

دانشگاه زنجان

دانشکده علوم - گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد

عنوان:

# جریان پمپی بی دررو در اتصال گرافینی نرمال-نارسانا-ابررسانا با ساختار قرص کاربینو

نگارش:

الهام مومیوند

استاد راهنمای اول:

دکتر رامین محمدخانی

استاد راهنمای دوم:

دکتر بابک عبداللهی پور

دی ۱۳۹۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## تقدیم به پدر و مادر عزیزم،

که نه می توانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دست های پینه بسته شان که شمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم. پس خدا یا تو فیتم ده که هر لحظه سگر گزارشان باشم و ثانیه های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم.

## شکر و قدردانی:

به نام آن که تمام دانسته‌های، هستی در برابر علم ناتناهیش ناپسند است.

خداوند مهربان را سپاس گزارم که فرصت و نعمت تحصیل علم و دانش را بر من ارزانی فرمود.

به پاس نعمت توفیق و ادای وظیفه بر خود لازم می‌دانم که از اساتید ارجمند و کرامت‌دارم، جناب آقای دکتر امین محمدخانی و جناب آقای دکتر بابک عبداللہی پور به خاطر سه صدر و رهنمودهای دلسوزانه که در تہیہی این پروژہ مرا مورد لطف خود قرار دادند و راهنمایی‌های لازم را نمودند صمیمانه شکر و قدردانی نمایم.

از اساتید و اوربزرگوار جناب آقای دکتر مالک زارعیان و جناب آقای دکتر فرہاد خوئی‌نی که قبول زحمت مطالعه و داوری این پایان‌نامہ را تقبل فرمودند، کمال شکر را دارم.

از تمام دوستان خوب و عزیزم، خالقان محظت زیبا و رنگی زندگیم، که باعث شدند دوران تحصیل من به فصلی به یادماندنی در دفتر زندگی ام تبدیل شود سپاس گزار می‌کنم.

بچنین دست‌پدر دلسوز و مادر مهربانم، که اسطوره‌ی استقامت و صبرندوبی بیچ چشم داشتی مورد حمایت و محبت‌های بی‌درغشان، ستم را می‌بوسم. از خواهر و برادر عزیزم که وجودشان انگیزه، بخش و مایه‌ی آرامش است کمال سپاس را دارم.

برای برادر مرحوم، بہشت برین را خواستارم کہ وجودش مایه‌ی آرامش زندگانیم بود و یاد و خاطرش، ہموارہ امید بخش است.

## چکیده

گرافین یک ساختار دوبعدی از اتم‌های کربن با شبکه لانه زنبوری است. الکترون‌های گرافین بواسطه‌ی دارا بودن ساختار بانندی با رابطه پاشندگی خطی برای برانگیختگی‌های الکترونی در انرژی‌های کم، شبیه فرمیون‌های دیراک بدون جرم رفتار می‌کنند. گرافین با داشتن این ویژگی خصوصیات جالب توجهی از خود بروز می‌دهد که توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. یک لایه از گرافین که در تماس با ابررسانا است بواسطه اثر مجاورت دارای خاصیت ابررسانایی می‌شود. بازتاب آندریف در گرافین به دو شکل معمولی و ویژه صورت می‌گیرد که از ساختار خاص گرافین نتیجه می‌شود. در این پایان نامه، جریان پمپی بی‌دررو را در یک اتصال گرافینی نرمال-نارسانا-ابررسانا با ساختار قرص کاربینو بررسی می‌نماییم. جریان پمپی با اعمال دو پتانسیل الکتروستاتیک توسط الکترودهایی به نواحی ابررسانا و نارسانا، که به صورت تناوبی و غیر هم‌فاز نوسان می‌کنند، ایجاد می‌شود. ما با استفاده از حل معادله‌ی دیراک-بوگولیوبوف-دوژن در اتصال مورد نظر و استفاده از روش پراکندگی، مؤلفه‌های ماتریس پراکندگی این اتصال گرافینی را به دست می‌آوریم. سپس با استفاده از فرمالیسم فرمول برورور برای جریان پمپی که مبتنی بر نظریه پراکندگی است، جریان پمپی ایجاد شده در سامانه مورد بررسی را برحسب شدت سد پتانسیل ناحیه نارسانا محاسبه می‌نماییم. نتایج به دست آمده برای این ساختار نشان می‌دهد که جریان پمپی بی‌دررو همانند ساختارهای تخت برحسب شدت سد پتانسیل، با دوره تناوب  $\pi$  نوسان می‌کند. اما تشدید جریان پمپی در ساختار قرص کاربینو برحسب شدت سد پتانسیل، دارای اختلاف فاز  $\frac{\pi}{4}$  در مقایسه با ساختار تخت است.

**واژه‌های کلیدی:** جریان پمپی، گرافین، قرص کاربینو، بی‌دررو.

# فهرست مطالب

یکی	فهرست مطالب
پنج	فهرست شکل‌ها
ده	پیش‌گفتار
۱	۱ آشنایی با گرافین و ویژگی‌های آن
۱	۱.۱ ساختار الکترونی گرافین . . . . .
۳	۱.۱.۱ طیف الکترونی گرافین با استفاده از مدل تنگ‌بست . . . . .
۵	۲.۱.۱ فرمیون‌های بدون جرم دیراک . . . . .
۷	۲.۱ اثر کوانتومی هال در گرافین . . . . .
۹	۱.۲.۱ پارادوکس کلاین در گرافین . . . . .
۱۲	۲.۲.۱ عدم جایگزیدگی . . . . .
۱۲	۳.۱ تحرک پذیری بالای گرافین . . . . .
۱۳	۴.۱ ترابرد شبه پخشی در گرافین . . . . .
۱۵	۵.۱ کاربردهای گرافین . . . . .
۱۷	۲ بررسی ساختارهای ناهم‌گون گرافینی نرمال-ابرسانا
۱۷	۱.۲ حالت ابرسانایی در گرافین . . . . .

