



کاربردهای مقطع‌نگاری الکتریکی و نوری در صنعت نفت و گاز

محمد رضا یوسفی نجف آبادی^۱، مائده هادی نیا^۱، رضا جعفری^۱،

حمید ابریشمی مقدم^۱، حمید رضا تقی راد^۲

^۱ گروه مهندسی پزشکی، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

^۲ گروه کنترل، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

yousefi@eetd.kntu.ac.ir, m_hadinia@ee.kntu.ac.ir, jafari@eetd.kntu.ac.ir,
moghadam@eetd.kntu.ac.ir, taghirad@kntu.ac.ir

چکیده:

یکی از نیازهای متخصصین در صنعت کسب اطلاع از وضعیت داخلی لوله‌ها، مخزن‌ها و حفره‌های حاوی نفت، گاز و مشتقات آن‌ها است که به طور معمول دسترسی به داخل آن‌ها بدون قطع فرآیند تولید ممکن نیست. نیاز به کسب این اطلاعات موجب شده تا تحقیقات زیادی در زمینه روش‌های مختلف اندازه‌گیری‌ها و آزمون‌های غیر مخرب صورت گیرد. استفاده از مقطع‌نگاری به عنوان یک روش تصویربرداری غیر مخرب از داخل خطوط لوله‌های انتقال نفت و گاز برای پایش مواد تشکیل دهنده سیال‌ها و اندازه‌گیری جریان و دبی سیال‌های چند فازه در طی سال‌های اخیر از اهمیت خاصی برخوردار شده و در حال گسترش است. یکی از مهم‌ترین ضروریات این تحقیق همگام شدن با توسعه این تکنولوژی و رقابت با فناوری‌های وارداتی می‌باشد. یکی از گروه‌های تحقیقاتی فعال که از سال ۱۳۸۵ فعالیت تحقیقاتی و صنعتی خود را در زمینه سیستم‌های مقطع‌نگاری الکتریکی و نوری آغاز کرده است، گروه مقطع‌نگاری الکتریکی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است که تا کنون اقدام به ساخت سیستم‌های مختلف مقطع‌نگاری، از جمله مقطع‌نگاری مقاومتی، مقطع‌نگاری امپدانسی، مقطع‌نگاری خازنی با کاربردهای صنعتی و پزشکی نموده و در حال طراحی و ساخت سیستم‌های دیگری از جمله مقطع‌نگاری القای مغناطیسی می‌باشد. در این مقاله ضمن معرفی مختصر روش‌های فوق‌الذکر و بررسی کاربرد این روش‌ها در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی به ذکر فعالیت‌های انجام شده در این گروه در زمینه مقطع‌نگاری الکتریکی خواهیم پرداخت و در نهایت به مقایسه این روش‌ها برای کاربردهای فوق‌الذکر خواهیم پرداخت.

واژه‌های کلیدی: مقطع‌نگاری لوله‌های نفت و گاز، تصویر برداری غیر مخرب لوله‌های نفت و گاز و پتروشیمی، مقطع

نگاری مقاومتی، مقطع‌نگاری امپدانسی، مقطع‌نگاری خازنی، مقطع‌نگاری الکترو مغناطیسی، مقطع‌نگاری نوری.

۱- مقدمه

مقطع نگاری از واژه "توموز"^۱ که واژه ای یونانی به معنی "یک مقطع" یا "یک برش" است، گرفته شده است. بدست آوردن یک تصویر از یک سطح مقطع را مقطع نگاری گویند. این عمل با استفاده از انرژی دار کردن ناحیه مورد نظر، انجام اندازه گیری‌های از روی سطح ناحیه و بدست آوردن تصویر از این اندازه گیری‌ها صورت می‌پذیرد. مقطع نگاری الکتریکی علاوه بر کاربردهای پزشکی کاربردهای مهمی در صنعت نفت نیز دارد. حدود ۱۵ سال پیش استفاده از خواص الکترومغناطیسی استاتیکی اجسام جهت مقطع نگاری غیر تهاجمی در فرکانس‌های پایین زیر ۲ مگا هرتز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. در زمینه مقطع نگاری پزشکی غیر تهاجمی، "هولدر" در سال ۱۹۹۳ و "بران" در سال ۱۹۹۶ و در زمینه مقطع نگاری صنعتی، "ویلیام" و "بک" در سال ۱۹۹۵ آغاز گر راه بوده‌اند [۱].

