



شبیه‌سازی و تحلیل لایه‌نشانی و بارگذاری حرارتی پوشش‌های سدّ حرارتی

محمد سجاد صالحی^۱، محمد سیلانی^۲ و صالح اکبرزاده^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ دانشیار گروه مکانیک جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۲

چکیده

برای افزایش بهره‌وری توربین‌های گازی لازم است که این توربین‌ها در دمای کاری بالا کار کنند. از این رو، جهت محافظت از تجهیزات داخل توربین در برابر بارگذاری‌های حرارتی نسبتاً شدید، از پوشش‌های سدّ حرارتی استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر مدل‌سازی فرآیند ساخت و ایجاد این پوشش‌ها به کمک روش اجزاء محدود انجام گرفت. در این مدل‌سازی ابتدا فرآیند ساخت و ایجاد این پوشش‌ها به منظور بررسی رفتار ترمومکانیکی آن‌ها و همچنین میدان دمایی و تنش پسماند موجود در این پوشش‌ها در حین فرآیند ساخت و پس از پایان آن و خنک‌سازی تا دمای محیط، شبیه‌سازی شده است. سپس با شبیه‌سازی شرایط کاری واقعی توربین، رفتار ترمومکانیکی این پوشش‌ها در شرایط کاری ارزیابی گردیده و توزیع میدان دما و تنش موجود در سیستم محاسبه شدند. برخلاف ساده‌سازی‌های انجام گرفته در کارهای پیشین، این پژوهش روشی برای مدل‌سازی فرآیند پاشش حرارتی ارائه می‌کند. بر مبنای آن، رفتار ترمومکانیکی این پوشش‌ها از ابتدای فرآیند تولید تا پایان آن و سپس شبیه‌سازی شرایط کاری توربین مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تنش پسماند بیشینه پس از خنک‌سازی، در سطح مشترک بین زیرلایه و پوشش میانی قرار داشته و مقدار آن نیز در محدوده‌ی نتایج گزارش شده در کارهای تجربی است.

کلمات کلیدی: پوشش‌های سدّ حرارتی؛ روش اجزاء محدود؛ لایه نشانی؛ تنش پسماند.

Finite Element Simulation and Analysis of Deposition Process and Thermal Loading on Thermal Barrier Coatings

M.S. Salehi¹, M. Silani², S. Akbarzadeh^{3,*}

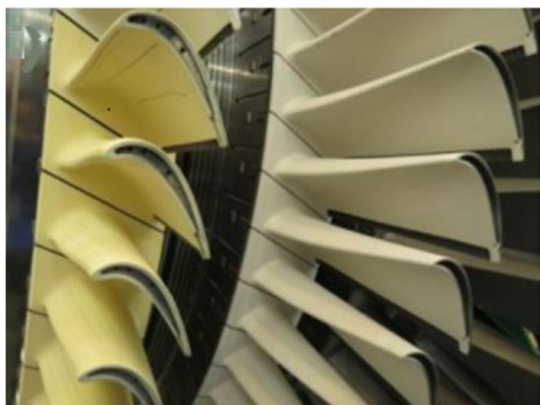
¹ M.A. Graduate Student, Mech. Eng., Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

^{2,3} Assoc. Prof., Mech. Eng., Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

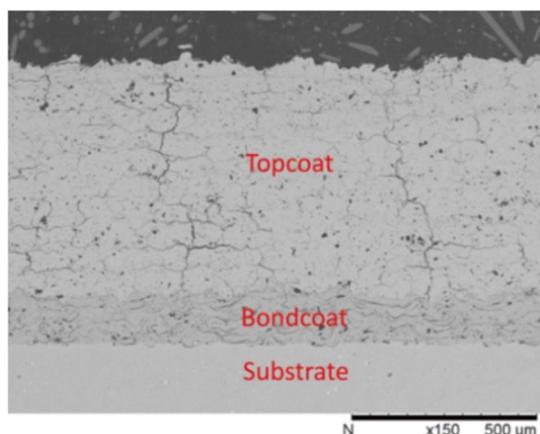
Abstract

The need for a high-temperature operation to increase efficiency has led to the use of protective coatings called Thermal Barrier Coatings (TBCs) to protect turbine equipment against destructive conditions and relatively high thermal loads. However, the coatings themselves are also gradually affected by these destructive conditions. In the present study, based on the microstructural characteristics of thermal barrier coatings, first, the modeling of the deposition process and the fabrication of these coatings was done using the finite element method. In this modeling, the deposition process of TBCs for studying the thermal and mechanical behavior of these coatings simulated. Then the temperature field and the residual stresses obtained during and after the deposition process and cooling to ambient temperature has been studied. Subsequently, by applying thermal loading and simulating the actual working conditions of the turbine, the thermal and mechanical behavior of TBCs was evaluated in working conditions and the distribution of the temperature and stress field in the system was calculated. The results show that the maximum residual stress after cooling is at the interface between the substrate and the bond coat. The obtained results and the accuracy of the proposed model validated by experimental reports.

Keywords: Thermal Barrier Coatings; Finite Element Method; Deposition Process; Residual Stress.



شکل ۱- پوشش‌های سد حرارتی بر روی پره های توربین
[۲]



شکل ۲- لایه‌های تشکیل‌دهنده پوشش‌های سد حرارتی
[۳]

۱- مقدمه

در قسمت داغ توربین‌های گازی یا موتور، به دلیل لزوم عملکرد در دمای کاری بالا به منظور افزایش بهره‌وری، نیاز به محافظت حرارتی قطعات دوار و غیردوار بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد. پوشش‌های سد حرارتی^۱ که به اختصار TBCs نامیده می‌شوند، پوشش‌هایی سرامیکی هستند که اغلب در بخش‌های داغ توربین‌های گازی صنعتی (مانند محفظه‌ی احتراق، تیغه‌ها یا پره‌های توربین)، در نیروگاه‌ها برای تولید برق، موتورهای هواپیما، نیروی محرکه دریایی، توربین‌های بخار و کمپرسورها و ... به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پوشش‌ها روی زیرلایه‌های سوپرآلیاژی قرار گرفته و اجازه می‌دهند تا بدون رسیدن دمای اجزاء فلزی به نقطه ذوب خود، دمای کاری توربین یا موتور افزایش یابد. به عبارتی، پوشش‌های سد حرارتی برای محافظت و عایق کردن این اجزاء فلزی روی آن‌ها قرار گرفته و باعث کاهش دمای سطح فلز و افزایش ماندگاری اجزاء می‌گردند [۱]. شکل ۱ نمونه‌ای از این پوشش‌ها را روی پره‌های توربین نمایش می‌دهد.

