



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد  
گرایش مخابرات میدان

ارائه متودلوژی به منظور مدلسازی و  
استخراج پارامترهای  
الکترومغناطیسی گازها

نگارش  
مهدی نوروزی

اساتید راهنما:  
دکتر عبدالعلی عبدی پور، دکتر مرادی

استاد مشاور:  
دکتر عباس محمدی

فروردین ۸۷



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

بسمه تعالی

تاریخ: ۲۶ آذر ۸۷  
شماره:

فرم اطلاعات پایان نامه  
کارشناسی - ارشد و دکترا

معاونت پژوهشی  
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: مهدی نوروزی  
شماره دانشجویی: ۸۴۱۲۳۱۱۳  
دانشگاه: آزاد  
رشته تحصیلی: برق-مخابرات  
گروه: مخابرات میدان

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: دکتر عبدی پور  
نام و نام خانوادگی: دکتر مرادی  
درجه و رتبه: استاد  
درجه و رتبه: استادیار

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: دکتر محمدی  
نام و نام خانوادگی:  
درجه و رتبه: دانشیار  
درجه و رتبه:

عنوان پایان نامه به فارسی:

ارایه متدلوژی به منظور مدلسازی و استخراج پارامترهای الکترومغناطیسی گازها

عنوان پایان نامه به انگلیسی:

Developing a methodology for modeling and extraction of electromagnetic parameters of gases materials

نوع پروژه: کارشناسی  
کاربردی  
ارشد  
بنیادی  
دکترا  
توسعه ای  
سال تحصیلی: ۸۶-۸۷  
نظری

تاریخ شروع: شهر یور ۸۵  
تاریخ خاتمه: اردیبهشت ۸۷  
تعداد واحد: ۶  
سازمان تأمین کننده اعتبار: دانشگاه امیرکبیر

واژه‌های کلیدی به فارسی:

تست الکترومغناطیسی، اندازه گیری پرمیٹیویتی، آشکارسازی نشتی

واژه‌های کلیدی به انگلیسی:

Electromagnetic Measurement, Permittivity Measurement, Leakage Detection

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات	تصویر	جدول	نمودار	نقشه	واژه‌نامه	تعداد مراجع	تعداد صفحات ضمیمه
زبان متن	فارسی				انگلیسی	چکیده	فارسی	۰
یادداشت								

نظرها و پیشنهادهای به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه  
استاد:

دانشجو:

به نام خدا



دانشکده مهندسی برق  
دانشگاه صنعتی امیر کبیر

شماره: ۵۸۰۱۹۱

تاریخ: ۸۷/۲/۲۷

برگ ارزیابی پایان نامه کارشناسی ارشد (۲۱کا)

نام و نام خانوادگی دانشجو: آقای مهدی نوروزی	رشته تحصیلی و گرایش: برق مخابرات میلان
شماره دانشجویی: ۸۴۱۲۳۱۱۳	استاد راهنما: دکتر عبدی پور
	دکتر مرادی

عنوان رساله: ارائه متودولوژی به منظور مدلسازی و استخراج پارامترهای الکترومغناطیسی گازها

تاریخ دفاع: ۸۷/۲/۳۰

امضاء	امتیاز	رتبه علمی	کد انفورماتیک	نام و نام خانوادگی	هیات داوران
	۸۰	استاد	۱۰۲۴۰	دکتر عبدالعلی عبدی پور	استاد راهنمای اول
	۸۰	استادیار	۱۰۳۸۳	دکتر غلامرضا مرادی	استاد راهنمای دوم
	۸۰	دانشیار	۱۰۳۹۴	دکتر عباس محمدی	استاد مشاور اول
					استاد مشاور دوم
	۸۰	استاد	۱۰۲۲۲	دکتر احد توکلی	داور داخلی
	۸۰	استاد	۱۰۱۸۸	دکتر مراغه چی	داور خارجی
					داور خارجی
	۸۰	میانگین نمرات هیئت داوران			

نمره به حروف	نمره به عدد	شرح	این قسمت توسط تحصیلات تکمیلی دانشگاه تنظیم خواهد شد.
	۱۶	میانگین نمرات هیئت داوران (بر مبنای ۲۰)	A
	۷	کسر نمره دیر کرد	B1
	—	کسر نمره عدم ارائه مقاله	B2
	—	تشویق بابت ارائه مقاله اضافی	C
	۱۵	$B=B1+B2$	D
		نمره نهایی $(D=A-B+C)$	

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده:

مدیر کل تحصیلات تکمیلی:

امضاء و مهر



تأیید کارشناس:

امضاء و مهر دانشکده:

## چکیده

با توجه به کاربرد وسیع شناساگر های مواد و همچنین با توجه به تفاوت خصوصیات دی الکتریک مواد، در این تحقیق به بررسی خصوصیات ثابت دی الکتریک و روشهای استاندارد اندازه گیری آن برای جامدات و مایعات و به صورت خاص گازها پرداختیم. در مورد جامدات و مایعات روشهای کاربردی زیادی وجود دارند که با دقت بسیار بالا ثابت دی الکتریک را اندازه گیری می کنند اما از آنجاکه گازهای مخلوط در هوا و بسیاری بخارات دیگر گازی دارای ضرایب دی الکتریک نزدیک به یکدیگر هستند، دستیابی به روش مناسب اندازه گیری قدری پیچیده تر می باشد.

