

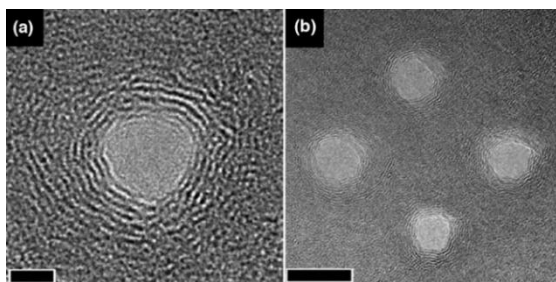
بررسی تأثیر دما بر خواص مکانیکی گرافن نانوحفره‌دار به روش دینامیک مولکولی

ایمان بیات^۱، محمود شریعتی^۲

^۱ کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، iman.bayat7@gmail.com
^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، mshariati44@gmail.com

چکیده

از مرتبه ۱ TPa و ۱۰۰ GPa هستند [۴، ۶]. به علاوه، رسانایی گرمایی گرافن 5000 W/(m.K) گزارش شده است [۶]. از سوی دیگر، وجود نانوحفره در ساختار گرافن خواص آن را دستخوش تغییر می‌کند. ممکن است ورق گرافن یک یا چند نانوحفره داشته باشد (شکل ۱). گرافن نانوحفره‌دار^۱، در خازن‌های شیمیایی، حسگرهای گاز، توالی‌سنجی DNA [۷-۹] و غربالگری مولکولی^۲ [۱۰] به کار می‌رود. جداسازی گازها [۱۱]، جداسازی ایزوتوپ‌های هلیم از یکدیگر [۱۲، ۱۳] و نمک‌زدایی از آب [۵، ۱۴-۱۷] نمونه‌های غربالگری مولکولی به کمک غشاهای حفره‌دار گرافن هستند.



شکل ۱: یک و چند نانوحفره در ورق گرافن (طول خط مقیاس در راست و چپ، به ترتیب ۱۰ nm و ۲ nm است) [۵]

چنانچه گرافن نانوحفره‌دار برای تصفیه مواد به کار رود معمولاً فشار زیادی به آن وارد می‌شود؛ برای مثال، فشار کاری در شیرین کردن آب دریا تقریباً $5/5 \text{ MPa}$ است. همچنین، عیب و شکست در ساختار گرافن عمدتاً استحکام آن را تضعیف می‌نماید. لیو و چن [۴] در مطالعه‌ای، تغییر شکل غشای نانوحفره‌دار گرافن تحت کشش را شبیه‌سازی کرده و برخی از خواص مکانیکی آن را به دست آورده‌اند. مطابق [۴]، مدول یانگ غشا تنها به تراکم نانوحفره‌ها وابسته است اما استحکام به اندازه، شکل و تراکم حفره‌ها بستگی دارد. عامل دیگری که انتظار می‌رود بر خواص مکانیکی گرافن نانوحفره‌دار مؤثر باشد، دما است. تا کنون مطالعات اندکی به بررسی تأثیر وجود حفره بر خواص مکانیکی ورق گرافن پرداخته‌اند. همچنین اثر دما در حضور حفره‌ها (ها) تا کنون بررسی نشده است.

گرافن با خواص ممتاز الکتریکی، مکانیکی، گرمایی و نوری، دگرشکلی از کربن به صورت یک ورق بسیار نازک است که در ساختار دست‌نخورده و بدون عیب آن، اتم‌های کربن شبکه‌ای شش‌ضلعی به ضخامت تنها یک اتم تشکیل می‌دهند. ممکن است در ساختار گرافن یک یا چند نانوحفره وجود داشته باشد که وجود این نانوحفره‌ها (ها) خواص گرافن را دستخوش تغییر می‌کند. گرافن نانوحفره‌دار، نویدبخش آینده‌ای درخشان در زمینه تصفیه و جداسازی همچون نمک‌زدایی از آب، جداسازی گازها و کانال‌های یونی است. در این مقاله، اثر دما بر خواص مکانیکی گرافن نانوحفره‌دار (دارای یک حفره یا آرایه‌ای از حفره‌ها) به کمک شبیه‌سازی دینامیک مولکولی با استفاده از نرم‌افزار LAMMPS مطالعه شده است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که استحکام کششی نهایی گرافن به دما وابسته است و در دماهای بیشتر از دمای اتاق کاهش می‌یابد. همچنین، مدول یانگ و کرنش نهایی با افزایش دما نسبت به دمای اتاق کاهش می‌یابند. بدین ترتیب، با شناخت تأثیر دما بر خواص مکانیکی مزبور می‌توان طراحی غشای گرافن نانوحفره‌دار را بهبود بخشید.

