Archive of SID

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

بهمن‌ماه ۱۳۹۴

انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران

بررسی اثرات استحکامی پوشش PT-AL بر پره استاتور توربین گاز

محمدرضا صالحی[1]

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اسلامشهر، اسلامشهر، ایران (کارشناسی ارشد مکانیک)

چکیده

تخریب های مکانیکی و تخریب های سطحی از علل تخریب در پره های توربین گاز می باشند. تخریب های مکانیکی شامل خزش و خستگی و آسیب های ناشی از خوردگی داغ اکسیداسیون و سایش سطح پره ها در گروه تخریب های سطحی قرار می گیرند.شرایط طراحی و شرایط عملکردی پره ها نقش مهمی بر عمر آنها دارد. این شرایط برای اغلب پره ها شامل سه بخش شرایط عملکردی ، تنشهای مکانیکی ، تنشهای حرارتی می باشد. بطور کلی مشارکت همزمان عوامل فوق در کاهش عمر پره ها نقش دارد. در طبقه بندی دیگری می توان از انواع تخریب های ممکن در پره های توربین های گازی پس از یک دوره کاری به دو گروه تخریب های خارجی(شامل خوردگی اکسیداسیون، تشکیل ترک، فرسایش، ساییدگی وخسارت شیء خارجی) و تخریب های داخلی(مثل پیر شدن ، رشد دانه ای، خزش مرز دانه ای، رسوب کاربید ها و تشکیل فازهای ترد) نام برد. در این مقاله به بررسی پوشش PT-AL بر روی پره های استاتور توربین یک موتور توربینی و بررسی استحکامی پره پس از اعمال پوشش پرداخته شده است. پره های استاتور توربین مربوطه جهت بهبود خوردگی تحت پوشش دهی نفوذی PT-AL به روش CVD قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: پره استاتور، توربین، پوشش PT-AL، استحکام

مقدمه

امروزه پوششهای محافظ توربین گاز عمدتا در سه گروه شامل پوششهای نفوذی (Diffusion Coatings) ، پوششهای روکشی (Overly Coatings) و پوششهای سد حرارتی (TBC) تقسیم بندی می شوند. عملیات شیمیایی- حرارتی (آلومینایزنگ) سطح پره در محیطی حاوی آلومینیوم انجام می پذیرد. پوشش آلومینایدی حاصل نتیجه اندر کنش آلومینیوم با سطح سوپر آلیاژ می باشد. در حال حاضر پوشش های آلومینایدنفوذی

[1] moh.rez.salehi@gmail.com

www.SID.ir

Archive of SID

بصورت ساده و یا اصلاح شده با عناصری مثل کرم، پلاتین، سیلسیم، ایتریم، جهت حفاظت ۸۰-۹۰٪ از پره های توربین هواپیما کاربرد دارد[۱].

پوششهای Pt-Al به دو صورت در مورد توربین بکار می رود:

۱- بعنوان پوشش محافظ: بصورت تک پوشش بر روی سطح پره های توربین اعمال می شوند تا فراهم کننده مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ برای سطح پره ها باشند.

۲- بعنوان پوشش پیوند: در این کاربرد پوشش Pt-Al نقش لایه پیوند دهنده پوشش سد حرارتی را به سطح آلیاژ پره ایفا می نماید.تحت این شرایط قرارگیری پوشش دو لایه در معرض محیط اکسید کننده پدیده rumpling بعلت وجود اختلاف بین ضرایب انبساط حرارتی و خواص مکانیکی پوشش و پایه آلیاژی باید مدنظر گرفته شود. در کاربرد پوشش Pt-Al بعنوان لایه پیوند به حضور و مقدار فاز $PtAl_2$ باید توجه داشت. اگر چه این فاز بعنوان منبع آلومینیوم مطرح است اما نقش اصلاح خواص مکانیکی پوشش و ترد کردن فصل مشترک سوپر آلیاژ-پوشش سد حرارتی را هم ایفا می نماید. چنانچه پوشش تنها برای حفاظت پره توربین در برابر خوردگی و اکسیداسیون مطرح باشد حضور فاز $PtAl_2$ مسئله ندارد اما در کاربرد بعنوان لایه پیوندی برای بعضی پوششها چون زیرکونیا در دماهای بالا تنش زا می باشد و عمر TBC را کاهش می دهد. در جدول ۱ از انواع پوشش های آلومینایز مورد استفاده در موتور های GE [۲] نام برده شده است.

