



تحلیل میدان دمای گذرای دیسک و پد ترمز FGM به صورت مدل سه بعدی متقارن

علی شهرجردی^{۱*}، علی صفری فرد^۲

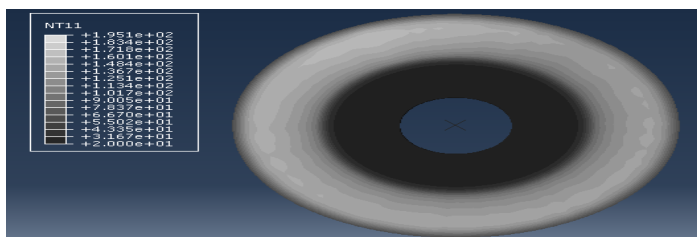
^۱ استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

^۲ دانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

برجسته‌ها

- از روش المان محدود برای مشخص کردن حوزه دمایی دیسک استفاده شد.
- با انتخاب ساختار FGM می‌توان سرعت انتقال حرارت را افزایش و آسیب‌های حرارتی را کاهش داد.

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۸

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۲/۲۸

*نویسنده مسئول:

shahrjerdi@malayeru.ac.ir

کلید واژه‌ها:

دیسک

پد

انتقال حرارت

FGM

چکیده

عملکرد صحیح سیستم ترمز در تمام شرایط رانندگی، در حفظ جان سرنشینان خودرو بسیار مؤثر است. یکی از سیستم‌های ترمز اصطکاکی، سیستم ترمز دیسک و پد است. در این تحقیق با استفاده از دیسک و پد FGM، بهبود در انتقال حرارت و خواص گرمایی سیستم ترمز بررسی و یک مدل سه‌بعدی تحلیلی برای تعیین توزیع دمای تماس بر روی سطح کاری ترمز در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن اثرات پد به‌عنوان منبع گرمایی، از روش المان محدود برای مشخص کردن حوزه دمایی دیسک با شرایط مرزی حرارتی مناسب استفاده می‌شود. خصوصیات مادی اجزای تشکیل‌دهنده دیسک و پد ترمز با پیروی از قانون توزیع توانی در راستای ضخامت تغییر می‌کنند و تأثیر خواص دیسک و پد بر نتایج تحلیل حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌گونه که در این پژوهش مشخص شده، با انتخاب ساختار FGM یک‌بار برای دیسک به‌تنهایی و یک‌بار برای دیسک و پد با لایه‌هایی از جنس‌های مشخص شده، می‌توان سرعت انتقال حرارت را افزایش و آسیب‌های حرارتی را کاهش داد. دمای بیشینه در ساختار FGM مقدار ۳۲۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، درحالی‌که در تحقیقات گذشته این مقدار ۲۷۹ درجه سانتی‌گراد بود و شیب کاهش دما در ساختار FGM نسبت به ساختار غیر FGM بیشتر است که این موضوع نشان‌دهنده توانایی ساختار FGM در بهبود انتقال حرارت ناشی از ترمزگیری می‌باشد.

۱- مقدمه

[۷] بررسی‌هایی را روی تأثیر استفاده از مواد FGM در تولید دیسک‌های پوششی انجام داد و به این نتیجه رسید که با استفاده از دیسک‌های FGM کرنش‌های پایین‌تری نسبت به دیسک‌های فولادی را شاهد خواهیم بود. چی و همکاران [۸] طی یک پژوهش شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی^۱، به بررسی تأثیر بهینه کردن تعداد پره‌ها، زاویه قوس و طول آن‌ها و همچنین شعاع داخلی و خارجی دیسک بر روی انتقال حرارت دیسک ترمز پرداختند. در این پژوهش نشان داده شد که برای یک دیسک با ۵۶ پره، زاویه و قوس پره‌ها تأثیر کمی روی انتقال حرارت دارد. شعاع داخلی و خارجی بهینه در این طرح به ترتیب ۸۳ mm و ۱۵۵ mm گزارش شده است. صمدی و همکاران [۹] به بررسی اثر لنت و دیسک بر عملکرد سیستم ترمز پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از لنت‌های سینتر و ایزوبار سایش دیسک‌ها کمتر شده و عمر آن‌ها افزایش می‌یابد. یوتوشنکو و همکاران [۱۰] به بررسی حساسیت دمایی مواد به‌کاررفته در تولید دیسک و پد پرداختند. آن‌ها این تحقیقات را به‌صورت عددی برای چند نوع ماده انجام دادند و نتایج را با هم مقایسه کردند. بهداروندی [۱۱] به مطالعه شبیه‌سازی عملکرد حرارتی دیسک ترمز با استفاده از نرم‌افزار انسیس^۲ پرداخت و بررسی کرد که ایجاد سوراخ‌های عرضی در دیسک چه تأثیری بر بهبود عملکرد آن خواهند داشت. خدایی انارکی [۱۲] به بهینه‌سازی دیسک ترمز دارای تهویه با استفاده از شبیه‌سازی و روش RSM و الگوریتم فراابتکاری NSGA-II جواب‌های نزدیک به جواب بهینه با اعمال سه هدف اصلی حداکثر سازی طول عمر، حداقل سازی وزن و حداکثر سازی انتقال حرارت آن استخراج شده است. یکی دیگر از مواردی که رانندگان اتومبیل با آن سروکار دارند، صدای ناشی از لنت بر اثر ترمز کردن و همچنین بوی ناشی از داغ کردن بیش‌ازحد آن است. صدا و بوی ناشی از حرارت ایجادشده گاه در مواقع خاص حرکتی و گاه به دلیل استفاده از نوعی ماده به‌خصوص در لنت و یا اجزای سیستم ترمزی، تولید می‌شود. اینجاست که اهمیت مواد مورد استفاده برای

