



مطالعه هدایت حرارتی و نحوه توزیع دما تحت شرایط مرزی مختلف در کامپوزیت تقویت شده با

نانولوله‌های کربنی

^۱عزام ناظم الشیبانی؛ ^۲*سید علیرضا موسوی شیرازی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی (تحصیلات تکمیلی)
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه فیزیک

چکیده

کامپوزیت های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی که در آنها از نانولوله‌های کربنی به عنوان پرکننده‌ها برای استفاده از خواص فیزیکی منحصر به فردشان استفاده می‌شود، توجه روزافزونی را به خود جلب کرده و یک روند امیدوارکننده در فناوری نانو ایجاد کرده است. رفتار انتقال حرارتی در چنین کامپوزیت‌هایی از نظر تئوری بسیار مفید بوده ولیکن یک تحلیل نظری کامل از رفتار انتقال حرارتی این رساناهای نانولوله کربنی هنوز وجود ندارد. در این مقاله به بررسی و مطالعه چگونگی توزیع دما در یک صفحه ساخته شده با نانوکامپوزیت پلی متاکریلات تقویت شده با نانولوله‌های کربنی، تحت شرایط مرزی مختلف پرداخته می‌شود. بدین منظور روش عددی المان محدود، به کارگیری شده و نرم‌افزار Ansys-Workbench به عنوان ابزار استفاده از این روش مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد در حالی که دو لبه مجاور دارای شرط مرزی دمای ثابت باشند، کمینه دما در مقایسه با حالت قبل، افزایش چشمگیری نشان می‌دهد. در این حالت همچنین با گذشت زمان از سرعت افزایش دمای متوسط کاسته و سرعت افزایش دمای کمینه افزایش می‌یابد. همچنین در حالتی که دو لبه غیر مجاور دارای شرط مرزی دمای ثابت باشند ناحیه افزایش دما یافته در هر دو سمت صفحه به صورت متقارن رشد می‌کند. همچنین دمای متوسط صفحه نسبت به حالت قبل مقدار کمتری می‌باشد.

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد

^۲*استادیار و عضو هیات علمی

*Email: a_moosavi@azad.ac.ir

علاوه بر آن در حالتی که سه لبه از صفحه دارای شرط دمایی ثابت باشند کانتور توزیع دما بدین صورت است که در مرکز لبه چهارم صفحه، کمینه دما رخ می‌دهد.

کلمات کلیدی: روش المان محدود، نانوکامپوزیت، نانولوله کربنی، هدایت حرارتی.

۱- مقدمه

انتقال حرارت نقش مهمی در طیف گسترده‌ای از زمینه‌های مهندسی از تولید، میکروالکترونیک با چگالی توان بالا تا پردازش حرارتی ایفا می‌کند [۱].

مشکلی که معمولاً وجود دارد، رسانایی حرارتی پایین محیط انتقال حرارت (به عنوان مثال سیال انتقال حرارت یا ماتریس پلیمری) است که اغلب انتقال حرارت را ناکارآمد می‌کند. یکی از راه‌حل‌های ممکن برای چنین مشکلی پراکندگی ذرات با رسانایی حرارتی بالا (یا سیم‌ها و دیسک‌ها) در محیط اصلی انتقال حرارت برای افزایش رسانایی حرارتی آن است. برای کامپوزیت‌های جامد، ذرات نیتريد آلومینیوم به عنوان پرکننده برای افزایش هدایت حرارتی اپوکسی و ماتریس پلی آمید استفاده می‌شود [2,3].

اخیراً گزارش شده است که ذرات جامد کمتر ساییده (مانند نیتريد بور) هدایت حرارتی ماتریس پلیمری را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۴]. به موازات توسعه در کامپوزیت‌های جامد، مایع پراکنده شده با نانوذرات جامد (که "نانو سیالات" نامیده می‌شوند) نشان داده شده است که رسانایی حرارتی بسیار بالاتری را در مقایسه با سیالات پایه حتی برای بارگذاری ذرات بسیار کم نشان می‌دهد [5,6]. نتایج نشان می‌دهد که نانولوله‌ها ممکن است در تعدادی از کاربردهای عملی مورد استفاده قرار گیرند. پیشرفت‌های زیادی در تکنیک‌های سنتز صورت گرفته است که اکنون می‌توانند نانولوله‌های خالص نسبتاً خالص را در مقادیر گرم تولید کنند.

