

(مقاله پژوهشی)

طراحی و تحلیل تیغه توربین فشار قوی با سه جنس متفاوت تحت بارهای حرارتی و آیرودینامیکی

سیدمحمد رضا سده ئی^۱، ایمان طاهری دوست اباد^۱، علی جلالی^۲

Leader121@chmail.ir

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

در شرایط تحریمی کنونی کشور در صنایع نفت و پتروشیمی، تجهیزات دوار از جمله توربین‌های گازی به دلیل برخورداری از سطح بالایی از دانش طراحی و تکنولوژی ساخت، همواره در مرکز توجه فعالان و صاحب‌نظران حوزه‌های مربوطه قرار داشته است. در فرایندهای مهندسی زمان و دقت دو موضوعی است که نمی‌توان از آن‌ها غافل شد. مطالعات اخیر نشان داده است که با استفاده از تحلیل اجزا محدود سه بعدی می‌توان سرعت شکست و تغییر شکل‌ها را به طور نسبتاً دقیق پیش‌بینی کرد. با این حال، عدم اطمینان مدل‌سازی یک مسئله مهم و غیر قابل اغماض است زیرا احتمال شکست نمونه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش برای درک عمیق از رفتار پره توربین گازی تحت بارگذاری‌های آیرودینامیکی و حرارتی، از چهار نوع ماده در خصوصیات ورودی استفاده شده است. تحلیل تنش و تغییرشکل به نحوی طرح‌ریزی شده است که تأثیرات انرژی، خواص مواد، هندسه و مرز حرارتی در تمام مناطق قطعه بصورت مجزا اعمال شود. با توجه به اهمیت تحقیقاتی ذکر شده در بالا، این کار نه تنها برای تعمیق درک رفتار تیغه توربین معنی‌دار است، بلکه در ارائه راهنمایی‌های صنعت برای بهینه‌سازی فرایندهای طراحی و ساخت این قطعه نیز مفید خواهد بود. نتایج این پژوهش نشان داد بیشترین تنش ایجاد شده در اعمال بار حرارتی مطلق و در نمونه ساخت افزایشی و آلیاژ پایه نیکل بوده و بیشترین تغییرشکل نیز برای آلومینیوم ۷۰۷۵ رخ داده است. همچنین نتایج پره ساخته شده با نیکل و ساخت افزایشی مشابه هم بوده ولی بدلیل هزینه پایین‌تر و ماشینکاری کمتر، پره ساخته شده با ساخت افزایشی مقرون به صرفه‌تر است.

واژگان کلیدی: تیغه توربین، متلب، بار آیرودینامیکی، بار حرارتی، شبیه‌سازی، مدل‌سازی

10.22034/ijmst.2021.531739.1524 DOI



تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۱۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰

صص ۲۲-۳۱

۱ - مقدمه

پره‌های توربین سوپراآلیاژی بر پایه نیکل، ضروری‌ترین اجزای خاص صنعت هوافضا و نظامی با پروفایل‌هایی پیچیده هستند [۱،۲]. سوپراآلیاژ بر پایه نیکل یک ماده معمولی برای برش است و سنگ‌زنی با چرخ‌های ساینده آلومینا، روش غالب برای ماشینکاری توربین است [۳،۴]. با این حال، به دلیل اثرات اتصال قوی حرارتی-مکانیکی یا حتی اثرات فاز حرارتی-مکانیکی در حین بارگذاری، تنش‌های باقیمانده فشاری یا کششی معمولاً در سطح یا زیر سطح قطعه کار ایجاد می‌شود [۵]. همانطور که در مرجع [۶] توضیح داده شده است، تنش‌های باقیمانده بزرگ همیشه تأثیر مهمی بر استحکام خستگی و قابلیت اطمینان اجزای کلیدی مبتنی بر نیکل دارند. اگر تنش‌های باقیمانده ناشی از بارگذاری به صورت کمی مورد مطالعه قرار نگیرد، اعتماد از قابلیت اطمینان یک جزء دشوار است. بنابراین، در دهه‌های گذشته، تنش‌های باقیمانده ناشی از بارگذاری‌های مختلف تبدیل به موضوع پیشرو در مطالعات تجربی، مدل‌های عددی مبتنی بر فیزیک و شبیه‌سازی المان محدود شده است. شکل ۱ برخی کاربردهای توربین‌های گازی را نشان می‌دهد.



شکل (۱) برخی کاربردهای مهم تیغه توربین

در توربین، هوا مکش و سپس به کمپرسور منتقل می‌شود که نتیجه آن فشرده‌سازی هوای مکیده از کوچکترین حجم مطلوب ممکن است. در کمپرسور بسته به تعداد مراحل، فشار تقریباً ۳۰ برابر و دمای آن تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. قطعات به کار رفته در توربین‌ها باید از

قدرت کافی برای غلبه بر تنش‌های ناشی از این شرایط شدید شامل خستگی، خزش، ترک خوردگی و اکسیداسیون برخوردار باشند. موادی که به خوبی از عهده این شرایط برمی‌آیند، موادی مانند سوپر آلیاژهای نیکل-کبالت هستند. در کنار این عناصر، آلومینیوم و تیتانیوم و همچنین جوشکاری ساخت افزایشی نیز به منظور افزایش مقاومت به خوردگی اضافه می‌شوند [۷،۸]. سپس هوای فشرده از کمپرسور به محفظه احتراق منتقل شده و با سوخت تزریق شده از موتور مخلوط و مشتعل می‌شود. در این مرحله، درجه حرارت می‌تواند به حدود ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد، بنابراین موادی مناسب هستند که می‌توانند در این شرایط پایدار باشند. این خصوصیات شامل فلزاتی است که از مقاومت در برابر حرارت و خوردگی بسیار بالا مانند تنگستن، مولیبدن و نیوبیوم برخوردار هستند [۷]. جوشکاری قوس فلزی رایج‌ترین فرآیند جوشکاری است که به دلیل توانایی آن در ایجاد شکاف در مفاصل بزرگ لب‌به‌لب، و با انتخاب مناسب فلز پرکننده با هزینه پایین‌تر به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک متغیر مهم در دبی ورودی، ورودی حرارتی است که نشان‌دهنده مقدار انرژی ذخیره‌شده در واحد طول است. کاهش حرارت ورودی به حوضچه مذاب کوچک‌تر اندازه باریک‌تر ناحیه متأثر از حرارت و بهبود کیفیت جوش منجر می‌شود [۹]. با این حال، تحقیقات در زمینه جوشکاری هیبریدی CO₂ لیزر-GMAW بسیار اندک بود. تأثیر گازهای محافظ و روش‌های محافظت از آن که بر ثبات فرآیند، نفوذ جوش، خصوصیات مکانیکی و متالورژیکی تأثیر می‌گذارد، تاکنون به طور مفصل در هیچ کار قبلی مورد بحث قرار نگرفته است. بنابراین، در این مقاله، یک آزمایش دقیق از جوشکاری هیبریدی CO₂ لیزر-GMAW بر روی ورق‌های ضد زنگ فوق‌العاده آستنیتی ۹۰۴ L 904L (SASS) برای بررسی تأثیر گازهای محافظ و اثرات آن بر خواص مکانیکی و متالورژیکی فوق آستنیتی روی جوش فولاد ضدزنگ انجام شد [۱۰].

