وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه
گاوازنگ - زنجان

بررسی انتشار نور در کف خشک سه‌بعدی، کف تَر و مواد دانه‌ای دوبعدی

پایان‌نامهٔ دکتری

زینب سجادی

استاد راهنما: دکتر میرفائز میری

فروردین ۱۳۸۸

بسم الله الرحمن الرحيم

چکیده

مطالعه انتشار نور در مواد کدر موضوعی بسیار مهم و جالب توجه است. از تحلیل شدت نور پراکنده شده از مواد کدر، می‌توان اطلاعات ارزشمندی از تحول و چگونگی ناهمگنی‌های موجود در آنها استخراج نمود. در سال‌های اخیر با استفاده از تکنیک‌های جدید اپتیکی مبتنی بر پخش نور در مواد کدر، خواص نهفته این مواد به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است.

ما در این پایان نامه، انتشار نور در محیط‌های ناهمگن را با رهیافت اپتیک هندسی مطالعه می‌کنیم. با در نظر گرفتن گشت تصادفی فوتون‌های نور در محیط ناهمگن، ضریب پخش فوتون‌ها را به صورت تحلیلی و با شبیه‌سازی کامپیوتری بدست می‌آوریم. در این رساله کف صابون به عنوان ماده ناهمگن پراکننده نور انتخاب شده است. برای بررسی انتشار نور در کف خشک سه بعدی، مدل کف ورونوی سه بعدی نامنظم را شبیه‌سازی کرده و نقش اجزای تشکیل دهنده کف و میزان بی‌نظمی موجود در آن را بر پخش نور مطالعه کرده‌ایم. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو با تخمین تحلیلی توافق دارند. از مقایسه مقادیر کمّی طول پویش آزاد حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشهای تجربی نتیجه می‌گیریم که بر خلاف تصور رایج، فیلم‌های صابون در پراکندگی نور نقش به‌سزایی دارند. همچنین تأثیر میزان ناهمگنی در نمونه‌های کف، بر رفتار پخشی نور ناچیز است. شهود تجربی نیز این موضوع را تأیید می‌کنند.

همچنین یک مدل تحلیلی برای پخش نور در کف تر دوبعدی ارائه کرده‌ایم. در این مسأله از یک بسته دوبعدی شامل دیسکهای هم‌اندازه به عنوان مدل کف تر استفاده شده است. نتایج این مدل تحلیلی با داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شده‌اند. در این مسأله برای طول پویش آزاد فوتون‌ها یک رابطه خطی با معکوس کسر آب کف بدست آوردیم که از لحاظ کیفی با نتایج تجربی سازگار است و از لحاظ کمّی نیز تنها به اندازه یک ضریب عددی از مرتبه یک با آزمایشها تفاوت دارد. این مدل را می‌توان برای پخش نور در محیط‌های دانه‌ای دوبعدی نیز به کار برد.

در ادامه، یک مدل یک بعدی برای پخش فوتون‌های نور در یک زنجیره ناهمگن، ارائه و آن را با دو روش تقریبی، حل تحلیلی می‌کنیم و شرایطی برای چگونگی تأثیر ناهمگنی‌های محیط بر پخش نور بدست می‌آوریم.

در مورد انتشار نور در کف می‌توان نشان داد که ضریب گذردهی فیلم‌ها از جهت تابش نور مستقل است، اما در بعضی از نانوساختارها و برخی مواد اپتیکی این تقارن وجود ندارد. از این‌رو در پایان، این مدل را به حالت کلی‌تر نامتقارن تعمیم خواهیم داد. نتایج این مدلهای یک‌بعدی با شبیه‌سازی مونت کارلو آزموده شده‌اند.

فهرست

چکیده . . . . . سه

مقدمه ۱

۱ مروری بر کارهای انجام شده در حوزه انتشار نور در کف

۱.۱ معرفی کف ۹

۱.۱.۱ هندسه، توپولوژی و برخی خواص آماری کف ۱۲

کف دو بعدی ۱۴

۲.۱.۱ فرایندهای دینامیکی در کف ۱۴

۲.۱ طیف سنجی موج پخشی ۱۶

۱.۲.۱ مروری بر نتایج حاصل از آزمایش DWS روی کف ۲۰

۳.۱ رهیافت گشت تصادفی برای انتشار نور ۲۹

۱.۳.۱ انتشار نور در مواد کلوئیدی: گشت تصادفی ساده ۲۹

۲.۳.۱ انتشار نور در کف: گشت تصادفی پافشار ۳۰

۴.۱ مروری بر مدلهای ارائه شده برای کف و پخش نور در آن ۳۲
۱.۴.۱ مدلهایی برای کف ۳۲
۲.۴.۱ انتشار نور در کف دو بعدی ۳۳
۳.۴.۱ انتشار نور در کف سه بعدی ۳۹
شبیه سازی عددی ۴۱
تخمین ضریب پخش به روش تحلیلی ۴۳