مطالعات روابط ساختار-توپولوژی-ویژگی در نانولوله‌ها به شدت توسط مدلسازی نظری پشتیبانی شده و در برخی موارد قبل از آن انجام شده است که به گسترش سریع این زمینه کمک کرده است. نانولوله‌های کربنی شبه یک بعدی، لوله‌های کاملاً مستقیم با قطرهایی در اندازه نانومتر و خواص نزدیک به فیبر گرافیت ایده‌آل هستند.

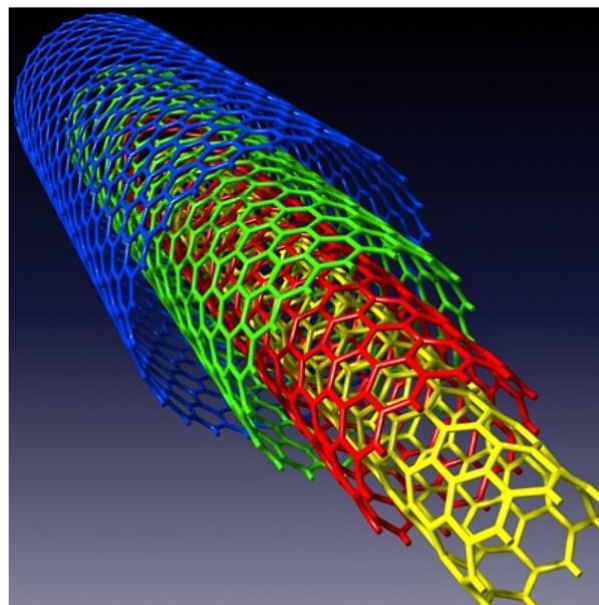
نانولوله‌های کربنی به طور تصادفی توسط Sumio Iijima در سال ۱۹۹۱، در حین مطالعه سطوح الکترودهای گرافیتی مورد استفاده در تخلیه قوس الکتریکی، کشف شدند [7]. مشاهدات و تجزیه و تحلیل او از ساختار نانولوله، مسیر جدیدی را در تحقیقات کربن آغاز کرد که تکمیل کننده فعالیت‌های رایج در تحقیقات فولرن بود. به نظر می‌رسد این لوله‌های

کوچک کربنی با استحکام باورنکردنی و ویژگی‌های الکترونیکی شگفت‌انگیز، آمادهٔ سبقت گرفتن از فولرن‌ها در رقابت به بازار فناوری هستند. این ساختار، توپولوژی و اندازه نانولوله‌ها است که خواص آنها را در مقایسه با ساختارهای اصلی مرتبط با گرافیت مسطح، مانند نمونه‌هایی که در الیاف کربن یافت می‌شوند، متمایز می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

نانولوله‌های کربنی اساساً به دو دسته تقسیم می‌شوند: نانولوله‌های کربنی تک جداره و نانولوله‌های کربنی چند جداره. علی‌رغم اشتراک آشکار، این دو گروه، به دلیل تفاوت‌های ساختاری، خواص فیزیکی متفاوتی با یکدیگر دارند. مهمترین ویژگی که نانولوله‌های کربنی تک جداره را متمایز می‌کند این است که دیواره نانولوله تنها از یک لایهٔ گرافین تشکیل شده است. به عبارت دیگر، نانولوله‌های کربنی تک جداره را می‌توان به صورت صفحات گرافین توصیف کرد که به طور یکپارچه به هم پیچیده شده و استوانه‌های توخالی را تشکیل می‌دهند. به همین دلیل است که اغلب از آنها به عنوان نانولوله‌های گرافین یاد می‌شود.

برخلاف نانولوله‌های تک جداره، نانولوله‌های کربنی چند جداره را می‌توان به عنوان یک آرایش متحدالمرکز از نانولوله‌های کربنی تک جداره در نظر گرفت، یعنی متشکل از لایه‌های متعدد گرافین (که از آنها به عنوان گرافیت هم نام برده می‌شود) که مطابق با شکل ۱ به طور یکپارچه به شکل لوله‌ای در هم پیچیده شده‌اند.



