بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه دکتری فیزیک نظری گرایش ماده - چگال

بررسی نوسانات بلوخ و انتقال ذره در مقیاس نانو به روش‌های جبری

استاد راهنما:

دکتر فردین خیر اندیش

پژوهشگر:

حسن پهلوانی

دیماه ۱۳۸۶

شیوه نگارش پایان نامه
رعایت شده است.
تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی دکتری رشته ی فیزیک نظری گرایش ماده چگال آقای حسن پهلوانی

تحت عنوان

بررسی نوسانات بلوخ و انتقال ذره در مقیاس نانو به روش های جبری

در تاریخ ۱۳۸۶/۱۰/۲۲ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی .... به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر فردین خیر اندیش با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۲- استاد داور داخل گروه دکتر محمد علی شاهزمانیان با مرتبه‌ی علمی استاد امضا

۳- استاد داور داخل گروه دکتر سید جواد اخترشناس با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر منصور حقیقت با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا

۵-استاد داور خارج از گروه دکتر کیوان آقابابایی سامانی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

امضای مدیر گروه

تشکر و قدردانی

خدای را هزاران سپاس که توفیق تحریر، تدوین و تکمیل این پایان نامه و توان به انجام رساندن آن را به اینجانب عنایت فرمود.

قبل از هر چیز از استاد گرامی و برادر ارجمند جناب آقای دکتر فردین خیراندیش به خاطر هدایت و راهنمایی این مجموعه کنکاش، کمال تشکر و سپاس گذاری را دارم.

از اساتید بزرگوارم جنابان آقای پرفسور محمد علی شاهزمانیان و دکتر سید جواد اختر شناس به عنوان داوران داخلی که حوصله به خرج دادند و این پایان نامه را مطالعه کرده اند تشکر و قدردانی می نمایم.

از آقایان دکتر کیوان آقابابایی و دکتر منصور حقیقت به عنوان داوران خارجی، مدیران محترم گروه فیزیک در طی این دوره و همچنین از پدر و مادر بزرگوارم تشکر می کنم.

در نهایت از همسر مهربان و فداکارم و فرزند عزیزم که نتوانستم در طی این دوره آن‌گونه که شرع و عرف مقرر فرموده بود، حق و دینشان را ادا کنم قدردانی و سپاس گذاری می‌نمایم.

تقدیم به :

ستارگان آسمان هدایت، ائمه هدی علیهم السلام

پیشکش به:

همسر مهربان

و فرزند عزیزم نوید رضا

برون داده‌های پایان نامه

مقاله های چاپ شده:

1. "Deformed parafermionic algebra from single-band tight- binding dynamics" Phy. Scr **77** (2008)

2. "Driven Mesoscopic Electric Circuits" Modern Physics Letters B **22,** (2008)

چکیده

بررسی و شناخت نوسانات بلوخ که از تغییر مکان تابع موج الکترونی یک ذره کوانتومی باردار در پتانسیل تناوبی تحت اثر میدان خارجی ناشی می‌شوند، از مهم‌ترین موضوعات تحقیقاتی روز در مقیاس نانو و علم نانوالکترونیک است. به منظور تحقیق در این زمینه، دانستن قوانین حاکم بر رفتار ذرات کوانتومی باردار وچگونگی حرکت آن‌ها در نانو ساختارها مهم است.