۱۸	پراکنندگی آندریف	۲.۲
۲۰	بازتاب آندریف در گرافین	۱.۲.۲
۲۱	بازتاب آینه‌ای آندریف	۲.۲.۲
۲۴	معادله‌ی دیراک-بوگولیوبوف-دوژن (DBdG) در گرافین	۳.۲
۲۶	اثر مجاورت ابرسانایی در اتصال ابرسانا-نرمال گرافینی	۴.۲
۲۸	حالت‌های پراکنندگی در ناحیه نرمال	۱.۴.۲
۳۰	حالت‌های پراکنندگی در ناحیه ابرسانا	۲.۴.۲
۳۴	ماتریس پراکنندگی	۳.۴.۲
۳۵	رسانایی اتصال (SN) گرافینی	۴.۴.۲
۳۶	رسانایی تونلی در اتصال گرافینی نرمال-نارسانا-ابرسانا	۵.۲
۳۹	حالت‌های پراکنندگی داخل نرمال	۱.۵.۲
۴۰	حالت‌های پراکنندگی داخل نارسانا	۲.۵.۲
۴۱	حالت‌های پراکنندگی داخل ابرسانا	۳.۵.۲
۴۲	ماتریس پراکنندگی	۴.۵.۲
۴۳	رسانایی اتصال گرافینی (NIS)	۵.۵.۲
۴۵	جریان پمپی بی‌دررو	۶.۲
۴۶	جریان پمپی کوانتومی بی‌دررو در یک اتصال فلز نرمال-ابرسانا	۱.۶.۲
۴۸	جریان پمپی کوانتومی بی‌دررو در اتصال گرافینی نرمال-نارسانا-ابرسانا (NIS)	۷.۲

### ۳ جریان پمپی بی‌دررو در اتصال گرافینی نرمال-نارسانا-ابرسانا با ساختار

۵۶	قرص کاربینو	
۵۶	دیسک کاربینو	۱.۳

۵۷	بررسی جریان پمپی بی دررو در اتصال گرافینی (NIS) با ساختار قرص کاربینو	۲.۳
۵۸	ناحیه نرمال گرافینی	۳.۳
۵۹	الکترون‌ها	۱.۳.۳
۶۲	حفره‌ها	۲.۳.۳
۶۳	ناحیه نارسانا	۴.۳
۶۳	الکترون‌ها	۱.۴.۳
۶۴	حفره‌ها	۲.۴.۳
۶۵	ناحیه ابرسانا	۵.۳
۶۶	حالت اول (بر حسب توابع هنکل نوع یک)	۱.۵.۳
۶۹	حالت دوم (بر حسب توابع هنکل نوع دوم)	۲.۵.۳
۷۴	محاسبه‌ی جریان پمپی بی دررو	۳.۵.۳

#### ۴ جریان پمپی بی دررو در اتصال نیمه‌رسانای نرمال-نارسانا-ابرسانا با ساختار

۸۰	قرص کاربینو	
۸۰	روش حل مسئله	۱.۴
۸۱	ناحیه نرمال	۲.۴
۸۲	الکترون‌ها	۱.۲.۴
۸۳	حفره‌ها	۲.۲.۴
۸۴	ناحیه نارسانا	۳.۴
۸۴	الکترون‌ها	۱.۳.۴
۸۴	حفره‌ها	۲.۳.۴
۸۵	ناحیه ابرسانا	۴.۴



۱.۴.۴	حالت اول (بر حسب توابع هنکل نوع یک)	۸۵
۲.۴.۴	حالت دوم (بر حسب توابع هنکل نوع دوم)	۸۷
۳.۴.۴	محاسبه‌ی جریان پمپی بی‌دررو	۸۹