۲ انتشار نور در کف ورونوی سه‌بعدی

۱.۲ مقدمه ۴۸
۲.۲ معرفی کف ورونوی ۵۵
۳.۲ ویژگی های کف ورونوی ۵۹
۴.۲ قسمت دوم شبیه سازی: ردیابی فوتون در کف ورونوی سه بعدی ٦۴
۵.۲ نتایج شبیه سازی ٦۹
۱.۵.۲ مدل بازتابندگی ثابت. ٦۹
۲.۵.۲ مدل بازتابندگی فرنل ۷۲
٦.۲ رهیافت تحلیلی برای توجیه نتایج شبیه‌سازی ۷٦
۷.۲ یک مدل ساده برای مرزهای پلاتو ۷۸
۱.۷.۲ نتایج شبیه سازی مدل شامل فیلم‌ها و مرزهای پلاتو ۸۰
۲.۷.۲ تخمین تحلیلی برای نتایج شبیه‌سازی مدل شامل فیلم‌ها و مرزهای پلاتو ۸۲

۳.۷.۲ معایب مدل شامل فیلم‌ها و مرزهای پلاتو ۸۳

۳ پخش نور در کف تر دو بعدی

۱.۳ مدل دوبعدی برای پخش نور در کف تر و مواد دانه‌ای ۸۸

۱.۱.۳ رهیافت تحلیلی ۸۸

۲.۱.۳ شبیه سازی عددی ۹۸

۳.۱.۳ بحث و جمع بندی ۱۰۲

۴ گشت تصادفی پافشار فوتون بر روی شبکه یک بعدی ناهمگن

۱.۴ مدل ۱۱۳

۲.۴ گشت تصادفی پافشار بر روی زنجیره منظم ۱۱۵

۳.۴ گشت تصادفی پافشار بر روی زنجیره نامنظم ۱۱۷

۱.۳.۴ روش بسط اختلالی ۱۱۸

۲.۳.۴ روش تقریب محیط مؤثر ۱۲۱

۴.۴ شبیه سازی عددی ۱۲۸

۵ گشت تصادفی پافشار نامتقارن در یک بعد

۱.۵ مدل ۱۳۴

۲.۵ زنجیره نامتقارن منظم ۱۳۵

۳.۵ زنجیره نامتقارن نامنظم ۱۳۸

۴.۵ تقریب محیط مؤثر ۱۳۸
۵.۵ شبیه سازی عددی ۱۴۳

٦ پیوست‌ها

پیوست A مقالات چاپ شده یا در دست تهیه حاصل از تحقیقات این رساله ۱۴۸
پیوست B ۱۵۰
پیوست C ۱۵۱
۱.٦ معرفی نرم افزار *Qhull* ۱۵۱
۱.۱.٦ خطاهای *Qhull* ۱۵۳
پیوست D ۱۵۵
۲.٦ معرفی ساختارها و آرایه های اصلی برنامه تولید کف ورونوی ۱۵۵
پیوست E ۱٦۱
۳.٦ روند شبیه سازی کف ورونوی سه‌بعدی ۱٦۱
۱.۳.٦ شرح تابع *CellMaker* ۱٦۲
۲.۳.٦ شرح تابع *VertexMaker* ۱٦۴
۳.۳.٦ شرح تابع *FilmMaker* ۱٦۵
۴.۳.٦ عملکرد تابع *Edgemaker* ۱٦۹
پیوست F ۱۷۲
پیوست G ۱۷۴

پیوست H ۱۷۶
پیوست I ۱۷۸
پیوست J ۱۷۹
پیوست K ۱۸۱
پیوست L ۱۸۳
پیوست M ۱۸۴
پیوست N ۱۸۵
پیوست O ۱۸۶
پیوست P ۱۸۷
پیوست Q ۱۸۹
مراجع ۱۹۰

مقدمه

انتشار امواج در مواد کدر موضوعی است که مورد توجه و مطالعه بسیاری از فیزیکدانان قرارگرفته است، چراکه می‌توان از پراکندگی شدید امواج در مواد کدر، برای آشکارسازی خواص درون آنها استفاده کرد[۳ ،۲ ،۱]. برای این منظور، امواج آکوستیک[۵ ،۴]، امواج الاستیک و نور برای مطالعه خواص داخلی بسیاری از مواد مانند بافتهای بدن [٦]، لایه‌های زمین[۷]، کریستالهای مایع [۱۰ ،۹ ،۸]، کف[۱۴ ،۱۳ ،۱۲ ،۱۱]، کلوئیدها[۱۵] و ... به کار رفته اند.

نور در داخل مواد کدر، در اثر برخوردهای مکرر با ناهمگنی‌های محیط به شدت پراکنده می‌شود و هنگام خروج از ماده جهت اولیه انتشار نور به کلی فراموش شده است. به همین سبب موادی همچون کف، شیر و مه، که شامل تعداد بسیار زیادی عوامل پراکندگی نور هستند، سفید و کدر دیده می‌شوند و مشاهده و مطالعه آنها با روش‌های معمولی مبتنی بر پراکندگی تک‌گانه [۱] میسر نیست.

