



بررسی تغییرات دمایی مختلف در نانولوله کربنی با شرایط مرزی جریان حرارتی ثابت

¹ عزام ناظم عبدالهادی الشیبانی؛ ^{2*} سید علیرضا موسوی شیرازی
¹ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی (تحصیلات تکمیلی)
² دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه فیزیک

چکیده

نانولوله های کربنی برای تقویت پلیمرها استفاده می شوند، زیرا نانولوله های کربنی بسیار قوی تر از پلیمرهای عادی هستند و ابعاد بزرگ تری نسبت به الیاف کربن معمولی دارند. از آنجایی که نانولوله های کربنی دارای رسانایی گرمایی غیرعادی بالایی هستند، این مسئله از نظر فناوری برای مدیریت انرژی بسیار مهم است. در این سیالات یا پلیمرهای آلی ترکیب شده با نانولوله کربنی، رابط نانولوله- ماتریس از اهمیت خاصی برخوردار است. نتایج نشان می دهد در حالتی که یکی از لبه های صفحه دارای شرط مرزی دما باشد با گذشت زمان، سرعت افزایش دمای کمینه افزایش می یابد و ۲۰۰ ثانیه زمان لازم است تا گرما در طول صفحه هدایت شود. همچنین در حالتی که دو لبه غیر مجاور، دارای شرط مرزی دمای ثابت باشند، دمای ناحیه افزایش یافته و در هر دو سمت صفحه به صورت متقارن رشد می کند. تکیه گاه استفاده شده در صفحه می تواند ترکیبی از انواع تکیه گاه های ساده و گیردار نیز باشد.

کلمات کلیدی: دما، صفحه نانوکامپوزیتی، فاز ماتریس، نانولوله.

۱- مقدمه

ساختار نانولوله ها به طور مشخص با الیاف کربن سنتی که برای چندین دهه برای نمونه به عنوان تقویت کننده در راکت های تنیس، قطعات قاب هواپیما و باتری ها به طور صنعتی مورد استفاده قرار گرفته اند متفاوت است [1]. مهم تر از همه،

¹ دانش آموخته کارشناسی ارشد

^{2*} استادیار و عضو هیات علمی

*Email: a_moosavi@azad.ac.ir

نانولوله‌ها برای اولین بار نشان دهنده ایده‌آل‌ترین، کامل‌ترین و منظم‌ترین فیبر کربن هستند که ساختار آن در سطح اتمی کاملاً شناخته شده است. اخیراً، نانولوله‌های کربنی در پلیمرها یا مواد دیگر تعبیه شده‌اند تا موادی با خواص انتقال الکتریکی و حرارتی خوب به دست آید. آزمایش‌ها افزایش قابل توجهی در هدایت حرارتی سیالات یا پلیمرهای آلی را نشان می‌دهند که با غلظت نسبتاً کم نانولوله‌های کربنی ترکیب شده‌اند.

نانولوله‌ها از سایر الیاف کربن ساخته شده و آنها را همراه با گونه‌های فولرن مولکولی در دسته خاصی از مواد اولیه قرار می‌دهد. در میان نانولوله‌ها، دو نوع مختلف که از نظر آرایش سیلندرهای گرافین متفاوت هستند، در کانون توجه قرار دارند. نانولوله‌های چند جداره مجموعه‌ای از چندین سیلندر گرافین متحدالمرکز هستند و در مقایسه با نانولوله‌های تک جداره که استوانه‌های جداگانه‌ای با قطر ۱ تا ۲ نانومتر هستند، ساختارهای بزرگ‌تری دارند [2]. اولی را می‌توان به عنوان یک سیستم گرافیت در مقیاس متوسط در نظر گرفت، در حالی که دومی واقعاً یک مولکول بزرگ است. با این حال، نانولوله‌های تک جداره تمایل زیادی به جمع شدن در طناب‌هایی که متشکل از توده‌های چند ده لوله مجزا که در یک شبکه مثلثی یک بعدی سازماندهی شده‌اند، نشان می‌دهند [3]. نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که در اکثر کاربردها، اگرچه نانولوله‌های منفرد باید جذاب‌ترین ویژگی‌ها را داشته باشند، اما باید با رفتار سنگدانه‌ها، همانطور که در نمونه‌های واقعی تولید می‌شود، مقابله کرد. روش‌های کلی که برای تولید نانولوله‌ها وجود دارد عبارتند از: تخلیه قوس و تبخیر لیزری [4,5].

