

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی حل عددی در تحلیل توزیع دما و تنشهای پسماند حرارتی در پوشش دولایه سد حرارتی $La_2Zr_2O_7/8YSZ$ به کمک حل المان محدود*

نسیم نایب پاشایی^(۱) حسین وفاپی نژاد^(۲) سید حسین سیدین^(۳) محمدرضا ابوطالبی^(۴)
حسین سرپولکی^(۵) سید محمد مهدی هادوی^(۶)

چکیده

توزیع دما و تنش‌های پسماند در پوشش سد حرارتی سه لایه ($La_2Zr_2O_7/8YSZ/NiCrAlY$) تحت یک چرخه حرارتی ترکیبی و واقعی به کمک نرم افزار تجاری اباکوس شبیه‌سازی شد. از تکنیک کاهش زمان حل به روش مقیاس دهی جرمی برای جلوگیری از اعوجاج بیش از حد مش بندی، کاهش خطای عددی و واگرایی استفاده گردید. نتایج نشان داد که استفاده از روش افزایش جرم المان‌ها و جابجایی گره‌ها بصورت تطبیق پذیر باعث افزایش سرعت حل می‌شود که دلیل آن بزرگتر شدن نمونه‌های حلی در فرایند است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تنش‌های پسماند در منطقه پوشش محافظ و نه زیرلایه تمرکز یافته است و این به نوبه خود باعث بهبود و افزایش عمر این محصول محافظ می‌باشد. تحلیل عددی نشان داد که بیشترین میزان اعوجاج بصورت عمده در ناحیه پوشش‌های سرامیکی متمرکز شده است.

واژه‌های کلیدی پوشش سد حرارتی، تنش پسماند، شبیه سازی المان محدود، شوک حرارتی.

Finite Element Simulation of Temperature Distribution and Residual Stresses in New Thermal Barrier Coating $La_2Zr_2O_7/8YSZ$

N. Nayeypashae H. Vafaenezhad S. H. Seyedein, M. Aboutalebi, S. M. Hadavi, H. Sarpoolaky

Abstract An attempt was made to investigate the thermal and residual stress distribution in a novel three layer ($La_2Zr_2O_7/8YSZ/NiCrAlY$) during a real-like heating regime. The technique of reduction of solving time like mass scaling leads to a considerable reduction in running time while satisfying and not violating accuracy and converging criteria and constrains. Simulation results indicated that, most of damaging and harmful distortion and residual stress concentrate on ceramic top coats and this lead less harm and life time reduction in substrate.

Key words Thermal barrier coating, Residual stresses, Finite element simulation, Thermal shock.

*نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۳/۴/۳۰ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۳/۱۰/۲۸ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

Email: nayeypashae@iust.ac.ir

(۲) دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۳) دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۴) استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۵) استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۶) دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه مالک اشتر.

مقدمه

سوپرآلیاژهای مورد استفاده در اجزای توربین‌های دما بالا، به دلایلی همچون اکسیداسیون و گازهای خورنده که در شرایط کاری و در نتیجه احتراق آزاد می‌شوند، در معرض شرایط کاری دشوار قرار دارند [۱-۴]. ترکیب شیمیایی این سوپرآلیاژها به گونه‌ای است که می‌توانند استحکام خوب و مقاومت خزش در دمای بالا را تامین کنند اما به تنهایی حفاظت محیطی کافی ندارند، بنابراین اعمال پوشش محافظ برای حفاظت مواد زیرلایه از تخریب در شرایط کاری سخت ضروری است [۵،۶]. تلاش‌های متعددی در دهه‌های گذشته منجر به توسعه پوشش‌های حفاظتی برای اجزای توربین شده است [۵،۷].

پوشش‌های سد حرارتی وظیفه کاهش دمای اجزای موجود در بخش‌های داغ توربین‌های گازی و در نتیجه افزایش طول عمر آن‌ها را بر عهده دارند [۸،۹]. کاربرد این پوشش‌ها باعث کاهش شدت انتقال حرارت و کاسته شدن از دمای زیرلایه می‌شود که بهبود مصرف سوخت، افزایش قدرت موتور و ماندگاری اجزای موتور را در پی خواهد داشت. تحقیقات نشان داده است که این پوشش‌ها می‌توانند مقاومت خوبی در برابر سایش و خوردگی ایجاد کنند [۱۰،۱۷].

عمر مفید پوشش‌های سد حرارتی عمدتاً تحت تاثیر ترکیب شیمیایی لایه واسط، نوع اکسید محافظ، دما و تغییرات آن، روش اعمال پوشش، عوامل محیطی مانند ترکیب شیمیایی و سرعت گاز، نمک مذاب خورنده و فرسایش ناشی از گازهای داغ است [۱-۴]. وظیفه اصلی پوشش‌های سد حرارتی جلوگیری از انتقال جریان گرمایی به زیرلایه است. بنابراین، قابلیت عایق سازی حرارتی به عنوان یکی از مهمترین فاکتورها در ارزیابی عملکرد و توسعه کاربردی این پوشش‌ها به شمار می‌رود [۱۱،۱۲].

پوشش‌های سد حرارتی زیرکونیای به طور جزئی

پایدار شده با ایتریا (YSZ) و پوشش میانی MCrAlY (Co = M و Ni ویا ترکیبی از این دو عنصر)، به دلیل دارا بودن طیفی از خواص موردنیاز، بیشترین کاربرد را به عنوان پوشش‌های محافظ در دمای بالا دارند [۱۳،۱۱،۸]. در کنار مزایای فراوان این دسته از پوشش‌های محافظ، نقطه ضعف اصلی YSZ دمای عملیاتی محدود (1200°C) برای کاربردهای طولانی مدت است [۱۵،۱۴]. در دماهای بالاتر، استحاله فازی فاز شبه پایدار تتراگونال (t') به فاز تتراگونال و فاز مکعبی باعث می‌شود که حین سرمایش فاز تتراگونال به فاز منوکلینیک تبدیل شود و میکروتکرک‌ها در پوشش تشکیل شوند. علاوه بر این، با توجه به زینتر شدن پوشش در دماهای بالا، تخلخل پوشش کاهش می‌یابد در حالی که مدول یانگ و تنش کششی افزایش می‌یابد. این امر منجر به کاهش عمر مفید پوشش تحت چرخه‌های حرارتی می‌شود. از سوی دیگر، این پوشش‌ها دارای غلظت بالایی از جای خالی یون اکسیژن هستند، که در دماهای بالا از طریق تشکیل پوسته اکسیدی محافظ پایدار (TGO-اکسیدی که در اثر حرارت رشد می‌کند) در سطح لایه واسط به انتقال اکسیژن و اکسیداسیون لایه واسط در فصل مشترک سرامیک/لایه واسط کمک می‌کنند. این امر منجر به جدایش و شکست TBCها خواهد شد [۱۵،۱۴].