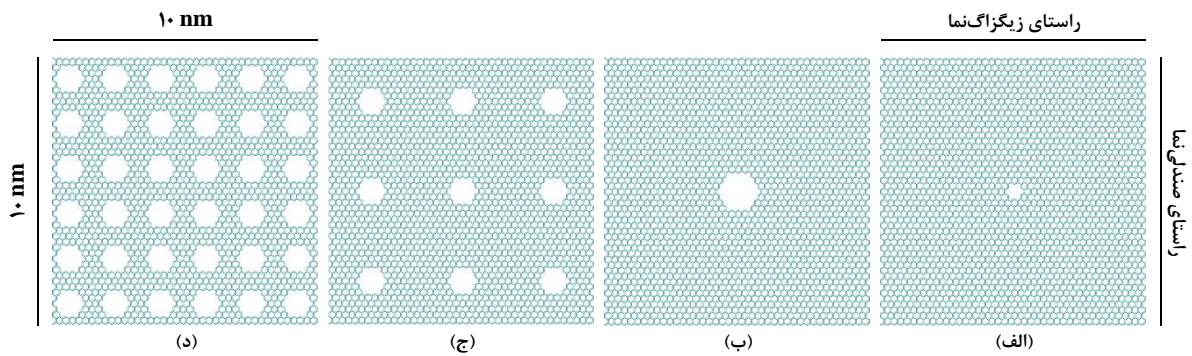
واژه‌های کلیدی: گرافن، نانوحفره، دینامیک مولکولی، LAMMPS

مقدمه

گرافن [۱] دگرشکلی از کربن به صورت یک ورق بسیار نازک است که از نخستین جداسازی آن کمی بیش از ده سال می‌گذرد. در ساختار دست‌نخورده و بدون عیب گرافن، اتم‌های کربن شبکه‌ای شش‌ضلعی به ضخامت تنها یک اتم تشکیل می‌دهند. این ساختار بی‌همتا همراه با خواص ممتاز الکتریکی، مکانیکی، گرمایی و نوری، گرافن را در کانون توجه محققان قرار داده است. گرافن با ویژگی‌های یادشده مهبیای کاربردهایی گوناگون در الکترونیک، مواد مرکب، حسگرها و سیستم‌های ذخیره‌سازی یا تبدیل انرژی است [۲-۵]. خواص مکانیکی گرافن به عنوان نازک‌ترین غشای موجود قابل توجه‌اند. برای مثال، سفتی کششی و استحکام کششی گرافن به ترتیب

¹ Nanoporous graphene

² Molecular sieving



شکل ۲: گرافن تک‌لایه با تک حفره‌ای با قطر ۴ Å (الف) و ۱۳ Å (ب) و با حفره‌هایی با قطر ۹ Å در آرایه‌های ۳ × ۳ (ج) و ۶ × ۶ (د)

تعریف مسأله

مطابق شکل ۲، سیستم مورد مطالعه یک ورق تک‌لایه گرافن با ابعاد تقریبی $10 \text{ nm} \times 10 \text{ nm}$ است که یک حفره در میانه آن واقع است یا آرایه‌ای از حفره‌ها در آن قرار دارد. آرایه حفره‌ها 3×3 ، 4×4 ، 5×5 یا 6×6 است. گرافن بدون حفره با ابعاد یادشده دارای ۳۹۳۶ اتم است. برای ایجاد حفره، اتم‌های درون دایره‌ای با قطر معین (که مرکز آن بر مرکز یک شش‌ضلعی منطبق است) حذف شده‌اند. با توجه به گسستگی توزیع اتم‌ها در گرافن، نانوحفره مدور نیست و قطر متوسط آن مدنظر است. قطر تک حفره ۴ Å یا ۱۳ Å و قطر حفره‌ها در آرایه ۹ Å انتخاب شده است [۴].