با توجه به دامنه پیشرفت از نظر مواد مورد استفاده، ضرورت انتخاب مواد مناسب منجر به تحقیق در زمینه آلیاژهای مختلف تولیدی شده است. این امر باعث شد تا محققان لیستی از مواد و آلیاژهای جدید را برای بهبود موتورهای توربین کشف کنند [۱۱]. اسپانگ و همکاران [۱۲] انتخاب مواد برای تیغه توربین فشار قوی (اسب بخار) موتورهای

جوشکاری هیبریدی لیزر - TIG یک فرآیند مؤثر برای فولاد دانه‌ای بسیار ریز است. در مقایسه با جوشکاری لیزر، جوشکاری ترکیبی می‌تواند سرعت جوشکاری بالاتر، شکل بهتر جوش و میکروسختی پایین را بدست آورد و باعث چقرمگی بیشتر شود.

آجادی و همکاران [۱۸] در مطالعه مقایسه‌ای دقیق از مواد و هندسه‌های توربین گازی و با استفاده از تجزیه و تحلیل اجزاء محدود انجام دادند. چهار ماده مختلف زیرکونیوم-کرومیت، مالت، آلومینیوم سیلیکات AISi و آلیاژ تیتانیوم استفاده شد. دو مدل مختلف با تعداد سوراخ‌های ۴ و ۶ عدد طراحی و تجزیه و تحلیل مدل برای پیدا کردن تعداد بهینه سوراخ‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که الف) با افزایش تعداد سوراخ‌ها دمای تیغه کاهش یافته ب) حداکثر دما در نوک تیغه و حداقل دما در ریشه تیغه وجود دارد ج) توزیع دما یکنواخت و به طور خطی از نوک به ریشه کاهش یافته مشاهده شده است. همچنین مشاهده شد از نظر ملاحظات عملکرد ساختاری، پره دارای ۴ عدد سوراخ و از نظر ملاحظات عملکرد حرارتی پره با ۶ عدد سوراخ برای تیغه توربین مناسب‌ترین است. تجو و همکاران [۱۹] طراحی و تحلیل تیغه توربین گازی با دو جنس Inconel 718 و Titanium T6 را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که اینکونل ۷۱۸ از استحکام بیشتری برخوردار بوده و به همین دلیل تنش کمتری نسبت به تیتانیوم T6 در آن ایجاد شده است. کیم و همکاران [۲۰] تجزیه و تحلیل انتقال گرمادگی مزن، تنش و شکست در یک تیغه توربین گازی با معابر خنک‌کننده دایره‌ای را مطالعه کرد. نتایج نشان داد که بالاترین ضریب انتقال حرارت در نقطه سکون لبه اصلی رخ داده است که در آن زمان کمترین ضریب انتقال حرارت در لبه قطعه است. همچنین مشاهده شد که نسبت به طرف مکش، انتقال حرارت در قسمت فشار بیشتر و حداکثر تنش در سطوح خارجی تیغه در بخش ریشه ظاهر شده است.

یومامه‌س و همکاران [۲۱] طراحی و تجزیه و تحلیل تیغه توربین گازی با سه ماده مختلف را با روش المان محدود مورد مطالعه قرار داد. از سه ماده مختلف شامل فولاد، Inconel 718 و N 188 برای آنالیز تیغه استفاده شد. دو طرح مختلف ریشه شامل مدل دندانه‌ای و مدل I انجام شد. نتایج نشان داد که تنش فون میز برای N 188 نسبت به

معمولی توربوجت را مورد بررسی قرار دادند. هدف این پژوهش یافتن مواد پیشرفته برای کاربرد در دمای بالای توربین فشار قوی یک موتور جت توربو بوده است. نتایج حاصل، سوپر آلیاژ پایه نیکل را به عنوان ماده مناسب برای پره های توربین معرفی کرد زیرا این ماده می‌تواند دمای کاری بالایی را با هزینه متوسط تجربه کند. حسین مهامد و همکاران [۱۳] تجزیه و تحلیل ساختاری تیغه توربین گازی را با استفاده از آنالیز عناصر محدود مورد مطالعه قرار دادند که طی آن استرس و کشیدگی تیغه با استفاده از مواد مختلف تعیین شد. نتایج نشان داد که ریشه تیغه برای کلیه مواد در معرض حداکثر استرس قرار دارد. کریشناکانت و همکاران [۱۴] در پژوهشی با تجزیه و تحلیل ساختاری و حرارتی تیغه توربین گازی با روش اجزاء محدود نشان دادند که حداکثر کشیدگی و حداکثر دما در بخش نوک تیغه مشاهده می‌شود، در حالی که حداقل تغییرشکل و حداقل دما در ریشه تیغه توربین قرار دارد. در این شبیه‌سازی از سه ماده HASTEALLOY X و Inconel 625, N-155 استفاده شد. تحلیل این مواد، نشان داد که حداکثر تنش و کرنش در ریشه تیغه و سطح بالایی تیغه و دمای تیغه و تنش‌های حرارتی برای Inconel 625 حداقل بود. سرو و همکاران [۱۵] برای تجزیه و تحلیل ساختاری تیغه از سه ماده مختلف آلیاژ آلومینیوم، آلیاژ تیتانیوم و آلیاژ منیزیم استفاده کردند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل نشان داد که آلیاژ منیزیم حداکثر تغییر شکل و حداقل تنش معادل در بین مواد استفاده شده را دارد، در حالی که آلیاژ تیتانیوم دارای حداقل تغییر شکل و حداکثر تنش معادل بود. راکش و همکاران [۱۶] با طراحی یک روتور توربین جت در نرم‌افزار کتیا و تجزیه و تحلیل آن را در نرم‌افزار انسیس برای سه ماده از آلیاژ آلومینیوم ۲۶۱۸، آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al4V و نیکل MAR-M-247 نشان دادند که حداکثر تنش در آلیاژ Ti-6Al4V و حداقل در آلیاژ آلومینیوم از نتایج به دست آمده برای یافتن عمر خستگی و ضریب ایمنی تیغه استفاده شد، از جمله این داده‌ها، چرخه خستگی بالا در آلیاژ MAR-M-247 و چرخه خستگی پایین در آلیاژ MAR-M-247 است. وان و همکاران [۱۷] برای بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری بر روی شکل جوش، ریزساختار، رشد دانه در منطقه تحت تأثیر گرما (خطر) و عملکرد مکانیکی، جوشکاری هیبریدی با گاز بی اثر (TIG) با لیزر-تنگستن انجام شد. نتیجه گیری شد که