در این تحقیق تلاش کردیم تا با ارائه روش تفاضلی و بهینه سازی آن راه را برای اندازه گیری دقیق ضرایب دی الکتریک گازها هموار سازیم. ابتدا با استفاده از رابطه کلاریوس مو ذاتی به تحلیل سیگنال یک مجموعه تفاضلی پرداختیم. بر پایه این تحلیل سیگنال شبیه سازی عددی انجام پذیرفت تا حساسیت سیستم نسبت به تغییرات پارامترهای مجموعه مورد مطالعه قرار گیرد. آنچه در پایان به دست آمد مقادیر بهینه اجزای مجموعه تفاضلی و همچنین حساسیت سیستم تفاضلی نسبت به تغییر این مقادیر می باشد.

علاوه بر این مشکلات مقدماتی پیاده سازی عملی سیستم تفاضلی در بستر شبیه سازی مورد مطالعه قرار گرفت و برای مشکلاتی همچون عدم تساوی طول خطوط تفاضلی و یا عدم همسانی رزوناتورها راه حل ارائه گردید. این تحقیق می تواند مقدمه ای برای اندازه گیری آزمایشگاهی و یا ساخت سنسورها و شناساگرهای صنعتی باشد.

## فهرست مطالب

### فصل اول

۴	۱-۱ مقدمه
۸	۲-۱ مواد دی الکتریک
۱۳	۳-۱ حدود تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی مواد
۱۳	۴-۱ هدف پروژه
۱۵	فصل دوم - روشهای اندازه گیری ضرایب دی الکتریک گازها
۱۵	۱-۲-۱ مقدمه
۱۷	۲-۲-۱ رابطه کلازیوس موزاتی
۲۰	۳-۲-۱ اصول اندازه گیری تفاضلی
۲۳	۴-۲-۱ تقویت کننده قفل شونده
۲۴	۵-۲-۱ ضریب انعکاس و آستانه شناسایی روشهای تک رزوناتوری
۲۸	۶-۲-۱ طرح عملی
۳۱	۷-۲-۱ مدل تفاضلی مایکروویو
۳۴	۸-۲-۱ طراحی محفظه رزونانس
۳۵	۹-۲-۱ شبیه سازی تکنیک تفاضلی
	۲-۹-۱ بررسی خروجی سیستم بر حسب $\Delta\epsilon$ های متفاوت و در دو حالت با اختلاف فاز صفر و نود درجه
۳۸	
۴۱	۲-۹-۲ تغییر نسبی دامنه با تغییر ضریب دی الکتریک
۴۲	۳-۹-۲ بررسی حساسیت سیستم به فرکانس اندازه گیری
۴۴	۴-۹-۲ بررسی حساسیت سیستم به طول خط
۴۹	۵-۹-۲ بررسی حساسیت سیستم به مقدار Q
۵۰	۶-۹-۲ بررسی حساسیت سیستم به مقدار R
	۲-۹-۷-۱ شبیه سازی سیگنال خروجی در حالتیکه دو رزوناتور یکسان نیستند
۵۱	
۵۷	فصل سوم- نتیجه گیری و پیشنهادات
۵۹	مراجع

## فصل اول

۱-۱ مقدمه

مطالعه تاثیراتی که انرژی میکروویو در مواد ایجاد می کنند، در صنعت، بیولوژی، پزشکی و اجاقهای میکروویو بسیار مهم و ضروری هستند.

فرکانسهای رادیویی و سیگنالهای میکروویو، در تکنولوژی مدرن، دارای کاربردهای صنعتی و علمی متعددی می باشند. از جمله دیگر کاربردهای آنها عبارتند از: ارتباطات بی سیم، تله متری، مهندسی بیو پزشکی، علوم غذایی، فرایند مواد و کنترل فرآیند ها در صنعت.

این کاربردها نیازمند اطلاع از ویژگی های الکتریکی محیط و اثرات محیط بر روی سیگنال های تابش، بازتابش و جذب شده است.

انرژی میکروویو، مکرراً در فرایندهای صنعتی مواد مورد بهره برداری قرار می گیرد، که این عمل نه تنها به دلیل کارایی آن، بلکه به دلیل آن است که محصولی بهتر و سودمندتر را ایجاد می نمایند. به عنوان مثال، در فرایندهای مرسوم برای خشک کردن جوهر کاغذ، استفاده از هوای داغ در یک ماشین چاپ، رطوبت موجود در کاغذ را نیز کاهش می دهد. این عوامل باعث کاهش عمر محصول می گردد. از طرف دیگر، امواج میکروویو تقریباً تغییری در ساختار کاغذ ایجاد نمی نمایند.