ورق نانوحفره‌دار گرافن در راستای زیگزاگ‌نما یا صندلی‌نما تحت کشش تک‌محوری قرار می‌گیرد و بدین ترتیب، مدول یانگ، استحکام نهایی و کرنش نهایی آن تحت کشش محاسبه می‌شوند. دمایی که گرافن در آن تغییر شکل می‌دهد، علاوه بر دمای اتاق (۳۰۰ K)، برابر با ۵۰۰ K، ۷۰۰ K و ۱۰۰۰ K در نظر گرفته می‌شود. این گستره دمایی برای گرافن منطقی است [۱۷، ۱۸]. علاوه بر این، با آگاهی از تأثیر نرخ کرنش بر خواص مکانیکی گرافن [۱۸]، مقدار آن در همه مسائل ثابت فرض می‌شود. حل مسائل تشریح شده، با کمک شبیه‌سازی دینامیک مولکولی صورت می‌گیرد که در ادامه به جزئیات آن پرداخته شده است.

جزئیات راه‌حل

شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی با استفاده از نرم‌افزار LAMMPS [۱۶] انجام می‌شوند. ابعاد جعبه شبیه‌سازی در راستاهای x ، y و z به ترتیب 100 Å ، 100 Å و 200 Å در نظر گرفته می‌شود. ورق گرافن با ابعاد $100 \text{ Å} \times 100 \text{ Å}$ پیش از شبیه‌سازی در میانه جعبه در صفحه $z = 0$ قرار دارد و بدون تغییر شکل است؛ در نتیجه، لبه‌های ورق دقیقاً در داخل جعبه قرار می‌گیرند.

شرایط مرزی در هر سه راستای x ، y و z تناوبی در نظر گرفته می‌شوند؛ بدین ترتیب، ورق گرافن بسیار بزرگ فرض می‌شود و اثر تمرکز تنش در لبه‌های آن از بین می‌رود. در صورت وجود تک حفره

در ورق، به دلیل ابعاد بزرگ ورق در مقایسه با اندازه حفره، فاصله حفره از تصاویر آن به میزانی است که فرض وجود یک حفره در ورق بسیار بزرگ برقرار بماند. در صورت وجود آرایه‌ای از حفره‌ها در ورق، رفتار یک ورق بسیار بزرگ با آرایه‌ای از حفره‌ها شبیه‌سازی خواهد شد. همچنین، لازم است شرایط مرزی در راستای هر یک از محورهای مختصات تناوبی باشد تا بتوان مؤلفه متناظر با آن را در تانسور تنش سیستم کنترل کرد. سرانجام، برای اجتناب از برهم‌کنش‌های غیرواقعی بین اتمی، میان ورق گرافن و تصاویر آن (با توجه به ابعاد ورق) 200 Å فاصله خلأ در نظر گرفته می‌شود.

برهم‌کنش اتم‌های کربن با پتانسیل بین مولکولی تطبیقی^۱ توصیف می‌گردد و برای کم کردن هزینه محاسبات، از برهم‌کنش‌های واندروالس چشم‌پوشی می‌شود. همچنین، برای جلوگیری از بروز رفتار غیرفیزیکی و برای دستیابی به نتایج سازگار با نظریه تابعی چگالی، شعاع برش^۲ در تابع برگزیننده^۳ پتانسیل مزبور باید در محدوده $210 \text{ Å} - 192 \text{ Å}$ باشد. در پژوهش حاضر این مقدار برابر 210 Å انتخاب شده است [۴].

