

پروپوزال شبیه سازی توموگرافی الکتریکی دوگانه (ECT/ERT) با نرم افزار COMSOL برای جریانهای چند فاز در خطوط لوله نفت و گاز

۱. مقدمه و اهداف پروژه

۱.۱. بیان مسئله

اندازه گیری و پایش دقیق جریانهای چند فاز (نفت، گاز، آب) در خطوط لوله، یکی از چالشهای اساسی در صنایع نفت و گاز است. شناخت دقیق توزیع فازها و الگوهای جریان (Flow Regimes) برای بهینه سازی فرآیندها، افزایش ایمنی و کاهش هزینه های عملیاتی حیاتی است. توموگرافی الکتریکی (ET) شامل توموگرافی خازنی الکتریکی (ECT) برای فازهای دی الکتریک (مانند گاز و نفت) و توموگرافی مقاومتی الکتریکی (ERT) برای فازهای رسانا (مانند آب شور) به عنوان یک روش غیرتهاجمی و مقرون به صرفه، ابزاری قدرتمند برای تصویربرداری از مقطع جریان است.

۱.۲. هدف پروژه

- هدف از این پروژه، شبیه سازی جامع و دقیق سیستم توموگرافی الکتریکی دوگانه (Dual-modality ECT/ERT) با ۱۶ سنسور در نرم افزار COMSOL Multiphysics برای یک خط لوله ۴ اینچی حاوی جریان سه فاز نفت، گاز و آب است. این شبیه سازی به منظور:
- طراحی بهینه آرایش سنسورها و مدارات تحریک/اندازه گیری.
 - تولید داده های مرزی (Boundary Data) مورد نیاز برای توسعه الگوریتم های بازسازی تصویر (Image Reconstruction).
 - ارزیابی عملکرد سیستم در شناسایی و تمایز الگوهای مختلف جریان چند فاز.

۲. داده های طراحی و پارامترهای شبیه سازی

۲.۱. مشخصات فیزیکی سیستم

توضیحات	مقدار	پارامتر
قطر استاندارد خطوط لوله صنعتی.	۴ اینچ (تقریباً ۱۰۱.۶ میلی متر)	قطر داخلی لوله
تعداد بهینه برای رزولوشن مناسب و پیچیدگی سخت افزاری قابل قبول.	۱۶ الکترو	تعداد سنسورها
آرایش متداول برای سیستم های توموگرافی الکتریکی.	۱۶ الکترو در یک ردیف محیطی	آرایش سنسور
برای جلوگیری از تأثیر دیواره لوله بر میدان الکتریکی.	عایق (مانند PTFE یا PEEK)	جنس لوله
استفاده از ماژول AC/DC برای حل معادلات میدان الکتریکی.	COMSOL Multiphysics	محیط شبیه سازی

۲.۲. خواص فیزیکی فازهای جریان

شبیه سازی بر اساس خواص فیزیکی فازهای سه گانه (گاز، نفت، آب) در شرایط عملیاتی استاندارد انجام خواهد شد.

توضیحات	ثابت دی الکتریک نسبی (ϵ_r)	رسانایی (σ) (mS/cm)	فاز
فاز دی الکتریک (مورد اندازه گیری ECT)	۱	۰	گاز (نیتروژن)
فاز دی الکتریک (مورد اندازه گیری ECT)	۲.۲	۰	نفت (Paraflex)
فاز رسانا (مورد اندازه گیری ERT)	۸۰	۳۳.۵	آب (آب شور)

۲.۳. پارامترهای فنی سیستم (مشابه سیستم های فنی مشابه)

پارامترهای زیر بر اساس داده های سیستم های فنی مشابه در مقالات علمی پیشنهاد شده اند و برای شبیه سازی در COMSOL استفاده خواهند شد:

پارامتر	ECT (خازنی)	ERT (مقاومتی)
فرکانس کاری	۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز	۱ تا ۱۰ کیلوهرتز
سطح ولتاژ تحریک	۵ تا ۱۰ ولت پیک به پیک (Vp-p)	۵ تا ۱۰ میلی‌آمپر (جریان تزریقی)
روش اندازه‌گیری	اندازه‌گیری خازن بین جفت الکترودها	اندازه‌گیری ولتاژ بین جفت الکترودها