تصویربرداری از داخل خطوط لوله‌های نفت، پایش مواد تشکیل دهنده سیال و اندازه گیری دبی سیال (نفت و گاز) در خطوط لوله‌های انتقال از کاربردهای مهم مقطع نگاری الکتریکی است. علاوه بر این سه کاربرد اصلی، امروزه مقطع نگاری الکتریکی کاربردهای متعدد دیگری نیز در صنعت پیدا کرده است. بعضی از این کاربردها تا به حال جنبه صنعتی پیدا کرده و به صورت تجاری وارد بازار شده‌اند و تعدادی دیگر در حال گذراندن تست‌های عملیاتی جهت تکمیل بوده و تعدادی دیگر تا مرحله آزمایشگاهی پیشرفته و هنوز وارد عرصه عملیاتی در صنعت نشده‌اند. تعدادی از این کاربردها در صنعت نفت عبارت از مانیتورینگ جریان‌ات چند فازه^۲، تشخیص نشتی در لوله‌های و مخازن دفن شده، عملیات اکتشافی زمین شناسی برای شناسایی بسترهای مایعات زیر زمینی، مانیتورینگ مراحل پلیمریزاسیون نایلون، مانیتورینگ فیلتراسیون تحت فشار و مانیتورینگ احتراق و انفجار می‌باشند. پایین بودن هزینه ساخت، سرعت بالا، امنیت و مناسب بودن برای لوله‌ها و مجاری با ابعاد مختلف دلایلی هستند که سبب شده علاقه بیشتری برای استفاده از سیستم‌های مقطع نگاری الکتریکی در صنعت به وجود آید [۲ و ۱].

مقطع نگاری الکتریکی یک روش تصویر برداری از توزیع امپدانس درون شی، با استفاده از اندازه گیری‌هایی از سطح آن می‌باشد. کمیت‌های فیزیکی مختلف مواد در ناحیه مقطع نگاری، امکان اندازه گیری‌های متفاوتی را ایجاد می‌کند که منجر به پیدایش سیستم‌های مقطع نگاری متفاوتی می‌شود به طوری که پیاده سازی مقطع نگاری برای فرایندها توسط روش‌های گوناگونی صورت می‌پذیرد. روش‌های مقطع نگاری الکتریکی بر اساس اندازه گیری سه ویژگی الکتریکی موجود در اجسام شامل ضریب هدایت الکتریکی (σ)، نفوذ پذیری الکتریکی (ε) و نفوذ پذیری مغناطیسی (μ) کار می‌کنند و بر این اساس این روش‌ها به سه زیر شاخه مقطع نگاری امپدانس الکتریکی^۳ (EIT)، مقطع نگاری ظرفیت خازنی الکتریکی^۴ (ECT) و مقطع نگاری القای مغناطیسی^۵ (MIT) تقسیم می‌شوند.

مقطع نگاری نوری نیز از جمله روش‌های مانیتورینگ فرآیندهای صنعتی درون لوله‌ای و درون حفره‌ای می‌باشد که در دسته بندی مجزا قرار می‌گیرد و بر اساس اعمال یک نور ورودی و شناسایی خواص شکست، جذب و تفرق نور در داخل سیال عمل می‌کند [۳].

¹ Tomos

² Multi-phase Flow

³ Electrical impedance tomography

⁴ Electrical capacitance tomography

⁵ Magnetic induction tomography

در مسأله مقطع نگاری با یک مسأله معکوس و یک مسأله پیشرو روبرو هستیم. مسأله معکوس شامل تعیین توزیع امیدانسی از روی ولتاژهای اندازه گیری شده می‌باشد. مسأله معکوس بد وضع می‌باشد زیرا به علت تعداد مجهولات زیاد و محدود بودن اندازه‌گیری‌ها لزوماً جواب یکتا نداشته و همچنین تغییرات بزرگ در توزیع امیدانس تغییرات اندکی در مقادیر خروجی به وجود می‌آورد. معمولاً برای مدل‌سازی مسأله پیشرو از روش‌های اجزاء محدود^۶ (FEM) و اجزای مرزی^۷ (BEM) استفاده می‌شود.

۲- سیستم مقطع نگاری امیدانس الکتریکی

قدیمی‌ترین روش تصویر برداری الکتریکی، تصویربرداری به روش امیدانس الکتریکی می‌باشد. در این روش از اتصال آرایه‌ای از الکترودهای سطحی به اطراف ناحیه تصویربرداری استفاده می‌شود. جریان به وسیله تعدادی از این الکترودهای سطحی به شیء تزریق شده و پتانسیل‌های الکتریکی از طریق الکترودهای دیگر اندازه‌گیری می‌شود. در روش‌های جدیدتر که حساسیت آن‌ها از روش‌های قبلی بهتر است، تمامی الکترودها در یک لحظه نمونه برداری منبع جریان بوده و در لحظه بعدی اقدام به اندازه‌گیری ولتاژ از ناحیه هدف می‌نمایند [۴].