کننده ماریپیچ چند گذر را ایجاد کرده است. استارو و همکاران [۲۷] روشی را برای تجزیه و تحلیل حرارتی گذرا و آسیب به ویسکوپلاستیک ارائه دادند تا برآورد طول عمر باقی مانده از اجزای توربین باشد. علاوه بر این، کارهای قابل توجهی در مورد تکامل تنش در پره‌های توربین با استفاده از یک روش اتصال جوش جامد انجام شده است [۳۰-۲۸].

۲. معادلات حاکم

انتقال حرارتی درون تیغه و انتقال حرارت میدان جریان به صورت همزمان انجام شده و از قانون انتقال گرما فوریه پیروی می‌کند:

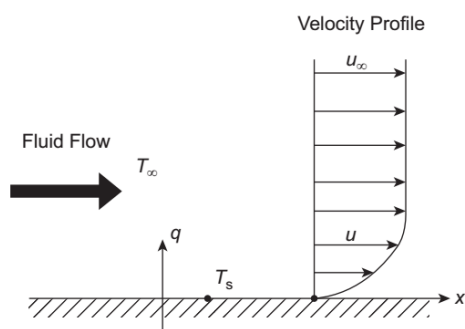
$$\rho_s c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_s \nabla T) \quad (1)$$

که در آن k_s هدایت حرارتی، c ثابت حرارتی مدل و t زمان است. به دلیل انتقال حرارت با میدان جریان و عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی بین لایه‌های مختلف، تنش حرارتی در یک پره توربین در محیط دمای بالا ایجاد می‌شود که این موضوع در شکل ۲ نشان داده شده است. یک روش جدا شدنی برای شبیه‌سازی میدان تنش اتخاذ شده است، که توسط معادله تعادل اداره میشود [۳۱]، یعنی:

$$\nabla \cdot \sigma + F = 0 \quad (2)$$

نیروی سیستم است. شایان F تانسور تنش و σ جایی که ذکر است که در این حالت نیرو مورد توجه قرار نمی‌گیرد. بنابراین، فرم معادله (۲) را بازنویسی می‌کنیم:

$$\nabla \cdot \sigma = 0 \quad (3)$$



شکل (۲) نحوه جریان سیال روی یک سطح

در مواردی که دمای سطح از دمای سیال بیشتر باشد ($T_s > T_\infty$)، گرما با هدایت از سطح به داخل لایه روی سطح جریان یافته و سپس گرما به سیال مجاور که در حال حرکت است، منتقل می‌شود. همرفت این ترکیب از انتقال در سطح و انتقال حرارت به سیال تعریف می‌شود. دو طبقه بندی اصلی از ضریب همرفت وجود دارد: همرفت اجباری

سایر مواد بیشترین و برای Inconel 718 کمترین مقدار را دارد. نقیض و همکاران [۲۲] تجزیه و تحلیل ساختاری پره-های توربین گازی را با استفاده از مواد مختلف مورد مطالعه قرار داد. هدف از این تحقیق بررسی عملکرد تیغه توربین با استفاده از Inconel 718 و سرامیک به عنوان ماده تیغه مربوطه و مقایسه نتایج است. مدل در نرم افزار کتیا طراحی و در نرم‌افزار انسیس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل شده نشان داد که Inconel 718 مقاومت بیشتری در برابر نیروهای وارده نسبت به سرامیک دارد. ردی و همکاران [۲۳] تأثیر دما و تحلیل ساختاری بر تیغه توربین گازی را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که دما تأثیر عمده‌ای بر عملکرد تیغه دارد. حداکثر کشیدگی در نوک و حداقل تغییرشکل در ریشه تیغه بود. به طور مشابه، حداکثر تنش در ریشه تیغه و حداقل تنش در نوک تیغه توربین مشاهده شد. برای آنالیز تیغه توربین در نرم‌افزار انسیس از مواد Inconel 625 - HASTEALLOY و N155 استفاده شد. نتایج نشان داد که تنش حرارتی و دمای تیغه برای Inconel 625 حداقل و از خواص حرارتی بهتری برخوردار بودند. پرودوی راج و همکاران [۲۴] تنش روتور چند مرحله‌ای تیغه توربین گازی از سوپر آلیاژ AISI-4130، آلیاژ Hast c-271 و آلیاژ INCONEL-718 را توسط نرم‌افزار Ansys مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که آلیاژ INCONEL-718 به دلیل خواص ساختاری بهتر، حداکثر عمر را داشته است. عبدالحسین و همکاران [۲۵] طراحی و تجزیه و تحلیل تیغه روتور توربین گازی را با استفاده از روش المان محدود مورد مطالعه قرار داده است. هدف از این تحقیق بررسی آنالیز ساختاری و حرارتی تیغه روتور مرحله اول و تیغه توربین گازی دو مرحله‌ای بود. زو و همکاران [۲۶] پیشرفت علوم مواد و فناوری خنک‌کننده تیغه را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها همچنین به منظور به حداقل رساندن نشت و همچنین تکامل فناوری تیغه‌های خنک شده در هوا، طراحی نوک تیغه را مورد مطالعه قرار دادند. تکامل مواد تیغه به سیستم امکان افزایش دمای بالاتر و همچنین مقاومت در برابر تنش‌های محیطی را می‌دهد. از پوشش برای محافظت تیغه توربین در برابر خوردگی استفاده می‌شود. سوپرآلیاژها با غلبه بر چالش‌های مختلف می‌توانند به عنوان مواد تیغه آینده مورد استفاده قرار گیرند. روش خنک‌کننده تیغه، مسیری طولانی از خنک‌کننده انتقال تک پاس تا خنک