پوشش‌های سد حرارتی غالباً از یک لایه پوشش پیوندی میانی^۲ بین فلزی با ترکیب MCrAlY که در آن M، کبالت (Co) یا نیکل (Ni) و یا ترکیبی از هر دو است و یک لایه پوشش فوقانی^۳ سرامیکی از جنس زیرکونیای پایدار شده به کمک ایتریا^۴ (YSZ) تشکیل می‌شوند (شکل ۲).

۲- شرح مسأله

طول عمر کوتاه معمولاً از معایب پوشش‌های سد حرارتی است. به دلیل به کارگیری پوشش‌های سد حرارتی در شرایط کاری خشن، پوسته شدن این پوشش‌ها در مراحل ابتدایی امری اجتناب ناپذیر بوده و ساختار آن‌ها دچار شکست و فروپاشی می‌شود. در واقع باید گفت، در کنار تمام وظایف در نظر گرفته شده برای پوشش‌های سد حرارتی، خود این پوشش‌ها نیز به دلیل قرار گرفتن در معرض شرایط نامطلوبی

همچون، تنش‌های حرارتی بالا، کرنش‌های نسبتاً شدید، خستگی حرارتی و ... مستعد خرابی و از بین رفتن می‌باشند [۴].

در پژوهش‌هایی که تا کنون انجام شده، نشان داده شده است توزیع میدان دما و هم‌چنین تنش پسماند، دو جنبه مهم پوشش‌های سد حرارتی هنگام استفاده از آن‌ها در شرایط کاری واقعی است. با محاسبه توزیع میدان دما می‌توان قابلیت هدایت حرارتی مؤثر یا اثر عایق کاری حرارتی را محاسبه نمود و روش اجزاء محدود^۵ (FEM) در محاسبه توزیع میدان دما در پوشش‌های سد حرارتی بسیار مؤثر

¹ Thermal Barrier Coatings

² Bond Coat

³ Top Coat

⁴ Ytria-Stabilized Zirconia

⁵ Finite Element Method

پوشش‌ها به محاسبه انتقال حرارت پوشش‌های سده حرارتی با احتساب عیوب (ریزمنفذا و ریزترکها) پرداخته‌اند. در پژوهشی دیگر، وانگ و همکاران [۱۵] با محاسبه هدایت حرارتی مؤثر پوشش‌های سده حرارتی، تأثیر تغییرات آن بر میزان عایق‌کنندگی پوشش‌ها را به دست آورده و با در نظرگرفتن ساختارهای مختلف و ترکیبات متفاوت نشان دادند، با افزایش هدایت حرارتی در اثر تغییرات اعمال شده در ساختار و ترکیب پوشش، چه مقدار از مقدار عایق‌کنندگی پوشش کاسته می‌شود.

ساریکایا^۲ و همکاران [۱۶]، با بهره‌گیری از روش اجزاء محدود به محاسبه میدان دما و تنش پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن چند ترکیب مختلف برای لایه‌های پوشش، آن‌ها را شبیه‌سازی نمودند و به این نتیجه رسیدند، پوششی که از لایه سرامیکی با ترکیب $MgZrO_3$ و پنج لایه از نسبت‌های مختلف بین پوشش میانی و پوشش فوقانی برخوردار بود، رفتار عایق‌کنندگی بیشتری از خود نشان می‌دهد.

لی^۳ و همکاران [۱۷]، با استفاده از شبیه‌سازی محاسباتی، مقدار و نحوه توزیع تنش پسماند در پوشش‌های سده حرارتی را به دست آورده و دریافتند که سطح مشترک بین لایه‌های مختلف پوشش، مناطق بحرانی تمرکز تنش است. آن‌ها در این پژوهش همچنین رابطه بین تنش پسماند و شرایط خنک‌سازی همچون نرخ و زمان خنک‌سازی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که نرخ خنک‌سازی کمتر و زمان خنک‌سازی کوتاه‌تر، منجر به کاهش مقدار تنش پسماند در این پوشش‌ها می‌شود.

پژوهش‌های انجام شده تا کنون در زمینه شبیه‌سازی رفتار ترمومکانیکی پوشش‌های سده حرارتی، تنها متمرکز بر تحلیل آن‌ها تحت بارگذاری حرارتی و در شرایط کاری توربین بوده است و همواره فرآیند ساخت و ایجاد این پوشش‌ها و شرایطی که در حین ساخت آن‌ها اتفاق می‌افتد، برای ساده‌سازی مسئله، نادیده گرفته شده است [۱۸]. در پژوهش حاضر تلاش شده است که با مدل‌سازی فرآیند پاشش حرارتی، رفتار ترمومکانیکی پوشش‌های سده حرارتی از ابتدای فرآیند تولید و لایه‌نشانی آن‌ها تا پایان فرآیند پاشش

خواهد بود. این پژوهش‌ها نشان دادند که با در نظر گرفتن ویژگی‌های ریزساختاری ذاتی پوشش‌های سده حرارتی، می‌توان هدایت حرارتی خود پوشش‌های سده حرارتی، انتقال گرما بین پوشش‌های سده حرارتی و محیط و تابش حرارتی در دمای بالا را به کمک روش اجزاء محدود محاسبه کرد [۸-۱۵].

از سویی دیگر، پژوهش‌های انجام شده نشان داده‌اند که تنش پسماند نیز به دلیل تأثیر آن بر حالت‌های خرابی و طول عمر پوشش‌های سده حرارتی ایجاد شده، بسیار مهم است. تعدادی از کارهای پیشین، توزیع تنش پسماند پوشش‌های سده حرارتی هنگام قرار گرفتن آن‌ها در معرض شرایط کاری مختلف را گزارش داده و تنش پسماند انواع گوناگون پوشش‌های سده حرارتی را به کمک روش اجزاء محدود محاسبه کردند. آن‌ها نشان دادند که تنش پسماند هنگام فرآیند ساخت، هنگام تحمل شوک حرارتی و همچنین در زمان اکسایش در دمای بالا در پوشش‌های سده حرارتی ایجاد و گسترش می‌یابد. روش اجزاء محدود بر پایه تکنیک کوپلینگ حرارتی- مکانیکی، می‌تواند به طور مؤثری تنش پسماند پوشش‌های سده حرارتی را محاسبه نماید [۹-۱۲].

