بسمِ الله الرَّحمنِ الرَّحيم

دانشگاه کردستان
دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

عنوان:

# روشی نوین برای اندازه گیری فاصله نقاط تماس سلول با زیرلایه در میکروسکوپ فلوئورسنس بازتابش کلی داخلی

پژوهشگر:

عطا بهمنی

استاد راهنما:

دکترعبدالله حسن زاده

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد

اسفند ماه ۱۳۸۹

# ***تعهد نامه***

اینجانب عطا بهمنی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد دانشگاه کردستان، دانشکده علوم پایه گروه فیزیک تعهد می نمایم که محتوای این پایان نامه نتیجه تلاش و تحقیقات خود بوده و از جایی کپی برداری نشده و به پایان رسانیدن آن نتیجه تلاش و مطالعات مستمر اینجانب و راهنمایی و مشاوره اساتید بوده است.

با تقدیم احترام

عطا بهمنی

۱۸/ ۱۲ /۱۳۸۹

**دانشگاه کردستان**
**دانشکده علوم پایه**
**گروه فیزیک**

**پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد**

# عنوان:
# روشی نوین برای اندازه گیری فاصله نقاط تماس سلول با زیرلایه در میکروسکوپ فلوئورسنس بازتابش کلی داخلی

**پژوهشگر:**
**عطا بهمنی**

در تاریخ ۱۸/ ۱۲/ ۱۳۸۹ توسط کمیته تخصصی وهیات داوران زیر مورد بررسی قرار گرفت و با نمره ........ و درجه ............... به تصویب رسید.

| هیات داوران | نام و نام خانوادگی | مرتبه علمی | امضاء |
|---|---|---|---|
| ۱ـ استاد راهنما | دکتر عبدالله حسن زاده | استادیار | |
| ۲ـ استاد داور خارجی | دکتر کاظم جمشیدی قلعه | دانشیار | |
| ۳ـ استاد داور داخلی | دکتر زهرا عالمی پور | استادیار | |

مهر و امضاء گروه

مهر و امضاء معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده

**تقدیم به.....**

تمام کسانی که علم را جهت خدمت به بشریت می آموزند
و بشر ره گم کرده را به سوی  سعادت
ابدی هدایت می کنند.

## تقدیر و تشکر

از همسر گرامیم که در طول این مدت باعث پشت گرمی من بودند سپاس گزارم.
سپاس فراوان نثار خانواده ام، خصوصاً پدر و مادر عزیزم که وجودشان سبب انگیزه و علاقه در من بود.
از استاد راهنمای ارجمندم، آقای دکتر عبدالله حسن زاده که زحمت راهنمایی پروژه را قبول فرمودند کمال تشکر وقدردانی دارم.

## چکیده

میکروسکوپ فلوئورسنس بازتابش کلی، بر میدان میرا استوار است. هنگام عبور نور از مرز مشترک ما بین دو محیط، اگر زاویه تابش بزرگتر از زاویه حد باشد، نور به طورکامل بازتابیده می‌شود. این حالت فقط وقتی اتفاق می‌افتد که نور از محیطی با ضریب شکست بیشتر به محیطی که ضریب شکست آن کمتر است، بتابد. هنگام بازتابش کلی نور از مرز مشترک، در محیطی که ضریب شکست آن کمتر است، میدان میرا تولید می‌شود که عمق نفوذ آن حدود ۱۰۰ نانومتر می باشد و تابعی از طول موج، ضرایب شکست شیشه و محیط فوقانی، و زاویه تابش است. میدان میرا می‌تواند برای تصویربرداری نقاط تماس و همچنین اندازه گیری فاصله نقاط تا زیرلایه به کار گرفته شود. تصویر برداری به کمک میکروسکوپ فوق برای پژوهشگران خیلی جذاب بوده است و برای کاربردهای گوناگون استفاده شده است. اما تعیین فاصله نقاط تماس سلول با زیرلایه، به دلیل استفاده از مدل‌های ریاضی پیچیده و روش‌های تجربی مشکل برای دانشمندان زیاد جذاب نبوده است.

در این پایان‌نامه، ما یک روش جدید ارائه می‌کنیم که اساس آن بر تغییر عمق نفوذ میدان میرا با تنظیم زاویه تابش برای تعیین فاصله نقاط تماس سلول تا زیرلایه استوار است. روش ما در مقایسه با روش های دیگر ساده تر و دقیق تر می‌باشد.

