



## پیشنهادی پایان نامه / رساله

نام و نام خانوادگی:	شماره ی دانشجویی:
۱- عنوان پایان نامه / رساله	

فارسی: تحلیل غیرخطی ترموالاستیک دیسک های ضخامت متغیر چرخان از مواد ناهمگن FG با در نظر گرفتن تغییر شکل های بزرگ

English: **Nonlinear thermoelastic analysis of heterogeneous FGM rotating discs with variable thickness considering large deformations**

۲- نوع پژوهش			
روش پژوهش:	نظری <input checked="" type="checkbox"/>	تجربی	ترکیبی (نظری-تجربی)
نوع پژوهش:	بنیادی	کاربردی	توسعه ای <input checked="" type="checkbox"/>
۳- تعریف مسأله			

این پژوهش، به تحلیل ترموالاستیک دیسک های چرخان با سرعت زاویه ای ثابت و ضخامت متغیر که از مواد ناهمگن تابعی<sup>۱</sup> (FGMs) ساخته شده اند، می پردازد. استفاده از مواد FG باعث تغییر خواصی مانند چگالی، مدول الاستیسیته و ضریب انبساط گرمایی دیسک می شود. متغیر بودن ضخامت نیز وجود پروفیل های مختلف را برای دیسک ممکن ساخته و تغییر در هندسه ی دیسک را ایجاد می کند. نشان دادن این تغییرات در خواص و هندسه، مستلزم استفاده از توابع ریاضی توزیع می باشد. چرخش دیسک با سرعت ثابت باعث به وجود آمدن نیروی گریز از مرکز شده و عامل غیر صفر شدن نیروهای حجمی در راستای شعاع می شود. انتقال حرارت ناشی از اختلاف دمای شعاع داخلی و خارجی دیسک نیز کرنش های حرارتی را در دیسک پدید می آورد. به دلیل وجود تغییر شکل های بزرگ در جهت شعاعی و در نتیجه وجود جملات غیرخطی در معادلات سینماتیک (روابط کرنش-جابجایی)، معادله دیفرانسیل حاکم از نوع مرتبه ی دوم غیرخطی با ضرایب متغیر می باشد.

۴- سابقه و ضرورت انجام پژوهش
------------------------------

دیسک های چرخان به دلیل کاربرد زیادی که در صنعت دارد، از دیرباز موضوع مطالعات متعددی بوده است. از میان کاربردهای دیسک های چرخان می توان به توربین ها، کمپرسورها، چرخ دنده ها و ... اشاره کرد. سرعت زاویه ای بالا در دیسک چرخان باعث ایجاد نیروی گریز از مرکز بزرگی در دیسک شده و همچنین، دمای بالا، منجر به کاهش مقاومت ماده ی آن می شود که اگر دیسک از جنس مناسبی ساخته نشده باشد، تغییر شکل زیادی را در دیسک چرخان ایجاد کرده و موجب غیرخطی شدن معادلات می شود. از طرفی سیستم های خطی بیش از آن که یک قاعده در طبیعت به شمار روند، یک استثنا هستند و محدود کردن مطالعات به سیستم های خطی عمدتاً به خاطر محدودیت در دانش ریاضی است. هرچند مسائل خطی تا حد زیادی نیازهای مهندسی را مرتفع می سازند، اما مواجهه با مسائل غیرخطی جدید و پیشرفت دانش ریاضی در جهت حل معادلات غیرخطی،

<sup>۱</sup> Functionally Graded Materials

سبب شده تا دست‌یابی به حل‌های تحلیلی برای مسائل غیرخطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شوند. همان‌طور که می‌دانیم، امروزه دیگر هدف، تبدیل مدل‌های تئوری موجود به کدهای عددی نیست، بلکه افزایش دقت مدل‌های موجود در زمینه‌های مختلف (مدل‌سازی مواد، تحلیل کرنش‌های بزرگ، مکانیک ضربه، بهینه‌سازی سازه‌های غیرخطی و ...) به منظور دست‌یابی به شبیه‌سازی دقیق‌تر واقعیت خصوصاً در مسائل غیرخطی است؛ هم‌چنین برخی از دیسک‌ها در قطعاتی استفاده می‌شوند که تعمیر و یا تعویض آن‌ها زمان‌بر، پرهزینه و بعضاً ناممکن است و این لزوم دقت در تحلیل آن‌ها را دوچندان می‌نماید؛ چنین قطعاتی در توربین‌ها، کمپرسورها و سفینه‌ها به وفور یافت می‌شوند. از این‌رو بررسی رفتار غیرخطی دیسک‌ها تحت بارهای مکانیکی و حرارتی حائز اهمیت می‌باشد.

