ساخته شده برای ارزیابی آزمایشگاهی (سمت چپ)

Fig 1. Schematic of ECT operation (right) and the sensor developed in the lab for evaluation (left)

اساس محاسبات نرم افزاری ECT مبتنی بر تعیین پتانسیل میدان (فانتوم) است. دو روش دیفرانسیلی برای تعیین پتانسیل میدان وجود دارد که عبارتند از روش المان محدود (FEM^1) و روش دیفرانسیل محدود (FDM^2). همچنین از دو روش انتگرالی شامل روش شبیه سازی منبع (SSM^3) و روش مونته کارلو^۴ نیز برای تعیین پتانسیل میدان استفاده می شود (Biswanath, 2009). آنالیز المان محدود هر مساله ای دارای چهار گام می باشد که عبارتند از: (a) مش بندی منطقه مورد نظر به تعداد مشخصی ناحیه کوچکتر تحت عنوان المان یا مش، (b) استخراج معادلات مربوط به یک المان نمونه، (c) هم گذاری همه المان های موجود در ناحیه مورد بررسی و (d) حل معادلات به دست آمده. جزئیات بیشتر از چهار مرحله فوق به منظور استخراج پتانسیل در هر یک از گره های داخل فانتوم در (Mousazadeh et

al., 2021) ارائه شده است. در ECT هدف از این عملیات، یافتن یک تقریب مناسب برای پتانسیل (Ve) داخل هر المان e و سپس درون یابی همه المان ها است تا پتانسیل درون مرزهای ناحیه مورد نظر به صورت پیوسته ای مشخص شود.

از بین چهار مرحله نام برده شده در بالا، عملیات مش بندی تاثیر مهمی در نتایج تحلیل ها و توموگرام ساخته شده داشته و می تواند دقت و البته سرعت اجرای برنامه را تحت تاثیر قرار دهد. در مش بندی محیط فانتوم، حداقل پنج متغیر می تواند نتیجه را تحت تاثیر قرار دهد که عبارتند از: (۱) شکل المان ها (مثلثی یا مستطیلی) (۲) تعداد المان ها، (۳) اندازه المان ها در نواحی مختلف، (۴) چرخش حلقه های حامل المان ها و (۵) مش بندی نواحی بیرونی حسگرها.

¹ Finite element method

² Finite difference method

³ Source simulation method

⁴ Monte Carlo

به منظور مش بندی، فانتوم مورد نظر که مقطعی دایره‌ای دارد، مطابق شکل ۲، ناحیه فانتوم به تعداد مشخصی حلقه تقسیم شده و سپس تعداد مشخصی نقاط روی حلقه‌ها ایجاد شده و با اتصال نقاط به همدیگر، المان‌ها شکل می‌گیرند. هدف از مش بندی ناحیه فانتوم، محاسبه پتانسیل داخل هر نقطه از فانتوم بوده تا بتوان مبتنی بر پتانسیل مورد نظر، مقدار ضریب گذردهی الکترواستاتیک (E) را در هر نقطه مشخص تعیین نمود و نهایتاً فضای اشغال شده توسط هر فاز را برآورد نمود. دو شکل مثلثی و مستطیلی رایج ترین شکل‌های مورد استفاده در مش بندی توموگرافی هستند. شکل مستطیلی معمولاً در FDM رایج است و شکل مثلثی در FEM استفاده می‌شود (Li, 2008).

- (a) تعداد ۵۷۶ المان به روش مش بندی متداول
 (b) تعداد ۲۰۴۸ المان با چرخش حلقه‌های حامل المان‌ها به منظور حذف کانال‌های ایجاد شده
 (c) تعداد ۱۴۶۰ المان با مش بندی محیط بیرونی الکترودها و چرخش حلقه‌ها
 (d) تعداد ۲۰۴۸ المان با چرخش حلقه‌ها و المان بندی بسیار ریز در مجاورت الکترودها