در پژوهش‌های انجام شده طی سالهای اخیر، روش‌های مختلفی برای غلبه بر مشکلات YSZ بررسی شده است [۱۴]. گزارش شده که پوشش‌های سد حرارتی بر پایه زیرکونات، به علت هدایت حرارتی پایین‌تر و پایداری فازی بالاتر و مقاومت بیشتر در برابر زینترینگ در دمای بالا گزینه مناسبی برای کاربردهای آینده در موتور هواپیماها، توربین‌ها و دیگر قطعات دمای بالا باشند. $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (LZ) اخیراً به عنوان ماده مورد استفاده در پوشش‌های سد حرارتی، پیشنهاد گردیده است [۱۶،۱۵].

سد حرارتی بر پایه زیرکونات انجام نشده است. از اینرو، در این تحقیق شبیه‌سازی عددی توزیع دما و تنش‌های پسماند در پوشش سد حرارتی سه لایه ترکیبی ($\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/8\text{YSZ}/\text{NiCrAlY}$) تحت یک چرخه حرارتی ترکیبی و واقعی، شامل گرمایش از دمای محیط تا دمای سرویس، نگهداری در دمای سرویس و سپس سرمایش تا دمای محیط مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش تحقیق

هندسه پوشش موردنظر متشکل از یک ساختار چندلایه است که از زیرلایه، لایه واسط، لایه سرامیکی اولیه و نهایتاً لایه سرامیکی ثانویه تشکیل شده است. جنس لایه‌های نام‌برده به ترتیب اینکونل ۷۳۸، ترکیب MCrAlY ، ترکیب سرامیکی زیرکونیای تقویت شده با ایتریا و نهایتاً ترکیب سرامیکی $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ می‌باشد که لایه واسط دارای ضخامت ۱۰۰ میکرومتر و سایر لایه‌ها دارای ضخامت ۲۰۰ میکرومتر هستند. نمایش گرافیکی شکل اصلی موتور توربوفن و مجموعه سیستم زیرلایه و پوشش، برش عرضی از مقطع دیواره و نمای سه بعدی مورد استفاده در شبیه‌سازی به ترتیب در شکل‌های (۱ و ۲) آمده است. تمامی اجزای سیستم اعم از زیرلایه و پوشش‌ها، دوبعدی و شکل‌پذیر و با هندسه پوسته‌ای در نظر گرفته شده است. ضخامت لایه‌ها متناسب با نوع پوشش و نیز نوع لایه سطحی متفاوت است و از این رو در شکل (۲) بصورت شماتیک معین شده است. در این تحقیق، ضخامت هر لایه ۲۰۰ میکرون است.

با توسعه صنایع جدید، تقاضا برای پوشش‌های سد حرارتی با عملکرد عالی به یک ضرورت تبدیل شده است. در این زمینه، ارزیابی و پیش‌بینی طول عمر پوشش‌های سد حرارتی اهمیت بیشتری یافته است. عموماً طول عمر و دوام پوشش‌های TBC، با تنش پسماند تعیین می‌شود. با توجه به آن که پوشش‌های سد حرارتی از چند لایه، شامل لایه فلزی و لایه سرامیکی، تشکیل شده‌اند تنش پسماند ناشی از عدم تطابق بین ضرایب انبساط حرارتی فلز و لایه سرامیکی، هنگامی که پوشش تحت چرخه حرارتی مابین گاز داغ و هوای خنک‌کننده قرار می‌گیرد، اجتناب ناپذیر خواهد بود [۱،۱۷،۱۸]. تنش پسماند منجر به جوانه‌زنی، رشد و گسترش ترک می‌شود [۸،۱۳،۱۹] و می‌تواند بر مدل شکست پوشش سد حرارتی تاثیر بگذارد. از اینرو، ارزیابی و پیش‌بینی الگوی توسعه تنش در پوشش سد حرارتی هنگام قرار گرفتن در معرض شوک حرارتی مهم و ضروری است [۱،۱۷].

روش‌های شبیه‌سازی عددی به ویژه روش‌های المان محدود، در ارزیابی رفتار پوشش‌ها و لایه فصل مشترک تحت بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی از طریق محاسبه میدان‌های تنش و کرنشی کاربرد فراوانی دارد و به منظور درک توزیع تنش در فصل مشترک فلز-سرامیک، مکانیزم گسترش تنش پسماند در لایه‌های مختلف و همچنین الگوی توسعه ترک و فرآیند شکست TBC کاربرد فراوانی دارد [۱،۱۷،۱۹،۲۵].

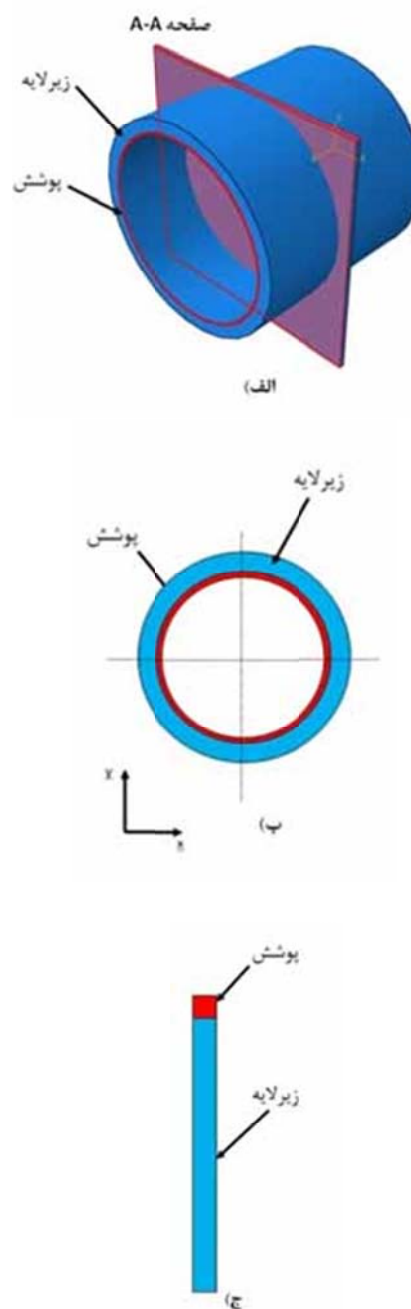
با توجه به مطالب ذکر شده، یافتن یک ترکیب جدید جهت جایگزینی با YSZ به منظور بهبود خواص و دوام پوشش‌های سد حرارتی ضروری به نظر می‌رسد. لذا پوشش‌هایی بر پایه $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (LZ) به عنوان کاندیدای جدید جهت ارتقای سطح کارایی این پوشش‌ها در کانون توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. لیکن تاکنون پژوهش‌های جامعی در ارتباط با پیش‌بینی رفتار حرارتی و توزیع تنش‌های پسماند در پوشش‌های