چنانچه تعداد مراکزپراکندگی در یک محیط به اندازه کافی زیاد باشد، نور در آن محیط پراکندگی چندگانه [۲] انجام می‌دهد و پس از تعداد زیادی پراکندگی، به حد پخش می‌رسد [۳][۱]. می‌توان فوتون‌های نور را گامزن‌های تصادفی در نظر گرفت که در اثر پراکنده شدن از ناهمگنی‌های محیط، حرکت تصادفی انجام داده و در ماده پخش می‌شوند. به تازگی تکنیکهای جدید اپتیکی برای مطالعه مواد ارائه شده است که مبتنی بر پدیده پخش نور در مواد هستند. می‌توان از این روش‌ها برای مطالعه داخل مواد کدر سود جست. مهمترین این روش ها، روش اسپکتروسکپی موج پخشی [۴] (DWS)[۱۸ ،۱۷ ،۱٦ ،۲] است. روش DWS، ابزاری برای مطالعه ساختار و دینامیک داخلی مواد کدر است. در این تکنیک با تحلیل توابع همبستگی زمانی شدت نور پراکنده از ماده، خواص و دینامیک داخلی آن را پیش بینی می‌کنند. تغییرات زمانی شدت نورپراکنده از

[۱] single scattering

[۲] multiple scattering

[۳] diffusion limit منظور از حد پخش این است که شدت نور پراکنده از ماده، در معادله پخش صدق می‌کند.

[۴] Diffusing Wave Spectroscopy

ماده، بازتابی از دینامیک و تحولات داخلی ماده است. روش اسپکتروسکپی موج پخشی برای مطالعه مواد دانه‌ای[۵] [۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳] ، کف [۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴]، امولسیون‌ها [۲۴، ۲۵] و غیره به کار رفته است.

آزمایش‌های پراکندگی نور نشان داده اند که فوتون‌های نور در کف صابون گشت تصادفی انجام می‌دهند و انتشار نور در این مواد پخشی است. اما مشخص نیست که چه سازوکاری منجر به پدیده پخش نور در کف می‌شود. آزمایش DWS نشان داده است که نحوه افت توابع همبستگی زمانی شدت نور پراکنده از کف، بسیار مشابه نتایج حاصل از این آزمایش بر روی محلولهای کلوئیدی است[۱۱]. این در حالی است که بوجود آورنده شکل توابع همبستگی در محلولهای کلوئیدی، حرکت براونی ذرات در محلول است[۱، ۱۶]. اما در کف سازوکاری مشابه حرکت براونی وجود ندارد. کف تر از حباب‌های کروی هوا تشکیل شده است که در یک محیط مایع قرار دارند. در کف خشک که آب آن در اثر جاذبه کشیده شده است، حباب‌ها شکل کروی خود را از دست می‌دهند و به شکل چند وجهی هایی در می‌آیند که فیلم‌های مایع وجوه آن هستند. هر سه فیلم در یک مرز پلاتو[۶] به هم می‌رسند و هر چهار مرز پلاتو یکدیگر را در یک رأس[۷] قطع می‌کنند. مرزهای پلاتو کانالهایی هستند که بیشتر آب کف در آنها قرار دارد[۲۶].

آب کف در اثر نیروی جاذبه در مرزهای پلاتو جریان پیدا می‌کند و این پدیده موجب خشک شدن[۸] کف می‌شود. از طرفی حباب‌های هوا در کف هم اندازه نیستند، لذا در اثر اختلاف فشار حباب‌های مجاور، گاز از حباب‌های کوچکتر به حباب های بزرگتر نشت می‌کند و کف به تدریج درشت‌تر می‌شود. پدیده‌های دینامیکی دیگری نیز در کف رخ می‌دهند که تعدادی از آنها شناخته شده‌اند، اما به علت ظاهر مات و سفید کف، مشاهده تمامی اتفاقات داخلی آن میسر نیست. در کف، به دلیل برخوردهای متوالی فوتون‌های نور با فیلم ها، رأسها و مرزهای پلاتو، پراکندگی چندگانه رخ می‌دهد. هیچ یک از فرآیندهای دینامیکی شناخته شده در کف، توجیه کننده شکل توابع همبستگی شدت و تشابه آنها با توابع همبستگی شدت در محلولهای کلوئیدی نیست. از سوی

[۵] granular media

[۶] Plateau border

[۷] vertex

[۸] drainage

دیگر بر اساس آزمایش‌های تجربی، طول پویش آزاد پراکندگی[۹] (l^*) که مسافتی است که فوتون‌ها در طی آن جهت حرکت خود را از یاد می‌برند، بر حسب کسر آب کف (ε) به شکل $l^* \propto 0.14/\varepsilon + 1.5$ می‌باشد[۱۳]. از آنجا که بیشتر آب کف در مرزهای پلاتو جای دارد، منطقی به نظر می‌رسد که عامل اصلی پخش نور در کف مرزهای پلاتو باشند. اما با یک تخمین تحلیلی ساده می‌توان نشان داد که این فرض منجر به رابطه $l^* \propto 1/\sqrt{\varepsilon}$ می‌شود که به وضوح با مشاهدات تجربی ناسازگار است. بنابراین فیلم‌های مایع و رأسها نیز می‌توانند در پراکندگی نور سهیم باشند. بنابراین می توان گفت که دینامیک کف همچنان مبهم است.