شکل ۱- نمایی از یک نانولوله چند جداره

به منظور مدل‌سازی نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله‌های کربنی که برای این پژوهش در نظر گرفته شده است، می‌بایست نخست، خواص ترمومکانیکی این نانوکامپوزیت مورد محاسبه قرار گیرد. پس از آن، با وارد کردن این خواص ترمومکانیکی در نرم افزار Ansys، می‌توان از آن‌ها به عنوان خواص ماده جدید برای انجام تحلیل استفاده کرد. برای محاسبه ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت مورد نظر، تئوری‌های مختلفی توسط محققان ارائه شده است. از این میان، تئوری‌های هالپین تسای و چارپی اصلاح شده از معروفترین این تئوری‌ها هستند که مدول یانگ و ضریب انبساط طولی نانوکامپوزیت را به صورت زیر تعریف می‌کنند [8-10].

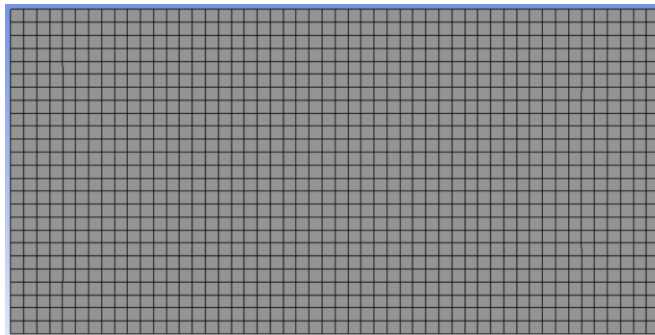
$$E_{CN} = E_m \left[\frac{3}{8} \left(\frac{1 + 2\xi\eta_L V_{CNT}}{1 - \eta_L V_{CNT}} \right) + \frac{5}{8} \left(\frac{1 + 2\eta_T V_{CNT}}{1 - \eta_T V_{CNT}} \right) \right]$$

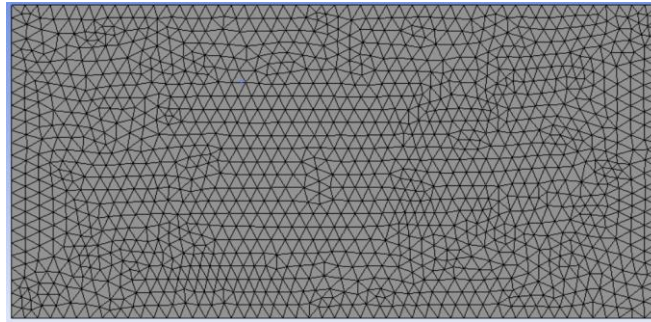
$$\alpha_{NC} = \frac{1}{2} \left[\frac{E_{CNT} V_{CNT} \alpha_{CNT} + E_m V_m \alpha_m}{E_{CNT} V_{CNT} + E_m V_m} (1 - \nu_{CNT} V_{CNT} - \nu_m V_m) + (1 + \nu_m) \alpha_m V_m + (1 + \nu_{CNT}) \alpha_{CNT} V_{CNT} \right]$$

که در آن، E_{CN} عبارت است از مدول یانگ نانوکامپوزیت و E_m مدول یانگ فاز ماتریس را نمایش می‌دهد.

بطوریکه: ξ بیانگر نسبت طول به قطر نانولوله، η نشان دهنده ضریب بهره‌برداری، V_{CNT} تابع کسر حجمی نانولوله در کامپوزیت می‌باشد. ضریب انبساط طولی نانوکامپوزیت، α_{NC} نشان داده می‌شود در حالی که α_{CNT} بیانگر ضریب انبساط طولی نانولوله است. α_m نشان دهنده ضریب انبساط طولی فاز ماتریس هستند. همچنین V_{CNT} و V_m به ترتیب ضریب پواسن نانولوله و فاز ماتریس می‌باشند.