دومین پارامتر موثر تعداد مش‌ها یا المان‌ها است. هرچه تعداد المان‌ها بیشتر باشد، تفکیک پذیری بهتری به دست آمده و نتیجه نهایی بهبود می‌یابد. البته بدیهی است که افزایش تعداد المان‌ها بتواند توزیع پتانسیل را نزدیک به مقدار واقعی آن تخمین کند، به هر حال تاثیر آن در این مساله خاص و در کنار ارزیابی سایر پارامترها و تاثیر متقابل پارامترهای مورد ارزیابی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مثال زمان اجرای برنامه که در سامانه‌های اندازه‌گیری برخط (مشابه اندازه‌گیری جریان جرمی مواد فله‌ای در کمباین‌ها) یک عامل اساسی است به صورت نمایی با افزایش تعداد المان‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین تعیین حداکثر تعداد المان‌ها می‌تواند مصالحه‌ای باشد بین کیفیت تصاویر توموگرام و زمان اجرای برنامه برای ساخت هر فریم از تصویر. برخلاف توموگرافی امپدانس الکتریکی (EIT) که در آن ناحیه مورد نظر به المان‌های با اندازه تقریباً یکسان تقسیم می‌شود، در ECT اندازه مش-بندی در حلقه‌های بیرونی معمولاً خیلی کوچکتر از حلقه‌های داخلی لحاظ می‌شود. از آنجایی که شدت میدان الکتریکی از حسگرهایی واقع در بیرون فانتوم به سمت داخل یا مرکز انتشار می‌یابد بنابراین، تقریب مناسب در حلقه‌های بیرونی نتایج مستقیمی بر خطی‌سازی میدان الکتریکی داشته و توموگرام مناسبی ایجاد می‌کند. چهارمین پارامتر موثر در مش بندی ناحیه مورد بررسی، دوران حلقه‌ها نسبت به همدیگر است. مطابق شکل ۲-۲ در روش مش بندی ساده، از آنجاییکه در برخی نقاط مش‌ها تقریباً به شکل مثلث قائم الزاویه بوده و زوایای راست گوشه آنها در امتداد همدیگر قرار می‌گیرند یک مسیر و کانال مجازی مشخصی برای جریان میدان الکتریکی ایجاد کرده و تقارن محیط را از بین می‌برد. این کانال مجازی، باعث تخمین غیر دقیق پتانسیل الکتریکی شده و باعث ایجاد خطا در نتایج می‌شود. برای حل این مشکل، از هر سه حلقه پشت سرهم، دو تا از حلقه‌ها با زاویه مشخص تقریباً 60° CCW نسبت به هم دوران داده شدند (شکل ۲-۲). پنجمین پارامتر مورد ارزیابی، عبارت است از مش بندی ناحیه بین الکترودها و شیلد پشت الکترودها (شکل ۲-۲). این ناحیه در برخی تحقیقات بالاخص در روش FDM به منظور بهبود نتایج، مش بندی می‌شود

با توجه به اینکه الکترودها در سطوح بیرونی لوله چسبانده شده اند، در حالت‌های (a)، (b)، و (c) اولین حلقه از مش‌ها به عنوان ضخامت لوله در نظر گرفته شد. در شکل (d) سه حلقه اول از مش‌ها به اندازه ضخامت لوله است. بنابراین، تعداد المان‌های موثر داخل فانتوم برای (a)، (b)، (c) و (d) به ترتیب برابر ۴۸۴، ۱۸۰۳، ۹۰۰ و ۱۳۵۲ عدد خواهد بود. بقیه المان‌ها به عنوان ضخامت لوله به صورت جداگانه در محاسبات شرکت داده می‌شوند.