وانگ^۱ و همکاران [۱۳] در پژوهش خود نشان دادند که هدایت حرارتی پوشش‌های سده حرارتی برای ارزیابی قابلیت اطمینان آن‌ها بسیار مهم است، در واقع برای پوشش‌های سده حرارتی اگر تنها هدایت حرارتی در نظر گرفته شود، هر چه هدایت حرارتی کم‌تر باشد، بهتر است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که اثر عایق‌کاری حرارتی بالا در پوشش‌های سده حرارتی معادل هدایت حرارتی کم است. بر اساس تحقیقات آن‌ها، به دلیل هدایت حرارتی کم‌تر پوشش فوقانی سرامیکی در مقایسه با لایه‌های دیگر پوشش‌های سده حرارتی، با افزایش ضخامت پوشش فوقانی، اثر عایق‌کاری حرارتی افزایش می‌یابد؛ اما از سویی دیگر، به دلیل روی هم قرار گرفتن لایه‌های پوشش، با افزایش ضخامت پوشش فوقانی، تنش پسماند انباشته شده در پوشش فوقانی سرامیکی نیز افزایش می‌یابد که این امر موجب خرابی و پوسته‌شدن پوشش می‌شود.

وانگ و همکاران [۱۴]، در پژوهش خود با بهره‌گیری از قانون انتقال حرارت فوریه کلاسیک، با شبیه‌سازی اولیه

^۲ O. Sarikaya

^۳ M. Lee

^۱ L. Wang

و خنک‌سازی آن و سپس تحت بارگذاری حرارتی و شرایط کاری واقعی توربین، مورد مطالعه و تحلیل قرار گیرد.

۳- مدل اجزاء محدود

به منظور شبیه‌سازی فرآیند مورد نظر، از روش کوپل ترتیبی برای تحلیل انتقال حرارت و تحلیل تنش در پوشش‌های سد حرارتی استفاده شد؛ بدین صورت که برای شبیه‌سازی مسئله، نخست یک تحلیل انتقال حرارت گذرا انجام گرفت تا توزیع دما هنگام پاشش با توجه به فرآیند رسوب شدن ذرات، محاسبه گردد. در گام بعد، به کمک یک حل اجزاء محدود الاستیک-پلاستیک، توزیع تنش حرارتی بر اساس پروفیل دمایی‌ای محاسبه شد که از مرحله قبل به دست آمد.

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره گردید، در پژوهش حاضر برخلاف ساده‌سازی‌های انجام شده در کارهای پیشین، فرآیند لایه‌نشانی و رسوب ذرات ماده هنگام پاشش پلاسمایی شبیه‌سازی شده است. این امر به دلیل تأثیر بسیار مهم این فرآیند در ایجاد نوع ساختار و توزیع تنش پسماند در پوشش‌ها انجام شده است. برای این منظور، در این پژوهش فرآیند لایه‌نشانی به کمک تکنیک فعال‌سازی/غیرفعال‌سازی المان‌ها در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. این تکنیک، کاربر را قادر می‌سازد که بسته به نیاز در هر مرحله از شبیه‌سازی، مجموعه‌ای از المان‌ها را از فرآیند پردازش خارج و یا با فعال‌سازی مجدد آن‌ها، آن‌ها را وارد فرآیند پردازش و تحلیل نماید و به این ترتیب کمک می‌کند تا با در نظر گرفتن تنش حرارتی و تنش کوئچپینگ به وجود آمده در هر لایه از المان‌ها، رفتار حرارتی و تنش پسماند با دقت بیشتری مدل‌سازی گردد.

در هر مرحله از شبیه‌سازی فرآیند لایه‌نشانی و با فعال شدن هر لایه از المان‌ها، بارگذاری حرارتی باعث به وجود آمدن تنش حرارتی زیادی در المان‌های زیرلایه و لایه‌های پوشش شده و به دنبال آن کرنش حرارتی قابل توجهی در المان‌ها اتفاق می‌افتد. این تغییر شکل المان‌ها، باعث جابجا شدن گره‌ها می‌شود و با ادامه این روند، تغییر مکان گره‌ها به تدریج بیشتر شده تا جایی که منجر به یک جابجایی بزرگ برای هر گره می‌شود. در این گونه تحلیل‌ها که جابجایی‌های بزرگ گره‌ها می‌تواند حتی یک پیکربندی جدیدی بسیار متفاوت با پیکربندی اولیه ایجاد کند، از تکنیک المان‌های

تکراری استفاده می‌شود. این المان‌های تکراری دقیقاً روی المان‌های اصلی قرار گرفته و گره‌های المان‌های اصلی با این المان‌های تکراری به اشتراک گذاشته می‌شود. این کار موجب می‌شود تا المان‌های تکراری، جابجایی گره‌های المان‌های اصلی پایینی را دنبال کرده و از طرفی با متصل بودن به گره‌های المان‌هایی که هنوز در حالت غیرفعال هستند، این امکان را فراهم سازند تا المان‌های لایه‌های بالاتر در موقعیت صحیح خود فعال گردند.

با توجه به اینکه انتقال حرارت در این پوشش‌ها تقریباً تنها در راستای ضخامت (راستای پاشش) است، از این رو، برای کاهش زمان محاسبات، در پژوهش حاضر از یک مدل دوبعدی استفاده شد. زیرلایه از جنس اینکونل ۷۱۸ انتخاب گردید. طول و عرض زیرلایه به ترتیب، ۱۲/۷ و ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. روی زیرلایه، پوشش میانی (NiCoCrAlY) به ضخامت ۲۵۰ میکرومتر و روی آن، پوشش فوقانی ($ZrO_2-8\%wtY_2O_3$) با ضخامتی معادل ۵۰۰ میکرومتر قرار داده شد. فرض شده است، سطح مشترک زیرلایه/پوشش میانی و پوشش میانی/پوشش فوقانی به صورت تخت هستند، لایه‌های پاشیده شده کاملاً با یکدیگر پیوند داشته و لایه‌ها عیوبی نداشته باشند. در هر مرحله از شبیه‌سازی فرآیند پاشش پلاسمایی، به کمک تکنیک فعال‌سازی المان‌ها، یک لایه نازک از پوشش میانی (به ضخامت هر لایه ۵۰ میکرومتر) و پس از آن، پوشش فوقانی (به ضخامت هر لایه ۱۰۰ میکرومتر) روی زیرلایه و یا لایه رسوب شده قبلی قرار می‌گیرد. رفتار مواد زیرلایه و پوشش‌ها، به وسیله ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی وابسته به دما شبیه‌سازی می‌شود. ویژگی‌های ترمومکانیکال هر کدام از مواد مدل شده، بر اساس گزارش‌های موجود در پژوهش‌های لی و همکاران [۱۷] و تیکسیرا^۱ و همکاران [۱۹] در نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفت.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مدل ارائه شده، از لبه سمت چپ، تنها در راستای افقی مقید گردیده است و لبه پایینی مدل نیز در راستای عمودی (راستای پاشش) مقید گشته و در بقیه‌ی جهات آزاد است. لبه زیرین مدل از ابتدای شروع فرآیند تا انتهای خنک‌سازی، با هوای محیط

¹ V. Teixeira



شکل ۳- مدل ارائه شده از پوشش‌های سد حرارتی شامل زیرلایه، پوشش میانی و پوشش فوقانی

دما هنگام لایه‌نشانی را می‌توان به صورت شکل ۴ نمایش داد.

