

بررسی توמוگرافی غیر تماسی امواج فراصوت برای تحلیل جریان‌های دو فازی گاز-مایع و اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های CFD

سیدحسین هاشم‌آبادی^{*}، ولی عصمتی پاقلعه، سعید زین العابدین

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

پیام نگار: Hashemabadi@iust.ac.ir

چکیده

در این مطالعه تصویربرداری و اندازه‌گیری خارجی جریان گاز/مایع با استفاده از توמוگرافی فراصوت^۱ به عنوان روشی جدید برای سنجش الگو و کسر حجمی فازها در جریان‌های چند فازی صنعتی، اعتبارسنجی شبیه‌سازی CFD و پدیده‌های گذرا در جریان، مورد بررسی قرار گرفته است. محدودیت‌ها و دامنه کاربرد این روش تصویربرداری خارجی غیر تماسی ذکر شده است و همچنین نظریه بازسازی تصویر با استفاده از این روش توضیح داده شده است.

کلمات کلیدی: توמוگرافی، جریان چند فازی، فراصوت، سیستم اندازه‌گیری جریان، اعتبارسنجی

۱- مقدمه

تکنیک‌های اندازه‌گیری با قابلیت نمایش پیوسته و هم‌زمان^۲ دینامیک جریان بدون تداخل هیدرودینامیکی در سیستم برای توصیف پدیده‌های حالت گذرا در سیستم‌های چند فازی بسیار محدود هستند. تحقیقات زیادی به منظور یافتن راهکار طی دهه‌های اخیر صورت گرفت که منجر به توسعه تکنیک توמוگرافی فرایند گردید. این فناوری که فرایند دستیابی به تصاویر مقطعی از اشیاء سه بعدی و به صورت خاص توמוگرافی فرایند جریان، تصویرسازی مقطعی جریان می‌باشد، در زمینه صنعتی در میانه دهه ۱۹۸۰ بکار گرفته شد.

تکنیک‌های اندازه‌گیری توموگرافیک به طور فزاینده‌ای در زمینه‌های مهندسی فرایند و شیمی محبوبیت یافته‌اند. با این روش‌ها، چگالی،

غلظت، دما، سرعت یا جزء خالی موضعی را می‌توان بدون تداخل با جریان چند فازی اندازه‌گیری کرد [۱]. همچنین این روش‌ها، پتانسیل بزرگی را برای توسعه و تأیید مدل‌های جریان، اعتبارسنجی‌های شبیه‌سازی CFD و عیب‌یابی فرایندهای صنعتی به منظور سودآوری و بازدهی بیشتر انتقال و فرایند مواد در لوله‌ها و ظروف فرایندی داراست. اندازه‌گیری جریان دو فازی همچون جریان نفت همراه آب یا گاز درون یک لوله با دامنه کاربرد وسیع، برای مثال کنترل خطوط لوله انتقال نفت و پایش فرایندهای شیمیایی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲]. تعیین پارامترهایی همچون کسر حجمی فاز گاز در خطوط یا ظروف فرایندی و تعیین رژیم جریان در جریان‌های چند فازی ضروریست. تصویرسازی جریان درون لوله اغلب اولین مرحله در تحلیل آزمایشگاهی به منظور بهبود جریان‌ها و کنترل فرایند می‌باشد. این امر بر اهمیت اندازه‌گیری توموگرافیک

1. Ultrasonic
2. Online

عملیات منطقی دوتایی^۲ و روش زمان انتشار^۳ در مسیر مستقیم به طور خلاصه معرفی شده است. زو و همکاران [۸]، در مقاله‌ای کاربرد توموگرافی فراصوت را برای پایش جریان گاز- مایع ارائه کردند. نویسندگان، وابستگی ذاتی پرتوهای فراصوت ناقص را به توزیع حباب‌ها در مایع بر مبنای روش حالت انتقال^۴ بررسی کردند و مدل ریاضی بیان‌کننده خصوصیات صوتی این جریان را ارائه دادند. آن‌ها عملکرد سامانه ساخته شده را برای شناسایی رژیم جریان با مدل‌های متعدد، ارزیابی کردند. زو و همکاران [۲]، آرایش هشت الکتروود با فواصل مساوی در جریان‌سنج‌های ظرفیتی که ترکیبی از جریان‌سنج ظرفیتی القایی مغناطیسی با تکنیک توموگرافی الکترومغناطیس است، به منظور کاهش خطاهای اندازه‌گیری در جریان‌های مغشوش بررسی کردند. آن‌ها با ارائه روش اندازه‌گیری وتر^۵ و الگوریتم تلفیق داده‌ها^۶ از زوایای چندگانه، نسبت سیگنال مناسب برای اندازه‌گیری شدت جریان را بهینه کردند. برون و همکاران [۴]، تکنیک توموگرافی فراصوت را برای پایش ذرات جامد در خطوط انتقال بادی توسعه دادند. این تکنیک از اندازه‌گیری‌های فراصوت حالت انتقال محدود به ناحیه مگاکرتر استفاده می‌کند و بازسازی تصویر از یک روش کارآمد و افکنش^۷ بهره می‌گیرد. در این تحقیق توانایی‌ها و محدودیت‌های تکنیک ارزیابی شده است. عبدالرحیم و همکاران [۵]، تکنیک توموگرافی فراصوت را برای پایش جریان گاز- مایع توسعه دادند. آن‌ها از ۱۶ جفت حسگر با ولتاژ کم ۲۰ ولتی با آرایش مدور حول یک لوله آزمایش استفاده کردند. عبدالرحیم و همکاران [۹]، ضمن انتشار نتایج اولیه و معرفی سامانه ساخته شده و الگوریتم مناسب بازسازی تصویر، ابراز داشتند که پایش زمان واقعی فرایند نقش غالبی در بسیاری زمینه‌های صنعتی و تحقیقاتی به خصوص در جریان‌های دو فازی بازی می‌کند. آن‌ها مدت^۸ ارسال سنسور فرستنده و دریافت توسط سنسورهای گیرنده را برای جریان‌های کاملاً گازی، گاز- مایع (۵۰:۵۰) و کاملاً مایع گزارش کردند. رحیمان و عبدالرحیم [۱۰]، روی توموگرافی اولتراسونیک نصب خارجی برای تصویربرداری جریان مایع و گاز تحقیق کردند. در این تحقیق، الگوریتم‌های و افکنش خطی^۹،