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = q \quad (\text{The first boundary } \Gamma_2)$$

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = \alpha(T_a - T) \quad (\text{The first boundary } \Gamma_3)$$

که در آن α نفوذ حرارتی، T_a دمای سیال است و n بردار واحد نرمال بر سطح است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، Γ_1 روی سطح پایین پره بارگذاری می-شود، Γ_2 مربوط به منطقه تماس با ریشه پره و Γ_3 مربوط به سایر سطوح قطعه است.

۳- مراحل شبیه سازی

مدل سازی تیغه توربین با نرم افزار سالیدورک و تحلیل با استفاده از نرم افزار متلب

یک مدل CAD از تیغه توربین در نرم افزار سالیدورک طراحی و مدل حاصل در نرم افزار متلب بارگذاری شده است. این پروفایل به ۱۵ سطح تقسیم بندی و با نسبت ۰/۰۱ مش زده شد. سپس برنامه تحلیلی بر اساس خواص و بارگذاری های مکانیکی و حرارتی متریکال موردنظر تنظیم و اجرا شد. مدل طراحی شده در شکل ۳، خواص مواد در جدول ۱ و کدهای فراخوانی مدل های مختلف قطعه در جدول ۲ درج شده است.

و همرفت طبیعی (آزاد). در همرفت اجباری، وسیله ای وجود دارد که باعث حرکت قابل توجه سیال می شود. این ابزار می تواند فن، دمنده یا پمپ باشد. در همرفت طبیعی، هیچ عاملی وجود نداشته و حرکت سیال ملایم تر است و از اثرات شناوری در سیال ناشی از انبساط حرارتی ایجاد می-شود. میزان انتقال حرارت از طریق همرفت بستگی به تفاوت دمای سطح و سیال دارد. علاوه بر این، چندین عامل دیگر نیز شامل حرکت سیال، خصوصیات حرارتی و فیزیکی سیال و هندسه و جهت گیری در فضای سطح، بر انتقال حرارت تأثیر می گذارد.

شرایط مرز حرارتی و بارهای گرمایی

با در نظر گرفتن هدایت گرمای سه بعدی در یک ماده جامد، می توان معادله حاکمیت مرتبط را به این صورت نوشت [۲۶]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

که در آن T دما و x, y, z مختصات دکارتی و t زمان است. گرمای نهان در هنگام چرخش در نظر گرفته نمی شود. شرایط اولیه به صورت زیر تنظیم شده است:

$$T = T_0$$

که در آن T_0 درجه حرارت اولیه قبل از شروع به کار است. در مورد مواد جامد با منبع حرارت، سه شرط مرزی به صورت زیر تعریف شده است [۲۶، ۲۷]:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = 0 \quad (\text{The first boundary } \Gamma_1)$$

جدول (۱) خواص مکانیکی و حرارتی مواد مورد آنالیز [۳۳-۳۵]

ماده	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GP)	رسانایی گرمایی (W/M/K)	ضریب انبساط حرارتی (1/K)
آلیاژ پایه نیکل	۰/۲۳	۲۲۷	۱۱/۵	۰/۰۰۰۰۱۲۷
آلومینیوم ۷۰۷۵	۰/۳۳	۷۱	۱۳۰	۰/۰۰۰۰۲۳
تیتانیوم گرید ۵	۰/۳۲	۱۱۰	۷/۱	۰/۰۰۰۰۰۹۶
ساخت افزایشی	۰/۲۹	۱۹۴	۱۵	۰/۰۰۰۰۱۶۷

جدول (۲) دستوره‌های فراخوانی مدل های مختلف در برنامه

<code>smodel = createpde('structural','static-solid')</code>	فراخوانی مدل آیرودینامیکی
<code>tmodel = createpde('thermal','steadystate')</code>	فراخوانی مدل حرارتی
<code>tmodel = createpde('structural','static-solid')</code>	فراخوانی مدل ترکیبی آیرودینامیکی و حرارتی
<code>msh = generateMesh(smodel,'Hmax',0.01)</code>	اعمال مش
<code>Interior cooling = 150</code>	
<code>Pressure side = 1000</code>	
<code>Suction side = 1000</code>	
<code>Tip = 1000</code>	
<code>Base = 800</code>	
<code>AmbientTemperature (C°)</code>	اعمال دمای کاری پره در نواحی مختلف
<code>Root in contact with hot gases = 400</code>	
<code>Root in contact with metal = 300</code>	

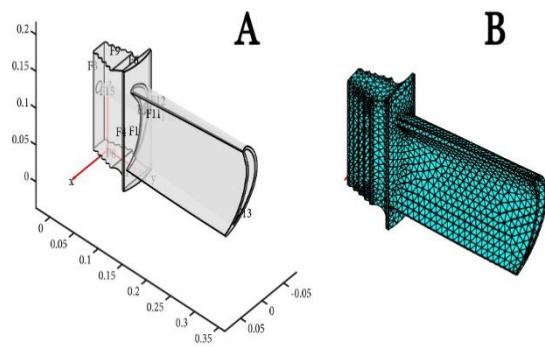
محدود، مدل الگوبرداری شده و به صورت فرضی به مجموعه ای از قطعات کوچک تقسیم می‌شود. در این پژوهش، اجزاء محدود بدان معنی است که هندسه به یک مجموعه متناهی از عناصر کوچک تقسیم می‌شود. عناصر به یکدیگر متصل شده و در نقطه‌ای به یکدیگر ملحق می‌شوند [۲۵] بنابراین روش اجزاء محدود به ابزاری بسیار قدرتمند برای تجزیه و تحلیل هندسه‌های پیچیده در مهندسی تبدیل شده است. برای تعیین تنش، کرنش و تغییر شکل تیغه توربین با استفاده از مواد مختلف در شرایط عملیاتی مشابه از آنالیز عناصر محدود برای تیغه توربین استفاده شده که مشخصات مش برنامه در جدول ۳ بیان شده است.

