

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش ماده چگال

**آستانه گذار فردریکز در بلورهای مایع نماتیک حاوی نانوذرات فروالکتریک**

استادان راهنما:

دکتر محمدعلی شاهزمانیان

دکتر حشمت اله یاوری

پژوهشگر:

مجتبی فرخ بین

مهرماه ۱۳۹۲

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر دست آوردهای مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از پژوهش موضوع این پایان‌نامه  
متعلق به دانشگاه اصفهان است. دانشجو موظف به رعایت  
آئین‌نامه و منشور اخلاق در پژوهش برای ارائه و یا چاپ  
مطالب مستخرج از پایان‌نامه خود می‌باشد.



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش ماده چگال آقای

مجتبی فرخ بین تحت عنوان

آستانه گذار فردیگز در بلورهای مایع نماتیک حاوی نانوذرات فروالکترونیک

در تاریخ ۱۳۹۲/۷/۱۶ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه... عالی... به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه دکتر محمدعلی شاهزمانیان با مرتبه‌ی علمی استاد

۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه دکتر حشمت اله یآوری با مرتبه‌ی علمی دانشیار

۳- استاد داور داخل گروه دکتر سعید جلالی اسدآبادی با مرتبه‌ی علمی استادیار

۴- استاد داور خارج گروه دکتر غلامرضا راشدی با مرتبه‌ی علمی استادیار

امضای مدیر گروه



## پاسکزاری:

من به سرچشمه‌ی خورشید نه خود بردم راه  
ذره‌ای بودم و مهر تو مرا بالا برد

پاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش را بنمونان کرد و به بهنیشینی رهروان علم و دانش مستخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیان ساخت. قلم ناتوان اینجا، قاصر از بیان گوشه‌ای از زحمات کسانی است که همواره والد ارشان بوده و جرحه‌نوش جام تعلیم و تربیت، فضیلت و انسانیت آنها بوده ام و همواره چراغ وجودشان روشمگر راه من در سختی‌ها و مشکلات بوده است. به همین جهت بر خود لازم می‌دانم از کسانی که در این راه همراه و بگام من بوده اند تشکر و قدردانی نمایم.

از پدر و مادر عزیزم که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عنو کشیده و گریانه از کنار غفلت بایم گذشته اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاور بی‌چشم و داشت برای من بوده اند؛

از اساتید فریخته جناب آقای دکتر شاخزمانیان و جناب آقای دکتر یآوری که مراب شاگردی خود پذیرفتند و در کمال سعی صدر، با حسن خلق و فروتنی، از پیچ لگی در این عرصه بر من دریغ نمودند؛

از اساتید داور، جناب آقای دکتر جلالی و دکتر راشدی که زحمت داوری این پایان نامه را متقبل شدند؛

از همه‌ی افراد و دوستانی که بی‌شک بعضی از آن ها سهم بالایی را در به ثمر نشاندن این پژوهش داشتند، خالصانه تشکر و قدردانی می‌کنم.

تقدیم بہ پدر و مادر عزیز و مہربانم

## چکیده:

امروزه یکی از هدف‌های مهم در زمینه‌ی تحقیقات پیشرفته‌ی بلور مایع، بالا بردن کارایی بلورهای مایع با استفاده از روش‌های فیزیکی، بدون نیاز به سنتز شیمیایی جدید است. یکی از روش‌های ممکن برای رسیدن به این هدف، افزودن ذرات کلئیدی با ابعاد نانو به عنوان ناخالصی به بلورهای مایع نماتیک است. به گونه‌ای که با افزودن ناخالصی، می‌توان خواص یک سامانه را به میزان زیادی تغییر داد و در جهت بهینه‌سازی هر چه بیشتر آن تلاش کرد.

به دلیل اثرات منحصربه‌فرد و چشمگیر افزودن ناخالصی نانوذرات فروالکتریک به سامانه‌های بلور مایع نماتیک (به طور مثال افزایش دمای نماتیک به همسانگرد به میزان  $K$  ۵، افزایش در ثابت دی‌الکتریکی موثر، کاهش آستانه‌ی ولتاژ گذار فردریکز و ...) نانوذرات فروالکتریک با ابعاد  $100-10\text{ nm}$  به عنوان ناخالصی انتخاب شده است تا کوچک بودن ابعاد این نانوذرات واپیچش کلی در سامانه به وجود نیابد. ناهمسانگردی محیط بلورهای مایع نیز سبب می‌شود که با اعمال میدان خارجی در جهت‌های مختلف، واپیچش‌های مختلفی در سامانه به وقوع بپیوندد و در تیغه‌ی بلور مایع به ازای یک آستانه‌ی میدان، گذار فردریکز در آن رخ دهد. از طرفی دیگر شکل و قطبیدگی نانوذرات فروالکتریک نیز به دلیل تولید میدان الکتریکی القایی در تغییر آستانه‌ی میدان گذار فردریکز، موثر خواهد بود.

به دلیل اهمیتی که در دانستن میدان آستانه‌ی گذار فردریکز در کارکرد ابزارهای الکترونیکی بلور مایع وجود دارد، لذا آستانه‌ی میدان گذار فردریکز (الکتریکی و مغناطیسی) در بلورهای مایع نماتیک خالص  $5CB$ ، به ازای شرایط مختلف چنگ‌زنی مولکول‌ها (همگن و هوموتروپیک) در واپیچش‌های مولکولی مختلف (پخ-خمش و پیچش) به صورت تحلیلی (تقریبی) و عددی (دقیق) به دست آورده شده، سپس میزان اعتبار این دو نسبت به هم ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌ترین مورد برای صرفه‌جویی در انرژی، استفاده از لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی همگن با واپیچش مولکولی پیچش است.