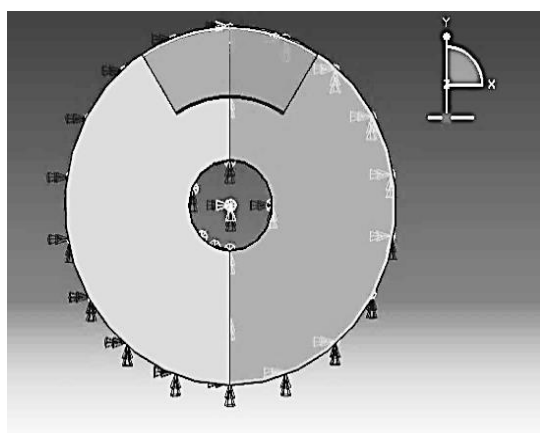
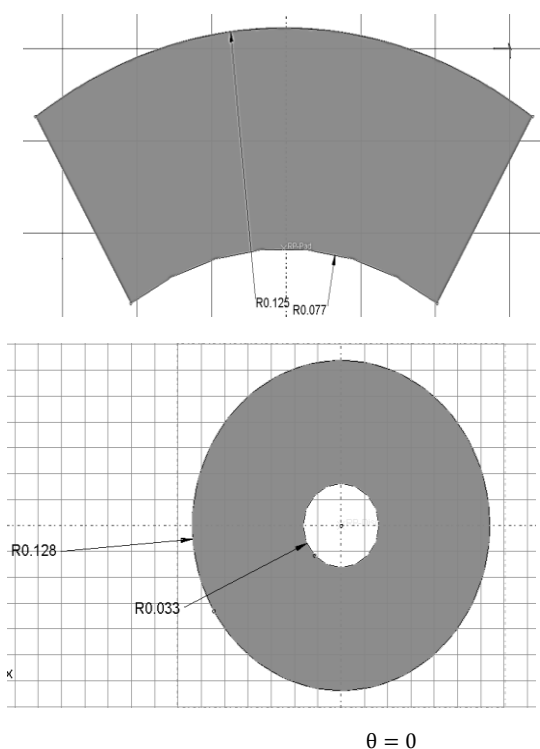
از متداول‌ترین سیستم‌های ترمز، سیستم ترمز اصطکاکی است که در هنگام ترمزگیری انرژی جنبشی و پتانسیل خودرو در ناحیه تماسی دیسک و لنت به گرما تبدیل می‌شود که بخش اعظم آن در دیسک و لنت پخش گردیده و باعث بالا رفتن دما می‌شود [۱]. دیسک ترمز از قطعات مصرفی در اتومبیل با درجه ایمنی بالا هستند که این درجه ایمنی نشان از اهمیت فوق‌العاده این قطعه به ظاهر ساده دارد. داشتن ثبات و پایداری و کارکرد بدون نقص سیستم ترمز، مواردی هستند که طراحان همواره در راستای بهبود آن‌ها تلاش می‌کنند [۲]. یکی از مواردی که این پایداری را تهدید می‌کند بالا رفتن دمای ترمزگیری می‌باشد. در ترمزگیری‌های شدید و در مواقع حساس که بحث ایمنی جان سرنشینان خودرو و خسارات مالی سنگین مطرح است، اهمیت بررسی فرایندهای تأثیرگذار در بهبود عملکرد ترمز به‌خصوص مسائل دمایی و انتقال حرارت بیشتر مشخص می‌شود.

تحقیقات زیادی در زمینه ترمز دیسکی انجام شده است که اولین بررسی‌ها توسط نیوکومپ [۳] صورت گرفته که در این تحقیق توزیع دما در یک دیسک ترمز به روش تحلیلی به دست آمد و نتایج با مقادیر تجربی مقایسه گردید. او مسئله را یک صفحه بی‌نهایت با ضخامت محدود فرض کرد که فشار حرارتی وارده بر سطح آن با زمان به‌صورت خطی کاهش پیدا می‌کند. لیمپرت [۴] تحقیقاتی بر روی خنک‌کاری دیسک‌های ترمز انجام داد و معادلات اساسی دیسک ترمز را پایه‌گذاری کرد. او معادله انرژی و معادله دمایی دیسک ترمز را ارائه داد. السون [۵] تحقیقاتی را بر روی دیسک‌های چرخان با استفاده از روش المان محدود انجام داد، او توزیع تنش را بر روی یک صفحه چرخان با استفاده از المان محدود به دست آورد و این توزیع تنش در به دست آوردن خواص خمشی دیسک چرخان مورد استفاده قرار گرفت. جائو و لین [۶] توزیع دما را در دیسک ترمز اتومبیل به دست آوردند. آن‌ها با در نظر گرفتن تقارن محوری برای دیسک ترمز، یک مدل تحلیلی برای تعیین توزیع دمای تماسی در سطح دیسک ترمز ارائه نمودند. ژانگ

¹ CFD² ANSYS CFX

۲-۱- روابط حاکم

یک سیستم مختصاتی کارتیزین برای مدل تعریف شده است که همه لایه‌های FGM را در بر خواهد گرفت. انتخاب سیستم مختصاتی مرجع بر اساس تغییرات فشار تماسی موجود می‌باشد. انتخاب مرجع مختصاتی مناسب می‌تواند به بهبود نتایج عددی کمک کند [۱۶]. مرجع مختصات برای دیسک و پد در شکل ۱ مشخص شده است.



شکل ۱: ابعاد و شرایط مرزی مکانیکی دیسک و پد.

ساخت اجزای ترمز و تماس بین دیسک و پد که عامل ایجاد این صدای ناهنجار و بوی ناشی از حرارت ایجاد شده بین دیسک و پد هست به میان می‌آید [۱۳]. مواد تابعی یک دسته خاص کامپوزیت‌ها هستند که از نظر میکروسکوپی ناهمگن می‌باشند [۱۴]. تئوری دیسک ترمز و دیسک کلاچ بر اساس دیسک‌های دوار می‌باشند که در کارهای مهندسی کاربردهای زیادی دارند. روشن است تغییر در خواص ماده و همچنین تغییر در ابعاد مسیر تغییر ماده که در FGMها وجود دارد، عملکرد اجزای تشکیل‌دهنده را در زمینه‌های مختلف مانند کارایی، طول عمر و ظرفیت انتقال قدرت بالا می‌برد [۱۵].

هدف از انجام این پژوهش استفاده از مواد FGM جهت بهبود انتقال حرارت در سیستم دیسک و پد هنگام ترمزگیری از طریق استفاده از مواد با قدرت انتقال حرارتی بالا و همچنین بهبود کیفیت عملکرد سیستم ترمز می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از مواد سرامیکی در لایه‌ها سعی شده است تا با استفاده از ویژگی‌های مناسب حرارتی این مواد در طراحی ترمز، ضمن جلوگیری از تغییر شکل‌های احتمالی، روند انتقال حرارت در دیسک ترمز بررسی شود. تمایز این پژوهش نسبت به تحقیقات مشابه، استفاده از مدل سه‌بعدی تحلیلی برای تعیین توزیع دمای تماس بر روی سطح کاری ترمز و استفاده از پدهای FGM می‌باشد. جهت بررسی روند انتقال حرارت سیستم، برخلاف تحقیقات گذشته که دیسک دوبعدی در نظر گرفته می‌شد، دمای لایه‌ها در زمان‌های مختلف به صورت سه‌بعدی و متقارن از شروع فرایند ترمزگیری تا اتمام آن در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش پد به عنوان منبع حرارتی تعریف و حرارت به صورت رسانش به لایه‌های پایین منتقل می‌شود. در ساختار دیسک و پد FGM از ۹ لایه استفاده شده است که این به دلیل بهینه بودن این تعداد لایه، جلوگیری از بالا رفتن هزینه‌های محاسباتی و همچنین عدم مشاهده تغییرات بالا در تعداد لایه‌های بیشتر می‌باشد. شکل ۱ نمایی کلی از دیسک و پد و ابعاد و شرایط مرزی مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد.