مواد و خواص فیزیکی و مکانیکی

متریال RENE 41 آلیاژ پایه نیکل است که برای قطعات تحت دمای کاری 1200 تا 1800 درجه فارنهایت و تنش بالا طراحی شده است. کاربرد های این آلیاژ در قطعات پس سوز، پره توربین، پیچ ها و بست های دما بالا استفاده می شود. متریال RENE 41 در فرم های ورق (AMS 5545) و میله و فرج (AMS 5712, AMS 5713) در دسترس می باشد. خواص فیزیکی این ماده مطابق جداول ۲و ۳ می باشد. خواص مکانیکی RENE 41 در جدول ۴ و اشکال ۱و ۲ آمده است [۳].

همچنین خواص فیزیکی و مکانیکی پوشش Pt-Al مطابق جداول ۵ تا ۷ می باشد[۴].

مدلسازی و شبیه سازی عددی

مدل هندسی پره شامل ۴ قسمت (فلنج خارجی، فلنج داخلی، پره و پوشش) می باشد. مدل اجزا محدود تهیه شده از مدل هندسی دارای ۶۸۳۵۴ گره و ۱۷۵۸۱ المان می باشد. نمایی از مدل اجزاء محدود پره بهمراه پوشش در شکل ۳ نمایش داده شده است.

با توجه به شرائط مرزی حرارتی که در آن فلنج داخلی و خارجی در معرض هوای خنک کاری قرار دارد دماروی سطوح این دو فلنج ۶۵۱ درجه سانتیگراد و براساس دمای جریان داغ سیال در کانال اصلی، دمای میانی پره ۷۵۱ درجه سانتیگراد و دمای بالا و پایین پره ۶۹۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. توزیع دمای حالت پایا

www.SID.ir

Archive of SID

پس از تحلیل حرارتی مطابق شکل ۴ می باشد. در این تحلیل فشار وارد بر پره مطابق فشار در لایه‌ی میانی گذرگاه جریان 0.35 Mpa در نظر گرفته شد.

با توجه به مدل اجزاء محدود، خواص مواد و شرائط مرزی تشریح شده تحلیل استحکامی صورت گرفت.

نتایج تحلیل حرارتی - مکانیکی

پوشش پلاتین آلومیناید بر روی زیر لایه برای محافظت از اکسیداسیون و خوردگی بکار گرفته می شود. بنابر مطالعات انجام شده این پوشش سد حرارتی نمی باشد و پوشش Pt-Al نقش لایه پیوند دهنده پوشش سد حرارتی بخصوص آلیاژهای زیرکونیا را به سطح آلیاژ پره ایفا می نماید. بعضی از مشخصات مکانیکی پوشش بخوبی آلیاژ می باشد و برخی دیگر دارای اثرات معنی داری می باشد. این اثرات ناشی از چند علت است :

۱- رفتار حرارتی پوشش ممکن است رفتار ساختار آلیاژی را عوض کند.

۲- نفوذ داخلی پوشش در داخل آلیاژ ممکن است به شکل گیری فازهای ترد بین لایه های بیانجامد.

۳- پوشش ممکن است دارای شکست معناداری بوسیله بارهای عرضی داشته باشد مخصوصا برای قسمتهای نازک زیر لایه ای.

۴- بدلیل اختلاف ضریب انبساط حرارتی و مدول الاستیسیته پوشش با آلیاژ پایه ممکن است تنش های کاری اضافی بوجود بیاید چنانکه اثرات این پدیده بخوبی در آنالیز تنشی انجام شده توسط نرم افزار ANSYS خودنمایی می کند. به طوری که تنش از حدود ۲۸ مگاپاسکال (شکل۵) به حدود ۱۰۲ مگاپاسکال (شکل۶) به ازای یک نقطه‌ی مشابه در لبه‌ی فرار پره (منطقه‌ای که احتمال رویت عیوب بیشتر است) برای حالتی که از پوشش Pt-Al استفاده شده، افزایش یافته است. به عبارت دیگر محاسبات فعلی بیانگر این است که تنش در نقاط بحرانی حدود ۷۰٪ افزایش خواهد یافت.

۵- چنانچه خواص مواد پوشش با خواص مواد پایه یکسان درنظر گرفته شود تنش‌های ایجاد شده با حالتی که از لایه‌ی پوشش صرف‌نظر شود، تقریبا نتایج یکسانی دارد.