در فصل ۴، نانوذرات فروالکتریک به عنوان ناخالصی به سامانه‌ی بلور مایع نماتیک خالص  $5CB$  اضافه شده است و نشان داده شده که با افزودن این نانوذرات، می‌توان دمای گذار فاز نماتیک به همسانگرد را بالا برد و به این طریق پایداری فاز بلور مایع نماتیک را افزایش داد.

در فصل ۵، نانوذرات فروالکتریک  $Sn_2P_2S_6$  به عنوان ناخالصی به سامانه‌های بلور مایع نماتیک  $5CB$  افزوده شده و اثرات افزودن این نانوذرات بر بلور مایع نماتیک  $5CB$  در واپیچش‌های مولکولی مختلف نشان داده شده و به مقایسه‌ی این نتایج با حالت خالص پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از این نانوذرات فروالکتریک به عنوان ناخالصی در سامانه‌های بلور مایع نماتیک  $5CB$ ، به دلیل ایجاد قطبیدگی، باعث کاهش آستانه‌ی ولتاژ گذار فردریکز در همه‌ی واپیچش‌های مولکولی ممکن، می‌گردد. بنابراین استفاده از این نانوذرات، برای ایجاد صرفه‌جویی انرژی در ابزارهای الکترونیکی بلور مایع نماتیک، بسیار مفید خواهد بود. آستانه‌ی ولتاژ گذار فردریکز در واپیچش‌های مولکولی پخ-خمش و پیچش در هر دو شرایط مرزی همگن و هوموتروپیک نیز به صورت تحلیلی استخراج شده‌اند و مؤلفه‌های عمود و موازی گذردهی دی‌الکتریکی در نانومعلق‌های فروالکتریک بلور مایع نماتیک، در شرایط واپیچش مولکولی پخ-خمش نیز استخراج شده است.

**کلمات کلیدی:** بلور مایع نماتیک- نانوذرات فروالکتریک- گذار فردریکز- گذردهی دی‌الکتریکی.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول: مقدمه‌ای بر بلورهای مایع: انواع و خواص ساختاری آنها

۱-۱	مقدمه	۱
۲-۱	تاریخچه	۲
۳-۱	انواع بلورهای مایع	۳
۱-۳-۱	بلورهای مایع لیوتروپیک	۴
۲-۳-۱	بلورهای مایع پولیمریک	۴
۳-۳-۱	بلورهای مایع ترموتروپیک	۴
۱-۳-۳-۱	بلور مایع نماتیک	۵
۲-۳-۳-۱	بلور مایع کلستریک	۶
۳-۳-۳-۱	بلور مایع سمتیک	۷
۱-۳-۳-۳-۱	بلور مایع سمتیک-A	۷
۲-۳-۳-۳-۱	بلور مایع سمتیک-B	۸
۳-۳-۳-۳-۱	بلور مایع سمتیک-C	۹
۴-۱	پارامتر نظم نماتیک	۱۰
۱-۴-۱	رھیافت میکروسکوپی	۱۰
۲-۴-۱	رھیافت ماکروسکوپی	۱۳

### فصل دوم: بلور مایع نماتیک محبوس

۱-۲	نظریه‌ی پیوستگی کشسان	۱۶
۱-۱-۲	میدان برداری و محور جهت‌نما	۱۷
۲-۱-۲	انرژی آزاد واپیچش فرانک-اوسن	۱۸
۱-۲-۱-۲	تقریب یک ثابتی	۲۲
۲-۲	تیغهی بلور مایع	۲۳
۳-۲	اثرات مرزی	۲۴



صفحه	عنوان
۲۵.....	۴-۲ چنگ‌زنی مولکولی در بلور مایع نماتیک
۲۷.....	۱-۴-۲ وضعیت بدون چنگ‌زنی
۲۷.....	۲-۴-۲ چنگ‌زنی قوی
۳۰.....	۱-۲-۴-۲ آرایش مولکولی همگن
۳۱.....	۱-۱-۲-۴-۲ پولیمیدهای سایشی
۳۱.....	۲-۲-۴-۲ آرایش مولکولی هوموتروپیک
۳۲.....	۳-۲-۴-۲ آرایش مولکولی هیبرید
۳۲.....	۳-۴-۲ چنگ‌زنی مخروطی
۳۳.....	۴-۴-۲ چنگ‌زنی مولکولی ضعیف
۳۴.....	۵-۲ اثرات اعمال میدان الکتریکی بر بلورهای مایع نماتیک
۳۴.....	۱-۵-۲ تانسور گذردهی دی‌الکتریکی
۳۶.....	۲-۵-۲ گشتاور دی‌الکتریکی
۳۸.....	۳-۵-۲ فلکسوالکتریسیته
۳۹.....	۶-۲ تأثیر اعمال میدان مغناطیسی بر بلورهای مایع نماتیک
<b>فصل سوم: گذار فردریکز در بلورهای مایع نماتیک خالص</b>	
۴۱.....	۱-۳ مقدمه
۴۱.....	۲-۳ معادله‌ی اوپلر- لاگرانژ
۴۱.....	۱-۲-۳ مورد یک متغیره یا یک بعد
۴۴.....	۲-۲-۳ مورد دو متغیره یا دو بعد
۴۴.....	۳-۲-۳ حالت سه بعدی
۴۴.....	۳-۳ گذار فردریکز
۴۷.....	۴-۳ میدان خارجی الکتریکی
۴۷.....	۱-۴-۳ لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی همگن
۴۸.....	۱-۱-۴-۳ واپیچش مولکولی پخ-خمش
۵۳.....	۲-۱-۴-۳ واپیچش مولکولی پیچش