در فرایندهای صنعتی می‌افزاید. بازسازی زمان واقعی^۱ تصویر جریان به منظور تخمین رژیم جریان و پایش زمان واقعی فرایند، نقش غالب در بسیاری از زمینه‌های صنایع و تحقیقات علمی مرتبط با جریان دو فازی گاز/ مایع بازی می‌کند. بازدهی عملیات فرایندها به اندازه‌گیری دقیق و کنترل پارامترهای هیدرودینامیکی همچون رژیم جریان و شدت جریان مرتبط است [۳]. تصویرسازی و اندازه‌گیری جریان‌ها روش مهم و مورد توجهی برای بازرسی صنایع فرایندی است. توموگرافی، اطلاعات کمی و کیفی بهتری در مقایسه با سایر روش‌های سنجش در اختیار قرار می‌دهد [۴].

توموگرافی فراصوت می‌تواند خصوصیات اشیاء را که توسط سایر روش‌ها نمی‌توان بدست آورد، سنجش نماید. امواج فراصوت تغییرات در امپدانس صوتی را ردیابی می‌کند که رابطه مستقیمی با چگالی محیط دارد. حسگرهای فراصوت به طور موفقیت‌آمیزی در اندازه‌گیری جریان، آزمایش‌های غیر مخرب و تصویر برداری پزشکی به کار گرفته شده است. معمولاً سیگنال فراصوت یا به صورت پیوسته یا پالسی استفاده می‌شود. در استفاده از سیگنال پیوسته، اثر ارسال پیوسته سیگنال توسط کریستال پیزوالکتریک در نظر گرفته می‌شود در صورتی که با استفاده از پالس‌ها، فاصله زمانی عبور و سیگنال دریافتی آنالیز و پارامترهای مورد نظر تخمین زده می‌شود [۵].

محققین زیادی به دلیل اهمیت بالای توموگرافی فرایند بر روی آن مطالعه کرده‌اند. دیکین و همکاران [۶]، در یک مطالعه مروری کارهای انجام شده روی توموگرافی فرایند به صورت نصب خارجی و فرایندهای انتخاب شده توسط محققین را بررسی کردند. آن‌ها بر مبنای روش الکتریکی توموگرافی فرایند را توصیف کردند. این نویسندگان کاربردهای این تکنولوژی شامل اندازه‌گیری پروفایل غلظت اجزاء، تعیین مرزهای بین فازی، سرعت و شدت جریان جرمی را برشمردند. همچنین در این مطالعه چگونگی بازسازی تصویر از جریان‌های با سرعت بالا نیز بررسی شده است. از جمله محققینی که تصویربرداری فراصوت جریان دو فازی را پایه ریزی کردند، زو و زو [۷] بودند. آن‌ها جریان ناهمگن دو فازی گاز- مایع را به دلیل اختلاف مقاومت صوتی بین آن‌ها انتخاب کردند. در این تحقیق اصول و ساخت تجهیز تصویربرداری فراصوت بر مبنای

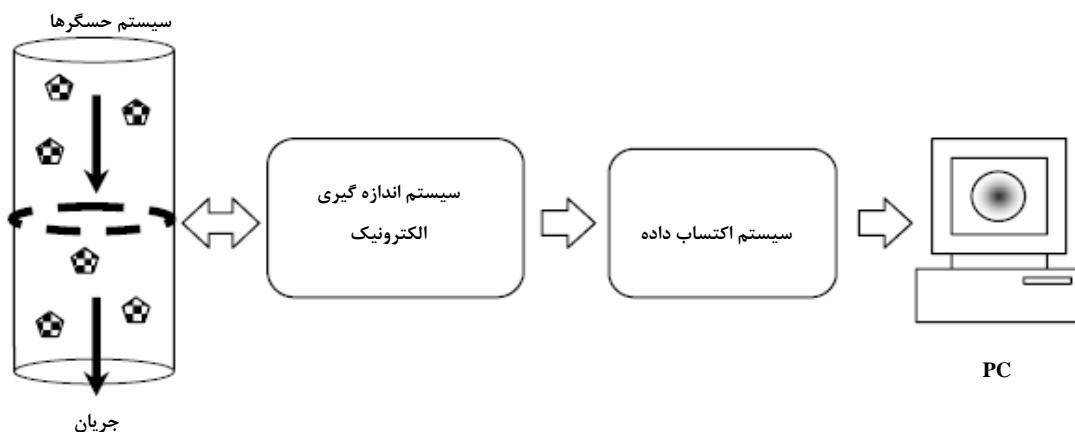
2. Binary Logic Operation
3. Time of Propagation
4. Transmission Mode
5. Chord Measurement Method
6. Data Fusion Algorithm
7. Back Projection Method
8. Time of Flight
9. Linear Back Projection Algorithm (LBPA)

1. Real-Time

توموگرافیک، اجزاء اصلی آن‌ها شبیه هم هستند و آن‌ها می‌توانند به چهار قسمت اصلی تحت عنوان سیستم دریافت داده مطابق با نوع حسگر، سیستم اندازه‌گیری الکترونیکی، سیستم اکتساب داده و نهایتاً نمایش نتایج تقسیم شوند. شکل (۱)، دید کلی سیستم اندازه‌گیری توموگرافیک را بیان می‌کند.