۹۲ ۵ نتیجه‌گیری

۹۴ مراجع

# فهرست شکل‌ها

- ۱ ساختار بلوری از گونه‌های مختلف کربن. (چپ به راست) الماس و گرافیت سه‌بعدی ( $3D$ )،  
گرافین دوبعدی ( $2D$ )، نانولوله‌های یک بعدی ( $1D$ ) و توپ‌های صفربعدی ( $0D$ ). . . . . ۵
- ۱.۱ ساختار نواری در گرافین. نوار رسانش در نقاط  $K, K'$  با نوار ظرفیت تلاقی دارد. . . . . ۱
- ۲.۱ : (چپ) شبکه لانه زنبوری گرافین و زیر شبکه‌های متمایز  $A, B$ . (راست) : منطقه اول بریلوئن  
متناظر با شبکه گرافین و نقاط دیراک  $K, K'$  در آن. . . . . ۲
- ۳.۱ ساختار بانندی گرافین. نوار ظرفیت  $\pi$  کاملاً پر است که در نقاط دیراک به نوار خالی رسانش  $\pi^*$   
می‌رسد [۲۲]. . . . . ۵
- ۴.۱ مقاومت طولی و رسانندگی هال بر حسب چگالی حامل‌های بار در گرافین تک لایه [۸]. . . . . ۹
- ۵.۱ تونل‌زنی در گرافین (بالا) و نیمه‌رسانای معمولی (پایین). دامنه‌ی تابع موج الکترون (قرمز) در  
گرافین ثابت می‌ماند در حالی که در تونل‌زنی معمولی به صورت نمایی کاهش می‌یابد. اندازه‌ی کره،  
دامنه‌ی تابع موج ورودی و عبوری را نشان می‌دهد. . . . . ۱۰
- ۶.۱ احتمال عبور  $T$  از درون یک سد پتانسیل با پهنای  $100\text{nm}$  بر حسب تابعی از زاویه‌ی فرودی برای  
گرافین تک‌لایه. . . . . ۱۱
- ۷.۱ وابستگی رسانندگی و فاکتور فانو در یک نوار گرافینی، با پهنای  $5 = \frac{W}{L}$  بر حسب ولتاژ گیت  
اعمالی. مینیمم رسانندگی در نقطه‌ی دیراک متناظر ماکزیمم فاکتور فانو می‌باشد [۴۷]. . . . . ۱۵
- ۱.۲ راست: بازتاب آندریف در فصل مشترک  $NS$ . چپ: بازتاب عادی از سطح نارسانا. . . . . ۱۹

- ۲.۲ در فصل مشترک ابررسانا و فلز نرمال، الکترون با بار منفی و فرودی از سمت فلز نرمال، به صورت حفره با بار مثبت بازتاب می یابد، و بار از دست رفته به عنوان جفت الکترون وارد ابررسانا می شود. این تبدیل الکترون-حفره به عنوان بازتاب آندریف شناخته می شود [۵۴].  $(k_e = k_F + \dots)$
- ۱۹  $\frac{E}{\hbar v_F}, k_h = k_F - \frac{E}{\hbar v_F}$  . . . . .
- ۳.۲ برانگیختگی های الکترون و حفره در ساختار نواری مخروطی گرافین (حالت های پر و خالی در انرژی های  $(E_F \pm \varepsilon)$  که توسط بازتاب آندریف در مرز ابررسانا به هم تبدیل می شوند [۵۵]. . . . .
- ۲۱ بازتاب آندریف آینه ای (سمت راست) و بازتاب رجعی آندریف (سمت چپ)، در فصل مشترک فلز نرمال-ابررسانا. فلش ها نشان دهنده ی جهت سرعت هستند [۵۰]. . . . .
- ۲۲ ۵.۲ رابطه ی پاشندگی در گرافین برای دو مقدار انرژی فرمی  $E_F = \hbar v k_F$ . خطوط قرمز نشان دهنده ی برانگیختگی های الکترونی (حالت های پر بالای تراز فرمی از یک وادی) است، در حالی که خطوط آبی برانگیختگی های حفره (حالت های خالی زیر تراز فرمی از وادی دیگر) را نشان می دهند. خطوط پر مربوط به نوار رسانش و خط چین ها مربوط به نوار ظرفیت است. تبدیل الکترون-حفره پس از بازتاب در یک ابررسانا توسط فلش ها برای حالتی که فرود عمود است  $(k_y = 0, k_x \equiv k)$ ، نشان داده شده است. بازتاب آندریف آینه ای (شکل سمت راست) وقتی اتفاق می افتد که یک الکترون در نوار رسانش تبدیل به یک حفره در نوار ظرفیت می شود. در حالت معمول (شکل سمت چپ) الکترون و حفره هر دو در نوار رسانش قرار دارند. در این حالت تبدیل الکترون-حفره در فرود عمودی به فصل مشترک، با احتمال یک  $(|r_A| = 1)$  اتفاق می افتد و این به خاطر عدم تطابق طول موج بزرگ بین ناحیه های نرمال و ابررسانا است. . . . .
- ۲۲ ۶.۲ شمایی از سامانه مورد بررسی. یک لایه از گرافین که در  $x = 0$  با ابررسانا در تماس است. . . . .
- ۲۷ ۷.۲ رابطه ی پاشندگی در ناحیه ی ابررسانا با توجه به رابطه ی  $\varepsilon = (\Delta_0^2 + (\mu' \pm \hbar v_F |k|)^2)^{\frac{1}{2}}$  برای  $\varepsilon < \Delta_0$  هیچ مد منتشر شونده ای در ناحیه ی ابررسانا نداریم [۵۰]. . . . .
- ۳۱

۸.۲ رسانایی دیفرانسیلی (بهنجار شده نسبت به مقدار بالستیک  $g_0 = \frac{4Ne^2}{h}$ ) فصل مشترک گرافین

نرمال و ابررسانا، برای حالت‌های طول موج فرمی  $\lambda_F$  کوچک و بزرگ در مقایسه با طول همدوسی

۳۶ . . . . .  $\xi = \frac{\hbar v_F}{\Delta_0}$

۹.۲ (a): طرح شماتیک مربوط به اتصال (NIS) در گرافین. در این جا ( $N$ ) نشان دهنده ناحیه‌ی

نرمال گرافینی، ( $I$ ) ناحیه‌ی نارسانا و ( $S$ ) ناحیه‌ی ابررسانا می‌باشد. سد پتانسیل نارسانا را می‌توان

با استفاده از ولتاژ گیت خارجی  $V_0$  که در شکل نشان داده شده، ایجاد کرد، علاوه بر آن ولتاژ گیت

$U_0$  را نیز داریم که به ناحیه‌ی ابررسانا ( $S$ ) اعمال شده‌است. واضح است که عامل اصلی جریان در

این اتصال اختلاف ولتاژ است. (b): شماتیکی از انرژی پتانسیل الکتروستاتیک  $U(r)$  در اتصال

۳۷ . . . . . (NIS) در قسمت (a).

