



Design, construction and evaluation of an electrical capacitance tomography system to monitor grains flow passing through pipeline

Nazilla Tarabi^{1✉} | Hossein Mousazadeh² | Jalil Taghizadeh-Tameh³

1. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: tarabi99@ut.ac.ir
2. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: hmousazadeh@ut.ac.ir
3. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: taghizadeh68@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 5, 2023

Revised: June. 24, 2023

Accepted: July. 6, 2023

Published online: Spring, 2023

Keywords:

Capacitance; Electrical tomography; Grains; Image reconstruction

ABSTRACT

In determining the mass flow rate of bulk materials such as grains that pass through closed channels such as pipes, the online measurement of the volume ratio of solid materials and their distribution in the pipe cross-section is of particular importance. Considering the features of conventional methods such as be creating obstacles in the passage of materials (permeability) and low accuracy, in this research the non-contact tomography method of electrical capacitance was investigated for monitoring the flow of solid materials. In this method, to measure the amount of material and its density, it uses the measurement of the dielectric properties of the material inside the pipe. The developed electro-capacitance tomography system has 8 main electrodes and 16 secondary electrodes, anti-noise guards and a transmitter and receiver circuit, which was installed on a non-conductive pipe with a diameter of 20 cm. The main problem in the performance of the electro-capacitance tomography is the noise and lack of optimal image reconstruction with the conventional LBP algorithm. In this study, the performance of Tikhonov algorithm was compared with the conventional LBP algorithm. In this research, by using different guards, the noise level of the system was reduced so that the signal-to-noise ratio reached 56.09 dB. The results of the comparison of two algorithms showed that the Tikhonov algorithm has a good behavior in reconstruction of a tomogram of the wheat mass next to the pipe walls compared to the LBP algorithm, and except for the condition that the pipe is completely full, in other filling patterns of the pipe, has a better performance.

Cite this article: Tarabi, N., Mousazadeh, H., & Taghizadeh-Tameh, J. (2023). Design, construction and evaluation of an electrical capacitance tomography system to monitor grains flow passing through pipeline, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 54 (1), 37-52. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.357391.665508>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.357391.665508>



طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه توموگرافی الکتروخازنی به منظور پایش برخط جریان غلات عبوری از لوله

نازیلا طربی^۱ | حسین موسی‌زاده^۲ | جلیل تقی‌زاده‌طامه^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه

تهران، کرج، ایران. رایانامه: tarabi99@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

رایانامه: hmousazadeh@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

رایانامه: taghizadeh68@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

در تعیین دبی جرمی مواد فله‌ای مانند غلات که از مجاری بسته چون لوله عبور می‌کنند، اندازه‌گیری برخط نسبت حجمی مواد جامد و توزیع آنها در مقطع لوله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به نقاط ضعف روش‌های موجود مانند ایجاد مانع در مسیر عبور مواد (نفوذی بودن) و دقت پایین، در این پژوهش روش غیرتماسی توموگرافی ظرفیت خازنی الکتریکی برای پایش جریان مواد فله‌ای مورد بررسی قرار گرفت که برای تعیین میزان مواد و تراکم آن، از اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک مواد درون لوله استفاده می‌کند. سامانه توموگرافی الکتروخازنی ساخته شده دارای ۸ الکتروود اصلی و ۱۶ الکتروود فرعی، محافظ‌های ضد نویز و مدار فرستنده و گیرنده است که بر روی لوله نارسانا به قطر ۲۰ سانتی‌متر نصب شد. مشکل عمده در عملکرد توموگرافی الکتروخازنی موجود، نویزپذیری و عدم بازسازی تصویر مطلوب با الگوریتم مرسوم LBP است. به همین دلیل در این پژوهش عملکرد الگوریتم Tikhonov با الگوریتم مرسوم LBP مقایسه شد. در این پژوهش با استفاده از محافظ‌های مختلف، نویزپذیری سامانه کاهش داده شد به طوری که نرخ سیگنال به نویز به میزان ۵۶/۰۹ دسی‌بل رسید که نشان‌دهنده کیفیت مطلوب سیگنال است. مقایسه دو الگوریتم نشان داد که الگوریتم Tikhonov دارای رفتار مناسبی در ساخت توموگرام از توده گندم در کنار دیواره های لوله در مقایسه با الگوریتم LBP بوده و بجز شرایطی که لوله به طور کامل پر است، در سایر الگوهای پرشدگی مقطع لوله، دارای عملکرد مطلوب‌تری است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۴/۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۱۵

تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

توموگرافی الکتریکی،

تصویرسازی،

ظرفیت خازنی،

غلات

استناد: طربی، نازیلا؛ موسی‌زاده، حسین؛ و تقی‌زاده‌طامه، جلیل (۱۴۰۲). طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه توموگرافی الکتروخازنی به منظور پایش برخط جریان غلات عبوری

از لوله، مجله مهندسی بیوسیستم ایران، ۵۴ (۱)، ۵۲-۳۷. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.357391.665508>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.357391.665508>

مقدمه

پایش برخط توزیع و تراکم مواد جامد فله‌ای که از لوله عبور می‌کنند برای تعیین دبی جرمی مواد در فرایندهای مختلف در کشاورزی (مانند تخلیه مواد از سیلو و لوله بالابر دانه کمباین به منظور تهیه نقشه عملکردی مزرعه)، صنایع پتروشیمی و معدن (Voss et al., 2020)، صنایع غذایی و دارویی، تخلیه مواد فله در بندر و اسکله‌ها، مورد نیاز است. روش‌های مکانیکی مرسوم اندازه‌گیری دبی جرمی سیال دوفازی جامد-گاز شامل روش‌های مبتنی بر نیروی مرکزگرا^۱ (کریمیان، ۱۳۹۸)، نیروی ضربه و همچنین کوریولیس (Zheng et al., 2016) هستند که مهمترین معایب این روش‌ها محدودیت در ابعاد و دقت اندازه‌گیری است. استفاده از روش هسته‌ای از دیگر روش‌های تعیین دبی جرمی مواد است که به دلیل استفاده از یک منبع رادیواکتیو دارای معایب متعددی است (Vetter et al., 2018). روش اپتیکال یا نوری در غلظت‌های پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد (Lambrou et al., 2014). امواج التراسونیک نیز به دو صورت پس‌پراکندگی^۲ و تضعیف^۳ برای تعیین دبی جرمی مواد جامد مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالت تضعیف، در تراکم بالای مواد، امواج ارسالی قدرت عبور از مواد را نداشته و بطور کامل تضعیف می‌شوند و قابلیت اندازه‌گیری پاسخ را ندارند (Figueiredo et al., 2016). در تکنیک پراکندگی نیز در محیط‌های بزرگ و تراکم بالا، سیگنال بازتابی شدیدا تحت تاثیر نویز بوده و نرخ سیگنال به نویز پایین است و عملکرد مطلوبی ندارد (Felix, D., 2017). بنابراین نیاز به ارائه روش غیرنفوذی و غیرتماسی و در عین حال با قابلیت بکارگیری در تراکم‌های مختلف مواد جامد و اشغال فضای کم وجود دارد. با توجه به نقاط ضعف روش‌های موجود، در این پژوهش روش توموگرافی برای پایش جریان مواد فله‌ای مانند غلات مورد بررسی قرار گرفت.

عملیات توموگرافی به روشی اطلاق می‌شود که در آن به کمک آرایه‌ای از اندازه‌گیری‌های محیطی از پیرامون یک جسم یا فانتوم، تصویر توزیع مواد مختلف از فانتوم بازسازی می‌شود (Wang, 2022). روش‌های توموگرافی کامپیوتری (CT Scan) و تصویرسازی رزونانس مغناطیسی (MRI) که در پزشکی بکار می‌روند جزء شناخته شده‌ترین روش‌های توموگرافی می‌باشند. هرچند این روش‌ها دارای مزیت نسبی در کیفیت نتایج خروجی خود هستند، ولی هزینه بالای استفاده از این سامانه‌ها و نوع روش بکار گرفته شده که مستلزم استفاده از اشعه‌های ایکس، گاما و یا بکارگیری میدان‌های مغناطیسی قوی می‌باشند (Sharif et al., 2022; Dichter, 2022) مهمترین عامل محدودکننده در بکارگیری این روش‌ها در صنعت است. به همین دلیل روش‌های توموگرافی الکتریکی^۴ در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند. توموگرافی الکتریکی یک روش غیرنفوذی است که تصویر دوبعدی یا سه بعدی از مقطع مورد بررسی ارائه می‌دهد و دارای هزینه پایین‌تری در مقایسه با سایر روش‌های توموگرافی است. توموگرافی الکتریکی به سه زیر مجموعه توموگرافی امپدانس الکتریکی (EIT)، توموگرافی الکتروخازنی (ECT) و توموگرافی القای الکترومغناطیس (MIT) تقسیم می‌شود که هر یک با توجه به نوع خصوصیات فیزیکی مواد اندازه‌گیری مانند رسانایی الکتریکی، ضریب نفوذپذیری و خاصیت گذردهی مواد قابلیت بکارگیری دارند. بنابراین کاربردهای هر یک از آنها نیز متفاوت خواهد بود. جدول ۱ راهنمایی برای انتخاب مناسب‌ترین تکنیک توموگرافی الکتریکی برای فرایندهای مختلف صنعتی برحسب مشخصه فیزیکی مواد و محیط مورد هدف را نشان می‌دهد (Wang, 2022). مواد عبوری که در این پژوهش مورد نظر است توده‌های گندمی است که در فضای بین دانه‌های آن هوا وجود دارد. بنابراین مواد مورد مطالعه در فاز جامد و گاز قرار دارند که نارسا هستند. با توجه به جدول ۱، توموگرافی الکتروخازنی یا به بطور خلاصه ECT در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. توموگرافی الکتروخازنی یک تکنیک بازسازی تصویر غیرنفوذی و غیرتماسی است که برای تعیین اطلاعاتی درباره محتوای محیط مورد بررسی مانند نسبت حجمی مواد جامد، تراکم یا غلظت مواد، از اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک مواد درون لوله یا مجرا استفاده می‌کند. در این تکنیک، توزیع گذردهی که با توزیع ذرات در مقطع لوله متناسب است، با استفاده از اندازه‌گیری ظرفیت خازنی تعیین می‌شود (Mohamad et al., 2016). توجه به این نکته ضروری است که خواص دی‌الکتریک مواد، تحت تاثیر تغییرات دما و رطوبت مواد نیز است. بنابراین ضروری است برای خنثی‌سازی تاثیر تغییرات دما و رطوبت، سامانه مورد نظر با مقادیر دما و رطوبت محیط هر چند دقیقه یکبار به طور خودکار، واسنجی شود. براساس نوع سیگنال تحریک یا فرستنده، اجرای ECT به دو روش تقسیم‌بندی می‌شود: روش اول مبتنی بر جریان AC^۵ است که در آن سیگنال تحریک موج سینوسی است و روش دوم مبتنی بر شارژ و دشارژ است که سیگنال تحریک در آن موج مربعی