یک سیستم ساده توموگرافی می‌تواند با نصب تعدادی سنسور حول محیط لوله عمودی یا افقی ساخته شود. سیگنال خروجی حسگرها از طریق یک کارت واسطه به کامپیوتر ارسال می‌گردد. کامپیوتر سیگنال را از حسگر به ترتیب خاص دریافت می‌نماید تا پردازش داده انجام گیرد و نهایتاً تصویر سطح مقطع جریان در لوله را می‌سازد. در توموگرافی، افکنش‌های چندگانه برای بدست آوردن داده از منظرهای مختلف از این سو به آن سوی ظرف فرایندی استفاده می‌شود. این داده‌ها برای بازسازی تصاویر مقطعی که نمایانگر محتویات خط لوله یا ظرف فرایندی است، استفاده می‌شود [۱۲ و ۱۰ و ۸-۷].

رینک و همکارانش [۱]، سامانه‌های اندازه‌گیری توموگرافی شناخته شده را بر اساس پیشرفت‌های صورت گرفته، بررسی و با یکدیگر مقایسه کردند. به عنوان مثال، کاربرد توموگرافی اشعه ایکس و الکتریکی برای تصویربرداری آکنه‌های ترکیبی و تصادفی را بررسی کردند. با تکنیک اندازه‌گیری توموگرافی الکتریکی، وضوح زمانی تا ۱۰۰ فریم در ثانیه به دست می‌آید، در حالی که با توموگرافی اشعه ایکس وضوح مکانی ۰/۴ میلی‌متر امکان پذیر است.



شکل ۱- ساختار کلی سیستم‌های تصویر برداری مقطعی نصب خارجی [۱۲]

بازسازی هیبریدی^۱ و بازسازی هیبریدی-دوتایی^۲ برای بازسازی نیمرخ غلظت جریان دوفازی ناهمگن با اسکن پرتو فن شکل بررسی گردید. آن‌ها همچنین در مقاله‌ای دیگر، بر روی مدل میرایی امواج فراصوت، الگوریتم بازسازی تصویر و اجزاء سیستم توموگرافی فراصوت بحث کردند و نتایج خود را برای رژیم‌های جریان لایه‌ای و حلقوی ارائه دادند [۱۱]. همچنین عبدالرحیم و همکاران [۱۲]، ساخت تصویر مقطعی جریان مایع و گاز را با استفاده از شبیه‌سازی زمان واقعی توموگرافی فراصوت را توسعه دادند. استینر و همکاران [۱۳]، روش جدیدی را برای بازسازی تصویر جریان گاز-مایع و جامد-مایع ارائه دادند. آن‌ها از الگوریتم بهینه‌سازی شبه نیوتن برای تعیین دقیق‌تر مکان و شکل حباب‌ها استفاده کردند.

در این مقاله، ضمن معرفی روش توموگرافی فراصوت، اجزای سامانه آزمایشگاهی توموگرافی امواج فراصوت برای آزمایش رژیم‌های مختلف جریان ارائه شده است. همچنین سامانه نرم افزاری طراحی شده در محیط ویژوال بیسیک با قابلیت انتخاب الگوریتم مناسب بازسازی و پردازش تصویر و نمایش آن معرفی شده است.

۲- انواع تکنیک‌های توموگرافی

روش‌های زیادی از انجام توموگرافی فرایند همچون توموگرافی ظرفیت الکتریکی، توموگرافی امپدانس الکتریکی، توموگرافی اپتیکال، توموگرافی بار الکتریکی، توموگرافی اشعه ایکس و توموگرافی فراصوت وجود دارند [۱۰]. با وجود این در اجرای سنجش

1. Hybrid Reconstruction Algorithm (HRA)

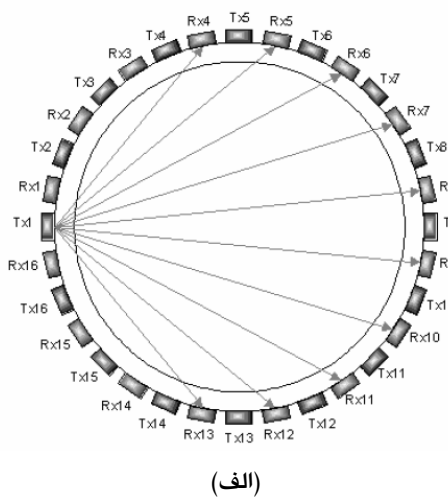
2. Hybrid-Binary Reconstruction Algorithm (HBRA)