۱۰.۲ شماتیکی از بازتاب معمولی ( $r$ ) و بازتاب آندریف ( $r_A$ ) و فرآیندهای عبور ( $t, t'$ ) در یک اتصال

گرافینی (NIS). در این شکل، بازتاب ( $r_A$ ) به صورت بازتاب رجعی آندریف نشان داده شده‌است

ولی باید توجه کرد که چون اتصال گرافینی است، بازتاب ( $r_A$ )، هر دو نوع بازتاب آندریف آینه‌ای

و بازتاب رجعی آندریف را شامل می‌شود، بنابراین ( $r_A$ ) نشان دهنده‌ی بازتاب آندریف کلی است

که در برگرفته‌ی هر دو نوع بازتاب است. در این شکل توابع موج الکترون و حفره در ناحیه‌ی

۴۲ . . . . . نارسانا نشان داده نشده‌است [۶۹].

۱۱.۲ شکل سمت چپ: رسانایی تونلی در یک اتصال گرافینی (NIS) بر حسب ولتاژ بایاس برای مقادیر

مختلف شدت سد پتانسیل  $\chi$ ، برای  $U_0 = 0$ ،  $E_F = 0.01$ .  $\Delta_0$ . توجه می‌نماییم که نمودار

برای  $\chi = 0$  و  $\chi = \pi$  به طور هم‌زمان با دوره تناوب  $\pi$  اتفاق می‌افتد. شکل سمت راست:

رسانایی تونلی برای ولتاژ بایاس صفر ( $eV = 0$ )، بر حسب شدت سد پتانسیل  $\chi$  برای  $\Delta_0 =$

$U_0 = 0$ ،  $E_F = 0.01$ . رفتار نوسانی با دوره تناوب  $\pi$  دارای بیشترین مقدار در  $\chi = (n + \frac{1}{4})\pi$

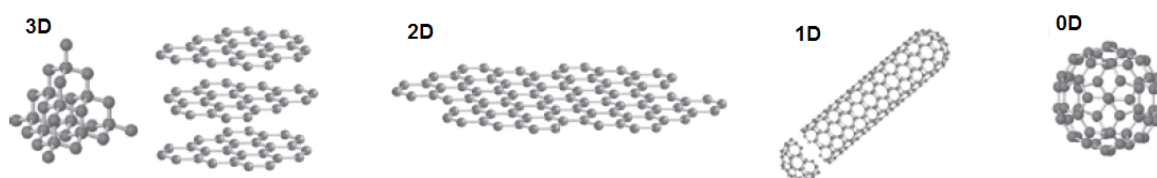
۴۴ . . . . . است.

- ۱۲.۲ (a) یک سامانه مزوسکوپی با دو پارامتر  $X_1$  و  $X_2$  که به طور نوسانی تغییر می‌کنند. (b) در یک دوره، پارامترهای  $X_1$  و  $X_2$  را در یک مسیر بسته نشان می‌دهد. . . . . ۴۷
- ۱۳.۲ (a) شمایی از اتصال گرافینی (NIS)، که در آن  $V_0$  ولتاژ متغیر گیت است که باعث ایجاد سد پتانسیل نارسانا ( $I$ ) به طول  $d$  می‌شود و ولتاژ گیت  $U_0$  به الکتروود ابرسانا اعمال می‌شود. (b) شماتیکی از سطوح انرژی در سه ناحیه می‌باشد. (c) فضای محصور شده در فضای پارامتری  $(U_0, V_0)$  در طی یک چرخه پمپاژ [۷۰]. . . . . ۴۹
- ۱۴.۲ شکل (a): جریان پمپی  $I_g^{NIS}$  (معادله (۹۰.۲))، بر حسب شدت سد پتانسیل  $\chi$  در یک گرافین (g) در اتصال (NIS). شکل (b): جریان پمپی  $I_{sc}^{NIS}$  (معادله (۱۰۸.۲))، در یک نیمه‌رسانا (SC) در اتصال (NIS) که در آن  $\frac{d}{\hbar} = \sqrt{2mE_F}$ . . . . . ۵۱
- ۱.۳ در این شکل شمایی از هندسه‌ی یک نمونه دیسک کاربید که از دو فلز با شعاع داخلی  $R_i$  و شعاع بیرونی  $R_o$  تشکیل شده‌است، نشان داده شده‌است. . . . . ۵۷
- ۲.۳ شمایی کلی از ساختار سامانه مورد بررسی که شامل یک اتصال گرافینی نرمال-نارسانا-ابرسانا با ساختار قرص کاربید است. . . . . ۵۸
- ۳.۳ جریان پمپی بی‌دررو برای یک اتصال گرافینی NIS در نقطه دیراک  $\varepsilon = 0$  بر حسب شدت سد پتانسیل ناحیه‌ی نارسانا ( $\chi$ ) برای مقادیر مختلفی از  $k_F R_1$ ، برای  $U_0 = 0$  و  $E_F = 0.01 \Delta_0$ . رفتار نوسانی جریان پمپی با دوره تناوب  $\pi$ ، دارای بیشترین مقادیر در  $\chi = n\pi$  است. . . . . ۷۶
- ۴.۳ جریان پمپی بی‌دررو برای یک اتصال گرافینی NIS در نقطه دیراک  $\varepsilon = 0$  بر حسب پتانسیل ناحیه ابرسانا ( $U_0$ ) برای مقادیر مختلفی از  $k_F R_1$ ، برای  $\chi = 0$  و  $E_F = 0.01 \Delta_0$ . با افزایش پتانسیل، جریان پمپی در این سامانه کاهش می‌یابد و با افزایش سطح اتصال سامانه ( $k_F R_1$ ) جریان در این سامانه افزایش می‌یابد. . . . . ۷۶

