

## ساختار الکترونی و خواص رسانش الکتریکی ساختار دو بعدی آرسنین

فرهاد فردوسی و اسماعیل عبدالحسینی سارسی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

پست الکترونیکی: abdolhosseini@cc.iut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۰۶/۱۱)

### چکیده

آرسنین یکی از اعضای گروه بزرگی از ساختارهای دو بعدی است که در پروژه حاضر ساختار تک لایه و نانونوارهای آن را بر پایه نظریه تابعی چگالی مورد بررسی قرار داده ایم. در این بررسی پس از محاسبه ساختار نواری تک لایه، اثر عرض را بر ساختار نواری نانونوارها از زاویه پدیده محدود شدگی کوانتومی مورد بحث قرار داده ایم. نتایج اثر متفاوت پدیده محدود شدگی کوانتومی بر نقاط مختلف هر نوار در ساختار نواری را نشان می دهد که عامل گذار گاف غیر مستقیم به مستقیم در اثر کاهش عرض نانونوارهای آرمچیر است. همچنین خواص رسانندگی الکتریکی تک لایه آرسنین از طریق محاسبه تحرک پذیری حامل های بار به دست آمده و اثر کرنش تک محوری ساختار بلوری بر آنها بررسی شده است. برای بررسی تحرک پذیری، از نقص های ساختار بلوری صرف نظر شده و تنها پراکندگی فونونی بر مبنای رابطه تاکاگی مد نظر قرار گرفته است. در این روند تمرکز بر دقت کمی مقادیر به دست آمده برای تحرک پذیری حامل های بار نبوده و ناهمسانگردی موجود بین تحرک پذیری در دو راستای آرمچیر و زیگراگ محوریت بحث را به خود اختصاص داده است. نتایج محاسبات حاکی از ناهمسانگردی قابل توجه تحرک پذیری در دو راستای آرمچیر و زیگراگ و تاثیر بسزای کرنش تک محوری ساختار بلوری بر آن است. همچنین تفاوت چشمگیری بین تحرک پذیری الکترون ها و حفره ها در راستای آرمچیر از جمله نتایج کلیدی قابل اشاره است.

واژه های کلیدی: تک لایه، نانونوار، ساختار نواری، آرسنین، تحرک پذیری، ناهمسانگردی

### ۱. مقدمه

گرافین، که ساختار اتمی تک لایه مسطح و لانه زنبوری دارد، یکی از جذاب ترین مواد عصر حاضر است [۱ و ۲]. این ماده از تحرک پذیری حامل های بار زیاد، هدایت گرمایی و همچنین مقاومت مکانیکی بالایی برخوردار است اما با این حال به طور ذاتی فاقد گاف انرژی است، که استفاده آن در ابزارهای الکترونیکی را با محدودیت ها و دشواری هایی مواجه می کند. این

موضوع باعث آغاز تحقیقات گسترده ای برای یافتن ساختارهای تک لایه اتمی شد که گاف انرژی ذاتی دارند. در این مسیر ساختارهای تک لایه لانه زنبوری خانواده کربن مانند سیلیسین، ژرمانین و استانین توجه زیادی را به خود جلب کردند [۳]. ساختار اتمی این مواد به دلیل ترکیب شدن<sup>۱</sup> اربیتال های  $sp^2$  و  $sp^3$  و به صورت خمیده<sup>۲</sup> است و در نتیجه گاف انرژی آنها با

۱. Hybridization

۲. buckled

اعمال میدان الکتریکی عمودی قابل کنترل است [۴ و ۵]. هرچند که این ساختارها به کمک زیرلایه به طور موفقیت آمیز ساخته شده است [۶ و ۷]، ساخت این ساختارها به صورت آزاد چندان سهل الوصول نیست. از دیگر ساختارهای مورد توجه که خواص منحصر به فردی دارد فسفرین است که با توجه به خواص ویژه آن گزینه مناسبی برای استفاده در ترانزیستورهای اثر میدان است [۸]. آرسنین از لحاظ ساختار اتمی و خواص شباهت زیادی به فسفرین داشته و این یکی از دلایل مورد توجه قرار گرفتن آن است. همچنین تحقیقات صورت گرفته بر روی ساختار چروکیده<sup>۱</sup> این ماده نشان دهنده ناهمسانگردی در خواص رسانش گرمایی آن بوده است [۹]. همین موضوع یکی از انگیزه‌های پژوهش حاضر است. در این بررسی علاوه بر بررسی ساختار نواری تک لایه و نانونوارهای آرسنین، برخی خواص این ماده در دو جهت اصلی را محاسبه کرده و ناهمسانگردی‌های موجود را مورد بررسی قرار داده‌ایم. در ابتدا خواص مکانیکی مانند ضریب الاستیک دو بعدی و پتانسیل تغییر شکل را در دو راستا محاسبه کرده و در نهایت به کمک مقادیر به دست آمده برای جرم مؤثر الکترون و حفره، تحرک پذیری حامل‌های بار در دو راستا محاسبه شده است. در ادامه اثر کرنش ساختار در دو راستای اصلی را بر خواص ذکر شده مورد بررسی قرار داده‌ایم.

## ۲. نتایج

در این پروژه برای محاسبات ابتدا به ساکن از بسته محاسباتی کوانتوم اسپرسوا<sup>۲</sup> استفاده کرده‌ایم. این بسته محاسبات را بر اساس نظریه تابعی چگالی انجام داده اما بر خلاف بسته‌های محاسباتی تمام‌الکترونی، تنها به محاسبه ترازهای لایه ظرفیت می‌پردازد و پتانسیل نواحی نزدیک به هسته‌های (ناحیه هسته) اتمی را با پتانسیل‌هایی که از پیش برای هر اتم محاسبه شده‌اند جایگزین می‌کند. این پتانسیل‌ها، شبه پتانسیل<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند و بر اساس روشی که برای تقریب پتانسیل ناحیه هسته استفاده

کرده‌اند، انواع مختلفی دارند. یکی از انواع این شبه پتانسیل‌ها که در این پروژه از آن استفاده شده، شبه پتانسیل PAW است. همچنین در این تحقیق از تابعی PBE که بر اساس نوعی از تقریب شیب تعمیم یافته (GGA) (برای محاسبه برهم‌کنش‌های تبادل-همبستگی) طراحی شده است، استفاده کرده‌ایم. در ابتدای محاسبات، مقادیر پارامترهای انرژی جنبشی قطع برای توابع موج (ecut wfc)، انرژی جنبشی قطع برای چگالی بار و پتانسیل (ecut rho) و تراکم نمونه برداری از ناحیه اول بریلوئن (k-grid mesh) را بهینه کرده‌ایم. از آنجایی که انرژی چسبندگی<sup>۴</sup> معمول‌ترین و اولین متغیری است که از لحاظ دقت همگرایی بررسی شده و (حداقل در شروع محاسبات) معیار انتخاب پارامترهای محاسباتی قرار می‌گیرد، ما نیز به منظور همگرایی انرژی چسبندگی با دقتی از مرتبه  $10^{-3}$  eV مقادیر بهینه پارامترهای ذکر شده را به ترتیب  $40 Ry$ ،  $40 Ry$  و  $10 \times 10 \times 1$  انتخاب کردیم (معمولاً مقدار انرژی جنبشی قطع برای چگالی بار و پتانسیل را بین ۸ تا ۱۰ برابر انرژی جنبشی قطع برای توابع موج در نظر می‌گیرند). با این حال در روند محاسبات دقت همگرایی برخی متغیرهای مورد نظر را در موارد لزوم به صورت جداگانه بررسی کرده‌ایم.