شبیه‌سازی رفتار گرافن در آزمون کشش تک‌محوری دو مرحله دارد: (الف) واهلش^۴ سیستم به مدت ۲۰ ps با گام زمانی ۱ fs و (ب) ایجاد تغییر شکل در ورق با نرخ کرنش ثابت و گام زمانی ۱ fs تا رخ دادن شکست [۱۸، ۱۹]. در مطالعه‌ای مشابه درباره خواص مکانیکی سیلیسین [۲۰]، یک مرحله نیز برای کمینه‌سازی انرژی سیستم وجود دارد که در این پژوهش از آن چشم‌پوشی می‌شود. واهلش سیستم سبب می‌شود تنش در درون ورق از بین برود [۱۹] و سیستم به یک حالت تعادل با کرنش صفر نزدیک شود [۲۰]. این مرحله از شبیه‌سازی برای رسم منحنی تنش-کرنش مهندسی در پایان شبیه‌سازی بسیار با اهمیت است؛ چراکه مطلوب است نمودار یادشده از نقطه مبدأ، یعنی به ازای تنش و کرنش صفر آغاز شود.

ایجاد تغییر شکل در ورق به چند روش امکان‌پذیر است: اعمال نیروی خارجی کنترل‌شده به لبه‌های ورق، جابه‌جا کردن لبه‌ها به صورت کنترل‌شده و بزرگتر کردن جعبه شبیه‌سازی در یک بُعد و نگاشت مکان همه اتم‌ها به موقعیت جدید. به دلیل اینکه آخرین روش مزبور در نرم‌افزار LAMMPS به سادگی پیاده می‌شود تغییر شکل ورق

¹ Adaptive intermolecular reactive empirical bond-order (AIREBO) potential

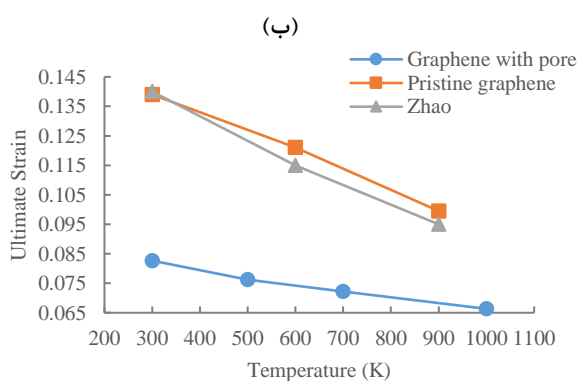
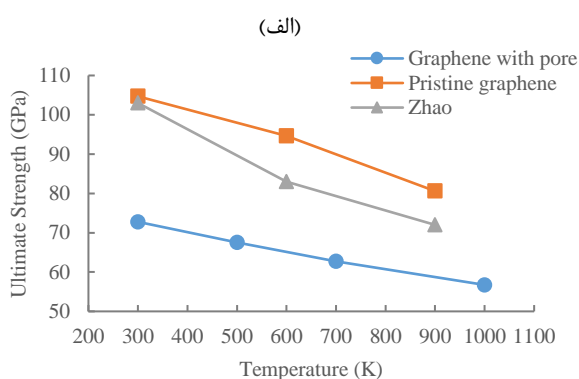
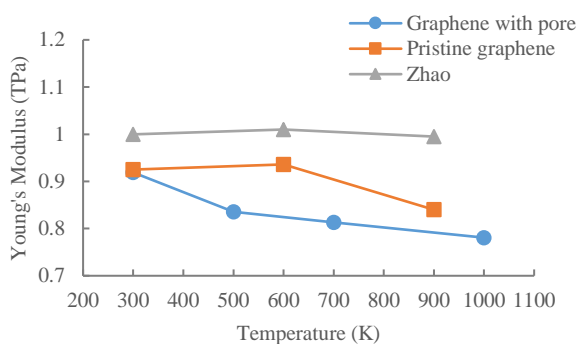
² Cutoff distance

³ Switching function

⁴ Relaxation

برای محاسبه حجم یک اتم، ورق گرافن به شکل مکعب مستطیلی فرض می‌شود که طول کوتاه‌ترین یال آن (ضخامت گرافن) $3/4 \text{ \AA}$ است و دو یال دیگر آن هم‌اندازه و به طول 10 \AA هستند [۱۹]. از تقسیم این حجم بر تعداد اتم‌های ورق در هر مسئله، حجم یک اتم به دست می‌آید.