دانشیته تئوری ترکیبات سرامیکی حین تحلیل استفاده شده است (از تخلخل موجود در لایه‌های سرامیکی صرفنظر شده است). در تحلیل حاضر از المانهای مثلثی درجه دوم با شش گره در رئوس و وسط اضلاع استفاده شد. این نوع المان امکان بالاتر بردن صحت انتگرال-گیری برای محاسبات جابجاییهای مربوط به کرنش و تنش پسماند را فراهم می‌سازد. از طرف دیگر برای کاهش زمان حل از روش انتگرالگیری کاهششی از نوع کرنش صفحه ای بهره برده شده است.

هنگام اختصاص دادن خواص حرارتی و مکانیکی به لایه های مختلف، فرض همسانگردی خواص در هر دو بعد لحاظ شده است زیرا از حضور عیوب ناشی از فرایند پوشش دهی صرفنظر شده است. جدول (۱) خواص مکانیکی مورد استفاده در تحلیل کوپل حرارتی و مکانیکی مورد استفاده را بصورت تابعی گسسته از دما نشان می‌دهد، شایان ذکر است که نرم افزار اباکوس داده‌های بیشتر را با برونیابی استخراج و استفاده می‌کند. با توجه به بزرگ و قابل ملاحظه بودن حوزه محاسبات در قیاس با ابعاد عیوب بلوری حاضر در ساختار سرامیک‌ها، فرض همسانگردی لایه‌های پوشش قابل قبول است.

لایه سطحی 8YSZ
لایه واسط NiCrAlY
زیرلایه Inconel 738

شکل ۲. ترتیب لایه های پوشش سد حرارتی موردنظر در شبیه سازی



شکل ۱. حوزه محاسبات انتخابی با توجه به هندسه واقعی جسم موردنظر

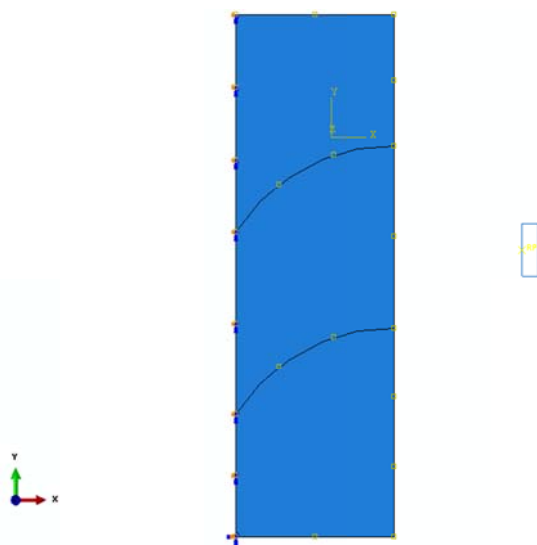
برای ساده سازی محاسبات و جلوگیری از اعوجاج بیش از حد المانها، فصل مشترک بین تمامی لایه‌های سرامیک/فلز و سرامیک/سرامیک تخت و بدون زبری فرض شده است. همچنین، فرض شده است که هیچگونه مقاومت حرارتی بین لایه‌ها وجود ندارد و از

جدول ۱ خواص فیزیکی و مکانیکی اجزای پوشش سد حرارتی

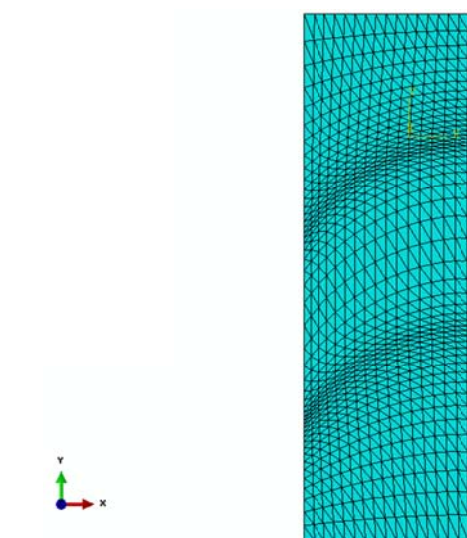
خواص ماده	دما (k)	زیرلایه Inconel 738	لایه واسط NiCoCrAlV	YSZ	La ₂ Zr ₂ O ₇
مدول الاستیک (GPa)	۲۷۶	۲۰۰	۲۲۵	۲۱۰	۱۷۵
	۶۷۳	۱۷۹	۱۸۶	۲۰۵	۱۶۷
	۱۰۷۳	۱۴۹	۱۴۷	۱۸۱	۱۵۰
	۱۴۷۳	۱۴۰	۱۳۴	۱۶۲	۱۳۵
دانسیته (kg/m ³)	۲۷۶	۸۲۲۰	۷۳۲۰	۵۴۰۰	۴۸۱۰
	۶۷۳				
	۱۰۷۳				
	۱۴۷۳				
ضریب پواسون	۲۷۶	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۱۲
	۶۷۳				
	۱۰۷۳				
	۱۴۷۳				
ضریب انبساط حرارتی ($\times 10^{-6}.k^{-1}$)	۲۷۶	۱۴/۴	۱۱/۶	۹/۱	۴/۵
	۶۷۳	۱۴/۴	۱۴	۱۰/۵۸	۹/۸۵
	۱۰۷۳	۱۵/۶	۱۶	۱۱/۱۳	۸/۲۱
	۱۴۷۳	۱۵/۸	۲۰/۸	۸/۵	۱/۷ ۱۰
گرمای ویژه (J.(kg.k)-1)	۲۷۶	۴۳۱	۵۰۱	۵۰۰	۲۱۹
	۶۷۳	۵۲۴	۵۹۲	۵۷۶	۴۵۵
	۱۰۷۳	۶۲۷	۷۸۱	۶۳۷	۴۷۵
	۱۴۷۳	۷۱۲	۷۶۴	۶۵۰	۵۱۵
هدایت حرارتی (W/m ² C)	۲۷۶	۱۱/۵	۴/۳	۱/۰۶	۰/۸۱
	۶۷۳	۱۷/۵	۶/۴	۰/۱۸	۰/۷۸
	۱۰۷۳	۲۳/۸	۱۰/۲	۰/۱۶۵	۰/۷۴

شکل (۳) حوزه محاسبات را بصورت مش بندی شده نمایان می سازد. برای انجام تحلیل ساختاری و محاسبه تنش پسماند، اعمال شرایط مرزی مناسب مکانیکی ضروری است. شرایط مرزی مختلفی بر روی نواحی کناری پوشش اعمال می گردد و در این تحقیق نیز بر اساس استراتژی غالب، شرایط مرزی مکانیکی متناسب با شرایط واقعی به طرفین قطعه اعمال گردید. با اعمال قیود مناسب می توان از حرکت قطعه در جهات مقید شده جلوگیری نمود و نیز تفسیر صحیحی از تنش های پسماند درون ماده به دست آورد. از اینرو، گوشه های افقی ساختار پوشش در جهت عمودی مقید شده و گوشه های عمودی از حرکت در جهت افقی بازداشته شده اند (شکل ۴).