۲- روش کار

در اینجا به ارائه مدل‌سازی و نتایج حاصل از مدل‌سازی کمانش حرارتی ورق پلیمری PMMA تقویت شده با نانولوله‌های تک‌جداره در نرم افزار آلمان محدود Ansys، پرداخته می‌شود و عوامل مؤثر و چگونگی تأثیر آن‌ها بر کمانش حرارتی این ورق مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق، به منظور انجام تحلیل از پلی متاکریلات به عنوان فاز ماتریس و نانولوله‌های کربنی تک جداره به عنوان فاز تقویت کننده نانوکامپوزیت استفاده می‌شود. خواص مکانیکی و حرارتی مورد نیاز برای تعریف ماده جدید جهت انجام تحلیل در نرم افزار Ansys عبارتند از: ۱- چگالی، ۲- ضریب انتقال حرارت، ۳- مدول یانگ، ۴- مدول برشی، ۵- ضریب انبساط حرارتی، ۶- ضریب پواسن. دلیل انتخاب و استفاده از PMMA برای فاز ماتریس در نانوکامپوزیت مورد نظر در این پژوهش آن است که در تحقیقات بسیاری، این ماده به

عنوان فاز ماتریس مورد استفاده قرار گرفته است و لذا خواص آن به صورت دقیق در بسیاری از مراجع ذکر شده است.

خواص مکانیکی و حرارتی مورد نیاز این ماده در جدول ۱ نمایش داده شده است [6,7,8]:

جدول ۱- خواص مکانیکی و حرارتی پلی متاکریلات

K (W/m°C)	E (GPa)	ν	$\alpha(10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1})$	G (GPa)	$\rho(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3})$
0.19	3.2	0.34	۷۶	1.7	۱۲۰۰

۱-۲- خواص نانولوله های کربنی تک جداره

خواص حرارتی و مکانیکی نانولوله های کربنی تک جداره در مراجع مختلف ارائه و محاسبه شده است. برای پژوهش

حاضر، این خواص در جدول ۲ در نظر گرفته شده و مورد استفاده قرار گرفته است [9,10].

جدول ۲- خواص حرارتی و مکانیکی نانولوله های کربنی

$E_{11}(\text{GPa})$	$E_{22}(\text{GPa})$	$G_{12}(\text{GPa})$	ν_{12}	$\alpha_{11}(10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1})$	$\alpha_{22}(10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1})$	$k(\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C})$	$\rho(\text{Kg}/\text{m}^3)$
5646.6	۷۰۸۰	1.9445	0.175	3.4584	5.1682	۲۱۰۰	1870.45

به منظور محاسبه خواص نانوکامپوزیت با استفاده از قانون مخلوط، می توان برای نانوکامپوزیت با ۱۲ درصد حجمی

نانولوله کربنی تک جداره و ماتریس پلی متاکریلات مدول یانگ در دو راستا را به صورت زیر مورد محاسبه قرار داد

[11,12]:

$$E_{11} = 0.137 * 0.12 * 5646.6 + 0.88 * 3.2 = 95.6461 \text{ GPa}$$

$$1.022/E_{22} = \frac{0.12}{7080} + \frac{0.88}{3.2} \rightarrow E_{22} = 3.716135 \text{ GPa}$$

همچنین مدول برشی برابر است با:

$$\frac{0.7154}{G_{12}} = \frac{0.12}{1.9445} + \frac{0.88}{1.7} \rightarrow G_{12} = 1.234812 \text{ GPa}$$

بر اساس آنچه ذکر شد مدول برشی در راستاهای دیگر عبارتند از:

$$G_{13} = 1.234812 \text{ GPa} , \quad G_{23} = 1.481774 \text{ GPa}$$

ضریب پواسن نیز به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$v_{12} = 0.12 * 0.175 + 0.88 * 0.34 = 0.3202$$

چگالی نیز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\rho = 0.12 * 1870.45 + 0.88 * 1200 = 1280.454 \text{ Kg/m}^3$$

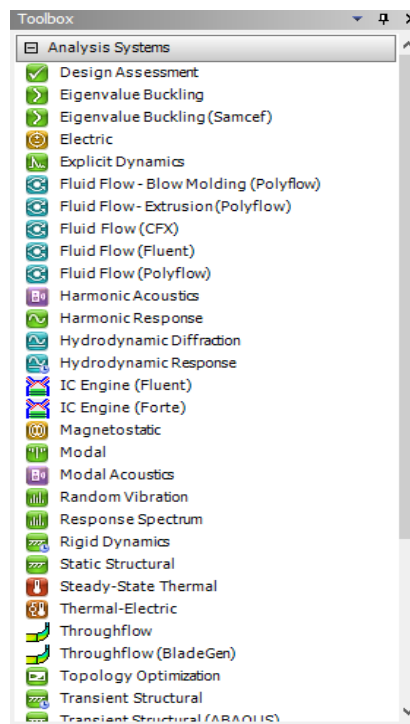
همچنین در نهایت، ضریب انبساط طولی نانوکامپوزیت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_{11} = 0.12 * 3.4584e^{-6} + 0.88 * 76e^{-6} = 67.29501 e^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{22} &= (1 + 0.175) * 0.12 * 5.1682 e^{-6} + (1 + 0.34) * 0.88 * 76 e^{-6} - 0.3202 * 67.29501 e^{-6} \\ &= 68.8 e^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