1. Centripetal
2. Backscatter
3. Attenuation
4. Electrical tomography
5. AC-based ECT system

است که در این بررسی از روش مبتنی بر AC استفاده می‌شود و برای این منظور از اعمال موج سینوسی با ولتاژ ثابت به الکترودهایی که در پیرامون لوله چیده شده بهره می‌برد و سپس از سایر الکترودها، سیگنال گیرنده در قالب جریان الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود.

جدول ۱. مقایسه مشخصه‌های بین EIT, ECT, MIT (Wang, 2022)

نوع سامانه توموگرافی	ویژگی‌های حسگرها	خصوصیات الکتریکی	محیط مورد هدف
EIT 	الکترودها (تماسی و غیرنفوذی)	رسانایی الکتریکی (\square): 10^{-10} S/m و ضریب گذردهی (\square): ۱-۱۰۰	مواد رسانای الکتریکی (آب، مواد شیمیایی) مواد نیمه رسانا مانند سیلیکون، بافت‌های بیولوژیک
ECT 	صفحات خازنی (غیرتماسی و غیرنفوذی)	ضریب گذردهی نسبی (\square): ۱-۱۰۰ (و رسانایی الکتریکی \square): کمتر از 0.1 S/m	مواد دی‌الکتریک و غیر فلزی (گاز، نفت، مواد غیر فلزی، پلیمر)
MIT 	سیم‌پیچ‌ها (غیرتماسی و غیرنفوذی)	رسانایی الکتریکی (\square): 10^{-10} S/m و نفوذپذیری مغناطیسی (\square): ۱-۱۰۰۰۰	مواد رسانای الکتریکی (آب، فلزات)، برخی مواد معدنی، مواد مغناطیسی، بافت‌های بیولوژیک، گرافیت

در یک بررسی، عملکرد سامانه توموگرافی ظرفیت خازنی الکتریکی برای پایش سیال دوفازی در شرایطی که لوله در حالت عمودی و شیب‌دار بود و فاز مایع، روغن و فاز گاز، هوا بود، ارزیابی شد. تصویر واقعی از عبور سیال توسط چندین دوربین که در لوله قرار داده شده بود گرفته شد و با توموگرام‌های حاصل از سامانه ECT مقایسه شد. نتایج نشان داد خطای ۸۸ درصد از داده‌ها بین ۱۰ تا ۵ درصد و خطای ۹۸ درصد داده‌ها زیر ۲۰ درصد بود (Almutairi et al., 2020). در پژوهش دیگری، برای بهبود عملکرد سامانه ECT از محافظ‌های محوری ثابت در دو طرف الکترودهای اندازه‌گیری استفاده شد تا به این ترتیب نویزپذیری سامانه کمتر شود. برای بیان کیفیت سیگنال از پارامتر نرخ سیگنال به نویز (SNR) که نشان‌دهنده مقاومت سیگنال به نویز و کیفیت بهتر سیگنال است، استفاده شد و پس از بهبود چیدمان الکترودها نرخ سیگنال به نویز به $10/8$ دسی‌بل رسید. همچنین در این پژوهش عملکرد دو مدل مدار فرستنده مورد بررسی قرار گرفت یک نمونه همان مدار مبتنی بر AC مرسوم و دیگری مدار تفاضلی بود (C/V) که در آن از دو منبع تولید موج سینوسی با دامنه یکسان اما در دو فاز مختلف استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که نرخ سیگنال به نویز در مدار C/V کمتر از مدار مرسوم مبتنی بر AC است که نتیجه مطلوبی نبود (Cui et al., 2015). در پژوهش انجام شده توسط Wang et al. (2020) از توموگرافی ظرفیت خازنی الکتریکی برای پایش سیال دوفازی گاز-جامد در راکتورهای بستر سیال متلاطم استفاده شد. در این بررسی از یک توزیع کننده گاز فراکتال نیز استفاده شد و نتایج ارزیابی توموگرام‌های حاصل از ECT نشان داد که غلظت ذرات با توزیع کننده گاز فراکتال بالاتر از غلظت‌های بدون توزیع کننده گاز فراکتال در شرایط عملیاتی یکسان است، که نشان می‌دهد توزیع کننده گاز فراکتال برای افزایش حرکت رو به بالا ذرات در راکتور مطلوب است. در تحقیقی مشابه، عملکرد دو سامانه ECT و شبیه‌سازی CFD برای بررسی مشخصه‌های جریان جامد-گاز در راکتور بستر سیال با یک لوله ورستر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که برای تضمین گردش مداوم مواد جامد در بستر و بررسی پوشش یکنواخت آن در بستر، استفاده از سامانه توموگرافی خازنی دارای عملکرد مطلوبی است (Zhou et al., 2019).

تحقیقات دیگری نیز در زمینه بکارگیری توموگرافی خازنی برای پایش سیال دوفازی انجام شده است (Roman et al., 2020; Perera et al., 2017) و نتایج نشان داده در اغلب موارد عامل محدود کننده در بکارگیری توموگرافی خازنی، سرعت پایین محاسبات و در نتیجه محدودیت در کاربردهای برخط و البته نویزپذیری بالا است. یکی از عوامل موثر در افزایش سرعت پردازش اطلاعات، انتخاب نوع الگوریتم بازسازی تصویر است. مرسوم‌ترین الگوریتم بازسازی تصویر در ECT، الگوریتم LBP^۱ است که به دلیل سادگی، محاسبات آن نیز با سرعت بیشتر انجام می‌شود اما از صحت مطلوبی برخوردار نیست. در پژوهشی که توسط Zhang & Zhang (2021) انجام شد عملکرد الگوریتم بازسازی تصویر آنیل^۲ بهینه‌سازی شده با عملکرد الگوریتم LBP برای جریان دوفازی نفت-گاز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که این الگوریتم از سرعت خوبی برای بازسازی تصویر برخوردار است اما نیاز به بهینه‌سازی‌های بیشتری دارد.

1. Linear back-projection
2. Annealing algorithm

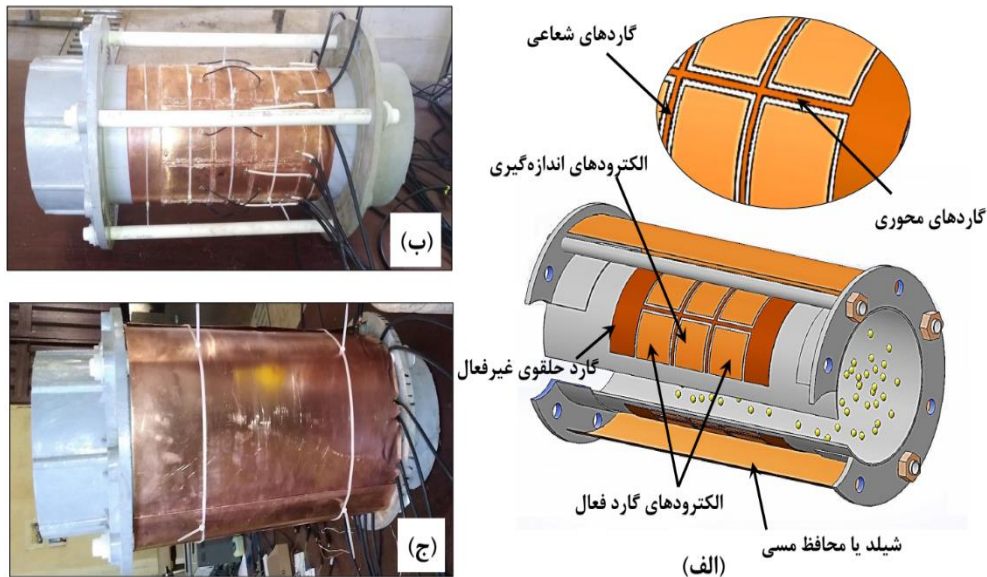
با توجه به مطالب ذکر شده در این پژوهش، هدف بهبود در عملکرد سامانه توموگرافی خازنی با بکارگیری چیدمان مناسب برای الکترودها و محافظ‌های اطراف آن و استفاده از الگوریتم بازسازی Tikhonov بجای الگوریتم مرسوم LBP در پایش جریان مواد جامد-گازی است که فاز جامد آن دانه‌های گندم و فاز گاز آن هوا است. در این پژوهش پس از ساخت سامانه و تشکیل توموگرام‌ها به بررسی پارامترهایی چون نرخ سیگنال به نویز (نشان‌دهنده کیفیت سیگنال) و تغییرات پتانسیل الکتریکی (معیاری برای بیان حساسیت) پرداخته می‌شود و برای صحت سنجی سامانه پارامتر میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد میانگین مطلق خطا (MAPE) و انحراف استاندارد (SD) برای هر دو الگوریتم بازسازی تصویر مورد مقایسه و بحث قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