سیکل بارگذاری حرارتی بدین صورت است که ابتدا در مرحله گرم شدن مجموعه در مدت زمان ۳۰۰ ثانیه تا دمای مورد نظر سرویس گرم می شود و در مرحله سرویس به مدت یک ساعت در آن دما باقی می ماند. در آخرین مرحله با صرف زمان ۳۰۰ ثانیه سیستم حرارت خود را از دست خواهد داد. نمودار شماتیک بارگذاری حرارتی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۴ اعمال شرایط مرزی مکانیکی به سیستم پوشش سد حرارتی



شکل ۳ محیط مش بندی شده مجموعه زیرلایه، لایه واسط و لایه سرامیکی پوشش سد حرارتی

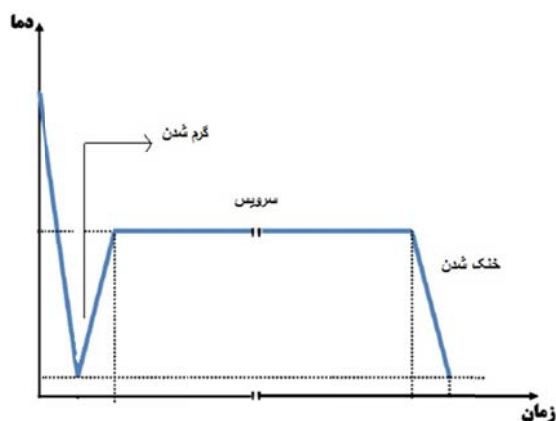
شرایط لازم است با استفاده از روش هایی این گام زمانی پایدار را افزایش داد، به گونه ای که علاوه بر زمان حل، دقت مساله نیز تحت تاثیر قرار نگیرد. با توجه به معادلات (۱) و (۲)، مشخص می گردد که افزایش چگالی المان می تواند سرعت موج را در آن کاهش دهد.

$$dt = \frac{Le}{c} \quad (1)$$

$$c = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{0.5} \quad (2)$$

با توجه به فرمولهای بالا، با افزایش میزان چگالی ماده به میزان مورد نظر، سرعت حرکت صوت درون جسم به میزان جذر آن مقدار کاهش می یابد و به همان میزان، نمو حلی افزایش می یابد. این افزایش نموهای حلی، کل زمان حل را به بازه های زمانی کوچکتری تقسیم می کند. حلگر ضمنی نرم افزار با استفاده از همین اصل، روشی را برای کاهش زمان شبیه سازی ارائه می دهد که به مقیاس دهی به جرم معروف است. در این روش به طور مجازی، جرم کل مدل یا قسمتی از آن افزایش یافته و به این ترتیب گام زمانی پایدار افزایش می یابد. در صورتی که مقیاس دهی به جرم به درستی انجام شود می تواند علاوه بر این که زمان حل را کاهش دهد، دقت حل را نیز در حد قابل قبولی حفظ کند. در صورتی که شبیه سازی شبه استاتیک باشد، کار انجام شده توسط نیروهای خارجی تقریباً برابر با انرژی داخلی سیستم خواهد بود. در این حالت انرژی ویسکوز تلف شده معمولاً کوچک است، مگر اینکه از مواد ویسکوالاستیک استفاده شده باشد. همانطور که از ماهیت فرآیند های شبه استاتیک انتظار می رود، به دلیل سرعت بسیار کم ماده درون مدل، نیروهای اینرسی بسیار کوچک و قابل صرف نظر کردن هستند. به همین دلیل انرژی جنبشی ماده قابل تغییر فرم نیز بسیار کوچک خواهد بود. لذا طبق یک قانون عمومی، انرژی جنبشی ماده تغییر شکل پذیر نباید از بخش کوچکی (معمولاً ۵ تا ۱۰ درصد) از انرژی داخلی آن، در حین فرآیند تجاوز کند.

حین حل عددی از قانون کلی ذکر شده برای بررسی صحت شبیه سازی شبه استاتیک استفاده می شود. در ابتدای تحلیل از یک مقیاس بندی جرم نسبتاً بزرگ استفاده شده و شبیه سازی انجام می شود. پس از دستیابی