۲-۲- روند کلی مدلسازی

تحلیل کمانش حرارتی، در نرم‌افزار Ansys به صورت یک تحلیل کوپله انجام می‌گردد. از آنجا که در نرم‌افزار مذکور مطابق شکل ۱ برای تحلیل در هر زمینه‌ای محیطی جداگانه در نظر گرفته شده است، برای تحلیل کمانش حرارتی نیز می‌بایست از ترکیب سه محیط مختلف استفاده نمود.

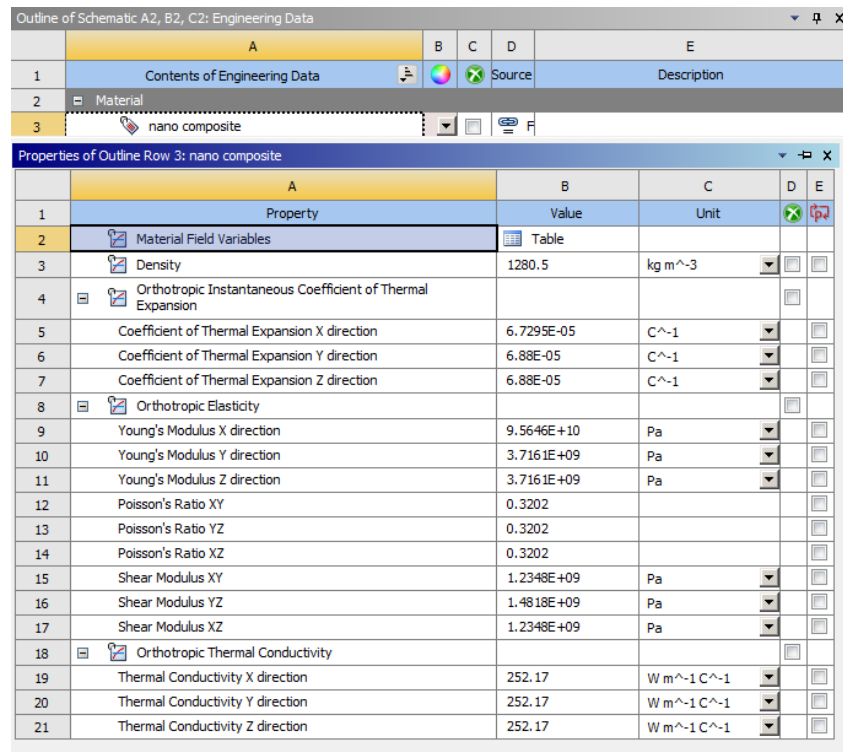


شکل ۱- تعدادی از محیط‌های تحلیل در نرم‌افزار Ansys

بدین ترتیب ابتدا می‌بایست بارگذاری حرارتی در حالت گذرا بر روی سازه انجام شود و سپس تحلیل کماتشی آن انجام پذیرد.

۳-۲- تعریف کردن جنس ماده

اولین محیط مورد استفاده برای تحلیل، محیط تحلیل حرارتی گذرا می‌باشد. لذا تمامی خواص مکانیکی و حرارتی مورد نظر برای تحلیل در هر سه محیط در قسمت داده مهندسی^۳ همین محیط وارد می‌شود و تا مرحله آخر تحلیل، نرم‌افزار، خواص مورد نیاز را از همین محیط فراخوانی خواهد نمود. شکل ۲ وارد شدن خواص مکانیکی و حرارتی محاسبه شده برای نانو کامپوزیت به نرم افزار Ansys را نمایش می‌دهد. همانگونه که در شکل مذکور قابل مشاهده است به دلیل غیر همگن بودن ماده، تمامی خواص در سه راستای X و Y و Z به صورت جداگانه برای نرم افزار تعریف شده است و همگی در دستگاه استاندارد بین المللی (SI) می‌باشند.