با توجه به موارد ذکر شده می توان انتظار داشت که تنشها در مراحل اول ودوم بخش ساکن توربین پوشش داده شده با افزایش توام باشد که این مسئله در کانتورهای تنشی استخراج شده از تحلیل (اشکال ۵و۶) قابل رویت می باشد . قابل ذکر است که تغییرات شکلی مکانیکی (شکل۷) قابل قبول بوده و اثرات تنشی ایجاد شده می تواند ناشی از تنشهای حرارتی و اثرات پوشش ایجاد شده باشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج تنشی و کانتور ضریب اطمینان (شکل۸) به دست آمده، نشان می دهد که تنشهای روی پوشش بیشتر از تنشهای روی پره می باشد که دلیل آن می تواند در اثر اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین پوشش و پره باشد. در شکلهای ۵ و ۶ نحوه توزیع تنش بر روی پره و همچنین پره پوشش داده شده نمایش داده

www.SID.ir

Archive of SID

شده است. نتایج حاکی از آن است که حداقل ضریب اطمینان گسیختگی خزشی با پوشش به ازای ۱۰۰۰ ساعت ۲/۴۳ می باشد . در مجموع محاسبات بیانگر این است که تنش در نقاط بحرانی پس از پوشش Pt-Al نسبت به پوشش حدود ۷۰٪ افزایش تنش خواهد داشت. در مجموع می‌توان گفت از نظر استحکامی پوشش انتخابی به جهت بهینه‌سازی تا حدی اثر منفی دارد.

مراجع

۱ . دکتر کورش شیروانی، پوشش دهی پره ها با پوشش Pt-Al ، سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران.

2. High Temperature Coating, Sudhangshu Buce.
3. MILITARY HANDBOOK
4. Md. Zafir Alam, B. Srivathsa, S.V. Kamat, V. Jayaram, D.K. Das, Microtensile testing of a free-standing Pt-aluminide bond coat, journal of Materials and Design.(2011), 32 ,1242–1252. (7)

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۱- پوشش دهی توربین های جنرال الکتریک

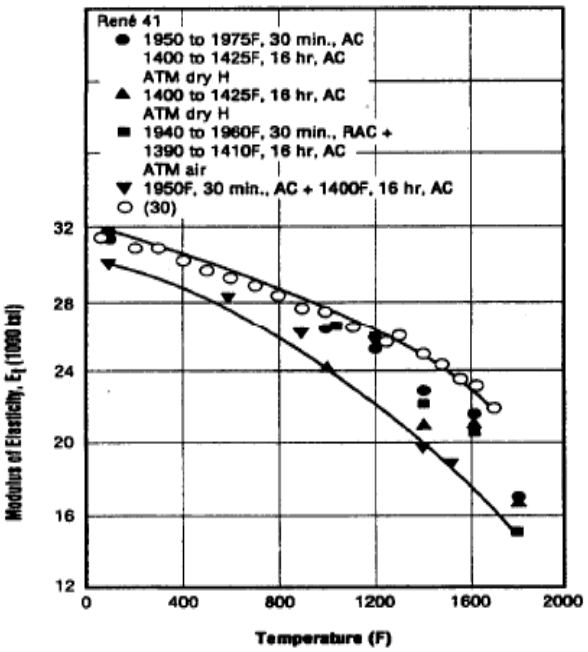
Coating	Performance characteristic	Comments
Platinum aluminide (single phase solid solution or solid solution + $PtAl_2$)	2X corrosion life relative to uncoated IN-738	Used between late 1970 and mid 1983
LPPS Overlays	1.5X corrosion life improvement relative to platinum aluminide	Introduced early 1980
GT-29	Baseline MCrAlY	
GT-29+	Aluminized over MCrAlY Used for firing temperature 1065℃ (1950℉) in air cooled first blade and for firing temperature 955℃ (1750℉) in uncooled first blade	Standard coating since 1990 Overaluminizing improves oxidation resistance
GT-29 In+	Used on internal surfaces in vanes	
GT-20	Used on vanes	Developed for aircraft engine

جدول۲- ضریب انبساط حرارتی آلیاژ Rene 41

Temperature F	English (μin/in·°F)
68-300	6.75
68-700	7.12
68-1100	7.62
68-1400	8.21
68-1700	9.0
68-1900	9.6