به طور خلاصه در این روش، شدت میدان میرا برحسب فاصله از سطح شیشه در چندین زاویه تابش بزرگتر از زاویه حد برای هر دو مد s وp محاسبه می‌شود. سپس، شدتهای میدان میرا در فواصل مختلف (یعنی ۵ نانومتر، ۱۰ نانومتر، ۱۵ نانومتر،...، ۱۰۰ نانومتر) بدست آورده می‌شوند. نمودارهای میدان میرا برحسب تابعی از زاویه تابش، در فواصل خاص از سطح شیشه نشان می‌دهند که با افزایش فاصله شکل نمودارها تغییر می‌کند. تغییرات شکل نمودارها در فواصل مختلف برای اندازه گیری فاصله نقاط تا سطح شیشه استفاده می‌شوند. برای بالا بردن دقت، اختلاف شدتهای میدان میرا برای هر دو قطبش s و p بدست آورده می‌شوند و از آنها برای یافتن فواصل جدایی سلول تا زیرلایه با دقت بسیار زیادی استفاده می‌شوند.

این روش، مستقل از پارامترهای آزمایش است و اجرای آن در عمل نیز، ساده است. با گرفتن تصاویر نقاط تماس در زوایای گوناگون برای مدهای s وp، و محاسبه شدت نور در هر نقطه تماس، نمودارشدت برحسب زاویه تابش رسم می‌شود. پس از مقایسه منحنی‌های تجربی با نمودارهای نظری، می توان فاصله سطح سلول تا شیشه را اندازه گرفت و برای دقت بیشتر اختلاف شدتها را می توان استفاده نمود.



**کلمات کلیدی**: بازتابش کلی، سلول- زیرلایه، فاصله سلول - زیرلایه، میدان میرا، میکروسکوپ فلوئورسنس

# فهرست مطالب

عنوان | صفحه


۱ فصل اول (مقدمه ای براامواج الکترومغنا طیس)........ ۱
۱-۱- مقدمه........ ۱
۱-۲- معرفی معادلات ماکسول........ ۲
۱-۲-۱- قانون گاؤس و شکل دیفرانسیلی آن........ ۲
۱-۲-۲- قانون فاراده و شکل دیفرانسیلی آن........ ۴
۱-۲-۳- تعمیم قانون آمپر و شکل دیفرانسیلی آن........ ۸
۱-۳- شرایط مرزی........ ۱۰
۱-۴- معادلات امواج الکترومغناطیسی........ ۱۲
۱-۵- بررسی امواج درمحیط های مرزدار........ ۱۴
۱-۵-۱- مدTEیا قطبشS........ ۱۵
۱-۵-۲- مدTM یا قطبشP........ ۱۵
۱-۶- بازتابش کلی و موج میرا........ ۱۸
۱-۶-۱- بررسی میدان میرا برای قطبشP........ ۲۱
۱-۶-۲- بررسی میدان میرا برای قطبشS........ ۲۴
۱-۷- خلاصه و نتیجه بحث........ ۲۸
۲ فصل دوم(میکروسکوپ فلوئورسنس بازتابش کلی داخلی و فلوئورسنس)........ ۲۹
۲-۱- مقدمه........ ۲۹
۲-۲- اجزاء اپتیکی میکروسکوپ نوری........ ۳۰
۲-۳- میکروسکوپ فلوئورسنس........ ۳۲
۲-۳-۱- اصول فیزیکی فلوئورسنس........ ۳۲
۲-۳-۱-۱- طیف های نوری جذب و گسیل، درفلوئورسنس........ ۳۴
۲-۴- کاربرد میکروسکوپ فلوئورسنس........ ۳۶
۲-۵- خصوصیات رنگ های فلوئورسنس........ ۳۷
۲-۶- تنظیم فیلترها و سیستم روشناییEpi........ ۴۳
۲-۶-۱- انواع لامپ ها برای تحریک فلوئورسنس........ ۴۴
۲-۶-۲- سیستم روشنایی Epi........ ۴۵
۲-۶-۳- فیلترها........ ۴۶
۲-۶-۴- آینه دو رنگه یا دوفام........ ۴۸
۲-۶-۵- لنزهای شیئی و بررسی مکانی آنها درمیکروسکوپ فلوئورسنس........ ۵۱
۲-۷- تفکیک یا جداسازی اپتیکی میکروسکوپ فلوئورسنس........ ۵۲
۲-۸- چند تصویر ازناحیه تماس سلول-زیرلایه به کمک میکروسکوپ........ ۵۴
۲-۹- خلاصه ونتیجه فصل........ ۵۵
۳ فصل سوم( نظریه عمومی الکترومغناطیس فلوئورسنس بازتاب کلی داخلی)........ ۵۶
۳-۱- مقدمه........ ۵۶
۳-۲- روش بازتابش کلی داخلی فلوئورسنس........ ۵۶
۳-۳- سلول........ ۵۷
۳-۳-۱- تعریف سلول........ ۵۷
۳-۳-۲- ساختمان سلول........ ۵۷
۳-۳-۳- شکل سلول........ ۵۸