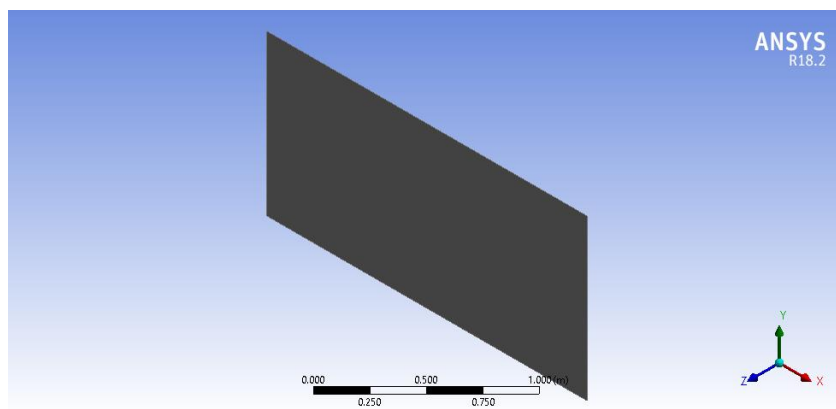


Outline of Schematic A2, B2, C2: Engineering Data				
A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data	Source		Description
2	Material			
3	nano composite			
Properties of Outline Row 3: nano composite				
A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1280.5	kg m ⁻³	
4	Orthotropic Instantaneous Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion X direction	6.7295E-05	C ⁻¹	
6	Coefficient of Thermal Expansion Y direction	6.88E-05	C ⁻¹	
7	Coefficient of Thermal Expansion Z direction	6.88E-05	C ⁻¹	
8	Orthotropic Elasticity			
9	Young's Modulus X direction	9.5646E+10	Pa	
10	Young's Modulus Y direction	3.7161E+09	Pa	
11	Young's Modulus Z direction	3.7161E+09	Pa	
12	Poisson's Ratio XY	0.3202		
13	Poisson's Ratio YZ	0.3202		
14	Poisson's Ratio XZ	0.3202		
15	Shear Modulus XY	1.2348E+09	Pa	
16	Shear Modulus YZ	1.4818E+09	Pa	
17	Shear Modulus XZ	1.2348E+09	Pa	
18	Orthotropic Thermal Conductivity			
19	Thermal Conductivity X direction	252.17	W m ⁻¹ C ⁻¹	
20	Thermal Conductivity Y direction	252.17	W m ⁻¹ C ⁻¹	
21	Thermal Conductivity Z direction	252.17	W m ⁻¹ C ⁻¹	

شکل ۲- خواص نانو کامپوزیت وارد شده در نرم افزار Ansys

۲-۴- هندسه مسأله

همانند خواص ماده، هندسه مسأله نیز در محیط اولیه که همان محیط تحلیل حرارتی گذرا می‌باشد مدلسازی می‌گردد و تا مرحله آخر، تحلیل هندسه مسأله از روی هندسه ای که در این محیط طراحی شده است فراخوانی می‌گردد. برای طراحی هندسه ورق از قسمت Geometry استفاده می‌شود. با باز کردن این محیط و کشیدن هندسه دو بعدی ورق و سپس نسبت دادن یک پوسته با ضخامت مشخص، هندسه ورق ایجاد و آماده تحلیل می‌گردد. ورق در نظر گرفته شده برای شروع تحلیل، یک ورق مستطیلی دارای ابعاد $۰/۰۵ * ۱ * ۲$ متر می‌باشد که در شکل ۳ نمایش داده شده است.

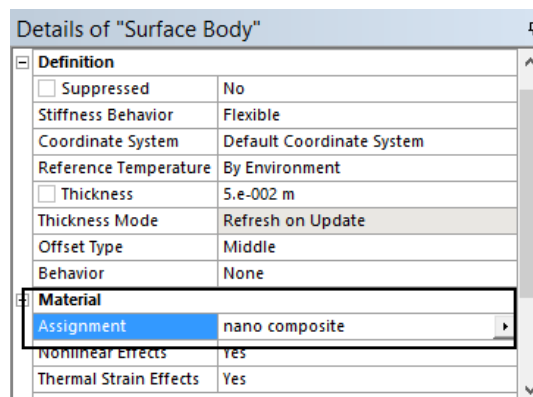


شکل ۳- نمای سه بعدی ورق طراحی شده برای انجام تحلیل

۲-۵- تحلیل حرارتی

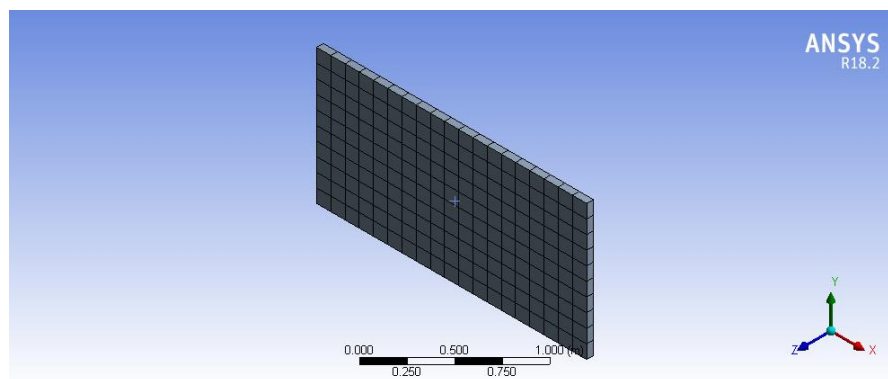
پس از طراحی هندسه ورق می‌بایست نوع بارگذاری و شرایط مرزی دمایی برای انجام تحلیل حرارتی، مشخص شود. برای این منظور از قسمت Model استفاده می‌گردد.