جدول۳- ضریب هدایت حرارتی آلیاژ Rene 41

Temperature F	Metric (W/m·K)	English ($Btu\text{-}in/ft^2 \cdot hr \cdot °F$)
70	9.0	62
1000	18.8	125
1600	23.1	160



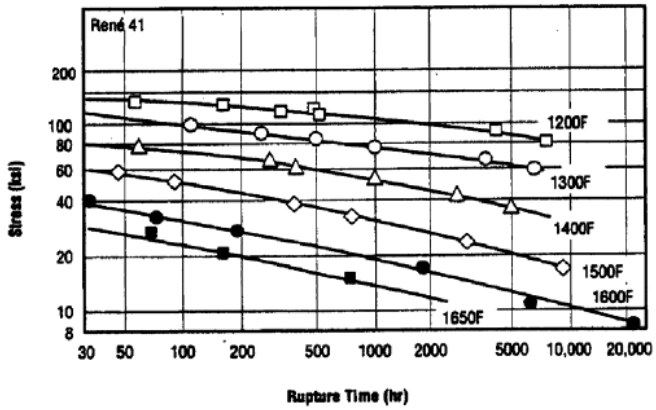
شکل۱- مدول الاستیسیته در دماهای مختلف آلیاژ Rene 41

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۴- خواص کششی در دماهای مختلف آلیاژ Rene 41

Temperature F	Ultimate Strength		Yield Strength (0.2%)		Elongation
	MPa	ksi	MPa	ksi	%
70	1420	206	1060	154	14
1000	1400	203	1020	147	14
1100	1379	200	1007	146	14
1200	1340	194	1000	145	14
1400	1105	160	940	136	11
1500	868	126	814	118	14
1600	620	90	550	80	19
1700	400	58	345	50	26



شکل۲- خواص خزشی در دماهای مختلف آلیاژ Rene 41

جدول۵- ضریب انبساط حرارتی پوشش

Coefficient of Thermal Expansion/°C × 10^{-6}

Temperature °C	NiCoCrAlY	NiAl	Pt Aluminide	Ni-Base Superalloy	Alumina	APS 7YSZ	EB-PVD 7YSZ (Perp. To Column)
25	13.3	14	13.6	12.2	8		
300	14.1	14.2	14.4	12.9	8.3	9.82	8.2
500	15	14.6	14.9	13.5	8.6	9.64	8.6
700	16.1	14.8	15.6	14.1	8.8	9.88	10.7
900	18	14.9	16.6	15.1	9.2	10.19	12.2

جدول۶- جدول مدول الاستیسته و ضریب پوآسون پوشش

Young's Modulus

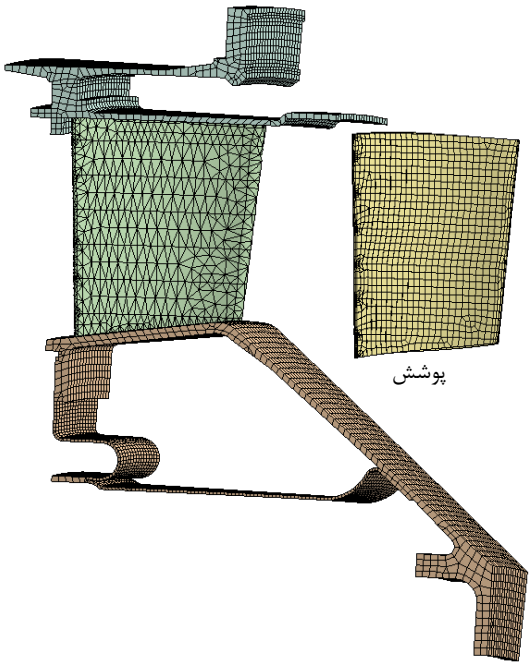
	APS 7YSZ	EB-PVD 7YSZ	NiCoCr AlY	Pt Aluminides	Super-alloys	Alumina	Plain Aluminide
E (GPa) Temperature °C(°F)						380–400	
24 (75)	2.5	35–40	170		200–220	400	100 (<100), 190 (<110)
538 (1000)	2.5						290 (<111)
871 (1600)	2.3						
982 (1800)	2					350	
1093 (2000)	1.8					340	
1204 (2200)	1.75					330	
Poisson's Ratio v				0.3	0.3	0.25	