در این قسمت به ارائه نتایج حاصل از تحلیل حرارتی و توزیع دمای یک صفحه نانوکامپوزیتی با فاز ماتریس از جنس پلی‌متاکریلات تقویت شده با نانولوله‌های کربنی تک جداره در نرم‌افزار Ansys Workbench پرداخته می‌شود. ابعاد ورق کامپوزیتی 1000×500 میلیمتر و توزیع حرارت به صورت دوبعدی فرض شده است. در بخش اول به ارائه نتایج حاصل از روند همگرایی مش پرداخته شده و امان مناسب جهت انجام تحلیل انتخاب خواهد شد.

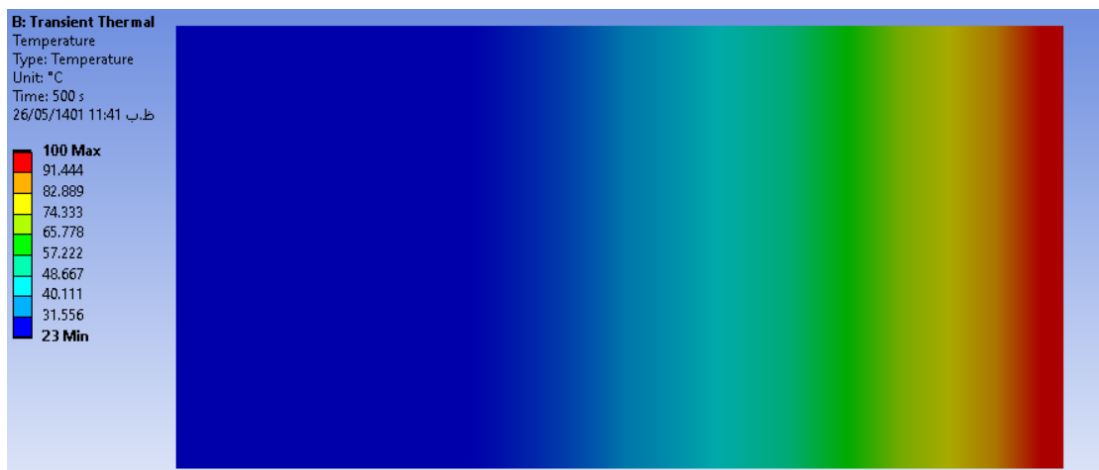




شکل ۲- نمای ظاهری المان‌های مربعی و مثلثی

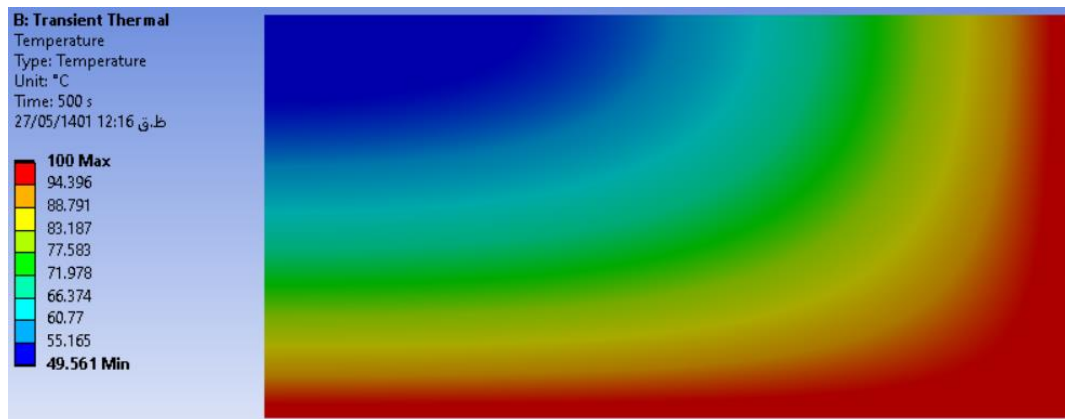
۳- نتایج و بحث

در صورتی که دمای 100°C به یکی از لبه‌های صفحه اعمال گردد، توزیع دما در آن پس از گذشت 500 ثانیه به صورت نمایش داده شده در شکل ۳ خواهد بود. همانگونه در این شکل مشاهده می‌شود در این زمان از تحلیل، دمای کمینه در صفحه نانو کامپوزیتی برابر با 23°C خواهد بود.