دینامیک کوانتومی یک ذره باردار در زنجیره ای نامتناهی از چاه‌های کوانتومی یک بعدی در تقریب مدل بستگی قوی تحت تأثیر یک میدان الکتریکی یکنواخت به روش تحلیلی در فصل اول بررسی شده است، همچنین سیمای کلی از نوسانات بلوخ و نا همدوسی آن‌ها در شبکه‌های اپتیکی بر اساس شواهد تجربی و کارهای محاسباتی مرور شده است. برای مطالعه دینامیک چنین ذره کوانتومی تحت تأثیر میدان خارجی وابسته به زمان اختیاری، در فصل دوم روش جبر دینامیکی برای سامانه‌هایی که هامیلتونی آن‌ها یک ترکیب خطی از جملاتی که مولدهای جبر لی را می سازند بررسی شده است. بنابراین ساختارهای جبری هامیلتونی نقش اصلی را در حل دقیق سامانه‌های وابسته به زمان بازی می‌کنند، همچنین در ادامه فصل دوم جبر پارافرمیون ها بررسی شده است. در واقع پارافرمیون‌های یک نوع از جبر های چندجمله ای هستند، پارافرمیون های مرتبه p از یک نوع آمار معروف به پارا آمار مابین فرمیون ها و بوزون ها تبعیت می کنند، پارافرمیون‌های مرتبه $P = 1$، فرمیون‌های معمولی‌اند. بر اساس این روش جبر دینامیکی، در فصل سوم تمام ویژگی‌های دینامیک کوانتومی ذره در مدل بستگی قوی تحت تأثیر میدان وابسته به زمان خارجی مطالعه شده است.

از آن جایی که در علم نانوالکترونیک و مقیاس نانو، الکترون‌ها معمولا خواص شبه موجی از خود نشان می دهند، وقتی ابعاد سامانه در حدود طول همدوسی حامل‌هاست (حداکثر فاصله‌ای که یک ذره می‌تواند با حفظ اطلاعات مربوط به فاز خود طی کند) برای بررسی دینامیک سامانه نه تنها باید مکانیک کوانتومی به کار گرفته شود بلکه گسستگی بار الکترون نیز باید در نظر گرفته شود. بنابراین در فصل چهارم سامانه‌های مزوسکوپی معرفی شده اند و تئوری کوانتومی مدارهای الکتریکی مزوسکوپی بررسی می شود.

در مقیاس نانو با تعداد متناهی از تله‌های کوانتومی سروکار داریم. به طوری که عبور الکترون از این تله‌ها توسط تونل- زنی کوانتومی امکان پذیر است و خاصیت موجی ذره در این سامانه‌ها دارای اهمیت است. در فصل پنجم بر اساس روش‌های عملگری در مکانیک کوانتومی برای حرکت یک ذره باردار کوانتومی در یک سامانه متناهی که از تعداد مشخصی از تلهٔ کوانتومی ساخته شده است تحت تأثیر میدان خارجی وابسته به زمان با استفاده از شرایط مرزی دیریکله، توانسته‌ایم یک مدل جبری معرفی کنیم. این مدل با جبر پارافرمیون‌ها منطبق می‌شود. در حقیقت یک مدل واقعی برای پارافرمیون پیدا کرده‌ایم. برای مثال این مدل در دینامیک اتم های سرد در شبکه های اپتیکی و همچنین در مدل سازی سیم کوانتومی در مدل بستگی قوی تحت یک میدان الکتریکی وابسته به زمان خارجی دیده می شود.

در فصل ششم ارتباط بین هامیلتونی که مدل بستگی قوی را توصیف میکند و هامیلتونی یک مدار کوانتومی مزوسکوپی با بار گسسته روشن گردیده است. بر اساس این ارتباط به روش جبر دینامیکی جریان ماندگاری برای یک حلقه کوانتومی محاسبه شده است. جریان ماندگاری و طیف انرژی یک مدار الکتریکی مزوسکوپی LC تحت تأثیر یک پتانسیل وابسته به زمان، پیدا شده است.

کلمات کلیدی

مدل بستگی قوی، چاه‌های کوانتومی، نوسانات بلوخ، سامانه، شبکه‌های اپتیکی، جبر لی، جبر پارافرمیون‌ها، مقیاس نانو، مدارهای کوانتومی مزوسکوپی، طول همدوسی، گسستگی بار، نانوساختارها

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: سیمای کلی نوسانات بلوخ

فصل دوم: مروری بر جبرلی و معرفی جبر چند جمله‌ای پارافرمیونی

عنوان صفحه

عنوان صفحه

فصل پنجم جبر پارافرمیونی تغییر شکل یافته حاصل از دینامیک تک-نواری در مدل بستگی قوی