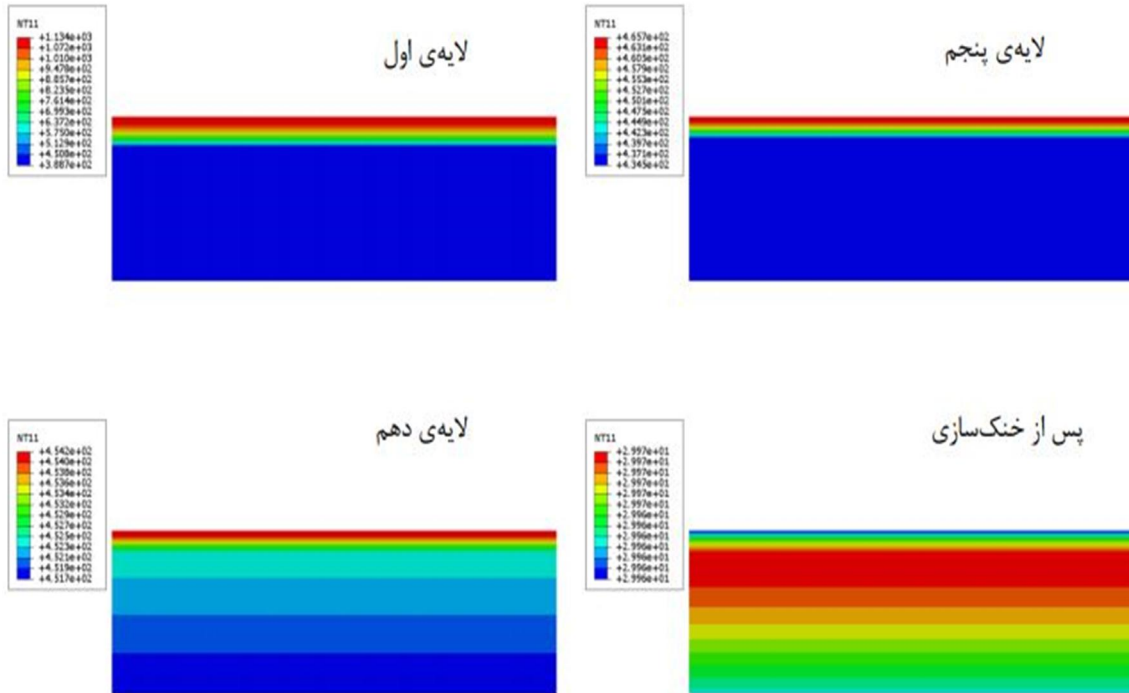
همچنین نمودار تغییرات دما برای یک نقطه دلخواه از زیرلایه به فاصله $1/35$ میلی‌متر از محور افقی و $6/81$ میلی‌متر از محور عمودی در شکل ۵ ارائه شده است. مقدار شار حرارتی پس از لایه‌نشانی لایه‌های اول و پنجم، به ترتیب 14 kW/m^2 و $4/2 \text{ kW/m}^2$ است. در واقع از آنجا که در ابتدای فرآیند پاشش، اختلاف دمای گاز پلاسما و زیرلایه بسیار زیاد است، شار حرارتی قابل توجهی به وجود می‌آید، اما با ادامه فرآیند به خاطر کم شدن اختلاف دمای یاد شده، به تدریج از مقدار شار حرارتی کاسته می‌شود. این مقدار تا پایان فرآیند پاشش در همین محدوده، نوساناتی داشته و نهایتاً در انتهای مرحله دهم (پایان پاشش) به $4/3 \text{ kW/m}^2$ می‌رسد. سپس در انتهای مرحله خنک‌سازی به دلیل خنک شدن مجموعه (زیرلایه و لایه‌های رسوب شده) و کاهش اختلاف دمای قطعه با محیط، مجدداً مقدار شار حرارتی کاهش می‌یابد تا آنجایی که پس از حدود بیست دقیقه، مقدار آن به 23 W/m^2 می‌رسد.

پس از لایه‌نشانی لایه اول، تنش به وجود آمده ناشی از پروفیل توزیع دما، مقدار بیشینه خود را در سطح مشترک همان لایه اول با زیرلایه تجربه می‌کند. مقدار این تنش بیشینه تقریباً برابر با 292 MPa است. با ادامه روند لایه‌نشانی و بر اساس نتایج به دست آمده، مشاهده می‌گردد که تنش بیشینه در راستای افقی، در همان محل سطح مشترک بین پوشش میانی و زیرلایه اتفاق می‌افتد. مقدار بیشینه این تنش با ادامه فرآیند لایه‌نشانی کاهش