نظر به اینکه انرژی میکروویو می تواند از داخل مواد نارسانا (دی الکتریک) عبور کند، این عامل می تواند برای شفاف نمودن ساختار مواد مرکب بطور موثری به کار برده شود. همچنین این عمل اجازه ترسیم اشکال درونی دی الکتریک های مورد نظر را نیز فراهم می سازد.

در مهندسی بیوپزشکی، میکروویو برای تولید گرمای کنترل شده برای hyper thermia استفاده می شود.

سیگنال های مخابرات بی سیم با محیط واسط واکنش می نمایند، این سیگنال ها بدون توقف پراکنده و پخش می

شوند. بنابراین، دانستن ماهیت محیط واسط می تواند در ساخت و طراحی يك شبکه مخابراتی پربازده موثر باشد. ضریب گذردهی الکتریکی<sup>۱</sup> مختلط، در کاربردهای میکروویو بخصوص برای ساخت مداراتی که به پهنای باند زیاد، دقت بالا و اندازه گیری های سریع نیاز دارند، يك پارامتر بسیار مهم می باشد.

به طور خلاصه، سیستم های مهندسی متعددی وجود دارند که شامل کنش و واکنش انرژی الکترو مغناطیسی با مواد محیط واسط هستند. طرح این سیستم ها نیازمند شناخت مناسبی از پدیده ای است که مستقیماً به پارامترهای ماهیت الکتریکی محیط واسط مربوط شده است.

یکی از خصوصیات مهم ماده اعم از جامد، مایع و گاز ثابت دی الکتریک آن می باشد. به عبارت دیگر با داشتن این ثابت می توان رفتار یک ماده را در مواجهه با امواج الکترومغناطیسی و خصوصاً در حالت اعمال میدان الکتریکی تا حد بسیار خوبی تخمین زد. به همین سبب از سالها قبل روشها متعددی برای یافتن این ثابت ارائه شده اند. یکی از مهمترین انگیزه ها در یافتن ثابت دی الکتریک گازها تحلیل خصوصیات و ویژگیهای مولکولهای آنها و بررسی فعل و انفعالات بین مولکولی است. ثابت دی الکتریک تابعی از دما و چگالی می باشد و البته مستقل از حجم یا مقدار گاز می باشد.

برای یک گاز غیرمغناطیسی، دارای خصوصیات خطی، ایزوتروپیک و هموژن ضریب دی الکتریک به صورت زیر می باشد: (ε با سرعت فاز رابطه دارد)

$$\epsilon = \left(\frac{c_0}{c}\right)^2 \quad 1-1$$

---

<sup>1</sup> Permittivity

<sup>۲</sup> در بسیاری مواد متخصصین رشته های دیگر از ثابت دی الکتریک برای تحقیقات خود استفاده می کنند. به همین سبب در صورت جستجو در مقالات بسیاری از منابع توسط متخصصین شیمی و یا مواد نوشته شده اند

در این رابطه  $c_0$  سرعت نور در خلا و  $c$  سرعت نور در ماده مورد بررسی می باشد.

به صورت عمومی ثابت دی الکتریک گازها در بسیاری موارد بوسیله سلولهای خازنی<sup>۱</sup> محاسبه می شود. این سلولها در فرکانس پایین کار می کنند (حدود ۱۰ کیلوهرتز)

این روش دارای محدودیتهای و مشکلاتی است که دقت اندازه گیری را محدود می کنند:

- یکی از این محدودیتهای هیستریزیس مکانیکی می باشد.
- محدودیت دیگر اعوجاج هندسی سلول (به سبب نیاز به عایقهای جداکننده) می باشد.

در سالهای اخیر استفاده از رزوناتور میکروویو برای بدست آوردن خصوصیات گازها مورد توجه بسیاری قرار گرفته است.

اما پیچیدگی این روش این است که برای استفاده از آن نیاز به درک مناسب و جامعی از تئوریهای الکترومغناطیس می باشد.

از آنجا که فرکانس رزونانس یک رزوناتور ایده آل با سرعت فاز نور در ماده ای که رزوناتور را پر کرده نسبت دارد می توان ضریب دی الکتریک را از این طریق بدست آورد. پس به عبارت دیگر در نهایت با داشتن فرکانس رزونانس می توان ضریب دی الکتریک ماده را بدست آورد. طبیعی است دقت جواب بدست آمده برای ثابت دی الکتریک خیلی بالا نیست. علت این پدیده ایده آل نبودن محفظه رزونانس<sup>۲</sup> می باشد.

جواب بدست آمده را می توان با استفاده از اعمال تئوری اختلالات و اصلاح قسمتهای غیر ایده آل محفظه بهبود بخشید. هرچه مدلسازی تئوری اختلالات جزئی تر باشد، مقادیر نهایی دقیقتر و قابل اعتمادتر خواهند بود. البته اینجا یک نوع مصالحه وجود دارد و آن اینست که هرچه مدلسازی

---

<sup>1</sup> Capacitance cells

<sup>2</sup> Resonance Cavity



دقیقتر باشد زمان بیشتری نیز برای تحلیل و پردازش نیاز است.