۲- تحلیل دمایی

$$q_i = h(T_i - T_\infty) \quad (7)$$

که T_∞ دمای محیط و h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محیط می‌باشد. پارامتر اصلی و تعیین‌کننده در مورد انتقال حرارت جابه‌جایی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است که وابستگی شدیدی به محیط مورد مطالعه، شرایط سیال، نوع انتقال حرارت جابه‌جایی و... دارد. در حالتی که سرعت سیال ناچیز باشد، انتقال حرارت صورت گرفته، فقط ناشی از هدایت حرارتی خواهد بود. با این حال با توجه به اختلاف سرعت بین سیال و دیسک دوار، در سیستم ترمزگیری موجود، انتقال حرارت از نوع جابه‌جایی نیز وجود خواهد داشت که با توجه به کوتاه بودن زمان فرایند ترمزگیری و تأثیر کم این نوع انتقال حرارت در سیستم ترمز موجود، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی صفر در نظر گرفته شده است [7].

شرایط مرزی مکانیکی برای تحلیل الاستیک در جهت‌های x و z می‌تواند به صورت زیر در نظر گرفته شوند [7]:
بر روی صفحات لبه داخلی دیسک $R=32.5$ و لبه خارجی دیسک $R=L$ شرایط متقارن زیر حاکم است:

$$(u_x)_i \Big|_{R=32.5} = (u_x)_i \Big|_{R=L} \quad (8)$$

$$(u_z)_i \Big|_{R=32.5} = (u_z)_i \Big|_{R=L} \quad (9)$$

که u جابه‌جایی در جهات x و z می‌باشد. همچنین نیروی ثابت F_z در جهت z اعمال می‌شود. مسئله الاستیک توسط نرم‌افزار عددی آباکوس [19] مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

در تحلیل‌های خود به دانستن میزان گرمای جذب شده توسط اجزا ترمز از منبع حرارتی نیازمندیم. با توجه به کوتاه بودن زمان ترمزگیری می‌توان فرض کرد که تمامی گرمای تولیدی از طرف منبع حرارتی توسط دیسک ترمز جذب خواهد شد.

میزان حرارتی که در سطح اجزای ترمز ایجاد می‌شود می‌تواند از طریق جابه‌جایی یا تشعشع به محیط اطراف منتقل شود. به دلیل ناچیز بودن انتقال حرارت از طریق تشعشع در زمان کم ترمزگیری می‌توان از میزان انتقال گرما آن صرف‌نظر کرد [6].

۳- شبیه‌سازی عددی

معادله هدایت حرارتی در اصطکاک برای لایه‌های دیسک به صورت زیر می‌باشد که دارای ترم‌هایی از رسانش و همرفتی است [7 و 17]:

$$i = 1.2.3 \dots 10 \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha_i} \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} + V \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) \alpha_i = \frac{k_i}{\rho_i c p_i} \quad (2)$$

که V سرعت، $c p_i$ گرمای ویژه و ρ_i چگالی و همچنین k_i ضریب رسانش حرارتی لایه‌های مختلف دیسک می‌باشد. شرایط مرزی برای نقاط تماس لایه‌ها و همچنین برای ارتباط با هوای اطراف تعریف می‌شود.

۲-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی میان لایه‌ها به وضعیت مکانیکی تماس بستگی دارد.

(الف) در مواقعی که سطوح تماس با هم در تماس هستند می‌توان از دو شرط زیر استفاده کرد [7]:

$$k_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \Big|_{z=z_i} - k_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z} \Big|_{z=z_i} = q_i \quad (3)$$

$$T_i \Big|_{z=z_i} = T_{i+1} \Big|_{z=z_i} \quad (4)$$

که q_i شار حرارتی ورودی به دیسک در ناحیه تماس می‌باشد.

(ب) در مواردی که سطوح در حال جدایش هستند:

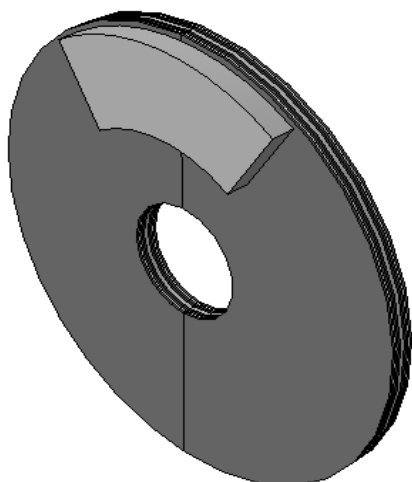
$$\frac{\partial T_i}{\partial z} \Big|_{z=z_i} = \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z} \Big|_{z=z} = 0 \quad (5)$$

به‌طور کلی این شرط مرزی برای سطوحی در نظر گرفته می‌شود که حین فرایند از هم فاصله گرفته و میل به جدا شدن پیدا کنند که در تحقیق حاضر فرض بر عدم جدایش سطوح می‌باشد و همچنین در موقعیت‌های لبه داخلی دیسک $x=32.5$ و لبه خارجی دیسک $x=L$ داریم:

$$T_i \Big|_{x=0} = T_i \Big|_{x=L} \quad (6)$$

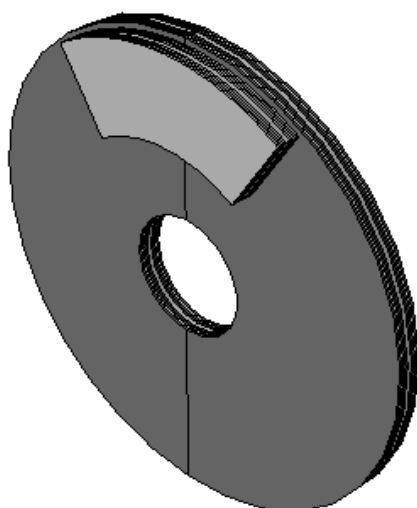
و برای اطراف و مرکز مدل خواهیم داشت:

۳-۱- مدل سازی



شکل ۲: ساختار دیسک FGM و پد تک لایه.

فرایند با آنالیز الاستیک با فرض کردن یک توزیع دمایی آغاز می شود که حاصل آن یافتن توزیع فشار میان لایه های دیگر باشد. این توزیع فشار در آنالیز دمایی به یافتن مولد حرارتی تولیدی مابین لایه ها کمک می کند. همچنین مش بندی به صورتی اعمال شده است که بتواند از پوشش خوبی در نقاط با تغییرات دمایی بالا برخوردار باشد.



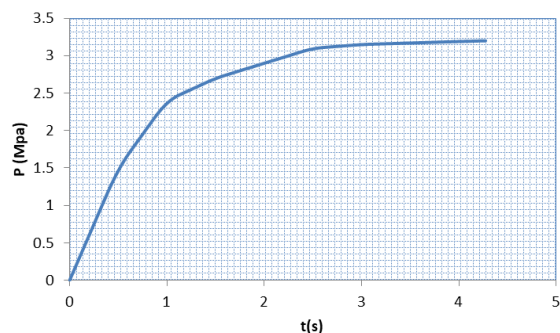
شکل ۳: ساختار دیسک و پد FGM.

جدول ۱: خواص دیسک FGM [۲۰].