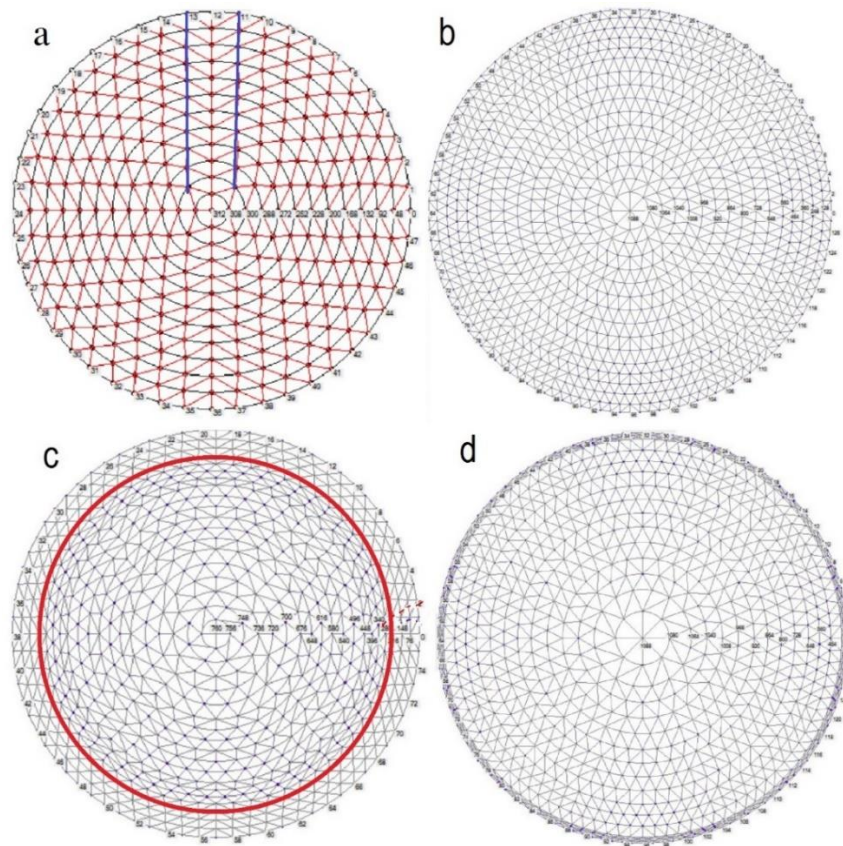
با لحاظ همه پارامترهای موثر، مقطعی به اندازه ۲۰۰ mm که نزدیک به قطر لوله‌های تخلیه و بارگیری کمباین غلات است با تعداد متفاوتی از المان‌ها از ۲۰۴۸-۷۲ المان مش بندی شد و چهار حالت مش بندی مورد مقایسه قرار گرفت. مقطع فوق برابر مقطع حسگر ساخته شده در شکل ۱ است. با مصالحه بین دو پارامتر دقت و زمان اجرا که در تضاد با همدیگر هستند، مش بندی نهایی با ۲۰۴۸ المان و ۱۰۸۹ گره و با المان‌های ریزتر در سه حلقه اول در شکل (d) نشان داده شده است. در ساخت و ترسیم تصاویر توموگرام یکی از زمان برترین بخش محاسبات، تعیین ماتریس حساسیت است. برای یک حسگر ECT با تعداد ۸ عدد حسگر و تعداد ۲۰۴۸ المان مش بندی، زمان محاسبه ماتریس حساسیت با کامپیوتر با CPU; Core i5 Intel حدود ۱۶ ساعت طول می‌کشد. برای برخی الگوریتم‌های مورد استفاده در سامانه پایش برخط، می‌توان ماتریس حساسیت را فقط یکبار اجرا کرده و در برنامه ذخیره نمود و با فراخواندن آن مورد استفاده قرار داد. بنابراین در این تحقیق، زمان اجرای برنامه به ازای هر فریم با فرض ثابت بودن ماتریس حساسیت مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در رابطه با مقایسه خطا نیز مطابق رابطه (۲) از $RMSE^1$ استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n_{data}} (A_{fill_desi} - A_{fill_tomo})^2}{n_{data}}} * 100\% \quad (2)$$

که در آن A_{fill_desi} عبارت است از مساحت سطح شی لحاظ شده داخل فانتوم، A_{fill_tomo} مساحت توموگرام به دست آمده و n_{data} تعداد کل داده‌های مورد بررسی. همه محاسبات شامل مش بندی،

¹ Root mean square error

محاسبات پتانسیل و FEM و شبیه‌سازی و داده‌گیری از حسگر در نرم‌افزار اختصاصی نوشته شده با C# انجام گرفت.