۲-۱ تئوری و مکانیزم عملکرد توموگرافی فراصوت

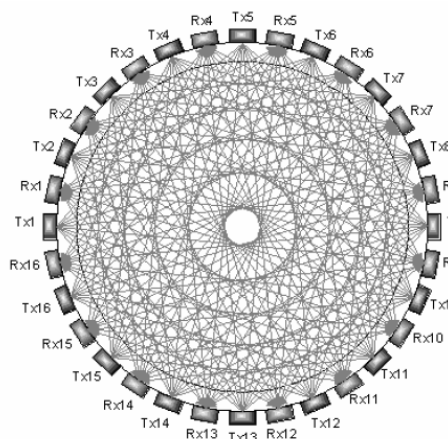
سیستم عملکرد حسگرهای فراصوت می‌تواند در سه حالت انتقال، انعکاس^۱ و انتشار^۲ دسته‌بندی شود [۱]. حالت انتقال بر مبنای اندازه‌گیری سنجش تغییرات خواص موج صوتی ارسال شده می‌باشد که به جنس محیط و ظرف اندازه‌گیری بستگی دارد. تغییرات خواص فیزیکی می‌تواند شدت پلاریزاسیون و/یا زمان عبور باشد. تکنیک حالت انعکاس بر مبنای سنجش موقعیت و تغییر خواص فیزیکی موج یا یک ذره منعکس شده روی یک سطح استوار است. مشابه تکنیک حالت انعکاس، تکنیک‌هایی وجود دارد که بر مبنای انکسار یا شکست موج در سطح پیوسته یا مجزای سطح شیء می‌باشند. تکنیک حالت انتشار بر اساس سنجش شدت و جهت فضایی^۳ تشعشع ارسال شده از درون صفحه اندازه‌گیری دسته‌بندی می‌شود [۱۴]. توموگرافی فرایند با استفاده از حسگرهای فراصوت با تکیه بر اثرات متقابل محیط انتقال همگن و حد فاصل‌ها، برای مثال انباشت گاز (حباب‌های گاز) در یک سیال مایع، استوار است. اثرات متقابل ممکن عبارتند از [۱۵]:

- میرایی دامنه امواج صوتی ارسال شده به سبب جذب و اثرات پراکنش محیط
- تغییر سرعت صوت در یک محیط ناهمگن
- تغییر دامنه و فاز میدان‌های پراکنده شده که توسط یک میدان ناهمگن فیزیکی ایجاد می‌شود.

شبهه به مقاومت ظاهری الکتریکی است. مقاومت ظاهری صوتی (Z) به صورت حاصل ضرب چگالی ماده (ρ) و سرعت صوت در ماده (C) تعریف می‌شود [۳-۴]. شکل‌های (۲) و (۳) حسگر ارسال‌کننده فراصوت نصب شده روی یک لوله آزمایشگاهی و هندسه اسکن کردن را نشان می‌دهند. با توجه به شکل (۲) پنج اثر متقابل را می‌توان مطرح کرد. اثر متقابل اول بین حسگر ارسال‌کننده و کوپلانت می‌باشد، اثر متقابل دوم بین کوپلانت و قطعه لوله است، اثر متقابل سوم بین قطعه لوله و مایع است، اثر متقابل چهارم بین محیط مایع و گاز و نهایتاً اثر متقابل بین محیط گاز و مایع است. شکل (۴)، مقدار نفوذ انرژی موج فراصوت از مایع به محیط گاز را نشان می‌دهد. این رخداد هنگام عبور از مرز هر محیط ناهمگنی می‌تواند روی دهد.

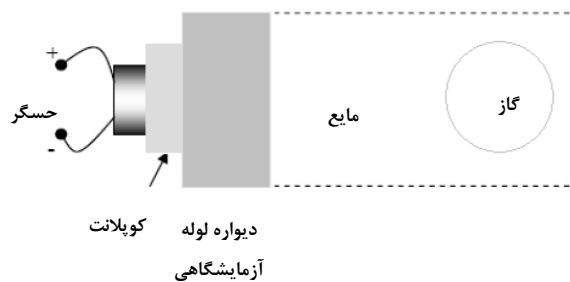


(الف)



(ب)

شکل ۳- (الف) هندسه اسکن کردن منفرد، (ب) هندسه اسکن کردن ۱۶ تایی [۱۰]



شکل ۲- نمایش نصب حسگر فراصوت روی لوله

یک بیان مفید و ساده اثرات متقابل فراصوت با یک ماده، مقاومت ظاهری^۴ صوتی آن (نسبت فشار صوت به سرعت ذره) می‌باشد که

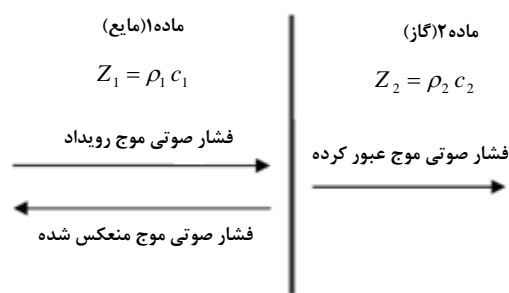
1. Reflection Mode
2. Emission Mode
3. Spatial Orientation
4. Impedance

نفوذ خواهد کرد، که به معنای انعکاس تقریباً کامل موج فراصوت در حد فاصل گاز/مایع است [۹ و ۱۱]. در مطالعه دیگری میزان انعکاس در مرز مایع/گاز برابر ۹۷/۹۹٪ گزارش شده است [۸]. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، حباب‌های گاز بایستی بزرگتر از حداقل نصف طول موج فراصوت باشد تا برای سیستم توموگرافی فراصوت قابل تشخیص باشند. رابطه طول موج و فرکانس بصورت زیر است [۱۰]:

$$v = f \lambda \quad (3)$$

که v سرعت صوت (m/s)، f فرکانس (Hz) و λ طول موج (m) می‌باشد. بنابراین، با احتساب فرکانس مبدل ۴۰ KHz و سرعت صوت در آب در دمای ۲۵°C، اندازه حباب‌های گازی بایستی حداقل ۱۹mm به طور متوسط باشند [۱۰].