## ۱.۲. ساختار اتمی

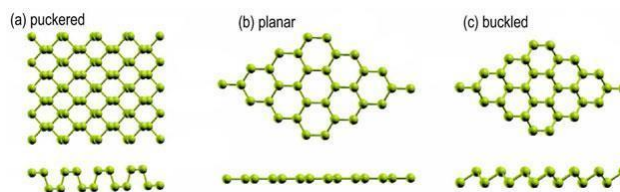
آرسنیک که موضوع بررسی این پژوهش است دو ساختار اتمی کپه‌ای تشکیل شده از صفحات اتمی دارد. در دو ساختار اتمی این ماده که ساختار پاکرد و باکلد نامیده می‌شوند، بر خلاف معروف‌ترین ساختار دو بعدی یعنی گرافین، کاملاً در یک صفحه قرار نگرفته‌اند. این سه نوع ساختار در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. در پروژه حاضر قصد بررسی خواص ساختار پاکرد آرسنین را داریم که تاکنون در مقایسه با ساختار باکلد کمتر به آن پرداخته شده است (در ادامه جز در مواردی که خلاف آن ذکر شود، منظور ساختار پاکرد است). از آنجایی که بسته محاسباتی کوانتوم اسپرسوا محاسبات را صرفاً برای ساختارهای تکرار شونده و تناوبی انجام می‌دهد، برای شبیه سازی شرایط

۱. puckered

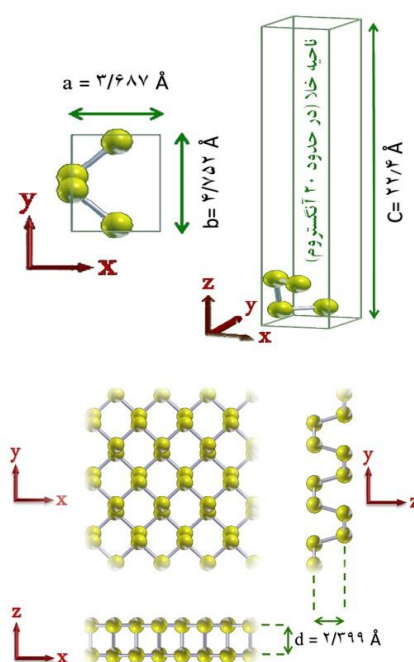
۲. Pseudopotential

۳. Quantum espresso

۴. Cohesive energy



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) سه نوع ساختار بلوری باکلد، مسطح و پاکرد.



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) ابریاخته ساختار تک لایه پاکرد آرسنین و (ب) تصاویر بخشی از ساختار تک لایه پاکرد آرسنین از سه نما.

تصویر مقطع افقی این ابریاخته (که شامل ۴ اتم آرسنیک است) در شکل ۲. الف نشان داده شده است.

همانطور که در شکل مشخص شده است مقادیر طول و عرض ابریاخته پس از واهلش ساختار ۳/۶۷۸ و ۴/۷۵۲ آنگستروم به دست آمده است. با تکرار این ابریاخته در جهت‌های درون صفحه‌ای (جهت‌های  $x$  و  $y$ ) بلور تک‌لایه آرسنین ساخته می‌شود. تصاویر بخشی از این ساختار تک‌لایه از سه نمای  $x$ ،  $y$  و  $z$  در شکل ۲. ب قابل مشاهده است.

به همین ترتیب در مورد نانوارهای<sup>۱</sup> آرسنین، ابریاخته را به گونه‌ای در نظر گرفتیم که علاوه بر ناحیه تهی در راستای  $z$ ، دو ناحیه تهی در دو طرف نانوار داشته باشد تا با ایجاد فاصله

انزوای تک‌لایه از لایه‌های مجاور، ابریاخته‌ای شامل ناحیه‌ای تهی در نظر می‌گیریم به گونه‌ای که به علت فاصله به وجود آمده بین لایه‌های تکرار شونده مجاور، بتوان از برهم‌کنش بین آنها صرف‌نظر کرد. معمولاً در فواصل بیش از ۱۰ آنگستروم می‌توان برهم‌کنش‌های بین اتمی را ناچیز و قابل صرف‌نظر در نظر گرفت ولی ما در محاسبات از طرفی به جهت حصول اطمینان از کیفیت انزوای لایه‌ها و از طرف دیگر به دلیل این که در روند پروژه به نقطه‌ای در میانه خلأ، که پتانسیل آن به عنوان مرجع ثابت پتانسیل قابل اتکا باشد، نیاز داریم طول ناحیه خلأ را در حدود ۲۰ آنگستروم در نظر گرفته‌ایم (با توجه به ضخامت تقریبی ۲ آنگسترومی تک لایه، اندازه ارتفاع ابریاخته را ۲۲/۴ آنگستروم انتخاب کرده‌ایم). تصویر سه بعدی به همراه

۱. Nanoribbon

به ترتیب برای نام‌گذاری نانونوارهای آرمچیر و زیگزاک آرسنین استفاده می‌کنیم. در این نامگذاری  $n$  تعداد ابریاخته تک‌لایه در عرض نانونوار و  $x$  نوع اتم خشی کننده است.

## ۲.۲. ساختار الکترونی

ساختار نواری در واقع ترازهای انرژی بلوری برای نقاط مختلف منطقه اول بریلوئن در فضای وارون است. اما مسیرهای خاصی در فضای وارون وجود دارد که از نقاط پرتقارن منطقه اول بریلوئن عبور می‌کنند و معمولاً بخش مهمی از اطلاعات ساختار نواری را در بر دارند. از این رو اغلب ساختار نواری را در طول این مسیرها محاسبه و رسم می‌کنند. مسیر پرتقارن ابریاخته پاکرد آرسنین، همان‌طور که در مقالات برای رسم ساختار نواری این ماده و مواد مشابه استفاده شده است، از نقاط  $\Gamma$ ،  $Y$ ،  $S$ ،  $X$ ،  $\Gamma$  و  $S$  می‌گذرد (شکل ۳. الف). بنابراین ساختار نواری تک لایه آرسنین را در طول این مسیر محاسبه کردیم که در شکل ۳. ب قابل رویت است.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود ساختار نواری آرسنین گاف نواری غیرمستقیم به اندازه  $0.792 \text{ eV}$  دارد. پایین‌ترین نقطه نوار رسانش در نقطه  $\Gamma$  فضای وارون و بالاترین نقطه نوار ظرفیت در نقطه‌ای از مسیر فضای وارون اتفاق می‌افتد که آن را نقطه  $R$  نامیده‌ایم. با توجه به این که ساختار نواری تنها در راستاهایی از بلور که تکرار شونده هستند قابل رسم است، در هر نانونوار تنها یک مسیر در فضای وارون برای رسم ساختار نواری وجود دارد. بنابراین ساختار نواری را برای نانونوارهای آرمچیر و زیگزاک به ترتیب در جهت‌های  $y$  و  $x$  (جهت‌های طول هر نانونوار) محاسبه و رسم کرده‌ایم. شکل ۴ و شکل ۵، به ترتیب ساختار نواری نانونوارهای آرسنین آرمچیر و زیگزاک خشی شده با هیدروژن را برای عرض‌های مختلف (بر حسب تعداد ابریاخته تک‌لایه در عرض نانونوار) نشان می‌دهد. در این تصاویر گاف نواری ساختارهای نواری با پیکان مشخص شده‌اند (رنگ آبی و قرمز پیکان‌ها به ترتیب به معنی مستقیم و غیرمستقیم بودن گاف نواری است). اندازه و نوع (از لحاظ مستقیم یا غیر مستقیم بودن) گاف نواری این

عرضی کافی بین نانونوارهای مجاور، شرایط یک نانونوار منزوی به خوبی شبیه سازی شود. نانونوارها را می‌توان بخش بریده شده‌ای از یک ساختار تک لایه دانست. با توجه به جهت برش ساختار تک‌لایه، دو نوع نانونوار به وجود می‌آید که بر اساس شکل لبه، نانونوارهای آرمچیر و زیگزاک نامیده می‌شوند. باید به این نکته توجه داشت که اتم‌هایی که در لبه نوار قرار دارند برخلاف دیگر اتم‌ها، که به سه اتم آرسنیک متصل هستند، تنها با دو اتم آرسنیک پیوند دارند و این مسئله باعث می‌شود که این اتم‌ها یک پیوند آزاد داشته باشند که به پیوند آویزان<sup>۱</sup> معروف است. وجود پیوندهای آویزان در لبه نانونوارها باعث ناپایداری و واکنش‌پذیری بالای لبه‌ها می‌شود. برای غلبه بر این مشکل و افزایش پایداری نانونوارها، معمولاً به وسیله تکنیک‌های آزمایشگاهی متفاوتی، اتم‌هایی از دیگر عناصر را به لبه نانونوارها متصل می‌کنند. این عمل را خشی سازی لبه‌ها<sup>۲</sup> و اتم‌های متصل شونده به لبه‌ها را اتم‌های خشی کننده<sup>۳</sup> می‌نامند. لازم به ذکر است که در حالت کلی اتم‌های خشی کننده می‌توانند در مکان‌های متفاوتی نسبت به لبه نانونوارهای قرار بگیرند که منجر به تغییراتی در میزان پایداری و خواص نانونوار حاصله شود. اما با توجه به این که از طرفی هدف پروژه حاضر تمرکز بر جزییاتی از این دست در خشی سازی نانونوارها نیست و از طرف دیگر تغییرات ناشی از محل قرار گیری اتم‌های خشی کننده معمولاً چندان قابل توجه و اساسی نیست، معمول‌ترین و محتمل‌ترین مکان را برای قرارگیری اتم‌های خشی کننده انتخاب کرده‌ایم. محتمل‌ترین محل قرارگیری اتم خشی کننده در محل همان اتمی است که در ساختار تک لایه به اتم لبه متصل بوده است و جای آن در لبه نانونوار خالی است.