جدول ۳ - اطلاعات مش

سweep	نوع
۹۰۵۰۰	تعداد کل المان
۱۵۴۰۰	تعداد کل گره
$3/6 \times 10^{-5}$	کمترین اندازه مش
$1/7 \times 10^{-2}$	بیشترین اندازه مش

کد اجرای این تحلیل به نحوی نوشته شده است که ابتدا مدل اولیه فراخوانی و مش زده شده و سپس بر حسب شرایط مرزی درج شده در جدول ۲ به ترتیب مراحل زیر اجرا شود:

۱- تغییر شکل و تنش حاصل از بارگذاری مکانیکی



شکل (۳) مدل طراحی و مش‌بندی تیغه توربین

از روش sweep برای مش زدن قطعات سه‌بعدی نسبتاً پیچیده استفاده می‌شود. در حالت سه‌بعدی، نوع المان‌های تولید شده با استفاده از این روش، مکعبی یا گوه‌ای می‌باشد. در صورت استفاده از این تکنیک برای مش زدن اجسام، نرم افزار دو مرحله را برای ایجاد مش sweep طی می‌کند.

۱- بر روی یکی از سطوح قطعه، مش دو بعدی ایجاد می‌شود.

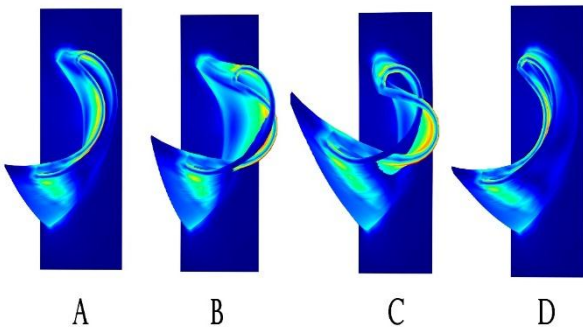
۲- در طول لبه‌های متصل کننده دو سطح، نودها کپی شده و لایه‌هایی از المان بین این لبه‌ها و دو سطح منبع و هدف ایجاد می‌گردد.

تحلیل تنش‌های ایجاد شده در یک تیغه توربین گازی فرایندی بسیار پیچیده است. روش اجزاء محدود یک روش تحلیلی برای محاسبه جواب است. در تجزیه و تحلیل اجزاء

سطح خارجی ریشه	۱۵	۳۰۰	۴۰۰	-	-
سطح انتهایی ریشه	۱۰۰۰	۳۰۰	۳۱۰	-	-
سطح داخلی پره	۳۰	۳۰۰	۱۵۰	-	-
سطح خارجی پره	۵۰	۳۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰۰	۴۵۰۰
سطح اتصال پره به ریشه	۴۰	۳۰۰	۸۰۰	-	-

۴. بحث و نتیجه گیری :

۴-۱. مرحله اول تحلیل (بارگذاری آبرودینامیکی):
 نتایج حاصل از این مرحله نشان داد که تغییر شکل ناشی از این بارگذاری در آلومینیوم بیشترین مقدار و در آلیاژ پایه نیکل کمترین حد خود را دارد و به طبع این موضوع مقدار ماکزیمم تنش به ترتیب در آلیاژ پایه نیکل، ساخت افزایشی، تیتانیوم و آلومینیوم ایجاد شده است. تغییرات ابعادی در این مرحله در شکل ۴ نشان داده شده است. در تمامی نتایج، نام گذاری تصاویر به نحو زیر خواهد بود: (A) آلیاژ پایه نیکل (B) تیتانیوم گرید ۵ (C) آلومینیوم ۷۰۷۵ (D) جوشکاری ساخت افزایشی با گاز محافظ.



شکل (۴) تغییر شکل ناشی از بار آبرودینامیکی با بزرگنمایی

۱۰۰

۴-۲. مرحله دوم تحلیل (نمایش توزیع حرارت قطعه طبق شرایط جدول ۲): در این مرحله و بعد از تعیین مشخصات و شرایط حرارتی قبل از محاسبه تنش و کرنش حرارتی، توزیع حرارت در قطعه اعمال می شود که این موضوع در شکل ۵ نشان داده شده است.

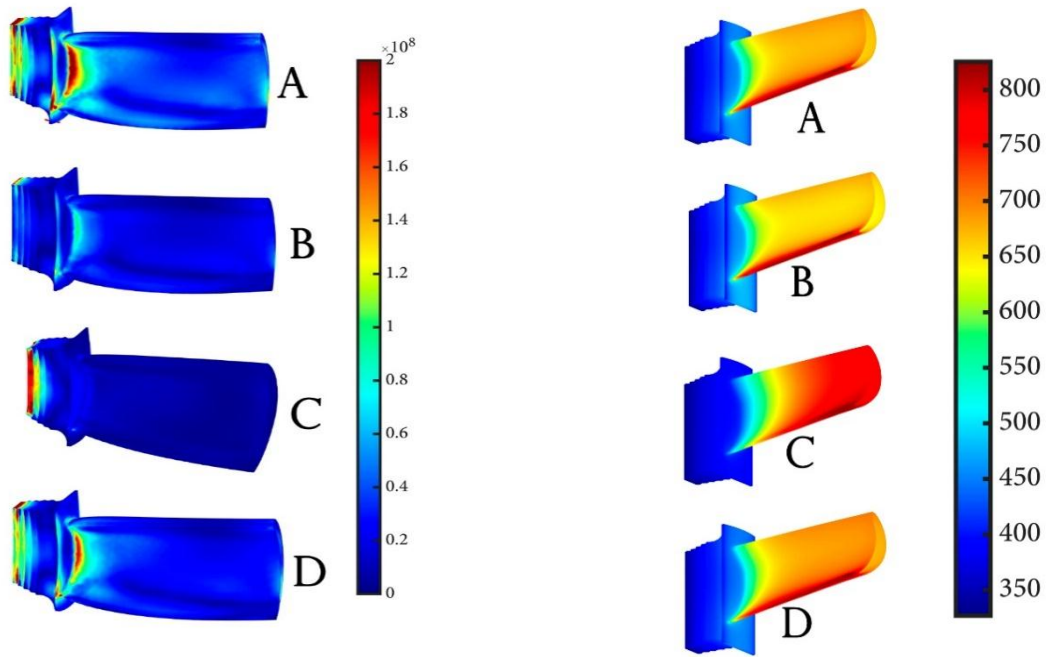
- ۲- مدل قطعه تحت جذب حرارت به تفکیک ضریب همرفتی و دمای سطوح مختلف
- ۳- تغییر شکل و تنش حاصل از بارگذاری حرارتی
- ۴- تغییر شکل و تنش حاصل از ترکیب بارگذاری حرارتی و مکانیکی