همان طوری که در شکل (۵) دیده می‌شود، زمان مشاهده^۱ که با t_s نشان داده شده است، اولین رأس نوسان پس از زمان عبور مسیر مستقیم می‌باشد. هنگامی که پالسی ارسال می‌شود، برای هر حسگر دریافت‌کننده، زمان مشاهده خاصی وجود دارد که در آن زمان، پالس ارسال شده دریافت می‌شود. با نمونه‌گیری دامنه نوسان^۲ در این زمان برای هر حسگر دریافت‌کننده، داده‌های مورد نیاز روش حالت انتقال بدست می‌آید [۱۶].



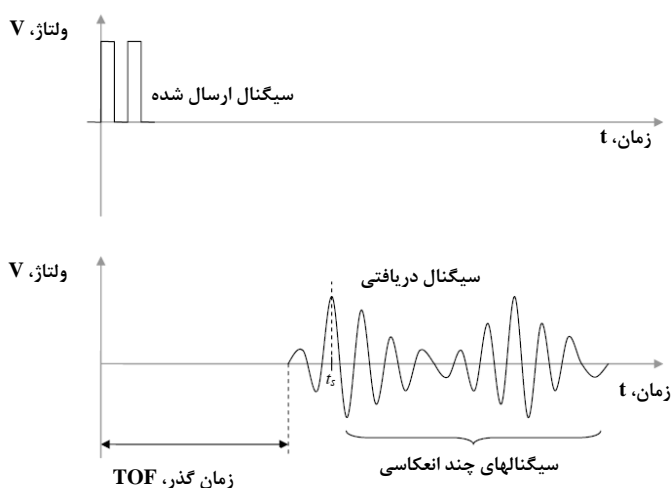
شکل ۴- انتشار امواج فراصوت از فاز مایع به فاز گازی

با توجه به شکل (۴)، از نسبت فشار صوتی امواج عبوری و منعکس شده به فشار امواج ارسال شده، ضرایب انعکاس و انتقال به ترتیب زیر تعریف می‌شوند:

$$R = \frac{P_r}{P_e} = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right] \quad (1)$$

$$D = \frac{P_d}{P_e} = \left[\frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \right] \quad (2)$$

به طوری که P_e فشار صوتی موج رویداد، P_r فشار صوتی موج منعکس شده و P_d فشار صوتی موج عبور کرده می‌باشد. مطالعه موردی نشان می‌دهد که به سبب اختلاف بزرگ مقاومت ظاهری صوتی بین محیط گاز و مایع، ۹۹/۹۴٪ از موج فراصوت از مرز مایع/گاز منعکس شده و در داخل سطح مایع پراکنده می‌شود. فقط ۰/۰۶٪ از موج ارسالی فراصوت از طریق مرز گاز/مایع به محیط گاز



شکل ۵- مثالی از سیگنال ارسالی و دریافتی حسگرها [۱۶]

1. Observation Time

2. Amplitude

۲-۲ سیستم اندازه‌گیری توموگرافیک فراصوت

شکل (۶) نمودار بلوکی سیستم توموگرافی فراصوت را نشان می‌دهد. در این سیستم معمولاً از حسگرهای فراصوت پیزوالکتریک استفاده می‌شود. این سیستم از بخش‌های میکروکنترلر، تولیدکننده سیگنال، سوئیچ انتخاب سنسور ترانسمیتر، آمپلی فایر، مدار نگهدارنده و نمونه‌گیری داده، کارت اکتساب داده و کامپیوتر تشکیل می‌شود.

۳-۲ بازسازی تصویر

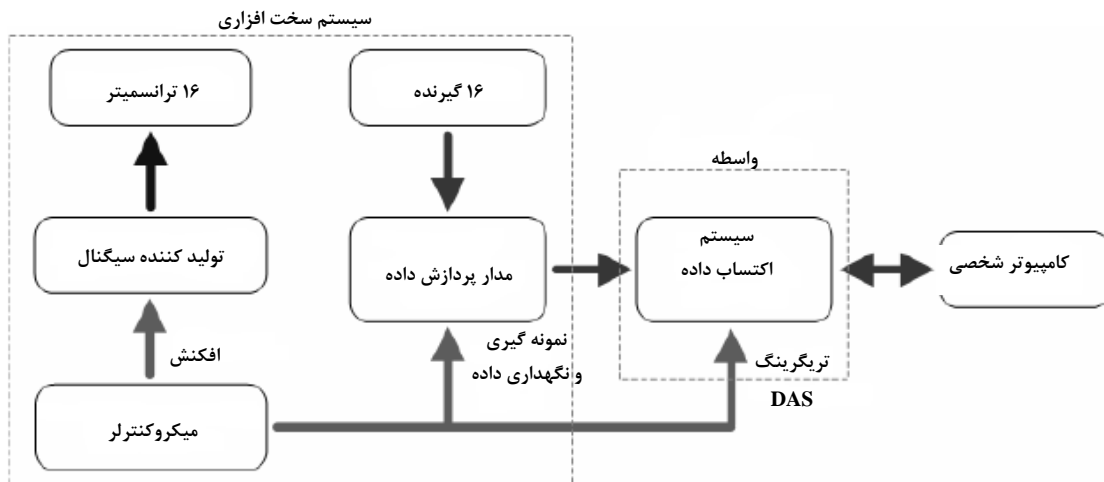
برای بازسازی تصویر مقطعی جریان از داده افکنش^۱، می‌توان از الگوریتم و افکنش استفاده کرد. اساساً، سنجش‌های حاصل شده از هر موج پرتاب شده، مقادیر موج تضعیف شده به سبب فضای شیء در صفحه تصویر هستند. مقادیر داده و افکنده با یکدیگر تداخل کرده و روپهم می‌افتند تا چگالی داده افکنش افزایش یابد [۱۰]. چگالی هر نقطه در تصویر بازسازی با جمع چگالی‌های همه پرتوهایی که از آن نقطه می‌گذرند، بدست می‌آید. از الگوریتم‌های توسعه داده شده به منظور بهبود کیفیت تصویر می‌توان الگوریتم و افکنش خطی، الگوریتم بازسازی هیبریدی و الگوریتم بازسازی هیبریدی-دوتایی نام برد [۱۶]. در الگوریتم و افکنش خطی، پروفایل غلظت از ترکیب داده افکنش هر حسگر ارسال‌کننده با نگاشت‌های حساسیت محاسبه شده حاصل می‌شود [۱۷]. ماتریس حساسیت مدل شده از هر جهت برای ساخت صفحه تصویر بکار گرفته می‌شود. برای بازسازی تصویر، هر ماتریس حساسیت با مقدار اتلاف