نانونوارها می‌توانند عرض‌های متفاوتی داشته باشند و آنها را بر اساس تعداد ابریاخته تک‌لایه که در عرض خود دارند نامگذاری کرده‌ایم. در ادامه از اسامی  $n - AsxPANR$  و  $n - AsxPZNR$

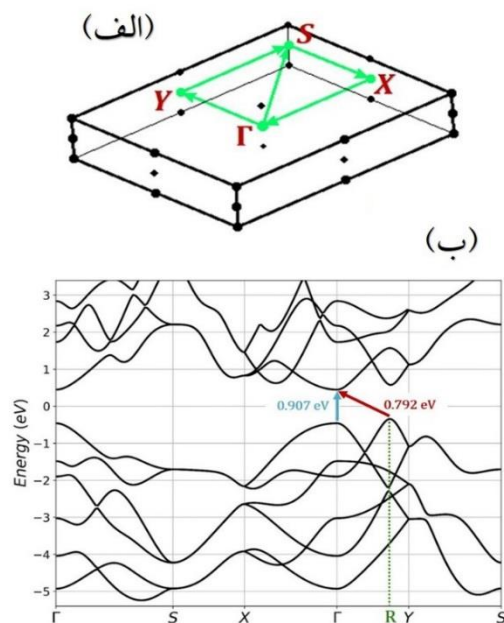
۱. Dangling bond

۲. Edge passivation

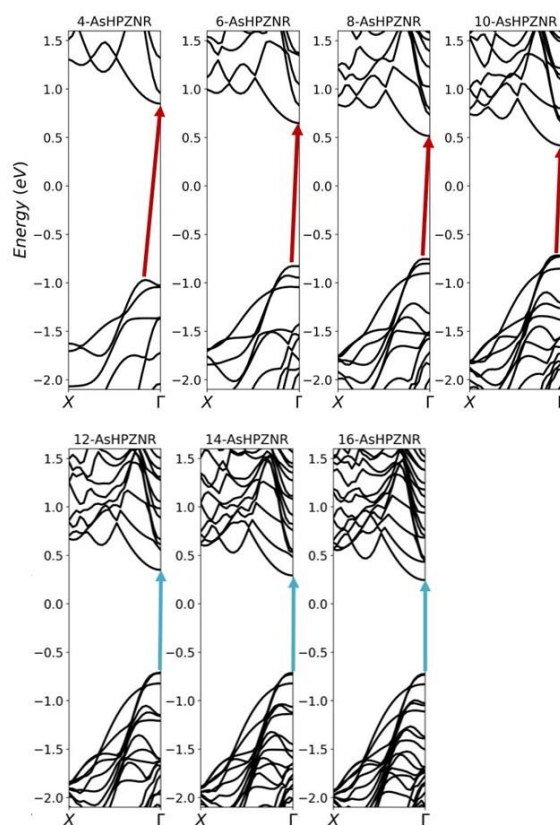
۳. Passivating atom

۴. Arsenene x Passivated Armchair NanoRibbon

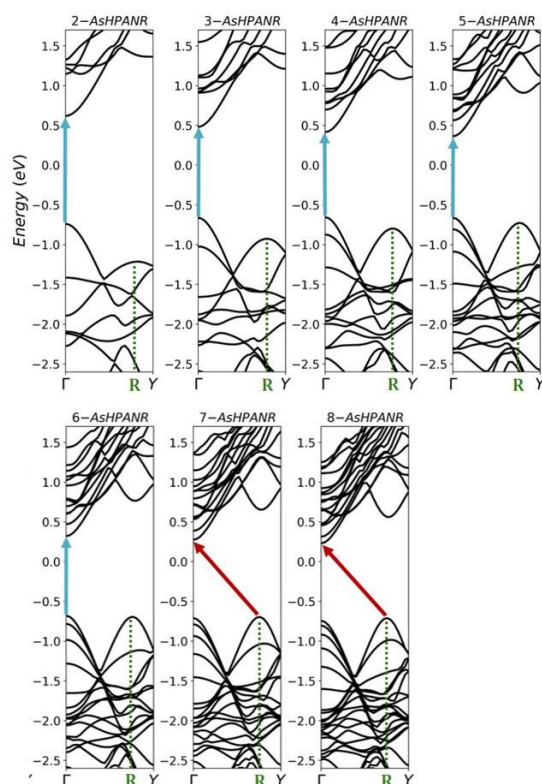
۵. Arsenene x Passivated Zigzag NanoRibbon



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) مسیر انتخاب شده در منطقه اول بریلوئن فضای وارون و (ب) ساختار نواری تک لایه آرسنین.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) ساختار نواری برای عرض مختلف نانونوار آرمچیر آرسنین خشی شده با هیدروژن (در جهت طول نانونوار).



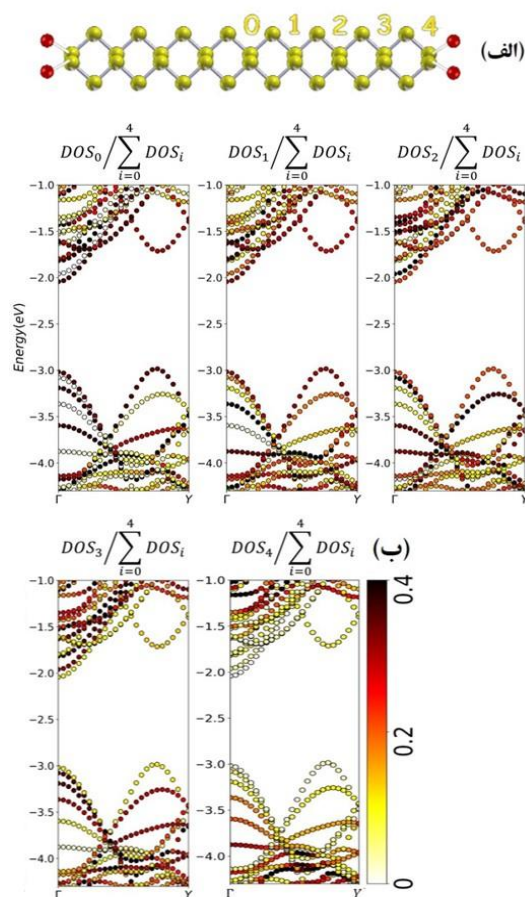
شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) ساختار نواری برای عرض مختلف نانونوار زیگزاگ آرسنین خشی شده با هیدروژن (در جهت طول نانونوار).

جدول ۱. اندازه و نوع گاف نواری نانونوارهای آرمچیر و زیگزاگ آرسنین خشی شده با هیدروژن بر حسب عرض.

نوع گاف نواری		اندازه گاف نواری		عرض نانونوار
نانونوار زیگزاگ	نانونوار آرمچیر	نانونوار زیگزاگ	نانونوار آرمچیر	
غیر مستقیم	مستقیم	۱/۸۱۹ eV	۱/۳۵۶ eV	۴
غیر مستقیم	مستقیم	۱/۴۷۵ eV	۱/۱۴۳ eV	۶
غیر مستقیم	مستقیم	۱/۲۷۱ eV	۱/۰۷۰ eV	۸
غیر مستقیم	مستقیم	۱/۱۳۵ eV	۱/۰۲۴ eV	۱۰
مستقیم	مستقیم	۱/۰۶۰ eV	۱/۰۰۱ eV	۱۲
مستقیم	غیر مستقیم	۱/۰۰۶ eV	۰/۹۷۱ eV	۱۴
مستقیم	غیر مستقیم	۱/۹۶۸ eV	۰/۹۴۱ eV	۱۶

ساختارهای نواری در جدول ۱ آورده شده است. افزایش می‌یابد و این اتفاق با توجه به اثرات محدودیت

اندازه گاف نواری هر دو نوع نانونوار با کاهش عرض کوانتومی کاملاً قابل انتظار است. اما با توجه به شکل‌های ۴ و ۵



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) مقطع افقی ابریاخته نانونوار آرمچیر عرض ۸ خشتی شده با هیدروژن، شامل نامگذاری یکی در میان ردیف‌های اتمی و (ب) نسبت چگالی حالات هر ردیف اتمی به مجموع چگالی حالات پنج ردیف نامگذاری شده (در نقاط مختلف ساختار نواری نانونوار (الف)).