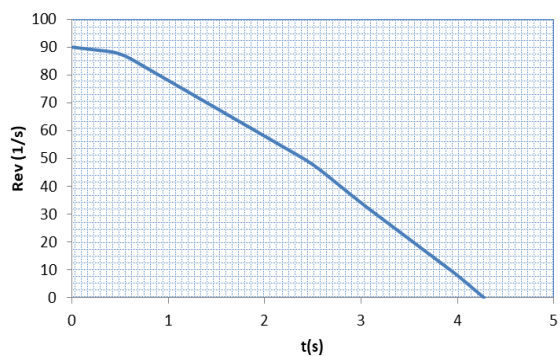
لایه	ضریب رسانش (W/k.m)	چگالی (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	گرمای ویژه (J/Kg. °C)	نسبت پواسون
------	-----------------------	--------------------	--------------------	--------------------------	-------------

ابتدا دیسک و پد به صورت دقیق در نرم افزار آباکوس مدل می شوند و نکات و شرایطی که دیسک و پد در حالت طبیعی و عملی دارند به این مدل اعمال گردد. جهت تعریف لایه ها و اعمال خواص مخصوص هر لایه به آن از قابلیت پارتیشن بندی در آباکوس استفاده می شود. در ادامه نتایج برای حالت های مختلف بررسی خواهد شد. تحلیل دمایی به صورت گذرا خواهد بود و از المان هشت گره ای مکعبی یا آجری شکل سه بعدی، استفاده شده است. در حالت اول دیسک به صورت FGM و دارای ۹ لایه با خواص موجود در جدول ۱ [۲۰] و پد دارای یک لایه با خواص موجود در جدول ۲ می باشد و ساختار آن در شکل ۲ قابل مشاهده است و سیستم در مجموع با ۲۷۶۱۲ المان شبکه بندی شده است. استفاده از این تعداد شبکه، نتایج را از شبکه مستقل می کند. در حالت دوم علاوه بر دیسک، پد نیز دارای ۹ لایه و با ساختار FGM با خواص موجود در جدول ۳ مدل می شود و ساختار آن در شکل ۳ مشخص است. در این حالت دیسک و ترمز در مجموع دارای ۲۹۴۸۴ المان می باشد. جهت اجرای این بررسی ها در آباکوس استاندارد از روش تحلیل کوپل دما- تغییر مکان استفاده شده است. همان گونه که قبلاً اشاره شد در این پژوهش از روش گسسته سازی پتروف-گلرکین استفاده می شود. در این الگوریتم جدید از یک روش پیشرو بهره برده خواهد شد و به جای تفاضل مرکزی از تفاضل معکوس استفاده می شود. در این تحلیل مسائل دمایی و الاستیک به صورت وابسته به دما و همزمان حل می شوند.

برابر می‌باشد و همانند دیسک FGM لایه پنج دارای ضخامتی دو برابر سایر لایه‌ها است. دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. سرعت اولیه $27/78 \text{ m/s}$ ، حداکثر گشتاور اصطکاکی $1357/48 \text{ N/m}$ و فشار ترمز $3/17 \text{ MPa}$ در نظر گرفته شده است. تغییر فشار و تغییر سرعت زاویه‌ای هنگام ترمز با گذشت زمان به صورت شکل ۴ و ۵ ارائه می‌گردد [۶].



شکل ۴: تغییرات فشار بر حسب زمان.



شکل ۵: تغییر سرعت زاویه‌ای بر حسب زمان.

۴- نتایج

۴-۱- صحت سنجی

همان‌طور که اشاره شد لین [۶] در تحقیقات خود یک مدل تحلیلی برای توزیع درجه حرارت در سطح کار ترمز با در نظر گرفتن عواملی چون منبع گرمای متحرک با تغییر سرعت نسبی و دمای گذرا ارائه کرده است. در این تحلیل که هندسه و خواص دیسک و پد به صورت تک‌لایه و کاملاً فلز مطابق با جدول ۴ ارائه شده‌اند، نتایج عددی نشان می‌دهد که توزیع دمایی سطح دیسک به ویژگی‌های

۰/۲۲	۴۰۴	۱/۶۲۸	۶۰۰۶	۱۱/۲	۹ و ۱
۰/۲۴	۴۰۸	۱/۷۴۶	۶۳۱۱	۲۰/۴	۸ و ۲
۰/۲۶	۴۱۲	۱/۸۶۴	۶۶۱۷	۲۹/۶	۷ و ۳
۰/۲۸	۴۱۶	۱/۹۸۲	۶۹۲۲	۳۸/۸	۶ و ۴
۰/۳	۴۸۷	۲۰۰	۷۸۰۰	۴۲	۵

جدول (۲): خواص پد تک‌لایه

۶۴/۵	زاویه پوشش پد ψ (deg)
۲۵۹۵	چگالی (ρ) (kg/m^3)
15×10^8	مدول یانگ E (GPa)
۱۴۶۵	گرمای ویژه C (J/Kg.C°)
۰/۲۵	نسبت پواسون ν
۱/۲۱۲	ضریب رسانش K (W/k.m)
3×10^{-5}	انبساط حرارتی α

جدول (۳): خواص پد FGM

لایه	ضریب رسانش (W/k.m)	چگالی (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	گرمای ویژه (J/Kg.C°)	نسبت پواسون
۹ و ۱	۱/۰۱	۲۰۲۰	۱/۱	۱۴۰۵	۰/۲۵
۸ و ۲	۱/۰۷	۲۱۰۰	۱/۲	۱۴۱۵	۰/۲۵
۷ و ۳	۱/۱۲	۲۲۵۰	۱/۲۵	۱۴۳۰	۰/۲۵
۶ و ۴	۱/۱۸	۲۴۰۰	۱/۴	۱۴۳۸	۰/۲۵
۵	۱/۲۱۲	۲۵۹۵	۱/۵	۱۴۶۵	۰/۲۵

۳-۲- خواص و هندسه مسئله

سیستم ترمز FGM همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، از دو قسمت دیسک و پد تشکیل شده است. دیسک با شعاع داخلی $32/5 \text{ mm}$ ، شعاع خارجی 128 mm و ضخامت $12/5 \text{ mm}$ که در راستای Z متقارن است در نظر گرفته شده است. ضخامت لایه‌های دیسک برابر می‌باشد ولی لایه پنج دارای ضخامتی دو برابر سایر لایه‌ها است. پد دارای شعاع داخلی 77 mm و شعاع خارجی 125 mm و ضخامت $12/5 \text{ mm}$ می‌باشد. ضخامت لایه‌های پد در حالت FGM

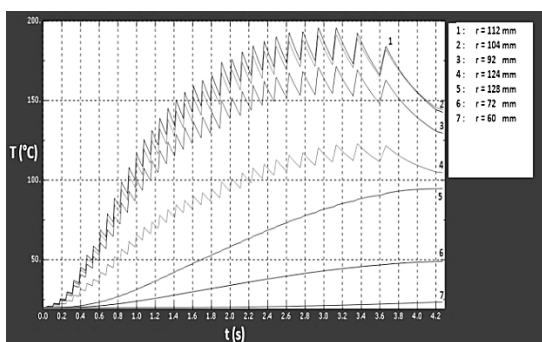
ندارد. این نتایج در جدول ۵ و شکل ۷ نشان داده شده است.