## عنوان

## صفحه

۵۵.....	۲-۴-۳ لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی هوموتروپیک
۵۶.....	۱-۲-۴-۳ واپیچش مولکولی پخ-خمش
۵۸.....	۳-۴-۳ حل عددی دقیق: جزئیات و نتایج
۵۹.....	۱-۳-۴-۳ لایه‌ی هم‌راستا کننده‌ی مولکولی همگن
۵۹.....	۱-۱-۳-۴-۳ واپیچش مولکولی پخ-خمش
۶۴.....	۲-۱-۳-۴-۳ واپیچش مولکولی پیچش
۶۵.....	۲-۳-۴-۳ لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی هوموتروپیک
۶۵.....	۱-۲-۳-۴-۳ واپیچش مولکولی پخ-خمش
۶۶.....	۳-۳-۴-۳ نتیجه‌گیری
۶۷.....	۵-۳ میدان مغناطیسی
۶۷.....	۱-۵-۳ واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های مرزی همگن
۶۹.....	۲-۵-۳ واپیچش مولکولی پیچش با لایه‌های مرزی همگن
۷۰.....	۳-۵-۳ واپیچش مولکولی خمش با لایه‌های مرزی هوموتروپیک
۷۱.....	۴-۵-۳ حل عددی دقیق: جزئیات و نتایج
۷۱.....	۱-۴-۵-۳ واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های مرزی همگن
۷۲.....	۲-۴-۵-۳ واپیچش مولکولی پیچش ایجاد شده با لایه‌های مرزی همگن
۷۴.....	۳-۴-۵-۳ واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های مرزی هوموتروپیک
۷۵.....	۴-۴-۵-۳ نتیجه‌گیری
۷۵.....	۶-۳ اعمال میدان بر سامانه‌های فرونماتیک

### فصل چهارم: دمای گذار در بلورهای مایع نماتیک با ناخالصی نانوذرات فروالکتریک

۸۱.....	۱-۴ مقدمه
۸۲.....	۲-۴ نظریه‌ی لاندو-دژن:
۸۴.....	۳-۴ نظریه‌ی مایر-ساوپ:
۴-۴	فرمول‌بندی نظریه‌ی مایر-ساوپ برای بلورهای مایع نماتیک با ناخالصی نانوذرات
۸۶.....	فروالکتریک

۸۹.....	۵-۴ دمای گذار
۸۹.....	۱-۵-۴ دمای گذار برای جفت شدگی های کوچک
۹۰.....	۲-۵-۴ دمای گذار برای جفت شدگی های بزرگ
۹۳.....	۶-۴ سامانه ی بلور مایع نماتیک با ناخالصی نانوذرات فروالکتریک تحت اعمال میدان الکتریکی خارجی
۹۶.....	۷-۴ نتیجه گیری

### فصل پنجم: آستانه گذار فردریکز در بلورهای مایع نماتیک حاوی نانوذرات فروالکتریک

۹۷.....	۱-۵ مقدمه
۹۸.....	۲-۵ آستانه ی میدان گذار فردریکز در سامانه های بلور مایع نماتیک حاوی نانوذرات فروالکتریک
۱۰۰.....	۱-۲-۵ واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه های هم راستا کننده ی مولکولی همگن
۱۰۲.....	۲-۲-۵ واپیچش مولکولی پیچش
۱۰۴.....	۳-۲-۵ واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه های هم راستا کننده ی مولکولی هوموتروپیک
۱۰۷.....	۳-۵ محاسبه ولتاژ گذار فردریکز
۱۰۷.....	۱-۳-۵ واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه های مرزی هوموتروپیک
۱۱۰.....	۲-۳-۵ واپیچش مولکولی پیچش
۱۱۰.....	۳-۳-۵ واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه های مرزی همگن
۱۱۱.....	۴-۵ گذردهی دی الکتریکی
۱۱۷.....	منابع و مأخذ:
۱۲۱.....	پیوست (الف): دی الکتریک کروی