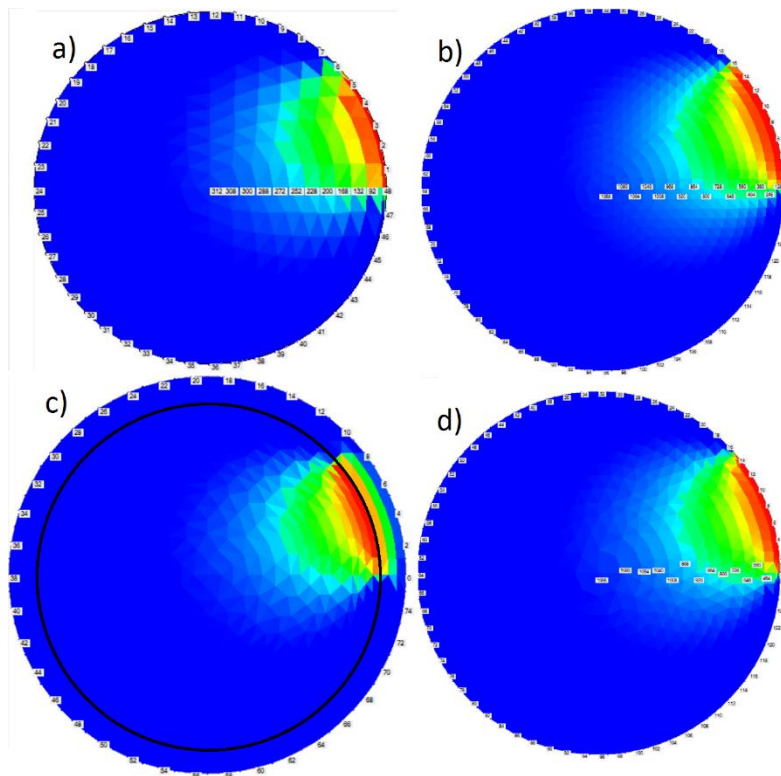
شکل ۲- مش بندی ناحیه مورد نظر؛ (a) روش مرسوم، (b) دوران حلقه‌ها، (c) مش بندی ناحیه بیرونی و (d) مش بندی ریز در مجاورت الکترودها

Fig 2. Discretizing the region of interest; a) common method, b) loops rotation, c) meshing back region of electrodes and d) small meshes in the proximity of electrodes

دهد. مطابق شکل در حالت‌های (b) و (d) که تعداد المان‌ها زیادتر است یکنواختی بهتری در داخل فانتوم قابل مشاهده است. در حالت (c) با توجه به اینکه میدان الکتریکی در فضای پشت الکترودها نیز شکل می‌گیرد و با توجه به اینکه بخش کوچکی از جریان القا شده در الکترودهای گیرنده ممکن است از ناحیه فوق بوده باشد، بنابراین با لحاظ کردن ناحیه بیرون الکترودها دقت می‌تواند افزایش یابد. به هر حال، با توجه به اینکه یک پوشش شیلد با فاصله نزدیک از سطوح پشتی الکترودها عبور داده می‌شود تاثیر این مسیر را می‌توان بیشتر کاهش داد.

۳- نتایج و بحث

در الگوریتم ECT محاسبات و ساخت تصویر توموگرام مبتنی بر میدان پتانسیل داخل فانتوم صورت می‌گیرد. بنابراین دقت پتانسیل میدان، ارتباط مستقیمی با تصویر ساخته شده و در کل دقت حسگر ساخته شده خواهد داشت. شکل (۳) پتانسیل میدان ساخته شده را برای چهار حالت (a)، (b)، (c) و (d) که در آن الکترود اول به منبع توان وصل شده و بقیه الکترودها به زمین متصل شده اند، نشان می‌دهد.