عنوان صفحه

فصل ششم مدارهای الکتریکی مزوسکوپی واداشته

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

پیش‌گفتار

با پیشرفت‌های روز افزون فنآوری نانو در عرصه‌های مختلف علمی به‌خصوص در ساخت وسایل اندازه‌گیری در مقیاس نانو و نانو الکترونی یک، دانستن قوانین حاکم بر رفتار ذرات و چگونگی حرکت آن‌ها در نانوساختارها بسیار لازم و ضروری است. بررسی دینامیک یک ذرهٔ کوانتومی باردار در یک پتانسیل دوره‌ای تحت تاثیر میدان خارجی یکی ازپدیده های جالب در فیزیک کوانتومی است [۱و۲]. به طوری‌که وقتی به یک ذرهٔ کوانتومی باردار (الکترون) موجود در سامانه میدان خارجی اعمال می‌شود، نوسانات متناوبی توسط الکترون در بلور به وجود می‌آید که به نوسانات بلوخ معروف است [۳-۵] و دارای دوره تناوب بلوخ $T_B = (2\pi\hbar/aF)$ هستند، به طوری‌که در آن F مقدار میدان ساکن و a دورهٔ تناوب است. یک پایه متعامد مناسب برای تحقیق در مورد ساختارها با پتانسیل تناوبی حالت‌های جای-گزیده است. سامانه‌هایی که در آن‌ها حالت‌های جای‌گزیده نقش اصلی را بازی می‌کنند با مدل بستگی قوی[1] توصیف می‌شوند. این حالت‌ها به حالت‌های وانیر-استارک[2]معروفند [۶-۱۳] و طبیعت آن‌ها اثر ژرفی در خواص انتقال الکترونیکی در جامدات دارد. شرط تحقق نوسانات بلوخ این است که دوره تناوب نوساناتی که ذره در شبکه کسب می-کند، از زمان واهلش (متوسط زمانی بین دو برخورد متوالی) کوچک‌تر باشد ($T_B \ll \tau$)، معمولا" این شرط در سامانه‌های حالت جامدی بر قرار نیست و نوسانات بلوخ را نمی‌توان در آن‌ها مشاهده کرد. این شرط معمولا" در شبکه-های استانداردی ارضا می‌شود که در آن‌ها پارامتر شبکه از مرتبه آنگستروم باشد. اولین آزمایش تجربی مشاهده نوسانات بلوخ در سال ۱۹۹۲ در چنین سامانه‌هایی صورت پذیرفت [۱۴و۱۵]، به طوری که با در نظر گرفتن شبکه‌های اپتیکی که در آن‌ها امواج ایستاده لیزر نقش شبکه‌های بلور و اتم‌های سرد خنثی، نقش الکترون را بازی می‌کنند، مشکلات مربوط به فرآیندهای واهلش حل گردید و توانستند نوسانات بلوخ را ببینند. بر این اساس آزمایش‌های زیادی برای آشکار کردن نوسانات بلوخ انجام شد. این آزمایش‌ها را می‌توان برای الکترون‌ها در ابر شبکه‌های ماده چگال [۱۶-۱۹]، برای اتم-های فرا سرد در شبکه‌های اپتیکی [۲۰-۲۶]، برای چگالش بوز- انیشتن [۱۵و۲۷-۳۳] ، در شبکه‌های اپتیکی دو بعدی [۳۴و۳۵] و در کارهای مختلف دیگری از جمله [۳۶-۴۵] جستجو کرد. هم‌چنین کارهای نظری زیادی نیز در زمینه نوسانات بلوخ در فلزات و نیمه رساناها در تقریب مدل بستگی قوی به انجام رسیده است [۴۶-۵۰]. که بسیاری از آن‌ها به خواص کپه‌ای ماده اختصاص دارد. معمولا" در این بررسی‌ها حد ترمودینامیکی ($N \to \infty$) یعنی مواردی که در آن