- ۵.۳ رسانایی برای یک اتصال گرافینی  $NIS$  در نقطه دیراک  $\varepsilon = 0$  بر حسب پتانسیل  $U_0$  برای مقادیر مختلفی از  $k_F R_1$ ،  $\chi = 0$  و  $\Delta_0 = 0.01 E_F$  با افزایش پتانسیل  $U_0$  و همچنین با افزایش سطح اتصال سامانه  $(k_F R_1)$ ، رسانایی کاهش می‌یابد. . . . . ۷۷
- ۶.۳ جریان پمپی بی‌دررو برای یک اتصال گرافینی  $NIS$  در نقطه دیراک  $\varepsilon = 0$  بر حسب سطح اتصال سامانه  $(k_F R_1)$ ، برای  $U_0 = 0$ ،  $\chi = 0$  و  $\Delta_0 = 0.01 E_F$  با افزایش سطح اتصال سامانه، جریان پمپی افزایش می‌یابد. . . . . ۷۷
- ۷.۳ جریان پمپی بی‌دررو برای یک اتصال گرافینی  $NIS$  بر حسب ولتاژ بایاس  $eV$  برای مقادیر مختلفی از  $k_F R_1$ ، برای  $\chi = 0$ ،  $U_0 = 0$  و  $\Delta_0 = 0.01 E_F$  مشاهده می‌کنیم که جریان پمپی در لبه گاف  $\Delta_0 = eV$  صفر است. . . . . ۷۸
- ۱.۴ ساختار سامانه مورد مطالعه، که اتصال نیمه‌رسانای نرمال-نارسانا-ابرسانا با ساختار قرص کاربینو است. . . . . ۸۱
- ۲.۴ جریان پمپی بی‌دررو برای یک اتصال نیمه‌رسانای ( $NIS$ ) در  $\varepsilon = 0$  بر حسب شدت سد پتانسیل ناحیه‌ی نارسانا ( $\chi$ ) برای  $k_F d = 1$ ،  $k_F R_1 = 5$  و  $U_0 = 0$ . رفتار نوسانی جریان پمپی با دوره تناوب  $\pi$ ، دارای بیشترین مقادیر در  $\chi = n\pi$  است. . . . . ۹۱

## پیش‌گفتار

کربن عنصری غیر فلزی می‌باشد که نقش یگانه‌ای در طبیعت دارد. کربن می‌تواند ساختارهای هندسی متعدد و متفاوتی تشکیل دهد. آلوتروپ‌های یک عنصر شکل‌های متفاوت یک عنصر هستند. آلوتروپ‌های سه‌بعدی کربن، الماس و گرافیت هستند که از زمان‌های قدیم شناخته شده بودند. شکل یک‌بعدی کربن نانولوله‌ها<sup>۱</sup> [۱] و شکل صفربعدی آن فولرین‌ها<sup>۲</sup> [۲، ۳] هستند، که چند دهه پیش کشف شده‌اند. آلوتروپ دوبعدی کربن که بشر به تازگی با پیشرفت تکنولوژی، موفق به ساخت آن شده، گرافین نام دارد. در شکل (۱) شمایی از آلوتروپ‌های کربن نشان داده شده است. گرافین یک لایه تک اتمی از اتم‌های کربن است



شکل ۱: ساختار بلوری از گونه‌های مختلف کربن. (چپ به راست) الماس و گرافیت سه‌بعدی ( $3D$ )، گرافین دوبعدی ( $2D$ )، نانولوله‌های یک بعدی ( $1D$ ) و توپ‌های صفربعدی ( $0D$ ).

که در یک شبکه لانه زنبوری دو بعدی آرایش یافته‌اند. این ماده نازک‌ترین و در عین حال محکم‌ترین ماده شناخته شده است و با وجود این که ساختار متراکمی دارد، به علت ضخامت بسیار اندکش که برابر با ضخامت یک اتم کربن است، نور را از خود عبور می‌دهد و از شفافیت بالایی برخوردار است. گرافین به علت داشتن خواص فوق‌العاده‌ای مانند رسانایی الکتریکی و گرمایی بسیار خوب، چگالی و تحرک‌پذیری بالای حامل‌های بار، رسانایی اپتیکی و خواص مکانیکی ویژه، به ماده‌ای منحصر به فرد تبدیل شده است. یکی از دلایل مهم برای اهمیت گرافین را می‌توان در اختصاص جایزه نوبل فیزیک در سال ۲۰۱۰ به دو دانشمندی که مطالعات خود را بر آن متمرکز کرده بودند دانست. ماده‌ای که به گفته کنستانتین نوسلوف<sup>۳</sup> یکی از دو دانشمند مذکور، به

<sup>۱</sup>Nanotubes

<sup>۲</sup>Fullerene

<sup>۳</sup>Konstantin Novoselov

مثابه یک معدن طلا است. حتی قبل از این که پیشگامان تحقیق بر روی گرافین، جایزه نوبل فیزیک را به خود اختصاص دهند، از این ماده به عنوان «حادثه بزرگ بعدی» یاد می‌شد. خیلی‌ها اعتقاد دارند که این ماده پایانی بر سیلیکون خواهد بود.