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: شکل طرح‌وار نحوه‌ی آرایش مولکول‌ها در سه فاز جامد بلورین، بلور مایع و مایع همسانگرد.	۲
شکل ۲-۱: نحوه‌ی آرایش مولکول‌ها در فاز جامد و مایع و مقایسه‌ی آن با بلور مایع نماتیک.	۵
شکل ۳-۱: فاز بلور مایع نماتیک. (الف) فاز بلور مایع نماتیک با عیوب سطحی (ب) فیلم نازک بلور مایع نماتیک روی مایع همسانگرد (ج) فاز بلور مایع نماتیک رشته‌ای.	۵
شکل ۴-۱: انواع مختلف بلور مایع نماتیک.	۶
شکل ۵-۱: بلور مایع کلستریک یا نماتیک دست‌سان ( $N^*$ ).	۷
شکل ۶-۱: فاز بلور مایع کلستریک.	۷
شکل ۷-۱: مولکول‌های بلور مایع سمکتیک- $A$ ( $SmA$ ).	۸
شکل ۸-۱: فاز بلور مایع سمکتیک- $A$ .	۸
شکل ۹-۱: مزوفاز سمکتیک- $B$ .	۸
شکل ۱۰-۱: فاز بلور مایع سمکتیک- $C$ .	۹
شکل ۱۱-۱: بلور مایع سمکتیک- $C$ .	۹
شکل ۱۲-۱: بلور مایع سمکتیک- $C^*$ (فروالکترونیک).	۱۰
شکل ۱۳-۱: نمایش یک مولکول بلور مایع نماتیک تک‌محوره با بردار مولکولی $\vec{a}$ .	۱۰
شکل ۱۴-۱: نمایش بردار جهت‌نمای $\vec{n}$ در چارچوب مرجع دستگاه مختصات.	۱۲
شکل ۱-۲: واپیچش در بلور مایع نماتیک. (الف) واپیچش مولکولی خمش (ب) پیچش (ج) پیچ. ۲۱	۲۱
شکل ۲-۲: واپیچش گاؤسی در بلور مایع نماتیک که در آن‌ها اثرات سطحی در نظر گرفته می‌شود.	۲۱
شکل ۳-۲: نمونه‌ای از واپیچش گاؤسی که در آن واپیچش مولکولی پیچش، بیشینه است.	۲۲
شکل ۴-۲: ساختار تیغه‌ی بلور مایع.	۲۳
شکل ۵-۲: نمونه بلور مایع نماتیک در شرایط مرزی سخت. (الف) در غیاب میدان (ب) در حضور میدان خارجی.	۲۴
شکل ۶-۲: بلور مایع نماتیک با شرایط مرزی نرم در حضور میدان خارجی.	۲۵
شکل ۷-۲: فصل مشترک بلور مایع نماتیک ( $z > 0$ ) و لایه هم‌تراز کننده ( $z < 0$ ). بردار جهت‌نما در جهت محور آسان با زاویه‌ی قطبی و سمتی $\theta_0$ و $\phi_0$ قرار دارد.	۲۶
شکل ۸-۲: تیغه‌ی بلور مایع نماتیک با صفحات مرزی.	۲۸
شکل ۹-۲: تغییرات $\theta$ در واپیچش مولکولی پیچش، نزدیک سطوح مرزی شکل ۲-۸. تغییرات $\theta$ بر حسب $l$ در کل تیغه خطی است به جز در ناحیه‌ی نزدیک $a$ ( $a$ متوسط اندازه‌ی مولکول است). $b$ طول درون‌یابی است و همان‌گونه که از شکل مشخص است، $b$ یا $a \sim$ یا خیلی بزرگ‌تر از $a$	

- خواهد بود. ۲۹.....
- شکل ۲-۱۰: آرایش مولکولی همگن (پلنر) در بلور مایع نماتیک در غیاب میدان خارجی. ۳۰.....
- شکل ۲-۱۱: ساختار تابعی امید خطی. ۳۱.....
- شکل ۲-۱۲: آرایش مولکولی هوموتروپیک در بلور مایع نماتیک در غیاب میدان خارجی. ۳۲.....
- شکل ۲-۱۳: آرایش مولکولی هیبرید (*HAN*) در بلور مایع نماتیک. ۳۲.....
- شکل ۲-۱۴: چنگ زنی مخروطی بردار جهت نما در صفحه‌ی مرزی. بردار جهت نما در جهت آسان روی یک مخروط که با صفحه‌ی مرزی زاویه‌ی  $\psi$  دارد، قرار می‌گیرد و  $U$  بردار عمود بر سطح به سمت خارج است. ۳۳.....
- شکل ۲-۱۵: مؤلفه‌های تانسور گذردهی دی‌الکتریکی در چارچوب مولکولی محلی.  $\vec{c}$  بردار جهت نما کج شده است. ۳۵.....
- شکل ۲-۱۶: کمینه‌ی انرژی آزاد در شرایطی که  $\epsilon_a > 0$  باشد. ۳۷.....
- شکل ۲-۱۷: کمینه‌ی انرژی آزاد در شرایطی که  $\epsilon_a < 0$  باشد. ۳۷.....
- شکل ۲-۱۸: فلکسوالکتریسیته. (الف) بدون واپیچش و گشتاور دوقطبی صفر، (ب) تحت اعمال میدان خارجی واپیچش از نوع پخ رخ داده و مولکول‌ها اغلب به سمت بالا سمت‌گیری کرده‌اند. ۳۸.....
- شکل ۲-۱۹: ذرات کلئیدی در بلور مایع نماتیک تحت نیروی الکتروفورز، با واپیچش جهت نما به صورت نظم‌های دوقطبی و چهارقطبی متقارن هستند. ۳۹.....
- شکل ۳-۱: تغییرات بردار جهت نما در تیغه‌ی بلور مایع نماتیک. ۴۲.....
- شکل ۳-۲: واپیچش‌های مولکولی مختلف در تیغه‌ی بلور مایع نماتیک به ازای اعمال میدان در جهت‌های مختلف. (الف) واپیچش مولکولی پخ-خمش و (ب) پیچش در تیغه‌ی بلور مایع نماتیک با لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی همگن، (ج) واپیچش مولکولی خمش در یک تیغه با لایه‌های مرزی هوموتروپیک، (د) واپیچش مولکولی هیبرید (*HAN*) در بلورهای مایع نماتیک با لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی همگن و هوموتروپیک. در شرایط  $E < E_c$ ، جهت محور آسان در هر مورد نشان داده شده است. ۴۶.....
- شکل ۳-۳: چارچوب مختصات استفاده شده در مطالعه‌ی واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی همگن، در تیغه‌ی بلور مایع نماتیک. ۴۸.....
- شکل ۳-۴: بلور مایع نماتیک *5CB*. ۵۱.....
- شکل ۳-۵: اثر میدان الکتریکی روی جهت‌گیری بردار جهت نما در میانه‌ی تیغه‌ی با ضخامت  $10 \mu m$  (حل تقریبی). ۵۲.....
- شکل ۳-۶: تغییرات جهت‌گیری بردار جهت نما در طول تیغه‌ی بلور مایع نماتیک با ضخامت  $10 \mu m$  تحت اعمال میدان الکتریکی  $2 \times 10^6 N/C$  (حل تقریبی). ۵۳.....
- شکل ۳-۷: چارچوب مختصات استفاده شده در مطالعه‌ی واپیچش مولکولی پیچش، در بلور مایع