شکل ۵ بارگذاری حرارتی اعمالی روی سیستم پوشش سد حرارتی

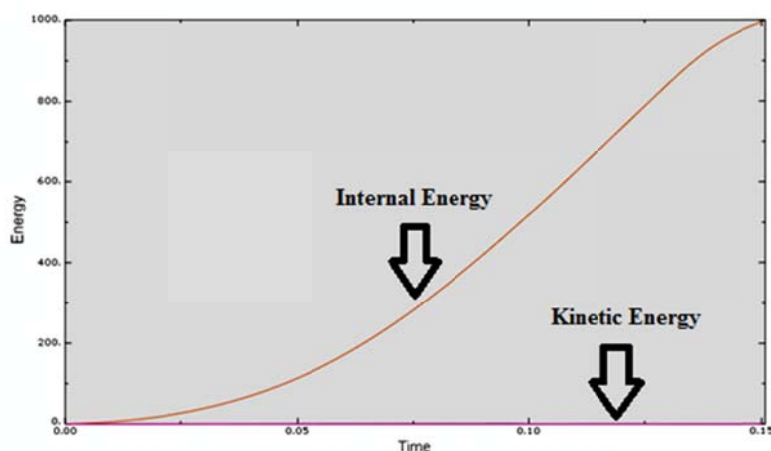
نتایج و بحث

برای دستیابی به یک حل اقتصادی (با دقت مناسب و در کوتاهترین زمان ممکن) معمولاً می توان به روش های مختلف زمان لازم برای حل مساله را کاهش داد. یک روش کارا و موثر، افزایش مصنوعی ابعاد المان ها به گونه ای است که حد پایداری افزایش یابد و تحلیل در تعداد گام های کمتری صورت پذیرد. این روش، تکنیک مقیاس دهی به جرم (mass scaling) نامیده می شود. در اکثر مساله ها از روش مقیاس دهی به جرم با مقیاس بالا برای کاهش زمان حل مساله بدون ایجاد خطا در جواب استفاده می شود. مقایسه نمودارهای انرژی داخلی و جنبشی معیاری برای ارزیابی عدم ایجاد خطا در مساله با استفاده از این روش است. میزان گام زمانی پایدار در نرم افزار به وسیله تخمین آن بر روی تک تک المان ها و سپس انتخاب کوچک ترین گام زمانی تعیین می گردد. به همین دلیل در صورتی که در مدل از المان های بسیار کوچک استفاده شده باشد یا به هر دلیل قسمتی از مدل به دلیل تغییر شکل های پیچیده، طول مشخصه کوچکی را به حل تحمیل کند، مقدار گام زمانی بسیار کوچک می گردد و در نتیجه تعداد گام زمانی مورد نیاز برای کل زمان شبیه سازی و به دنبال آن زمان صرف شده برای شبیه سازی بسیار طولانی می شود. گاهی اوقات این المان های کوچک تعدادشان بسیار اندک بوده و در قسمت کوچکی از کل مدل متمرکز هستند به صورتی که تاثیر چندانی در دقت حل نداشته ولی به شدت باعث کم شدن حد پایداری می گردند. در این

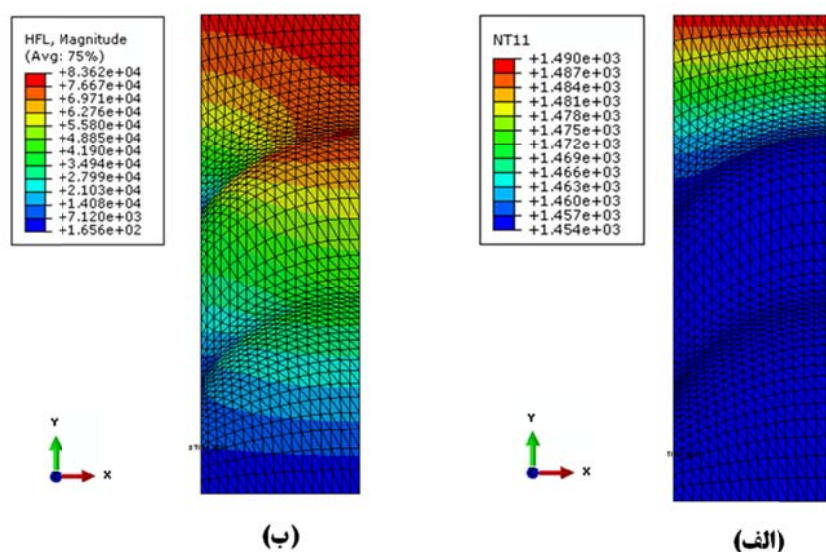
اعوجاج مش‌ها در مدل کوپله المان محدود تا جایی ادامه می‌یابد که مش از به دست آوردن نتایج دقیق عاجز است و در نتیجه تحلیل به دلایل زیادی خاتمه می‌یابد. در چنین مسائلی ضروری است که از ابزار مش بندی هوشمند و تغییر یافته‌ای برای کاهش موثر تغییر شکل و اعوجاج مش‌ها و مشکلات ناشی از آن استفاده گردد. مش بندی تطبیق پذیر ابزاری است که باقی ماندن مش با کیفیت را حتی با وجود تغییر فرم‌های شدید در طول تحلیل امکان پذیر می‌سازد. نرم‌افزار المان محدود قابلیت‌های بسیار زیاد و قوی مش بندی تطبیق پذیر را برای تحلیل مسائل به شدت غیرخطی، در دامنه مسائل شبه استاتیکی تا مسائل دینامیک فراهم کرده است. در این تحقیق از تنظیم دو رابطه فرکانس و میزان تغییر گره‌ها در هر نمو حلی برای حداقل نمودن میزان اعوجاج مش بندی و همچنین حداقل نمودن زمان حل مدل استفاده شد.

فرکانس بیانگر این مساله هست که بعد از چندین نمو حلی گره‌ها به مکان اصلی بازگردانیده شوند. این امر با امکان دادن به مش برای حرکت نسبتاً مستقل از حرکت ماده انجام می‌پذیرد که باعث می‌گردد مش با هندسه جدید قطعه کار تطبیق یابد، با این وجود مش - بندی تطبیق پذیر تعداد المان‌ها و اتصال بین آن‌ها را تغییر نمی‌دهد.

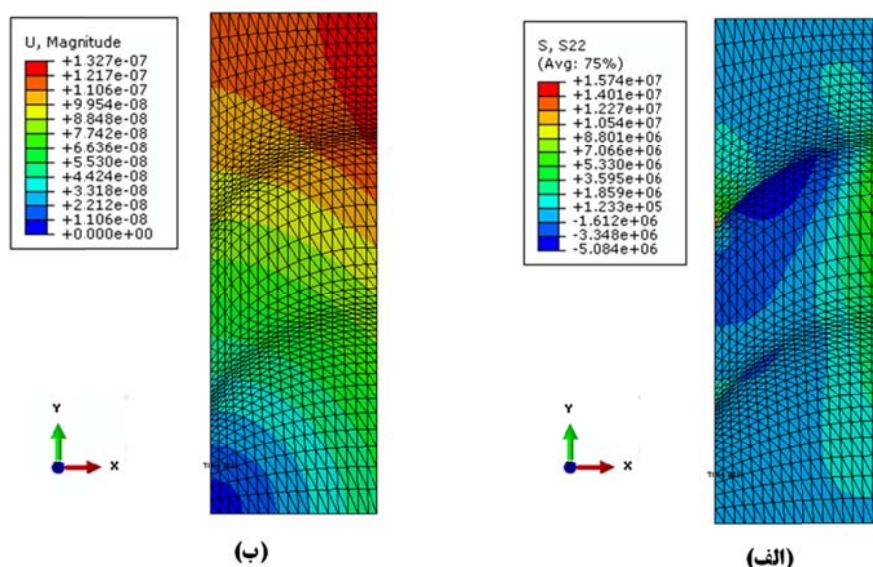
به نتایج بایستی نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی ماده رسم و بررسی شود. در صورتی که نسبت این دو انرژی از مقدار گفته شده تجاوز نکرده باشد، می‌توان اطمینان حاصل نمود که نتایج مربوط به یک فرآیند شبه استاتیک است. در غیر این صورت مقدار مقیاس دهی به جرم کاهش داده می‌شود و دوباره مساله حل می‌گردد و این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که نسبت مذکور در بیشتر زمان فرایند به حد مورد نظر برسد و در عین حال اختلاف پاسخ‌ها بین دو شبیه‌سازی متوالی ناچیز گردد. افزایش انرژی جنبشی به مقداری بیش از مقدار ذکر شده بیانگر این است که مقداری از انرژی صرف شده برای غلبه به اینرسی ماده و در نتیجه شتاب دادن به جسم صرف شده است. شکل (۶) نمودارهای تغییرات انرژی جنبشی و داخلی را در محدوده معینی از فرآیند که تغییرات دما به حد پایا می‌رسد، نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، انرژی جنبشی کسر بسیار اندکی از کل انرژی درون سیستم را صرف می‌کند و حالت شبه استاتیک سیستم قابل دسترسی است. روند تغییرات در ۳۰ ثانیه حرارت دهی رسم شده است و این روند در بقیه فرایند ادامه دارد که در این شکل برای نشان دادن بهتر مقایسه، فقط همان مرحله اول نشان داده شده است.