در این برنامه، تنش حرارتی و تغییر شکل تیغه توربین در شرایط عملیاتی حالت پایدار محاسبه می شود. تیغه دارای مجاری خنک کننده داخلی بوده و هوای خنکی که از مجاری جریان دارد، درجه حرارت تیغه را در حد مجاز برای ماده حفظ می کند. این ویژگی در تیغه های مدرن، معمول است. توربین جزئی اصلی از موتورهای جت است که وظیفه استخراج انرژی از گاز با دمای بالا و فشار زیاد تولید شده در محفظه احتراق و تبدیل آن به حرکت چرخشی برای تولید رانش را دارد. توربین یک مجموعه شعاعی از تیغه ها است که به طور معمول از آلیاژهای نیکل ساخته می شود. این آلیاژها در برابر دمای بسیار بالای گازها مقاومت می کنند. در چنین دمائی، ماده به طور قابل توجه منبسط شده و باعث ایجاد تنش مکانیکی در مفاصل و تغییر شکل چشمگیر چندین میلی متری می شود. برای جلوگیری از خرابی مکانیکی و اصطکاک بین نوک تیغه و محفظه توربین، طراحی تیغه باید تنش و تغییر شکل را در نظر بگیرد. این برنامه به طور کلی شامل سه مرحله زیر است:

- ۱- در حالی که اثرات حرارتی نادیده گرفته می شود، فقط برای فشار گازهای اطراف، تحلیل ساختاری صورت می گیرد.
- ۲- محاسبه تنش گرمایی در حالی که فشار، تخصیص داده نمی شود.
- ۳- ترکیب فشار و تنش گرمایی.

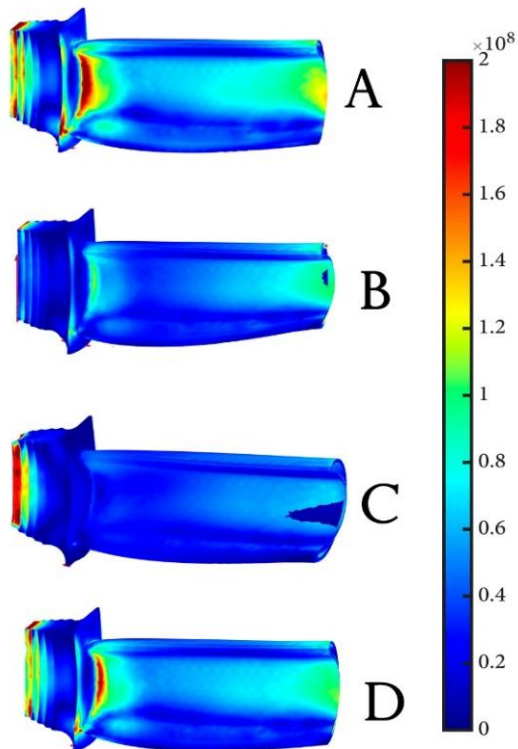
جدول (۴) شرایط مرزی نقاط مختلف قطعه

ناحیه	ضریب همرفتی	دمای اولیه (°C)	دمای کاری (°C)	بار فشاری (P)	بار مکشی (P)
نوک پره	۲۰	۳۰۰	۱۰۰۰	-	-
سطح داخلی ریشه	۳۰	۳۰۰	۱۵۰	-	-



شکل (۵) توزیع حرارت در نمونه‌های مختلف (C°)

شکل (۶) تنش ناشی از بار حرارتی (Pa)



شکل (۷) تنش ترکیبی حرارتی و آیرودینامیکی (Pa)

۳-۴. مرحله سوم تحلیل (استخراج میزان تنش حرارتی

در قطعه طبق شرایط جدول ۲):

نیروهای حرارتی وارده بر تیغه باعث ایجاد بالاترین تنش در بین نیروهای شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج نشان داده شده در شکل ۶ حاکی از آنست که بیشترین تنش در نواحی ریشه و محل اتصال پره به ریشه ایجاد می‌شوند. همچنین در بین مواد ماکزیمم تنش حرارتی به ترتیب توسط آلومینیوم ۷۰۷۵، آلیاژ پایه نیکل، ساخت افزایشی و تیتانیوم گرید ۵ ثبت شده است.

۴-۴. مرحله چهارم (محاسبه تنش و کرنش برای

بارگذاری همزمان حرارتی و آیرودینامیکی)

نتایج حاصل از ترکیب هر دو نوع بارگذاری حرارتی و آیرودینامیکی مشخص می‌کند که مقدار ماکزیمم توزیع نهایی تنش در پره از نظر جنس، به ترتیب برای آلومینیوم ۷۰۷۵، آلیاژ پایه نیکل، ساخت افزایشی و تیتانیوم گرید ۵ و از نظر نواحی مختلف قطعه به ترتیب در قسمت انتهایی ریشه و محل اتصال ریشه به پره ایجاد می‌شود. شکل ۷ نتایج مرحله چهارم را نشان می‌دهد.

نتایج تنش و تغییر شکل‌های به وجود آمده به تفکیک جنس و نوع بار در جداول ۵ و ۶ بیان شده است.