در این پایان نامه، ابتدا ویژگی پارامترهای مواد (با تاکید بر دی الکتریک ها) و روش تعیین خصوصیات آنها، مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. سپس روشهای اندازه گیری مشخصات گازها با تاکید بر گاز طبیعی مورد مطالعه قرار می گیرد و مجموعه مورد نظر برای تست مشخصات الکترومغناطیسی گازها پیشنهاد می گردد. در نهایت با استفاده از یک الگوی تفاضلی دقت سیستم مورد بررسی قرار می گیرد و با شبیه سازی سیستم ارائه شده به افزایش کارایی آن و بررسی نقاط بحرانی می پردازیم.

## ۲-۱ مواد دی الکتریک:

در مواد دی الکتریک، بیشتر بارهای حامل محدود شده اند، و نمی توانند در هدایت الکتریکی شرکت کنند. با این حال، اگر یک میدان الکتریکی خارجی، بر این مواد اعمال گردد ممکن است که این بارهای محدود شده جابجا شوند. این جابجایی بار باعث ایجاد یک میدان دو قطبی می گردد، که با میدان اعمال شده مخالفت کرده و ماده مورد نظر قطبی می شود.

مواد دی الکتریک در حالت عادی تعداد بسیار کمی ذرات باردار در خود دارند. در مواد دی الکتریک عموماً آنها و مولکولها بی بار هستند (به عنوان مثال آرگون، نیتروژن) و یا در موادی همچون کلرید سدیم یونها در یک ساختار منظم قرار گرفته اند. در این مواد الکترونها بسیار محکم به هسته متصل شده اند و تحت تاثیر میدان الکتریکی این ذرات مقدار بسیار کمی منحرف می شوند.

میدان الکتریکی اعمالی همان دیپلها را می خواهد هم جهت با خود بنماید (میدان می خواهد دی الکتریک را پلاریزه کند)

اگر چگالی دیپل (پلاریزاسیون الکتریکی) را به صورت  $P$  در نظر بگیریم در یک حجم کوچک در یک دی الکتریک پلاریزه شده خواهیم داشت:

$$\delta u = P \delta V \quad (2-1)$$

در یک محیط واسط خطی و همه سویکسان<sup>۱</sup>، مقدار چگالی قطبی شدگی بطور مستقیم با شدت میدان الکتریکی اعمال شده در ارتباط است، که از رابطه زیر بدست می آید.

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (3-1)$$

در این رابطه،  $\epsilon_0$  عبارت است از ضریب گذردهی الکتریکی فضای آزاد و  $\chi_e$  قابلیت الکتریکی ماده است.

<sup>1</sup> isotropic

چگالی شار الکتریکی (D)، با چگالی قطبی شدگی و شدت جریان میدان الکتریکی مطابق رابطه زیر در ارتباط است:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \vec{P} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (4-1)$$

در این رابطه  $\epsilon$ ، ضریب گذردهی الکتریکی ماده نامیده می شود.

نظر به اینکه در سیستم SI،  $\epsilon$  عددی بسیار کوچکی می باشد، معمولاً بجای اندازه گیری آن، ضریب گذردهی الکتریکی نسبی يك ماده تعیین می گردد، که این پارامتر به عنوان ثابت دی الکتریک ماده نیز شناخته می شود.

معادله (4-1) تنها در ناحیه فرکانسی اندازه گیری شده معتبر است، مگر اینکه ضریب گذردهی الکتریکی، مستقل از فرکانس باشد. بیشتر مواد واپاشنده<sup>1</sup> هستند که در این صورت ضریب گذردهی الکتریکی آنها تابع فرکانس است، در چنین حالتی سمت راست معادله (4-1) به يك انتگرال کونولوشن میدانی در حوزه زمان تبدیل می گردد.

يك میدان الکتریکی متغیر با زمان باعث ایجاد دو نوع جریان متفاوت در يك ماده دی الکتریک می گردد. جریان جابجایی و جریان هدایتی که به وسیله بارهای آزاد ایجاد می گردند.

جریان هدایتی مطابق قانون اهم و طبق معادله زیر با شدت میدان الکتریکی در ارتباط است.

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (5-1)$$

در این رابطه  $\vec{J}_c$  عبارت است از چگالی جریان هدایتی که با واحد آمپر بر متر بیان می شود و  $\sigma$  قابلیت هدایت يك ماده است که واحد آن زیمنس بر متر می باشد. در حوزه فرکانس چگالی جریان جابجایی  $\vec{J}_D$  طبق رابطه زیر با چگالی شار الکتریکی در ارتباط است.