هدف ما در این پایان نامه مطالعه پراکندگی نور در کف است. به این منظور انتشار نور را در کف خشک و کف تر به روش‌های شبیه سازی رایانه‌ای و تحلیلی بررسی می‌کنیم. سعی می‌کنیم به راهی برای دستیابی به خواص داخلی و نهان کف بدون نیاز به دستکاری آن نزدیک شویم و ارتباط میان خواص پخشی نور در این دسته از مواد را با ناهمگنی‌های موجود در آنها بررسی کنیم. ابعاد حبابهای کف نسبت به طول موج نور بسیار بزرگ است. این امر موجب می‌شود که بتوان با رهیافت اپتیک هندسی مسأله پخش نور در کف را بررسی نمود. می‌توان فوتونهای نور را گام‌زن‌های تصادفی[۱۰] در نظر گرفت که در اثر برخورد به ناهمگنیهای موجود در کف یک گشت تصادفی انجام می‌دهند. هنگامی که فوتون به یک فیلم مایع با ضریب گذردهی[۱۱] t و ضریب بازتابندگی[۱۲] r برخورد می‌کند، با احتمال t از فیلم عبور و با احتمال r بازتاب می کند. این حرکت منجر به نوع خاصی از گشت تصادفی به‌نام گشت تصادفی پافشار[۱۳] می‌شود. در این نوع گشت تصادفی جهت حرکت گام‌زن در یک گام، در انتخاب گام بعدی آن تأثیر می‌گذارد. ما در این تحقیق، از گشت تصادفی پافشار برای مدل کردن حرکت فوتونها و بدست آوردن ضریب پخش و طول پویش آزاد آنها استفاده کرده‌ایم. این نوع از گشت تصادفی در بخش ۲.۳.۱ تشریح شده است.

میری و اشتارک نقش فیلم‌های صابون را در پراکندگی نور در کف خشک مطالعه کرده‌اند[۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰].

[۹] transport mean free path

[۱۰] random walker

[۱۱] transmittance

[۱۲] reflectance

[۱۳] persistent random walk

آنها مدل منظم لانه زنبوری و مدل نامنظم کف ورونوی[۱۴] را در دو بعد و نیز مدل کف کلوین [۱۵] را در سه بعد به عنوان مدلهایی برای کف خشک در نظر گرفته‌اند و پراکندگی نور از فیلم‌های مایع را بررسی نموده اند. در بخش ۱.۴.۱ مروری بر این مدلها خواهیم داشت. سلول منظم کلوین یک مدل ایده‌آل و غیرواقعی است. در این مدل تمامی حباب‌های کف هم شکل و هم اندازه‌اند. همچنین وجوه سلول کلوین دو به دو موازیند. چنین ساختاری در کف واقعی هرگز مشاهده نمی شود. توازی وجوه سلول کلوین در تابش عمودی نور منجر به انتشار غیر واقعی فوتون‌ها در یک بعد (عمود بر وجوه موازی) می‌شود. برای گسترش مدل منظم کلوین به کف واقعی نامنظم، ما از مدل کف ورونوی سه بعدی استفاده کرده ایم و با تغییر تدریجی یک شبکه کلوین به یک شبکه نامنظم، نمونه‌هایی با میزان بی نظمی مختلف تولید کرده و انتشار نور را در این نمونه‌ها شبیه سازی کرده‌ایم[۳۲]. نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو نشان می‌دهد که بی‌نظمی‌های توپولوژیکی و هندسی، تأثیر چندانی در پخش نور ندارند و تنها از نظر کمی ضریب پخش فوتون‌ها را اندکی تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین طول پویش آزاد حاصل از این مدل برای فوتون از لحاظ کمی با طول پویش آزاد حاصل از آزمایش همخوانی دارد. این امر نشان می‌دهد که فیلم‌های صابون در پراکندگی نور مؤثر هستند.

مدل ورونوی نامنظم برای کف خشک سه بعدی مدلی مناسب است. اما در مورد کف تر، حباب‌ها شکل کروی دارند و در مایع کف غوطه‌ورند. ما گشت تصادفی فوتون‌ها را در یک بسته دو بعدی از دیسکهای هم‌اندازه به شعاع R را به عنوان مدلی برای انتشار نور در کف آبدار برگزیده‌ایم[۳۳]. مزیت این مدل این است که به روش تحلیلی قابل حل می‌باشد. در این مدل، حباب‌های دایره ای صابون در دو بعد، یک نمونه کف تشکیل می‌دهند که سطح φ از صفحه را می‌پوشانند. فوتون‌های نور در این محیط، گشت تصادفی پافشار انجام می‌دهند و هنگام برخورد با سطح دایره‌ها، با احتمال r بازتاب و با احتمال $t = 1 - r$ عبور می‌کنند. برای سادگی فرض کرده‌ایم که r و t مقادیری ثابت هستند و مقدار آنها را به کمک انتگرالگیری روی زوایای مختلف تابش با توجه به قوانین فرنل تخمین زده‌ایم. از آنجا که کف تر از لحاظ شکل هندسی مشابه محیط‌های دانه‌ای است، می‌توان این مدل را در مسأله انتشار نور در یک محیط دانه‌ای مانند گوی‌های شیشه ای به کار برد. طول پویش آزاد