www.SID.ir

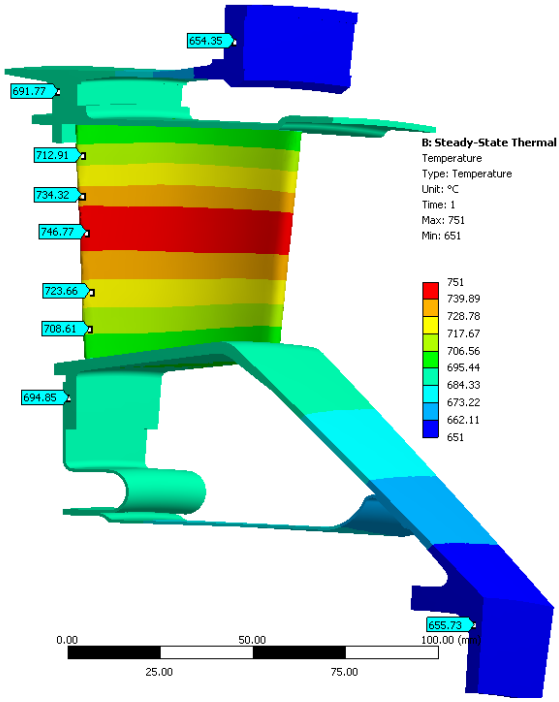
Archive of SID

جدول۷- جدول تست کششی پوشش پلاتینیوم آلومیناید با ضخامت ۱۰۰ میکرومتر

Test No.	Elastic modulus (GPa)	Fracture strength (MPa)	Fracture strain (%)
1	103	215	0.17
2	105	197	0.19
3	100	232	0.19
4	110	245	0.15
5	107	196	0.14
6	105	220	0.16
7	98	206	0.20
8	95	185	0.17
9	105	188	0.18
10	97	210	0.17



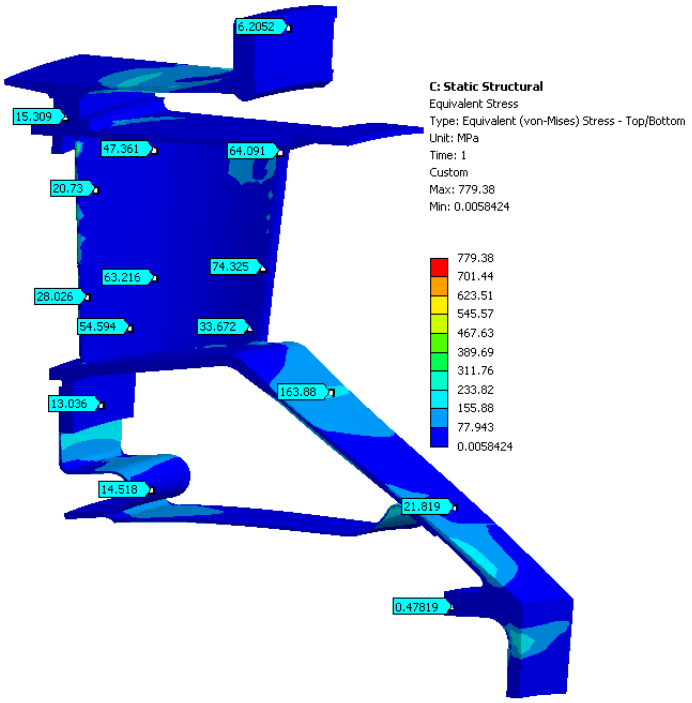
شکل۳- نمایی از مدل اجزاء محدود بخش ساکن توربین توام با پوشش