---

<sup>1</sup> dispersive

$$\vec{J}_{DE} = j\omega\vec{D} \quad (6-1)$$

چگالی کل جریان  $\vec{J}_T$  عبارت است از مجموع چگالی های جریان جابجائی و جریان هدایتی، بنابراین:

$$\vec{J}_T = \sigma\vec{E} + j\omega\epsilon\vec{E} \quad (7-1)$$

جریان هدایتی میزان تلفات دی الکتریک را نشان می دهد. منبع کاهش دیگری نیز در مواد دی الکتریک وجود دارد. هنگامی که يك میدان الکتریکی متناوب استفاده گردد، دو قطبی های پلاریزاسیون به طور ثابت به عقب و جلو حرکت می کنند. نظر به اینکه حامل های بار دارای جرم محدود هستند، میدان الکتریکی برای حرکت دادن آنها باید کار انجام بدهد، و لذا این امکان وجود ندارد که واکنش، بی درنگ و بدون تاخیر انجام گیرد. لذا بردار قطبی شدگی ممکن است در خلاف جهت میدان الکتریکی استفاده شده، قرار گیرد، که در این صورت به ویژه در فرکانس های بالا، قابل ملاحظه و مشاهده است. برای گنجاندن این پدیده، معادله (7-1) به صورت زیر تصحیح می گردد.

$$\begin{aligned} \vec{J}_T &= \sigma\vec{E} + j\omega\epsilon\vec{E} + \omega\epsilon''\vec{E} \\ &= j\omega\left(\epsilon - j\frac{\sigma + \omega\epsilon''}{\omega}\right)\vec{E} = j\omega\epsilon^*\vec{E} \end{aligned} \quad (8-1)$$

که  $\epsilon^*$  ضریب گذردهی الکتریکی مختلط ماده نامیده می شود. ضریب گذردهی الکتریکی مختلط نسبی يك ماده از طریق معادله زیر بدست می آید.

$$\begin{aligned} \epsilon^* &= \frac{\epsilon^*}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \left( \epsilon - j\frac{\sigma + \omega\epsilon''}{\omega} \right) \\ &= \epsilon'_r - j\epsilon''_r = \epsilon_r (1 - j \tan \delta) \end{aligned} \quad (9-1)$$

که  $\epsilon'_r$  و  $\epsilon''_r$  قسمت های حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی مختلط نسبی می باشند. باید توجه شود که قسمت موهومی برای يك ماده بدون تلف، صفر است. جمله  $\tan\delta$ ، تانژانت

تلفات نامیده می شود، زیرا این عبارت نشان دهنده تانژانت زاویه<sup>۱</sup> بین جریان کل و فاز جابجایی است، که برای ماده ای با تلفات پائین، نزدیک به صفر است. خصوصیات مواد دی الکتریک انتخاب شده در جدول (۱-۱) ارائه شده است.

جدول ۱-۱- پارامترهای ویژه چند ماده عایق در دمای اتاق و

در فرکانس 2.45 GHz [5]

تانژانت تلفات	ثابت عایقی (نسبی)	ماده
0.0006	9.0	آلومینا <sup>۱</sup>
0.05	2.50	Bacon (smoked)
0.12	4.4	گوشت یخ زده
0.3302	52.4	گوشت خام
0.27	58	خون.*
0.1304	4.6	کره (دارای نمک)
0.1552	2.9	کره
0.047	4.3	Borosilicate glass
0.0111	4.5	بتن (خشک)
0.0077	2.6	روغن ذرت
0.0682	2.64	روغن پنبه دانه <sup>۲</sup>
0.0062	2.55	خاک خشک (شنی)
0.5	35.0	سفیده تخم مرغ
0.0001	4.0	کوارتز <sup>۳</sup>
0.21	5.5	چربی*
0.0050	6.0	Glass ceramic
0.0360	2.5	گوشت خوک <sup>۴</sup>
0.3	32	جگر سفید <sup>۵</sup> *
0.33	49	ماهیچه*
0.0083	2.4	نایلون
0.0610	2.46	روغن زیتون
0.0125-0.0333	3-4	کاغذ
0.02	6.0	شیشه نوشابه
0.0003	2.1	تفلون
0.0050	4.0	پلی استر
0.0040-0.4167	1.2-5	چوب *در دمای 37°C

<sup>1</sup> Alumina

<sup>2</sup> Cottonseed

<sup>3</sup> Fused quartz

<sup>4</sup> Lard

<sup>5</sup> Lung

ویژگی های پراکندگی مواد را می توان بوسیله معادله ۸-۱ نشان داد.

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \left( j \frac{f}{f_r} \right)^{1-\alpha}} \quad (10-1)$$

که  $\varepsilon_s$  و  $\varepsilon_\infty$  به ترتیب ضریب گذردهی الکتریکی نسبی ماده در فرکانس های بینهایت و صفر می باشد. فرکانس های  $f_r$  و  $f$  (برحسب هرتز) به ترتیب نشان دهنده فرکانس کاری سیگنال و فرکانس استراحت ماده می باشد. اگر  $\alpha$  صفر باشد، معادله (۱۰-۱) می تواند به معادله دیبای<sup>۱</sup> کاهش یابد. خصوصیات پراکندگی مایعات انتخاب شده در جدول (۲-۱) ارائه گردیده است.