نوارهای انرژی متعدد غیر تبه‌گن در ساختار نواری نانونوارها است. صحت این موضوع را می‌توان به طور کیفی با بررسی چگالی حالات وابسته به بردار موج<sup>۱</sup> نانونوارها تحقیق کرد.

با نگاه به شکل ۶. ب (که به عنوان مثال به یکی از نانونوارها پرداخته است) می‌توان دریافت که با وجودی که هر نوار انرژی به طور کامل به یک ردیف اتمی متعلق نیست، اما در هر نوار انرژی یک ردیف اتمی سهم بیشتری را نسبت به سایر ردیف‌ها به خود اختصاص داده است.

می‌توان دید که بالاترین نوار ظرفیت و پایین‌ترین نوار رسانش ساختار نواری نانونوارها شباهت زیادی به بالاترین نوار ظرفیت و پایین‌ترین نوار رسانش ساختار نواری تک‌لایه دارند.

می‌توان دید که ساختار نواری نانونوارها در مقایسه با بخش هم مسیر خود در ساختار نواری تک‌لایه (مسیر  $\Gamma-X$  و  $\Gamma-Y$ ) دچار تغییرات دیگری نیز شده است. در مقایسه با ساختار نواری تک‌لایه در ساختار نواری نانونوارها، تعداد بیشتری نوار انرژی در بازه انرژی یکسان وجود دارد که با عریض‌تر شدن نانونوارها تعداد آنها افزایش می‌یابد. علت این موضوع را می‌توان در وجود شرایط متفاوت برای اتم‌های قرار گرفته در هر ردیف از عرض نانونوار (با توجه به فاصله متفاوتی که از لبه دارند) جستجو کرد. در ساختار تک‌لایه تمام اتم‌ها شرایطی مشابه دارند که باعث تبه‌گن شدن نوارهای آنها می‌شود. اما در نانونوارها وجود شرایط متفاوت برای ردیف‌های مختلف اتم‌ها باعث برهم خوردن تبه‌گنی نوارهای اتم‌های مربوطه می‌شود که نتیجه آن حضور

<sup>۱</sup> K resolved DOS

ظرفیت و پایین‌ترین نوار رسانش)، در کنار اثرات محدودیت کوانتومی، گاهی توضیح خوبی برای تغییر شکل نوارهای انرژی نیز ارائه می‌دهد. در ادامه این روش بررسی را در مورد بالاترین نوار ظرفیت نانونوارهای آرمچیر به کار گرفته‌ایم.

همان‌طور که می‌دانیم جرم مؤثر نسبت داده شده به هر نقطه از ساختار نواری با مشتق دوم آن نقطه از ساختار نواری بر حسب تغییرات بردار موج در جهت مورد نظر رابطه عکس داشته و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$m^* = \hbar^2 / \partial^2 E / \partial^2 k, \quad (1)$$

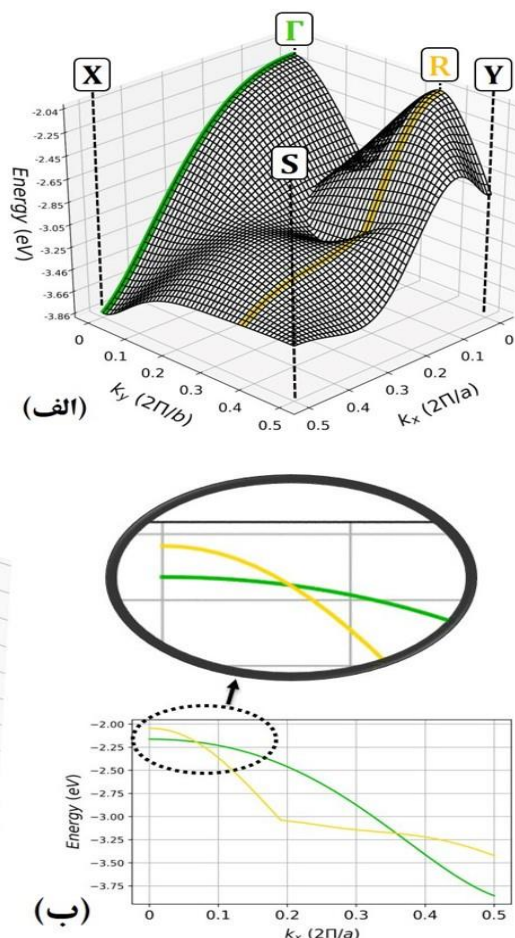
از رابطه فوق برای به دست آوردن جرم مؤثر در جهت  $x$  به صورت  $m_x^* = \hbar^2 / \partial^2 E / \partial^2 k_x$  و برای به دست آوردن جرم مؤثر در جهت  $y$  به صورت  $m_y^* = \hbar^2 / \partial^2 E / \partial^2 k_y$  استفاده خواهد شد. از طرف دیگر می‌دانیم که جرم مؤثر اثرگذار در انرژی ترازهای چاه کوانتومی، جرم مؤثر محاسبه شده در جهت محدود شدگی است. در گذار ساختار لایه‌ای به ساختار نواری، عرض محدود نانونوارها عامل محصور شدگی بوده و بنابراین جهت عرض نانونوارها جهت محدود شدگی به حساب می‌آید. اما از آنجایی که ساختار نواری در جهت عرض نانونوارها (دست کم به شکل مرسوم) قابل محاسبه نیست، برای محاسبه جرم مؤثر با تقریب مرسوم باید از ساختار نواری تک‌لایه در مسیر و جهت معادل استفاده کرد.

این تقریب همان تقریبی مرسوم است که افزایش اندازه گاف نواری را به خوبی توضیح می‌دهد. با این حال توجه به نتایج بررسی چگالی حالات وابسته به بردار موج که نشان دهنده سهم عمده اتم‌های ردیف‌های مرکزی نانونوارها (یعنی همان اتم‌هایی که شرایط نسبتاً مشابهی با اتم‌های ساختار تک‌لایه دارند) در نوارهای انرژی مورد بحث است، منجر به قابل‌اتکاتر به نظر رسیدن این تقریب (دست کم در تحلیل‌های کیفی) می‌شود. در مورد نانونوارهای آرمچیر مهم‌ترین مشخصه تغییرات بالاترین نوار ظرفیت در مورد نانونوارهای آرمچیر مهم‌ترین مشخصه تغییرات بالاترین نوار ظرفیت کاهش انرژی سریع‌تر نقطه  $R$  در مقایسه با نقطه  $\Gamma$  در اثر کاهش عرض نانونوار است. این موضوع منجر به مستقیم شدن گاف

نتایج به دست آمده از بررسی‌های چگالی حالات وابسته به بردار موج در توجیه این پدیده نیز می‌تواند تا حدودی مفید واقع شوند به شکلی که علت این شباهت را می‌توان به سهم نسبی بالای ردیف‌های مرکزی نانونوارها در این نوارهای انرژی مورد بحث نسبت داد. از آنجایی که ردیف‌های اتمی مرکزی نانونوارها (به علت فاصله بیشتر از لبه‌ها) شرایطی شبیه‌تر به شرایط اتم‌های قرار گرفته در تک‌لایه را تجربه می‌کنند می‌شود انتظار داشت که نوارهای انرژی وابسته به این اتم‌ها تا حدودی به نوارهای انرژی ساختار نواری تک‌لایه شبیه باشند. از طرف دیگر با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ دیده می‌شود که این شباهت با کاهش عرض نانوارها کم‌رنگ‌تر می‌شود به گونه‌ای که تغییر شکل بالاترین نوار ظرفیت باعث گذار گاف نواری غیر مستقیم به مستقیم برای نانونوارهای آرمچیر و گذار مستقیم به غیر مستقیم برای نانونوارهای زیگزگ در اثر کاهش عرض شده است.