با توجه به اهمیت زمان $t = 3/3$ s، توزیع دمایی در سطح دیسک در این زمان در تحقیقات آقای لین محاسبه شده است که به زاویه θ وابستگی بالایی نشان می‌دهد و بیشترین دماها در خط شعاعی $\theta = 0$ مشاهده می‌شوند و این نتایج را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد. مکان خط شعاعی $\theta = 0$ در شکل ۱ مشخص شده است.

باز طراحی مدل‌سازی فوق و نتایج آن در شکل ۹ اهمیت زاویه θ در توزیع دمایی سطح دیسک را نشان می‌دهد. این اهمیت می‌تواند ناشی از وجود پد به‌عنوان منبع حرارتی در سطح دیسک بوده باشد. همچنین با بررسی توزیع دمایی حاصل شده از هر دو روش مدل‌سازی به نزدیکی نتایج آنان پی خواهیم برد. با توجه به موفقیت مدل ارائه شده در بخش‌های ۳ جهت تحلیل پژوهش آقای لین، می‌توان از این مدل جهت تحلیل عددی مقاله موجود استفاده کرد.

جدول ۵: مقایسه نتایج تحقیقات لین و بازطراحی آن به‌صورت سه‌بعدی

پارامتر	لین	سه بعدی لین
زمان بیشینه دما (t)	۳/۳	۳/۱۸
شعاع بیشینه دما (mm)	۱۱۰	۱۱۲
بیشینه دما (C°)	۲۷۹	۱۹۵

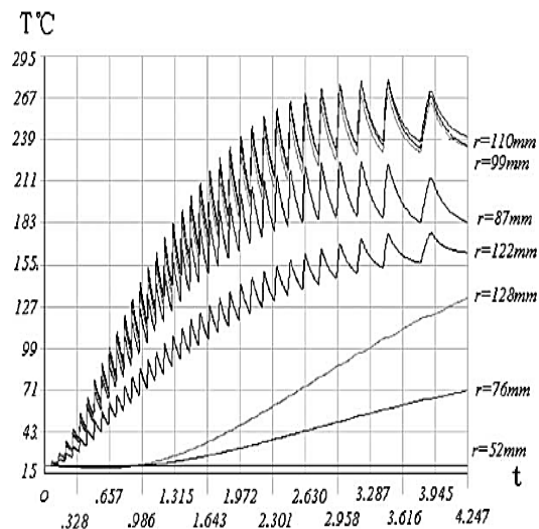


شکل ۷: نمودار تغییرات دمایی در شعاع‌های مختلف دیسک در بازطراحی تحقیقات آقای لین.

عملیاتی از جمله تغییر سرعت، ضریب رسانش دیسک و همچنین به مدت‌زمان ترمزگیری بستگی دارد.
جدول ۴: هندسه و خواص دیسک و پد در تحقیقات لین [۶].

پد	دیسک	پارامتر
۷۷	۳۲/۵	شعاع داخلی
۱۲۵	۱۲۸	شعاع خارجی
۱۴۶۵	۴۱۹	گرمای ویژه
۱/۲۱۲	۴۸/۴۶	رسانای حرارتی
۲۵۹۵	۷۲۲۸	چگالی

نتایج تحقیقات فوق نشان‌دهنده تغییرات دمایی برای شعاع‌های مختلف در خط شعاعی $\theta = 0$ و در سطح دیسک می‌باشد که با بررسی آن‌ها می‌توان مشاهده کرد که بیشترین دما در زمان $t = 3/3$ s ایجاد می‌شود و همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، در شعاع‌های نزدیک به پد به‌عنوان منبع حرارتی نرخ دمایی بیشتری را خواهیم داشت.

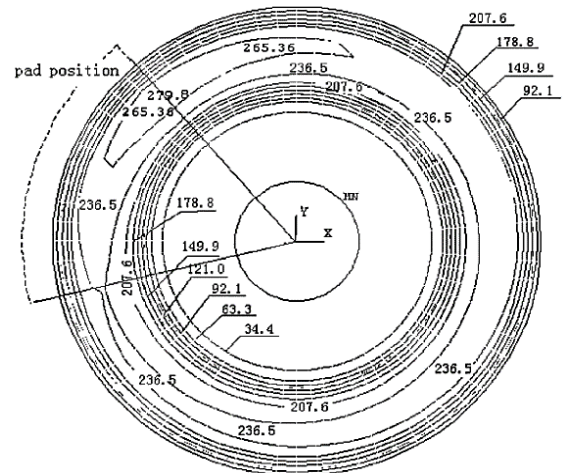


شکل ۶: نمودار تغییرات دمایی در شعاع‌های مختلف دیسک در تحقیقات آقای لین [۶].

باز طراحی تحقیقات فوق از روش ارائه شده در بخش ۳ (برای یک دیسک غیر FGM با هندسه و خواص مشابه تحقیقات آقای لین) نتایج موجود در شکل ۵ را حاصل کرد که بیشینه دمایی در زمان $t = 3/18$ s و همچنین بیشترین نرخ دمایی در شعاع‌های نزدیک به منبع حرارتی مشاهده می‌شوند که با نتایج تحقیقات آقای لین اختلاف چندانی

در این مقاله با قرار دادن لایه‌های سرامیکی اطراف هسته فلز در دیسک، بر آن هستیم تا به ترتیب از ویژگی‌های مقاومت حرارتی و رسانش حرارتی آن‌ها در جهت بهبود عملکردی سیستم ترمز و افزایش انتقال حرارت استفاده ببریم. در ساختار موردنظر از ۹ لایه برای مدل‌سازی سیستم ترمز استفاده شده است که ۸ لایه سرامیک و یک لایه مرکزی فلز خواهد بود. همچنین با FGM کردن ساختار پد تأثیر آن بر انتقال حرارت سیستم بررسی می‌شود.