می‌توان نشان داد که تنش‌ها در دیسک‌های چرخان با ضخامت متغیر بسیار کمتر از تنش‌های دیسک‌ها با ضخامت ثابت در شرایط یکسان است [۱]. در این حالت، توزیع تنش می‌تواند تا حدودی اصلاح شود؛ بنابراین معمولاً در طراحی دیسک‌ها از مقطع غیریکنواخت استفاده می‌شود، به گونه‌ای که بیشترین ضخامت در لبه‌ی درگیر داخلی دیسک وجود داشته و این مقطع به صورت یکنواخت تا لبه‌ی بیرونی و آزاد آن کاهش می‌یابد [۲]. هم‌چنین با توجه به حرارت بالایی که در برخی موارد، دیسک‌ها در معرض آن قرار می‌گیرند، باید به شکل هم‌زمان، قابلیت زیادی برای تحمل بارگذاری مکانیکی و تحمل دمای بالا و تنش‌های حرارتی زیاد در دیسک‌ها وجود داشته باشد که این مسأله استفاده از مواد ناهمگن تابعی را در دیسک‌ها توجیه می‌نماید. به همین دلیل، تحلیل تنش‌های مکانیکی و حرارتی در یک دیسک با مقطع غیریکنواخت ساخته شده از مواد FG، موضوعی جالب برای تحلیل و بررسی بوده، به گونه‌ای که پژوهشگران زیادی وقت خود را صرف بررسی این موضوع نموده‌اند.

نخستین بار لامه در سال ۱۸۵۲ با استفاده از تئوری الاستیسیته‌ی صفحه‌ای<sup>۲</sup> (PET)، حل دقیق استوانه‌های جدار ضخیم متقارن محوری با جدار ثابت، تحت فشار یکنواخت داخلی از ماده‌ی همگن و همسان‌گرد را ارائه کرد. گلرکین با استفاده از معادلات اساسی الاستیسیته، روابط پوسته‌های جدار ضخیم را به دست آورد [۳]. ولاسف با استفاده از تئوری الاستیسیته‌ی خطی، معادلات قابل حلی برای پوسته‌های ضخیم ارائه کرد. در تئوری الاستیسیته‌ی صفحه‌ای از تنش‌های برشی صرف‌نظر می‌شود. نقدی [۴] با لحاظ اثر برش عرضی و اینرسی دورانی، تئوری تغییرشکل برشی<sup>۳</sup> (SDT) را برای پوسته‌های ضخیم بنیان نهاد. میرسکی و هرمان [۵] با به کارگیری تئوری تغییرشکل برشی مرتبه‌ی یکم<sup>۴</sup> (FSDT)، تحلیل ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای جدار ضخیم را ارائه کردند. گرینسپن [۶] مقادیر ویژه‌ی استوانه‌های جدار ضخیم را با تئوری‌های مختلف پوسته‌های نازک و ضخیم مقایسه نمود. بنابراین دو تئوری الاستیسیته‌ی صفحه‌ای و تغییرشکل برشی برای پوسته‌های ضخیم مطرح شد. در این میان، تئوری‌های دیگری هم ارائه شدند که در تحلیل پوسته‌های جدار نازک کاربرد داشتند، از جمله می‌توان به تئوری دائل [۷] اشاره کرد که امروزه، مرجع بسیاری از مقالات به صورت مستقیم یا غیر مستقیم می‌باشد. اما چون دیسک‌ها معمولاً به شکل استوانه‌ای با ضخامت زیاد فرض می‌شوند، اغلب از این تئوری در بررسی دیسک‌ها استفاده نمی‌شود. در تئوری الاستیسیته‌ی صفحه‌ای، فرض می‌شود که مقاطع مستوی عمود بر سطح میانی، پس از اعمال فشار و تغییرشکل، همچنان مستوی و عمود بر آن باقی می‌مانند. درحقیقت کرنش برشی و تنش برشی صفر در نظر گرفته می‌شوند. اما برخلاف تئوری کلاسیک پوسته‌های نازک، جابه‌جایی هر نقطه از پوسته برابر با جابه‌جایی سطح میانی در نظر گرفته نمی‌شود. این تئوری را لامه برای استوانه‌ی جدار ثابت متقارن محوری از ماده‌ی همگن و همسان‌گرد به کار برد و توزیع تنش را در استوانه‌ها به دست آورد. تئوری لامه به تئوری کلاسیک استوانه‌های ضخیم نیز مشهور است [۳ و ۸]. با استفاده از بسط تیلور و تعریف جابه‌جایی هر نقطه به صورت مجموع جابه‌جایی سطح میانی