شکل ۳- توزیع دما در صفحه پس از گذشت 500 ثانیه در شرایط دمای 100°C داشتن برای یکی از لبه‌ها

کانتور توزیع دما در صفحه در صورتی که شرط مرزی دما در دو لبه مجاور در آن اعمال شده باشد در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در این حالت، کمینه دما پس از گذشت 500 ثانیه برابر است با 49.561°C که در مقایسه با حالت قبل، افزایش چشمگیری نشان می‌دهد.



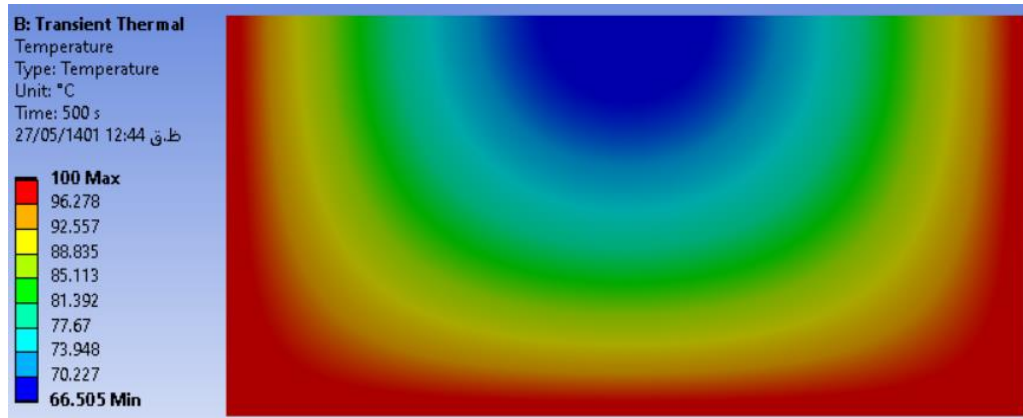
شکل ۴- کانتور توزیع دما در صفحه در صورت اعمال شرط مرزی دما در دو لبه مجاور

در شکل ۵، کانتور توزیع دما در شرایطی که دو لبه غیرمجاور صفحه دارای شرایط مرزی دمایی باشند نمایش داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که ناحیه افزایش دما یافته در هر دو سمت صفحه به صورت متقارن رشد کرده است.



شکل ۵- کانتور توزیع دما در صفحه در صورت اعمال شرط مرزی دما در دو لبه غیرمجاور

در شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که با اعمال شرط مرزی دمایی در سه لبه صفحه نانوکامپوزیتی، کانتور توزیع دما بدین صورت است که در مرکز لبه چهارم صفحه، کمینه دما رخ می‌دهد.



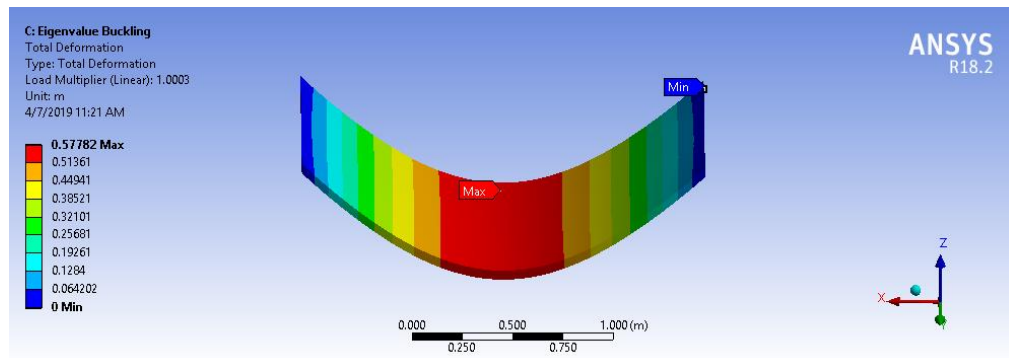
شکل ۶- کانتور توزیع دمای استخراج شده از نرم افزار Ansys در صفحه در صورت اعمال شرط مرزی دما در سه لبه

با اعمال جریان حرارتی در یکی از لبه‌های صفحه، کانتور توزیع دما مطابق شکل ۷ در جسم ایجاد می‌گردد که مشابه است با کانتور شکل ۳. اما مقادیر دمای کمینه و بیشینه در این مورد متفاوت است، چرا که در این شرایط، دیگر شرط دمای ثابت برای هیچیک از لبه‌ها در نظر گرفته نشده است.