سه نوع بارگذاری حرارتی، آیرودینامیکی و ترکیبی توسط نرم افزار متلب انجام و در نهایت نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- بیشترین تنش در رابطه با بار حرارتی محاسبه شد.
- ۲- توزیع حرارت در آلومینیوم بیشتر و سریع تر از سه ماده دیگر انجام گرفت.
- ۳- تنش و تغییر شکل ماکزیمم به ترتیب در آلومینیوم ۷۰۷۵، تیتانیوم گرید ۵، جوشکاری ساخت افزایشی و آلیاژ پایه نیکل ثبت شده است.
- ۴- تنش های حرارتی و مکانیکی در قسمت ریشه پره که محل اتصال آن به قطعات دیگر است و بواسطه ثابت بودن، کمتر در معرض حرارت و فشار قرار دارد بسیار کمتر از دیگر نواحی قطعه است.
- ۵- در هر چهار ماده، بیشترین تنش مربوط به دو ناحیه اتصال پره به ریشه و انتهای ریشه است که دلیل منطقی این موضوع ثابت بودن و عدم حرکت ریشه در حین بارگذاری است.
- ۶- از آنجا که در بار مطلق حرارتی، قطعه حرکتی ندارد، بنابراین دلیل کمتر بودن میزان تنش در مرحله ترکیب بارهای حرارتی و آیرودینامیکی نسبت به تنش مطلق حرارتی به واسطه نقش خنک کنندگی جریان هوا بر روی قطعه است.

بنابراین از نتایج خروجی، استفاده از آلیاژ پایه نیکل و پره جوشکاری ساخت افزایشی مناسب ترین ماده در بین چهار ترکیب است. از طرفی به دلیل هزینه بالای متریال و ماشینکاری آلیاژهای مختلف استفاده از پره ساخت افزایشی مقرون به صرفه است. از این مطالعه می توان نتیجه گرفت که خرابی مکانیکی پره در توربین های گازی بسیار محسوس بوده و برای جلوگیری از این خرابی، انتخاب مواد اقدامی بسیار مهم است. ماده انتخاب شده باید به گونه ای باشد که باید در برابر فشارهای مکانیکی و گرما مقاومت کند که در حین کار توربین تولید می شود.

۹- منابع

- [1] Aspinwall DK, Soo SL, Curtis DT, Mantle AL. Profled superabrasive grinding wheels for the machining of a nickel based superalloy. *CIRP Ann Manuf Technol* 2007;56(1):335-8.
- [2] Klocke F, Klink A, Veselovac D, Aspinwall DK, Kruth JP. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes. *CIRP Ann Manuf Technol* 2014;63(2):703-26.

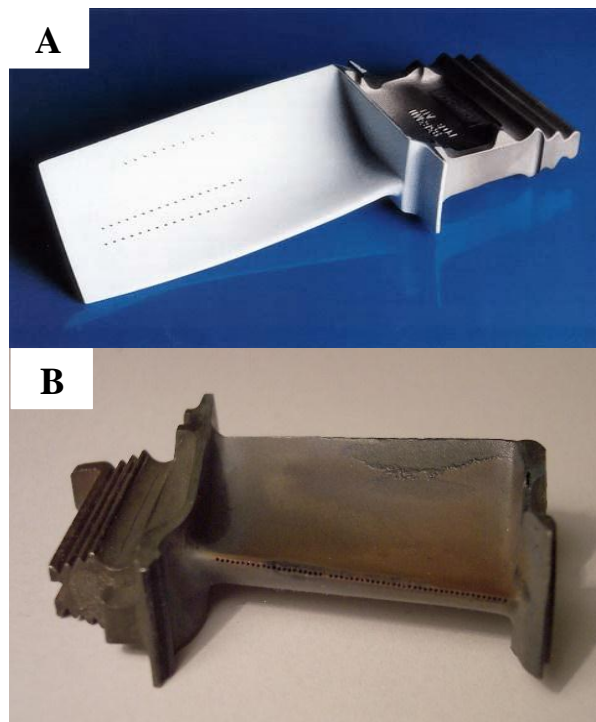
جدول (۵) تنش های وارده بر قطعه تحت بارگذاری های مختلف (Mp)

ماده	آیرودینامیکی	حرارتی	ترکیبی
آلیاژ پایه نیکل	۱۰۶	۸۶۶	۸۵۴
تیتانیوم گرید ۵	۱۰۲	۳۰۲	۲۹۴
آلومینیوم ۷۰۷۵	۱۰۲	۸۷۲	۸۶۰
ساخت افزایشی	۱۰۴	۷۵۵	۷۴۳

جدول (۶) تغییر شکل قطعات تحت بارگذاری های مختلف -mm

ماده	آیرودینامیکی	حرارتی	ترکیبی
آلیاژ پایه نیکل	۰/۲	۱/۵	۱/۵
تیتانیوم گرید ۵	۰/۴	۱/۳	۱/۸
آلومینیوم ۷۰۷۵	۰/۷	۱/۹	۲
ساخت افزایشی	۰/۲	۱/۵	۱/۵

در شکل شماره ۸، مدل های واقعی پره توربین حرارتی در قبل و بعد از بارگذاری نمایش داده شده است.



شکل (۸) پره توربین گازی (A قبل و B بعد از بارگذاری)

۵- نتایج

تجزیه و تحلیل اجزاء محدود تیغه جت توربین با چهار ماده مختلف شامل آلیاژ پایه نیکل، جوشکاری ساخت افزایشی با گاز محافظ، آلومینیوم ۷۰۷۵ و تیتانیوم گرید ۵ و تحت