۳-۳-۴- اندازه سلول ۵۸
۳-۳-۵- عمر سلول ۵۹
۳-۴- بازتابش کلی در ساختارهای چهارلایه ای(شیشه-مایع-غشاء-سیتوپلاسم) ۵۹
۳-۴-۱- موردa : میدان میرا درمحیط های مایع-غشاء-سیتوپلاسم ۶۳
۳-۴-۱-۱- بررسی حالتهای خاص ۷۶
۳-۴-۲- موردb: میدان میرا در محیط های مایع- سیتوپلاسم و موج پیوسته در محیط غشاء ۸۵
۳-۴-۳- موردC: میدان میرا درمحیط های مایع-غشاء و موج پیوسته در محیط سیتوپلاسم ۸۷
۳-۴-۴- موردd :میدان میرا درمحیط مایع وموج پیوسته درمحیط های غشاء-سیتوپلاسم ۹۱
۳-۴-۵- جذب ۹۸
۳-۴-۵-۱- محاسبه شدت میدان الکتریکی درمحیط مایع ۱۰۰
۳-۵- خلاصه و نتیجه فصل ۱۰۹
۴ فصل چهارم(نتایج و بحث) ۱۱۱
۴-۱- مقدمه ۱۱۱
۴-۲- نمودارعمق نفوذ d برحسب زاویه فرودی $\theta$ ۱۱۲
۴-۳- شدت میدان میرا برحسب فاصله ازمرزمشترک برای قطبش هایP وS ۱۱۳
۴-۴- شدت میدان الکتریکی برحسب زاویه فرودی برای قطبش هایP و S ۱۳۱
۴-۵- نمودارهایS وP درفاصله z یکسان ۱۳۵
۴-۶- تفاضل شدتP و S ۱۴۷
۴-۷- خلاصه و نتیجه گیری ۱۵۹
منابع: ۱۶۰
پیوست یک ۱۶۲

# فهرست جدول ها

عنوان | صفحه

جدول۲-۱: طول موج های تحریک وگسیل تعدادی از رنگ های فلوئورسنس............................................................................. ۴۰
جدول۴-۱:جدول تفاضل شدتهای مربوط بهp و S درحالتهای۶۲ و۷۳ ، ۶۲ و۸۴ ، ۷۳ و۸۴ درجه........................................ ۱۴۹
جدول۴-۲:جدول تفاضل شدتهای p بر حسب فواصل نقاط از زیرلایه در حالتهای۶۲، .... ، ۶۹ درجه................................. ۱۵۰
جدول۴-۳:جدول تفاضل شدتهای p بر حسب فواصل نقاط از زیرلایه در حالتهای۷۰، .... ، ۷۶ درجه................................. ۱۵۱
جدول۴-۴:جدول تفاضل شدتهای p بر حسب فواصل نقاط از زیرلایه در حالتهای۷۷، .... ، ۸۴ درجه................................. ۱۵۲
جدول۴-۵:جدول تفاضل شدتهای s بر حسب فواصل نقاط از زیرلایه در حالتهای۶۲، .... ، ۶۹ درجه................................. ۱۵۳
جدول۴-۶:جدول تفاضل شدتهای s بر حسب فواصل نقاط از زیرلایه در حالتهای۷۰، .... ، ۷۶ درجه................................. ۱۵۴
جدول۴-۷:جدول تفاضل شدتهای s بر حسب فواصل نقاط از زیرلایه در حالتهای۷۷، .... ،۸۴ درجه.................................. ۱۵۵
جدول۴-۸: رابطه بین تفاضل شدتها با فواصل نقاط از زیرلایه در یک سلول چسبیده به سطح........................................... ۱۵۶