بمنظور ارزیابی قابلیت سامانه توموگرافی الکتروخازنی در تعیین توزیع دانه غلات در مقطع لوله و اندازه‌گیری دبی جرمی مواد عبوری، سامانه مبتنی بر توموگرافی الکتروخازنی (ظرفیت الکتریکی) طراحی و ساخته شد. این سامانه مانند سایر سامانه توموگرافی سه بخش دارد. بخش اول شامل حسگرهای خازنی است. حسگرها در واقع، مجموعه‌ای از الکترودهایی هستند که پیرامون محیط مورد بررسی چیده شده‌اند. بخش دوم، مدارهای تحریک حسگرها و اندازه‌گیری پاسخ از حسگرها هستند و بخش سوم شامل الگوریتم بازسازی تصویر و استخراج اطلاعات توزیع ذرات در مقطع لوله است که در ادامه به مراحل اجرای هر بخش پرداخته می‌شود.

حسگرهای توموگرافی خازنی

در ساخت الکترودهای خازنی از صفحه مسی به ضخامت 0.5 میلی‌متر استفاده شد. در سامانه توموگرافی الکتروخازنی ساخته شده دو نوع الکترودها در نظر گرفته شد، الکترودهای اندازه‌گیری کننده یا الکترودهای اصلی و الکترودهای محافظ فعال^۱ یا الکترودهای فرعی که شکل ۱-الف نمای برش خورده و شماتیکی از حسگر خازنی ساخته شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. ابعاد الکترودهای اصلی و الکترودهای محافظ فعال برابر با 10×10 سانتی‌متر بود. در سامانه توموگرافی خازنی، عموماً از ۸، ۱۲ و یا ۱۶ الکترودهای اندازه‌گیری کننده یا اصلی استفاده می‌شود. در این پژوهش با توجه به قطر لوله از ۸ الکترودها استفاده شد. الکترودها بر روی لوله نارسانا از جنس PVC به قطر ۲۰ سانتی‌متر قرار داده شدند. در دو طرف هر الکترودهای اصلی، دو الکترودهای محافظ فعال قرار دارد. بنابراین در مجموع ۱۶ الکترودهای محافظ فعال در حسگر توموگرافی خازنی ساخته شده بکار گرفته شد. علت استفاده از الکترودهای محافظ فعال حذف نویز است. در سامانه‌های توموگرافی خازنی مرسوم، الکترودهای محافظ فعال وجود ندارند و در عوض الکترودهای اصلی با طول بیشتری ساخته می‌شوند که در این شرایط دقت اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. هنگامی که الکترودهای اصلی نقش فرستنده سیگنال را ایفا می‌کند، توسط مدار سوئیچ که در ادامه توضیح داده می‌شود، الکترودهای محافظ فعال نیز سیگنال فرستنده را سوئیچ می‌کنند و هنگامی که الکترودهای اصلی نقش گیرنده سیگنال را ایفا می‌کند، الکترودهای محافظ فعال به زمین سوئیچ می‌شوند به همین دلیل به این الکترودهای محافظ، پسوند فعال داده می‌شوند. برای حذف نویز علاوه بر الکترودهای محافظ فعال، از محافظ‌های محوری و محافظ‌های شعاعی از جنس مس استفاده شد که آنها به زمین متصل بوده و هر دو نوع الکترودهای اصلی و محافظ با مقاومت بالا به آنها متصل شده‌اند. در شکل ۱-الف نوارهای باریک محافظ محوری و شعاعی نشان داده شده است. در دو طرف الکترودها نیز محافظ‌های حلقوی قرار دارند که آن نیز به زمین متصل هستند و موجب حذف نویز می‌شوند. به دلیل نویزپذیر بودن حسگرهای خازنی در توموگرافی یک محافظ یا شیلد نهایی از جنس مس بر روی کل سامانه کشیده شد که در شکل ۱-ب حسگر توموگرافی خازنی ساخته شده بدون شیلد نهایی و در شکل ۱-ج به همراه شیلد نهایی نشان داده شده است. دو الکترودهای محافظ فعالی که در دو طرف الکترودهای اصلی قرار دارند توسط لچیم کردن سیم به یکدیگر متصل شده‌اند. هم الکترودهای اندازه‌گیری کننده یا اصلی و هم الکترودهای محافظ فعال توسط سیم به مدار تحریک و قرائت متصل می‌شوند.



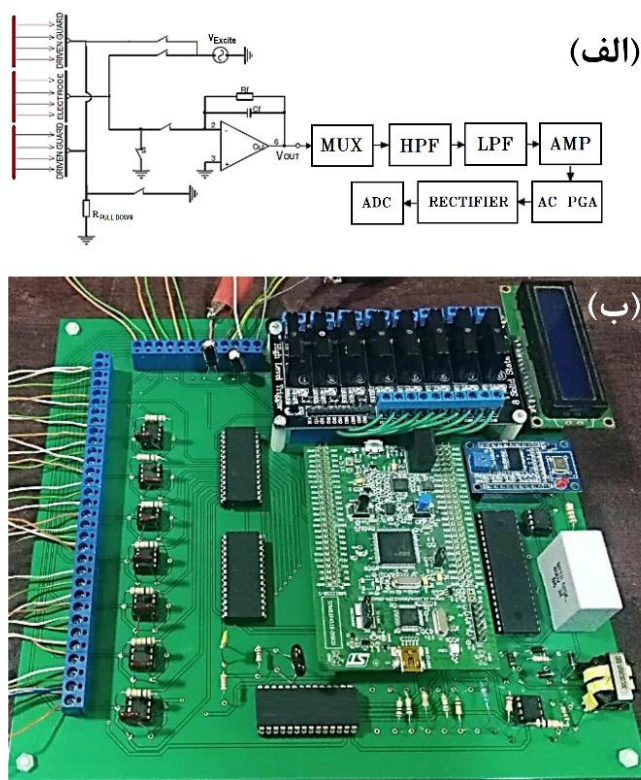
شکل ۱. حسگر توموگرافی الکتروخازنی ساخته شده، (الف) نمای سه بعدی و برش خورده از الکترودهای اصلی و محافظ بر روی لوله‌ای که مواد از آن عبور می‌کنند، (ب) حسگرهای توموگرافی خازنی ساخته شده بدون شیلد مسی، (ج) حسگرهای توموگرافی خازنی ساخته شده به همراه شیلد مسی که بر روی آن کشیده شده است.

مدارهای فرستنده و گیرنده سیگنال

در سامانه ساخته شده مبتنی بر توموگرافی الکتروخازنی، برای سیگنال فرستنده از مدار مبتنی بر AC استفاده شد که در آن سیگنال تحریک موج سینوسی با فرکانس ۵۰۰ کیلوهرتز است که توسط ترکیب‌کننده دیجیتال مستقیم (DDS^۱) با ولتاژ مشخص تولید شد. برخلاف توموگرافی امپدانس الکتریکی که سیگنال فرستنده یا تحریک از نوع جریان الکتریکی ثابت بود، در توموگرافی الکتروخازنی، سیگنال فرستنده از نوع ولتاژ ثابت است، بنابراین مدار فرستنده و قرائت آن از پیچیدگی کمتری نسبت به توموگرافی امپدانس الکتریکی برخوردار است. همان‌گونه اشاره شد هنگامی که الکترودهای اصلی نقش فرستنده را ایفا می‌کند، الکترودهای محافظ فعال در دو طرف الکترودهای اصلی نیز به مدار تحریک سوئیچ می‌شوند. کلیه سوئیچ شدن الکترودهای اصلی و محافظ فرعی به مدار تحریک توسط مالتی پلکسر (MUX^۲) انجام می‌شود. پس از ارسال سیگنال فرستنده، سایر الکترودها باقی‌مانده نقش گیرنده را ایفا می‌کنند و به مدار گیرنده سوئیچ می‌شوند. در این هنگام، الکترودهای محافظ فعال دو طرف الکترودهای اصلی که نقش گیرنده را ایفا می‌کنند در هنگام قرائت، توسط کانال دیگر مالتی پلکسر به زمین سوئیچ می‌شوند. در شکل ۲-الف دیگرام مدار تحریک و قرائت سیگنال برای یک الکترودهای اصلی و دو محافظ فعال آن نشان داده شده است. سیگنال گیرنده در قالب جریان الکتریکی است بنابراین، لازم است به منظور قرائت تغییرات سیگنال گیرنده، توسط مدار تبدیل جریان به ولتاژ، سیگنال گیرنده در قالب جریان را به ولتاژ تبدیل کرد که در شکل ۲-الف این مدار توسط مدار آمپلی فایر فیدبک دار که در فیدبک آن یک خازن و یک مقاومت به صورت موازی هم قرار دارد، نشان داده شده است (Wang et al., 2020). پس از فیلتر اولیه سیگنال و تقویت آن، سیگنال توسط واحد ADC میکرو قرائت می‌شود و به واحد پردازش تصویر انتقال داده می‌شود. در شکل ۲-ب تصویری از مداری که برای سامانه در آزمایشگاه طراحی و مونتاژ شد نشان داده شده است. کلیه سوئیچ سیگنال بین مالتی پلکسرها و قرائت داده‌ها توسط میکروکنترلر خانواده ARM مدل STM32F411 انجام شد.