شکل ۳- پتانسیل میدان برای مش بندی چهار حالت مورد بررسی

Fig 3. Field potential for discretizing of four evaluated cases

موثر در داخل فانتوم، کمتر است زیرا سه حلقه بیرونی المان‌ها به عنوان ضخامت لوله لحاظ شده است. عملاً زمان اجرای بیش از یک ثانیه برای کاربردهای برخط مناسب نیست. ولی برای الگوریتم‌های غیر تکرار شونده می‌توان برخی محاسبات را از پیش انجام داده و نتیجه را در هارد ذخیره نمود و موقع اجرا، فقط فراخوان کرد. با این روش، هر چهار حالت فوق را می‌توان برای الگوریتم‌های غیر تکراری به صورت برخط استفاده نمود. البته الگوریتم‌های تکراری نسبت به الگوریتم‌های غیر تکراری دقت را بهبود می‌بخشند. باید بین زمان اجرای برنامه و درصد خطای ایجاد شده یک مصالحه‌ای صورت بگیرد. هرچه تعداد المان‌های بیشتر باشد، محیط بیرونی الکترودها مش بندی شود و از الگوریتم‌های تکرار شونده استفاده شود، دقت حسگر بیشتر شده و در عوض زمان اجرای برنامه زیاد خواهد شد. در شکل ۶ درصد خطای ساخت تصویر توموگرام مبتنی بر رابطه (۲) نشان داده شده است. سطح مساحت تعیین شده توسط رابطه فوق به سطح مساحت کلی تقسیم شده و نمودار فوق بدون واحد و بر حسب درصد است. مطابق این شکل، دو حالت (b) و (d) که دارای المان‌های بیشتر بودند، دارای درصد خطای کمتری نیز هستند. گرچه این دو حالت دارای خطای تقریباً یکسانی هستند ولی زمان اجرای حالت (d) چندین برابر کمتر از حالت (b) است. زیرا تعداد المان‌های داخل محدوده فانتوم کمتر

به منظور تعیین زمان اجرای هر فریم و همچنین دقت تصویر سازی چهار حالت مورد بررسی، تعدادی شی با ضریب گذردهی الکتریکی تقریباً به اندازه غلات، داخل فانتوم لحاظ شده و تصویر ایجاد شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه شی لحاظ شده و تصویر ناشی از آن در ستون سمت چپ شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل فوق فرض شده بخش مرکزی فانتوم با گندم با ضریب گذردهی الکتریکی $\epsilon = 5$ پر شده باشد. سپس تهیه تصویر توموگرام مبتنی بر ماتریس حساسیت از پیش ساخته شده و همچنین الگوریتم گوس-نیوتن با روش منظم سازی تیخونوف^۱ انجام گرفت (Tarabi, et al., 2021). نمونه تصویر توموگرام ساخته شده برای چهار حالت مختلف در ستون سمت راست شکل ۴ نشان داده شده است. یکی از پارامترهای مهم و تعیین کننده در سامانه های توموگرافی برخط، زمان اجرای هر فریم برای ساخت تصویر توموگرام است. بالاخص در الگوریتم‌های تکراری^۲ که برای ساخت هر فریم تصویر لازم است الگوریتم چندین بار اجرا شود. زمان لازم برای ساخت تصویر توموگرام برای چهار حالت (a)، (b)، (c) و (d) در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق شکل، تعداد المان‌های هر حالت، تناسب لگاریتمی با زمان اجرای برنامه دارد. برای مش بندی حالت اول زمان اجرا کمتر از یک ثانیه و برای حالت (b) زمان اجرای هر فریم به بیش از ۱۰۰ ثانیه می‌رسد. در حالت (d) نیز گرچه تعداد کل المان‌ها با حالت (b) برابر است ولی تعداد المان‌های

² Iterative

¹ Tikhonov

Fig 5. Run-time for one frame in four evaluated cases

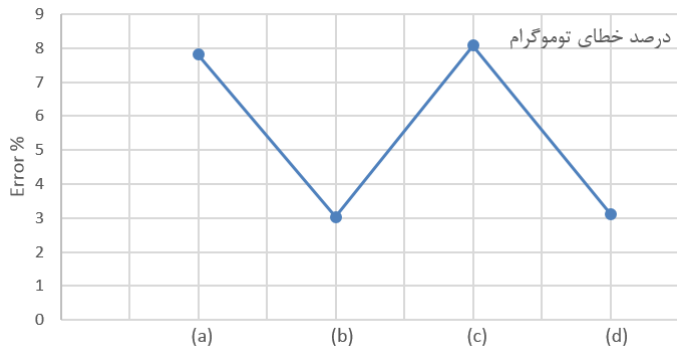


Fig 6. Reconstructed tomograms precision in four evaluated cases.