در این قسمت در ابتدا نانو کامپوزیت تعریف شده در بخش قبل مطابق با شکل ۴ به سازه نسبت داده می‌شود.



شکل ۴- نسبت دادن نانو کامپوزیت به ورق

پس از اعمال جنس به سازه، می بایست عملیات گسسته سازی (المان بندی یا مش ریزی) انجام گیرد. در صورتی که کاربر به صورت دستی، المانی برای سازه مورد نظر تعریف نکند، نرم افزار به صورت اتوماتیک یک نوع مش ساده برای جسم در نظر می گیرد. از آنجا که در تحلیل اولیه، صرفاً رسیدن به یک پاسخ اولیه مدنظر است، این اجازه به نرم افزار داده می شود تا یک المان دلخواه برای جسم، در نظر بگیرد. در مراحل بعدی تحلیل، به انتخاب بهترین نوع و اندازه برای المان پرداخته می شود. در شکل ۵، المان اولیه ای که نرم افزار برای ورق اعمال کرده است نشان داده شده است.



شکل ۵- المان بندی اولیه ورق

پس از انجام المان بندی، بایستی شرایط مرزی دمایی به سازه اعمال گردد. برای اعمال دما به سازه سه روش، قابل استفاده است:

روش اول، اعمال یک دمای ثابت به کل ورق می‌باشد. در صورتی که یک دمای ثابت به کل ورق اعمال شود به دلیل وجود یک شرط مرزی، این سازه قابل تحلیل نخواهد بود.

روش دوم، اعمال شرط مرزی دما به لبه های سازه و انتقال حرارت جابه‌جایی^۴ در کل ورق می‌باشد. این روش به دلیل ایجاد گرادیان دما در قسمت های مختلف سازه، دقت تحلیل را پایین می‌آورد. لذا این شرط دمایی برای تحلیل چندان مناسب نخواهد بود.

روش سوم، اعمال یک انتقال حرارت جابه‌جایی به کل سازه می‌باشد که هم قابل تحلیل است و هم توزیع دما در کل سازه به صورت یکنواخت ایجاد می‌شود. لذا برای انجام فرآیند تحلیل، از این نوع بارگذاری حرارتی استفاده خواهد شد.

۲-۶- تحلیل استاتیکی

پس از انجام تحلیل حرارتی، برای انجام تحلیل تنش اولیه از محیط تحلیل استاتیکی استفاده می‌شود. در این محیط، نرم افزار به صورت خودکار از همان ماده، هندسه و مش ایجاد شده در محیط قبلی استفاده می‌کند.

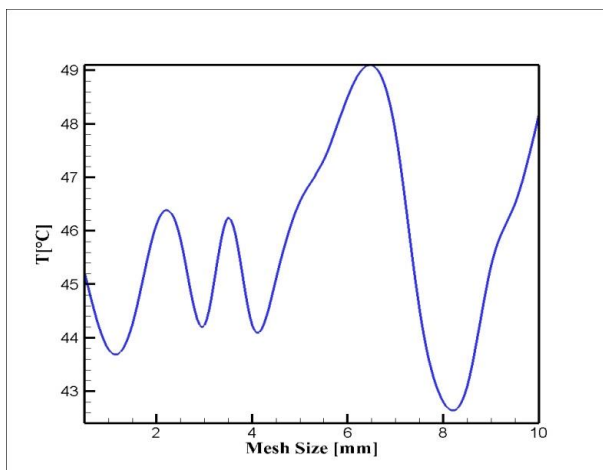
پس از ورود به این محیط تنها نیاز است تا شرایط مرزی استاتیکی برای سازه تعریف گردد تا طبق همان توزیع دمایی که در مرحله قبل در آن ایجاد شده است، توزیع تنش استاتیکی در آن محاسبه شود. برای این منظور بدون اعمال هیچگونه بار مکانیکی، موقعیت و نوع تکیه گاه مورد نظر برای سازه در آن مشخص می‌شود. برای تحلیل اولیه از تکیه گاه ساده در چهار گوشه سازه استفاده می‌شود.