الگوی قرائت و اندازه‌گیری ظرفیت خازنی در توموگرافی الکتروخازنی بین الکترودهای فرستنده و گیرنده در شکل ۳ نشان داده شده است. در مرحله اول، وقتی الکترودهای اصلی ۱ به همراه دو الکترودهای محافظ فعال خود، به عنوان الکترودهای عمل می‌کنند، الکترودهای اصلی ۲ تا ۸، نقش الکترودهای گیرنده را ایفا می‌کنند و جریان آن اندازه‌گیری می‌شود. در مرحله دوم، الکترودهای ۲ به همراه دو الکترودهای محافظ خود، به عنوان الکترودهای فرستنده خواهد بود، در این شرایط الکترودهای اصلی ۳ تا ۸، نقش الکترودهای گیرنده را دارند. به این ترتیب تا ۷ مرحله ارسال و قرائت سیگنال اتفاق می‌افتد و در مجموع ۲۸ قرائت از تغییرات ظرفیت خازنی وجود خواهد شد.

1. Direct digital synthesizer
2. Multiplexer



شکل ۲. الف) طرح‌واره‌ای از مدار تحریک و قرائت برای یک الکتروود اصلی و دو الکتروود محافظ، ب) مدار ساخته شده برای تحریک و قرائت از ۸ الکتروود اندازه‌گیری‌کننده

الکتروود گیرنده								
الکتروود فرستنده		E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
	E1	1	2	3	4	5	6	7
	E2		8	9	10	11	12	13
	E3			14	15	16	17	18
	E4				19	20	21	22
	E5					23	24	25
	E6						26	27
	E7							28

شکل ۳. الگوی ۲۸ قرائت برای ۸ الکتروود اصلی در توموگرافی الکتروخازنی ساخته شده

بمنظور تعیین ظرفیت خازنی محیط بین الکتروودها که با تراکم مواد در مقطع لوله متناسب است، از قرائت ولتاژ توسط الکتروودهای گیرنده از رابطه ۱ استفاده شد (Cui et al., 2015). در این رابطه V_o ، ولتاژ قرائت شده از هر الکتروود است که توسط مدار تبدیل جریان به ولتاژ قابل اندازه‌گیری است و V_i ولتاژ سیگنال ورودی که همان ولتاژ موج سینوسی تولید شده است. C_x ظرفیت خازنی بین هر الکتروود است که در ادامه برای محاسبات و حل مسئله مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

$$V_o = -\frac{\omega C_x R_f}{\omega C_f R_f + 1} V_i \quad \text{(رابطه ۱)}$$

در رابطه ۱ و با توجه به مدار نشان داده شده در شکل ۴، مقادیر C_f و R_f برابر با مقدار ظرفیت خازن و مقاومت مورد استفاده در فیدبک آمپلی فایر مبدل جریان الکتریکی به ولتاژ است. ω فرکانس زاویه‌ای سیگنال ورودی است که از رابطه $\omega = 2\pi f$ بدست می‌آید که در آن f فرکانس تحریک است.

با توجه به اینکه رطوبت دانه و دما در تعیین خواص دی‌الکتریک مواد موثر هستند، بنابراین پس از تست‌های اولیه برای خنثی کردن تاثیر تغییرات دما و رطوبت دانه و انجام محاسبات و تصویرسازی، نیاز به سنجش برخط دما و رطوبت دانه و اعمال آن به طور لحظه‌ای در

محاسبات است. به همین دلیل دما و رطوبت نمونه مرجع که مشخصه‌های آن کاملاً مشابه مواد عبوری است توسط حسگر دمای غلاف‌دار مدل LM35 و رطوبت سنج مدل BENETECH GM640 اندازه‌گیری شده و در محاسبات اعمال می‌شود تا تاثیر تغییرات دما و رطوبت بر اندازه‌گیری‌ها خنثی شود.

بازسازی تصویر

الگوریتم‌های بازسازی تصویر در توموگرافی الکتروخازنی دارای دو مرحله حل مسئله مستقیم و مسئله معکوس است. مسئله مستقیم، برای پیدا کردن میزان ظرفیت خازنی بین الکتروود با در نظر گرفتن هر فرم از توزیع گذردهی معلوم است. در مسئله معکوس برای تعیین توزیع گذردهی مجهول که متناسب با میزان توزیع دانه‌های غلات در مقطع لوله است از ظرفیت خازنی بین الکتروودها که از قرائت ولتاژ بین الکتروودها بدست می‌آید استفاده می‌شود. بطور کلی، ظرفیت خازنی بین الکتروود C_{ij} را می‌توان از بار الکتریکی Q_j بر روی الکتروود زام و اختلاف پتانسیل ΔV_{ij} بین الکتروود زام و الکتروود نام آورد که در رابطه ۲ نشان داده شده است:

$$C_{ij} = Q_j / \Delta V_{ij} \quad \text{رابطه ۲}$$

بار الکتریکی Q_j تابعی از توزیع گذردهی بین الکتروودها $\varepsilon(x, y)$ و توزیع پتانسیل $\phi(x, y)$ پوشش داده شده توسط مساحت سطح الکتروود Γ است و بنابراین ظرفیت خازنی بین الکتروود را می‌توان مطابق رابطه ۳ بیان کرد (Jiangbao et al., 2018):

$$C_{ij} = \frac{1}{\Delta V_{ij}} \int_{\Gamma} \varepsilon(x, y) \nabla \phi(x, y) d\Gamma \quad \text{رابطه ۳}$$

از آنجایی که توزیع پتانسیل تابعی از توزیع گذردهی است، ظرفیت خازنی بین الکتروودها را می‌توان به عنوان تابعی از توزیع گذردهی در نظر گرفت:

$$C = F(\varepsilon(x, y)) \quad \text{رابطه ۴}$$

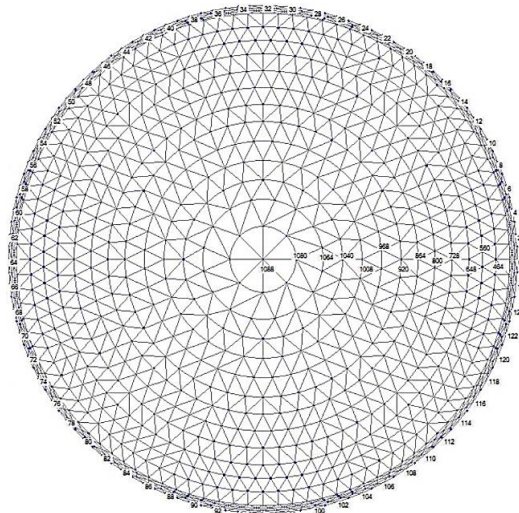
بنابراین تغییر در ظرفیت خازنی بین الکتروودها ΔC ، ساده‌سازی شده و برحسب حساسیت حسگر خازنی s برای یک تغییر معلوم گذردهی $\Delta \varepsilon$ بیان می‌شود و مطابق رابطه ۵ است:

$$\Delta C = s \Delta \varepsilon \quad \text{رابطه ۵}$$

بنابراین، مسئله مستقیم بازسازی تصویر می‌تواند به صورت مدل خطی بیان شود و رابطه ۶، بیانی از حالت ماتریسی رابطه ۵ است.

$$C = SK \quad \text{رابطه ۶}$$

که C یک ماتریس قطری (28×1) شامل مقادیر ظرفیت خازنی نرمال شده از همه ترکیب‌های ظرفیت خازنی بین الکتروودها است. S نیز یک ماتریس حساسیت (28×2048) است. مقدار 2048 تعداد المان‌های مش‌بندی مورد نظر برای تعیین توزیع پتانسیل‌ها در مقطع لوله با استفاده از روش حل عددی المان محدود است. در شکل ۴، نحوه مش‌بندی مقطع محیط مورد نظر نشان داده شده است. K یک ماتریس قطری (2048×1) برای توزیع گذردهی معلوم مواد دی‌الکتریک در بین حسگر ECT برای هر المان است.