---

[1] Tight-binding model
[2] Wannier-Stark

تعداد بسیار زیادی از تله‌های کوانتومی در نظر گرفته می‌شود بررسی شده است. در اصل برای مدل بستگی قوی بیان‌های تحلیلی متعددی برای میدان‌های خارجی مستقل از زمان و وابسته به زمان وجود دارد[۵و۸و۴۲و۴۳و۵۱و۵۲]. از جمله آن‌ها می‌توان به کارهای کرش[3] و همکاران اشاره کرد [۵۱-۵۵]. آن‌ها توانستند دینامیک یک ذره کوانتومی باردار را در یک زنجیرهٔ نامتناهی از چاه‌های کوانتومی یک بعدی در تقریب مدل بستگی قوی و تحت اثر یک میدان اختیاری وابسته به زمان $F(t)$ بررسی کنند که با هامیلتونی زیر توصیف می‌شود

$$\hat{H} = G\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |n\rangle\langle n+1| + |n+1\rangle\langle n|) + F(t)\sum_{n=-\infty}^{+\infty} n|n\rangle\langle n|, \qquad (۰-۱)$$

کت $|n\rangle$ در این‌جا، بیان‌گر یک حالت وانیر جای‌گزیده در مکان n است. این حالت‌ها متعامدند. تابع حقیقی G تابع زوج شدگی انتگرال همپوشانی نزدیک‌ترین همسایه‌هاست. بر اساس روش جبر دینامیک هامیلتونی مدل بستگی قوی (۰-۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت [۵۱]

$$\hat{H}(t) = G(\hat{K} + \hat{K}^{\dagger}) + F(t)\hat{N}, \qquad (۰-۲)$$

که در آن عملگرهای بالا برنده $\hat{K}^{\dagger}$ و پائین آورنده $\hat{K}$ و عملگر موقعیت $\hat{N}$، جبر لی زیر را ارضا می‌کنند

$$\left[\hat{N}, \hat{K}\right] = -\hat{K}, \qquad \left[\hat{N}, \hat{K}^{\dagger}\right] = \hat{K}^{\dagger}, \qquad (۰-۳)$$
$$\left[\hat{K}, \hat{K}^{\dagger}\right] = 0.$$

آن‌ها با انتخاب یک میدان خارجی مناسب (مستقل از زمان- هماهنگ و........) بر اساس جبر لی در مورد دینامیک تولید شده توسط هامیلتونی بحث کردند.

گفتنی است که هامیلتونی (۰-۲) در غیاب نیروی خارجی ($F = 0$) در نمایش بلوخ به راحتی قطری می‌شود ودارای طیف پیوسته‌ای به صورت زیر است [۴۶و۴۸]

$$E = G\cos(ak). \qquad (۰-۴)$$

وقتی به سامانه میدان وارد می‌گردد جای‌گزیدگی تدریجی توابع موج را باعث می‌شود و طیف پیوسته (۰-۴) به ترازهایی با فاصله مساوی از هم معروف به ترازهای وانیر- استارک تبدیل می‌گردد

$$E_m = mFa, \qquad (۰-۵)$$

---

[3] Korsch

که در آن از طریق معادله T_B می‌توان عبارت Fa را به نوسانات بلوخ ربط داد. بنابراین نتیجه می‌گیریم که بررسی و شناخت نوسانات بلوخ از مهم‌ترین موضوعات تحقیقاتی روز در مقیاس نانو است. ساخت ترانزیستور بلوخ(نانو ترانزیستور) و ساخت وسایل بسیار دقیق (ابزار دقیق) برای اندازه‌گیری درمقیاس اتمی بعضی از کاربردهای نوسانات بلوخ در علم نانو الکترونیک است [۵۶و۵۷]