# فهرست شکل ها

عنوان صفحه


شکل ۱-۱: خطوط میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی I در یک سیم راست بلند....... ۷
شکل۱-۲: خطوط میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی I در سیمی به شکل حلقه دایره ای کوچک....... ۷
شکل۱-۳: تغییر میدان الکتریکی در مرز مشترک دو محیط....... ۱۱
شکل۱-۴: تغییر میدان مغناطیسی در مرز مشترک دو محیط....... ۱۲
شکل۱-۵: بردارهای موج و میدانهای وابسته به آنها برای قطبیدگی TE....... ۱۵
شکل۱-۶: بردارهای موج و میدانهای وابسته به آنها برای قطبیدگی TM....... ۱۵
شکل۱-۷:زاویه حد $\theta_c$ هنگام عبور نور از محیط ضریب شکست بیشتر به محیط ضریب شکست کمتر....... ۱۷
شکل۱-۸: بازتابش کلی....... ۱۸
شکل۱-۹: شکل موج میرا در محیط دوم....... ۲۱
شکل۲-۱: تصویرمجازی بزرگ شده از یک نمونه در میکروسکوپ....... ۳۱
شکل۲-۲: اجزاء میکروسکوپ نوری....... ۳۱
شکل۲-۳: دیاگرام جاب لانسکی....... ۳۳
شکل۲-۴: طیف جذبی و گسیل فلوئورسنس نرمالیزه شده فلوئورسین ترکیب شده....... ۳۶
شکل۲-۵: طیف جذب و گسیل رنگ‌های فلوئورسنس....... ۴۱
شکل۲-۶: نمودارهای طیفی تحریک و گسیل سه رنگ فلوئورسنس برحسب طول موج....... ۴۲
شکل۲-۷: ترکیب فیلترها در مکعب فیلتر فلوئورسنس....... ۴۴
شکل۲-۸: نمودارهای طیف گسیل فیلترها در یک مجموعه فیلتر فلوئورسنس....... ۴۷
شکل۲-۹: نمودارهای گسیل مجموعه فیلتر سه باندی برای رنگ های FITC،DAPI، و تکزاس قرمز ....... ۵۰
شکل۲-۱۰:تصویر ستاره در صفحه کانونی عدسی همگرا توسط یک تلسکوپ....... ۵۲
شکل۲-۱۱: تصاویرسلول MC3T3-E1....... ۵۴
شکل۳-۱: اجزاء مختلف سلول جانوری....... ۵۸
شکل۳-۲: مدل دی‌الکتریک لایه‌ای سلول- زیرلایه....... ۶۰
شکل۳-۳: موج میرا در محیط های مایع-غشاء-سیتوپلاسم....... ۶۴
شکل۳-۴: زاویه های تابش و شکست در چهار محیط مجاور هم در حالت کلی....... ۶۵
شکل۳-۵: موج میرا در محیط‌های مایع-سیتوپلاسم....... ۸۵
شکل۳-۶: موج میرا در محیط‌های مایع-غشاء....... ۸۸
شکل۳-۷: موج میرا در محیط مایع....... ۹۲
شکل۳-۸: صفحه مختلط- نمودار ارگاند....... ۹۹
شکل۴-۱: نمودار عمق نفوذ برحسب زاویه فرودی برای دو محیط شیشه و مایع محتوی سلول....... ۱۱۳
شکل۴-۲: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله در زوایای تابش۶۲، ۶۵، ۷۰، ۷۵ و۸۰ درجه برای مد s....... ۱۱۵
شکل۴-۳: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله در زوایای تابش۶۲، ۶۵، ۷۰، ۷۵ و۸۰ درجه برای مد p....... ۱۱۵
شکل۴-۴: نمودار شدت میدان I روی مرز مشترک(z=۰) برحسب زاویه فرودی....... ۱۱۶
شکل۴-۵: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای$\theta$=۶۲ , d=۲۱۵nm....... ۱۱۷
شکل۴-۶ نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای$\theta$=۶۳ , d=۱۵۲nm....... ۱۱۸
شکل۴-۷: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای$\theta$=۶۴ , d=۱۲۳nm....... ۱۱۸
شکل۴-۸: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای$\theta$=۶۵ , d=۱۰۸nm....... ۱۱۹
شکل۴-۹: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای$\theta$=۶۶ , d= ۹۷nm....... ۱۱۹
شکل۴-۱۰: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای$\theta$=۶۷ , d=۸۸nm....... ۱۲۰
شکل۴-۱۱: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای$\theta$=۶۸ , d=۸۳nm....... ۱۲۰