نزدیک به هفتاد سال پیش دو فیزیکدان معروف به نام‌های لاندائو و پایرلز<sup>۱</sup> استدلال کردند که شبکه دوبعدی به لحاظ ترمودینامیکی ناپایدار است و نمی‌تواند وجود داشته باشد [۴، ۵]. نظریه آن‌ها به این نکته اشاره داشت که سهم افت و خیزهای گرمایی در بلور با ابعاد کم، هم‌مرتبه و قابل مقایسه با فاصله اتم‌ها در شبکه است. این بحث سپس توسط مرمین<sup>۲</sup> [۶] توسعه داده شد و توسط مشاهدات تجربی دیگران تأیید گردید. تا اینکه برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ میلادی گرافین دوبعدی پایدار در آزمایشگاه گروه گایم<sup>۳</sup> ساخته شد [۷، ۸]. چنین لایه دوبعدی نه تنها پیوسته است بلکه یک بلور با کیفیت بالا است، به طوری که حامل‌های بار می‌توانند بدون پراکندگی مسافت حدود هزار فاصله بین اتمی را بپیمایند. به عبارتی الکترون‌ها در گرافین دارای تحرک پذیری بالایی هستند و این خصوصیت، آن را نامزد مهمی برای استفاده در نانو الکترونیک می‌سازد. چنین ساختار بلوری دوبعدی با حذف ملایم بعد سوم به دست آمده است و شدیداً پایدار است.

پس از ساخته شدن گرافین در آزمایشگاه، به خاطر رفتار شگفت‌آور و غیر معمول این سامانه دوبعدی و کاربردهای علمی بالقوه‌ی این ماده، تحقیقات گسترده‌ای روی این ماده صورت گرفته است. شاید به جرأت مهمترین دلیل جذابیت گرافین را بتوان طبیعت منحصر به فرد حامل‌های بار آن دانست. در جهان فیزیک ماده چگال، معادله شرودینگر حکومت می‌کند، که تقریباً همیشه برای توصیف خواص الکترونیکی مواد کافی بوده است. در این میان گرافین یک استثنا است. تراورد بار در گرافین مشابه حرکت ذرات نسبیتی می‌باشد، لذا حامل‌های بار آن از معادلات ذرات نسبیتی بدون جرم تبعیت می‌کنند. این که هیچ مشخصه نسبیتی برای الکترون و حرکت آن در حوالی اتم کربن وجود ندارد، اما برهم‌کنش آن‌ها در حضور شبکه لانه زنبوری گرافین، باعث ظهور شبه‌ذرات جدیدی می‌شود که در حد انرژی‌های کم از معادله دیراک با یک سرعت متوسط

<sup>۱</sup>Landau and Peierls

<sup>۲</sup>Mermin

<sup>۳</sup>Geim



حدود  $10^6 \left(\frac{m}{s}\right)$  پیروی می‌کنند [۹، ۱۰]. چنین شبه‌ذراتی را فرمیون‌های بدون جرم دیراک می‌نامیم. توصیف شبه‌نسبیتی الکترون در شبکه لانه زنبوری به‌طور نظری در سال‌های گذشته آشکار شده و هیچ‌گاه نیز از جذابیت آن کاسته نشده، اما با پیدایش تجربی گرافین، راه برای بررسی پدیده‌های الکترودینامیک کوانتومی بوسیله خواص الکترونی گرافین هموار شد. ساختار نواری گرافین در منطقه اول بریلوئن مخروطی شکل است و در دمای صفر الکترون‌ها تا انتهای نوار ظرفیت را کاملاً پر می‌کنند و نوار رسانایی خالی می‌باشد. بنابراین برانگیختگی‌های پایه گرافین حول و حوش محل تماس دو نوار اتفاق می‌افتند که این نقاط را نقاط دیراک می‌نامند. انرژی حول این نقاط به شکل خطی است و به‌خاطر رابطه پاشندگی خطی در گرافین، سرعت فرمی الکترون‌های کم انرژی، از انرژی آن مستقل است. در نتیجه گرافین نیمه‌فلزی بدون گاف انرژی است که حامل‌های بار در آن در انرژی‌های کم، شبیه فرمیون‌های بدون جرم دیراک رفتار می‌کنند. [۷، ۸، ۱۱]. این امر به مشاهده‌ی خواص الکترونی جالب توجهی مانند اثر کوانتومی هال نیمه‌صحیح، تونل‌زنی کلاین، رفتار شبه‌پخشی، وجود کمینه‌ی غیر صفر برای رسانایی با وجود صفر شدن چگالی حامل‌های بار در نقاط دیراک و عدم جایگزیدگی الکترون‌ها شده‌است. این ویژگی‌ها باعث شده که گرافین به‌عنوان اولین ماده دوبعدی توجه بسیاری را به خود جلب نماید. گرافین همچنین پلی بین فیزیک ماده چگال و الکترودینامیک کوانتومی برقرار می‌کند و به دلیل طیف برانگیختگی‌های دیراک گونه‌اش، در واقع آزمایشگاهی برای بررسی پیش‌بینی‌های کوانتوم نسبیتی و الکترودینامیک کوانتومی است. با تأیید القای ابررسانایی در گرافین، این ماده به ابزاری کاربردی برای مطالعه ابررسانایی و الکترودینامیک نسبیتی به‌طور هم‌زمان نیز تبدیل شده‌است.