- نماتیک. ۵۴.....
- شکل ۳-۸: چارچوب مختصات استفاده شده در مطالعه‌ی واپیچش مولکولی پخ-خمش، با لایه-های مرزی هوموتروپیک در بلور مایع نماتیک. ۵۶.....
- شکل ۳-۹: اثر میدان الکتریکی روی  $\theta$  در میانه تیغه با ضخامت  $10 \mu m$  (حل تقریبی). ۵۸.....
- شکل ۳-۱۰: اثر ضخامت تیغه‌ی بلور مایع نماتیک  $5CB$  بر آستانه‌ی میدان الکتریکی لازم برای گذار فردریکز، در واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی همگن. ۵۹.....
- شکل ۳-۱۱: تغییرات زاویه  $\theta$  در تیغه‌ی بلور مایع نماتیک  $5CB$  با ضخامت  $10 \mu m$  در اثر میدان الکتریکی  $2 \times 10^5 N/C$ . ۶۰.....
- شکل ۳-۱۲: آستانه‌ی میدان لازم برای ایجاد گذار فردریکز در تیغه‌ی بلور مایع نماتیک  $5CB$  با ضخامت  $10 \mu m$ ، در مواردی که واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی همگن باشد، برابر  $E_c = 125.041/7158 N/C$  است. ۶۱.....
- شکل ۳-۱۳: آستانه‌ی میدان الکتریکی لازم برای گذار فردریکز در بلور مایع نماتیک  $5CB$  با واپیچش مولکولی پیچش به ازای ضخامت‌های مختلف تیغه. ۶۴.....
- شکل ۳-۱۴: تغییرات زاویه  $\theta$  در واپیچش مولکولی پیچش در تیغه‌ی بلور مایع نماتیک  $5CB$  با ضخامت  $10 \mu m$  در اثر میدان‌های الکتریکی  $2 \times 10^5 N/C$ . ۶۴.....
- شکل ۳-۱۵: آستانه‌ی میدان لازم برای گذار فردریکز در یک تیغه‌ی بلور مایع نماتیک  $5CB$  با ضخامت‌های متفاوت. در این مورد واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی هوموتروپیک، تحت اعمال میدان الکتریکی موازی تیغه، ایجاد شده است. ۶۵.....
- شکل ۳-۱۶: تغییرات زاویه  $\theta$  در تیغه‌ی بلور مایع نماتیک  $5CB$  با ضخامت  $10 \mu m$  در اثر اعمال میدان الکتریکی  $2 \times 10^5 N/C$  با واپیچش مولکولی پخ-خمش (با لایه‌های مرزی از نوع هوموتروپیک). ۶۶.....
- شکل ۳-۱۷: چارچوب مختصات مورد استفاده در مطالعه‌ی واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه-های مرزی همگن، تحت اعمال میدان مغناطیسی. ۶۸.....
- شکل ۳-۱۸: چارچوب مختصات استفاده شده در مطالعه‌ی واپیچش مولکولی پیچش در بلور مایع نماتیک تحت اعمال میدان مغناطیسی. ۶۹.....
- شکل ۳-۱۹: چارچوب مختصات استفاده شده در مطالعه‌ی واپیچش مولکولی پخ-خمش در بلور مایع نماتیک با لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی هوموتروپیک؛ در شرایطی که سامانه تحت اعمال میدان مغناطیسی قرار گیرد. ۷۰.....
- شکل ۳-۲۰: اثر ضخامت تیغه‌ی بلور مایع نماتیک  $5CB$  بر آستانه‌ی میدان مغناطیسی لازم برای گذار فردریکز در واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های مرزی همگن. ۷۱.....
- شکل ۳-۲۱: تغییرات زاویه بردار جهت‌نما در واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های مرزی