حسگر متناظر آن ضرب می‌شود. این به مثابه و افکنش تک‌تک مقادیر اتلاف حسگر به صفحه تصویر می‌باشد. سپس همین عناصر در این ماتریس‌ها برای ایجاد توزیع ولتاژ و افکنش یا نیمرخ غلظت با یکدیگر جمع می‌شوند و نهایتاً این توزیع ولتاژ با سطوح رنگی یا پیکسل‌های رنگ شده صفحه تصویر مقطعی را ارائه خواهند داد. بیان ریاضی این فرایند به صورت معادله زیر می‌باشد [۱۱]:

$$V_{LBP}(x, y) = \sum_{Tx=1}^{16} \sum_{Rx=1}^{16} S_{Tx, Rx} \times \bar{M}_{Tx, Rx}(x, y) \quad (4)$$

به طوری که $V_{LBP}(x, y)$ توزیع ولتاژ روی ماتریس نیمرخ غلظت، $S_{Tx, Rx}$ مقدار اتلاف حسگر و $\bar{M}_{Tx, Rx}(x, y)$ ماتریس نرمال شده حساسیت است.

عبدالرحیم و همکارانش [۱۶]، با ارائه فلوجارت مشخصی برای الگوریتم بازسازی هیبریدی دوتایی، کارایی سیستم توموگرافی فراصوت را برای رژیم‌های مختلف جریان با روش‌های بازسازی تصویر بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که خطای سطح برای حالت کاملاً مایع با الگوریتم و افکنش خطی حدود ۰/۷٪- و برای حالت ۱۰ درصد مایع، حدود ۰/۶٪- به صورت قابل قبولی گزارش شده است. ماکزیمم خطای اندازه‌گیری شده برای رژیم جریان حلقوی^۲ برای مدل‌های استفاده شده با قطر جریان میانی ۸۲/۸ میلی‌متر با الگوریتم بازسازی هیبریدی-دوتایی، ۲۹/۷ درصد بدست آمد که این مقدار برای الگوریتم و افکنش خطی برابر ۵۲/۵- درصد می‌باشد.



شکل ۶- نمودار بلوکی توموگرافی فراصوت [۱۱]

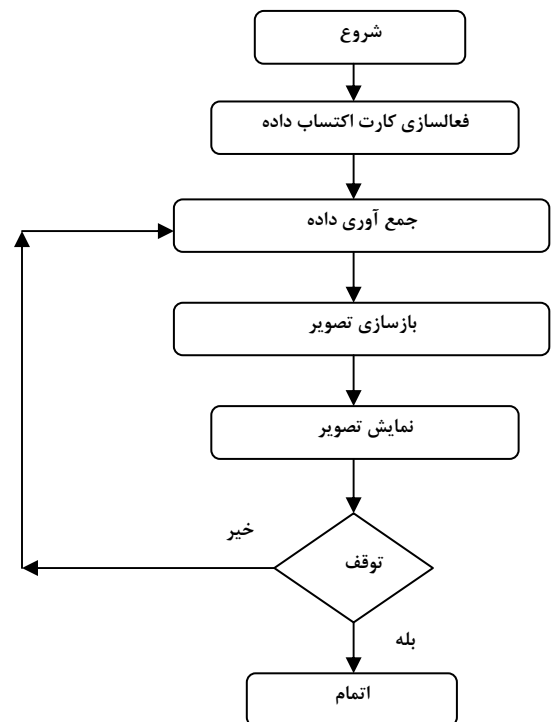
۴- کاربردهای صنعتی و تحقیقاتی توموگرافی فراصوت

جریان سیالات در صنعت نفت، گاز، پتروشیمی، صنایع شیمیایی، انرژی و مهندسی بیولوژیک که بازدهی عملیات رابطه بسیار نزدیکی با رژیم جریان دارد، نقش بسیار وسیع و گسترده‌ای بازی می‌کند. شرایط عملیاتی جریان سیال برای کاربردهای مختلف ممکن است به صورت وسیعی تغییر کند. برای مثال، فشار عملیاتی می‌تواند از فشار جزئی تا مقادیر فشار زیاد تا ۱۰۰۰ بار متغیر باشد. مشخصه سیالات نیز می‌تواند از محدوده آب تمیز تا دوغاب‌های سیمانی بسیار ساینده، سوسپانسیون‌های ژل ویسکوز یا فرساینده و خطرناک محلول‌های شیمیایی باشد. در چنین شرایطی اندازه‌گیری دقیق و پایش زمان واقعی فرایندها تقریباً مشکل است. یک سکوی تولید نفت دریایی، مخلوطی از ترکیبات آب، نفت، گاز و رسوبات را به صورت سوسپانسیون تولید می‌کند. این مخلوط به ظروف فرایندی جداسازی وارد می‌شود تا گاز و نفت آن بازیابی گردد. آب و لجن در صورتی که مقادیر خیلی کمی از آلودگی نفتی را داشته باشند، می‌توانند به محیط بازگردانده شوند. این امر، استخراج ماکزیمم نفت و حداقل آلودگی محیط زیست را تضمین می‌کند. بسیاری از جریان‌سنج‌ها نیازمند ورود مخلوط همگن ترکیبات هستند و نمی‌توانند در شرایط غیرهمگن عملکرد مناسبی داشته باشند. کارایی جریان‌سنج‌های توربینی می‌تواند بسیار متأثر از تغییرات گرانیوی باشد. کارکرد جریان‌سنج‌های الکترومغناطیسی هم محدود به رسانایی سیال بالای 10^{-4} (S/m) می‌باشد. در حالی که، با استفاده از حسگرهای فراصوت و توموگرافی فرایند می‌توان تصاویری دقیق از مخلوط‌های چند فازی ساخت و چنین محدودیت‌هایی برای آن وجود ندارد.