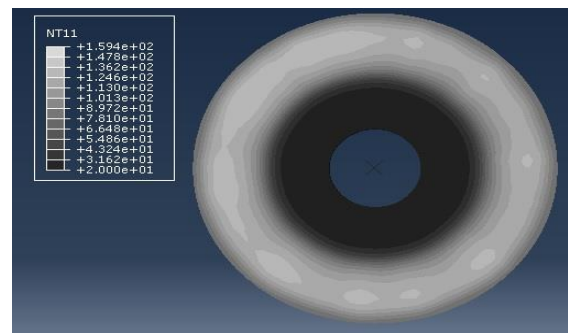
در این تحلیل مدت‌زمان یک ترمز کامل از سرعت اولیه با $27/78 \text{ m/s}$ تا صفر، $4/274 \text{ s}$ در نظر گرفته شده است. با توجه به آنکه بیشترین تغییرات دمایی در محل منبع حرارتی به وجود می‌آید و منبع حرارتی پد فرض شده و با توجه به زاویه قرارگیری پد یعنی $\theta = 0$ ، جهت بررسی‌های بهتر در سیستم دیسک FGM و پد تک‌لایه، تغییرات دمایی در سطح دیسک FGM و $\theta = 0$ و شعاع‌های مختلف بررسی شده است. نتایج حاصل از این بررسی را می‌توان در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ مشاهده کرد. شکل ۱۱ و ۱۲ توزیع دمایی سطح دیسک را در مدل دیسک FGM و پد تک‌لایه به ترتیب با تعداد ۲۷۶۱۲ و ۵۰۴۶۴ المان نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد المان‌ها از ۲۷۶۱۲ المان، تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در بیشینه دمای سطح رخ نمی‌دهد. بنابراین با در نظر گرفتن این تعداد المان نتایج از شبکه مستقل می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در دیسک FGM و پد تک‌لایه، در شعاع‌های مختلف با گذشت زمان دمای نقاط افزایش می‌یابد که با توجه به اصل انتقال حرارت از نقاط گرم‌تر به نقاط سردتر امری بدیهی می‌باشد



شکل ۸: توزیع دمایی سطح دیسک در تحقیقات آقای لین [۶].

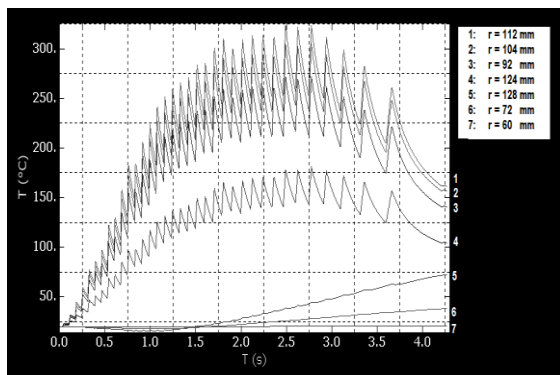
۲-۴- نتایج و بحث

در پژوهش موجود سعی شده است ضمن مدل‌سازی یک ساختار دیسک-پد FGM، بررسی شود که ساختار FGM در دیسک و پد تا چه اندازه به بهبود عملکرد سیستم و انتقال حرارت در اجزای ترمز کمک می‌کند.



شکل ۹: توزیع دمایی در سطح دیسک تک‌لایه در بازطراحی تحقیقات آقای لین.

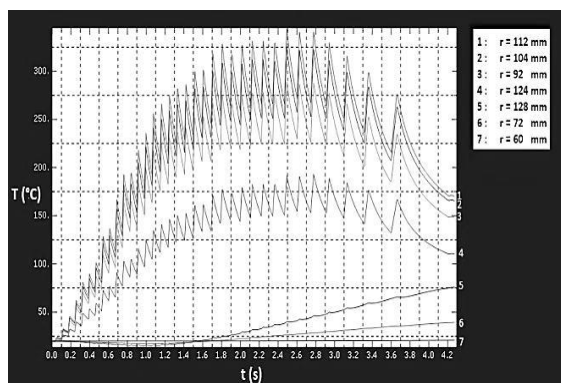
فلزات با وجود رسانش حرارتی خوب، در برابر حرارت از خود تغییر شکل نشان می‌دهند که می‌تواند در مواجهه با گرمای حاصل از ترمزگیری باعث عیب در عملکرد ترمز شود. در مقابل لایه‌های سرامیکی از مقاومت گرمایی بالایی برخوردار هستند درحالی‌که منتقل‌کننده حرارت خوبی به شمار نمی‌روند.



ساختار FGM وجود دارد که این به دلیل خواص حرارتی این ساختار می‌باشد. این انتقال حرارت بهتر، می‌تواند باعث جلوگیری از ایجاد تنش‌های حرارتی دیسک شود.

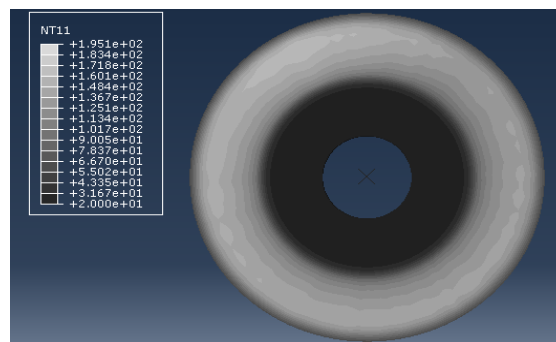
در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ توزیع و تغییرات دمایی دیسک در سیستم دیسک FGM-پد در شعاع‌های مختلف نشان داده شده است. در این حالت نیز در شعاع‌های مختلف با گذشت زمان دمای نقاط افزایش می‌یابد. در این ساختار نیز بیشترین دمای دیسک در زمان $2/5$ S و در شعاع ۱۱۲ میلی‌متر یعنی در نزدیکی لبه خارجی پد مشاهده می‌شود. این دمای بیشینه در ساختار پد FGM مقدار ۳۴۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که نسبت به حالتی که فقط دیسک به صورت FGM بود، کمی افزایش را نشان می‌دهد. هرچند این افزایش بیشینه دما چندان چشم‌گیر نیست.

تغییرات و توزیع دمایی پد در حالت‌های تک‌لایه و ساختار FGM در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. در هر دو حالت در تمامی شعاع‌ها با گذشت زمان دمای نقاط افزایش می‌یابد که با توجه به اصل انتقال حرارت از نقاط گرم‌تر به نقاط سردتر امری بدیهی می‌باشد. همچنین در انتهای زمان ترمزگیری و در شعاع‌های بالاتر، در مقایسه با سایر نقاط دمایی بالاتری مشاهده می‌شود. بیشترین دمای پد در انتهای زمان ترمزگیری و در شعاع ۱۲۰ mm یعنی نزدیک به لبه خارجی پد دیده می‌شود که این مقدار ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد است.

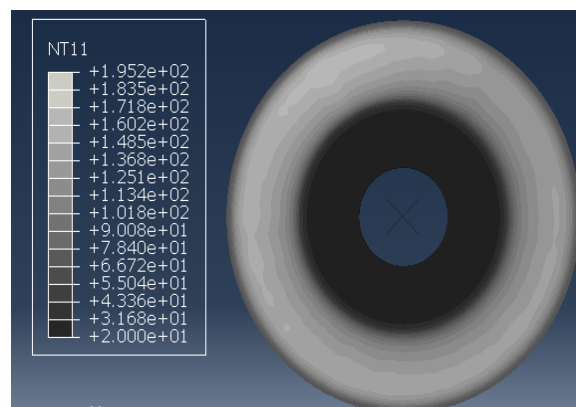


شکل ۱۳: نمودار تغییرات دمایی شعاع‌های مختلف دیسک در مدل دیسک FGM-پد.

شکل ۱۰: نمودار تغییرات دمایی دیسک FGM-پد تک‌لایه در شعاع‌های مختلف سطح دیسک.