- [19] Kyung Min Kim, Jun Su Park, Dong Hyun Lee, Tack Woon Lee, Hyung Hee Cho, Analysis of conjugated heat transfer, stress and failure in a gas turbine blade with circular cooling passages, *Eng. Failure Anal.* 18 (2011) 1212-1222.
- [20] L. Umamaheswararao, K. Mallikarjunarao, Design and analysis of a gas turbine blade by using FEM, *Int. J. Latest Trends Eng. Technol.* (2012).
- [21] R. Nagesh, H.R. Apoorva, R. Mohan, Static structural analysis of gas turbine blades comparing the materials, *Int. Adv. Res. J. Sci. Eng. Technol.* (2017) ISSN (Online) 2393-8021 ISSN (Print) 2394-1588.
- [22] K. Harshavardhan Reddy, D. Raghurami Reddy, N. Balajiganesh, Structural and thermal analysis of a gas turbine blade, *Int. J. Eng. Innovative Technol.*, 7 (3), ISSN: 2277-3754.
- [23] Ch.V Prudhvi Raj, K. Arun Kumar, Stress Analysis of gas turbine multi stage rotor assembly, *Int. J. Sci. Res.* (2014) ISSN (Online): 2319-7064.
- [24] Ahmed Abdulhussein Jabbar, A.K. Rai, P. Ravinder Reddy, Mahmood Hasan Dakhil, Design and analysis of gas turbine rotor blade using finite element method, *Int. J. Mech. Product. Eng. Res. Dev.* 4 (1) (2014) 91-112, ISSN(P): 2249-6890; ISSN(E): 2249-8001.
- [25] Li Xu, Sun Bo, You Hongde, Wang Lei, Evolution of Rolls-Royce air-cooled turbine blades and feature analysis, 2014 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, APISAT2014
- [26] A. Staroselsky, T.J. Martin, B. Cassenti, Transient thermal analysis and viscoplastic damage model for life prediction of turbine components, *J. Eng. Gas Turbines Power* 137 (2015) 042501.
- [27] W. Wróblewski, Numerical evaluation of the blade cooling for the supercritical steam turbine, *Appl. Therm. Eng.* 51 (2013) 953-962.
- [28] K.M. Kim, J.S. Park, D.H. Lee, T.W. Lee, H.H. Cho, Analysis of conjugated heat transfer, stress and failure in a gas turbine blade with circular cooling passages, *Eng. Fail. Anal.* 18 (2011) 1212-1222.
- [29] W.D. York, J.H. Leylek, Three-dimensional conjugate heat transfer simulation of an internally-cooled gas turbine vane ASME Turbo. Expo. Collocated With the 2003 International Joint Power Generation Conference 2003, pp. 351-360.
- [30] <https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/fea/whatisfea.html>.
- [31] H. Carslaw, J. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, Oxford, 1959.
- [32] L Wang, Y Qin, Z-c Liu, P-q Ge, W Gao, Computer simulation of a workpiece temperature field during the grinding process, *Proc. Instit. Mech. Eng. Part B: J.*
- [33] L. ZhangQin, L. YongBing, W. YaSheng, C. GuanLeng, Numerical analysis of a moving gas tungsten arc weld pool with an external longitudinal magnetic field applied, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 27, pp. 288-295, 2005.
- [34] Hand book of High temperature characteristic of stainless steels, A Designer's Handbook Series, N 9004, A. I. a. S. Institute, ed.
- [35] WELDING GUIDE, BOHLER. Welding. Products, ed., 2010.
- [3] Xi XX, Ding WF, Wu ZX, Anggei L. Performance evaluation of creep feed grinding of γ -TiAl intermetallics with electroplated diamond wheels. *Chinese J Aeronaut* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.04.031>.
- [4] Chen JJ, Fu YC, Qian N, Jiang HF, Ching CY, Ewing D, et al. Investigation on cooling behavior of axially rotating heat pipe in profile grinding of turbine blade slots. *Appl Therm Eng* 2021;182:116031.
- [5] Ding ZS, Sun GX, Guo MX, Jiang XH, Li BZ, Liang SY. Effect of phase transition on micro-grinding-induced residual stress. *J Mater Process Technol* 2020;281:116647.
- [6] Ding WF, Zhang LC, Li Z, Zhu YJ, Su HH, Xu JH. Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials. *Int J Adv Manuf Technol* 2017;88:2939-68.
- [7] Material is used to make the hot sections of jet engines. <https://aviation.stackexchange.com/questions/25645/what-material-is-used-to-make-the-hot-sections-of-jet-engines>.
- [8] نخودچی، سهیل، شکوه فر، اکبری ایرج، صالح & رضازاده. (۲۰۱۴). بررسی عددی و تجربی توزیع دما و تنش پسماند در فرایند جوشکاری چند مرحله ای دو ورق از جنس فولاد زنگ نزن با ضخامت غیریکسان. مهندسی مکانیک مدرس (فنی و مهندسی مدرس)-81(9), 14, 89.
- [9] WANG, L. L., et al. Special features of double pulsed gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 251: 369-375.
- [10] SATHIYA, P.; MISHRA, Mahendra Kumar; SHANMUGARAJAN, B. Effect of shielding gases on microstructure and mechanical properties of super austenitic stainless steel by hybrid welding. *Materials & Design*, 2012, 33: 203-212.
- [11] Ikpe Aniekan Essienubong, Owunna Ikehukwu, Patrick O. Ebnunilo, Ememobong Ikpe, Material selection for high pressure (HP) turbine blade of conventional turbojet engines, *Am. J. Mech. Ind. Eng.* 1 (1) (2016) 1-9,
- [12] Hussain Mahamed Sahed Mostafa Mazarbhuiya, Krishna Murari Pandey, Steady state structural analysis of high pressure gas turbine blade using finite element analysis, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 225 (2017),
- [13] P.V. Krishnakanth, G. Narasa Raju, R.D.V. Prasad, R. Saisrinu, Structural & thermal analysis of gas turbine blade by using F.E.M, *Int. J. Sci. Res. Eng. Technol.* (2013) ISSN 22780882.
- [14] P.R. Surve, R.V. Shitole, D.R. Shirdhankar, S.N. Shigwan, V.S. Bagade, Structural Analysis of Gas Turbine Blade, *Int. Res. J. Eng. Technol.* (2017) e-ISSN: 2395
- [15] K. Rakesh, S. Kanchiraya, Modeling and stress analysis of gas turbine rotor, *Int. Res. J. Eng. Technol.* (2017) e-ISSN: 2395-0056.
- [16] YAN, Jun; GAO, Ming; ZENG, Xiaoyan. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48:4: 512-517.
- [17] G.D. Ujade, M.B. Bhambere, Comparative study of gas turbine blade materials, geometries using finite element analysis, *Int. Res. J. Eng. Technol.* 02 (2015), eISSN: 2395-0056; p-ISSN: 2395-0072.
- [18] V. Theju, P.S. Uday, P.L.V. Gopinath Reddy, C.J. Manjunath, Design and analysis of gas turbine blade, *Int. J. Innov. Res. Eng. Technol.* (2014) ISSN: 2319-8753.