شکل ۶ مقایسه تغییرات انرژی جنبشی و داخلی حین فرایند



شکل ۷ کانتورهای الف) توزیع دمایی؛ ب) شار حرارتی در سیستم پوشش سد حرارتی



شکل ۸ کانتورهای الف) توزیع تنش پسماند؛ و ب) اعوجاج لایه‌ای در سیستم پوشش سد حرارتی

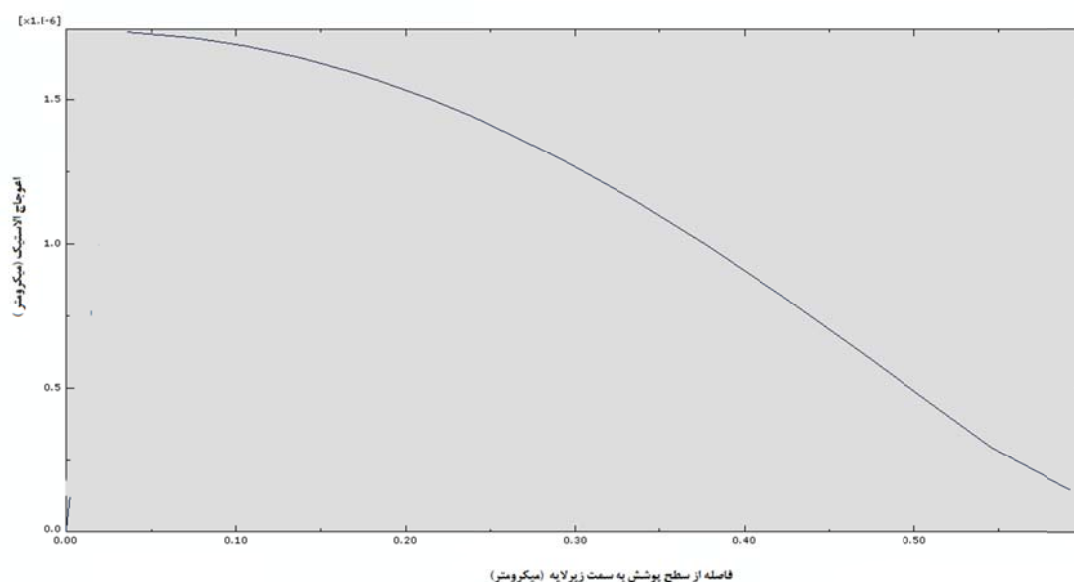
احتمال صفرشدن جرم المان را از بین می‌برد. شکل (۷) توزیع حرارت و شار حرارتی جاری درون لایه‌ها و شکل (۸) توزیع تنش پسماند و میزان اعوجاج الاستیک درون مجموعه سیستم پوشش سد حرارتی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) دیده می‌شود بیشترین میزان تمرکز حرارتی در دو لایه پوشش‌های سد حرارتی فوقانی دیده می‌شود که با فلسفه طراحی و زمینه کاربرد این دسته از سیستم‌های

بعد از چندین بار تکرار حل مساله، کمترین میزان تغییرات هندسه مش و بیشترین میزان کاهش زمان حل به ازای فرکانس ۱ و ۹ (تعداد دفعات جابجایی گره در هر فرکانس) بدست آمد. به بیان دیگر، با رعایت معیارهای همگرایی، در محدوده‌ای از حل از تحلیل لاگراژی استفاده شده و هندسه ماده به مش‌بندی مقید است و در ادامه حل، دیگر ماده و مش‌بندی مستقل از یکدیگر خواهند شد. از جایی به بعد با ادامه حل، فضای اویلری حین پیشرفت مساله حکفرما است و

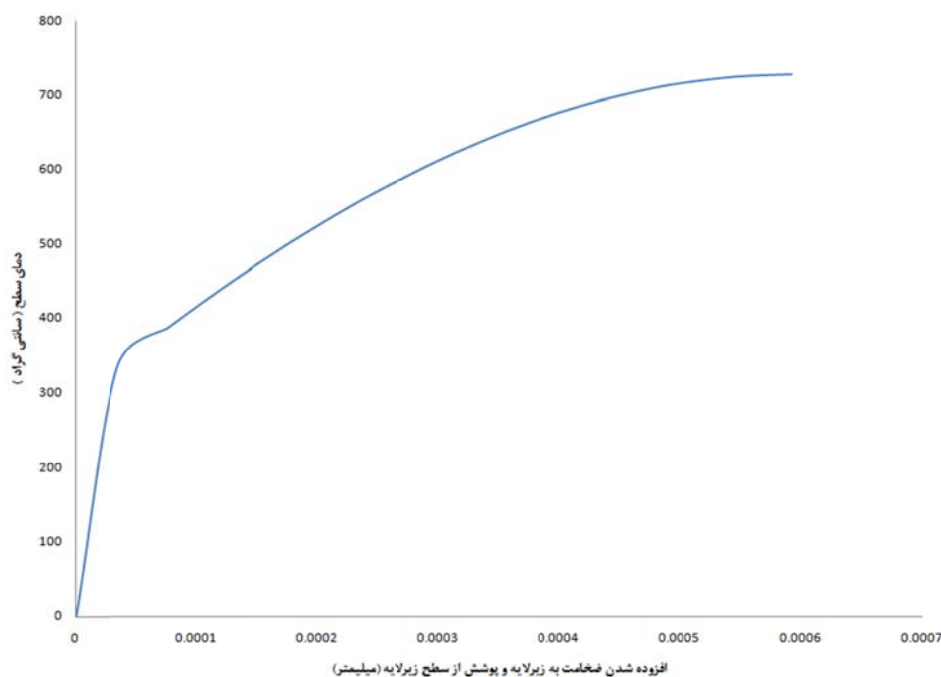
لایه بیشتر از سیستم‌های نوین ارائه شده در این تحقیق است. باید به مزایای فوق این مزیت را نیز اضافه نمود که تمرکز شارحرارتی در لایه‌های بالایی باعث حصول زودهنگام تعادل حرارتی در نیمه بالایی سیستم پوشش شده و کاهش حجم حرارت انتقالی به ترکیبات فلزی زیرین را به همراه خواهد داشت.