۳- نتایج و بحث

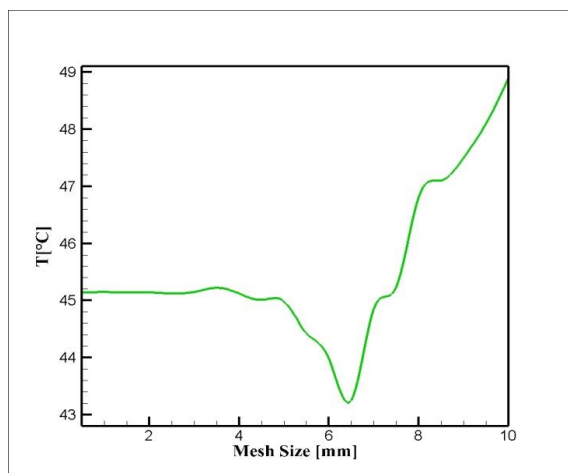
در صورتی که دمای 100°C به یکی از لبه های صفحه اعمال گردد، توزیع دما در آن پس از گذشت ۵۰۰ ثانیه به صورت نمایش داده شده در شکل ۶ خواهد بود. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود در این زمان از تحلیل، دمای کمینه در صفحه نانوکامپوزیتی برابر با 23°C خواهد بود. پس از انجام تحلیل استاتیکی، مدل ایجاد شده، آماده انجام تحلیل کمانش و محاسبات مربوط به این تحلیل است. بدین منظور پس از ورود به محیط تحلیل کمانش، می‌توان به بررسی توزیع تنش، کرنش، جابه‌جایی و بار بحرانی برای مودهای مختلف کمانش پرداخت. در این محیط می‌توان تعداد مودهای مورد نظر برای تحلیل را انتخاب نموده و توزیع تنش، کرنش و جابه‌جایی برای هر یک از این مودها را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار داد. حال به ارائه نتایج حاصل از تحلیل حرارتی و توزیع دمای یک صفحه نانوکامپوزیتی با فاز ماتریس

⁴ Convection

از جنس پلی متاکریلات تقویت شده با نانولوله‌های کربنی تک‌جاره در نرم‌افزار Ansys پرداخته می‌شود. ابعاد ورق کامپوزیتی ۱۰۰۰×۵۰۰ میلیمتر و توزیع حرارت به صورت دو بعدی فرض شده است.