در محاسبه مدول یانگ با توجه به ناحیه خطی به ازای کرنش‌های کوچک‌تر از $0/005$ محاسبه می‌شود. در برخی از موارد، به دلیل نوسان‌های نامنظم نمودار به ازای کرنش‌های نزدیک به صفر، مدول یانگ در بازه‌ای از کرنش‌ها محاسبه می‌شود که شامل این نوسان‌ها نباشد [۲۰]. همچنین، استحکام نهایی بیشترین مقدار تنش کششی، دقیقاً پیش از وقوع شکست فرض شده‌است و کرنش متناظر با آن کرنش نهایی است [۱۹، ۲۰].



شکل ۳: تغییرات مدول یانگ (الف)، استحکام نهایی (ب) و کرنش نهایی (ج) با دما در راستای صندلی نما، برای سیستمی با نانوحفره به قطر 4 \AA در میانه

به همان ترتیب، با تغییر اندازه جعبه در راستای کشش صورت می‌گیرد. نرخ کرنش مهندسی برابر با $0/001 \text{ ps}^{-1}$ انتخاب می‌گردد [۱۸] و اندازه جعبه پس از هر 100 گام زمانی یک بار تغییر می‌کند تا سیستم فرصت نزدیک شدن به حالت تعادل جدید را داشته باشد.

هر دو مرحله شبیه‌سازی در هنگرد هم‌دما-هم‌فشار^۱ اجرا می‌شوند. در مرحله واهلش، سیستم به تعادل گرمایی می‌رسد و سپس، انحراف دمای آن از یک مقدار ثابت و از پیش تعیین شده اندک خواهد بود. همچنین، مؤلفه‌های تنش محوری ورق در هر سه راستای محورهای مختصات، نزدیک به صفر کنترل می‌شوند؛ از این رو در مرحله تغییر شکل، تنش محوری در راستای کشش از مقداری نزدیک به صفر شروع به تغییر می‌کند. در هنگام تغییر شکل نیز مؤلفه‌های تنش محوری در دو راستای عمود بر راستای کشش، نزدیک به صفر کنترل می‌شوند تا فرض تک‌محوری بودن تنش برقرار بماند.

نتایج و جمع‌بندی

آنچه نرم‌افزار محاسبه می‌کند، مقدار تنش مهندسی برای ورق گرافن نیست؛ بلکه تانسور تنش متناظر با هر اتم است که طبق رابطه (۱) به دست می‌آید [۲۱].

$$S_{ab} = - \left[m v_a v_b + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N_p} (r_{1a} F_{1b} + r_{2a} F_{2b}) + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N_b} (r_{1a} F_{1b} + r_{2a} F_{2b}) + \frac{1}{3} \sum_{n=1}^{N_a} (r_{1a} F_{1b} + r_{2a} F_{2b} + r_{3a} F_{3b}) + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{N_d} (r_{1a} F_{1b} + r_{2a} F_{2b} + r_{3a} F_{3b} + r_{4a} F_{4b}) + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{N_i} (r_{1a} F_{1b} + r_{2a} F_{2b} + r_{3a} F_{3b} + r_{4a} F_{4b}) + K \text{space}(r_{ia}, F_{ib}) + \sum_{n=1}^{N_f} r_{ia} F_{ib} \right] \quad (1)$$

در این رابطه a و b می‌توانند x ، y و z را اختیار کنند تا شش مؤلفه تانسور تنش را تشکیل دهند. جمله‌های سمت راست این معادله هر یک مفهومی فیزیکی دارند؛ اما برای کاستن از هزینه محاسبات، تنها دو جمله نخست محاسبه می‌شوند. نخستین جمله سهم انرژی جنبشی برای اتم i است. جمله دوم نشان‌دهنده انرژی برهم‌کنش‌های دوبه‌دو است که در آن n روی N_p همسایه اتم i تغییر می‌کند، r_1 و r_2 مکان دو اتم دخیل در برهم‌کنش است و F_1 و F_2 نیروی ناشی از برهم‌کنش وارد بر دو اتم است.