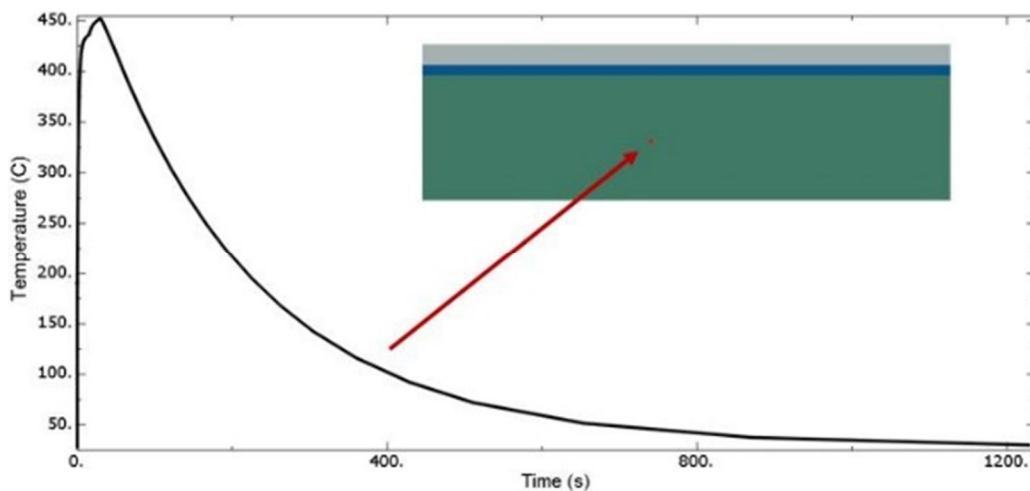
با دمایی (T_a) برابر 27 درجه سانتیگراد در ارتباط است. از سویی دیگر، با توجه به شرایط واقعی پوشش‌دهی حرارتی، سطح بالایی زیرلایه و سطح لایه‌های رسوب شده نیز با گاز پلاسما داغ (T_g) در ارتباط بوده که این دما برای لایه‌نشانی پوشش‌های میانی و فوقانی، به ترتیب برابر 450 و 470 درجه سانتیگراد است؛ همچنین بر اساس شرایط واقعی فرآیند لایه‌نشانی، دمای اولیه برای زیرلایه، ذرات مذاب پوشش میانی و فوقانی به ترتیب برابر 27 ، 1400 و 2200 درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد [۱۷]. برای تحلیل انتقال حرارت از المان‌های چهار گرهی انتقال حرارت هدایت ($DCC2D4$) و برای تحلیل تنش (حل استاتیکی) از المان‌های چهار گرهی تنش صفحه‌ای ($CPS4$) استفاده شده است. تعداد کلی گره‌ها و المان‌ها در مش‌بندی ارائه شده، 53424 گره و 63450 المان است.

۴- نتایج و بحث

با شروع لایه‌نشانی، دمای زیر لایه به سرعت افزایش یافته و با ادامه فرآیند نهایتاً به حدود 452 درجه سانتیگراد می‌رسد. بیشینه دما پس از لایه‌نشانی لایه‌های اول و پنجم به ترتیب به 390 و 436 درجه می‌رسد؛ همچنین دمای سطح پوشش در انتهای فرآیند پاشش به 454 درجه می‌رسد؛ اما با پایان لایه‌نشانی و پس از مرحله خنک‌سازی به دمای 29 درجه باز می‌شود. مطابق شکل ۴، با شروع لایه‌نشانی، دما به سرعت بالا رفته و پس از پایان فرآیند پاشش (ثانیه‌ی ۳۰) و شروع مرحله خنک‌سازی دما به تدریج تا دمای محیط کاهش می‌یابد و پس از گذشت حدود 20 دقیقه به پایداری می‌رسد. روند تغییرات میدان



شکل ۴- روند تغییرات میدان دما در حین لایه‌نشانی



شکل ۵- روند تغییرات دمای یک نقطه دلخواه از زیرلایه در حین لایه‌نشانی

موجود در قطعه افزایش یافته و در نهایت پس از پایان مرحله خنک‌سازی به مقدار 30.4 MPa می‌رسد. افزایش تنش موجود در قطعه را می‌توان ناشی از انباشته شدن تنش کوئنچینگ لایه‌های مختلف هنگام خنک‌سازی تا دمای محیط و نهایتاً ایجاد تنش پسماندی معادل MPa 30.4 در قطعه تعبیر کرد.

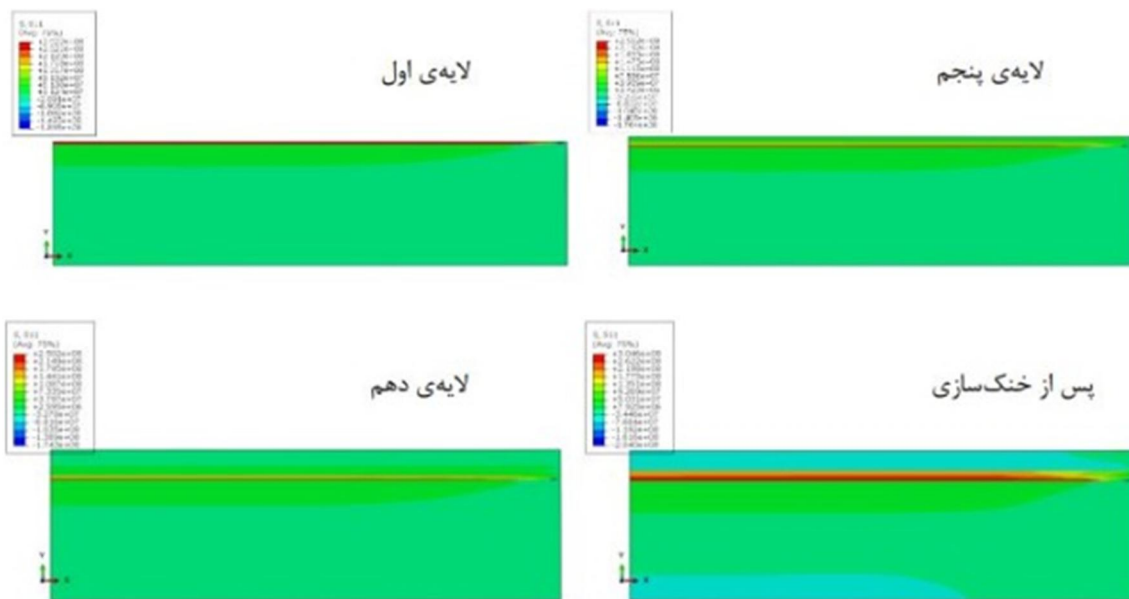
می‌یابد و به عنوان نمونه، پس از لایه‌نشانی لایه پنجم به 255 MPa و پس از پایان فرآیند پاشش به 250 MPa کاهش پیدا می‌کند. مشاهده می‌شود که محل این تنش بیشینه، همچنان در همان موقعیت قبلی و در سطح مشترک پوشش میانی و زیرلایه قرار دارد؛ اما پس از قطع بارگذاری حرارتی روی قطعه و آغاز خنک‌سازی، تنش

تنش پسماند به وجود آمده در قطعه پس از خنک‌سازی در شکل ۶ نمایش داده شده است.