با اندازه‌گیری امیدانس انتقالی^۸ شیء هدف در جهت‌های مختلف، ضرایب هدایت الکتریکی (σ) و نفوذ پذیری الکتریکی (ε) قابل محاسبه است. در بعضی از روش‌های دیگر که به مقطع‌نگاری مقاومتی^۹ (ERT) معروف هستند از ضریب نفوذ پذیری الکتریکی صرف نظر می‌شود. به عنوان نمونه شکل (۱) یک نمونه سیستم مقطع‌نگاری مقاومتی به‌کارگیری شده برای اندازه‌گیری روی خط^{۱۰} دبی^{۱۱} سیال را نشان می‌دهند [۵]. شکل (۲) نیز نمونه‌ای دیگر از سیستم‌های اندازه‌گیری روی خط دبی با استفاده از مقطع نگار امیدانس الکتریکی ۱۶ الکترودی را نشان می‌دهد [۶].

در سال ۱۳۸۵ پس از تشکیل هسته اولیه گروه مقطع‌نگاری الکتریکی در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، اولین سیستم مقطع‌نگاری مقاومتی در این گروه در سال ۱۳۸۷ ساخته شد. در این سیستم جریان‌ها به دو الکتروده اعمال گردیده و ولتاژها از دیگر الکترودها اندازه‌گیری شدند.

در آزمایش این سیستم برای دریافت داده‌های واقعی از یک فانتوم استفاده شده است. این فانتوم استوانه‌ای شکل و با شعاع ۰/۱۵ متر، ارتفاع ۰/۳۵ متر و از جنس P.V.C ساخته شده بود. محفظه داخلی این فانتوم از محلول آب نمک استاندارد ۳٪ پر شده بود. برای دریافت داده از فانتوم، از چهار الکتروده استفاده شده است که دو الکتروده برای اعمال جریان و دو الکتروده دیگر نیز برای اندازه‌گیری ولتاژ حاصل از آن بکار می‌رود. الکترودهای استفاده شده نیز از جنس Ag/AgCl می‌باشند [۷-۸]. در تحقیقات بعدی در سال ۱۳۸۸ با به‌کارگیری مدولاتورهای حساس به فاز در این سیستم تغییراتی ایجاد شد و سیستم مقطع‌نگاری مقاومتی به سیستم مقطع‌نگاری امیدانسی تبدیل گردید که در سیستم جدید، مؤلفه‌های حقیقی و موهومی توأمأماً اندازه‌گیری شدند [۹].

در سال ۱۳۸۹ با ساخت یک سیستم دیگر و با بهره‌گیری از بهبود نرم افزاری روش پیشرو و افزایش تعداد الکترودها و ترکیب المان‌های سه ضلعی و چهارضلعی، دقت تفکیک پذیری سیستم بهبود یافت. بهبود سخت افزاری در ساخت منبع جریان