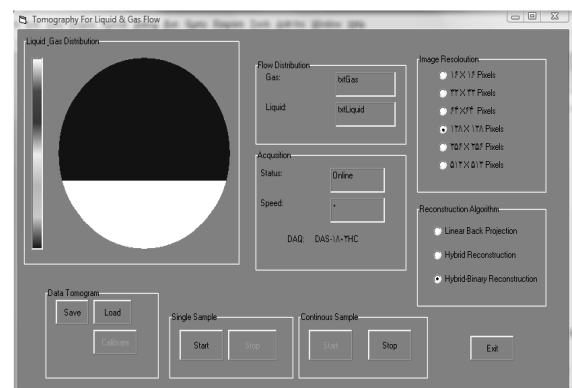
در صنایع فرایندی به دلیل خوردگی در مبدل‌های گرمایی و عملیات راکتورها و برج‌ها با مخلوط‌های دو یا چند فازی مواجه هستیم که دریافت تصویری از این مخلوط‌ها می‌تواند به تصمیم‌گیری و کنترل در شرایط عملیاتی و اضطراری کمک کند. همچنین در بسیاری موارد، امکان برش خطوط یا ظروف فرایندی و نصب تجهیزات اندازه‌گیری و شناسایی رژیم جریان از لحاظ ایمنی و هزینه‌های مالی مقرون به صرفه نمی‌باشد. از طرفی نصب تجهیزات تداخلی در درون سیال می‌تواند بر رژیم جریان تأثیرگذار باشد. در چنین مواردی بکارگیری روش توموگرافی خارجی فراصوت می‌تواند بسیار مفید باشد.

۳- ایجاد کد نرم افزاری توموگرافی فراصوت

در این مطالعه، بر اساس منطق ریاضی فوق‌الذکر، محیط نرم افزاری مناسبی برای ایجاد تصاویر حاصل از توموگرافی فراصوت ایجاد گردید. شکل (۷) الگوریتم کارکرد سامانه نرم افزاری پردازش تصویر بازسازی شده را نشان می‌دهد. این نرم‌افزار قابلیت انتخاب الگوریتم‌های مختلف بازسازی تصویر و نمایش توموگرام حاصل از سیستم را داراست. رابط گرافیکی طراحی شده توسط نرم‌افزار ویژوال بیسیک ۶، در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل ۷- الگوریتم کارکرد سامانه نرم‌افزاری پردازش تصویر بازسازی شده



شکل ۸- رابط گرافیکی سامانه نرم‌افزاری پردازش تصویر بازسازی شده

۵- جمع‌بندی

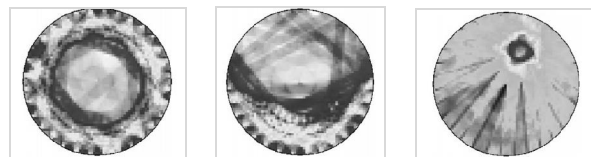
در این مقاله معرفی و استفاده از توموگرافی خارجی و غیر تماسی با سیال با بکارگیری امواج فراصوت جهت تحلیل جریان‌های چند فازی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های CFD مورد بحث قرار گرفت. همچنین با بررسی نظریه و مکانیزم عملکرد آن، اصول اساسی و محدودیت‌های توموگرافی فراصوت مرور گردید. الگوریتم بازسازی تصویر مورد مطالعه قرار گرفت و برخی از کاربردهای صنعتی و تحقیقاتی این شیوه مطالعه شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد الگوریتم‌های بازسازی هیبریدی و بازسازی هیبریدی دوتایی نسبت به الگوریتم و افکنش خطی از وضوح بالاتری برخوردار بوده و خطای سطحی کمتری را ایجاد می‌نماید. می‌توان گفت، مزیت توموگرافی فراصوت نسب به سایر روش‌های توموگرافی فرایند امکان طراحی سیستم به صورت قابل حمل، کارایی بالا، دامنه وسیع کاربردها، سنجش به صورت نصب خارجی بر روی لوله‌ها و ظروف فرایندی غیر شفاف و ایمنی بیشتر پرتوهای منتشر شده می‌باشد.

یکی دیگر از کاربردهای این روش را می‌توان اعتبارسنجی شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی دانست بطوری که می‌توان نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی را با نتایج حاصل از سیستم توموگرافی خارجی فراصوت جریان‌های چند فازی مقایسه و اعتبار مدل را بررسی نمود. در نهایت، می‌توان گفت که این سیستم جایگزین خوبی برای جریان‌سنج‌های موجود و در دسترس در بازار می‌باشد [۹].