هر چند که اثر گذاری عوامل متعددی در این تغییر شکل محتمل است، اما برای مثال با دقت در روند تغییرات بالاترین نوار ظرفیت نانونوار آرمچیر می‌توان حدس زد که اثر محدودیت کوانتومی عمده‌ترین عامل مؤثر در این تغییرات باشد. در اکثر مواقع از محدود شدگی کوانتومی به عنوان عامل افزایش دهنده گاف نواری در اثر کاهش اندازه یاد می‌شود (همان‌طور که در پروژه حاضر چنین است). اما افزایش گاف نواری تنها پیامد محدودیت کوانتومی نبوده و گاهی بررسی دقیق‌تر آن می‌تواند به درک و توضیح برخی دیگر از پدیده‌ها کمک کند. با توجه به مبانی پدیده محدودیت کوانتومی، چه در چاه کوانتومی کاملاً آرمانی (چاه پتانسیل با عمق بی‌نهایت) و چه در چاه کوانتومی اصلاح شده (چاه پتانسیل با عمق محدود) انرژی ترازهای گسسته با عکس جرم مؤثر (دست کم با عکس توانی از جرم مؤثر) متناسب است. همچنین همین شکل از وابستگی انرژی ترازها به جرم مؤثر (با توجه به تاثیر جهت تقعر هر نقطه از نوار انرژی در علامت جرم مؤثر آن نقطه) به عنوان عامل بالا رفتن دره نوار رسانش و پایین آمدن قله نوار ظرفیت در اثر کاهش اندازه ماده (و در نتیجه افزایش گاف نواری) مطرح شده است. اما مد نظر قرار دادن مقادیر جرم مؤثر در نقاط دیگر ساختار نواری (از جمله در نقاط مختلف بالاترین نوار





شکل ۷. (الف) رویه بالاترین نوار ظرفیت تک لایه آرسنین در مش بندی منظمی از فضای وارون است و (ب) نمودار بالاترین نوار ظرفیت در امتداد دو مسیر سبز و زرد رنگ.

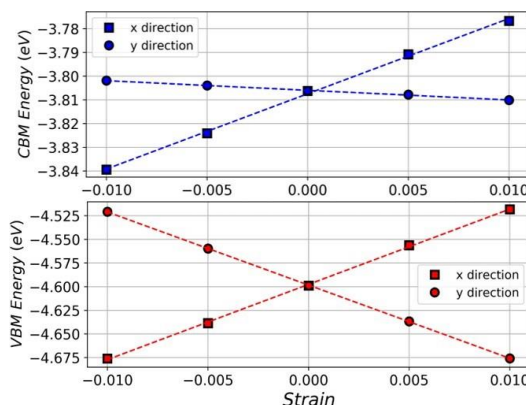
### ۳،۲ تحرک پذیری حامل های بار تک لایه آرسنین

در این بخش قصد داریم تحرک پذیری حامل های بار تک لایه آرسنین را در جهت های آرمچر و زیگزاگ (جهت های  $x$  و  $y$ ) مورد بررسی قرار دهیم. یکی از معتبرترین روش های محاسبه تحرک پذیری حامل های بار (بدون در نظر گرفتن تاثیر نقص های بلوری) استفاده از رابطه تاکاگی است [۱۰ و ۱۱]. این رابطه به صورت زیر است:

$$\mu_{nD} = \frac{e\hbar^2 C_{VD}}{k_B T m_d^* m_d(E_I)} \quad (2)$$

در این رابطه  $C_{VD}$  ضریب کشسانی دو بعدی،  $E_I$  پتانسیل تغییر شکل و  $m_d^*$  و  $m_d$  به ترتیب جرم مؤثر در جهت حرکت حامل های بار و جرم مؤثر میانگین هستند. تحرک پذیری حامل ها بسته به این که در چه انرژی قرار داشته و چه بردار

نواری در ساختار نواری نانونوارهای با عرض کمتر شده است. با توجه به شکل شماره ۷ می توان دید که در راستای محور  $x$  (در امتداد خطوط رنگی) نقطه  $R$  تقعر بیشتری در مقایسه با نقطه  $\Gamma$  دارد. با توجه به رابطه ۱، تقعر بیشتر نقطه  $R$  در راستای  $x$  به معنی جرم مؤثر کوچک تر این نقطه در این راستا است. بنابراین همان طور که حدس زده بودیم اثر متفاوت محصور شدگی کوانتومی بر نقاط مختلف ساختار نواری، علت گذار گاف نواری غیر مستقیم به مستقیم در اثر کاهش عرض در نانونوارهای آرمچر است. این روش برای تحلیل و پیش بینی کیفی پیامدهای کاهش عرض بر قسمت های دیگر ساختار نواری نانونوارهای آرمچر و زیگزاگ نیز قابل استفاده است که در این بخش به همین مقدار بسنده می کنیم.



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار تغییرات انرژی نقاط VBM و CBM ساختار نواری تک‌لایه آرسنین بر حسب کرنش ساختار بلوری در دو راستای x و y.

جهت عمود بر جهت کشیدگی و فشردگی به کمک ابزار pw.x و محاسبات وی سی-رلکس<sup>۱</sup>، واهلش شد. سپس با محاسبه ساختار نواری برای ابریاخته‌های واهلش یافته، تغییرات انرژی نقاط CBM و VBM بر حسب کرنش در دو راستا قابل محاسبه است که نتایج در شکل ۸ قابل مشاهده است.

برای هر جهت، پتانسیل‌های تغییر شکل با محاسبه شیب بهترین خط گذرنده از نقاط مربوطه در نمودار فوق به دست می‌آید و مقادیر آن برای CBM و VBM به ترتیب برابر با ۳/۳۲ و ۷/۶۸ الکترون ولت است. دیگر پارامترهای مؤثر در تحرک پذیری حامل‌های بار، جرم مؤثر در جهت حرکت حامل‌ها  $m^*$  و جرم مؤثر میانگین  $m_d$  هستند که مقادیر به دست آمده در جدول ۲ قابل مشاهده است.

آخرین پارامتری که برای محاسبه تحرک پذیری مورد نیاز است ضریب کشسانی دو بعدی ( $C_{rD}$ ) تک‌لایه آرسنین در دو راستای x و y است که بر خلاف دو پارامتر قبلی به نقطه مورد بررسی در ساختار نواری وابسته نیست. روش محاسبه ضریب بر مبنای بررسی تغییرات انرژی کل ماده در اثر کشیدگی و فشردگی ساختار بلوری استوار است. با برازش دادن معادله درجه دو  $E = ae^2 + b$  بر تغییرات انرژی کل بر حسب کرنش می‌توان ضریب کشسانی دو بعدی را از رابطه زیر به دست آورد:

$$C_{rD} = \frac{2a}{S_e} \quad (4)$$

موجی داشته باشند متفاوت است، به گونه‌ای که می‌توان به نقاط مختلف ساختار نواری تحرک پذیری متفاوتی نسبت داد. الکترون‌ها در هر نوار انرژی تمایل به قرار گرفتن در کم انرژی‌ترین حالات ممکن آن نوار را دارند. در نتیجه در نیمه رساناها الکترون‌های انتقال یافته به نوار رسانش در پایین‌ترین نقاط این نوار و حفره‌های به وجود آمده در نوار ظرفیت در بالاترین نقاط این نوار تجمع می‌یابند. بنابراین در ادامه پارامترهای این رابطه را به صورت جداگانه بررسی کرده و سپس به کمک آنها تحرک پذیری را برای بالاترین نقطه نوار ظرفیت (VBM) و پایین‌ترین نقطه نوار رسانش (CBM) محاسبه و بررسی می‌کنیم.

پتانسیل تغییر شکل  $E_l$  معیاری از وابستگی انرژی نقاط مختلف ساختار نواری به تغییر شکل ساختار بلوری است و برای هر نقطه از ساختار نواری به کمک رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$E_l^i = \Delta V_i / (\Delta l / l_0) \quad (3)$$

در این رابطه  $l_0$  و  $\Delta l$  به ترتیب طول اولیه و تغییر طول یاخته واحد در راستای مورد نظر،  $\Delta V$  تغییر انرژی نقطه مشخصی از ساختار نواری (نقطه  $i$ ) و  $E_l^i$  پتانسیل تغییر شکل آن نقطه است. برای این منظور ابریاخته تک لایه آرسنین را یک بار در جهت x (جهت زیگزاگ در ساختار بلوری) و بار دیگر در جهت y (جهت آرمچیر در ساختار بلوری) به اندازه نیم و یک درصد کشیده و فشرده کرده و با آزاد گذاشتن پارامتر شبکه در

جدول ۲. مقادیر جرم مؤثر نقاط VBM و CBM ساختار نواری تک لایه آرسنین در دو راستای x و y.

$m_d$	$m_y^*$	$m_x^*$	
$0.525 m_e$	$0.23 m_e$	$1/20 m_e$	CBM
$0.18 m_e$	$-0.09 m_e$	$-0.36 m_e$	VBM

جدول ۳. مقادیر ضریب کشسانی به همراه مقادیر جرم مؤثر، پتانسیل تغییر شکل و تحرک پذیری نقاط VBM و CBM ساختار نواری تک لایه آرسنین در دو راستای x و y.