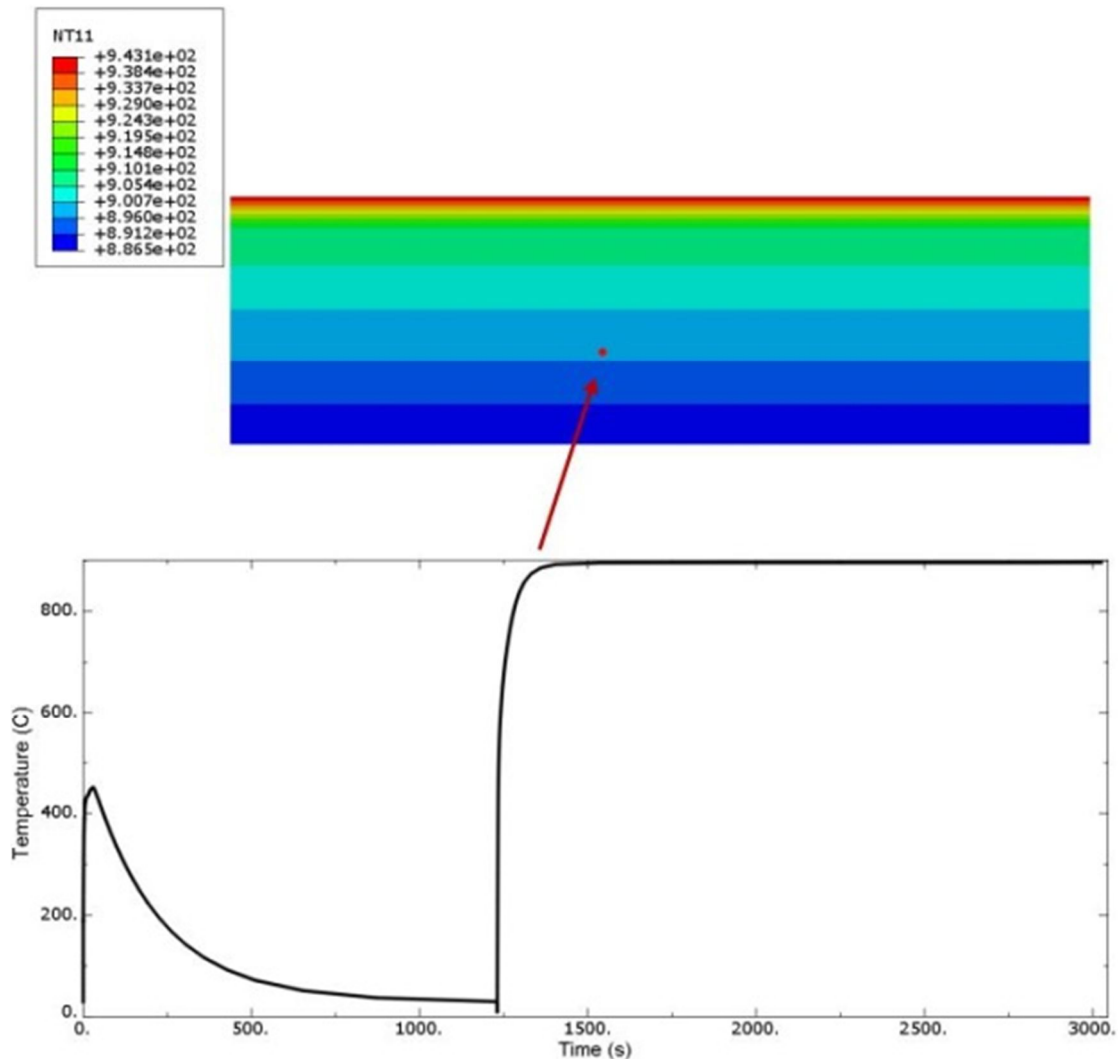
پس از شبیه‌سازی فرآیند ساخت پوشش‌های سد حرارتی و پایان پاشش و خنک‌سازی سیستم تا دمای محیط، مدل تازه پوشش داده شده تحت بارگذاری حرارتی قرار گرفته و با شبیه‌سازی شرایط کاری، رفتار حرارتی و مکانیکی آن مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور، یک بارگذاری دمایی با توزیع یکنواخت دما در کل مدل روی سطح فوقانی پوشش سیستم اعمال می‌شود. این بارگذاری حرارتی از حالتی که مجموعه در دمای محیط است، شروع می‌شود و به دمای حدود ۹۵۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. زمان در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی این مرحله ۳۰ دقیقه است. با شروع بارگذاری حرارتی دمای مجموعه افزایش می‌یابد تا اینکه دمای سطح فوقانی پوشش که با گاز داغ در ارتباط است، به دمای مورد نظر برسد. پس از آن دما به پایداری رسیده و مجموعه در این موقعیت حرارتی باقی می‌ماند. در حالی که دمای تقریبی سطح فوقانی پوشش به حدود ۹۴۵ درجه سانتیگراد رسیده، دمای سطح زیرین زیرلایه به حدود ۸۸۶ درجه می‌رسد. این اختلاف ۵۸ درجه‌ای به وجود آمده به معنای عملکرد عایق‌کنندگی پوشش در محافظت از زیرلایه است (شکل ۷).

در راستای عمودی (راستای پاشش)، در لبه سمت راست مدل و در قسمت لایه‌های پوشش میانی، نسبت به سایر نقاط، تنش عمودی به وجود آمده وضعیت شدیدتری دارد. در واقع با شروع فرآیند پاشش و لایه نشانی اولین لایه، در لبه سمت راست مدل، تنشی معادل ۴۳ MPa ایجاد می‌شود. با ادامه روند لایه‌نشانی، موقعیت این تنش بیشینه به طرف نقطه‌ای واقع بر سطح مشترک پوشش میانی و زیرلایه و روی لبه مدل رفته و مقدار این تنش بیشینه به تدریج افزایش می‌یابد و به ۵۳ MPa در لایه پنجم و ۵۴ MPa پس از لایه‌نشانی آخرین لایه می‌رسد؛ اما با شروع خنک‌سازی از مقدار این تنش به شدت کاسته می‌شود، این کاهش تنش به شکلی است که در نهایت به تنش فشاری تبدیل می‌شود. این روند همچنان ادامه یافته تا آنجا که بیشینه این تنش فشاری پس از مرحله خنک‌سازی به ۱۱۱ MPa- رسیده و موقعیت آن روی همان لبه سمت راست و در سطح مشترک پوشش‌های میانی و فوقانی قرار می‌گیرد.