<sup>۲</sup> Plane Elasticity Theory

<sup>۳</sup> Shear Deformation Theory

<sup>۴</sup> First-order Shear Deformation Theory

و جابه‌جایی آن نقطه نسبت به سطح میانی، می‌توان جابه‌جایی تئوری لامه را به‌صورت یک چندجمله‌ای نوشت. اگر فقط یک جمله از چندجمله‌ای در نظر گرفته شود، تئوری تغییرشکل برشی مرتبه‌ی صفر نامیده می‌شود که مشابه تئوری خمشی در پوسته‌های نازک است. اگر دو جمله از چندجمله‌ای در نظر گرفته شود، تئوری تغییرشکل برشی مرتبه‌ی یکم نامیده می‌شود که مشابه تئوری فلوگه در پوسته‌های نازک است [۶]. در تئوری تغییرشکل برشی مرتبه‌ی یکم، مقاطع مستوی و عمود بر سطح میانی پس از تغییرشکل مستوی باقی می‌مانند ولی الزاماً عمود بر سطح میانی نخواهند بود.

با پیشرفت سریع صنایع هوافضا، صنایع نظامی، پتروشیمی و ... نیاز به موادی با مقاومت مکانیکی و حرارتی بالا ایجاد شده است. مواد همگن و همسان‌گرد به دلیل یکنواختی خواص، محدودیت‌هایی ایجاد می‌کنند، برای مثال در صنایعی که سازه در مجاورت دماهای بالا قرار دارد، استفاده از مواد همگن و همسان‌گرد که خواسته‌های طراح را برآورده کند، مشکل است. در حرارت زیاد، فلزات و آلیاژهای فلزی به‌شدت در معرض اکسیداسیون<sup>۵</sup>، خزش<sup>۶</sup>، خوردگی<sup>۷</sup> و ... قرار می‌گیرند. درحالی که استفاده‌ی تنها از مواد با خواص ترمودینامیکی مطلوب همچون سرامیک‌ها، بسیاری از خواص مورد نظر در طراحی مانند چقرمگی و استحکام بالا را برآورده نمی‌کنند. از این‌رو دانشمندان همواره در تلاش بوده‌اند که از مواد جدید با خواص برتر استفاده کنند. ایده‌ی مواد مرکب (کامپوزیت‌ها) در پایان دهه‌ی ۱۹۴۰ و آغاز ۱۹۵۰ در صنایع دریایی عملی شد. مواد مرکب از ترکیب دو یا چند ماده‌ی ناهمسان به‌وجود می‌آیند که خواص فیزیکی متفاوت و گاهی ناسازگار دارند. این عدم سنخیت رفتار مواد، باعث تمرکز تنش و ایجاد گسستگی در مرز لایه‌ها در اثر بارگذاری هم‌زمان مکانیکی و حرارتی می‌شود. کامپوزیت‌ها از دیدگاه مکانیکی، همگن و ناهمسان‌گرد تلقی می‌شوند. لخنیتسکی [۹] تئوری الاستیسیته‌ی مواد ناهمسان‌گرد را فرمول‌بندی کرد. پس از وی وینسون [۱۰] تئوری کلاسیک و تئوری تغییرشکل برشی را در تحلیل استاتیکی پوسته‌های کامپوزیتی به‌کار برد و بین نتایج دو روش مقایسه‌ای انجام داد. توتونچو [۱۱] نیز اثر ناهمسان‌گردی بر تنش‌های موجود در دیسک‌های در حال چرخش را بررسی نمود. مواد مرکب تا حد زیادی نیاز صنایع را برطرف می‌کردند اما اشکال عمده‌ی آن‌ها، تغییرناگهانی مواد و خواص آن‌ها بود که در نتیجه موجب تغییر ناگهانی رفتار مواد به‌ویژه در مرز لایه‌ها می‌شد، لذا ایده‌ی تغییر تدریجی خواص مواد پی‌ریزی شد. مواد با تغییرات تابعی خواص یا مواد ناهمگن تابعی (FGM) در ساختار ارگانایسم‌های زنده، مانند استخوان وجود داشته است. مواد FG، ناهمگن هستند ولیکن آن‌ها را همسان‌گرد در نظر می‌گیرند. این مواد مقاومت زیادی در برابر گرادیان دمایی بالا دارند. درحقیقت این‌گونه مواد با کاهش تنش‌های حرارتی، آثار منفی آن‌ها را به نحو قابل توجهی کاهش می‌دهند. به کمک مواد FG می‌توان در ناحیه‌هایی که تنش‌های حرارتی به حالت بحرانی می‌رسند، آن‌ها را کنترل کرد [۱۲].