[۱۴] Voronoi

[۱۵] سلول کلوین، سلول ویگنر سایتز شبکه مکعبی مرکز پر است. این سلول در شکل ۱ــ۲۰ نشان داده شده است.

فوتون‌ها را به صورت تحلیلی بر حسب ضرایب شکست دیسک‌ها و محیط اطراف آنها، شعاع دیسک‌ها، ضریب بازتابندگی r و کسر اشغال φ بدست آورده‌ایم. چنانکه نتایج این مدل را برای حباب‌های کف محلول در آب به کار بریم، طول پویش آزاد به شکل $l^*/R = 0.11/\varepsilon + 0.37$ پیش بینی می‌شود که از لحاظ کیفی با نتایج تجربی سازگار است.

در مدلهای منظم کف لانه‌زنبوری و کلوین که برای پراکندگی نور در کف خشک ارائه شده اند[۲۷، ۳۰] هنگامی‌که فوتون‌ها به‌صورت عمودی به فیلم‌ها برخورد می‌کنند، یک حرکت یک بعدی انجام می‌دهند. در این حالت یک گشت تصادفی پافشاریک‌بعدی اتفاق می‌افتد که در آن فوتون در برخورد با هر فیلم نسبت به عبور یا بازتاب (بسته به مقدار بازتابندگی r و گذردهی t) تصمیم‌گیری می‌کند. اما ضخامت فیلم‌های مایع در کف با هم یکسان نیست و از طرفی ضریب گذردهی هر فیلم به ضخامت آن بستگی دارد. از این‌رو ما در ادامه، مسأله گشت تصادفی پافشاریک‌بعدی روی یک زنجیره ناهمگن را مطالعه نموده‌ایم. فرض کرده‌ایم که ضرایب گذردهی در نقاط زنجیره ضریب گذردهی t با توزیع $f(t)$ دارند. هر یک از نقاط این زنجیره به منزله یک فیلم است. مزیت این مدل یک بعدی این است که به صورت تحلیلی قابل مطالعه است. چنانچه گذردهی در تمامی نقاط زنجیره یکسان باشد، حل دقیق مسأله امکان پذیر است. در مورد زنجیره ناهمگن با دو روش تقریبی مختلف مسأله را حل کرده‌ایم. این روش‌ها عبارتند از تقریب محیط مؤثر[۱۶] و تقریب بسط اختلالی[۱۷]. ضریب پخش فوتون‌ها به روش تحلیلی بدست آمده و با شبیه سازی کامپیوتری نیز مقایسه شده است. نتایج این مدل نشان می‌دهد که چنانکه $\langle \frac{1}{t} \rangle$ در زنجیره، کراندار باشد، فوتون‌ها در زنجیره پخش می‌شوند. اما اگر $\langle \frac{1}{t} \rangle$ بی‌نهایت باشد، رفتار پخشی فوتون‌ها به رفتار $f(t)$ در نزدیکی $t \to 0$ بستگی دارد و پخش نامتعارف[۱۸] فوتون‌ها نیز می‌تواند اتفاق بیفتد[۳۴]. توجه کنید که بستگی رفتار پخشی نور به $f(t)$ در واقع به معنی وجود رابطه‌ای میان ناهمگنی‌های محیط و رفتار نور است و ما را به مطالعه مواد ناهمگن از طریق مشاهده نور پراکنده از آنها نزدیک می‌کند.

نتایج این مدل یک بعدی را می‌توان به صورت تجربی آزمود. چیدمانی از یک مجموعه‌ی تیغه های موازی را در نظر بگیرید. ضریب گذردهی هر تیغه را می توان با توجه به ضریب شکست و ضخامت آن به‌دست آورد.

[۱۶] effective medium approximation

[۱۷] disorder expansion approximation

[۱۸] anomalous diffusion

با تابانیدن یک باریکه لیزر عمود بر تیغه‌ها می‌توان شرایطی برای گشت تصادفی پافشاری یک بعدی فراهم کرد. مدلهای پخش یک‌بعدی به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. شباهت بسیار زیادی بین نتایج مدل ما با مدلهای رسانش جهشی[۱۹] روی یک زنجیره یک بعدی وجود دارد. در مدلهای رسانش جهشی از گشت تصادفی ناهمبسته استفاده می‌شود که ماهیت آن با گشت تصادفی پافشار کاملاً متفاوت است. از این رو شباهت میان نتایج، جالب توجه است.