در مقیاس نانو صحبت بر سر انتقال یک الکترون یا در مورد کلی یک تک ذره باردار کوانتومی بین تعداد متناهی جزیره (منطقه پراکندگی) است. به طوری که اگر قطب‌های مثبت ومنفی یک منبع به‌وسیله گاف عایقی از یک‌دیگر جدا شده باشند و در وسط گاف الکترودی به نام جزیره قرار گیرد عبور الکترون از گاف عایقی توسط تونل زنی کوانتومی صورت می‌گیرد. بنابراین و سایل مورد مطالعه در نانو الکترونیک از رفتار موجی الکترون تبعیت می‌کنند. همان طور که ذکر شد نوسانات بلوخ در حالت ماکروسکوپی برای تعداد نامتناهی از تله‌های کوانتومی به روش مدل بستگی قوی بررسی شده‌اند [۴۸و۵۱]، ما در این پایان نامه مدلی که از تعداد متناهی تله کوانتومی در مقیاس نانو و نیز در موردی که شرایط مرزی بسته یا دیریکله[۴] در آن در نظر گرفته می شود را معرفی می کنیم و دینامیک ذره کوانتومی باردار را در آن مطالعه می کنیم . این مدل از مهم‌ترین موضوعات تحقیقات روز در مقیاس نانو به شمار می رود زیرا با آن می‌توان، دینامیک اتم‌های سرد را در شبکه‌های اپتیکی در تقریب مدل بستگی قوی توصیف کرد [۵۸-۶۰]، در مورد پدیده‌های انتقال و یا خواص ترابردی ذرات کوانتومی باردار رساناها در مقیاس نانو می‌توان بحث نمود [۶۱و۶۲]، هم‌چنین یک سیم کوانتومی در تقریب مدل بستگی قوی را که تحت تأثیر یک میدا ن خارجی اختیاری وابسته به زمان قرا می‌گیرد، می-توان طراحی کرد [۶۳-۶۵].

با توجه به اهمیت این مدل، هامیلتونی وابسته زمانی که ما در نظر خواهیم گرفت، هامیلتونی یک سامانه متناهی با شرایط مرزی بسته و یا دیریکله است که به شکل زیر تعریف می‌شود

$$\hat{H} = G\sum_{n=1}^{N-1}\left(|n\rangle\langle n+1| + |n+1\rangle\langle n|\right) + F(t)\sum_{n=1}^{N} n|n\rangle\langle n|, \qquad (۶-۰)$$

در این معادله $|n\rangle$ یک حالت جای‌گزیده وانیر روی مکان n است. مطالعه این مدل براساس یک روش جبری است که اساس آن بر پایه روش‌های عملگری در مکانیک کوانتوی استوار است [۴۸و۵۱]. بنابراین، با استفاده از نظریه گروه‌ها که ابزار های محا سباتی مفیدی در فیزیک هستند، جبرهای چند جمله‌ای را بررسی می‌کنیم و با شناخت

---

[4] Dirichlet

و مطالعه یک نوع از جبرهای چند جمله‌ای معروف به جبرهای پارافرمیونی می‌توانیم نشان دهیم که هامیلتونی (۰-۳) با شرایط مرزی دیریکله را می‌توان به عنوان یک مدل واقعی از جبرهای پارافرمیونی تغییر شکل یافته در نظر گرفت. پارافرمیون‌های مرتبه p در حالتی موازی با بوزون‌ها و فرمیون‌ها معرفی شده‌اند [۶۶-۶۸]. فرمیون‌های معمولی متناظر با پارافرمیون‌های مرتبه $p=1$ هستند و مطابق اصل پائولی، هر حالت توسط یک فرمیون اشغال می‌شود. از آن جایی که فرمیون‌ها از آمار فرمی-دیراک و بوزون‌ها از آمار بوز- انیشتن تبعیت می‌کنند، می‌توان فرض کرد که پارافرمیون‌ها از یک نوع آمار ما بین دو آمار ذکر شده معروف به پارا آمار تبعیت می‌کنند [۶۹-۷۱]. کُوئسنه[5] مفهوم جبر پارافرمیونی را گسترش داد [۷۲]، رابطه بین جبرهای پارافرمیونی و دیگر جبرها را می‌توان در مرجع [۷۳-۷۷] دید. جبر چند جمله‌ای پارافرمیونی مرتبه p به صورت زیر داده می‌شود[۶۶]

$$\begin{aligned}
&\left[\hat{M},\hat{B}\right]=-\hat{B},\\
&\left[\hat{M},\hat{B}^{\dagger}\right]=\hat{B}^{\dagger},\\
&\hat{B}^{p+1}=(\hat{B}^{\dagger})^{p+1}=0,\\
&\hat{B}^{\dagger}\hat{B}=\hat{M}(p-1-\hat{M})=\phi\left[\hat{M}\right],\\
&\hat{B}\hat{B}^{\dagger}=(\hat{M}+1)(p-\hat{M})=\phi\left[\hat{M}+1\right],\\
&\hat{M}=\frac{1}{2}(\left[\hat{B}^{\dagger},\hat{B}\right]+p).
\end{aligned} \qquad (۰-۷)$$