برای تحلیل رفتار مواد، پیش از هر چیز نیاز به یک مدل ریاضی از ماده داریم. مدل‌های مختلفی برای مواد از نظر رابطه‌ی تنش و کرنش ارائه شده است که هر کدام در موارد خاصی کاربرد دارند. با توجه به اینکه مواد FG اساساً ناهمگن می‌باشند و خواص مکانیکی، حرارتی و مغناطیسی آن‌ها به صورت پیوسته و تدریجی تغییر می‌کند، می‌توان تغییر خواص را با یک تابع پیوسته‌ی ریاضی مدل کرد و از آن در روش‌های تحلیلی و عددی بهره گرفت. یکی از روش‌هایی که در بسیاری از تحلیل‌های مربوط به دیسک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، فرض چند لایه‌ای بودن مواد می‌باشد. در این روش هر لایه به‌صورت ماده‌ی همگن فرض شده است و لایه‌های همگن به‌گونه‌ای در کنار هم قرار می‌گیرند، تا خاصیت متغیر بودن ماده ایجاد شود. روش مرسوم در مدل‌سازی خواص مکانیکی، استفاده از یک تابع توانی یا تابع نمایش برای بیان توزیع پیوسته‌ی خواص در ماده می‌باشد. معمولاً در عبارات مربوط به توزیع خواص، تغییرات مدول کشسانی، ضریب انبساط حرارتی و چگالی را در نظر می‌گیرند. آباتا و نودا [۱۳]،