شکل۴-۱۲: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای۶۹= $\theta$ , d=۷۸nm ...... ۱۲۱
شکل۴-۱۳: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای ۷۰= $\theta$ , d=۷۴nm ...... ۱۲۱
شکل۴-۱۴: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای ۷۱= $\theta$ , d=۷۱nm ...... ۱۲۲
شکل۴-۱۵: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای۷۲= $\theta$ , d=۶۸nm ...... ۱۲۳
شکل۴-۱۶: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای۷۳= $\theta$ , d=۶۶nm ...... ۱۲۳
شکل۴-۱۷: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای۷۴= $\theta$ , d=۶۴nm ...... ۱۲۴
شکل۴-۱۸: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای۷۵= $\theta$ , d= ۶۲nm ...... ۱۲۴
شکل۴-۱۹: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای۷۶= $\theta$ , d=۶۱nm ...... ۱۲۵
شکل۴-۲۰: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای۷۷= $\theta$ , d= ۵۹nm ...... ۱۲۵
شکل۴-۲۱: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای۷۸= $\theta$ , d=۵۸nm ...... ۱۲۶
شکل۴-۲۲: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای۷۹= $\theta$ , d= ۵۷nm ...... ۱۲۶
شکل۴-۲۳: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای ۸۰= $\theta$ , d= ۵۶nm ...... ۱۲۷
شکل۴-۲۴: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای ۸۱= $\theta$ , d= ۵۵nm ...... ۱۲۷
شکل۴-۲۵: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای۸۲= $\theta$ , d= ۵۵nm ...... ۱۲۸
شکل۴-۲۶: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای۸۳= $\theta$ , d= ۵۴nm ...... ۱۲۸
شکل۴-۲۷: نمودار شدت میدان میرا برحسب فاصله از مرز مشترک برای ۸۴= $\theta$ , d= ۵۴nm ...... ۱۲۹
شکل۴-۲۸: نمودارشدتI بر حسب Z برای موج قطبیدهS در زوایای فرودی ۷۵,۷۰,۶۶,۶۲درجه...... ۱۳۰
شکل۴-۲۹: نمودارشدتI بر حسبZ برای موج قطبیدهP در زوایای فرودی۷۰,۶۶,۶۲, ۷۵ درجه...... ۱۳۱
شکل۴-۳۰: نمودار شدت I برحسب زاویه فرودی $\theta$ برای قطبش S ...... ۱۳۲
شکل۴-۳۱: نمودار شدت Iبرحسب زاویه فرودی $\theta$ برای قطبش P ...... ۱۳۳
شکل۴-۳۲: نمودار شدت Iبرحسب زاویه فرودی $\theta$ برای قطبش S ...... ۱۳۴
شکل۴-۳۳: نمودار شدت Iبرحسب زاویه فرودی $\theta$ برای قطبش P ...... ۱۳۴
شکل۴-۳۴: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s وp در Z=۰ (روی مرز مشترک) ...... ۱۳۵
شکل۴-۳۵: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۵ nm ...... ۱۳۶
شکل۴-۳۶: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۱۰ nm ...... ۱۳۶
شکل۴-۳۷: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p درZ=۱۵ nm ...... ۱۳۷
شکل۴-۳۸: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۲۰ nm ...... ۱۳۷
شکل۴-۳۹: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۲۵ nm ...... ۱۳۸
شکل۴-۴۰ نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۳۰ nm ...... ۱۳۸
شکل۴-۴۱: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۴۰ nm ...... ۱۳۹
شکل۴-۴۲: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۵۰ nm ...... ۱۳۹
شکل۴-۴۳: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۶۰ nm ...... ۱۴۰
شکل۴-۴۴: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۷۰ nm ...... ۱۴۰
شکل۴-۴۵: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۸۰ nm ...... ۱۴۱
شکل۴-۴۶: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۸۵ nm ...... ۱۴۱
شکل۴-۴۷: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۹۰ nm ...... ۱۴۲
شکل۴-۴۸: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۹۵ nm ...... ۱۴۲
شکل۴-۴۹: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p در Z=۱۰۰ nm ...... ۱۴۳
شکل۴-۵۰: نمودار شدتI برحسب $\theta$ برای هردو مد s و p درz=۱۰۵ nm ...... ۱۴۳
شکل۴-۵۱: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هر دو مد s و p در Z=۱۱۰ nm ...... ۱۴۴

شکل۴-۵۲: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هر دو مد s و p در Z=۱۲۰ nm ........ ۱۴۴
شکل۴-۵۳: نمودارشدت I برحسب $\theta$ برای هر دو مد s و p در Z=۱۳۰ nm ........ ۱۴۵
شکل۴-۵۴: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هر دو مد s و p در Z=۱۴۰ nm ........ ۱۴۵
شکل۴-۵۵: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هر دو مد s و p در Z=۱۴۵ nm ........ ۱۴۶
شکل۴-۵۶: نمودار شدت I برحسب $\theta$ برای هر دو مد s و p در Z=۱۵۰ nm ........ ۱۴۶
شکل۴-۵۷:نمودار تفاضل شدت Is-Ip برحسب زاویه فرودی $\theta$، ازZ=۰nm تا Z=۱۵۰nm........ ۱۴۸