شکل (۹) میزان اعوجاج در راستای شعاعی را برای مجموعه سیستم زیرلایه و سه پوشش بالایی متشکل از یک لایه واسط و دو لایه سرامیکی سد حرارتی نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، تمامی افت دمایی و انرژی حرارتی بصورت قابل ملاحظه‌ای در دو لایه سرامیکی بالایی متمرکز شده است و حتی در لایه اتصال هم چندان بار حرارتی و تخریب ناشی از آن را مشاهده نمی‌کنیم. مقایسه این نتایج با نتایج حاصل از شبیه‌سازی پوشش‌های سد حرارتی معمولی، افت دمایی بیشتر و دمای زیرلایه پایین‌تر را برای این پوشش‌های نوین نمایان می‌سازد [۱۴،۱۵].

محافظ در توافق است. پوشش‌های سرامیکی دو لایه با دمای ذوب بسیار بالا بعنوان سد حرارتی عمل می‌کنند و بیشترین میزان انرژی حرارتی را درون خود حفظ می‌کنند تا به لایه‌های زیرین که از جنس فلزی هستند و دماهای نرم شدن، خمیری شدن و پارگی داغ کمتری دارند، آسیب کمتری وارد گردد [۲۶]. بعلاوه همانطور که در شکل (۷-ب) دیده می‌شود زیرلایه از جنس سوپرآلیاژ نیز متحمل کمترین میزان بار حرارتی می‌گردد و حداکثر عمر را برای توربوفن به همراه خواهد داشت. در شکل (۸) کارکرد مثبت دیگر این گونه طراحی پوشش‌های ترکیبی سد حرارتی دیده می‌شود. حداکثر مقادیر تنش پسماند در درون محدوده دو پوشش سرامیکی بالایی قرار گرفته است و تقریباً تنش‌های مخرب کاهنده عمر که ناشی از تغییرات دمایی در سیستم هستند، از لایه واسط عبور نمی‌کنند و این امر عمر زیرلایه را افزایش می‌دهد. با مقایسه تحلیل‌های مشابه که روی پوشش‌های سد حرارتی ساده تک لایه انجام شده است [۲۶] می‌توان به این نتیجه رسید که میزان تنش ذخیره شده در زیرلایه با سیستم‌های تک



شکل ۹ الگوی توزیع اعوجاج در طول سیستم پوشش و لایه‌های پوشش سد حرارتی



شکل ۱۰ روند افزایش دمای سطح سیستم از زیرلایه به سمت پوشش‌ها

و از دست نرفتن خواص عایق حرارتی در دمای بالا، به دلیل دولایه بودن و چسبندگی مناسب، می‌تواند مقاومت بیشتری در برابر بار حرارتی از خود نشان دهد [۲۶].

نتیجه گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی عددی توزیع دما و تنش‌های پسماند در پوشش سد حرارتی سه لایه $(La_2Zr_2O_7/8YSZ/NiCrAlY)$ تحت یک چرخه حرارتی ترکیبی و واقعی، شامل گرمایش از دمای محیط تا دمای سرویس، نگهداری در دمای سرویس و سپس سرمایش تا دمای محیط مورد بررسی قرار گرفت. کانتورهای دمایی و شار حرارتی نشان داد که پوشش‌های نوین ترکیبی نسبت به پوشش‌های رایج سد حرارتی گرمای کمتری را به زیرلایه انتقال می‌دهند و از انتقال انرژی حرارتی نیز جلوگیری می‌کنند. توزیع تنش پسماند در طول منطقه پوشش-زیرلایه بصورت عمده در ناحیه پوشش‌های سرامیکی متمرکز شده است و بیشترین میزان اعوجاج نیز در همین ناحیه قرار دارد. این مطالب گویای این است که پوشش‌های دو لایه سد حرارتی دارای بیشترین میزان کاربرد در افزایش عمر

شکل (۱۰) روند افزایشی تغییرات دمایی را از زیرلایه تا پوشش زیرکوناتی بالایی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل به وضوح مشاهده می‌شود در زیرلایه از جنس سوپرآلیاژ شاهد حداقل دماهای کاری در سیستم هستیم که این خود به افزایش عمر توربوفن کمک می‌کند. در ادامه با وارد شدن به ناحیه لایه واسط و لایه‌های دوتایی سرامیکی بعدی، دو اتفاق مثبت در راستای ازدیاد بیشتر عمر زیرلایه فلزی می‌افتد. نخست اینکه، در لایه‌های فوقانی پوشش شاهد دماهای بالاتر هستیم و میزان افت دمایی از سطح پوشش سد حرارتی تا زیرلایه قابل ملاحظه می‌باشد. این امر به نوبه خود کارکرد مثبت حضور سیستم‌های سد حرارتی را در کاهش دمای زیرلایه نشان می‌دهد. مزیت دوم تمرکز بیشترین میزان بار حرارتی در محدوده ضخامت دو لایه فوقانی سرامیکی در پوشش دو لایه سرامیکی می‌باشد که این امر در مقایسه با پوشش سد حرارتی تک لایه سرامیکی نشان دهنده قابلیت عایق‌سازی قابل توجه پوشش دولایه ترکیبی پیشنهاد شده در پژوهش حاضر می‌باشد [۱۵، ۱۶]. به عبارت دیگر، این سیستم جدید لایه نشانی، علاوه بر نشان دادن مقاومت به زینتر بالاتر

قطعات توربین ها هستند. بعلاوه از تکنیک افزایش مجازی جرم و دانسیته المان برای افزایش نمو حل و بدنبال آن، کاهش کل زمان محاسبات با موفقیت بهره برده شد. علاوه بر آن، استفاده از سیستم هوشمند و تطبیق پذیر انتقال مش از حالت لاگرانژی به اویلری از اعوجاج بیش از حد و صفرشدن جرم المان جلوگیری کرد و در نتیجه همگرایی مساله حین حل کوپل با اطمینان بیشتری حاصل شد.