بوده و به ازای تعداد المان‌های کمتر به دلیل مش‌بندی ریزتر در مجاورت الکترودها توانسته است دقت یکسانی را ارائه کند.

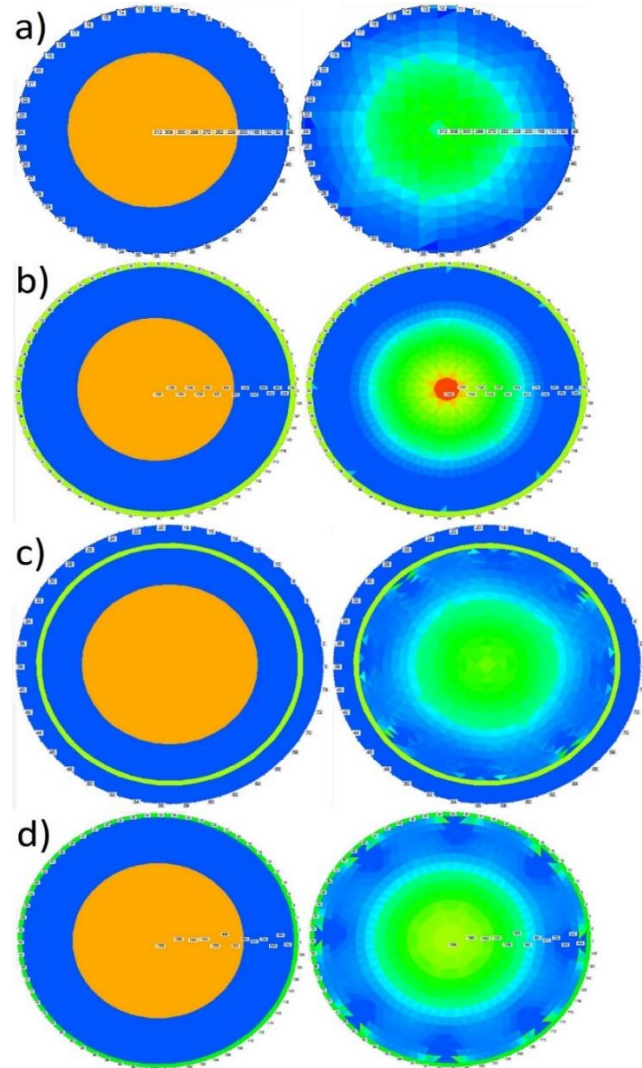


Fig 4. Typical tomograms reconstructed for four evaluated cases

Fig 5. Run-time for one frame in four evaluated cases

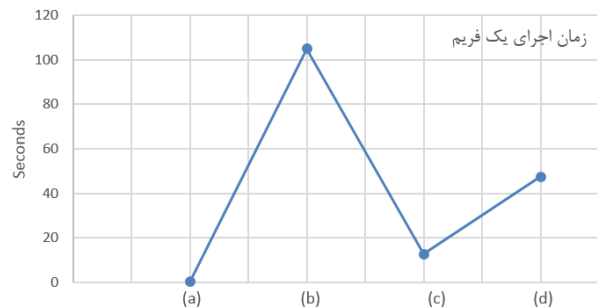


Fig 6. Reconstructed tomograms precision in four evaluated cases.