# ۱ فصل اول
# مقدمه ای براامواج الکترومغناطیس

## ۱-۱- مقدمه

بار الکتریکی ساکن، میدان الکتریکی تولید می‌کند و اطراف هر سیم حامل جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی وجود دارد که در قانون آمپر به زیبایی نشان داده شده است. بار الکتریکی متحرک اطراف خود علاوه بر میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی نیز بوجود می‌آورد. یعنی با تغییر میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی تولید می‌شود. میدان مغناطیسی متغیر نیز به نوبه خود، یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کند که با قانون فاراده بیان می‌شود. به عبارتی میدانهای الکتریکی و مغناطیسی اگر با زمان تغییر کنند، یکدیگر را می‌آفرینند. این میدانها، یک میدان الکترومغناطیسی را تشکیل می‌دهند که با سرعت نور c در فضا منتشر می شود.

امواج الکترومغناطیسی که در بالا توصیف شد به طور نظری در قرن نوزدهم توسط معادلات کلارک ماکسول پیشگویی شد[۱]. علاوه بر آن ماکسول نشان داد که سرعت انتشار این امواج در خلاء از رابطه زیر به دست می آید:

$$c = \frac{۱}{\sqrt{\varepsilon_{\circ}\mu_{\circ}}} = ۳\times ۱۰^{۸}\,\frac{m}{s} \qquad (۱-۱)$$

که $\varepsilon_{\circ},\mu_{\circ}$ به‌ترتیب گذردهی مغناطیسی و الکتریکی خلاء می باشند.

معادلات ماکسول به زیبایی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را به هم مرتبط می‌سازند.

چهار قانون بنیادی الکترومغناطیس عبارتنداز: ۱- قانون گاؤس، قانونی که عدم قطبهای مغناطیسی را بیان می‌کند.۲- قانون آمپر، که میدان مغناطیسی را به جریان‌های دائم ایجاد کننده آن مربوط می کند. ۳- قانون فاراده مربوط به القا، که آهنگ تغییر شار مغناطیسی و نیروی محرکه القایی را به هم مرتبط می سازد.۴- برای تغییر جریانها با زمان ناگزیر باید قانون آمپر را تعمیم دهیم[۲].

این چهارقانون مجموعه معادلات ماکسول نامیده می‌شوند. درقسمتی از این فصل به کمک این معادلات، امواج الکترومغناطیسی را بحث می‌کنیم. نیز، آنچه را که در عبور از یک مرز مشترک میان دو محیط بر یک موج ساده واقع می‌شوند به طور خلاصه بررسی می‌کنیم و قسمت آخر فصل را به بحثی مهم در مورد تولید میدان میرا[1] اختصاص می‌دهیم که اخیراً در میکروسکوپ فلوئورسنس بازتابش کلی داخلی (TIRFM[2]) کاربرد خوبی داشته است[۳].

## ۱-۲- معرفی معادلات ماکسول

### ۱-۲-۱- قانون گاؤس و شکل دیفرانسیلی آن

میان انتگرال مولفه عمودی میدان الکتریکی بر روی یک سطح بسته و مقدار کل بارهای درون این سطح، رابطه مهمی وجود دارد که به قانون گاؤس معروف است:

$$\oint_s \vec{E}.\hat{n}\,da = \frac{q}{\varepsilon_\circ} \qquad (۱-۲)$$

q مقدار کل بارهای درون سطح بسته ، $\varepsilon_\circ$ ضریب گذردهی الکتریکی خلاء و $\vec{E}$ میدان الکتریکی موجود در محیط هستند. اگر سطحی، بار نقطه ای q را احاطه کند انتگرال سطحی مؤلفه عمودی میدان الکتریکی (در خلاء) برابر $\frac{q}{\varepsilon_\circ}$ است. اگر بار، خارج از این سطح باشد مقدار انتگرال سطحی صفر خواهد شد. لازم به ذکر است اگر بار مورد نظر در محیطی با ضریب گذردهی الکتریکی $\varepsilon$، واقع شده باشد آنگاه در رابطه (۱-۲) به جای $\varepsilon_\circ$ مقدار $\varepsilon$ منظور می‌شود. وقتی که سطح بسته S، توزیع پیوسته‌ای از بارها، که با یک چگالی بار $\rho$ مشخص شده است را دربر گیرد آنگاه می‌توان قانون گاؤس را به آن نیز تعمیم داد. در صورتی‌که هر عنصر $\rho dv$ از بار را به منزله یک بار نقطه‌ای در نظر بگیریم آنگاه می‌توان نوشت:

$$q = \int_v \rho dv \qquad (۱-۳)$$

در این مورد قانون گاؤس را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\oint_s \vec{E}.\hat{n}\,da = \frac{۱}{\varepsilon_\circ}\int_v \rho\,dv \qquad (۱-۴)$$