شکل‌های (۹) و (۱۰)، چند نمونه از تصاویر مقطعی جریان با رژیم‌های لایه‌ای، حلقوی و حبابی را به منظور مقایسه الگوریتم‌های بازسازی تصویر نشان می‌دهد. همان طوری که در شکل‌ها دیده می‌شود، کیفیت بازسازی تصویر با الگوریتم هیبریدی دوتایی از وضوح بالاتری نسبت به الگوریتم و افکنش خطی برخوردار است. صنعتگران و محققین با دریافت واضحی از رویدادها و رژیم‌های جریان درون تجهیزات، می‌توانند تصمیمات بسیار مفیدی را برای رفع مشکلات فرایندی اتخاذ نمایند.

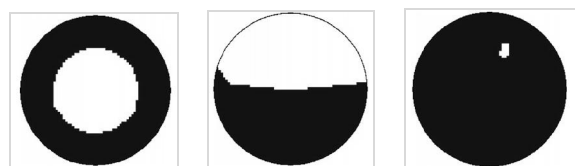
مراجع

- [1] Reinecke, N., Petritsch, G., Schmitz, D., Mewes, D., "Tomographic Measurement Techniques: Visualization of Multiphase Flows", Chemical Engineering Technology, Vol. 21, 7-18, (1998).
- [2] Xu, L. J., Li, X. M., Dong, F., Wang, Y., Xu, L. A., Optimum Estimation of the Mean Flow Velocity for the Multi-Electrode Inductance Flow meter, Measurement Science Technology, 12, 1139-1146, (2001).
- [3] Plaskowski, A., Beck, M. S., Thron, R., Dyakowski, T., Imaging Industrial Flows: Applications of Electrical Process Tomography. U.K.: IOP Publishing Ltd, (1995).
- [4] Brown, G. J., Reilly, D., Mills, D., Development of an Ultrasonic Tomography System for Application in Pneumatic Conveying, Measurement Science Technology, 7, 396-405., (1996).
- [5] Abdul Rahim, R., Fazalul Rahiman, M. H., Chan, K. S., Monitoring liquid/gas flow using ultrasonic tomography, 3rd International Symposium on Process Tomography, Lodz, Poland, (2004).
- [6] Dickin, F. J., Hoyle, B. S., Hunt, A., Huang, S. M., Ilyas, O., Lenn, C., Waterfall, R. C., Williams, R. A., Xie, C. G., Beck, M. S., Tomographic imaging of industrial process equipment: techniques and applications, IEE Proceedings-G, 139 (1), 72-82, (1992).
- [7] Xu, L. J., Xu, L. A., Gas/Liquid Two-Phase Flow Regime Identification by Ultrasonic Tomography, Flow Measurement Instrumentation, 8(3/4), 145-155, (1997).
- [8] Xu, L., Han, Y., Xu, L. A., Yang, J., Application of Ultrasonic Tomography to Monitoring Gas/Liquid Flow, Chemical Engineering Science, 52, 2171-2183, (1997).



(الف) (ب) (پ)

شکل ۹- تصویر بازسازی شده توسط الگوریتم و افکنش خطی (الف) جریان حبابی، (ب) جریان لایه‌ای ۵۵٪؛ (پ) جریان حلقوی [۱۶]



(الف) (ب) (پ)

شکل ۱۰- تصویر بازسازی شده توسط الگوریتم بازسازی هیبریدی دوتایی (الف) جریان حبابی، (ب) جریان لایه‌ای ۵۵٪؛ (ج) جریان حلقوی [۱۶]

- [9] Abdul Rahim, R., Fazalul Rahiman M. H., Ng Wei N., Chan K. S., Initial Result on Monitoring Liquid/Gas Flow Using Ultrasonic Tomography, *Jurnal Teknologi* Vol. 40(D), Penerbit Universiti Teknologi Malaysia, (2004).
- [10] Fazalul Rahiman, M. H., Abdul Rahim, R., Liquid/gas flow visualization using non-invasive ultrasonic tomography, 4rd World Congress on Industrial Process Tomography, Aizu, Japan, (2005).
- [11] Abdul Rahim, R., Fazalul Rahiman, M. H., Puspanathan, J., Two-phase flow regime identification by ultrasonic computerized tomography, *Sensors & Transducers Journal*, vol.116, Issue 5, pp. 76-82, (2010).
- [12] Abdul Rahim, R., Nayan, N. M., Fazalul Rahiman, M. H., Ultrasonic Tomography System for Liquid/Gas Flow: Frame Rate Comparison Between Visual Basic and Visual C++ Programming, *Jurnal Teknologi*, 44(D),131-150, (2006).
- [13] Steiner, G., Podd, F., Brandner, M., Watzenig, D., Iterative model-based image reconstruction for ultrasound process tomography, XVIII IMEKO World Congress: Metrology for a sustainable development, Brazil, (2006).
- [14] Chaouki, J., Larachi, F., Dudukovic, M. P., Non-invasive Monitoring of Multiphase Flows, Amsterdam: Elsevier Science, (1997).
- [15] Hoyle B. S., Xu L. A., *Process Tomography: Principles, Techniques and applications*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 119-149, (1995).
- [16] Abdul Rahim, R., Fazalul Rahiman, M. H., Chan, K. S., Nawawi, S. W., Non-invasive imaging of liquid/gas flow using Ultrasonic Transmission-Mode Tomography, *Sensor and Actuators*, A35, 337-345, (2007).
- [17] McKeen, T. R., Pugsley, T. S., The Influence of Permittivity Models on Phantom Images obtained From Electrical Capacitance Tomography, *Measurement Science Technology*, Vol. 13, pp. 1822-1830, (2002).