بر اساس نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که مقدار تنش بیشینه در راستای افقی اتفاق می‌افتد. به عبارتی، مقدار تنش در راستای افقی به مراتب بیشتر از تنش در راستای عمودی است. روند تغییرات میدان تنش بیشینه در راستای افقی در حین لایه‌نشانی و هم‌چنین



شکل ۶- روند تغییرات میدان تنش در راستای افقی در حین لایه نشانی



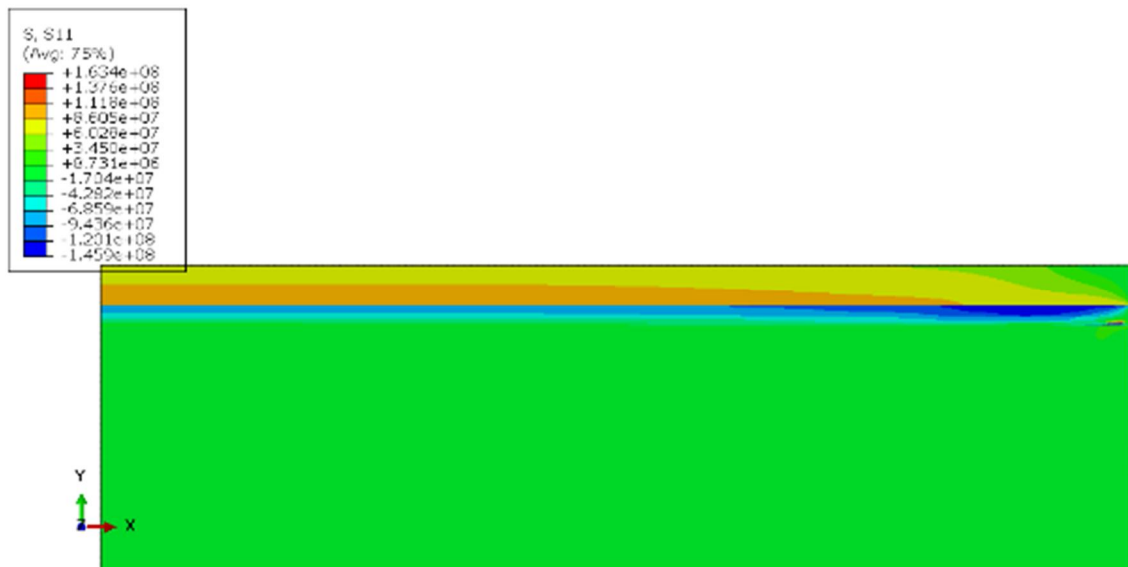
شکل ۷- روند تغییرات دمای همان نقطه از زیر لایه در شرایط کاری

مؤلفه‌های تنش پسماند بود را آزاد می‌کند. این مقدار تنش موجود در سیستم نیز، ناشی از وجود تنش عدم انطباق حرارتی به دلیل اختلاف در ضریب انبساط حرارتی مواد لایه‌های مختلف سیستم پوشش داده شده است. مقدار و نحوه توزیع تنش در مجموعه، تحت بارگذاری حرارتی در شرایط کاری توربین در شکل ۸ نمایش داده شده است.

۵- راستی آزمایی نتایج

در پژوهش ساریکایا و همکاران [۸]، گزارش شده است که پوشش‌های سد حرارتی به طور میانگین، دمای فلز را بین ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌دهند. به عبارت دیگر، این

با شبیه‌سازی شرایط کاری توربین برای محاسبه تنش موجود در مجموعه، مشاهده گردید که مقدار تنش موجود در سیستم در راستای افقی به حدود ۱۶۳ MPa می‌رسد. این در حالی است که همان‌طور که بیان شده بود، تنش پسماند موجود در سیستم تازه پاشش داده شده ۳۰۴ MPa بود؛ بنابراین مشاهده می‌شود که مقدار تنش پسماند موجود در پوشش‌های سد حرارتی، پس از قرارگیری آن‌ها تحت بارگذاری حرارتی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، بارگذاری حرارتی روی سیستم تازه پوشش داده شده همانند یک عملیات حرارتی، باعث کاسته شدن از مقدار تنش موجود در سیستم شده و در واقع تنش کوئنچینگ که یکی از



شکل ۸ - توزیع تنش در راستای افقی در سیستم پوشش، تحت بارگذاری حرارتی

ساخت و ایجاد این پوشش‌ها نادیده گرفته می‌شد، در این تحقیق، با شبیه‌سازی فرآیند ساخت و ایجاد این پوشش‌ها رفتار حرارتی و مکانیکی پوشش‌های سته حرارتی مورد بررسی قرار گرفت و میدان دما و مقدار و نحوه توزیع تنش پسماند در آن‌ها محاسبه گردید. برای این منظور، ترکیبی از تحلیل حرارتی و تحلیل تنش استفاده گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که هنگام فرآیند ساخت، دمای زیرلایه از دمای محیط تا دمای ۴۵۲ درجه سانتیگراد بالا رفته و پس از پایان فرآیند و خنک‌سازی، به دمای محیط باز می‌گردد؛ هم‌چنین شار حرارتی عبوری از قطعه هنگام آغاز فرآیند ساخت معادل 14 kW/m^2 بوده، اما در پایان فرآیند پاشش به $4/3 \text{ kW/m}^2$ و پس از خنک‌سازی به 23 W/m^2 کاهش می‌یابد.

نتایج به دست آمده برای تنش پسماند هم نشان داد که مقدار بیشینه این تنش در شروع فرآیند ساخت، تنش کششی و برابر 292 MPa بوده، ولی تا پایان فرآیند پاشش این مقدار کاهش یافته و به 250 MPa می‌رسد. موقعیت این تنش بیشینه نیز همواره در سطح مشترک بین زیرلایه و پوشش میانی قرار دارد. مقدار تنش پسماند بیشینه پس از خنک‌سازی به 304 MPa می‌رسد، اما موقعیت آن هم‌چنان در همان سطح مشترک بین زیرلایه و پوشش میانی قرار دارد؛ هم‌چنین بر اساس نتایج، تنش به وجود

پوشش‌ها بین ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد عایق‌کنندگی برای فلز ایجاد می‌کنند. با توجه به نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر، همان‌گونه که مشاهده شد، پس از اعمال بارگذاری حرارتی، اختلاف دمای ایجاد شده از سطح فوقانی پوشش تا سطح زیرین زیر لایه در حدود ۵۸ درجه سانتیگراد است که در محدوده گزارش‌های پیشین قرار دارد.

گفتنی است، در این زمینه تحقیقات آزمایشگاهی جامعی وجود ندارد که تغییرات تنش در جهات مختلف و در نقاط مختلف را اندازه‌گیری کرده باشد، اما در مقادیر گزارش شده در کارهای پیشین برای تنش، بازه 70 MPa تا 380 MPa تنش کششی برای راستای افقی و هم‌چنین بازه‌ی 37 MPa تا 192 MPa تنش فشاری برای راستای عمودی گزارش گردیده است [۱۷، ۲۰]. نتایج به دست آمده از این پژوهش نیز با تقریب مناسبی در همین محدوده قرار دارد.