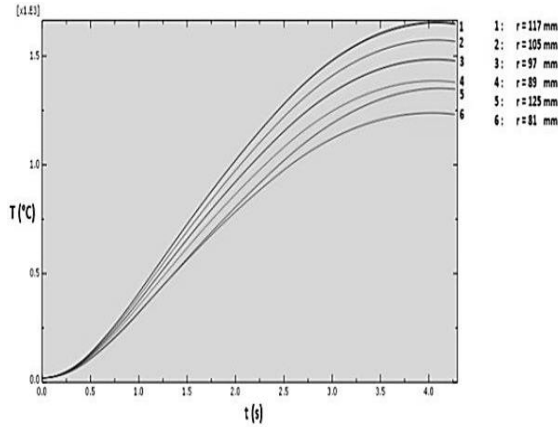


شکل ۱۱: توزیع دمایی دیسک FGM و پد تک‌لایه در سطح دیسک با ۲۷۶۱۲ المان.

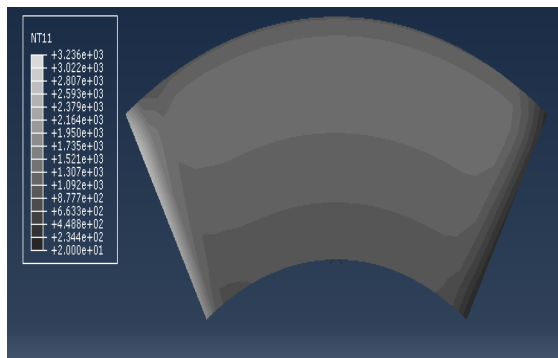


شکل ۱۲: توزیع دمایی دیسک FGM و پد تک‌لایه در سطح دیسک با ۵۰۴۶۴ المان.

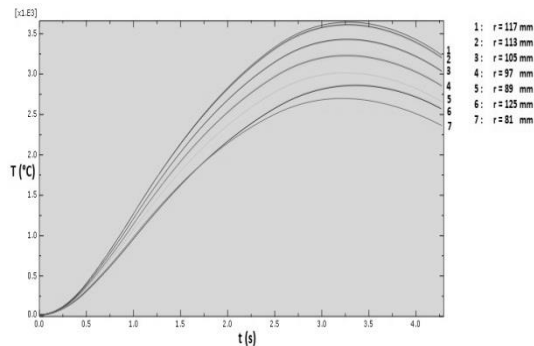
همچنین همان‌گونه که انتظار می‌رود در انتهای زمان ترمزگیری و در شعاع‌هایی که پد به عنوان منبع حرارتی در آن‌ها قرار دارد، در مقایسه با سایر نقاط دمایی بالاتری دارد. بیشترین دمای دیسک در زمان $2/5$ S و در شعاع ۱۱۲ mm یعنی در نزدیکی لبه خارجی پد مشاهده می‌شود. این دمای بیشینه در ساختار FGM مقدار ۳۲۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، درحالی‌که در تحقیقات لی [۶] این مقدار ۲۷۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و شیب کاهش دما در ساختار FGM نسبت به غیر FGM بیشتر است که این موضوع نشان‌دهنده توانایی ساختار FGM در بهبود انتقال حرارت ناشی از ترمزگیری می‌باشد. با توجه به دو شکل ۷ و ۱۰ که نتایج بررسی انتقال حرارت در زمان ترمز در یک سیستم دیسک و پد به ترتیب با و بدون ساختار FGM را نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که انتقال حرارت بهتری در



شکل ۱۶: نمودار تغییرات دمایی شعاع‌های مختلف در سطح پد تک‌لایه.



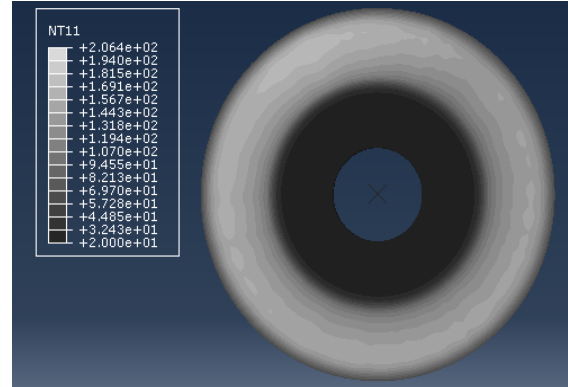
شکل ۱۷: توزیع دمایی در سطح پد FGM.



شکل ۱۸: نمودار تغییرات دمایی شعاع‌های مختلف در سطح پد FGM.

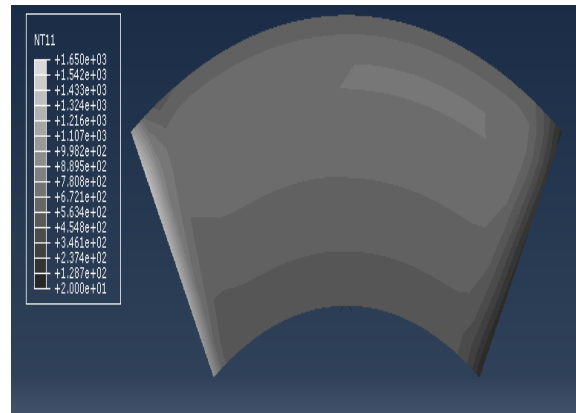
۵- نتیجه‌گیری

در اثر ترمزگیری، حرارتی ایجاد می‌شود که در صورت عدم انتقال خوب آن می‌تواند باعث ایجاد تخریب سیستم ترمز شود. نتایج شبیه‌سازی توزیع دمایی سطح دیسک و پد در $\theta=0$ ، و در شعاع‌های مختلف نشان می‌دهد که با استفاده از



شکل ۱۴: توزیع دمایی سطح دیسک در مدل دیسک FGM و پد FGM.

این دمای بیشینه در ساختار FGM حدود ۳۶۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و کاهش دما در ساختار FGM نسبت به غیر FGM زودتر اتفاق می‌افتد و این امر نشان از بهبود انتقال حرارت ناشی از ترمزگیری در ساختار پد FGM است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت بین دمای سطح دیسک و پد زیاد است. این موضوع در تحقیقات طلعتی و جلالی‌فر [۲۱] نیز مشاهده شد. در تحقیقات ایشان بالاترین دمای پد، حدود ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و بالاترین دمای دیسک حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. اختلاف دما بین دیسک و پد در سطح تماس، به دلیل در نظر گرفتن پد به‌عنوان منبع گرمایی و همین‌طور وجود مقاومت حرارتی بین دیسک و پد است که به علت تجمع ذرات ناشی از سایش و در نتیجه ایجاد یک لایه نازک بین دیسک و پد، به وجود آمده است و این مقاومت حرارتی باعث پارتیشن حرارتی بین دیسک و پد می‌شود [۲۱].



شکل ۱۵: توزیع دمایی در سطح پد تک‌لایه.

