بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

# اثرات حرارتی تپ لیزر میلی‌ثانیه روی کامپوزیت اپوکسی-کربن

**رضا گودرزی**

**پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی**

**rgodarzi@aeoi.org.ir**

**چکیده – در این مقاله، اثرات حرارتی ناشی از جذب انرژی تپ لیزر پس از اندرکنش با کامپوزیت اپوکسی-کربن بررسی شده است. جذب انرژی لیزر سبب افزایش دما با توزیع گوسی شکل شده است و به دلیل اعمال انرژی لیزر در یک بازه زمانی کوتاه، به کامپوزیت شوک وارد شده است؛ اثرات تنشی کامپوزیت پس از تابش تپ لیزر به دست آمده و توزیع آن در سطح نمونه حاکی از اعمال فشار قابل توجهی به نمونه است که به طور شعاعی گسترش یافته است. در جهت عمقی، با محاسبه بیشینه تنش، نشان داده شده است که با کاهش جذب انرژی لیزر، اثرات تنشی نیز کاهش یافته است.**

کلید واژه- اپوکسی، اثرات حرارتی، کامپوزیت، کربن، لیزر میکروثانیه

# Thermal effects of milliseconds laser pulse on carbon-epoxy composite

**Reza Goodarzi**

**Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute,
rgodarzi@aeoi.org.ir**

**Abstract- In this paper, the thermal effects of laser pulsed energy absorption after interaction with an epoxy-carbon composite are investigated. The absorption of laser energy increases the temperature by the Gaussian distribution and shocks the composite due to the applying the laser pulse in a short period of time; The stress effects of the composite are obtained after laser pulse irradiation and its distribution on the sample surface indicates that significant pressure is applied to the sample, which is radially expanded. In the deep direction, by calculating the maximum stress, it is shown that with decreasing laser energy absorption, the effects of straw stress are reduced.**

Keywords: Epoxy, Thermal effects, Composite, Carbon, Milliseconds laser

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04 ]

## مقدمه

استفاده از کامپوزیت‌ها از زمان‌های گذشته در بین مردم رواج داشته است، به‌عنوان مثال افزودن کاه به گل جهت تقویت گل و ساخت آجری مقاوم جهت استفاده در بناها از اولین استفاده‌های مردم از این سیستم بوده است. مثال دیگر تقویت بتن توسط میله‌های فولادی می‌باشد که قدمت آن به سال ۱۸۰۰ میلادی باز می‌گردد تاریخچه مواد پلیمری تقویت شده با الیاف به سال‌های ۱۹۴۰ در صنایع دفاعی و به خصوص کاربردهای هوا فضا بر می‌گردد [۱].

یک ماده با دو یا چند جز مشخص را می‌توان یک کامپوزیت در نظر گرفت درصورتی‌که فازها و اجزای تشکیل‌دهنده آن خواص کاملاً متفاوتی با یکدیگر داشته باشند. ترکیب دو یا چند ماده با یکدیگر به طوری که به صورت شیمیایی مجزا و غیر محلول در یکدیگر باشند و خواص سازه‌ای این ترکیب نسبت به هریک از اجزاء تشکیل‌دهنده آن به تنهایی در موقعیت برتری قرار بگیرد کامپوزیت می‌نامند. کامپوزیت ترکیبی است از حداقل دو ماده مجزا با فصل مشترک مشخص بین هر جزء تشکیل‌دهنده. در مهندسی مواد به موادی گفته می‌شود که از یک فاز زمینه (ماتریس) و یک تقویت‌کننده (پرکننده) تشکیل‌شده باشند.

کامپوزیت از دو قسمت اصلی ماتریس و تقویت‌کننده تشکیل شده‌است. فاز تقویت کننده که از الیاف در گروه‌های مختلف تشکیل‌شده و فاز ماتریس که شامل رزین‌ها می‌باشد. ماتریس با احاطه کردن تقویت‌کننده آن را در محل نسبی خودش نگه می‌دارد. تقویت‌کننده موجب بهبود خواص مکانیکی ساختار می‌گردد. تقویت‌کننده می‌تواند به صورت فیبرهای کوتاه و یا بلند و پیوسته باشد. الیاف‌های تقویت‌کننده، تحمل‌کننده اصلی بارها می‌باشند و زمینه (ماتریس) فراهم‌سازی بستر مناسب جهت انتقال بار از الیافی به الیاف دیگر را بر عهده دارد.