شکل ۴. مش‌بندی مقطع مورد نظر برای تعیین ضریب گذردهی محیط داخل مقطع توسط روش حل عددی المان محدود

برای حل مسئله معکوس، مقادیر گذردهی باید از مقادیر ظرفیت‌خازنی اندازه‌گیری شده بدست آید. این را می‌توان توسط رابطه ۷ بیان کرد (Alhosani, 2016):

$$K = S^{-1}C \quad \text{رابطه ۷}$$

که S^{-1} معکوس ماتریس حساسیت بوده و C و K ماتریس‌های شامل مقادیر گذردهی نرمال شده و ظرفیت‌خازنی نرمال شده هستند. از آنجایی که ماتریس حساسیت S یک ماتریس مربعی نیست، در نتیجه معکوس پذیر نیست و به عبارتی بد وضع^۱ یا غیرقابل تعیین است. الگوریتم‌های مختلفی برای تقریب زدن این ماتریس مورد استفاده قرار می‌گیرند که مرسوم‌ترین این الگوریتم‌ها، الگوریتم LBP^۲ است (Marashdeh, 2006). در الگوریتم LBP از ترانهاده ماتریس S به عنوان تقریبی از معکوس آن استفاده می‌شود و مطابق رابطه ۸ بیان می‌شود.

$$K = S^T C \quad \text{رابطه ۸}$$

در این پژوهش علاوه بر الگوریتم مرسوم LBP، عملکرد الگوریتم دیگری تحت عنوان روش منظم‌سازی Tikhonov مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این الگوریتم برای برطرف کردن مشکل عدم محاسبه معکوس ماتریس حساسیت، از رابطه ۹ برای تعیین مقادیر آرایه‌های ماتریس گذردهی که نشان دهنده مقدار گذردهی برای هر المان است استفاده شد (Marashdeh, 2006).

$$K = (S^T S + \mu I)^{-1} S^T C \quad \text{رابطه ۹}$$

در رابطه ۹، K ماتریس ضریب گذردهی المان‌های درون مقطع مورد بررسی است، C و S نیز به ترتیب ماتریس‌های ظرفیت‌خازنی و حساسیت هستند. در رابطه ۹، $S^T S$ نیز معکوس پذیر نیست به همین منظور از پارامتر منظم‌سازی μ که در ماتریس همسانی I ضرب می‌شود و با $S^T S$ جمع می‌شود و برای معکوس پذیر کردن نیاز است، استفاده می‌شود.

ارزیابی عملکرد سامانه توموگرافی الکتروخازنی در سنجش غلات

در ارزیابی عملکرد سامانه، ابتدا پارامترهای کیفیت پتانسیل‌های الکتریکی یا ولتاژ اندازه‌گیری شده، مورد بررسی قرار گرفت. پارامتر تغییرات پتانسیل الکتریکی (VC)، معیاری برای بیان میزان حساسیت یا قابلیت تشخیص دانه‌های گندم است. برای محاسبه تغییرات پتانسیل‌ها طبق رابطه ۱۰ از نرم اختلاف بین پتانسیل‌های الکترودها در دو حالت فاز گاز به تنهایی (لوله خالی) ($V_{\epsilon 0}$) و فاز جامد به همراه فاز گاز (مقطع لوله پر از گندم) ($V_{\epsilon 1}$) استفاده می‌شود (Russo et al., 2017).

$$VC = \|V_{\epsilon 1} - V_{\epsilon 0}\| \quad \text{رابطه ۱۰}$$

پارامتر نرخ سیگنال به نویز (SNR^3) بیان‌کننده کیفیت سیگنال در اندازه‌گیری است. به منظور محاسبه نرخ سیگنال به نویز، زمانی که در محیط مورد بررسی، هیچ گونه ناهمگنی وجود ندارد (بدون فاز جامد یا گندم)، اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی قرائت می‌شوند و توسط رابطه ۱۱ نرخ سیگنال به نویز محاسبه می‌شود (Bera & Nagaraju, 2012):

$$SNR_{BP} = 20 \log_{10} \frac{VC_{AVR}}{SD[V_C]} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در رابطه ۱۱، VC_{AVR} میانگین اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی، $SD[V_C]$ انحراف معیار پتانسیل‌های الکتریکی مرزی است. برای مقایسه پاسخ دو الگوریتم بازسازی تصویر بکار رفته، از الگوها و چیدمان‌های مختلف گندم در لوله استفاده شد که در شکل ۶ و شکل ۷ این چیدمان گندم در مقطع لوله نشان داده شده است. توموگرام حاصل از الگوریتم بازسازی تصویر با نمونه واقعی مورد مقایسه قرار گرفت. برای ارزیابی دقیق‌تر، پارامترهای آماری چون خطای میانگین مربعات ریشه‌ها و انحراف استاندارد تعیین شد. برای هر شرایط آزمون ۲۰ تکرار و در هر تکرار ۵ نمونه گرفته شد. با استفاده از رابطه ۱۲ مقادیر خطای میانگین مربعات ریشه‌ها (RMSE) که نشان دهنده اختلاف داده‌های اندازه‌گیری شده از مقدار واقعی و صحت سامانه است، بدست آمد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n_{data}} \left(\frac{A_{Real}}{A} - \frac{A_{ECT}}{A} \right)^2}{n_{data}}} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

در رابطه ۱۲، A_{Reals} ، مساحت واقعی و مطلوب سطح اشغال شده توسط دانه‌های گندم است، A_{ECT} مساحت نشان داده شده توسط

1. Ill condition
2. Linear back-projection
3. Signal to Noise Ratio

تصویر بازسازی شده از سامانه توموگرافی الکتروخازنی است. A مساحت کل محیط مورد بررسی که برابر با مساحت سطح مقطع لوله است، n_{data} تعداد داده‌های گرفته شده در هر شرایط آزمون است.

تعیین خطای عملکرد دستگاه مبتنی بر میانگین مطلق خطا (MAPE) توسط سامانه EIT نیز نشان‌دهنده انحراف از مقدار درست یا واقعی است و مرسوم است که این خطا را بر حسب درصدی از مقدار واقعی مطابق رابطه ۱۳ محاسبه کنند (Shetty & Kolk, 2010).

$$MAPE\% = \left(\frac{\sum \left| \frac{A_{EIT} - A_{real}}{A_{real}} \right|}{n} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۱۳}$$

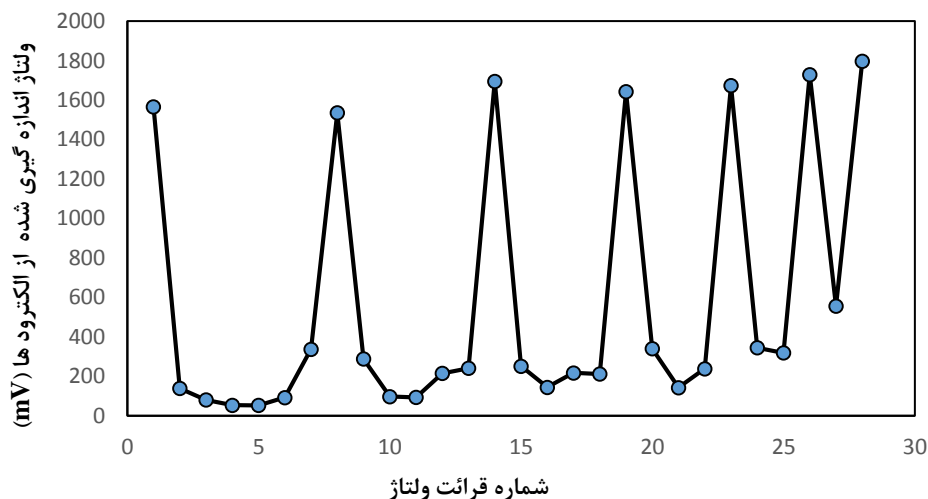
در رابطه ۱۳، A_{Reals} ، مساحت واقعی اشغال شده توسط دانه‌های گندم است، A_{ECT} مساحت نشان داده شده توسط تصویر بازسازی شده از سامانه توموگرافی الکتروخازنی است. n تعداد داده‌های گرفته شده در هر شرایط آزمون است.

به منظور محاسبه انحراف استاندارد (SD) که معیاری از دقت سامانه است از رابطه ۱۴ استفاده شد. که در این رابطه A_{ECT} مساحت اشغال شده دانه‌های گندم است که توسط سامانه توموگرافی نشان داده می‌شود، \bar{A}_{ECT} میانگین داده‌ها و A مساحت کل مقطع مورد بررسی و n_{data} تعداد داده‌ها است.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n_{data}} \left(\frac{A_{ECT}}{A} - \frac{\bar{A}_{ECT}}{A} \right)^2}{n_{data}}} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