کمیت $\oint_s \vec{E}.\hat{n}da$ مقدارشار میدان الکتریکی گذرنده از سطح s نامیده می‌شود. با تعریف بردارجابه جایی الکتریکی به صورت $\vec{D} = \varepsilon_\circ \vec{E}$ می‌توانیم رابطه (۱-۴) را به صورت زیر بنویسیم:

---

[1] Evanescent Field

[2] Total Internal Reflection Fluorescence Microscopy

$$\oint_s \vec{D}\,.\hat{n}\,da \;=\int_v \rho\, dv$$ (۱-۵)

حال می‌خواهیم شکل دیفرانسیلی قانون گاؤس را بدست آوریم.
قضیه واگرایی در ریاضی، انتگرال سطحی روی سطح بسته را به انتگرال حجمی محصور در سطح، تبدیل می‌کند.

$$\oint_s \vec{F}.\hat{n}da = \int_v \vec{\nabla}.\vec{F}dv$$ (۱-۶)

$\vec{\nabla}$ دل عملگر دیفرانسیلی برداری است که در دستگاه مختصات قائم به صورت زیر نوشته می شود:

$$\vec{\nabla} = \hat{i}\,\frac{\partial}{\partial x} + \hat{j}\,\frac{\partial}{\partial y} + \hat{k}\,\frac{\partial}{\partial z}$$ (۱-۷)

عملگر دل، فقط سمت چپ تابعی از (x,y,z) که بر روی آن عمل مشتق گیری انجام می شود، قرار می‌گیرد. اگر این قضیه را در مورد قانون گاؤس در رابطه (۱-۵) بکار بریم خواهیم داشت:

$$\oint_s \vec{D}\,.\hat{n}\,da \;= \oint_v \vec{\nabla}\,.\vec{D}\,dv$$ (۱-۸)

با مقایسه کردن روابط (۱-۵) و (۱-۸) داریم:

$$\oint_v \vec{\nabla}\,.\vec{D}\,dv \;=\; \int_v \rho\, dv$$ (۱-۹)

رابطه (۱-۹) باید برای همه حجم‌ها، یعنی هر حجم V که انتخاب می کنیم درست باشد و این در صورتی امکان پذیراست که انتگرالده‌های طرف راست و چپ با هم برابر باشند. بنابراین، شرط آنکه معادله بالا برای هر حجمی که انتخاب می‌شود معتبر باشد، باید داشته باشیم:

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{D} = \rho$$ (۱-۱۰)

رابطه (۱-۱۰) شکل دیفرانسیلی قانون گاؤس نام دارد و یکی از چهار معادله ماکسول می‌باشد[۲و۴].

## ۱-۲-۲- قانون فاراده و شکل دیفرانسیلی آن

القای نیروی محرکه الکتریکی توسط تغییر شار مغناطیسی (میزان خطوط گذرنده میدان مغناطیسی $\vec{B}$از سطح S که بسته نباشد) برای اولین بار در اوایل قرن نوزدهم توسط مایکل فارادی و جوزف هنری مشاهده شد[۵]. معادله مشخصه الکتروستاتیک عبارت است از:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad (۱-۱۱)$$

یعنی تاو میدان الکتریکی ساکن، صفر است.

یا صورت انتگرالی آن:

$$\oint \vec{E}.d\vec{l} = 0 \quad (۱-۱۲)$$

روشی ساده برای اثبات معادلات (۱-۱۱) و (۱-۱۲) استفاده از تعریف اختلاف پتانسیل الکتروستاتیکی بین دو نقطه می‌باشد. اختلاف پتانسیل الکتریکی میان دو نقطه a و b در فضایی که میدان الکتریکی وجود دارد به صورت زیر است:

$$V_b - V_a = -\int_a^b \vec{E}.d\vec{l} \quad (۱-۱۳)$$

$\vec{E}$میدان الکتریکی و $d\vec{l}$ المان طولی است که برای انتگرال‌گیری انتخاب شده است.