در مورد موادی مانند فیلمهای کف، ضریب گذردهی فیلم از جهت تابش نور مستقل است. یعنی فوتون از هر طرف به فیلم برخورد کند با ضریب گذردهی یکسان، عبور خواهد کرد. این موضوع را می‌توان به صورت ریاضی نیز نشان داد. اما موادی نیز وجود دارند که برای آنها جهت فرود نور مهم است. برای مثال ضرایب گذردهی برای نور تابیده از چپ و راست، در برخی دیودهای اپتیکی به میزان قابل توجهی با هم متفاوت است[۳۵]. همچنین به تازگی عدم تقارن نسبت به جهت تابش نور در یک نانو ساختار مشاهده شده است[۳۶].

بنابراین ما برای تکمیل مسأله گشت تصادفی پافشار روی زنجیره ناهمگن، آن را به حالت کلی تر زنجیره نامتقارن تعمیم داده‌ایم [۳۷]. فرض شده است که ضریب گذردهی در هر نقطه شبکه به جهت فرود نور بستگی دارد و t و t' به ترتیب ضرایب گذردهی برای فوتون‌های فرودی از راست و چپ هستند. تابع توزیع ضرایب گذردهی $F(t,t')$ است. به کمک روش تقریبی محیط مؤثر، دو کلاس مجزا برای $F(t,t')$ بدست آمده است که منجر به پخش عادی فوتون‌ها در زنجیره می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو با پیش بینی مدل سازگار است.

برای آشنایی خواننده با مطالب مورد نیاز در این پایان نامه، فصل اول به مرور مختصری بر مفاهیمی چون کف و خواص آن، آزمایش اسکپتروسکپی موج پخشی، گشت تصادفی پافشار و.... اختصاص داده شده است.

در فصل دوم کف ورونوی سه بعدی را به عنوان مدلی برای کف خشک نامنظم معرفی کرده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتشار نور در آن را به تفصیل شرح می‌دهیم. همچنین با توجه به اینکه شبیه سازی شبکه ورونوی و تعقیب فوتون‌ها در آن بسیار پیچیده است، بخش قابل توجهی از این فصل به تشریح برنامه کامپیوتری نحوه ساخت نمونه‌های کف ورونوی و تعقیب فوتون تخصیص داده شده است.

[۱۹] hopping conduction

در فصل سوم یک مدل تحلیلی درشت دانه برای انتشار نور در کف تر ارائه شده است. در این مدل، برای گشت تصادفی پافشار فوتون در یک بسته دوبعدی از دایره های هم‌اندازه، ضریب پخش به صورت تابعی از پارامترهای مدل بدست آمده است. این مدل همراه با نتایج شبیه سازی مونت کارلو در فصل سوم آمده است.

فصل چهارم مربوط به حل تحلیلی گشت تصادفی پافشار فوتون روی یک زنجیره ناهمگن است. این مسأله به دو روش حل تحلیلی شده و شرایطی برای چگونگی بازتاب نوع ناهمگنیهای زنجیره در رفتار پخشی نور بدست آمده است. نتایج مدل همراه داده های شبیه سازی به طور مفصل ارائه شده است.

در فصل پنجم مدل یک بعدی فصل چهار را به حالت نامتقارن تعمیم داده و دو کلاس مجزا برای پخش فوتون‌ها روی زنجیره ناهمگن با گذردهی نامتقارن بدست آورده‌ایم.

فصل اول

مروری بر کارهای انجام شده در حوزه انتشار نور در کف

از آنجا که در این پایان‌نامه، کف صابون به عنوان محیط اصلی انتشار نور انتخاب شده است، ابتدا به معرفی کف و ساختار و ویژگیهای آن می‌پردازیم. کف را می‌توان از جنبه های مختلفی مورد بررسی قرار داد. برای مثال خواص شارشی، رئولوژی[۱]، توپولوژی[۲]، ساختار و دینامیک کف، هر یک بطور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مسلماً پرداختن به تمامی ویژگیهای کف در این پایان‌نامه لزومی ندارد. در بخش ۱.۱ به طور خلاصه آن دسته از ویژگیهای کف را که در حوزه مطالعات این تحقیق مفید هستند مرور خواهیم کرد.

ظاهر سفید کف مطالعه و مشاهده داخل آن را مشکل می‌کند. در بخش ۲.۱ روش اسپکتروسکپی موج پخشی[۳] (DWS) را به عنوان ابزاری دقیق و نیرومند برای مطالعه کف و سایر مواد کدر نرم[۴] معرفی خواهیم کرد. اساس این روش پخش نور در ماده است. آزمایشهای مختلف نشان داده‌اند که نور در کف پراکندگی چندگانه[۵] انجام داده و در آن پخش می‌شود[۴۶، ۴۵، ۴۴، ۴۱، ۴۰، ۳۹، ۳۸، ۱۳، ۱۱]. ازاینرو روش DWS به عنوان