ابررسانایی یکی از برجسته‌ترین پدیده‌های فیزیکی است که ماهیت کوانتومی مواد را نشان می‌دهد و پدیده‌ای است که در دماهای بسیار پایین برای برخی از مواد رخ می‌دهد. در حالت ابررسانایی مقاومت الکتریکی ماده صفر می‌شود و ماده خاصیت دیامغناطیس کامل پیدا می‌کند، یعنی میدان مغناطیسی را از درون خود طرد می‌کند. طرد میدان مغناطیسی تنها تفاوت اصلی ابررسانا با رسانای کامل است، زیرا در رسانای کامل انتظار می‌رود میدان مغناطیسی ثابت بماند، در حالی که در ابررسانا میدان مغناطیسی همواره صفر است.

گرافین یک نیمه‌رسانا با گاف انرژی صفر است و ذاتاً ابررسانا نیست اما می‌توان این خاصیت را با استفاده از اثر مجاورت<sup>۱</sup> در آن القا نمود. این اثر را می‌توان برحسب نفوذ جفت‌های کوپر از فلز نرمال به داخل ابررسانا و در چارچوب فرآیند بازتاب آندریف توجیه کرد. یکی از مهمترین ویژگی‌های اتصالات ابررسانایی بروز بازتاب آندریف در آن‌ها است. زمانی که یک الکترون از سمت نرمال به فصل مشترک نرمال-ابررسانا نزدیک می‌شود به صورت یک حفره در همان امتداد الکترون فرودی بازتابیده می‌شود، که آن را بازتاب آندریف می‌نامند. بازتاب آندریف در گرافین به دو صورت بازتاب رجعی و آینه‌ای صورت می‌گیرد که از ساختار خاص گرافین نتیجه می‌شود. انعکاس آندریف در ابررسانا از نوع رجعی<sup>۲</sup> است. انعکاس رجعی به این معنی است که حفره‌ی منعکس شده در همان مسیر الکترون فرودی برمی‌گردد. بنابراین همه‌ی مؤلفه‌های سرعت، تغییر علامت می‌دهند. در حالی که در گرافین خالص بازتاب آندریف از نوع آینه‌ای<sup>۳</sup> است به طوری که مؤلفه‌ی عمودی سرعت تغییر علامت می‌دهد.

وقتی که یک نارسانا بین دو ابررسانا قرار گیرد، در غیاب ولتاژ خارجی یک ابرجریان جوزفسون<sup>۴</sup> به خاطر اختلاف فاز دو ابررسانا در اتصال برقرار می‌شود [۱۲]. تحقیقات نشان داده‌اند که جریان جوزفسون در اتصالات ضعیف (مثل فلز نرمال گرافین به جای نارسانا) نیز بوجود می‌آید که این فرآیند توسط بازتاب آندریف قابل توجیه است [۱۳]. بنابراین انتظار داریم در نبود ولتاژ خارجی وقتی تنها یک لایه ابررسانا در اتصال است، جریانی در سامانه برقرار نشود. اما می‌توان یک جریان در این نوع سامانه‌ها در غیاب اختلاف پتانسیل بایاس بوجود آورد که به جریان پمپی معروف است. برای ایجاد جریان پمپی در یک سامانه لازم است حداقل دوتا از پارامترهای سامانه به صورت نوسانی و غیرهم‌فاز تغییر کنند. این پارامترها می‌توانند پتانسیل‌های اعمالی به سامانه یا پارامترهایی که هندسه‌ی سامانه را مشخص می‌کنند، باشند. جریان پمپی در سامانه‌های مختلف به دلیل کاربردهای فراوان در عرصه‌ی فناوری نانو الکترونیک بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است. گرافین با دارا

<sup>۱</sup>Proximity effect

<sup>۲</sup>Andreev retro-reflection

<sup>۳</sup>Specular Andreev reflection

<sup>۴</sup>Josephson critical current

بودن خصوصیات منحصر به فرد می‌تواند سامانه مناسبی برای این منظور باشد [۱۴، ۱۵]. جریان پمپی در یک ساختار تخت<sup>۱</sup> گرافینی توسط بروور<sup>۲</sup> مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۶]. ما در این پژوهش به محاسبه‌ی جریان پمپی بی‌دررو در اتصال گرافینی (NIS) با ساختار قرص کاربینو می‌پردازیم. در این مطالعه، هندسه ساختار و تقارن قرص کاربینو مورد توجه است و اهمیت این ساختار در این است که برخلاف ساختار تخت، لبه ندارد. برای محاسبه‌ی جریان پمپی بی‌دررو در این سامانه بایستی ماتریس پراکندگی سامانه را محاسبه نماییم. برای این کار لازم است ابتدا توابع موج شبه ذرات مربوط به هر سه ناحیه را محاسبه نموده، سپس با استفاده از روش پراکندگی، مؤلفه‌های ماتریس پراکندگی را به دست آوریم. با در دست داشتن مؤلفه‌های ماتریس پراکندگی به محاسبه جریان پمپی با استفاده از فرمول بروور می‌پردازیم. نتایج به دست آمده از این محاسبات نشان می‌دهند که جریان پمپی بی‌دررو در سامانه مورد مطالعه در نقطه دیراک، رفتاری نوسانی بر حسب شدت سد پتانسیل ناحیه نارسانا با دوره تناوب  $\pi$  دارد. جریان پمپی به ازای مقادیر  $\chi = n\pi$  از شدت سد پتانسیل، که در آن  $n$  یک عدد صحیح است، به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این نتیجه در مقایسه با اتصال گرافینی NIS با ساختار تخت نشان می‌دهد که تشدید جریان پمپی بر حسب شدت سد پتانسیل دارای اختلاف فاز  $\frac{\pi}{4}$  است.