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ابتدا بر اساس مشخصات ریزساختاری پوشش‌های سته حرارتی، به کمک روش اجزاء محدود فرآیند ساخت و ایجاد این پوشش‌ها مدل‌سازی گردید. بر خلاف پژوهش‌های پیشین که به منظور ساده‌سازی، فرآیند

- [3] Gupta M (2015) Design of thermal barrier coatings: A modelling approach. Springer.
- [4] Zhao H, Levi CG, Wadley HN (2014) Molten silicate interactions with thermal barrier coatings. *Surf Coat Technol* 251: 74-86.
- [5] Bertrand G, Bertrand P, Roy P, Rio C, Mevrel R (2008) Low conductivity plasma sprayed thermal barrier coating using hollow psz spheres: Correlation between thermophysical properties and microstructure. *Surf Coat Technol* 202(10): 1994-2001.
- [6] Clarke DR (2003) Materials selection guidelines for low thermal conductivity thermal barrier coatings. *Surf Coat Technol* 163: 67-74.
- [7] Klemens P, Gell M (1998) Thermal conductivity of thermal barrier coatings. *Mater Sci Eng: A* 245(2): 143-149.
- [8] Ma X, Wu F, Roth J, Gell M, Jordan EH (2006) Low thermal conductivity thermal barrier coating deposited by the solution plasma spray process. *Surf Coat Technol* 201(7): 4447-4452.
- [9] Bengtsson P, Persson C (1997) Modelled and measured residual stresses in plasma sprayed thermal barrier coatings. *Surf Coat Technol* 92(1-2): 78-86.
- [10] Hsueh CH, Fuller Jr ER (2000) Residual stresses in thermal barrier coatings: effects of interface asperity curvature/height and oxide thickness. *Mater Sci Eng: A* 283(1-2): 46-55.
- [11] AN Khan, J Lu, H Liao (2003) Effect of residual stresses on air plasma sprayed thermal barrier coatings. *Surf Coat Technol* 168(2-3): 291-299.
- [12] Zhang X, Xu B, Wang H, Wu Y (2005) An analytical model for predicting thermal residual stresses in multilayer coating systems. *Thin Solid Films* 488(1-2): 274-282.
- [13] Wang L, Wang Y, Sun X, Pan Z, He J, Zhou Y, Wu P (2011) Microstructure and surface residual stress of plasma sprayed nanostructured and conventional ZrO₂-8wt% Y₂O₃ thermal barrier coatings. *Surf Interface Anal* 43(5) 869-880.
- [14] Wang L, Wang Y, Sun X, He J, Pan Z, Wang C (2012) A novel structure design towards extremely low thermal conductivity for thermal barrier coatings-Experimental and mathematical study. *Mater Design* 35: 505-517.
- [15] Wang L, Zhong X, Zhao Y, Tao S, Zhang W, Wang Y, Sun X (2014) Design and optimization of coating structure for the thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying via finite element method. *J Asian Ceram Soc* 2(2): 102-116.
- [16] Sarikaya O, Islamoglu Y, Celik E (2005) Finite element modeling of the effect of the ceramic coatings on heat transfer characteristics in

آمده در پوشش‌ها، در راستای افقی (راستای سطح مشترک پوشش‌ها) مقدار به مراتب بیشتری نسبت به راستای عمودی (راستای پاشش) داشته و در حالی که پس از خنک‌سازی، مقدار تنش کششی بیشینه در راستای افقی به ۳۰۴ MPa رسیده است، این تنش در راستای عمودی مقداری برابر ۳۵ MPa دارد.

سپس به توسعه مدل ارائه شده پرداخته شد و با شبیه‌سازی شرایط کاری توربین و اعمال بارگذاری حرارتی روی سیستم و رساندن دمای مرتبط با سطح پوشش به حدود ۹۵۰ درجه سانتیگراد، رفتار حرارتی و مکانیکی پوشش‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، در حالی که دما در سطح فوقانی پوشش در حدود ۹۴۴ درجه سانتیگراد قرار داشت، دمای سطح زیرین زیر لایه به ۸۸۶ درجه سانتیگراد رسید. این اختلاف دما به معنای عایق کردن حدوداً ۵۸ درجه‌ای زیرلایه در دمای کاری توربین است. به عبارتی دیگر، با به کارگیری پوشش‌های سد حرارتی برای تجهیزات درون توربین با دمای کاری نزدیک به ۹۵۰ درجه سانتیگراد، این پوشش‌ها، ۵۸ درجه سانتیگراد زیرلایه را خنک تر نگه داشته و از بالا رفتن دمای آن جلوگیری می‌کنند؛ هم‌چنین نتایج تحلیل تنش این پوشش‌ها نشان دهنده آن بود که هنگام قرار گرفتن سیستم پوشش در دمای بالای توربین، این دمای بالا رفتاری شبیه به عملیات حرارتی برای سیستم پوشش داشته و باعث کاستن مقدار قابل توجهی از تنش‌های پسماند موجود در قطعه پس از خنک‌سازی می‌شود و مقدار بیشینه این تنش را از ۳۰۴ MPa به ۱۶۳ MPa کاهش می‌دهد.

۷- مراجع

- [1] Schulz U, Leyens C, Fritscher K, Peters M, Saruhan-Brings B, Lavigne O, Dorvaux JM, Poulain M, Mévrel R, Caliez M (2003) Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings. *Aerosp Sci Technol* 7(1): 73-80.
- [2] Wang L, Li D, Yang J, Shao F, Zhong X, Zhao H, Yang K, Tao S, Wang Y (2016) Modeling of thermal properties and failure of thermal barrier coatings with the use of finite element methods: a review. *J Eur Ceram Soc* 36(6): 1313-1331.

- [19] Teixeira V, Andritschky M, Fischer W, Buchkremer H, Stöver D (1999) Effects of deposition temperature and thermal cycling on residual stress state in zirconia-based thermal barrier coatings. *Surf Coat Technol* 120: 103-111.
- [۲۰] اصغری ورزنده س (۱۳۸۹) مدل‌سازی شکست در پوشش‌های محافظ حرارتی. دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- thermal barrier applications. *Mater Design* 26(4): 357-362.
- [17] Lee MJ, Lee BC, Lim JG, Kim MK (2014) Residual stress analysis of the thermal barrier coating system by considering the plasma spraying process. *J Mech Sci Technol* 28(6): 2161-2168.
- [18] Asghari S, Salimi M (2010) Finite element simulation of thermal barrier coating performance under thermal cycling. *Surf Coat Technol* 205(7): 2042-2050.