جبر پارافرمیونی تغییر شکل یافته به دست آمده در معادله (۵-۲۶) برای موارد ویژه ۲و۳ $= N$ دقیقا" با جبر پارافرمیونی (۰-۷) یکسان است و با یک نگاشت مناسبی تبدیل به جبر su(2) می‌شود، و برای ۴ $\geq N$یک جبر تغییر شکل یافته‌ای از جبر پارافرمیونی(۰-۷) است.

بنابراین نتیجه می‌گیریم که برای بررسی و تحقیق روش‌های تجربی در مقیاس نانومتر باید در زمینه انتقال الکترونیکی در ابعاد اتمی مطالعه کنیم. خواص انتقال در سامانه‌های مختلف به ساختار اتمی آن‌ها بستگی دارد. این مهم باعث شده است که در سال های اخیر برای محاسبه رسانش در چنین سامانه‌هایی بر اساس اصول اولیه کوشش های زیادی صورت پذیرد، به طوری که روش‌های مختلفی در این زمینه فرمول بندی شده است که پایه مشترکی در روش

---

[5] Quesne

لَندور–باتایکر[۶] دارند. درچنین محاسباتی، سامانه شامل یک سیم کوانتومی معروف به ناحیه پراکندگی است که با اندازه متناهی بین دو اتصال فلزی (منبع پتانسیل خارجی وابسته به زمان) معروف به حمام قرار می‌گیرد [۶۳–۶۵و۷۸–۸۶]

گسستگی بار درمقیاس نانو، در نانو الکترونیک و سامانه‌های مزوسکوپی مهم است. سامانه‌هایی که ابعادی در حدود nm ۱۰ دارند به سامانه‌های مزوسکوپی یا نانو ساختارها معروفند. در چنین سامانه های رفتار الکترون به صورت موجی است و این رفتار به شکل هندسی نمونه بستگی دارد. وقتی ابعاد سامانه در حدود طول فاز همدوسی حامل‌هاست، (طول همدوسی حامل ها حداکثر فاصله ای است که یک ذره می تواند با حفظ اطلاعات مربوط به فاز خودطی نماید) برای بررسی دینامیک سامانه مکانیک کوانتومی به کارگرفته می‌شود. در این حالت گسسته بودن بار (بارها مضارب درستی از بار الکترون هستند) در بررسی مدارهای کوانتومی مزوسکوپی باید به حساب آورده شود.

نخستین بار لی و چن[۷] یک نظریه کوانتومی برای مدارهای مزوسکوپی با بار گسسته ارائه نمودند [۸۷]. در این نظریه گسسته بودن بار الکتریکی توسط عملگر خودالحاق بار $\hat{q}$ در نظر گرفته می‌شود که دارای یک طیف گسسته است. یک مُدل ساده از چنین سامانه‌هایی مدارهای کوانتومی LC هستند که با دو پارامتر اساسی خودالقا L و ظرفیت C توصیف می‌شوند [۸۸–۹۰]. نظریه لی و چن در مسائل متنوعی مربوط به مدارهای مزوسکوپی به کار گرفته شده است [۸۸–۹۵]. در ادامه این پایان نامه، با در نظر گرفتن هامیلتونی مدل بستگی قوی با شرایط نامتناهی $-\infty \le n \le \infty$ و هامیلتونی مدارهای کوانتومی مزوسکوپی با بار گسسسته مطابق شکل زیر

$$\begin{aligned}\hat{H}(t) &= G(\hat{K}+\hat{K}^{\dagger})+F(t)N,\\ \hat{H}(t) &= -\frac{\hbar^2}{2Lq_e^2}(\hat{Q}+\hat{Q}^{\dagger}-2)+\varepsilon(t)\hat{q}+\frac{\hat{q}^2}{2C}.\end{aligned} \qquad (۸–۰)$$