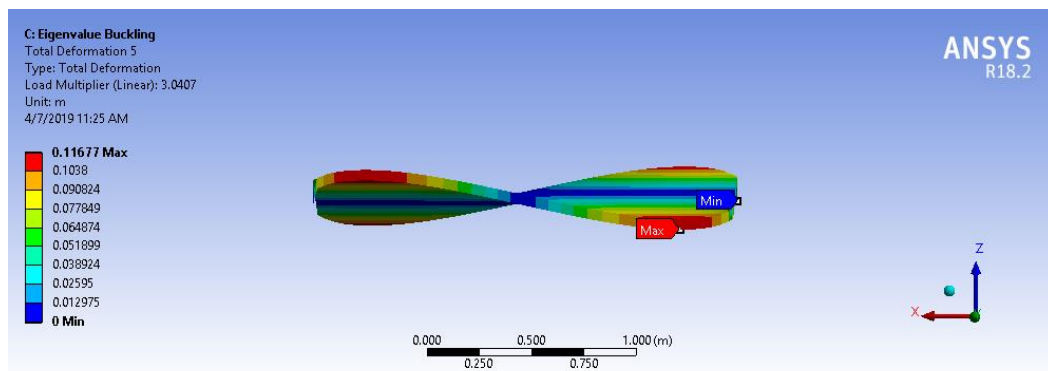


شکل ۷- کانتور توزیع دمای استخراج شده از نرم افزار Ansys تحت شرایط مرزی جریان حرارتی در یک لبه

برخلاف شرط مرزی دما ثابت مشاهده می‌شود که دمای میانگین در این حالت به صورت خطی تغییر می‌کند و در تمام طول زمان تحلیل، با شیبی ثابت افزایش می‌کند، این در حالی است که شیب نمودار دمای بیشینه در اوایل طول تحلیل بیشتر از اواخر آن است. همچنین دمای کمینه، تغییرات زیادی در طول تحلیل نشان نمی‌دهد. توزیع جابه‌جایی و تغییر شکل ورق در موده‌های اول تا پنجم کمانش در تحلیل اولیه و تحت شرایط تکیه‌گاهی ساده در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸- نحوه تغییر شکل و جابه‌جایی در موده‌های اول تا پنجم کمانش تحت تکیه‌گاه ساده



شکل ۹- نحوه تغییر شکل و جابه‌جایی در موده‌های اول تا پنجم کمانش تحت تکیه‌گاه ساده

۴- نتیجه گیری

در حالتی که یکی از لبه‌های صفحه دارای شرط مرزی دما باشد با گذشت زمان، سرعت افزایش دمای کمینه افزایش می‌یابد و ۲۰۰ ثانیه زمان لازم است تا گرما در طول صفحه هدایت شود. در حالتی که دو لبه مجاور دارای شرط مرزی دما ثابت باشند، کمینه دما در مقایسه با حالت قبل، افزایش چشمگیری نشان می‌دهد. در این حالت همچنین با گذشت زمان از سرعت افزایش دمای متوسط کاسته و سرعت افزایش دمای کمینه افزایش می‌یابد. در حالتی که دو لبه غیر مجاور دارای شرط مرزی دما-ثابت باشند ناحیه، افزایش دما یافته در هر دو سمت صفحه به صورت متقارن رشد می‌کند. همچنین دمای متوسط صفحه نسبت به حالت قبل مقدار کمتری می‌باشد.

در حالتی که سه لبه از صفحه دارای شرط دمایی ثابت باشند کانتور توزیع دما بدین صورت است که در مرکز لبه چهارم صفحه، کمینه دما رخ می‌دهد.