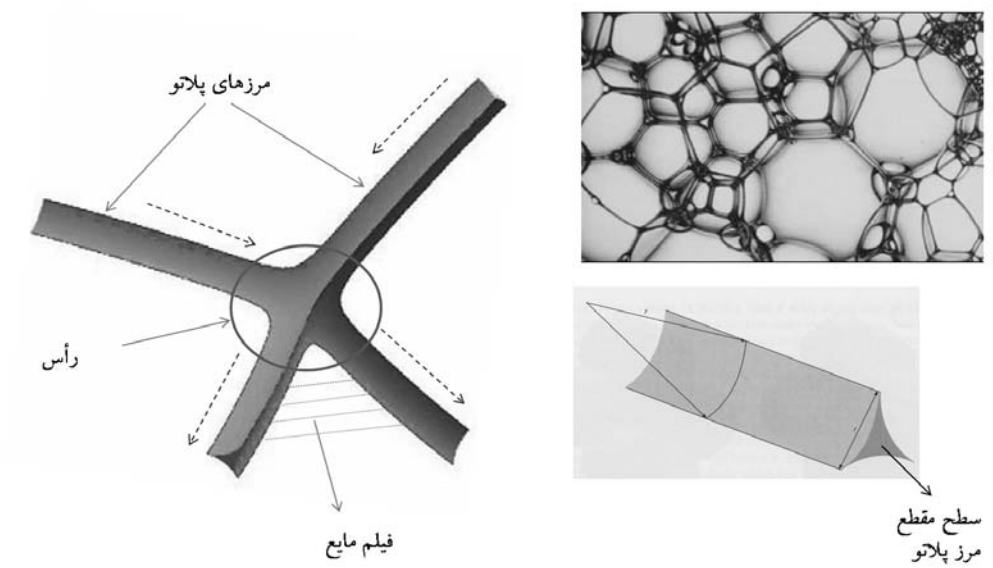
[۱] rheology

[۲] topology

[۳] Diffusing Wave Spectroscopy

[۴] soft

[۵] multiple scattering



شکل ۱—۱: کف مایع و اجزای تشکیل دهنده آن. برگرفته از [43].

ابزاری مفید و قدرتمند برای مطالعه کف از اهمیت بالایی برخوردار است. به کمک این روش اطلاعات گسترده‌ای از ساختار و دینامیک داخلی کف بدست آمده است. در این فصل برخی از این دستاوردها را نیز مرور خواهیم کرد.

۱.۱ معرفی کف

کف مایع یک سیستم ناهمگن دور از تعادل است که بیشتر حجم آن را گاز تشکیل می دهد. کف، قابلیت جاری شدن دارد، با این وجود کف برخی از خواص مکانیکی جامدات را داراست و بسته به میزان تنشی که به آن وارد شود ممکن است خواص جامد یا مایع از خود نشان دهد. این رفتار کف، مشابه مواد دانه‌ای[۶] است. شباهت ساختار کف به شیشه ها، کریستالها و برخی بافتهای سلولی، خواص شارشی ویژه آن در محیطهای متخلخل، خواص مکانیکی جالب آن و شباهت برخی ویژگیهای فیزیکی آن به محیط های دانه‌ای موجب شده است که این ماده مورد توجه فیزیکدانان واقع شود[۲۶].

کاربرد گسترده کف در صنعت، اهمیت مطالعه آن را افزایش می دهد. به دلیل حجم و سطح تماس بسیار زیاد و چگالی اندک، کف در آتش نشانی، تسهیل استخراج معادن و خصوصاً استخراج نفت و فرایندهای خالص

[۶] granular media

سازی و جداسازی کاربرد گسترده دارد. به علاوه در صنایع غذایی بسیاری از دِسِرها و مواد لَبنی متشکل از کف هستند[۴۸ ،۴۷]. کف های جامد نیز که بسیاری از خواص توپولوژیکی آنها مشابه کف های مایع است در گستره وسیعی از صنعت به کار می روند[۵۰ ،۴۹]. برای مثال فومهای فلزی به علت استحکام زیاد و چگالی اندک در صنایع خودروسازی، هواپیما سازی و غیره کاربرد فراوان دارند. از سوی دیگر در بسیاری از موارد کف به طور ناخواسته تولید می شود[۷] و وجود آن مضر است[۵۱]. بنابراین مطالعه کف برای کنترل آن لازم به نظر می رسد.

کف از دو فاز مایع و گاز تشکیل شده است. با وجود شفافیتِ هر دو این فازها، کف بدلیل پراکندگی شدید نور در آن، سفید و کدر دیده می شود. از این رو مشاهده و مطالعه ساختار و دینامیک داخلی آن به روشهای عادی میسر نیست. امابه کمک روش نوظهور طیف سنجی موج پخشی[۸] می توان به اطلاعاتی از داخل کف دست یافت [۱۸ ،۱۷ ،۱۶ ،۲]. در بخش بعدی این روش را بیشتر معرفی خواهیم کرد.