کامپوزیت‌های پلیمری به دو شکل ورقه‌ای و میلگرد وجود دارند و بر اساس فیبر تشکیل دهنده آن‌ها به سه دسته: الیاف کربنی، الیاف شیشه و الیاف آرامید تقسیم می‌شوند. مهم‌ترین استفاده از این کامپوزیت‌ها در صنعت مقاوم‌سازی و ترمیم و تقویت سازه‌ها می‌باشد.

فیبر کربن ماده‌ای است که از الیاف بسیار نازکی که دارای اتم‌های کربن هستند ساخته می‌شود. این اتم‌ها در یک آرایش کریستالی میکروسکوپی، در جهت طولی با هم پیوند دارند. این آرایش کریستالی هست که فیبر کربن را به شدت محکم می‌سازد. فیبر کربن برای ساخت مواد کامپوزیتی همراه با رزین پلاستیکی استفاده می‌شود. فیبر کربن دارای استحکام فولاد است، در حالی که بسیار سبک است و همچنین انعطاف‌پذیر است. این الیاف همچنین در صورت حرارت دادن منبسط نمی‌شوند و در کل به دلیل مقاومت بالای حرارتی نمی‌سوزند. این فیبر در مقابل خم شدن و کشیدگی آسیب نمی‌بیند و بسیار مقاوم است اما اگر در برابر یک ضربه‌ی ناگهانی زیاد قرار گیرد مانند ضربه با چکش، می‌شکند. فیبر کربن دارای بهترین نسبت وزن به استقامت است [۲].

استحکام یک کامپوزیت کربنی دو دلیل اصلی دارد: علت اول سختی ذاتی کربن و ماتریس استفاده شده است. علت دوم این است که واکنشی شیمیایی بین دو ماده‌ی مورد بحث رخ می‌دهد. ویژگی‌های کامپوزیت کربن عبارتند از: وزن و چگالی کم، رسانایی الکتریکی و حرارتی خوب، ضریب انبساط حرارتی پایین و حفظ استحکام در دمای بالا. این ویژگی‌ها شده که از این ماده در صنعت هوافضا، در ساخت لوازم ورزشی مانند راکت تنیس، چوب گلف، کمان و ... استفاده می‌شود. پره‌های استفاده شده در توربین‌های بادی از فیبر کربن است. فیبر کربن در صنایع خودروسازی در ساخت اجزای داخلی کابین خودرو و در خودروهای لوکس از قطعات فیبر کربن برای به وجود آمدن خواص

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04 ]

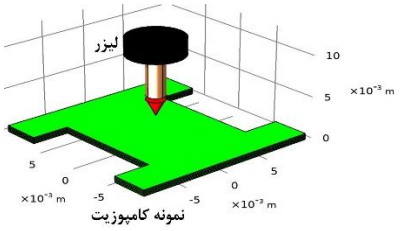
آیرودینامیکی مثبت استفاده شده است. از دیگر ویژگی‌های کامپوزیت‌های کربنی، مقاومت بسیار عالی در مقابل خوردگی است. از اینرو کاربرد آن‌ها در بتن‌آرمه به جای میلگردهای فولادی، مورد توجه قرار گرفته است [۱].

علاوه بر کاربردهای ساختاری، از کامپوزیت‌ها در کاربردهایی که خصوصیات حرارتی و ساختاری در آن‌ها مهم هستند هم استفاده می‌شود. در نتیجه، تجزیه و تحلیل حرارتی-سازه همراه با ساختارهای نازک از دیدگاه شبیه‌سازی اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند. در این مقاله مقاومت ورقه کاپوزیت کربن اپوکسی نسبت تپ لیزری مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر موقعیت یک منبع گرما در پروفایل تنش و تغییر شکل بررسی شده است. همچنین محاسبه ضرایب انبساط حرارتی همگن از لایه‌های فردی انجام شده است.