۳- نتیجه‌گیری نهایی

تاثیر چهار روش مش‌بندی روی دقت تصاویر توموگرام ساخته شده و همچنین زمان اجرای هر فریم در یک سامانه ECT مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق نتایج به دست آمده از بین چهار حالت مورد ارزیابی، ریزتر کردن المان‌ها در مجاورت الکترودها تاثیر قابل توجهی در افزایش دقت حسگر ECT دارد. همچنین هرچه تعداد المان‌ها بیشتر باشد دقت افزایش می‌یابد. بنابراین بهتر است تعداد المان‌ها را تا حدی زیادتر کرد که شرط برخط بودن اندازه‌گیری نقض نشود. با لحاظ شرایط فوق تعداد الان به دست آمده برای لوله‌ای به قطر mm ۲۰۰ حدود ۲۰۴۸ به دست آمد. همچنین دوران دادن حلقه‌های المان نیز بدون اینکه تاثیری در زمان اجرای برنامه داشته باشد نتایج را بهبود می‌بخشد. بنابراین به عنوان نتیجه‌گیری کلی در مش‌بندی سطح مقطعی متناسب با قطر mm ۲۰۰، تعداد مش مناسب حدود ۲۰۴۸ عدد، اندازه مش‌ها در نزدیکی الکترودها ریزتر بوده و همچنین دوران حلقه‌های داخل فانтом می‌تواند کیفیت توموگرام‌های ساخته شده را افزایش دهد.

سپاس‌گزاری

از مساعدت و حمایت سازمان بنادر و دریانوردی در تامین هزینه این طرح پژوهشی-کاربردی به شماره ۲۰/۶۶۶۸/ص از تاریخ ۱۳۹۹-۱۴۰۱ تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

منابع

Basu, S. (2019). Plant Flow Measurement and Control Handbook (Book Chapter; Solid flow measurement). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812437-6.00008-1>

Biswanath M. (2009). Electric field calculations by numerical techniques. A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of bachelor of technology.

Department of electrical engineering national institute of technology Rourkela.

Hunt, A. (2014). Weighing without touching applying electrical capacitance tomography to mass flow rate measurement in multiphase flows. *Measurement and Control*. Vol. 47(1) 19–25.

Li, Y. (2008). Key issues of 2D 3D image reconstruction in electrical tomography. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. University of Manchester.

Marashdeh, Q. (2006). Advances in electrical capacitance tomography. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. The Ohio State University.

Mokhtar, KH. Z. (2018). Gas/Solids mass flow measurement by electrical capacitance tomography and electrostatic sensors. A thesis submitted to the niversity of Manchester for the degree of master of philosophy in the faculty of science and engineering.

Mousazadeh, H., Tarabi, N., Taghizadeh-Tameh, J., Kiapey, A. and Mohammadid, F. (2021). Potential distribution and sensitivity map in ECT systems based on finite element method. 13th Iranian National Congress on Biosystems Engineering and Mechanization.

Shafquet, A. SH. (2011). Measurement of void fraction using electrical capacitance tomography for air-water co-current bubble column. Master's thesis, University Technology PETRONAS.

Shafquet, A., Ismail, I., Jaafar, A. (2014). Modeling and simulation of multi-plane electrical capacitance tomography sensor for flow imaging by using finite element analysis. 978-1-4799-4653-2/14/\$31.00 © 2014 IEEE.

Shaib, M. F. B. A., Mohamad, E. J., Rahim, R. A., Jamil, M. B. A., Ling, L. P. (2011). An Overview: Effectiveness of different arrangement for electrode guard in electrical capacitance tomography. *Sensors & Transducers Journal*, Vol. 135, Issue 12.

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*. p. 101986.

Yan, H., Shao, F., Wang, S. (1999). Simulation Study of Capacitance Tomography Sensors. 1st Word Congress on Industrial Tomography, Buxton, Greater Manchester, April 14-17.

Zhang, L. F., Wang, H. X. (2009). A new normalization method based on electrical field lines for electrical capacitance tomography. *Meas. Sci. Technol.* 7pp.

Zheng, J., Jinku, L., Yi, L., Lihui, P. (2018). A Benchmark dataset and deep learning-based image reconstruction for electrical capacitance tomography. *Sensors*. 18, 3701.