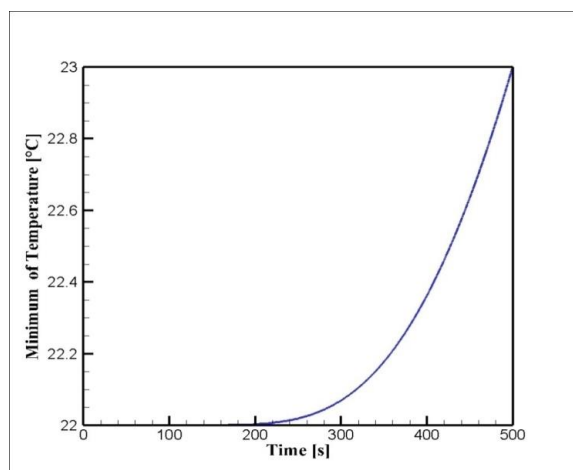


شکل ۶- تغییرات دمای میانگین در ثانیه ۵۰۰ برای سایزهای مختلف المان‌های مثلثی

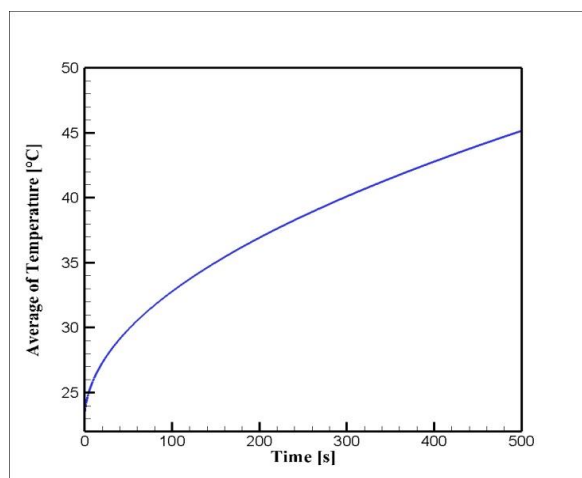


شکل ۷- تغییرات دمای میانگین در ثانیه ۵۰۰ برای سایزهای مختلف المان‌های مربعی

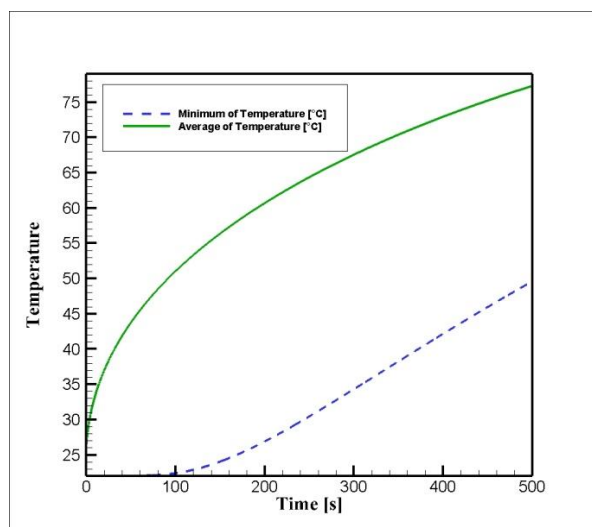
همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود تا ثانیه ۲۰۰، دمای کمینه در صفحه، همان ۲۲°C می‌باشد که این نشان می‌دهد که ۲۰۰ ثانیه زمان لازم است تا گرما در طول صفحه هدایت شود. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که با گذشت زمان، سرعت افزایش دمای کمینه افزایش می‌یابد.



شکل ۸- نمودار دمای کمینه در صفحه در صورتی که یکی از لبه های آن دارای شرط دمای ثابت باشد

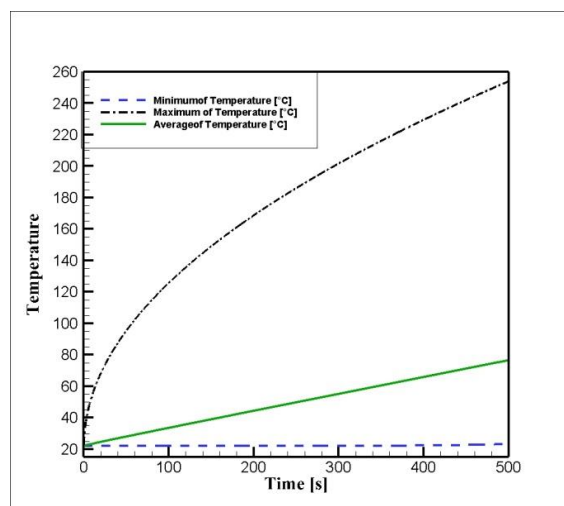


شکل ۹- نمودار دمای میانگین در صفحه در صورتی که یکی از لبه های آن دارای شرط دمای ثابت باشد



شکل ۱۰- تغییرات دمای کمینه و متوسط در حالتی که دو لبه مجاور از صفحه دارای شرط دما باشند

همچنین در شکل ۱۱، نمودار دماهای بیشینه، کمینه و میانگین در جسم، به نمایش در آمده‌اند. بر خلاف شرط مرزی که دما ثابت است در اینجا مشاهده می‌شود که دمای میانگین در این حالت به صورت خطی تغییر می‌کند و در تمام طول زمان تحلیل، با شیبی ثابت افزایش می‌یابد. 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.

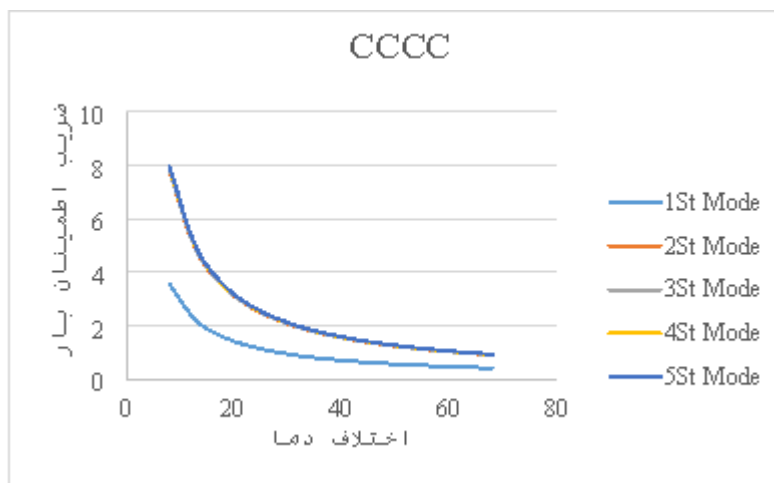


شکل ۱۱- تغییرات دمای بیشینه، میانگین و کمینه در طول تحلیل با شرایط مرزی جریان حرارت ثابت در یک لبه