⁶ Finite element method

⁷ Boundary element method

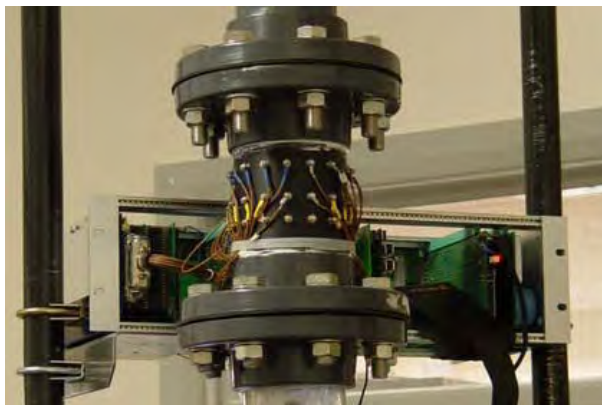
⁸ Transimpedance

⁹ Resistance tomography

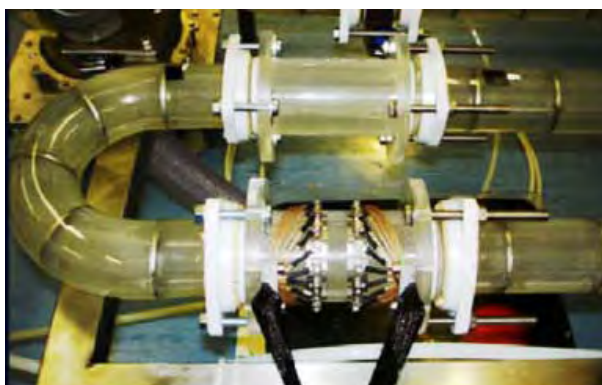
¹⁰ On line

¹¹ Flow

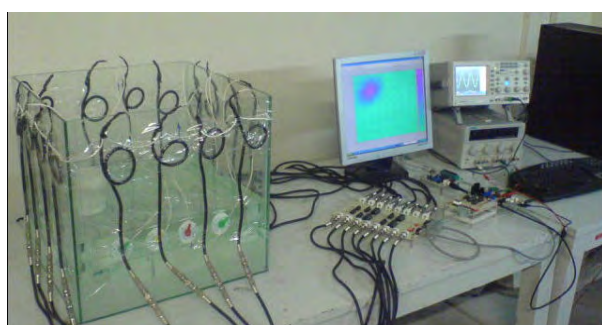
جدید، مالتی پلکسرها، فانتوم و طراحی کارت واسط از دیگر تغییرات سیستم جدید مقطع‌نگاری امپدانسی بود. شکل (۳) این سیستم را به همراه فانتوم ۱۶ الکترودی ساخته شده نشان می‌دهد. در این سیستم در هر لحظه یک جفت الکتروود، جریان را تزریق کرده و سایر الکتروودها وظیفه اندازه‌گیری ولتاژ را بر عهده دارند [۱۰].



شکل (۱): استفاده از سیستم مقطع‌نگاری مقاومتی جهت اندازه‌گیری روی خط دبی [۵].



شکل (۲): استفاده از یک سیستم مقطع‌نگاری امپدانسی ۱۶ الکترودی جهت اندازه‌گیری روی خط دبی [۶].

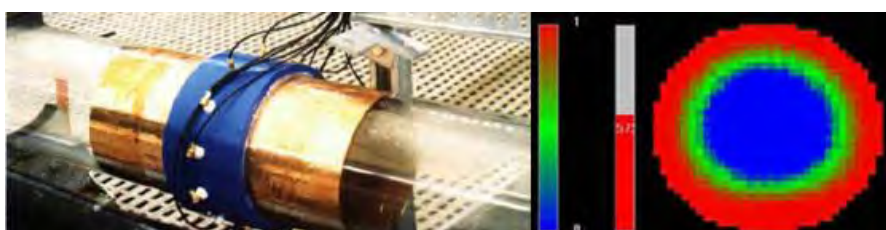


شکل (۳): فانتوم ۱۶ الکترودی استفاده شده در سیستم مقطع‌نگاری امپدانسی [۱۰].

۳- سیستم مقطع‌نگاری ظرفیت خازنی الکتريکی

روش دیگر تصویر برداری الکتريکی، تصویر برداری به روش ظرفیت خازنی الکتريکی می‌باشد. در این روش نیز از یک آرایش الکتروودهای سطحی استفاده شده و یک میدان الکتريکی به ماده اعمال می‌شود و پس از آن توسط داده‌های الکتروودهای سطحی، توزیع ضرایب نفوذ پذیری الکتريکی (ε) بدست می‌آید. تفاوت بین این روش و مقطع‌نگاری امپدانسی در این است که

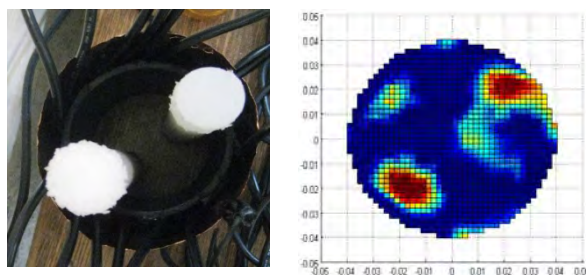
در مقطع‌نگاری ظرفیت خازنی الکتریکی بجای اندازه‌گیری امپدانس، ظرفیت خازنی بین جفت الکترودهای متفاوت اندازه‌گیری می‌شود. این روش برای اشیاء با ضریب نفوذ پذیری کم و ضریب هدایت ناچیز با مرزهای عایق مفید می‌باشد. تکنیک‌های مقطع‌نگاری الکتریکی به واسطه ارزان بودن، امنیت بالا، سرعت بالای جمع‌آوری اطلاعات و مناسب بودن برای مجاری و لوله‌ها با ابعاد مختلف نقش بسیار مهمی در کاربردهای صنعتی جهت به تصویر درآوردن فرایندها دارند. از میان تکنیک‌های مقطع‌نگاری الکتریکی، تکنیک مقطع‌نگاری الکتریکی خازنی به دلیل توانایی تشخیص بین فازهای متفاوت مبنی بر توزیع ضرایب نفوذپذیری الکتریکی در سطح مقطع مورد نظر، به شکل گسترده‌ای موضوع بسیاری از تحقیق‌های روز دنیا شده است [۱۱]. تحقیق در زمینه مقطع‌نگاری الکتریکی خازنی با رشته‌های مختلف علمی مرتبط است و زمینه‌های تحقیق آن را می‌توان به سه دسته طراحی حسگر، الکترونیک سخت افزار و بازسازی تصویر تقسیم بندی کرد. نمونه‌ای از یک سیستم مقطع‌نگار در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل حباب هوا در میان جریان نفت در لوله به تصویر کشیده شده است [۱۲].



شکل(۴): تصویر بازسازی شده در سیستم مقطع‌نگاری الکتریکی خازنی نشان دهنده حباب هوا در جریان نفت [۱۲].