در حالتی که یک لبه از صفحه نانوکامپوزیتی دارای شرایط مرزی جریان حرارتی ثابت باشد مشاهده می‌شود که دمای میانگین در این حالت به صورت خطی تغییر می‌کند و در تمام طول زمان تحلیل، با شیبی ثابت افزایش می‌کند، این در حالی است که شیب نمودار دمای بیشینه در اوایل طول تحلیل بیشتر از اواخر آن است. همچنین دمای کمینه، تغییرات زیادی در طول تحلیل نشان نمی‌دهد.

در حالتی که دو لبه مجاور از صفحه دارای شرط مرزی جریان حرارتی ثابت باشند بیشینه دما در محل تلاقی این دو لبه ایجاد می‌شود. در این شرایط دمای بیشینه در جسم نسبت به حالتی که تنها یک لبه از آن دارای شرایط جریان حرارتی است کمتر است و دمای کمینه بیشتر از حالت قبل است، این نشان می‌دهد که در این شرایط میزان انتقال حرارت در صفحه، بیشتر از حالت قبل است و صفحه کامپوزیتی انتقال حرارت بهتری از خود نشان می‌دهد.

در حالتی که دو لبه غیر مجاور از صفحه دارای شرط جریان حرارتی ثابت باشند با گذشت زمان، شیب نمودار دمای بیشینه کاهش می‌یابد و شیب دمای کمینه دچار افزایش می‌گردد.

در حالتی که سه لبه از صفحه دارای شرط مرزی جریان حرارتی باشند دمای بیشینه و کمینه دقیقاً برابر است با دمای بیشینه و کمینه حالت قبل و در این حالت صرفاً نحوه توزیع دما متفاوت است و محل ایجاد دمای بیشینه در نقاط تلاقی لبه های صفحه می‌باشد.

مراجع

- [1] Incropera, Frank P., David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, and Adrienne S. Lavine. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Vol. 6. New York: Wiley, 1996.
- [2] Li, Lin, and D. D. L. Chung. "Thermally conducting polymer-matrix composites containing both AlN particles and SiC whiskers." *Journal of electronic materials* 23, no. 6 (1994): 557-564.
- [3] Xu, Yunsheng, D. D. L. Chung, and Cathleen Mroz. "Thermally conducting aluminum nitride polymer-matrix composites." *Composites Part A: Applied science and manufacturing* 32, no. 12 (2001): 1749-1757.
- [4] Ng, Hsiao Yen, Soo Khim Lau, and X. H. Lu. "Thermal conductivity, thermo-mechanical and rheological studies of boron nitride-filled polybutylene terephthalate." In *Materials Science Forum*, vol. 437, pp. 239-242. Trans Tech Publications Ltd., Zurich-Uetikon, Switzerland, 2003.
- [5] Eastman, Jeffrey A., S. R. Phillpot, S. U. S. Choi, and P. Keblinski. "Thermal transport in nanofluids." *Annual review of materials research* 34 (2004): 219.

- [6] Koblinski, Pawel, Jeffrey A. Eastman, and David G. Cahill. "Nanofluids for thermal transport." *Materials today* 8, no. 6 (2005): 36-44.
- [7] Iijima, Sumio, M. Yudasaka, R. Yamada, S. Bandow, K. Suenaga, F. Kokai, and K. Takahashi. "Nano-aggregates of single-walled graphitic carbon nano-horns." *Chemical Physics Letters* 309, no. 3-4 (1999): 165-170.
- [8] Ghasemi, Ahmad Reza, and Mohammad Mohammadi-Fesharaki. "Influence of different parameters on cured shapes and residual stresses of unsymmetric composite laminate reinforced by multi-wall carbon nanotubes." *Polymer Bulletin* 76, no. 11 (2019): 5751-5771.
- [9] Srivastava, V. K., and Shraddha Singh. "A micro-mechanical model for elastic modulus of multi-walled carbon nanotube/epoxy resin composites." *composites* 10 (2012): 12.
- [10] Hirsch, Teddy J. "Modulus of elasticity of concrete affected by elastic moduli of cement paste matrix and aggregate." In *Journal proceedings*, vol. 59, no. 3, pp. 427-452. 1962.