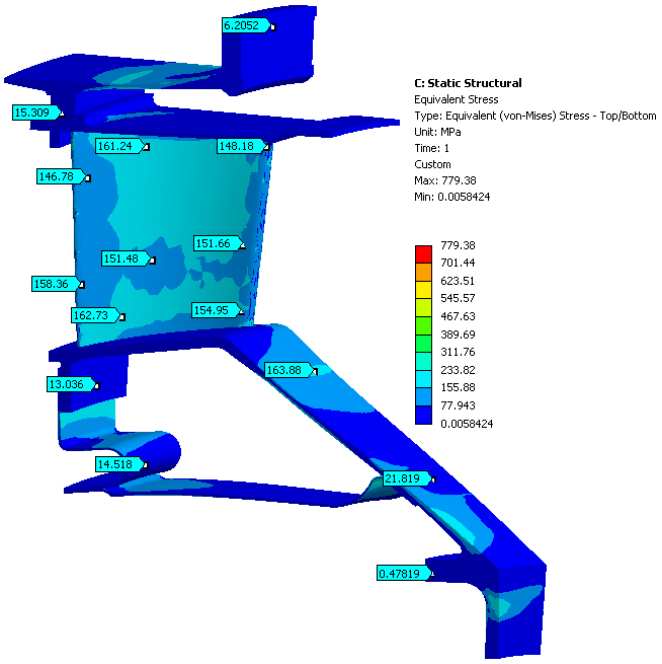
شکل۴- توزیع دمای بخش ساکن توربین

www.SID.ir

Archive of SID



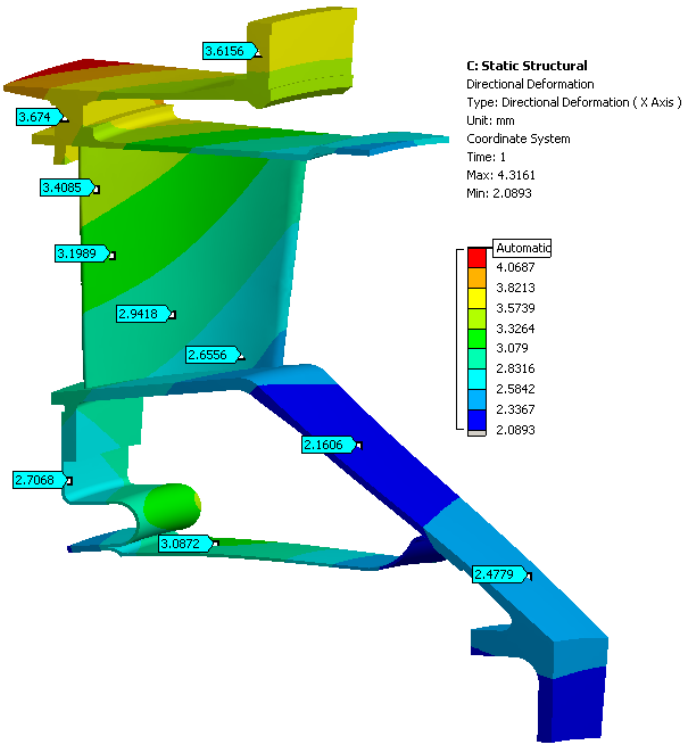
شکل۵- توزیع تنش ون-میزز در بخش ساکن توربین (روی پره و در زیر پوشش)



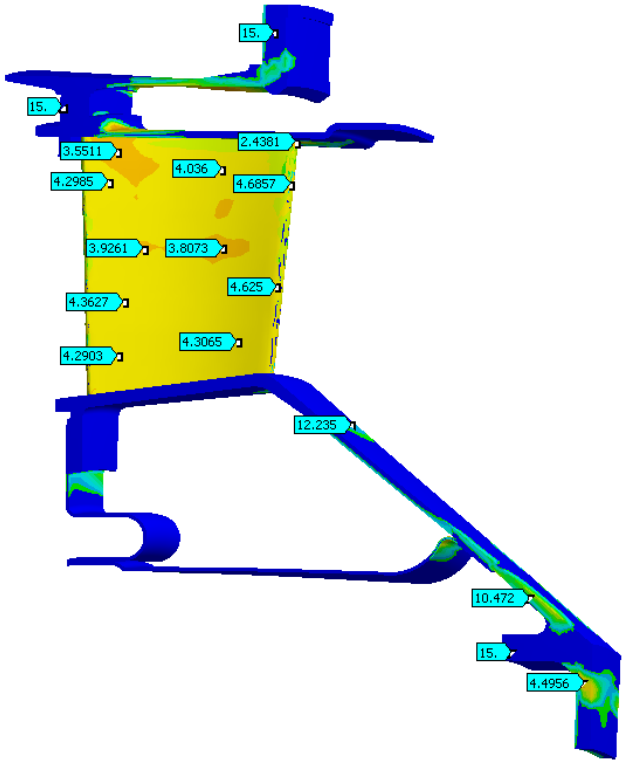
شکل۶- توزیع تنش ون-میزز در بخش ساکن توربین (در پره بر روی پوشش)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۷- توزیع تغییر مکان شعاعی در بخش ساکن توربین(برحسب میلیمتر)



شکل۸- توزیع ضریب اطمینان براساس تنش گسیختگی خزشی

www.SID.ir