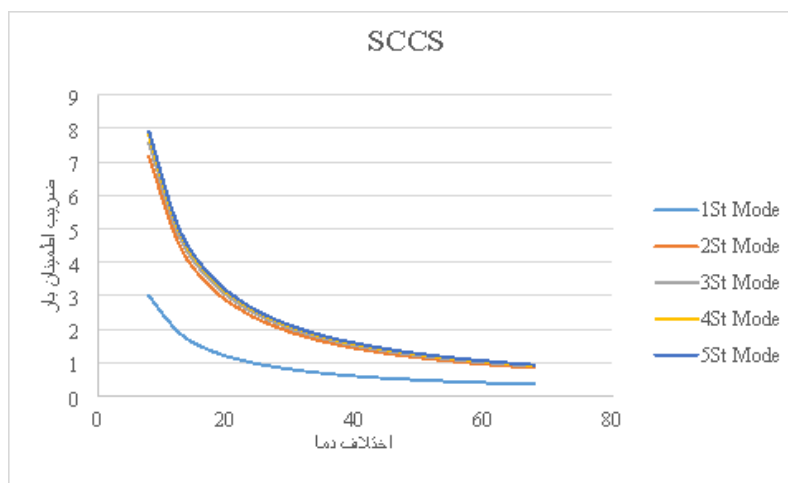


شکل ۱۲- نحوه قرارگیری تکیه گاه ها در حالت SCCS

پس از انجام تحلیل استاتیکی، مدل ایجاد شده آماده انجام تحلیل کمانش و محاسبات مربوط به این تحلیل است. بدین منظور پس از ورود به محیط تحلیل کمانش، می توان به بررسی توزیع تنش، کرنش، جابه جایی و بار بحرانی برای مدهای مختلف کمانش پرداخت. در این محیط می توان تعداد مود های مورد نظر برای تحلیل را انتخاب نموده و توزیع تنش، کرنش و جابه جایی برای هر یک از این مود ها را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار داد.



شکل ۱۳- تغییرات ضریب اطمینان بار برای مود های مختلف با تغییر دما



شکل ۱۴- تغییرات ضریب اطمینان بار برای مود های مختلف با تغییر دما

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر به بررسی چگونگی توزیع دما در یک صفحه نانوکامپوزیتی از جنس پلی متاکریلات تقویت شده با نانولوله های کربنی تک جداره پرداخته شد. نکته مهمی که با بررسی نتایج تحلیل برای این حالت و مقایسه آن با حالت تکیه گاه ساده می توان بدان پی برد، افزایش ضریب اطمینان بار برای حالت تکیه گاه گیردار نسبت به تکیه گاه ساده است. همانگونه که مشاهده شد اختلاف دمای بحرانی برای مود اول در این حالت حدود 30°C می باشد که ۵۰ درصد نسبت به حالت قبل افزایش نشان می دهد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که سازه در این حالت نسبت به کماتش مقاومتر است. علاوه بر تکیه گاه های ساده و گیردار، تکیه گاه استفاده شده در ورق، می تواند ترکیبی از انواع تکیه گاه های ساده و گیردار نیز باشد.

مراجع

- [1] Dresselhaus, M. S., G. Dresselhaus, K. Sugihara, I. L. Spain, and H. A. Goldberg. "Graphite Fibers and Filaments, Springer-Verlag." *New York* (1988): 35-84.
- [2] Ajayan, Pulickel M., and Otto Z. Zhou. "Applications of carbon nanotubes." *Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties, and applications* (2001): 391-425.
- [3] Arora, Neha, and N. N. Sharma. "Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review." *Diamond and related materials* 50 (2014): 135-150.
- [4] Kroto, Harold W., James R. Heath, Sean C. O'Brien, Robert F. Curl, and Richard E. Smalley. "C60: Buckminsterfullerene." *nature* 318, no. 6042 (1985): 162-163.
- [5] Journet, Catherine, and Patrick Bernier. "Production of carbon nanotubes." *Applied physics A: Materials science & processing* 67, no. 1 (1998).
- [6] Zhidong, Han. "Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes and Their Polymer Nanocomposites." *A Review. Progress in Polymer Science* 36 (2011): 7.
- [7] TabkhPaz, Majid, Shaghayegh Shajari, Mehdi Mahmoodi, Dong-Yeob Park, Hamsini Suresh, and Simon S. Park. "Thermal conductivity of carbon nanotube and hexagonal boron nitride polymer composites." *Composites Part B: Engineering* 100 (2016): 19-30.
- [8] Treacy, MM JEBBESSEN, Thomas W. Ebbesen, and John M. Gibson. "Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes." *nature* 381, no. 6584 (1996): 678-680.
- [9] Mohammadimehr, Mehdi, H. B. Zarei, Ali Parakandeh, and Ali Ghorbanpour Arani. "Vibration analysis of double-bonded sandwich microplates with nanocomposite facesheets reinforced by symmetric and un-symmetric distributions of nanotubes under multi physical fields." *Structural Engineering and Mechanics* 64, no. 3 (2017): 361-379.
- [10] Louie, Steven G., and Marvin L. Cohen. *Conceptual foundations of materials: a standard model for ground-and excited-state properties*. Elsevier, 2006.
- [11] Kroto, Harold W., James R. Heath, Sean C. O'Brien, Robert F. Curl, and Richard E. Smalley. "C60: Buckminsterfullerene." *nature* 318, no. 6042 (1985): 162-163.
- [12] 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.