و با توجه به این‌که عملگرهای $\{K,\hat{K}^{\dagger},\hat{N}\}$ و $\{Q,\hat{Q}^{\dagger},\hat{q}\}$ جبر یکسانی دارند، ارتباط بین دو هامیلتونی نشان داده شده است. به طور کلی می‌توان گفت نوسانات بار و جریان در مدارهای کوانتومی مزوسکوپی با بار گسسسته، معادل نوسانات بلوخ در بلورهاست. این تشابه به کوانتش بار مربوط می‌شود، که در آن بار، نقش مشابه با ثابت شبکه را در بلور بازی می‌کند. بر این اساس، عملگرهای $\hat{Q}$ ، $\hat{Q}^{\dagger}$ و $\hat{q}$ را نیز بر حسب حالت‌های جای‌گزیده

[6] Landauer-Buttiker
[7] Li and Chen

وانیر–استارک می‌توان نوشت و ویژگی‌های دینامیک کوانتومی مدارهای الکتریکی مزوسکوپی تحت میدان خارجی اختیاری بر اساس روش‌های جبر دینامیکی را بررسی کرد.

در فصل اول پایان نامه، سیمایی کلی از دینامیک نوسانات بلوخ از دیدگاه‌های نظری و محا سبات عددی و کارهای تجربی صورت پذیرفته، بررسی و مطالعه شده است.

در فصل دوم، با معرفی جبر لی، دینامیک سامانه‌های وابسته به زمان به روش جبر دینامیکی بررسی شده است. جبرهای چند جمله‌ای و رابطه آن‌ها با جبرهای پارافرمیونی و جبرهای پارافرمیونی مرتبه P و روابط ساختاری بین عملگرهای آن‌ها معرفی و به طور کامل بررسی شده است.

در فصل سوم، دینامیک نوسانات بلوخ به روش جبر دینامیکی برای سامانه‌هایی که تحت تأثیر میدان‌های خارجی وابسته به زمان هستند بررسی شده است.

در فصل چهارم، سامانه‌های مزوسکوپی معرفی و نظریه کوانتومی برای مدارهای الکتریکی مزوسکوپی مطالعه شده و نقش گسستگی بار الکتریکی در مدارها بررسی شده است و ویژگی‌های دینامیک کوانتومی مدارهای الکتریکی مزوسکوپی. را در آن‌ها مطالعه کرده ایم.

در فصل پنجم، با معرفی مدلی در مقیاس نانو که از شرایط مرزی بسته و یا دیریکله تبعیت می‌کند، بر اساس روش‌های عملگری در مکانیک کوانتومی به مدلی واقعی برای جبر پارافرمیونی تغییر شکل دست می‌یابیم، این فصل هم‌چنین نشان می‌دهد، در شرایط خاصی جبر پارافرمیونی تغییر شکل یافته به جبر $\mathrm{su}(2)$ تبدیل می‌شود و در حالت کلی یک جبر پارا فرمیونی تغییر شکل یافته است. در ادامه این فصل عملگر تحول زمانی را برای یک سامانه با شرایط مرزی دیریکله به‌د ست آمده است.

در فصل ششم، با به حساب آوردن گسسته بودن بار الکتریکی، ارتباط بین هامیلتونی که دینا میک تک–نواری مدل بستگی قوی توصیف می کند و هامیلتونی یک مدار کوانتومی مزوسکوپی با بار گسسته را روشن شده است. بر اساس دینامیک جبر لی جریان ماندگاری را برای مدارهای کوانتومی L واداشته به دست آورده و با یک روش تقریبی جریان ماندگاری و طیف انرژی را برای مدار کوانتومی مزوسکوپی LC محاسبه شده است.

در فصل هفتم بحث ونتجه گیری ارائه گردیده است