جهت x (جهت زیگزاگ)		جهت y (جهت آرمچور)		
CBM (الکترون)	VBM (حفره)	CBM (الکترون)	VBM (حفره)	
$3/32 eV$	$8/22 eV$	$-0.28 eV$	$-7/68 eV$	پتانسیل تغییر شکل
$1/20 m_e$	$-0.36 m_e$	$0.23 m_e$	$-0.09 m_e$	جرم مؤثر
$0.52 m_e$	$0.18 m_e$	$0.52 m_e$	$0.18 m_e$	جرم مؤثر میانگین
$45/64 N/m$	$45/64 N/m$	$10/85 N/m$	$10/85 N/m$	ضریب کشسانی دو بعدی
$1.073 cm^2/V.s$	$1.713 cm^2/V.s$	$1.074.3 cm^2/V.s$	$1.773 cm^2/V.s$	تحرک پذیری (در دمای اتاق)

واکنش بسیار متفاوتی در مقابل کشیدگی و فشردگی ساختار بلوری در دو راستای مختلف از خود نشان می دهد که باعث تفاوت چند برابری پتانسیل تغییر شکل این نقطه در دو راستای x و y شده است. در دو نقطه مورد بررسی ساختار نواری جرم مؤثر نیز در راستای x حدوداً ۴ الی ۵ برابر بزرگ تر از جرم مؤثر در راستای y است. براینده همه این پارامترهای ناهمسانگرد در نهایت منجر به ناهمسانگردی تحرک پذیری شده که مقدار این ناهمسانگردی برای نوار ظرفیت بسیار قابل توجه است. واضح است که به علت توان دو پتانسیل تغییر شکل در رابطه تحرک پذیری، این پارامتر نسبت به دیگر پارامترها نقش تعیین کننده تری در تحرک پذیری حامل های بار (چه از لحاظ اندازه و چه از لحاظ ناهمسانگردی) دارد.

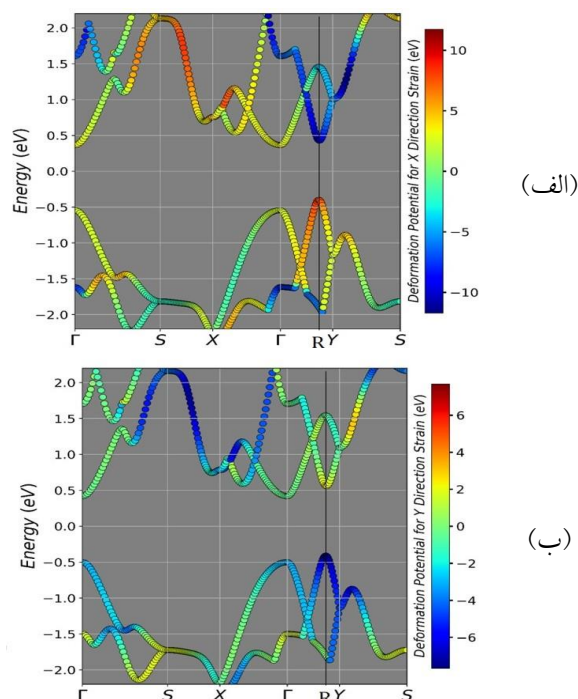
## ۴.۲. اثر کرنش بر ساختار الکترونی و تحرک پذیری

### حامل های بار تک لایه آرسنین

اعمال کرنش یکی از روش های شناخته شده برای ایجاد تغییر در خواص ساختارهای دو بعدی محسوب می شود. با این حال

در این رابطه  $S_x$  مساحت سطح مقطع افقی ابریاخته تک لایه در حالت بدون کرنش است. با استفاده از این روش، در جهت y ضریب کشسانی دو بعدی تک لایه آرسنین  $10/85 N/m$  و در جهت x برای کرنش مثبت (کرنش کششی)  $33/34 N/m$  و برای کرنش منفی (کرنش فشاری)  $57/94 N/m$  به دست می آید. به کمک پارامترهای محاسبه شده، تحرک پذیری الکترون ها (که به خواص CBM وابسته است) و حفره ها (که به خواص VBM وابسته است) برای تک لایه آرسنین در دمای اتاق قابل محاسبه است. مقادیر به دست آمده برای تحرک پذیری و پارامترهای مؤثر در آن، که در بالا محاسبه شد، در جدول ۳ خلاصه شده است.

با نگاهی به این جدول ناهمسانگردی قابل توجهی را بین مقادیر برخی پارامترها در دو راستای x و y می توان دید. یکی از این ناهمسانگردی ها در مورد رفتار کشسانی متفاوت تک لایه آرسنین در مقابل کشش و فشار در دو راستای متعامد است به گونه ای که نیروی لازم برای ایجاد تغییر طول مشخصی در راستای x حدوداً  $4/5$  برابر نیروی لازم برای ایجاد همین تغییر طول در راستای y است. همچنین نقطه CBM در ساختار نواری



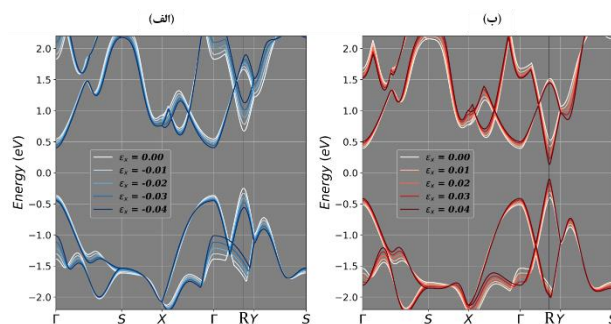
**شکل ۹.** (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) و (ب) به ترتیب پتانسیل تغییر شکل در دو راستای x و y برای نقاط مختلف ساختار نواری تک لایه آرسنین. (مقادیر مربوط به هر رنگ در ستون رنگی کنار هر نمودار مشخص شده است).

در اثر کشیدگی ساختار بلوری افزایش و در اثر فشردگی ساختار بلوری کاهش می‌یابد و این روند در مورد نقاط با پتانسیل تغییر شکل منفی برعکس است. از این رو با نگاهی به شکل ۹ می‌توان پیش‌بینی کرد که در اثر میزان کافی کشیدگی ساختار بلوری در راستای x به علت پتانسیل تغییر شکل منفی در راستای x نوار رسانش در بردار موج R و پتانسیل تغییر شکل مثبت در راستای x در بردار موج  $\Gamma$ ، بردار موج کمینه این نوار (CBM) از  $\Gamma$  به R تغییر یابد. هرچند که پتانسیل تغییر شکل جهت y این نقاط هم علامت هستند اما به علت بزرگ‌تر بودن مقدار آن در بردار موج R، همین اتفاق برای فشردگی ساختار بلوری در راستای y نیز محتمل است. به همین ترتیب در مورد نوار ظرفیت جابه‌جایی بردار موج بیشینه این نوار از R به  $\Gamma$  برای فشردگی ساختار بلوری در جهت x و کشیدگی ساختار بلوری در جهت y (هر دو به علت اختلاف در بزرگی پتانسیل تغییر شکل) قابل پیش‌بینی است. نتیجه محاسبه ساختار نواری تک لایه کرنش یافته آرسنین تحت مقادیر ۱ تا ۴ درصدی کرنش کششی و فشاری تک محوری در دو راستای x

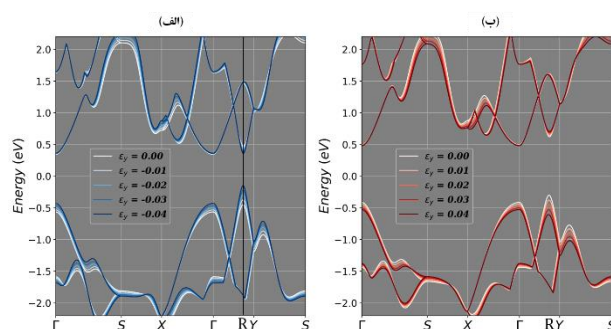
چگونگی تاثیر کرنش بر خواص همه مواد یکسان نبوده و گاهی منجر به تأثیرات بسیار منحصر به فردی در برخی از ساختارهای بلوری می‌شود.

با توجه به نتایج بخش قبل و ناهمسانگردی قابل توجه مشاهده شده در مورد پارامترهای تک‌لایه آرسنین، پاسخ ناهمسانگرد و جالب توجه خواص این ساختار به کشیدگی و فشردگی در راستاهای مختلف دور از ذهن نیست. در بخش قبل پتانسیل تغییر شکل نقاط VBM و CBM را به منظور محاسبه تحرک پذیری حامل‌های بار قرار گرفته در این نقاط مورد بررسی قرار دادیم. اما با توجه به تعریف پتانسیل تغییر شکل، این پارامتر همچنین می‌تواند دید خوبی از چگونگی واکنش ساختار نواری به کرنش ساختار بلوری به دست داده و به پیش‌بینی تغییرات آن کمک کند. بنابراین پتانسیل تغییر شکل را برای تمام نقاط نوارهای بالایی نوار ظرفیت و نوارهای پایینی نوار رسانش محاسبه کردیم که نتیجه آن در شکل ۹ قابل مشاهده است.