در فصل اول به معرفی گرافین و مروری بر ویژگی‌های آن می‌پردازیم. همان‌طور که اشاره شد، قسمت عمده‌ی منحصر به فرد بودن گرافین از طیف شبه‌نسبیتی آن ناشی می‌شود که با استفاده از روش مدل تنگ‌بست، هامیلتونی دیراک حاکم بر فرمیون‌های بدون جرم دیراک و طیف انرژی آن را به دست می‌آوریم. در ادامه فصل به معرفی برخی از خواص یکتای گرافین می‌پردازیم.

در فصل دوم ابتدا یک اتصال ابررسانا-نرمال گرافینی در نظر می‌گیریم، برای بررسی این سامانه از معادله‌ی دیراک-بوغولیوبوف-دوژن<sup>۳</sup> (DBdG) استفاده می‌نماییم. با محاسبه توابع موج و با استفاده از شرط پیوستگی توابع موج در سطح مشترک ابررسانا-نرمال، ماتریس پراکندگی را به دست می‌آوریم. سپس با

<sup>۱</sup>plane structure

<sup>۲</sup>Brouwer

<sup>۳</sup>Dirac - Bogoliubov - De Gennes

استفاده از فرمول بلاندر-تینخام-کلاپویچ<sup>۱</sup> [۱۷] در روشی موسوم به *BTK* رسانایی دیفرانسیلی را محاسبه می‌کنیم. در ادامه رسانایی اتصال *NIS* گرافینی با ساختار تخت و جریان پمپی بی‌دررو در این ساختار را با استفاده از معادلات دیراک-بوگولیوبوف-دوژن (*DBdG*) مورد بررسی قرار می‌دهیم. نتایج حاصل نشان می‌دهند که رسانایی و جریان پمپی در این اتصال بر حسب شدت سد پتانسیل در ناحیه نارسانا رفتار نوسانی دارند. سپس خصوصیات اتصال گرافینی *NIS* و اتصال غیرگرافینی *NIS* با ساختار تخت را مورد بررسی قرار می‌دهیم. به‌طوریکه نتایج حاصل از آن‌ها نشان می‌دهند که جریان پمپی در این اتصالات بر حسب شدت سد پتانسیل ناحیه‌ی نارسانا رفتار نوسانی با دوره تناوب  $\pi$  دارند. جریان پمپی ایجاد شده در اتصال گرافینی *NIS* در نقاط  $\chi = (n + \frac{1}{4})\pi$  و در مقابل جریان پمپی ایجاد شده در اتصال نیمه‌رسانای *NIS* در نقاط  $\chi = n\pi$  دارای بیش‌ترین مقادیر هستند که در آن‌ها  $n$  یک عدد صحیح است. به‌طوریکه تشدید جریان پمپی بر حسب شدت سد پتانسیل در این دو سامانه، دارای اختلاف فاز  $\frac{\pi}{4}$  هستند.

در فصل سوم با در نظر گرفتن یک اتصال گرافینی (*NIS*) با ساختار قرص کاربینو<sup>۲</sup>، جریان پمپی بی‌دررو را در این سامانه محاسبه می‌نماییم. پارامترهای لازم برای ایجاد جریان پمپی به‌صورت دو پتانسیل الکترواستاتیک در نظر گرفته می‌شوند که توسط الکترودهایی به نواحی ابررسانا و نارسانا اعمال می‌شوند. هدف اصلی ما در این پروژه، بررسی تأثیر ساختار قرص کاربینو را بر جریان پمپی است.

در فصل چهارم جریان پمپی بی‌دررو را در یک اتصال غیرگرافینی (*NIS*) با ساختار قرص کاربینو که در آن  $N$  یک نیمه‌رسانا است، محاسبه می‌نماییم. به‌طوریکه در آن ناحیه نرمال را می‌توان یک گاز الکترونی دوبعدی در نظر گرفت. در واقع ما خصوصیات پمپی یک گاز الکترونی دوبعدی را با فرمیون‌های دوبعدی مقایسه می‌نماییم. نتایج حاصل نشان می‌دهند که جریان پمپی بی‌دررو در این ساختار همانند ساختار تخت، به ازای مقادیر  $\chi = n\pi$  از شدت سد پتانسیل، که در آن  $n$  یک عدد صحیح است، به بیشترین مقدار خود می‌رسد. ولی در مقایسه با اتصال گرافینی *NIS* با ساختار قرص کاربینو تشدید جریان پمپی بر حسب شدت

<sup>۱</sup>Blonder-Tinkham-Klapwijk formula

<sup>۲</sup>Corbino disk