مراجع

1. Vaßen R., Ophelia Jarligo M., Steinke T., Emil Mack D., Stöver D., "Overview on advanced thermal barrier coatings", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, pp. 938-942, (2010).
2. Tamarin Y., "Protective Coatings for Turbine Blades", ASM International, Materials Park, Ohio, (2002).
3. Keyvani A., Saremi M., Heydarzadeh Sohi M., "Oxidation resistance of YSZ-alumina composites compared to normal YSZ TBC coatings at 1100 °C", *Journal of alloys and compounds*, Vol. 509, pp. 8370-8377, (2011).
4. عرب سرهنگی س.، میرحبیبی ع.، عربی ح.، رستگاری س.، "بررسی خواص ریزساختاری و مکانیکی پوشش چند لایه سپرحرارتی کامپوزیتی زیرکونیا/آلومینا و پوشش دولایه زیرکونیایی اعمال شده به روش پاشش پلاسما"، فصلنامه سرامیک ایران، شماره ۳۱، (۱۳۹۱).
5. Mohammadi M., Javadpour S., Kobayashi A., Jenabali Jahromi S.A., Shirvani K., "Thermal shock properties and microstructure investigation of LVPS and HVOF-CoNiCrAlYSi coatings on the IN738LC superalloy", *Vacuum*, Vol. 88, pp.124-129 (2013).
6. Cao X.Q., Vassen R., Stoever D., "Ceramic materials for thermal barrier coatings", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 24, pp. 1-10 (2004).
7. Lima C.R.C., Cinca N., Guilemany J.M., "Study of the high temperature oxidation performance of Thermal Barrier Coatings with HVOF sprayed bond coat and incorporating a PVD ceramic interlayer", *Ceramics International*, Vol. 38, pp. 6423-6429, (2012).
8. Khor K.A., Gu Y.W., "Thermal properties of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coatings", *Thin Solid Films*, Vol. 372, pp.104-113, (2000).
9. Di-Girolamo G., Blasi C., Brentari A., Schioppa M., "Microstructure and thermal properties of plasma-sprayed ceramic thermal barrier coatings", *Studi & ricerche*, Research papers, (2013).
10. رحیمی پور م.، مهدی پور م.، "لایه نشانی پلاسمایی MCrAlY/YSZ بر روی سوپر آلیاژ Inconel 738 و بررسی رفتار خوردگی داغ آن"، نشریه علمی پژوهشی علوم و مهندسی سطح، شماره ۱۴، صفحات ۷۵-۶۷، (۱۳۹۱).
11. Wang L., Wang Y., Sun X.G., He J.Q., Pan Z.Y., Wang C.H., "A novel structure design towards extremely low thermal conductivity for thermal barrier coatings – Experimental and mathematical study", *Materials and design*, Vol. 35, pp. 505-517, (2012).
12. جمالی ح.، مظفری نیا ر.، شجاع رضوی ر.، احمدی پیدانی ر.، "ارزیابی ظرفیت عایق سازی حرارتی پوشش های سد حرارتی پایه زیرکونیایی پاشش پلاسمایی شده"، مجله علمی پژوهشی مهندسی سطح، شماره ۱۴، صفحات ۸۷-۷۷، (۱۳۹۱).
13. زرگر ح.، سرپولکی ح.، رضایی ح.، "آشنایی با پوشش های سرامیکی محافظ حرارت و روشهای اعمال"، فصلنامه سرامیک

ایران، شماره ۶-۵، صفحات ۵۹-۴۵، (۱۳۸۵).

14. Naga S.M., "Ceramic matrix composite thermal barrier coatings for turbine parts", In book: *Advances in Ceramic Matrix Composites*, Woodhead Publishing Limited, Edition 1, Chapter 21, pp. 524-533, (2014).
15. Xu Z., He L., Mu R., He Sh., Huang G., Cao X., "Hot corrosion behavior of $\text{La}_2\text{Zr}_{20}\text{T}_7$ with the addition of Y_2O_3 thermal barrier coatings in contacts with vanadate-sulfate salts", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 504, pp. 382-385, (2010).
16. Wang L., Wang Y., Zhang W.Q., Sun X.G., He J.Q., Pan Z.Y., Wang C.H., "Finite element simulation of stress distribution and development in 8YSZ and double-ceramic-layer $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/8\text{YSZ}$ thermal barrier coatings during thermal shock", *Applied Surface Science*, Vol. 258, pp. 3540- 3551, (2012).
17. Zhang S., Zhao D., "Aerospace Materials Handbook", CRC Press, 1st edition, (2012).
18. Smarsly W., "Coatings for Advanced Aero Engine Materials", *presented at the 8th HIPIMS Conference*, University Sheffield, UK, (2009).
19. Baker M., "Finite element simulation of interface cracks in thermal barrier coatings", *Computational Materials Science*, Vol. 64, pp. 79-83, (2012).
20. Saeedi B., Sabour A., Ebadi A., Khoddami A.M., "Influence of the Thermal Barrier Coatings Design on the Oxidation Behavior", *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 25-4, pp. 499-507, (2009).
21. Khoddami A.M., Sabour A., Hadavi S.M.M., "Microstructure formation in thermally-sprayed duplex and functionally graded NiCrAlY/Yttria-Stabilized Zirconia coatings", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp.6019-6024, (2007).
22. Akbarpour S., Motamedian H.R., Abedian A., "Micromechanical FEM modeling of thermal stresses in functionally graded materials", *26th International congress of the Aeronautical Sciences*, Anchorage, Alaska, USA, (2008).
23. Tang F., Ajdelsztajn L., Kim G.E., Provenzano V., Schoenung J.M., "Effects of variations in coating materials and process conditions on the thermal cycle properties of NiCrAlY/YSZ thermal barrier coatings", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 425, pp. 94-106, (2006).
24. Watremetz B., Baietto-Dubourg M.C., Lubrecht A.A., "2D thermo-mechanical contact simulations in a functionally graded material: A multigrid-based approach", *Tribology International*, Vol. 40, pp. 754-762, (2007).
25. Zhang X.C., Xu B.S., Wang H.D., Wu Y.X., "Modeling of the residual stresses in plasma-spraying functionally graded $\text{ZrO}_2/\text{NiCoCrAlY}$ coatings using finite element method", *Materials and Design*, Vol. 27, pp. 308-315, (2006).
26. Ranjbar-far M., Absi J., Mariaux G., Smith D.S., "Crack propagation modeling on the interfaces of thermal barrier coating system with different thickness of the oxide layer and different interface morphologies", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 4961-4969, (2011).