با توجه به رابطه ۴، انرژی نقاط با پتانسیل تغییر شکل مثبت



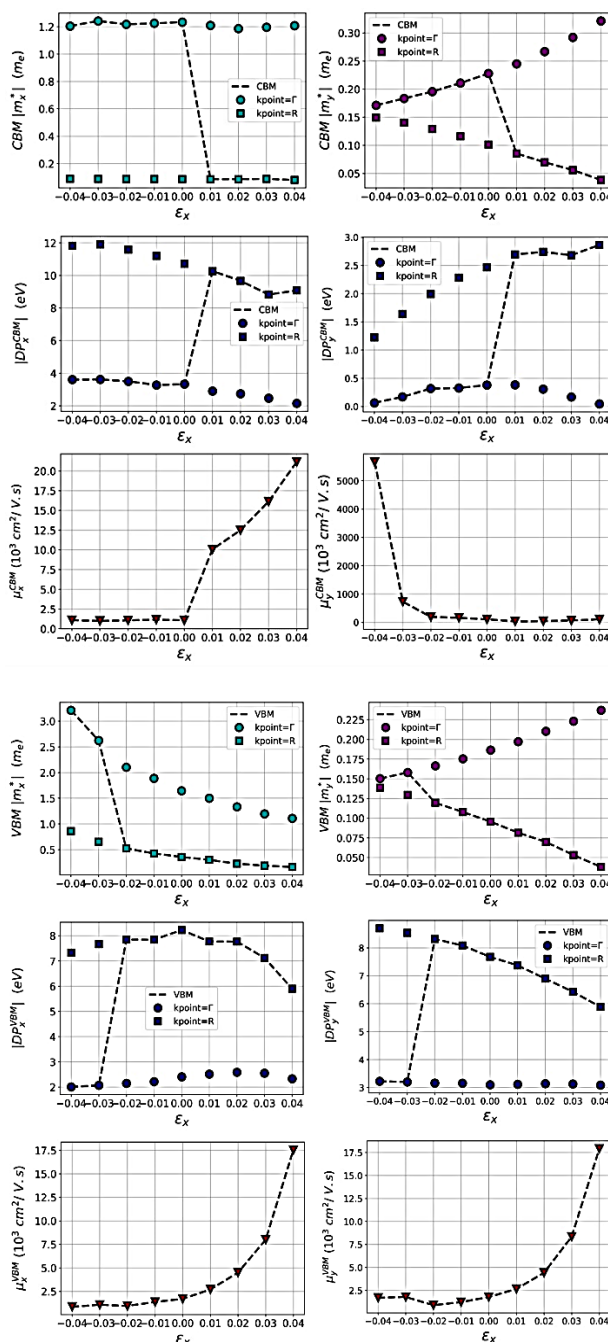
شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) ساختار نواری تک لایه آرسنین برای مقادیر منفی کرنش (فشردگی) در راستای x و (ب) ساختار نواری تک لایه آرسنین برای مقادیر مثبت کرنش (کشیدگی) در راستای x.



شکل ۱۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) ساختار نواری تک لایه آرسنین برای مقادیر منفی کرنش (فشردگی) در راستای y و (ب) ساختار نواری تک لایه آرسنین برای مقادیر مثبت کرنش (کشیدگی) در راستای y.

ظرفیت می‌تواند عامل تغییرات چشمگیر و ناگهانی جرم مؤثر مورد استفاده در محاسبه تحرک پذیری باشد. برای مشخص شدن چگونگی این تغییرات مقادیر جرم مؤثر، پتانسیل تغییر شکل و تحرک پذیری را در دو راستای x و y مورد بررسی قرار داده‌ایم. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مقادیر محاسبه شده این پارامترها برای کرنش ۴- تا ۴ درصدی قابل مشاهده است. در نمودارهای مربوط به پتانسیل تغییر شکل و جرم مؤثر مقادیر مربوط به بردار موج R و  $\Gamma$  (در کرنش‌های مختلف) به صورت جداگانه و به ترتیب با نشانگرهای مربع و دایره مشخص شده‌اند. برای مقادیر مختلف کرنش، بردار موج نقاط بیشینه نوار ظرفیت و کمینه نوار رسانش (که در تحرک پذیری حامل‌های بار حائز اهمیت هستند) تغییر کرده و بین بردارهای موج R و  $\Gamma$  جابه‌جا می‌شوند. بردار موج مربوط به VBM و CBM در هر کرنش با دنبال کردن مسیر خط چین در نمودارها قابل تشخیص است. توجه به تغییر ناگهانی بردار موج مربوط به

و y به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به نمایش در آمده است. مطابق با انتظار، نتایج محاسبه ساختار نواری برای ساختارهای بلوری کرنش یافته تک لایه آرسنین سازگاری خوبی را با پیش‌بینی‌های متکی بر پتانسیل تغییر شکل نشان می‌دهد. بحث اخیر نکته جالب توجهی از نقطه نظر بررسی خواص تحرک پذیری در خود دارد. اگر علت تغییر بردار موج مربوط به کمینه نوار رسانش (یا بیشینه نوار ظرفیت) تفاوت پتانسیل تغییر شکل کمینه (یا بیشینه) جدید و سابق است، با توجه به وابستگی تحرک پذیری حامل‌های بار به پتانسیل تغییر شکل، همین تفاوت (احتمالاً) می‌تواند عامل تغییرات قابل توجه تحرک پذیری باشد. البته در بررسی تغییرات تحرک پذیری در اثر کرنش باید به نقش جرم مؤثر نیز دقت شود. هرچند در اثر اعمال کرنش به ساختار بلوری معمولاً جرم مؤثر نقاط مختلف ساختار نواری دچار تغییرات ملایمی می‌شوند اما در واقع، تغییر بردار موج نقاط کمینه نوار رسانش و بیشینه نوار



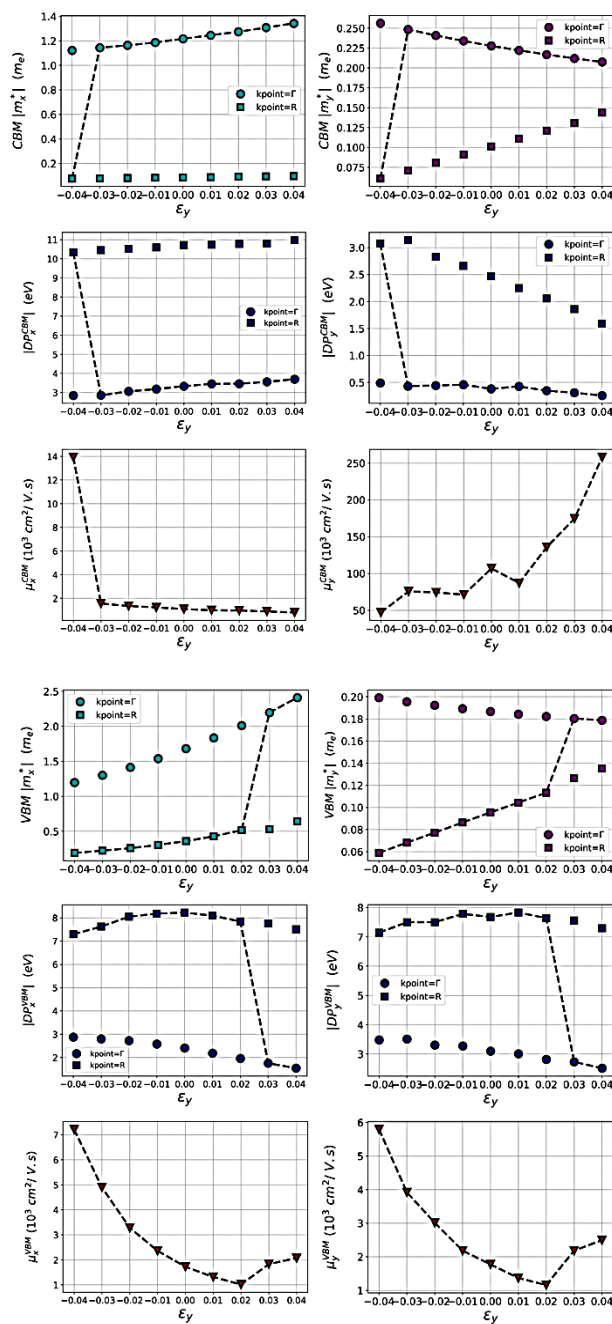
شکل ۱۲. نمودارهای مقادیر جرم مؤثر راستاهای x و y، پتانسیل تغییر شکل راستاهای x و y و مقادیر تحرک پذیری حامل های بار در راستاهای x و y مربوط به پایین ترین نقطه نوار رسانش (حفره ها) و بالاترین نقطه نوار ظرفیت (الکترون ها) بر حسب مقدار مختلف کرنش ساختار بلوری در راستای x.