- همگن، در تیغه‌ی بلور مایع نماتیک  $5CB$  با ضخامت  $10 \mu m$  در اثر اعمال میدان‌های مغناطیسی ۲ تا  $T$  ۶..... ۷۲
- شکل ۳-۲۲: آستانه‌ی میدان مغناطیسی لازم برای گذار فردریکز در یک تیغه‌ی بلور مایع نماتیک  $5CB$  با ضخامت‌های ۲، ۴ و  $8 \mu m$  در شرایط واپیچش مولکولی پیچش..... ۷۳
- شکل ۳-۲۳: تغییرات زاویه‌ی بردار جهت‌نما در درون تیغه‌ی بلور مایع نماتیک  $5CB$  با ضخامت  $10 \mu m$  در اثر اعمال میدان مغناطیسی ۲ تا  $T$  ۶ با واپیچش مولکولی پیچش..... ۷۳
- شکل ۳-۲۴: اثر ضخامت تیغه‌ی بلور مایع نماتیک  $5CB$  بر میدان مغناطیسی لازم برای گذار فردریکز در واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های مرزی هوموتوپیک..... ۷۴
- شکل ۳-۲۵: تغییرات زاویه‌ی  $\theta$  در واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی هوموتروپیک در یک تیغه‌ی بلور مایع نماتیک  $5CB$  با ضخامت  $10 \mu m$ ..... ۷۴
- شکل ۳-۲۶: تیغه‌ی بلور مایع فرونماتیک..... ۷۶
- شکل ۳-۲۷: نمودار  $g_+$  بر حسب  $\varphi$  و  $\psi$ ..... ۷۷
- شکل ۳-۲۸: نمودار  $g_-$  بر حسب  $\varphi$  و  $\psi$ ..... ۷۸
- شکل ۳-۲۹: نمودار  $h_c^+$  بر حسب  $\sigma$ ..... ۷۸
- شکل ۳-۳۰: نمودار  $h_c^+$  بر حسب  $\kappa$ ..... ۷۹
- شکل ۳-۳۱: نمودار  $h_c^-$  بر حسب  $\sigma$ ..... ۷۹
- شکل ۳-۳۲: نمودار  $h_c^-$  بر حسب  $\kappa$ ..... ۷۹
- شکل ۳-۳۳: نمودار  $h_r$  بر حسب  $\sigma$ ..... ۸۰
- شکل ۱-۴: بلورهای مایع نماتیک احاطه‌شده توسط نانوذرات فروالکتریک. (الف) نانوذرات بدون گشتاور دوقطبی الکتریکی. (ب) نانوذرات فروالکتریک با گشتاور دوقطبی الکتریکی، میدان الکتریکی‌ای تولید می‌کنند که باعث افزایش در نظم جهت‌گیری بلورهای مایع نماتیک می‌شود..... ۸۲
- شکل ۴-۲: تغییرات سه پارامتر نظم بلور مایع نماتیک بر حسب دما..... ۸۳
- شکل ۴-۳: تغییرات انرژی آزاد بلور مایع نماتیک بر حسب پارامتر نظم..... ۸۴
- شکل ۴-۴: سامانه بلور مایع نماتیک با ناخالصی نانوذرات فروالکتریک. مولکول‌های آبی و قرمز رنگ، به ترتیب بلور مایع نماتیک و نانوذرات فروالکتریک‌اند..... ۸۵
- شکل ۴-۵: نمودار  $\Delta T$  بر حسب قطبش به ازای کسر حجمی مختلف نانوذرات فروالکتریک در شرایط جفت شدگی‌های قوی (نظریه‌ی مایر- ساوپ) در بلور مایع نماتیک  $5CB$ ..... ۹۲
- شکل ۴-۶: نمودار  $\Delta T$  بر حسب قطبش به ازای کسر حجمی مختلف نانوذرات فروالکتریک در شرایط جفت شدگی‌های ضعیف یا دمای بالا (نظریه‌ی لاندائو) در بلورهای مایع نماتیک  $5CB$ ..... ۹۲
- شکل ۴-۷: چهار ناحیه‌ی متفاوت در اثر کر..... ۹۴
- شکل ۴-۸: مدت زمان نزدیک شدن دو ذره کلئیدی به یکدیگر و رسیدن به پایداری..... ۹۶

- شکل ۵-۱: واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی همگن، در تیغه‌ی بلور مایع نماتیک به همراه ناخالصی نانوذرات فروالکتریک. .... ۱۰۰
- شکل ۵-۲: برآیند میدان‌ها در تیغه‌ی بلور مایع نماتیک حاوی نانوذرات فروالکتریک. .... ۱۰۰
- شکل ۵-۳: آستانه‌ی میدان لازم برای گذار فردریکز در نانومعلق‌های فروالکتریک در بلور مایع نماتیک  $5CB$  با واپیچش مولکولی پخ-خمش در شرایط مرزی همگن به ازای محدوده‌های میدانی مختلف. .... ۱۰۱
- شکل ۵-۴: تغییرات بردار جهت‌نما درون تیغه‌ی بلورهای مایع نماتیک  $5CB$  با ناخالصی نانوذرات کلونیدی  $Sn_2P_2S_6$  هنگامی که واپیچش به صورت پخ-خمش با شرایط مرزی همگن باشد. .... ۱۰۲
- شکل ۵-۵: ساختار تیغه‌ی بلور مایع نماتیک به همراه ناخالصی نانوذرات فروالکتریک در واپیچش مولکولی پیچش. .... ۱۰۲
- شکل ۵-۶: اثر ضخامت تیغه بر آستانه‌ی میدان الکتریکی لازم برای گذار فردریکز در بلور مایع نماتیک  $5CB$  آمیخته شده به نانوذرات فروالکتریک با واپیچش مولکولی پیچش. .... ۱۰۳
- شکل ۵-۷: تغییرات بردار جهت‌نما در تیغه‌ی بلور مایع نماتیک  $5CB$  با ناخالصی نانوذرات فروالکتریک در واپیچش مولکولی پیچش. .... ۱۰۴
- شکل ۵-۸: دستگاه مختصات استفاده شده در تیغه‌ی بلور مایع نماتیک با ناخالصی نانوذرات فروالکتریک  $Sn_2P_2S_6$  در توصیف واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های هم‌راستا کننده‌ی مولکولی هوموتروپیک. .... ۱۰۵
- شکل ۵-۹: اثر ضخامت تیغه بر آستانه‌ی میدان الکتریکی لازم برای گذار فردریکز در نانومعلق‌های فروالکتریک بلور مایع نماتیک  $5CB$  در واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های مرزی هوموتروپیک. .... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۰: تغییرات بردار جهت‌نما در تیغه بلور مایع نماتیک  $5CB$  با نانومعلق‌های فروالکتریک  $Sn_2P_2S_6$  در واپیچش مولکولی پخ-خمش با لایه‌های مرزی هوموتروپیک. .... ۱۰۶



## فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۳: داده‌های تجربی بلور مایع نماتیک 5CB.....	۵۱
جدول ۱-۴: داده‌های تجربی بلور مایع نماتیک 5CB با ناخالصی نانوذرات فروالکتریک $BaTiO_3$ .....	۹۱
جدول ۱-۵: داده‌های تجربی بلور مایع نماتیک 5CB با نانوذرات $Sn_2P_2S_6$ .....	۹۹

## فصل اول

### مقدمه‌ای بر بلورهای مایع: انواع و خواص ساختاری آن‌ها

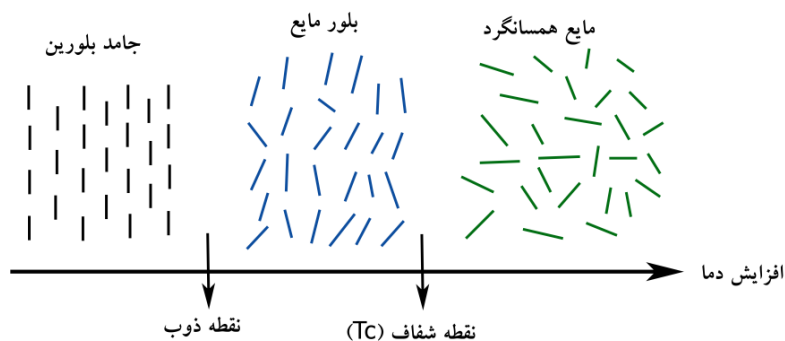
#### ۱-۱ مقدمه

امروزه شکل‌های مختلف ماده از جمله جامد، مایع و گاز برای هر کسی شناخته شده است. ولی اغلب در طبیعت، مرز بین شکل‌های مختلف ماده به خوبی تعریف شده نیست. مایعات معمولی در طبیعت همسانگردند، بنابراین خواص اپتیکی، الکتریکی و مغناطیسی آن‌ها از هر چشم‌اندازی مشابه یکدیگر است [۱]. اما مورد متمایزی از ماده به نام "بلور مایع" وجود دارد که خواصی بین حالت بلوری (جامد) و همسانگردی (مایع) دارد. این مواد، مانند شاره‌ها جاری می‌شوند و از طرفی دیگر بعضی از خواص جامدات، مانند نظم بلوری و دو شکستگی را نیز با خود به همراه دارند. بیشتر کاربردهای بلور مایع نیز به واسطه‌ی این خواص دوگانه‌ی آن‌ها حاصل می‌شود. به موادی با این رفتار دوگانه، مزوزن<sup>۱</sup> و به فازهای گوناگونی که مواد با این رفتار در آن به وجود می‌آیند، مزوفاز<sup>۲</sup> می‌گویند. در بلورهای جامد، علاوه بر نظم مکانی، نظم بلند بردی در جهت‌گیری نیز برای مولکول‌ها داریم؛ لذا مولکول‌ها در شکل بلوری، به طور منظم در یک شبکه‌ی دوره‌ای سه بعدی دسته‌بندی شده‌اند. اما در بلورهای مایع، نظم مکانی برای مولکول‌ها نداریم و یا بسیار کم است ولی نظم بلند برد جهت-گیری مولکولی وجود دارد. در مایعات ناهمسانگرد، مولکول‌ها هیچ نظم مکانی و هیچ نظم بلند برد جهت‌گیری ندارند.

---

1. Mesogen

2. Mesophase



شکل ۱-۱: شکل طرح‌وار نحوه‌ی آرایش مولکول‌ها در سه فاز جامد بلورین، بلور مایع و مایع همسانگرد.