## مواد و روش‌ها

در این مقاله، تجزیه و تحلیل ساختاری کامپوزیت اپوکسی-کربن لایه‌بندی‌شده با استفاده از رابط لایه لایه نرم افزار کامسول برای مواد کامپوزیت انجام شده است. از هندسه سه بعدی استفاده شده است. تجزیه و تحلیل حرارتی هر لایه لایه با استفاده از انتقال گرما در رابط پوسته موجود در ماژول انتقال حرارت صورت گرفته است.

هندسه کامپوزیت شبیه‌سازی شده عبارت است از شش لایه مسطح H شکل که روی یکدیگر قرار گرفته‌اند (مطابق شکل ۱)، ضخامت هر لایه، ۰,۱۲۵ میلی‌متر بوده و جنس آن‌ها الیاف کربن قرار گرفته در اپوکسی رزین است.




شکل ۱: شماتیک هندسه کلی

ماتریس الاستیسیته با درنظر گرفتن ماده همگن با محور اصلی عمودی به صورت: {$D_{11}$=۱۴۱,۳۴, $D_{12}$=۳,۳۵, $D_{13}$=۳,۳۵, $D_{22}$=۱۰,۲۵, $D_{23}$=۲,۸۳, $D_{33}$=۱۰,۲۵, $D_{44}$=۴,۵۲, $D_{55}$=۲,۹۵, $D_{66}$=۴,۵۲ GPa} در نظر گرفته شده است؛ البته تنها مؤلفه‌های غیر صفر نوشته شده است. خواص حرارتی نمونه نیز با رسانندگی حرارتی به صورت: {$K_{11}$=۶,۲, $K_{22}$=۰,۵, $K_{33}$=۰,۵ W/m.K} در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی

| کمیت | پارامتر | مقدار |
|---|---|---|
| نسبت حجمی فیبر | $V_f$ | ۰,۶ |
| نسبت حجمی متریس | $V_m$ | ۰,۴ |
| مدول یانگ فیبر | $E_{1f}$ | ۲۳۰ [GPa] |
| مدول یانگ ماتریس | $E_m$ | ۴[GPa] |
| نسبت پواسون فیبر | $v_{12f}$ | ۰,۲ |
| نسبت پواسون ماتریس | $v_m$ | ۰,۳۵ |
| ضریب انبساط حرارتی در جهت فیبر | $\alpha_{1f}$ | -۰,۶×۱۰$^{-۶}$ [۱/K] |
| ضریب انبساط حرارتی عمود بر فیبر | $\alpha_{2f}$ | ۸,۵×۱۰$^{-۶}$ [۱/K] |
| ضریب انبساط حرارتی ماتریس | $\alpha_m$ | ۵۵×۱۰$^{-۶}$ [۱/K] |

بر اساس پارامترهای جدول ۱، می‌توان ضریب انبساط حرارتی لایه در جهت فیبر و عمود بر آن و نیز نسبت پواسون کل را به ترتیب مطابق روابط ۱ تا ۳ محاسبه کرد.

$$\alpha_{11} = \frac{V_f \alpha_{1f} E_{1f} + V_m \alpha_m E_m}{V_f E_{1f} + V_m E_m} \quad (۱)$$

$$v_{12} = v_{12f} V_f + v_m V_m \quad (۲)$$

$$\alpha_{22} = \alpha_{33} = (1+v_m) V_m \alpha_m + \left(1+v_{12f}\frac{\alpha_{1f}}{\alpha_{2f}}\right) V_f \alpha_{2f} - v_{12}\alpha_{11} \quad (۳)$$

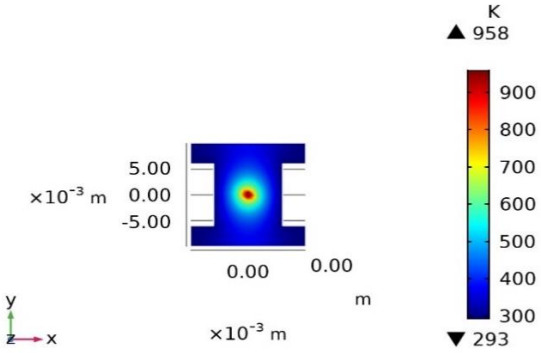
[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04 ]

مقادیر به دست آمده از روابط ۱ و ۳ برای ضریب انبساط حرارتی: $\{\alpha_{11},\alpha_{22},\alpha_{33}\}=\{3,72\ E\text{-}8,3,47\ E\text{-}5,3,47E\text{-}5\}$ می‌باشند و می‌توان مشاهده کرد که ضریب انبساط حرارتی در جهت فیبر، حدوداً سه مرتبه بزرگی از ضریب انبساط حرارتی در راستای عمود بر فیبر کوچک‌تر است.