بسته به میزان آبی که در کف وجود دارد آن را به کف خشک[۹] و آبدار[۱۰] تقسیم بندی می کنند [۱۱]. کسر آب کف[۱۲] را با ε نشان می دهیم. چنانچه ε کف از 8% کمتر باشد آنرا کف خشک می نامند. از $8\% \sim \varepsilon$ تا $\varepsilon \sim 15\%$ محدوده کف تر است. اگر کسر آب کف از 35% فراتر رود، به جای کف با حبابهای معلق گاز در آب سر و کار داریم که به آن آب گازدار[۱۳] می‌گویند. آب گاز دار کاملاً خواص مایع ها را دارد.

در کف تر حبابهای هوا شکل کروی دارند. اما در کف خشک حبابها به شکل چند وجهیهایی در می آیند که فیلمهای نازک مایع وجوه آنها را تشکیل می دهند. محل تقاطع این فیلمها که همان اضلاع چند وجهی هستند مرزهای پلاتو[۱۴] نامیده می شوند. مرزهای پلاتو یکدیگر را در رأسهای چند وجهی قطع می کنند. فیلم، رأس[۱۵] و مرز پلاتو اجزاء اصلی تشکیل دهنده کف هستند. در شکل ۱—۱ این اجزاء نشان داده شده اند. فیلم های مایع

---

[۷] excessive foam formation

[۸] Diffusing Wave Spectroscopy

[۹] dry foam

[۱۰] wet foam

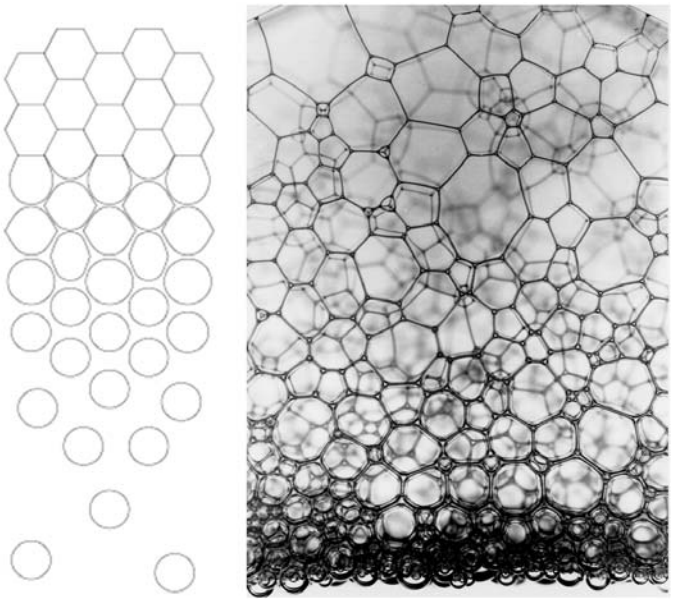
[۱۱] تعریف درست کف تر و کف خشک براساس خواص رئولوژیکی کف صورت می گیرد. از آنجا که رئولوژی کف بحث بسیار گسترده‌ای است که جایگاهی در این پایان نامه ندارد، ما تعریف کف خشک و تر را بر اساس کسر آب آن بیان می کنیم.

[۱۲] liquid fraction

[۱۳] bubbly liquid

[۱۴] Plateau borders

[۱۵] vertex



شکل ۱—۲: با گذشت زمان آب موجود در کف در اثر گرانش در مرزهای پلاتو جریان می یابد و در کف ظرف جمع می‌شود کف موجود در بالای ظرف، کف خشک است و در زیر آن کف تر تشکیل می شود. برگرفته از [42].

بسته به نوع ماده تشکیل دهنده کف و نیز شرایط محیطی حاکم بر آن ممکن است بین 10 نانومتر تا چند میکرومتر ضخامت داشته باشند. در حالت تعادل، در حالت تعادل ضخامت فیلمهای مایع کمتر از 100 نانومتر است[۵۲]. فیلم ها در کف مسطح نیستند و انحنای اندکی دارند. مرزهای پلاتو، کانالهای آبداری هستند که بیشتر آب کف در آنها قرار دارد. این مرزها یک شبکه[۱۶] نامنظم تشکیل می‌دهند. در اثر نیروی گرانش مایع کف در این کانالها جریان پیدا می کند (مشابه شکل ۱—۱). بنابراین کف پس از مدتی در اثر گرانش آب خود را از دست داده و خشک می‌شود. در ε های بسیار کوچک، معمولاً می توان مرزهای پلاتو را به صورت خطوط متقاطع در نظر گرفت. پدیده خشک شدن[۱۷] کف از ۴۰ سال پیش تا کنون به روشهای مختلف نظری و تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است [۵۶، ۵۵، ۵۴، ۵۳]. اگر یک ظرف حاوی کف مدتی به حال خود باقی بماند، در زیر آن آب جمع می شود. این وضعیت در شکل ۱—۲ مشاهده می شود. کف بالای ظرف، کف خشک شامل حبابهای چند وجهی است. حال آنکه در عمق ظرف حبابها شکل کروی دارند و در آب غوطه‌ورند.

[۱۶] network

[۱۷] drainage