در سال ۱۳۸۸ گروه مقطع‌نگاری الکتریکی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی اقدام به طراحی و ساخت یک سیستم مقطع‌نگاری خازنی الکتریکی کرد [۱۱]. این سیستم با تخمین ضرایب نفوذپذیری الکتریکی مواد درون سطح مقطع لوله‌ها و یا مجاری اقدام به بازسازی تصاویر سطح مقطعی از مجاری و لوله‌ها می‌کند. تخمین ضرایب نفوذپذیری الکتریکی توسط اندازه‌گیری خازن‌های روی سطح شی و حل یک مسأله معکوس صورت می‌پذیرد.

در این سیستم، حل مسأله پیشرو با روش اجزای محدود انجام شده و دو روش "انتگرال گاوسی" و روش "بار" جهت محاسبه خازن‌ها در مسأله معکوس استفاده شده است. سیستم مقطع‌نگار ارائه شده با استفاده از مدار شارژ و دشارژ ساخته شده است. تصاویر بازسازی شده با استفاده از داده‌های سیستم عملی در اولین نمونه ساخته شده نتایج رضایت بخشی را ایجاد کرد. نتایج تصاویر بازسازی شده سیستم مقطع‌نگاری خازنی ساخته شده به همراه فانتوم در شکل (۵) نشان داده شده است.



استفاده شده در مقطع‌نگاری

شکل(۵): سمت چپ: فانتوم

خازنی، سمت راست تصویر بازسازی شده [۱۱].

۴- سیستم مقطع نگاری القای مغناطیسی

یکی دیگر از روش‌های مقطع‌نگاری، تصویربرداری به روش القای مغناطیسی می‌باشد. این روش در سال ۱۹۹۳ پایه گذاری شده است. در این روش یک میدان مغناطیسی قوی توسط چند سیم پیچ تحریک به شیء هدف اعمال شده و باعث ایجاد جریان‌های گردابی در درون شیء می‌شوند. داده‌های خروجی از سیم‌پیچ‌های اندازه‌گیری ولتاژ برای بازسازی تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقطع‌نگاری القای مغناطیسی به هر دو ضریب هدایت الکتریکی (σ) و نفوذ پذیری مغناطیسی (μ) حساس بوده و به وسیله ولتاژهای اندازه‌گیری شده به وسیله سیم پیچ‌های حسگر (سنسورهای القایی بسیار حساس)، این ضرایب در شیء هدف قابل محاسبه می‌باشند [۱۳]. این روش تصویر برداری با نام‌های دیگری همچون مقطع‌نگاری اندوکتانسی^{۱۲} و مقطع‌نگاری الکترومغناطیسی^{۱۳} نیز شناخته می‌شود.

البته اخیراً روش‌های ترکیبی دیگری نیز ابداع شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به اعمال میدان مغناطیسی توسط سیم‌پیچ‌های تحریک و ثبت پتانسیل‌های القایی در شیء هدف توسط الکترودهای سطحی [۱۴] یا اعمال جریان خارجی به شیء هدف توسط الکترودهای سطحی و حس میدان مغناطیسی خارج شده از شیء هدف به وسیله سنسورهای القایی اشاره کرد [۱۵ و ۱۶]. این روش‌ها به نام مقطع‌نگاری الکتریکی مغناطیسی امپدانسی^{۱۴} شناخته می‌شوند.

از مقطع‌نگاری القای مغناطیسی در کاربردهای صنعتی در جاهایی که خواص هدایت الکتریکی و نفوذ پذیری مغناطیسی اجسام اهمیت دارد، به ویژه مانیتورینگ فرایندهای صنعتی، آزمون غیر مخرب و ژئوفیزیک استفاده می‌شود. به عنوان مثال‌هایی از کاربرد این روش صنعتی، می‌توان به تشخیص اجسام خارجی در دستگاه‌های خطرناک، تشخیص اجسام خارجی در صنایع غذایی، تشخیص اجسام خارجی در لوله‌های نفت و گاز، تشخیص ترک‌ها در بازرسی خطوط لوله‌های نفت و گاز، دسته بندی فلزات، تشخیص ضخامت جوش یا هدایت الکتریکی و مشاهده روی خط در صنایع تولید فلز اشاره کرد. بازسازی تصویر در این روش نیز، یک مسأله معکوس بد وضع شده غیر خطی^{۱۵} می‌باشد که تا کنون از روش‌های زیادی برای بازسازی این تصویر استفاده شده است [۱۷].