<sup>5</sup> Oxidation

<sup>6</sup> Creep

<sup>7</sup> Corrosion

هورگان و چان [۱۴]، یانگ [۱۵] و تارن [۱۶] تابع توانی را بررسی کردند. اراسلان و اورسان [۱۷] دیسک را در حالتی که ضخامت آن به شکل نمایی و خواص آن به شکل خطی تغییر کنند، مورد مطالعه قرار دادند. جباری و همکاران [۱۸ و ۱۹] با در نظر گرفتن تغییرات توانی خواص مکانیکی در راستای شعاع استوانه، به تحلیل الاستیک مسأله پرداختند، آن‌ها در تحقیقات خود بارگذاری حرارتی را در حالت پایدار و مسأله را به صورت متقارن محوری تحلیل نمودند. حسینی و نقدآبادی [۲۰] تحلیل حرارتی-کشسان دیسک چرخان ناهمگن تابعی را ارائه کردند. آن‌ها معادله دیفرانسیل حاکم بر مسأله را با استفاده از تقسیم‌بندی مجازی دیسک به حلقه‌های (نوارهای) باریک و در نظر گرفتن شرط پیوستگی لازم بین حلقه‌های مجاور و اعمال شرایط مرزی دیسک چرخان، به مجموعه‌ای از معادلات جبری خطی برای تعیین حل حرارتی-کشسان تبدیل کردند. حجتی و حسینی [۲۱] دیسک با ضخامت و چگالی متغیر را با استفاده از روش خواص مواد متغیر<sup>۸</sup> (VMP) تحلیل نمودند. توتونچو و تمل [۲۲] روشی جدید برای تحلیل استوانه، دیسک و کره‌های FGM تحت فشار ارائه نمودند؛ آن‌ها با استفاده از روش توابع مکمل<sup>۹</sup> (CFM) و الاستیسیته‌ی صفحه‌ای، توزیع تنش‌های شعاعی و مماسی را در سرتاسر هندسه‌های مورد نظر، به دست آوردند؛ در این روش، با تبدیل شدن مسأله‌ی مقدار مرزی به مسأله‌ی مقدار اولیه، حل آسان‌تر می‌شود. بیات و همکاران [۲۳] یک راه حل تحلیلی برای حل ترموالاستیک دیسک چرخان FGM با ضخامت متغیر بر اساس نظریه‌ی تغییرشکل برشی مرتبه‌ی یکم تدوین نمودند. تحلیل تنش‌های حرارتی در یک دیسک چرخان با ضخامت، چگالی، مدول برشی و ضریب انبساط حرارتی متغیر در راستای شعاعی، توسط نای و باترا [۲۴] انجام گرفت. وائور و شوایزر [۲۵] یک دیسک چرخان با منبع حرارتی ساکن را به صورت مکانیکی تحلیل کردند. با استفاده از روش اجزای محدود، شارما و همکاران [۲۶] اقدام به حل معادلات انتقال حرارت و پس از آن تحلیل تنش‌های حرارتی در یک دیسک ساخته‌شده از مواد FG نمودند. در مدل آن‌ها دیسک روی یک محور ثابت شده بود تا بتوان دمای محور و سطح داخلی دیسک، برابر در نظر گرفت. جباری و قنّاد [۲۷] به تأثیر توابع گوناگون بر عملکرد دیسک‌های چرخان تحت بارگذاری حرارتی پرداختند. زمانی‌نژاد و همکاران [۲۸] یک فرمول کلی برای تحلیل ترموالاستیک یک پوسته‌ی ضخیم چرخان FG با انحنای دلخواه و ضخامت متغیر تحت بارگذاری حرارتی-مکانیکی به دست آوردند، آن‌ها از تئوری تغییرشکل برشی مرتبه‌ی بالا استفاده نمودند. پرهیزگار و قنّاد [۲۹] و قدیمی و قنّاد [۳۰] از تابع توانی در پژوهش‌های خود استفاده نمودند. همچنین عبدالله و همکاران [۳۱] با فرض تغییرات توانی مدول یانگ، ضریب انبساط حرارتی، ضریب رسانش و چگالی، تنش و کرنش دیسک با ضخامت متغیر را بر اساس تئوری الاستیسیته‌ی صفحه‌ای و تئوری هدایت حرارتی حالت پایدار بررسی کردند و در نهایت، به منظور کاهش حداکثر تنش در امتداد شعاع، به بهینه‌سازی توزیع مواد پرداختند. ویشواجیت و همکاران [۳۲] یک دیسک ترمز را در نرم‌افزار Catia طراحی نمودند و در نرم‌افزار ANSYS با استفاده از چهار ماده‌ی مختلف شبیه‌سازی کردند. ایشان دیسک را تحت آنالیز مکانیکی-حرارتی برای یافتن بهترین ماده که بتواند بارگذاری را در شرایط حرارتی حفظ کند، آزمایش نمودند.

به سبب اهمیت زیاد، دیسک‌ها در شرایط گوناگون دیگری نیز بررسی شده‌اند: چاده‌ری و گوپتا [۳۳] به تحلیل هایپرالاستیک دیسک چرخان توپر و حلقوی ضخامت متغیر با تغییرشکل‌های بزرگ الاستیک در مواد تراکم‌ناپذیر با فرض مدل ساختاری مونی-ریولین پرداختند. آن‌ها نشان دادند، سرعت زاویه‌ای مجاز برای یک دیسک توپر با ضخامت متغیر، دو برابر بزرگتر از یک استوانه‌ی توپر با جدار ثابت است که حول محور خود می‌چرخد. اراسلان [۳۴] تغییرشکل الاستیک و پلاستیک دیسک چرخان با ضخامت متغیر را با شرایط مرزی مختلف محاسبه کرد. شریعت و محمدجانی [۳۵] یک تحلیل

<sup>۸</sup> Variable Material Properties

<sup>۹</sup> Complementary Functions Method

اجزای محدود سه‌بعدی برای بررسی خمش و توزیع تنش در یک دیسک چرخان را که خواص آن در هر دو راستای شعاعی و ضخامت متغیر هستند، ارائه نمودند.