نتایج و بحث

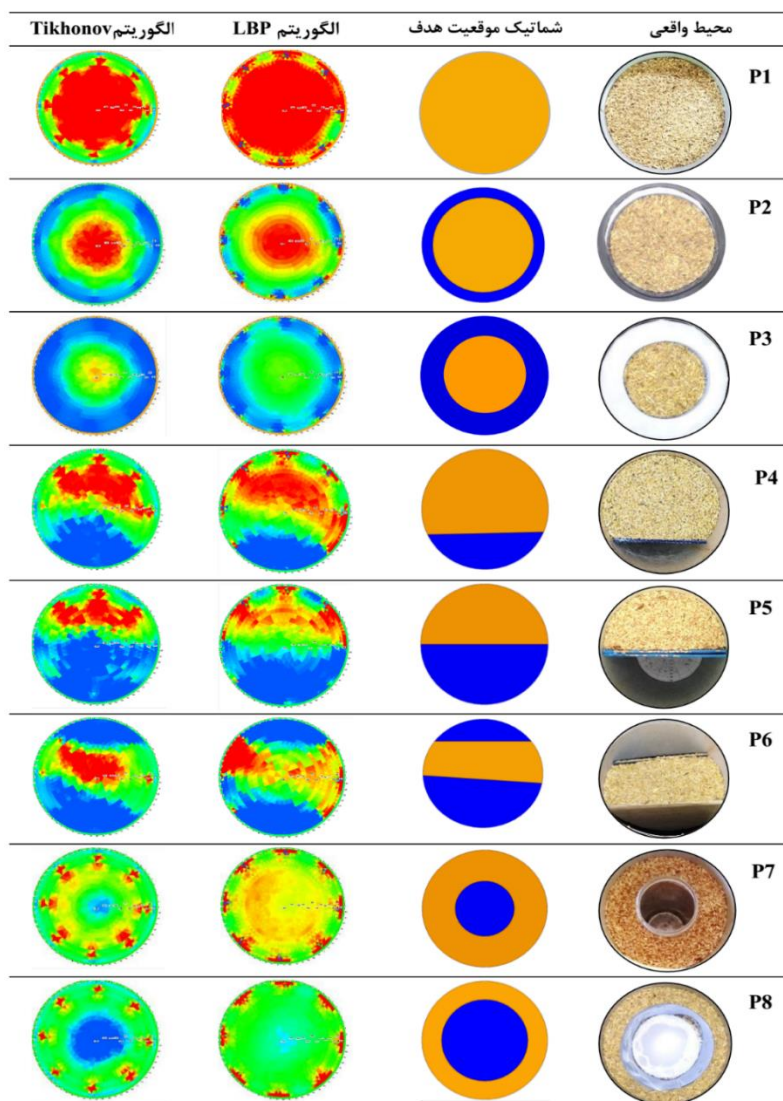
شکل ۵ نمودار ولتاژ قرائت شده از الکترودهای توموگرافی خازنی را نشان می‌دهد. دامنه دینامیک ولتاژهای قرائت شده برابر با ۱۷۴۰ میلی‌ولت است. میزان بالای نرخ سیگنال به نویز نشان دهنده مقاومت سیگنال به نویز و کیفیت بهتر سیگنال است. با توجه به داده‌های بدست آمده نرخ سیگنال به نویز برابر با ۵۶/۰۹ دسی‌بل بوده و پارامتر تغییرات ولتاژ (VC) برابر با ۴۲۴ میلی‌ولت است. بطور کلی میزان نرخ سیگنال به نویز گزارش شده در سامانه‌های مختلف توموگرافی، بین ۱/۰۶ تا ۷۶ دسی‌بل گزارش شده است (Russo et al., 2017). همچنین در پژوهش انجام شده در زمینه نرخ سیگنال به نویز در توموگرافی خازنی، پس از بهبود چیدمان الکترودها به ۱۰/۸ دسی‌بل رسید (Cui et al., 2015) در صورتی که در این پژوهش با توجه به نوع اعمال فیلترها و محافظ‌های ضد نویز در مقایسه با سایر تحقیقات، مقدار SNR بدست آمده در سامانه توموگرافی خازنی ساخته شده مطلوب‌تر است.



شکل ۵. نمودار ولتاژ قرائت شده مطابق الگوی فرستنده و گیرنده برای سامانه توموگرافی خازنی با ۸ الکترودها

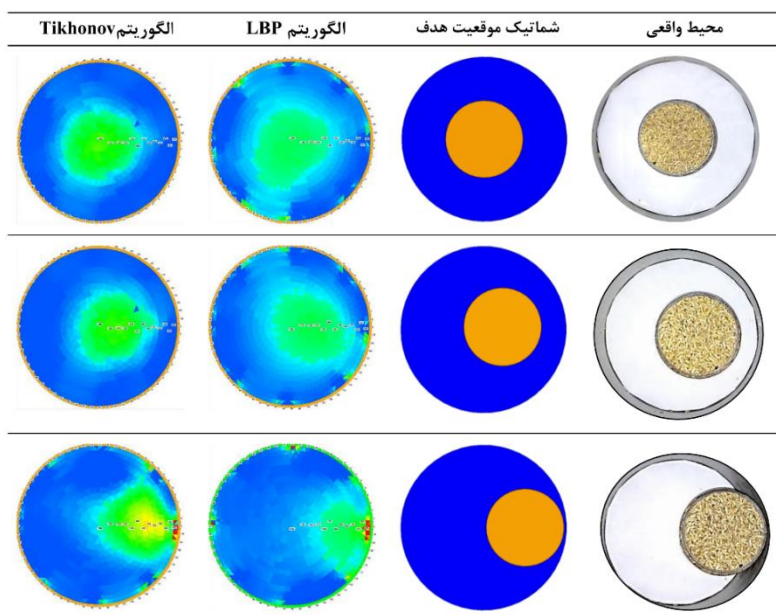
در شکل ۶ تصاویر بازسازی شده یا توموگرام‌های تشکیل شده از مقطع لوله توسط سامانه ساخته شده در حالت‌های مختلفی که گندم در لوله قرار می‌گیرد نشان داده شده است. در توموگرام‌های ساخته شده، رنگ آبی نشان دهنده فضای خالی (هوا) در مقطع لوله است. و از طیف رنگ سبز تا قرمز نشان دهنده وجود گندم در مقطع لوله است. در بازسازی مقطع لوله از دو الگوریتم مرسوم LBP و Tikhonov استفاده شد. در هشت موقعیت مختلف پرشدگی مقطع لوله توسط گندم، عملکرد سامانه مورد بررسی قرار گرفت. در موقعیت اول (P1) وقتی

لوله کاملاً توسط گندم پر شده، عملکرد هر دو الگوریتم نسبتاً مطلوب بوده و لوله کاملاً پر نمایش داده می‌شود. در موقعیت دوم (P2) وقتی مواد از وسط لوله عبور می‌کند و فاصله اندکی از کناره‌های لوله دارند و نواری به عرض ۲ سانتی متر از گندم تا لبه دیواره لوله خالی است، در این موقعیت نیز تفکیک بین این حالت و حالت کاملاً پر توسط هر دو الگوریتم قابل تفکیک است اما الگوریتم Tikhonov عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان داده است. در حالت سوم (P3) پرشدگی لوله وقتی فضای پر شده توسط گندم تا دیواره لوله فاصله ۳ سانتی‌متری دارد نیز عملکرد الگوریتم Tikhonov مطلوب‌تر از LBP است. در حالت‌های چهار و پنج (P4, P5) که لوله به صورت نیمه و سه چهارم پر شده، توموگرام ساخته شده توسط الگوریتم LBP عملکرد بهتری از خود نشان داده است. در حالت ششم (P6) که مقطع لوله به شکل نواری توسط گندم پر شده است، الگوریتم Tikhonov نتیجه بهتری نشان داده است. دو حالت آخر پرشدگی مقطع لوله برای زمانی است که میانه لوله خالی بوده و اطراف آن توسط گندم پر شده است. در حالت هفتم (P7) قطر فضای خالی درون لوله ۹ سانتی‌متر است که تقریباً عملکرد هر دو الگوریتم در تشخیص این فضای خالی چندان مطلوب نبوده است هرچند که الگوریتم Tikhonov تا حدی این فضای خالی را شناسایی کرده اما قطر صحیحی از فضای خالی را ارائه نمی‌دهد. در حالت هشتم (P8)، قطر فضای خالی بین گندم‌ها، افزایش یافته است که در این حالت الگوریتم Tikhonov این فضا را به خوبی شناسایی کرده است اگرچه قطر شناسایی شده کمتر از مقدار واقعی است که نشان دهنده حساسیت پایین این الگوریتم است. اما الگوریتم LBP همچنان قادر به شناسایی مطلوب این فضای خالی در وسط لوله پر از گندم نبوده است. بنابراین نتیجه‌ای که می‌توان از توموگرام‌های نشان داده شده در شکل ۶ گرفت این است که هر دو الگوریتم قابلیت تفکیک اختلاف بین حالت‌های پرشدگی مخزن را دارند اما هر یک با خطاهای متفاوت و نسبتاً زیاد که در ادامه با بیان پارامتر RMSE در مورد این خطا توضیح داده خواهد شد.



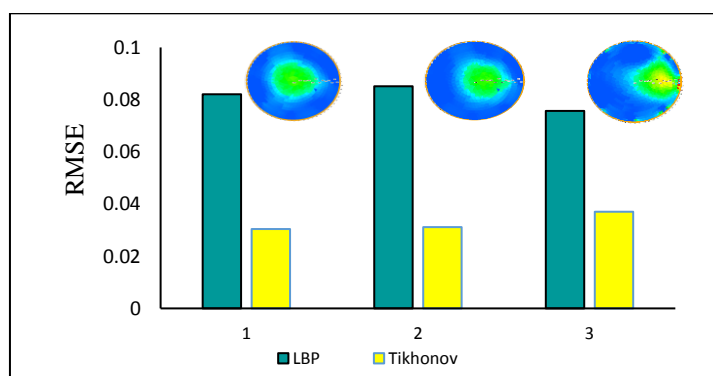
شکل ۶. گندم داخل لوله در شرایط مختلف پرشدگی لوله و توموگرام حاصل از دو الگوریتم تصویرسازی

برای بررسی و مقایسه عملکرد هر الگوریتم در بخش‌های مختلف لوله نیز از پرشدگی مخزن به یک اندازه در بخش‌های مختلف لوله استفاده شد که نحوه چیدمان آن در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۷، مساحت پرشدگی گندم به شکل دایره‌ای به قطر ۹ سانتی‌متر است. توموگرام این مقدار پرشدگی در بخش‌های مختلف لوله توسط دو الگوریتم مورد بررسی قرار گرفت که سه حالت آن در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج این بررسی نشان داد که هر دو الگوریتم قابلیت تفکیک تغییر مکان در لوله را دارا هستند. اگرچه الگوریتم LBP عملکرد مطلوب‌تری در شناسایی هدف در مرکز نسبت به نزدیک دیواره‌های لوله از خود نشان داده است، اما الگوریتم بازسازی تصویر Tikhonov نیز در هر سه حالتی که توده دانه‌های گندم در مرکز، در یک دوم شعاع و چسبیده به دیواره لوله هستند دارای عملکرد مطلوبی بود و با نزدیک شدن به دیواره از دقت در اندازه تصویر بازسازی شده کاسته می‌شد اما به طور کلی عملکرد الگوریتم Tikhonov در هر سه موقعیت مرکز، یک دوم شعاع و چسبیده به دیواره از الگوریتم LBP مطلوب‌تر بود.