شمای کلی از یک سیستم مقطع‌نگاری القای مغناطیسی نمونه در شکل (۶) نشان داده شده است، که از سه بخش کلی آرایه سنسورها، مدارهای الکترونیکی واسطه و کامپیوتر تشکیل شده است. در این سیستم انرژی به شیء هدف به وسیله اعمال یک جریان سینوسی به یک یا چند سیم پیچ تحریک اعمال می‌شود و ولتاژهای اندازه‌گیری شده توسط سیم پیچ‌های گیرنده حاصل جمع آثار^{۱۶} میدان‌های اعمال شده توسط سیم پیچ‌های تحریک می‌باشد [۱۸]. هر چقدر تعداد دفعات اعمال میدان و به طبع آن تعداد اندازه‌گیری‌ها بیشتر باشد، کیفیت تصویر بازسازی شده بهتر خواهد بود. پس از این مرحله سیگنال‌های خروجی از سیم پیچ‌های گیرنده، گسسته سازی شده و وارد کامپیوتر می‌شوند. سپس به وسیله یک الگوریتم بازسازی، یک تصویر از شیء هدف بدست می‌آید. تصویر بدست آمده در لبه‌های خارجی شیء هدف شامل جزئیات بیشتری نسبت به مرکز شیء می‌باشد. تفاوت سیستم‌های مختلف مقطع‌نگاری القای مغناطیسی در آرایه سنسورها (نحوه چیدمان سیم پیچ‌های گیرنده)، فرکانس کاری (سیم پیچ تحریک) و نحوه حس میدان‌های تشخیصی توسط سنسورهای القایی (سیم پیچ‌های گیرنده) می‌باشد [۱۹-۲۱]. میدان حس شده توسط سنسورهای اندازه‌گیری ولتاژ، شامل میدان اولیه ناشی از میدان تحریک اصلی و

¹² Mutual inductance tomography(also MIT)

¹³ Electromagnetic tomography (EMT)

¹⁴ Magnetic electrical impedance tomography

¹⁵ Ill-posed problem non linear

¹⁶ Projection

میدان ثانویه ناشی از جریان‌های گرد آبی درون شی می‌باشد. برای تشخیص میدان ثانویه به یک آشکار ساز حساس به فاز برای تمیز دادن این دو نوع میدان نیاز داریم [۲۱].

از جمله خصوصیات سیستم‌های مقطع نگاری القای مغناطیسی صنعتی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- هدایت الکتریکی در شیء هدف زیاد است.

- فرکانس کاری پایین برای تحریک استفاده می‌گردد (تا ۵۰۰ KHZ).

- در اشیاء فرو مغناطیس، سیگنال ثانویه هم فاز با سیگنال اولیه می‌باشد (ΔB حقیقی و مثبت).

- در اشیاء با هدایت الکتریکی بالا (فلزات)، سیگنال ثانویه دارای قسمت حقیقی منفی و یک قسمت موهومی است.

- اندازه میدان ثانویه (ΔB)، حدود ۲۵٪ اندازه میدان اصلی (B) است.



شکل (۶): شمای کلی از یک سیستم مقطع نگاری القا مغناطیسی [۱۸].

سیستم‌های مقطع نگاری القای مغناطیسی چند فرکانسی نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۳-۲۴]. مقایسه‌ای از سه روش مقطع نگاری الکتریکی در جدول (۱) آورده شده است [۲۵].

جدول (۱): مقایسه روش‌های مقطع نگاری الکتریکی [۲۳].

نوع حسگر	کمیت اندازه گیری	خواص مواد	مواد نمونه
ECT	خازن	$10^2 < \epsilon_r < 10^4$ $\sigma < 10^{-14} S/m$	نفت، آب یونیزه ^{۱۷} ، پودرهای غیر فلزی، پلیمرها، گازهای مشتعل
EIT	مقاومت (امپدانس)	$10^{-3} < \sigma < 10^7 S/m$ $10^2 < \epsilon_r < 10^4$	آب، آب نمک، بافت‌های زیستی ^{۱۸} ، مواد زمین شناسی ^{۱۹} ، نیمه هادی‌ها
MIT	سلف/ اندوکتانس متقابل	$10^2 < \mu_r < 10^4$ $10^2 < \sigma < 10^7 S/m$	فلزات، برخی کانی‌ها، مواد مغناطیسی، آب یونیزه شده