اختلاف پتانسیل هر نقطه با خودش، صفراست. به عبارتی دیگر، اختلاف پتانسیل از a تا b برابر منفی اختلاف پتانسیل از b تا a می باشد.

$$V_b - V_a = -(V_a - V_b) \quad (۱-۱۴)$$

با نوشتن صورت انتگرالی رابطه (۱-۱۴) داریم:

$$-\int_a^b \vec{E}.d\vec{l} = \int_b^a \vec{E}.d\vec{l} \Rightarrow \oint \vec{E}.d\vec{l} = 0$$

و رابطه (۱-۱۲) اثبات شد. به کمک قضیه استوکس[1] می توان، رابطه ی (۱-۱۱) را نتیجه گرفت.
قضیه استوکس بیان می کند؛ انتگرال خطی یک بردار روی یک منحنی بسته، برابر است با انتگرال سطحی مؤلفه قائم تاو (کرل) آن بردار، روی هر سطحی که توسط این منحنی محصور شده باشد[۶].

$$\oint_c \vec{F}.d\vec{l} = \int_s \vec{\nabla} \times \vec{F}.\hat{n}\,da \qquad (۱۵-۱)$$

پس، خواهیم داشت:

$$\oint_c \vec{E}.d\vec{l} = \int_s \vec{\nabla} \times \vec{E}.\hat{n}\,da = ۰ \qquad (۱۶-۱)$$

چون این رابطه برای تمام سطوح S برقرار است پس، نتیجه می گیریم:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = ۰$$

و رابطه ی (۱-۱۱) اثبات شد. لیکن، روابط (۱-۱۱) و (۱-۱۲) برای میدان‌های الکتریکی وابسته به زمان صادق نیستند.
قانون القای الکترومغناطیس فارادی بیان می‌کند: هرگاه، شار مغناطیسی که از یک مسیر بسته می گذرد با زمان تغییر کند در آن نیروی محرکه القایی تولید می شود که با آهنگ تغییر شار (مشتق شار نسبت به زمان) متناسب است؛ و با عامل بوجود آورنده نیروی محرکه القایی، مخالفت می‌کند.

$$\varepsilon = -\frac{d\varphi}{dt} \qquad (۱۷-۱)$$

$\varepsilon$ نیروی محرکه القایی و $\varphi$ شار مغناطیسی گذرنده از حلقه می‌باشد که برابر $\int \vec{B}.\hat{n}da$ (انتگرال میدان مغناطیسی روی سطحی که از آن عبورمی‌کند) است. از طرفی در میدان‌های الکتریکی وابسته به زمان، نیروی محرکه الکتریکی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon = \oint \vec{E}.d\vec{l} \qquad (۱۸-۱)$$

از معادلات (۱-۱۷) و (۱-۱۸) نتیجه می‌گیریم که:

[1] Stokes Theorem

$$\oint \vec{E}.d\vec{l} = -\frac{d\varphi}{dt} \qquad (۱-۱۹)$$

با توجه به تعریف شار مغناطیسی، خواهیم داشت:

$$\oint \vec{E}.d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B}.\hat{n}\,da \qquad (۱-۲۰)$$

سمت چپ معادله (۱-۲۰) را به کمک قضیه استوکس از رابطه (۱-۱۵)، بازنویسی می‌کنیم

$$\oint_c \vec{E}.d\vec{l} = \int_s \vec{\nabla}\times\vec{E}.\hat{n}\,da = -\frac{d}{dt}\int \vec{B}.\hat{n}\,da$$

و با قرار دادن مشتق داخل انتگرال به رابطه زیر می‌رسیم

$$\int_s \vec{\nabla}\times\vec{E}.\hat{n}\,da = -\int_s \frac{\partial\vec{B}}{\partial t}.\hat{n}\,da \qquad (۱-۲۱)$$

چون رابطه (۱-۲۱) برای تمام سطوح ثابت S، باید صادق باشد پس داریم

$$\vec{\nabla}\times\vec{\mathrm{E}} = -\frac{\partial\vec{\mathrm{B}}}{\partial\mathrm{t}} \qquad (۱-۲۲)$$

که شکل دیفرانسیلی قانون فاراده است.

یکی از ویژگی‌های آشکار خطوط میدان مغناطیسی حاصل از هر توزیع جریانی، این است که خطوط میدان $\vec{B}$ پیوسته‌اند (شکل‌های ۱- ۱ و ۱-۲). بر خلاف خطوط میدان الکتریکی ساکن، خطوط میدان مغناطیسی آغاز و پایانی ندارند. این بدان معناست که " بار مغناطیسی" یا "قطب مغناطیسی" آزاد وجود ندارد. واقعیتی که پیامدهای مهمی در مبحث الکترومغناطیس دربر دارد.