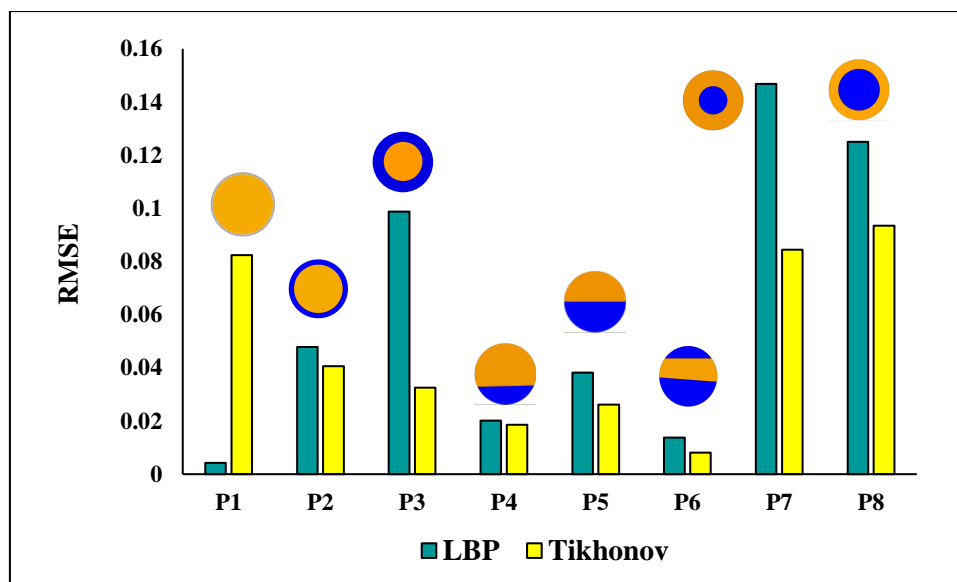
شکل ۷. تصویر بازسازی شده توسط دو الگوریتم بازسازی تصویر در شرایطی که شیء هدف در اندازه یکسان در موقعیت‌های مختلف لوله قرار دارد

برای شرایطی که توده دانه‌های گندم در بخش‌های مختلف محیط مورد بررسی قرار دارد مقادیر RMSE در شکل ۸ نشان شده است. در این شکل شیء هدف توده دانه‌های گندم است در بخش وسط، یک دوم شعاع و سه چهارم شعاع قرار دارد. مقدار RMSE در کمترین مقدار متعلق به الگوریتم Tikhonov و برای موقعیتی است که شیء در وسط قرار دارد و مقدار آن برابر با ۰/۰۳۰۴ است. با نزدیک شدن به دیواره این خطا افزایش یافته و به ۰/۰۳۷ می‌رسد. این روند افزایش خطا در رابطه با الگوریتم LBP برعکس است. در این الگوریتم وقتی توده دانه‌های گندم به دیواره نزدیک می‌شوند مقدار میانگین مربعات خطا کاهش یافته و به ۰/۰۷۵۶ می‌رسد. اما با وجود روند کاهشی خطا برای الگوریتم LBP، الگوریتم Tikhonov دارای خطای کمتر و عملکرد بهتری در تشخیص و تفکیک موقعیت‌ها دارد.



شکل ۸. نمودار مقادیر RMSE برای مجموعه‌ای از دانه‌های گندم با سطح پرشدگی یکسان در موقعیت‌های مختلف لوله

در شکل ۹، نمودار مقادیر RMSE برای الگوهای پرشدگی گندم در هشت حالت مختلف نشان داده شده است. در شرایطی که لوله کاملا پر است، برخلاف نتایج قبل، خطا در الگوریتم LBP کمتر از خطا در الگوریتم Tikhonov است این مسئله در توموگرام شکل ۶ موقعیت P1 مشخص است. در شرایطی که مقطع لوله کاملا توسط گندم پر شده است، در توموگرام بازسازی توسط الگوریتم Tikhonov، نقاط خالی از گندم در تصویر بازسازی شده به رنگ آبی وجود دارند، در واقع در الگوریتم Tikhonov مقدار اندازه گیری شده کمتر از مقدار واقعی است در حالی که در الگوریتم LBP کاملا مقطع لوله در توموگرام پر نشان داده می شود. در سایر الگوهای پرشدگی مقطع لوله با گندم، تقریبا در همه موقعیت ها، خطای الگوریتم Tikhonov کمتر از الگوریتم LBP است. در موقعیت های P2 تا P8، مقادیر RMSE برای الگوریتم بازسازی Tikhonov در محدود ۰/۰۴ تا ۰/۰۱ قرار دارد که کمتر از مقادیر میانگین مربعات خطا برای الگوریتم LBP است. مطابق توموگرام های بدست آمده از الگوریتم Tikhonov، توزیع گندم پخش شده در مقطع لوله در تمام موقعیت ها کمتر از توزیع واقعی است. همچنین در الگوریتم LBP، عکس این نتایج وجود دارد و توزیع نشان داده شده توسط توموگرام حاصل از این الگوریتم از توزیع واقعی بیشتر است. الگوی توزیع گندم P7 بیشترین میانگین مربعات خطا را به خود اختصاص داده به طوری که هر دو الگوریتم عملکرد مطلوبی در زمانی که وسط لوله خالی است از خود نشان ندادند.



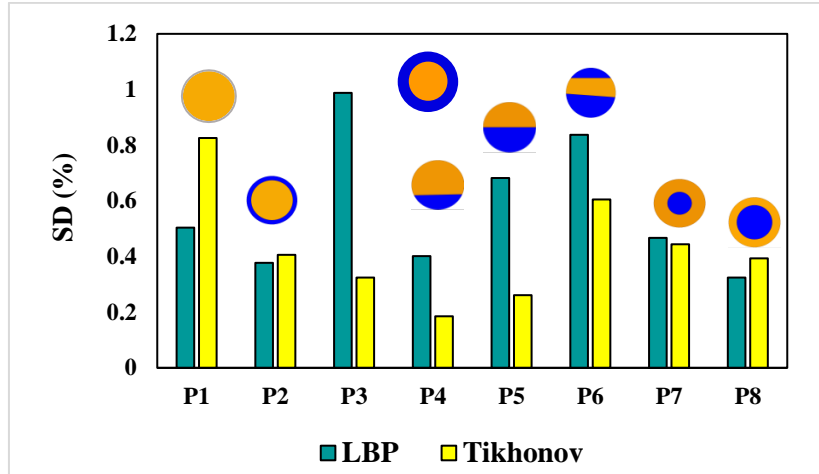
شکل ۹. نمودار مقادیر RMSE برای مجموعه ای از دانه های گندم در موقعیت های مختلف لوله

در جدول ۲ نیز درصد مقادیر میانگین مطلق خطا برای موقعیت های P1 تا P8 نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، در کل عملکرد الگوریتم بازسازی Tikhonov نتایج مطلوب تری از الگوریتم LBP برای تعیین توزیع دانه های گندم در مقطع لوله نشان داد. در شناسایی و تفکیک موقعیت های مختلف دانه های گندم نیز عملکرد الگوریتم Tikhonov در شرایطی که مواد در وسط و نزدیک دیواره لوله قرار دارند، مطلوب تر بود.

جدول ۲. درصد مقادیر میانگین مطلق خطا برای موقعیت های P1 تا P8

الگوریتم	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1
LBP	۴/۰۴۷	۳/۸۳۳	۰/۵۲۱	۱/۱۲۱	۰/۸۶۱	۴/۴۶۲	۱/۰۲	۰/۰۷
Tikhonov	۳/۱۱۳	۲/۷۸۱	۰/۲۳۵	۰/۷۲۸	۰/۳۱۷	۱/۲	۰/۱۸۵	۲/۳۴۲

در شکل ۱۰، مقادیر انحراف استاندارد (SD) برای الگوهای مختلف پرشدگی مقطع لوله توسط توده گندم نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش پرشدگی لوله و تراکم مواد، انحراف استاندارد کاهش می یابد و به عبارتی در تراکم های بیشتر دقت سامانه افزایش می یابد و همان گونه که از توموگرام های مشخص بود، مقادیر SD در الگوریتم Tikhonov کمتر از الگوریتم LBP است.