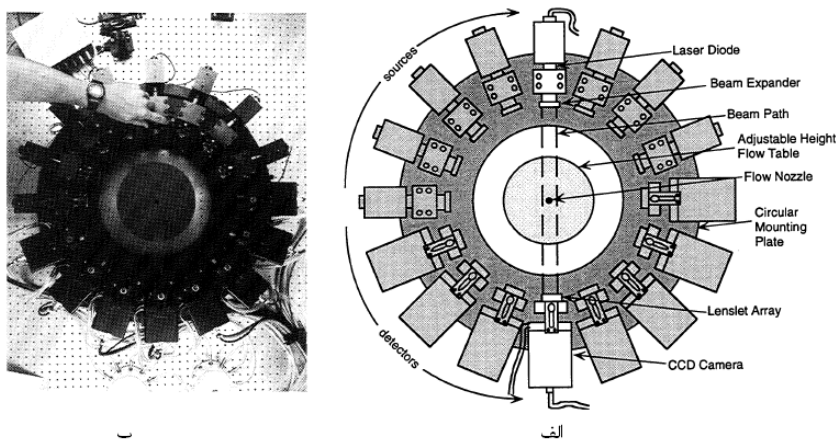
¹⁷ De-ionized water

¹⁸ Biological tissue

¹⁹ Geological materials

۵- سیستم مقطع نگاری نوری

روش‌های نوری برای تصویربرداری سه بعدی از فلوی سیال و فلوی هوای گرم شده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳] و [۲۶]. توجه قابل توجهی در تشخیص ساختار سازمان یافته انتقال جریان سیال با دقت تفکیک‌پذیری مکانی و زمانی بالا با یک اندازه‌گیری غیرتهاجمی وجود دارد. شماتیک یک سیستم مقطع‌نگاری نوری در شکل (۷-الف) نمایش داده شده است. نمونه آزمایشگاهی این سیستم نیز در شکل (۷-ب) نمایش داده شده است. این سیستم شامل ۸ منبع دیود لیزری و ۸ آشکارساز دوربین CCD است. این آشکارسازها به طور هم‌زمان تابش لیزر خارج شده از محیط پس از عبور از گاز یا سیال را اندازه می‌گیرند. این اندازه‌گیری‌ها به عنوان ورودی به یک الگوریتم بازسازی مقطع‌نگاری استاندارد وارد می‌شوند تا یک تصویر دو یا سه بعدی از جریان سیال یا گاز ایجاد شود. بازسازی تصویر در مقطع نگاری پخشی نوری به روش معکوس انجام می‌شود. در روش معکوس معمولاً از یک فرآیند تکراری که در آن یک مدل پیشرو به یکسری فرضیات اولیه برای پارامترهای محیط اعمال می‌شود استفاده می‌شود. مقایسه مجموعه کمیت‌های اندازه‌گیری واقعی و مدل شده به اصلاح توزیع پارامترها منجر می‌شود که می‌تواند به طور تکراری به مدل پیشرو وارد شود تا جایی که اختلاف این دو مجموعه داده به نحو بهینه‌ای کوچک شود.



شکل (۷)- الف: شماتیک یک سیستم مقطع‌نگاری نوری، ب: نمونه‌ای آزمایشگاهی یک سیستم مقطع‌نگاری نوری [۲۶].

۶- نتیجه‌گیری

نیاز به بررسی داخل اشیاء و فضاهایی که در عمل دسترسی به داخل آن‌ها بدون قطع فرآیند تولید امکان پذیر نمی‌باشد یکی از اساسی‌ترین نیازهای تمامی فرآیندهای تولیدی پیوسته است که صنعت نفت و گاز نیز یکی از عمده‌ترین آن‌ها به شمار می‌رود. بنابراین می‌توان در کاربردهای مانیتورینگ پیوسته در دبی‌های بالا از این روش‌ها بهره زیادی برد. می‌توان تصاویر بدست آمده از این روش‌ها را مورد تحلیل قرار داد تا پارامترهایی، نظیر ابعاد فضای حباب هوا، سرعت رژیم سیال، شروع کریستال سازی و غیره بدست آید. مهم‌ترین مزایای روش‌های مقطع‌نگاری شامل غیر تهاجمی بودن، غیر تداخلی بودن، کم بودن هزینه ساخت، سرعت نمونه برداری بالا و قابلیت تصویر برداری روی خط لحظه به لحظه می‌باشد. تجهیزات سیستم نیز نسبتاً سبک و ساده بوده و به راحتی قابل نصب و استفاده می‌باشند. با این وجود تفکیک پذیری فضایی نسبتاً کم در تصاویر بازسازی شده، غیر خطی بودن و بد وضعی معادلات حاکم بر سیستم، چالش‌های بزرگ مطرح شده در مواجهه با سیستم‌های مقطع‌نگاری الکترونیکی می‌باشند [۲۴].