۳. سناریوهای شبیه‌سازی و داده‌های مورد نیاز طراح

۳.۱. الگوهای جریان چند فازی (Flow Regimes)

شبیه‌سازی باید شامل الگوهای مختلف جریان سه‌فازی باشد تا طیف وسیعی از شرایط عملیاتی پوشش داده شود. الگوهای اصلی مورد نیاز عبارتند از:

- جریان لایه‌ای (Stratified Flow): فازها به صورت لایه‌های مجزا (گاز در بالا، نفت و آب در پایین) قرار می‌گیرند.
- جریان حلزونی (Slug Flow): بسته‌های بزرگ گاز (Slug) به صورت متناوب با مایع (نفت و آب) حرکت می‌کنند.
- جریان حبابی (Bubbly Flow): حباب‌های کوچک گاز در فاز مایع پیوسته (نفت یا آب) پراکنده شده‌اند.
- جریان پلاگ (Plug Flow): شبیه به جریان حلزونی، اما با بسته‌های گاز کوتاه‌تر و منظم‌تر.
- جریان حلقوی (Annular Flow): مایع به صورت یک لایه نازک (حلقه) در اطراف دیواره لوله جریان دارد و گاز در مرکز قرار دارد.
- جریان امولسیون (Emulsion Flow): یک فاز مایع به صورت قطرات ریز در فاز مایع دیگر پراکنده شده است (مثلاً آب در نفت یا نفت در آب).

۳.۲. داده‌های خروجی مورد نیاز برای طراح

خروجی شبیه‌سازی COMSOL باید به گونه‌ای باشد که مستقیماً در فاز توسعه الگوریتم‌های بازسازی تصویر و طراحی سخت‌افزار قابل استفاده باشد. داده‌های مورد نیاز عبارتند از:

- ماتریس داده‌های مرزی (Boundary Data Matrix):
 - برای ECT: ماتریس اندازه‌گیری‌های خازنی (Capacitance Matrix) برای ۱۲۰ جفت الکترود (در حالت ۱۶ الکترود).
 - برای ERT: ماتریس اندازه‌گیری‌های ولتاژ (Voltage Matrix) برای جفت الکترودهای مختلف (با توجه به روش تزریق جریان).

2. توزیع واقعی فازها (Ground Truth): فایل‌های هندسی یا ماتریس‌های توزیع فاز (Phase Distribution Matrix) برای هر الگوی جریان شبیه‌سازی شده، که به عنوان مرجع برای اعتبارسنجی الگوریتم‌های بازسازی استفاده می‌شود.
 3. نقشه‌های میدان الکتریکی (Electric Field Maps): نقشه‌های توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی در مقطع لوله برای هر سناریو، به منظور تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی هندسه سنسور.
 4. فایل‌های مدل COMSOL: مدل‌های کامل هندسی و فیزیکی ایجاد شده در COMSOL برای امکان تغییر و توسعه توسط تیم طراحی.
-

۴. جمع‌بندی و گام‌های بعدی

این پروپوزال، چارچوب فنی لازم برای یک شبیه‌سازی موفق و کاربردی در COMSOL را فراهم می‌کند. با تولید داده‌های مرزی دقیق برای طیف وسیعی از الگوهای جریان چند فازی، زیرساخت لازم برای توسعه یک سیستم توموگرافی الکتریکی دوگانه ۱۶ سنسوری پیشرفته فراهم خواهد شد.

گام‌های بعدی:

1. تأیید نهایی پارامترهای فنی (فرکانس، ولتاژ) توسط تیم طراحی.
2. شروع فاز مدل‌سازی هندسی و فیزیکی در COMSOL.
3. اجرای شبیه‌سازی‌ها برای الگوهای جریان تعریف شده و استخراج داده‌های خروجی.
4. تحویل نهایی ماتریس‌های داده و گزارش فنی جامع.