[9] Samadi R, Farzanegan M, Asadian M, Khorami M. Investigation of the effect of pads and discs on the performance of the brake system. 9th Rail Transportation Conference, Tehran, Iran, 2007. (In Persian)

[10] Yevtushenko A, Kuciej M, Och E. Temperature in thermally nonlinear pad-disk brake system. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2014;57:274-81.

[11] Behdarvandi A, Bahoush Kazeruni R. Simulation of thermal performance of brake disc using Ansys CFX software. 1st Annual National Conference on Mechanical Engineering and Industrial Solutions, Mashhad, Iran, 2015 (In Persian).

[12] Khodaei Anaraki P, Hosseinzadeh Khashan A. Optimization of ventilated brake discs using simulation and multi-objective algorithm III-NSGA. 2nd National Conference on Engineering Management, Astaneh Ashrafieh, 2017. (In Persian)

[13] Moinszadeh M. Control of turbulence and corresponding noises in car disc brake system. 3rd National Conference on Mechanical Engineering, Esfarayen, Iran, 2017. (In Persian)

[14] Arnab B, Islam S, Khalak A, Afsar A. Finite difference solution to thermoelastic field in a thin circular FGM disk with a concentric hole. Procedia Engineering. 2014;90:193-8.

[15] Rezvani Tavakol M. A Review of the Theory and Approximation of Mechanical Properties of FGM Functional Materials by Introducing These Materials in Nature and Its Applications in Industry. Science Engineering Elite Quarterly. 2017;2(1):171-182.

[16] Zagrodzki P, Lam K, Al Bahkali E, Barber J. Nonlinear transient behavior of a sliding system with frictionally excited thermoelastic instability. J Trib. 2001;123(4):699-708.

[17] Davies M. Solutions to Fourier's equation and unsteady heat flow through structures. Building and Environment. 1995;30(3):309-21.

[18] Yu CC, Heinrich JC. Petrov—Galerkin method for multidimensional, time-dependent, convective-diffusion equations. International Journal for numerical methods in engineering. 1987;24(11):2201-15.

[19] Hibbitt, Karlsson, Sorensen. ABAQUS: theory manual: Hibbitt, Karlsson & Sorensen; 1997.

یک ساختار FGM با خواص مناسب می‌توان این امکان را فراهم آورد. یکی از مهم‌ترین معیارها در بررسی انتقال حرارت جهت جلوگیری از آسیب به سیستم، زمان انتقال حرارت می‌باشد. در دیسک FGM و همچنین پد FGM شاهد آن هستیم که این زمان با انتخاب خواص مناسب برای لایه‌ها کاهش می‌یابد و توزیع دمایی مناسب‌تری را شاهد خواهیم بود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که انتخاب این نوع از دیسک و پد ترمز می‌تواند به بهبود انتقال حرارت در هنگام ترمزگیری کمک کند. دمای بیشینه در ساختار FGM مقدار ۳۲۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد در حالی که در تحقیقات گذشته این مقدار ۲۷۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و شیب کاهش دما در ساختار FGM نسبت به غیر FGM بیشتر است که این موضوع نشان‌دهنده توانایی ساختار FGM در بهبود انتقال حرارت ناشی از ترمزگیری می‌باشد.

۶- مراجع

[1] Rezaei J, Moradi M, Rekrak D. Simulation of temperature and pressure distribution in disc brakes by finite element method. 3rd International Conference on Science and Engineering, Istanbul, Turkey, 2016 (In Persian)

[2] Behdarvandi A, Bahoush Kazeruni R. Heat transfer in the brake disc. 1st Annual National Conference on Mechanical Engineering and Industrial Solutions. Mashhad, Iran, 2015 (In Persian).

[3] Parker R, Newcomb T. The Performance and Characteristics of the Disk Brake. SAE Technical Paper 640140, 1964.

[4] Limpert R. Cooling Analysis of Disk Brake Rotors. 1975, SAE Tech Pap 751014.

[5] Nigh GL, Olson M. Finite element analysis of rotating disks. Journal of Sound and Vibration. 1981;77(1):61-78.

[6] Gao C, Lin X. Transient temperature field analysis of a brake in a non-axisymmetric three-dimensional model. Journal of materials processing technology. 2002;129(1-3):513-7.

[7] Jang YH, Ahn S-h. Frictionally-excited thermoelastic instability in functionally graded material. Wear. 2007;262(9-10):1102-12.

[8] Chi Z, He Y, Naterer G. Convective heat transfer optimization of automotive brake discs. SAE Int J Passeng Cars-Mech Syst. 2009;2(1):961-9.



Transient Temperature Field Analysis of FGM Brake Disk and Pad as a Symmetric Three-Dimensional Model

Ali Shahrjerdi^{1*}, Ali Safarifard²

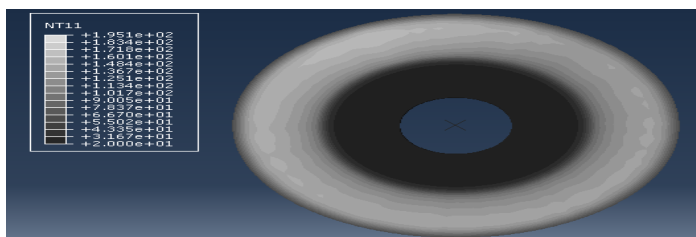
¹ Assistant Professor, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

² MSc, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

HIGHLIGHTS

- Using the FEM, the temperature range of the disk with the appropriate thermal boundary conditions is determined.
- By selecting FGM structure, the heat transfer rate can be raised and the heat damage can be minimized.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 17 February 2022

Received in revised form: 23 October 2021

Accepted: 17 November 2021

Available online: 18 May 2021

*Correspondence:

shahrjerdi@malayeru.ac.ir

How to cite this article:

A. Shahrjerdi, A. Safarifard. Transient temperature field analysis of FGM brake disk and pad as a symmetric three-dimensional model. Journal of Aerospace Mechanics. 2022;18(1):41-52

Keywords:

Disk
Pad
Heat transfer
FGM

ABSTRACT

The accurate performance of the braking system in all driving conditions is significantly effective in saving the life of the car's occupants. The disk and pad braking system are regarded as one of the friction braking systems. Employing the FGM disks and pads, the improvement of heat transfer and thermal properties of the braking system is investigated in this research. In order to specify the contact temperature distribution on the work surface of the brake, a three-dimensional analytical model is considered. Using the FEM, the temperature range of the disk with the appropriate thermal boundary conditions is determined based on the effects of the pad as a heat source. Following the power law of distribution, the material properties of the brake disk components change within the thickness and the effect of disk and pad properties on the thermal analysis results is examined. As stated in this research, selecting FGM structure only for the disk and once for the disk and pad with layers of the specified materials, the heat transfer rate can be raised, and the heat damage can be minimized. The maximum temperature in the FGM structure is 324 °C; however, in the previous research, this value is 272 °C and the slope of the temperature reduction in the FGM structure is more significant compared to the non-FGM structure which indicates the capability of the FGM structure to improve heat transfer resulting from braking.