مقدار تنش مهندسی در راستای کشش ورق بدین شکل حاصل می‌شود (به فرض، اگر σ_{xx} مدنظر باشد) که مقادیر σ_{xx} روی همه اتم‌ها جمع زده می‌شود و در پایان هر گام زمانی، میانگین آن در خروجی برنامه چاپ می‌شود (معدل‌گیری مکانی). از مقادیر میانگین مکانی در پایان هر 500 گام زمانی معدل‌گیری می‌شود (معدل‌گیری زمانی). مقدار به دست آمده در مرحله قبل برحسب واحد فشار \times حجم است و برای تبدیل به مقداری با واحد تنش، بر حجم یک اتم تقسیم می‌شود. خارج قسمت برابر با تنش مهندسی در راستای کشش (σ_{xx}) است.

¹ NPT ensemble

- [7] Heerema, S. J., and Dekker, C., 2016. "Graphene nanodevices for DNA sequencing". *Nature Nanotechnology*, 11, pp. 127-136, doi: [10.1038/nnano.2015.307](https://doi.org/10.1038/nnano.2015.307).
- [8] Kulkarni, M., and Mukherjee, A., 2016. "Ionic liquid prolongs DNA translocation through graphene nanopores". *RSC Advances*, 6(51), pp. 46019-46029, doi: [10.1039/C6RA07017E](https://doi.org/10.1039/C6RA07017E).
- [9] Wells, D. B., Belkin, M., Comer, J., and Aksimentiev, A., 2012. "Assessing graphene nanopores for sequencing DNA". *Nano Letters*, 12(8), pp. 4117-4123, doi: [10.1021/nl301655d](https://doi.org/10.1021/nl301655d).
- [10] Koenig, S. P., Wang, L., Pellegrino, J., and Bunch, J. S., 2012. "Selective molecular sieving through porous graphene". *Nature Nanotechnology*, 7, pp. 728-732, doi: [10.1038/nnano.2012.162](https://doi.org/10.1038/nnano.2012.162).
- [11] Jiang, D. E., Cooper, V. R., and Dai, S., 2009. "Porous graphene as the ultimate membrane for gas separation". *Nano Letters*, 9(12), pp. 4019-4024, doi: [10.1021/nl902194e](https://doi.org/10.1021/nl902194e).
- [12] Hauser, A. W., Schrier, J., and Schwerdtfeger, P., 2012. "Helium tunneling through nitrogen-functionalized graphene pores: pressure- and temperature-driven approaches to isotope separation". *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(19), pp. 10819-10827, doi: [10.1021/jp302498d](https://doi.org/10.1021/jp302498d).
- [13] Hauser, A. W., and Schwerdtfeger, P., 2012. "Nanoporous graphene membranes for efficient $^3\text{He}/^4\text{He}$ separation". *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 3(2), pp. 209-213, doi: [10.1021/jz201504k](https://doi.org/10.1021/jz201504k).
- [14] Cohen-Tanugi, D., and Grossman, J. C., 2014. "Mechanical strength of nanoporous graphene as a desalination membrane". *Nano Letters*, 14(11), pp. 6171-6178, doi: [10.1021/nl502399y](https://doi.org/10.1021/nl502399y).
- [15] Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., and Hone, J., 2008. "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene". *Science*, 321(5887), pp. 385-388, doi: [10.1126/science.1157996](https://doi.org/10.1126/science.1157996).
- [16] Plimpton, S., 1995. "Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics". *Journal of Computational Physics*, 117(1), pp. 1-19, doi: [10.1006/jcph.1995.1039](https://doi.org/10.1006/jcph.1995.1039).
- [17] Pop, E., Varshney, V., and Roy, A. K., 2012. "Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications". *MRS Bulletin*, 37(12), pp. 1273-1281, doi: [10.1557/mrs.2012.203](https://doi.org/10.1557/mrs.2012.203).
- [18] Zhao, H., and Aluru, N. R., 2010. "Temperature and strain-rate dependent fracture strength of graphene". *Journal of Applied Physics*, 108(6), p. 064321, doi: [10.1063/1.3488620](https://doi.org/10.1063/1.3488620).
- [19] He, L., Guo, S., Lei, J., Sha, Z., and Liu, Z., 2014. "The effect of Stone-Thrower-Wales defects on mechanical properties of graphene sheets - A molecular dynamics study". *Carbon*, 75, pp. 124-132, doi: [10.1016/j.carbon.2014.03.044](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.03.044).
- [20] Roman, R. E., and Cranford, S. W., 2014. "Mechanical properties of silicene". *Computational Materials Science*, 82, pp. 50-55, doi: [10.1016/j.commatsci.2013.09.030](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.09.030).
- [21] lammps.sandia.gov - Sandia National Laboratories, 2018. "LAMMPS documentation". <https://lammps.sandia.gov/doc/Manual.html>.