مراجع

- [1] B. Brown, "Medical impedance tomography and process impedance tomography: a brief review," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 12, pp. 991-996, 2001.
- [2] I. Evans and T. York, "Microelectronic capacitance transducer for particle detection," *IEEE Sensors Journal*, vol. 4, pp. 364-372, 2004.
- [3] L. McMackin, R. J. Hugo, R. E. Pierson, and C. R. Truman, "High speed optical tomography system for imaging dynamic transparent media," *Optics Express*, Vol. 1, pp. 301-311, 1997.
- [4] R. Williams and M. Beck, *Process tomography: principles, techniques, and applications*, Butterworth-Heinemann, 1995.
- [5] H. Li, M. Wang, Y. Wu, Y. Ma, R. Williams, "Measurement of oil volume fraction and velocity distributions in vertical oil-in-water flows using ERT and a local probe," *Journal of Zhejiang University Science*, Vol. 6A, pp. 1412-1415, 2005.
- [6] G. Vilar, R. A. Williams, M. Wang, R. J. Tweedie, "On line analysis of structure of dispersions in an oscillatory baffled reactor using electrical impedance tomography," *Chemical Engineering Journal*, vol.141, pp. 58-66, 2008.
- [۷] نصیره دیاریان و رضا جعفری، "کاربرد مقطع نگاری امپدانس الکتریکی در تست‌های غیر مخرب و مهندسی پزشکی و پیشرفت‌های اخیر آن" دومین کنفرانس بین‌المللی بازرسی فنی و آزمون غیر مخرب، تهران، ۱۳۸۷.
- [۸] نصیره دیاریان، "مدل‌سازی اجزاء محدود و ساخت یک سیستم مقطع نگاری امپدانس الکتریکی،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۷.
- [۹] سید احمد حمیدی، "طراحی و پیاده‌سازی یک دم‌ولتور حساس به فاز دیجیتال برای استفاده در سیستم‌های مقطع نگاری الکتریکی،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸.
- [۱۰] عباس نصوری، "بهبود و تعیین دقت تفکیک پذیری یک سیستم مقطع‌نگاری امپدانس الکتریکی،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۹.
- [۱۱] کیان در، "طراحی و پیاده‌سازی دستگاه مقطع نگار الکتریکی خازنی،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸.
- [12] Q. Marashdeh, "Advances in electrical capacitance tomography," Ph.D. thesis, The Ohio State University, 2006.
- [13] M. Soleimani and A. Tamburrino, "Shape reconstruction in magnetic induction tomography using multi frequency data," *International Journal of Information and Systems Sciences*, Vol. 2, pp. 343-353, 2006.
- [14] J. M. Scaife, R. C. Tozer and I. L. Freeston, "Conductivity and permittivity images from an induced current electrical impedance tomography system," *IEE Proc.*, Vol. A.141, pp. 356-362, 1994.
- [15] B. Horner and F. Mesch, "An induction flowmeter insensitive to asymmetric flow profiles," *European Concerted Action on Process Tomography Conf.*, pp. 321-330, 1995.
- [16] Y. Tomita and S. Honda, "Estimation of velocity profile by magnetic flowmeter with rotating field," *SICE Conf.*, pp. 1301-1304, 1992.
- [17] A. J. Peyton, Z. Z. Yuy, G. Lyony, S. Al-Zeibaky, J. Ferreiraz, J. Velezz, F. Linharesz, A. R. Borgesz, H. L. Xiong, N. H. Saundersk and M. S. Becky, "An overview of electromagnetic inductance tomography: description of three different systems," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 7, pp. 261-271, 1996.
- [18] G. S. Park and S. Kang, "A study on the determination of the object shape in magnetic inductance tomography system," *12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, pp. 72-77, 2006.
- [19] X. Ma, A. J. Peyton, S. R. Higson, A. Lyons and S. J. Dickinson, "Hardware and software design for an electromagnetic induction tomography (EMT) system for high contrast metal process applications," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, pp. 111-118, 2006.
- [20] M. Soleimani, W. R. B. Lionheart, A. J. Peyton, X. Ma, and S. R. Higson, "A three dimensional inverse finite element method applied to experimental eddy current imaging data," *IEEE Transactions on Magnetics.*, Vol. 42, pp. 1560-1567, 2006.
- [21] H. Griffiths, "Magnetic induction tomography," *Measurements Science Technology*, Vol. 12, pp. 1126-1131, 2001.
- [22] T. York, "Status of electrical tomography in industrial applications," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 10, pp. 608, 2001.
- [23] J. Rosell-Ferrer, R. Merwa, P. Brunner and H. Scharfetter, "A multifrequency magnetic induction tomography system using planar gradiometers: data collection and calibration," *Measurements Science Technology*, Vol. 12, pp. 1126-1131, 2006.



- [24] H. Scharfetter, A. Kostinger and S. Issa, "Hardware for quasi-single-shot multifrequency induction tomography: the Graz Mk2 system," *Physiological Measurements*, Vol. 29, pp. S431-443, 2008.
- [25] N. Reinecke and D. Mewes, "Recent developments and industrial/research applications of capacitance tomography," *Measurements Science Technology*, Vol. 7, pp. 233-246, 1996.
- [26] R. E. Pierson, E. Y. Chen, K. P. Bishop, and L. M. Mackin, "Modeling and measurement of optical turbulence by tomographic imaging of a heated air flow," *SPIE*, Vol. 28, 2007