اثر اعمال کرنش به ساختار بلوری، تحرک پذیری تغییرات زیادی را تجربه می کند. در مواردی مانند تغییرات  $\mu_x^{CBM}$  در  $(\epsilon_x = 0\% \rightarrow 4\%)$  و  $(\epsilon_x = -3\% \rightarrow -4\%)$  که شاهد تغییر

CBM و VBM (انتقال از R به  $\Gamma$  و برعکس) برای درک دلیل تغییرات ناگهانی مقادیر جرم مؤثر، پتانسیل تغییر شکل و در نهایت تحرک پذیری سودمند است. نتایج نشان می دهد که در

۱. تغییر کرنش راستای x از صفر به یک درصد





شکل ۱۳. نمودارهای مقادیر جرم مؤثر راستاهای x و y، پتانسیل تغییر شکل راستاهای x و y و مقادیر تحرک پذیری حامل های بار در راستاهای x و y مربوط به پایین ترین نقطه نوار رسانش (حفره ها) و بالاترین نقطه نوار ظرفیت (الکترون ها) بر حسب مقدار مختلف کرنش ساختار بلوری در راستای y.

مربوط به VBM و CBM رخ نداده، تغییرات ملایم اما تأثیر گذار پتانسیل تغییر شکل و جرم مؤثر منجر به افزایش چشمگیر تحرک پذیری شده است. کاهش قابل توجه  $m_y^*$  برای بالاترین نوار ظرفیت و پایین ترین نوار رسانش در بردار موج R بر اثر

ناگهانی و قابل توجه تحرک پذیری هستیم، تغییر بردار موج مربوط به VBM و CBM مسئولیت اصلی را به عهده دارد. در برخی از موارد نیز مانند تغییرات  $\mu_y^{CBM}$ ،  $\mu_x^{CBM}$ ،  $\mu_y^{VBM}$  در  $\mu_x^{VBM}$  (با وجودی که تغییری در بردار موج

کشش ساختار بلوری در راستای  $x$ ، در شکل ۱۰ الف مشهود است (به تیز شدگی تدریجی نوارهای ذکر شده در بردار موج  $R$  با افزایش کشش ساختار بلوری در راستای  $x$  دقت کنید).

در واقع محاسبه دقیق رسانایی الکتریکی امری بسیار پیچیده است. این در حالی است که محاسبات فوق که بر اساس رابطه تاکاگی انجام شده شکل ساده‌ای از جفت شدگی الکترون-فونون را در نظر گرفته است و بنابراین تنها تخمینی از حد بالای تحرک پذیری به دست می‌دهد. در شرایط واقعی عوامل خارجی بسیاری وجود دارد که باعث کاهش این مقادیر بیش از حد برآورد شده می‌شود. با این وجود نتایج به دست آمده از رابطه تاکاگی از نقطه نظر مقایسه تحرک پذیری نسبی راستاهای مختلف به منظور بررسی ناهمسانگردی‌های موجود به اندازه کافی قابل اعتماد است [۱۲]. به جهت درک بهتر از ناهمسانگردی تحرک پذیری تک لایه آرسنین در دو راستای  $x$  و  $y$  و اثرات کرنش ساختار بلوری بر آن، نسبت تحرک پذیری در دو راستا را برای مقادیر مختلف کرنش محاسبه کردیم که نتایج در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. نتایج، وابستگی ناهمسانگردی تحرک پذیری حامل‌های بار به کرنش تک محوری ساختار بلوری را نشان می‌دهد که این وابستگی برای الکترون‌ها (CBM) بسیار شدید و قابل توجه است.

### ۳. نتیجه گیری

محاسبات نشان می‌دهد که اگرچه ساختار تک لایه آرسنین گاف غیر مستقیم دارد، در اثر فشردگی بیش از ۲ درصدی در راستای  $x$  و کشیدگی بیش از ۳ درصدی در راستای  $y$  شاهد گذار گاف غیر مستقیم به مستقیم خواهیم بود. اتصال اتم‌های هیدروژن به لبه نانونوارها به خوبی اثر لبه را خنثی می‌کنند به شکلی که در نزدیکی سطح فرمی اتم‌های هیدروژن و اتم‌های

### مراجع

آرسنیک لبه سهم ناچیزی دارند. این موضوع باعث می‌شود که در ساختار نواری، نوارهای نزدیک به سطح فرمی در نانونوارها و تک لایه شباهت قابل مشاهده‌ای داشته باشند. به عنوان پدیده‌ای شناخته شده، اثرات محدود شدگی کوانتومی باعث افزایش گاف نواری نانونوارها با کاهش عرض آنها می‌شود. اما بررسی دقیق‌تر نشان داد که کیفیت متفاوت اثرات محدود شدگی کوانتومی بر بخش‌های مختلف ساختار نواری منجر به گذار گاف غیر مستقیم به مستقیم در نانونوارهای آرمچیر با کاهش عرض نیز می‌شود. همچنین محاسبات تحرک پذیری، تحرک پذیری بسیار بالای الکترون‌ها در پایین ترین نقطه نوار رسانش در راستای  $y$  را نشان می‌دهد که مهم ترین عامل آن را می‌توان مقدار بسیار کوچک پتانسیل تغییر شکل مربوطه دانست. با وجودی که تحرک پذیری حفره‌ها در دو راستای  $x$  و  $y$  تقریباً برابر است، ناهمسانگردی قابل توجهی در تحرک پذیری الکترون‌ها در این دو راستا وجود دارد. از طرف دیگر تفاوت بسیار زیادی بین تحرک پذیری الکترون‌ها و حفره‌ها در راستای  $y$  وجود دارد که شرایط خوبی را برای جداسازی مؤثر الکترون و حفره در موارد لزوم فراهم می‌آورد. نتایج به دست آمده از ساختارهای کرنش یافته نشان می‌دهد که کرنش ساختار بلوری با ایجاد تغییر در انحنا نوارهای انرژی موجب تغییرات جرم مؤثر و در نتیجه تحرک پذیری می‌شود. از طرف دیگر جابه‌جایی‌های بردار موج مربوط به بیشینه انرژی نوار ظرفیت و کمینه انرژی نوار رسانش در اثر کرنش، تغییرات قابل توجه و ناگهانی را در تحرک پذیری حامل‌های بار موجب می‌شوند. از مهم ترین نتایج اعمال کرنش بر ساختار بلوری می‌توان به کاهش شدید ناهمسانگردی تحرک پذیری الکترون‌ها در کرنش ۴- درصدی در راستای  $x$  و افزایش شدید این ناهمسانگردی در کرنش ۴- درصدی در راستای  $y$  اشاره کرد.

Cambridge (2012).

3. C Liu, H Jiang, and Y Yao, *Phys. Rev. B* **84** (2011) 195430.
4. N D Drummond, V Zolyomi, and V I Fal'ko, *Phys. Rev. B* **85** (2012) 075423.

1. H Castro Neto, F Guinea, N M R Peres, K S Novoselov, and A K Geim, *Rev. Mod. Phys.* **81** (2009) 109.
2. M I Katsnelson, "Graphene: Carbon in Two Dimensions", Cambridge University Press,



9. M Zeraati, S M Vaez Allaei, I Abdolhosseini Sarsari, M Pourfath, and D Donadio, *Phys. Rev. B* **93**, 8 (2016) 85424.
10. S Takagi, A Toriumi, M Iwase, and H Tango, *IEEE Trans. Electron Devices*, **41**, 12 (1994) 2363.
11. J Qiao, X Kong, Z X Hu, F Yang, and W Ji, *Nat. Commun.* **5** 1 (2014) 4475.
12. R Fei and L Yang, *Nano Lett.* **14**, 5 (2014) 2884.
5. M Ezawa, *New J. Phys.* **14** (2012) 033003.
6. P Vogt, P De Padova, C Quaresima, J Avila, E Frantzeskakis, M C Asensio, A Resta, B Ealet, and G Le Lay, *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 155501.
7. A Fleurence, R Friedlein, T Ozaki, H Kawai, Y Wang, and Y Yamada-Takamura, *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 245501.
8. L Li, Y Yu, G J Ye, Q Ge, X Ou, H Wu, D Feng, X H Chen, and Y Zhang, *Nat. Nanotechnol.* **9** (2014) 372.