در بلورهای مایع، سمت‌گیری متوسط مولکول‌ها با یک بردار واحد به نام "جهت‌نما"<sup>۱</sup> معرفی می‌شود و با  $\hat{n}$  نشان داده می‌شود. توزیع مولکول‌ها حول این محور جهت‌نما می‌تواند به صورت تقارن تک محوره<sup>۲</sup> یا دو محوره<sup>۳</sup> باشد. به دلیل وجود برخی خواص مایعات در این بلورها، این مواد نسبت به عوامل خارجی از جمله میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و مکانیکی و همچنین شرایط مرزی، به شدت حساس‌اند. در غیاب این نیروهای خارجی، فاز بلورهای مایع در تماس با هر سطحی که باشد آن سمت‌گیری‌ای را برمی‌گزیند که انرژی سطحی را کمینه کند، این خاصیت به چنگ‌زنی مولکولی<sup>۴</sup> معروف است. امتداد جهت‌گیری یا چنگ‌زنی مولکولی می‌تواند به صورت عمود، موازی (صفحه‌ای) یا اریب نسبت به سطح باشد [۲].

## ۲-۱ تاریخچه

به طور کلی می‌توان تاریخچه‌ی پیشرفت بلور مایع [۳] را به سه دسته زیر تقسیم کرد:

(۱) نخستین دوره از کشف بلورهای مایع در اواخر قرن نوزدهم تا سال ۱۹۲۵ میلادی شروع شد، در این دوره، دانشمندان متعددی در قرون ۱۹ و ۲۰ میلادی، بلور مایع را مشاهده کرده بودند، ولی هیچ‌کدام از این دانشمندان مطالعه و بررسی‌ای روی بلورهای مایع به عنوان یک حالت جدیدی از ماده که خصوصیات شارگی و ناهمسانگردی را باهم دارد، انجام ندادند. با این وجود، اعتبار کشف بلورهای مایع را باید به فردریک رینیتزر<sup>۵</sup> نسبت داد که مشاهدات او در مورد پدیده‌های رنگی در ذوب کردن کلسترول اسید و کلسترول بنزوات در مقاله [۴] به چاپ رسید. امروزه می‌دانیم که پدیده‌های رنگی گزارش شده توسط رینیتزر، مشخصه‌ی تعداد زیادی از فازهای بلور مایع کلستریک‌ها و نماتیک دستوار ( $N^*$ ) است.

1. Director

2. Uniaxial

3. Biaxial

4. Anchoring

5. Friederich Reinitzer

(۲) دوره‌ی دوم از سال ۱۹۲۵ تا ۱۹۶۰ میلادی شروع شد. در این دوره، میزان علاقه‌مندی و کار کردن روی بلور مایع به تدریج شروع شد، با این وجود تعداد افرادی که در این دوره، روی بلورهای مایع کار می‌کردند خیلی کم بود، ولی این افراد به شدت فعال بودند. ورلاندر<sup>۱</sup> و گروهش در رشد تعدادی از مؤلفه‌ها که برای ساخت فازهای بلور مایع مشهورند، مشارکت کردند و بر مبنای کار آن‌ها مشخص شد که ساختارهای مولکولی که شکل کشیده دارند (مانند مولکول‌های میله‌ای شکل) برای تشکیل مزوفازها مناسب می‌باشند. این کشف برای فیزیکدانان بسیار مهم بود؛ زیرا بر پایه‌ی آن، از نظر ریاضی می‌توان ساختارهای مولکولی این مواد که به صورت میله‌ای شکل است را فرمول‌بندی نمود. پس از آن در سال ۱۹۲۲ جورج فریدل<sup>۲</sup>، بلورهای مایع را به سه فاز نماتیک<sup>۳</sup>، کلستریک<sup>۴</sup>، سمکتیک<sup>۵</sup> تقسیم کرد. در این دوره، افراد دیگری نیز بودند که کارهای مهمی انجام دادند به طور مثال می‌توان به کشف نیرویی که موجب جهت‌گیری مایعات همسانگرد می‌شود توسط فردریکز و زولینا<sup>۶</sup>، تأثیر میدان مغناطیسی روی بلورهای مایع توسط زوچر<sup>۷</sup> و کشف بلورهای مایع لیوتروپیک توسط استوالد<sup>۸</sup> و لاورنس<sup>۹</sup> و ... اشاره کرد.

(۳) دوره‌ی سوم از سال ۱۹۶۰ میلادی تا به امروز است. در این دوره، این شاخه به شدت پیشرفت کرد و کاربردهای صنعتی و بیولوژیکی برای بلورهای مایع پیدا شد. از جمله رویداد مهمی که موجب پیشرفت سریع در این زمینه شد، می‌توان به انتشار مقاله‌ای توسط مایر<sup>۱۰</sup> و ساوپ<sup>۱۱</sup> روی نظریه‌ی میدان متوسط حالت نماتیک اشاره کرد، که متمرکز روی نیروهای پراکنندگی لندن به عنوان برهم‌کنش‌های جاذب در میان مولکول‌ها و پارامتر نظم است. نظریه‌ی مایر-ساوپ، چشم‌انداز نوینی برای پیشرفت‌های نظری روی بلورهای مایع بود.

فعالیت‌های بیشتر در شاخه‌ی بلورهای مایع، توسط دموس<sup>۱۲</sup> و دیگران صورت گرفت.

### ۳-۱ انواع بلورهای مایع

بلورهای مایع بر اساس شکل‌گیری ساختار آن‌ها به سه دسته کلی لیوتروپیک<sup>۱۳</sup>، پلیمریک<sup>۱۴</sup> و

- 
1. Vorlander
  2. Georges Friedel
  3. Nematic
  4. Cholesteric
  5. Smectic
  6. Zolina
  7. Zocher
  8. Ostwald
  9. Lawrence
  10. Maier
  11. Saupe
  12. Demus
  13. Lyotropic
  14. Polymeric