شرایط مرزی که برای شبیه‌سازی درنظر گرفته شده است: ۱) شرایط مرزی ساختاری در لبه‌های X=۰ و X=۲ سانتیمتر ثابت فرض شده‌اند؛ ۲) دما در لبه‌های X=۰ و X=۲ سانتیمتر، دمای اتاق ۲۹۳ کلوین درنظر گرفته شده است. رسانایی همرفت با شار $20\ W/m^2K$ در سطح پایین انتخاب شده است؛ ۳) یک لیزر تپی با توان ۱۰۰ وات و دوام ۱۰۰ میلی‌ثانیه که شعاع کمرباریکه آن ۰/۵ میلی‌متر است، به صورت عمود بر سطح می‌تابد.

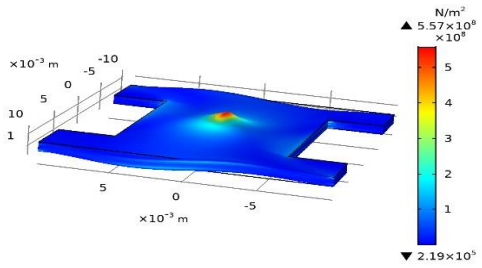
## نتایج و بحث

پروفایل حرارتی پوسته لایه‌ای مرکب درست پس از تابش تپ لیزر در شکل ۲ نشان داده شده است. بیشینه دما در مرکز لایه و به اندازه ۹۵۸ کلوین می‌باشد؛ هرچه از مرکز فاصله گرفته می‌شود، دما کاهش می‌یابد که با انتخاب پروفایل گوسی برای توزیع شدت لیزر همخوانی دارد.



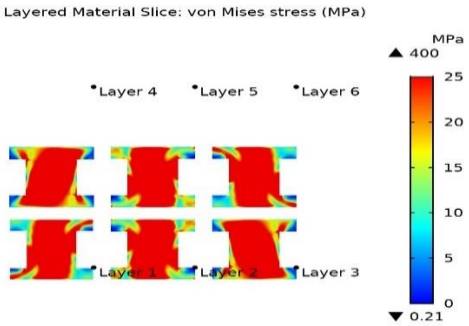

شکل ۲: توزیع دما در سطح نمونه پس از تابش تپ لیزر

اثرات ناشی از لایه لایه بودن و اورتوتروپی (orthotropy) که به دلیل اختلاف خواص لایه‌ها در جهت انتشار تپ لیزر و در جهت عمود بر آن وجود دارد، روی تنش و تغییر شکل پوسته در شکل ۳ نشان داده شده است. تنش حرارتی مشابه پروفایل توزیع دما است و اثر اورتوتروپی بودن نمونه روی تغییر شکل آن مشهود است.




شکل ۳: پروفایل توزیع تنش

جهت مشاهده اثر جهتگیری لایه‌ها روی بیشینه تنش که قید بهره ون میسز (von Mises yield criterion) نیز نامیده می‌شود، نمودار یک برش از لایه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در مقایسه با شکل ۳، توزیع تنش و دامنه آن در جهت z متفاوت است.




شکل ۴: توزیع بیشینه تنش در عمق (لایه‌ها)

## نتیجه‌گیری

دراین مقاله تغییرات حرارتی و تنش وارد بر کامپوزیت کربن پس از اندرکنش با تپ لیزر محاسبه شد.

## مرجع‌ها

[۱] C. T. William, and D. Hull. *An introduction to composite materials*. Cambridge university press,۲۰۱۹.

[۲] R. Mostafizur, D. Khastgir, and A. Kanakhir Aldalbahi. *Carbon-containing polymer composites*. Singapore: Springer, ۲۰۱۹

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04 ]