جدول ۲-۱- ویژگی های الکترومغناطیسی برای برخی از مایعات در دمای اتاق [5]

$\varepsilon_\infty$	$\varepsilon_s$	$\alpha$	$f_r$ (GHz)	ماده
1.9	21.2	0	47.6	استون
2.95	17.1	0.08	0.33	بوتانول
2.35	5.63	0.04	15.5	کلروبنزن
5	78	0	19.7	آب مقطر
4.2	24	0	1.24	اتانول
3	37	0.23	2.0	اتیلن گلیکول
5.7	33.1	0	3.0	متانول
3.2	19	0	0.54	پروپانل

<sup>1</sup> Debye

### ۱-۳- حدود تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی مواد:

یکی از مهمترین ویژگی های الکترومغناطیسی هر ماده، ضریب گذردهی الکتریکی<sup>۱</sup> آن می باشد، که با  $\epsilon^2$  نمایش داده می شود. این کمیت در سیستم MKS، دارای واحد  $F/m$  می باشد و برای مواد موجود در طبیعت در محدوده ی  $10^{11}$  می باشد. مقدار این ضریب برای خلا برابر  $\epsilon_0 = 8/85 \frac{pF}{m}$  می باشد که

برای هوا نیز تقریباً همین مقدار می باشد.

این کمیت برای تمام مواد موجود در طبیعت بالاتر از یک است. محدوده ی تغییر این ماده برای مواد پیرامون ما، از یک تا صد می باشد. البته به ندرت موادی دارای ضریب گذردهی نسبی چند هزار می باشند. جدول (۱-۳)، مقادیر نمونه ای  $\epsilon_r$  را برای چند ماده نشان می دهد.

جدول ۱-۳- مقادیر نمونه ای ضریب گذردهی نسبی برای چند ماده

[5]

آب دریا	گوگرد	نایلون	خاک خشک	پارافین ن	هوا (در $1At$ )
۸۰	۴	۳/۸	۳/۴	۲/۱	۱/۰۰۰۶

نکته مهم این است که برای عایق ها، مهم ترین عامل شناسایی، همین ضریب می باشد و درجه اهمیت آن بسیار بیشتر از دو عامل شناسایی دیگر می باشد.

### ۱-۴ هدف پروژه

با توجه به آنچه تا کنون آمده است، به بررسی روشهای اندازه گیری ضرایب دی الکتریک و مقایسه آنها خواهیم پرداخت و برای مواد گازی به بررسی رابطه ترمودینامیکی و تحلیل سیگنال یک مجموعه اندازه گیری خواهیم پرداخت. هدف در اینجا بررسی و ارائه روشی است که بتواند با دقت بسیار مناسبی ترکیباتی چون گاز متان

<sup>1</sup> Permittivity

<sup>2</sup> Epsilon

را از هوا باز شناسد چرا که این گازها دارای ضریب دی الکتریک بسیار نزدیک به هوا هستند و شناسایی آنها در بررسی نشتی ها بسیار مهم می باشد.



## فصل دوم - بررسی روشهای اندازه گیری ضرایب دی الکتریک گازها

### ۲-۱- مقدمه

بررسی دقیق ضریب دی الکتریک مواد چه برای شناسایی ترکیبات ناخالص آنها و چه برای تعیین خلوص خود مواد در بسیاری از صنایع مورد نیاز است. از آن جمله می توان به صنایع غذایی اشاره کرد که حضور درصد کمی از گازهایی چون بخار آب و یا برخی ترکیبات دیگر ماندگاری این مواد را به شدت کاهش می دهد.

از طرف دیگر در محیطهای الکترونیکی نیز حضور گازهای مختلف می تواند عملیات قطعات الکترونیکی را تحت تاثیر قرار دهد.

در سالهای اخیر سنسورها و روشهای مختلفی برای بررسی حضور یا عدم حضور گازها در محیطهای خاص طراحی و ساخته شده اند. از آن جمله می توان به سنسورهای الکترولیتیک، سنسورهای خازنی و غیره اشاره کرد. هر کدام از این سنسورها دارای محدودیتهای و مزیتهایی بسته به نوع کاربرد خود هستند.

در بین این روشها، روشهای میکروویو به سبب انعطاف زیاد خود مورد توجه ویژه ای قرار گرفته اند. به عنوان مثال روشهای میکروویو وابستگی کمی به نوع کاربرد خود دارند به طوریکه در روشهای میکروویو نمونه مورد بررسی در بسیاری موارد می تواند جامد، مایع و یا گاز باشد. روشهای میکروویو زیادی برای بررسی خصوصیات مواد طراحی شده اند که برای رده بندی و شناسایی مواد مورد استفاده قرار می گیرند. این روشها اکثرا بر اساس اندازه گیری ضریب دی الکتریک مواد تحت آزمایش پایه ریزی شده اند.