برای حل هر مسئله، سه شبیه‌سازی مستقل با سرعت‌های اولیه متفاوت برای اتم‌ها اجرا می‌شود و مقادیر میانگین مدول یانگ، استحکام نهایی و کرنش نهایی گزارش می‌شوند [۱۸]. در نرم‌افزار LAMMPS، سرعت‌های اولیه به صورت تصادفی به اتم‌های متحرک اختصاص داده می‌شوند به گونه‌ای که دمای اولیه سیستم برابر با دمای ثابت مورد نظر در شبیه‌سازی باشد.

مطابق شکل ۳، انتظار می‌رود که مدول یانگ، استحکام نهایی و کرنش نهایی ورقه با یک نانوحفره به قطر 4 \AA در میانه و تحت کشش در راستای صندلی‌نما با افزایش دما کاهش یابد. با وجود این، تغییرات مدول یانگ و کرنش نهایی با دما یکنوا نیست. این بی‌نظمی با افزایش قطر نانوحفره بیشتر می‌شود. با هدف رفع این مشکل، تعداد شبیه‌سازی‌های مستقل برای چند مسأله معین افزایش داده شد و برای حل چند مسأله دیگر، تعداد گام‌های مرحله واهلش افزوده یا کاسته شد. افزایش تعداد شبیه‌سازی‌ها در یک مورد، نتایج را بهبود داد و مشخص شد که تعداد گام‌های مرحله واهلش نیز بر نتایج تأثیرگذار است.

چنان‌که در نمودارهای شکل ۳ ملاحظه می‌شود، به ازای دماهای بیشتر از دمای اتاق تا 1000 K ، مدول یانگ، استحکام نهایی و کرنش نهایی با افزایش دما کاهش می‌یابند. بنابراین، پیش‌بینی می‌شود غشای نانوحفره‌دار گرافن در دماهای زیاد استحکام کمتری داشته باشد و شکست آن به انرژی کمتری نیاز داشته باشد. این یافته‌ای مهم است که ضرورت طراحی صحیح یا تقویت غشای حفره‌دار گرافن را برای کاربردهای مفید آن آشکار می‌سازد.

مراجع

- [1] Geim, A. K., and Novoselov, K. S., 2007. "The rise of graphene". *Nature Materials*, 6, pp. 183-191, doi: [10.1038/nmat1849](https://doi.org/10.1038/nmat1849).
- [2] Heidarhaei, M., Shariati, M., and Eipakchi, H., 2018. "Effect of interfacial debonding on stress transfer in graphene reinforced polymer nanocomposites". *International Journal of Damage Mechanics*, 27(7), pp. 1105-1127, doi: [10.1177/1056789517724857](https://doi.org/10.1177/1056789517724857).
- [3] Huang, X., et al., 2012. "Functional nanoporous graphene foams with controlled pore sizes". *Advanced Materials*, 24(32), pp. 4419-4423, doi: [10.1002/adma.201201680](https://doi.org/10.1002/adma.201201680).
- [4] Liu, Y., and Chen, X., 2014. "Mechanical properties of nanoporous graphene membrane". *Journal of Applied Physics*, 115(3), p. 034303, doi: [10.1063/1.4862312](https://doi.org/10.1063/1.4862312).
- [5] Yuan, W., Chen, J., and Shi, G., 2014. "Nanoporous graphene materials". *Materials Today*, 17(2), pp. 77-85, doi: [10.1016/j.mattod.2014.01.021](https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.01.021).
- [6] Park, S., and Ruoff, R. S., 2009. "Chemical methods for the production of graphenes". *Nature Nanotechnology*, 4, pp. 217-224, doi: [10.1038/nnano.2009.58](https://doi.org/10.1038/nnano.2009.58).