شکل ۱۰. نمودار مقادیر SD برای توده دانه‌های گندم در الگوهای پرشدگی مختلف لوله

نتیجه گیری کلی

هدف از این پژوهش ساخت و ارزیابی عملکرد یک سامانه توموگرافی خازنی برای تعیین نحوه توزیع توده غلات مانند گندم در مقطع لوله با استفاده از دو الگوریتم بازسازی تصویر LBP و Tikhonov بود. در این پژوهش علاوه بر بکارگیری الگوریتم متفاوت از الگوریتم مرسوم، با استفاده از محافظ‌های مختلف، نویزپذیری سامانه کاهش داده شد به طوری که نرخ سیگنال به نویز به میزان ۵۶/۰۹ دسی‌بل رسید که نشان دهنده کیفیت مطلوب سیگنال است. نتایج مقایسه دو الگوریتم نشان داد که الگوریتم Tikhonov دارای رفتار مطلوبتری در ساخت توموگرام از توده گندم در کنار دیواره‌های لوله در مقایسه با الگوریتم LBP است و به غیر از شرایطی که لوله به طور کامل پر است، در سایر الگوهای پرشدگی مقطع لوله، دارای عملکرد مطلوب‌تری است. هر دو الگوریتم در شناسایی فضای خالی بین توده گندم عملکرد مناسبی نشان ندادند بنابراین پیشنهاد می‌شود سایر الگوریتم‌ها نیز برای تشخیص فضای خالی بین توده گندم مورد استفاده قرار گیرند. در کل با توجه به سرعت مناسب الگوریتم Tikhonov، این الگوریتم می‌تواند جایگزین مناسبی برای الگوریتم مرسوم LBP باشد.

منابع

کریمیان، ع. (۱۳۹۸). دبی سنج جرمی جانب مرکز مواد فله‌ای جامد، شماره ثبت اختراع: ۱۰۱۶۷۸.

REFERENCES

- Alhosani, E. (2016). Electrical capacitance tomography for real-time monitoring of process pipelines (Doctoral dissertation, University of Bath).
- Almutairi, Z., Al-Alweet, F. M., Alghamdi, Y. A., Almisned, O. A., & Alothman, O. Y. (2020). Investigating the characteristics of two-phase flow using electrical capacitance tomography (ECT) for three pipe orientations. *Processes*, 8(1), 51.
- Bera, T. K., & Nagaraju, J. (2012). Studying the resistivity imaging of chicken tissue phantoms with different current patterns in Electrical Impedance Tomography (EIT). *Measurement*, 45(4), 663-682.
- Cui, Z., Wang, H., & Yin, W. (2015). Electrical capacitance tomography with differential sensor. *IEEE Sensors Journal*, 15(9), 5087-5094.
- Dichter, G. S. (2022). Functional magnetic resonance imaging of autism spectrum disorders. *Dialogues in clinical neuroscience*.
- Figueiredo, M. M. F., Goncalves, J. L., Nakashima, A. M. V., Fileti, A. M. F., & Carvalho, R. D. M. (2016). The use of an ultrasonic technique and neural networks for identification of the flow pattern and measurement of the gas volume fraction in multiphase flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 70, 29-50.
- Felix, D. (2017). Experimental investigation on suspended sediment, hydro-abrasive erosion and efficiency reductions of coated Pelton turbines (Doctoral dissertation). Switzerland: Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zürich.
- Jiangbao, Y., Lei, Z., Feng, Z., Tan, X., & Changsheng, Z. (2018). An Improved Normalized Model of

- Electrical Capacitance Tomography. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 176, p. 01032). EDP Sciences.
- Karimian, A. (1398). Centripetal mass flow meter for solid material, Iran Patent No. 101678. (*In Persian*).
- Lambrou, T. P., Anastasiou, C. C., Panayiotou, C. G., & Polycarpou, M. M. (2014). A low-cost sensor network for real-time monitoring and contamination detection in drinking water distribution systems. *IEEE sensors journal*, 14(8), 2765-2772.
- Mohamad, E. J., Rahim, R. A., Rahiman, M. H. F., Ameran, H. L. M., Muji, S. Z. M., & Marwah, O. M. F. (2016). Measurement and analysis of water/oil multiphase flow using Electrical Capacitance Tomography sensor. *Flow Measurement and Instrumentation*, 47, 62-70.
- Marashdeh, Q. (2006). Advances in electrical capacitance tomography. The Ohio State University.
- Perera, K., Pradeep, C., Mylvaganam, S., & Time, R. W. (2017). Imaging of oil-water flow patterns by electrical capacitance tomography. *Flow Measurement and Instrumentation*, 56, 23-34.
- Russo, S., Nefti-Meziani, S., Carbonaro, N., & Tognetti, A. (2017). A quantitative evaluation of drive pattern selection for optimizing EIT-based stretchable sensors. *Sensors*, 17(9), 1999.
- Roman, A. J., Ervin, J. S., & Cronin, J. (2020). Studies of two-phase flow through a sudden expansion using electrical capacitance tomography. *International Journal of Refrigeration*, 119, 206-215.
- Sharif, P. M., Nematizadeh, M., Saghazadeh, M., Saghazadeh, A., & Rezaei, N. (2022). Computed tomography scan in COVID-19: a systematic review and meta-analysis. *Polish Journal of Radiology*, 87(1), 1-23.
- Shetty, D. & Kolk, R.A. (2010). Mechatronics system design. *Cengage Learning*.
- Vetter, K., Barnowski, R., Haefner, A., Joshi, T. H., Pavlovsky, R., & Quiter, B. J. (2018). Gamma-Ray imaging for nuclear security and safety: Towards 3-D gamma-ray vision. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 878, 159-168.
- Voss, A., Pour-Ghaz, M., Vauhkonen, M., & Seppänen, A. (2020). Retrieval of the saturated hydraulic conductivity of cement-based materials using electrical capacitance tomography. *Cement and Concrete Composites*, 112, 103639.
- Wang, M. (2022). *Industrial Tomography (Second Edition). Systems and Applications Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, United Kingdom.*
- Wang, S., Sun, X., Xu, C., Bao, J., Peng, C. and Tang, Z. (2020). Investigation of a circulating turbulent fluidized bed with a fractal gas distributor by electrostatic-immune electrical capacitance tomography. *Powder Technology*, 361, 562-570.
- Zheng, D., Wang, S., Liu, B. and Fan, S. (2016). Theoretical analysis and experimental study of Coriolis mass flow sensor sensitivity. *Journal of Fluids and Structures*, 65, 295-312.
- Zhang, L. and Zhang, M. (2021). Image reconstruction of electrical capacitance tomography based on optimal simulated annealing algorithm using orthogonal test method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 80, 101996.
- Zhou, H., Tu, Q.Y. and Wang, H.G. (2019). Investigation of the complex gas-solids flow characteristics in a fluidized bed with a Wurster tube by process tomography and CFD simulation. *Powder Technology*, 357, 117-133.



Design, construction and evaluation of an electrical capacitance tomography system to monitor grains flow passing through pipeline

Extended Abstract

Introduction

On-line monitoring of the distribution and density of solids that are transferred from the pipe are required in various processes. Conventional methods of mass flow measurement have limitations. Therefore, in this study, electrical capacitance tomography was used to determine the distribution of grain materials such as wheat in the pipe. In this research, the aim is to improve the performance of the capacitance tomography system by using a suitable arrangement for the electrodes and guards around it and using the Tikhonov reconstruction algorithm instead of the conventional LBP algorithm.

Material and Methods

In order to evaluate the capability of the electrical capacitance tomography system for determining the distribution of grains in the pipe section and measuring the mass flow rate of passing materials, a system based on electrical capacitance tomography was designed and manufactured. This system has three parts. The first part includes capacitive sensors. Sensors are actually a set of electrodes that are arranged around the pipe. The second part is a circuit for stimulating the sensors and measuring the response from the sensors. The third part includes the image reconstruction algorithm and the extraction of information on the distribution of particles in the pipe cross-section.

Algorithms of image reconstruction in electrical capacitance tomography have two stages of solving the direct problem and the inverse problem. The direct problem is to find the capacitance between the electrodes considering any form of known permittivity distribution. In this research, in addition to the conventional LBP algorithm, the performance of another algorithm called the Tikhonov regularization method is investigated. In this research parameters such as signal-to-noise ratio (SNR), which indicates the quality of the signal and sensitivity of the system are investigated. Root mean square error (RMSE) parameter, absolute average percentage of the error (MAPE) and standard deviation (SD) for both image reconstruction algorithms are compared and discussed.

Results and discussion

The dynamic range of boundary potentials is equal to 1740 millivolts. High signal-to-noise ratio indicates resistance of signal to noise and better signal quality. According to the obtained data, the signal-to-noise ratio is equal to 56.09 dB and the voltage variation parameter (VC) is equal to 424 millivolts. Two conventional LBP and Tikhonov algorithms were used to reconstruct the pipe section. The performance of the system was investigated in eight different positions of filling the pipe section by wheat. In situations P2 to P8, the RMSE values for the Tikhonov reconstruction algorithm are in the range of 0.04 to 0.01, which is lower than the mean squared error values for the LBP algorithm. The lowest value of RMSE belongs to the Tikhonov algorithm and for the position where the object is in the middle, and its value is equal to 0.0304. As grains of wheat was approaching the wall, this error increases and reaches to 0.037.

The results showed that with the increase of pipe filling and material density, the standard deviation decreases, and in other words, the accuracy of the system increases at higher densities, and as it was clear from the tomograms, the SD values in the Tikhonov algorithm are less than the algorithm is LBP.

Conclusion

The comparison results of the two algorithms showed that the Tikhonov algorithm has a more favorable behavior in making a tomogram of the wheat mass next to the pipe walls compared to the LBP algorithm. Both algorithms did not perform well in identifying the empty space between the wheat clumps, so it is suggested that other algorithms be used to detect the empty space between the wheat clumps. In general, considering the appropriate speed of Tikhonov's algorithm, this algorithm can be a suitable alternative to the conventional LBP algorithm.