روشهای رزونانس میکروویو که از محفظه های رزونانس استفاده می کنند به صورت گسترده برای اندازه گیری پارامترهایی همچون فاکتور تراکم پذیری متان<sup>1</sup>، ضریب شکست گازها<sup>2</sup> [3] در فرکانسهای بالا، ضریب دی الکتریک گازها [2] و خصوصیات دی الکتریک میکرومخلو<sup>3</sup>ها [4] مورد استفاده قرار گرفته اند.

اکثر روشهای رزونانس محفظه یا اختلالات جزیی محفظه را اندازه گیری می کنند و یا تغییر فرکانس رزونانس را - به سبب ورود ماده مورد آزمایش که می تواند مایع، جامد و یا گاز باشد- شناسایی می کنند.

روشهایی که تنها از یک رزوناتور استفاده می کنند، برای اولین بار در سال ۱۹۵۰ برای اندازه گیری ثابت دی

<sup>1</sup> Compressibility factor of methane

<sup>2</sup> Refractive indices

<sup>3</sup> Microemulsions

الکتریک گازها در فرکانس باند X مورد استفاده قرار گرفته اند. (توسط زیمن و وینگفیلد<sup>1</sup> [5]) در سالهای اخیر از روشهای تک رزوناتوری حتی برای اندازه گیری مقدار آب نمونه های گاز و یا آلودگیها که جزء اندازه گیریهای بسیار دقیق می باشد نیز استفاده شده است. [1,6]

روشهایی که از دو رزوناتور برای یافتن ضریب شکست گازها استفاده می کنند و معروف به روشهای تفاضلی می باشند، توسط کرین و برینبام<sup>2</sup> ابداع شدند [7,8] از کاربردهای مهم این روشها بررسی ضریب دی الکتریک گازهایی است که ضریب دی الکتریک آنها بسیار نزدیک به هم می باشد. به عنوان مثال در صورتیکه بجوایم گاز متان را از هوا شناسایی کنیم با توجه به ضریب دی الکتریک آنها که برای متان ۱,۰۰۰۶۷۰۸۴۴ و برای هوای خشک ۱,۰۰۰۵۷۲۸۹۰ [21] می باشد، استفاده از روشهای تک رزوناتوری بسیار پیچیده است اما اگر از روشهای دو رزوناتوری استفاده شود می توان با مقایسه دقیق دو رزوناتور بعد از تنظیم مقدار مناسب<sup>3</sup> Offset تفاوت این دو ضریب را پیدا کرد.

فردی به نام سرجنت<sup>4</sup> [9] روش برینبام را با ارتباط دادن تفاوت فرکانس رزونانس با تفاوت زمانی پالسهای رزونانس در شناساهای کریستالی بهبود بخشید و بعد از آن هازگاوا<sup>5</sup> [10] روشهای اولیه برینبام و سرجنت را ترکیب کرد و توانست رطوبت سنجی بسازد که به کمک آن بتواند رطوبت هوای اتمسفر را اندازه بگیرد.

همانگونه که به نظر می رسد در میان روشهای میکروویو روشهای تفاضلی از دقت بالاتری برخوردار هستند به عنوان مثال با این روشها توانایی شناسایی بخار آب حتی در حدود چند Ppm در گازها وجود دارد [7] در این روشها حضور آلودگیها در ترکیبات گازی موجب تغییر ضریب دی الکتریک می شوند که خود به سبب تغییر فرکانس رزونانس محفظه نسبت به محفظه رزونانس مرجع مشخص می شود.

در روشهای تفاضلی دقت اندازه گیری تا حد زیادی به مقدار نویز وابسته است چراکه اگر سیگنال تفاضلی و سیگنال نویز در یک حد باشند، تفاوت ضرایب دو رزوناتور شناسایی نمی شود. همچنین در این روشها تفاوت شکل هندسی دو رزوناتور و تفاوت خصوصیات الکتریکی اجزای مجموعه دقت آستانه سیستم را تغییر می دهند.

<sup>1</sup> Wingfield and Zieman

<sup>2</sup> Crain and Birnbaum

<sup>3</sup> به سبب همگون نبودن کامل دو رزوناتور

<sup>4</sup> Sergeant

<sup>5</sup> Hasegawa and Stokesberry

باید توجه داشت که اکثر روشهای ذکر شده برپایه این فرض استوارند که رابطه زیر در ناحیه مایکروویو برقرار است:

$$\varepsilon = n^2 \quad (1-2)$$

باید توجه کرد که این رابطه اکیدا برای گازهای قطبی درست نیست چراکه این گازها در باند X از خود پراکنندگی نشان<sup>۱</sup> می دهد و آشکارسازی آنها که از دیرینه مورد توجه بوده است تقریبا با این روش غیر ممکن است. برای مرتفع کردن این مشکل روشهای دیگری بر اساس روابط ترمودینامیکی گازها ارائه شده است. یکی از این روشها که بسیار مورد توجه قرار گرفته است روشی است که بر اساس رابطه کلازیوس موزاتی<sup>۲</sup> استوار است. این رابطه برای گازهای قطبی و البته در فشارهای کم برقرار است. در سالهای اخیر اکثر اندازه گیریهای دقیق ضرایب دی الکتریک گازها بر اساس این رابطه انجام شده است. در بخشهای بعد به ارائه روشی بر اساس این رابطه ترمودینامیکی می پردازیم و سپس با شبیه سازی عددی مقادیر بهینه برای انتخاب رزوناتور بدست خواهند آمد. همچنین حساسیت سیستم را نسبت به تغییر هر یک از پارامترهای عملی مشخص خواهیم کرد. در بخشهای مختلف بر اساس اعداد و جداول تولید کنندگان تجهیزات مایکروویو تخمینی از آستانه عملی شناسایی ضریب دی الکتریک دو رزوناتور ارائه خواهد شد.

## ۲-۲-۲- رابطه کلازیوس موزاتی

همانگونه که می دانیم خصوصیات و رفتار گازهای ایده آل و یا غیر ایده آل را می توان با بدست آوردن رابطه بین متغیرهای ترمودینامیکی مستقل توصیف نمود. رابطه کلازیوس موزاتی در فرم ویريال خود ارتباط بین سه متغیر مستقل فشار، دما و ضریب دی الکتریک گاز را بیان می کند. فرم ویريال تابع کلازیوس موزاتی به صورت توانهای چگالی مولی به صورت زیر است: [15]

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = A_\varepsilon \rho + B_\varepsilon \rho^2 + C_\varepsilon \rho^3 + \dots \quad (2-2)$$

$\rho$  چگالی مولی،  $A_\varepsilon, B_\varepsilon, C_\varepsilon$  نیز ضرایب ویريال اول و دوم و سوم هستند که به ترتیب نماینده ارتباطات بین دو مولکول، بین زوج مولکول و بین سه مولکولها<sup>۳</sup> هستند.

<sup>1</sup> Dispersion

<sup>2</sup> Clausius-Mossotti (CM)

<sup>3</sup> Triplet

در اولین تقریب وقتی فشار پایین است، چگالی از رفتار گاز ایده آل پیروی می کند. در این صورت تنها ضریب اول غیر صفر در نظر گرفته می شود و خواهیم داشت:

$$\varepsilon = \frac{1+2A_\varepsilon\rho}{1-A_\varepsilon\rho} \approx 1+3A_\varepsilon\rho \quad (3-2)$$

اولین ضریب ویریال دی الکتریک  $A_\varepsilon$  به صورت مستقیم با توانایی پلاریزاسیون مولکول قطبی رابطه دارد. همچنین برای ترکیبی از گازها این ضریب می تواند به عنوان تابع مقدار مولار هر جزء ترکیب گاز در نظر گرفته شود. اولین ضریب ویریال یک ترکیب گاز دو تایی  $(A_\varepsilon)_m$  تابع جزء مولی گاز دوم  $x$ ، اولین ضریب ویریال گاز اول  $(A_\varepsilon)_p$  و اولین ضریب ویریال گاز دوم  $(A_\varepsilon)_c$  می باشد:

$$(A_\varepsilon)_m = (1-x)(A_\varepsilon)_p + x(A_\varepsilon)_c \quad (4-2)$$

بدین سبب ترکیب شدن گاز نا خواسته در گاز خالص یک تغییر نسبی در ضریب دی الکتریک ایجاد می کند:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_p}{\varepsilon_p} = \frac{3x\rho[(A_\varepsilon)_c - (A_\varepsilon)_p]}{1+3\rho(A_\varepsilon)_p} \quad (5-2)$$

در این رابطه  $\rho = \frac{P}{RT}$  می باشد و  $\varepsilon_m, \varepsilon_p$  به ترتیب ضریب دی الکتریک گاز خالص و ترکیب گازها می باشد. از طرف دیگر اگر در رابطه تقریبی  $\varepsilon \approx 1+3A_\varepsilon\rho$ ، اطلاع قبلی از  $A_\varepsilon$  داشته باشیم، می توانیم تغییرات  $\varepsilon$  را به تغییرات  $\rho$  نسبت دهیم:

$$\Delta\varepsilon \approx 3A_\varepsilon\Delta\rho \quad (6-2)$$

این تغییرات خود وابسته به تغییرات فشار است:

$$\Delta\varepsilon \approx 3A_\varepsilon \frac{\Delta P}{RT} = \frac{3A_\varepsilon}{RT} \Delta P \quad (7-2)$$

با در نظر گرفتن این رابطه می توان ارتباط مستقیم بین تغییر فشار و یا تفاوت فشار دو رزوناتور در روش تفاضلی با تفاوت ضریب دی الکتریک دو رزوناتور برقرار کرد.

لازم به توضیح است که اولین ضریب ویریال گازها را می توان با استفاده از مشخصات مولکولی آنها بدست آورد [16]. به عنوان مثال برای گازهای قطبی رابطه زیر برقرار است:

<sup>1</sup> Binary Gas Mixture