با مرور کارهای انجام‌شده، ملاحظه می‌شود که بررسی و تحلیل دیسک‌ها از سال‌ها قبل آغاز شده است و هم‌اکنون نیز محققان روی این موضوع تحقیق می‌کنند. با وجود پژوهش‌های فراوان انجام‌شده، هنوز تحلیل الاستیک و ترموالاستیک دیسک‌ها با ضخامت متغیر با استفاده از روابط غیرخطی سینماتیکی انجام نشده است.

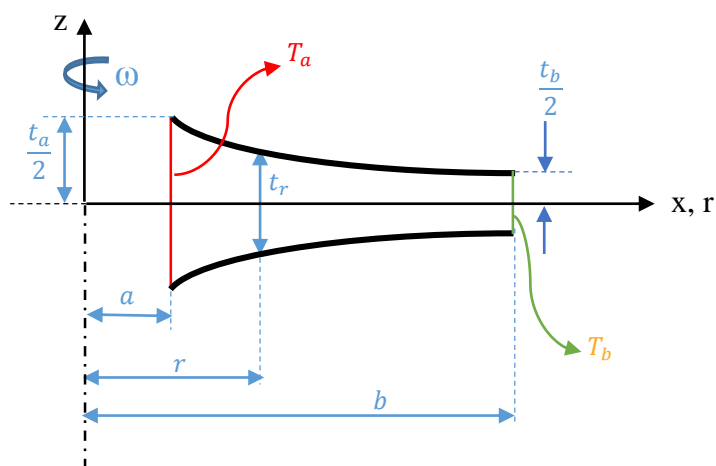
## ۵- نوآوری پژوهش

۱. حل الاستیک دیسک چرخان FGM با ضخامت متغیر با استفاده از تئوری الاستیسیته‌ی صفحه‌ای غیرخطی؛
۲. حل ترموالاستیک دیسک چرخان FGM با ضخامت متغیر با استفاده از تئوری الاستیسیته‌ی صفحه‌ای غیرخطی؛
۳. حل الاستیک دیسک چرخان FGM با ضخامت متغیر با استفاده از تئوری تغییرشکل برشی غیرخطی (در صورت امکان).

## ۶- فرضیه‌ها (متغیرها و فرض‌ها)

برای استخراج معادلات دیسک FGM با ضخامت متغیر، از فرض‌های زیر استفاده می‌شود.

۱. دیسک، از لحاظ هندسه، جنس، بارگذاری و شرایط مرزی، متقارن محوری در نظر گرفته می‌شود.
۲. ضخامت دیسک تابعی از شعاع فرض می‌شود.
۳. جابه‌جایی در راستای شعاع، بزرگ در نظر گرفته می‌شود.
۴. جنس دیسک از مواد ناهمگن با تغییرات خواص در راستای شعاعی در نظر می‌شود.
۵. به دلیل تغییرات ناچیز نسبت پواسون و ضریب انتقال حرارت، این دو پارامتر ثابت فرض می‌شوند.
۶. چرخش دیسک با سرعت زاویه‌ای ثابت می‌باشد.
۷. نیروی گریز از مرکز، تنها نیروی مکانیکی اعمال شده به دیسک می‌باشد و از تأثیر فشار جازنی چشم‌پوشی می‌شود.
۸. لایه‌ی داخلی دیسک و محور هم‌دما هستند.
۹. انتقال حرارت فقط به‌صورت رسانش<sup>۱۰</sup> و به دلیل اختلاف دمای بین شعاع داخلی و خارجی انجام می‌شود.
۱۰. توزیع دما تابع شعاع است، بدین ترتیب دما در هر یک از شعاع‌های داخلی و خارجی یکنواخت می‌باشد.
۱۱. دیسک در شعاع داخلی به‌صورت کاملاً گیردار به محور متصل است.



متغیرهای مورد نظر در این پژوهش به صورت زیر است.

#### متغیرهای مستقل:

۱. هندسه: مطابق شکل زیر، ضخامت دیسک در فاصله  $r$  از محور دوران، با  $t_r$  نشان داده شده است.  $a$  و  $b$  هم به ترتیب شعاع داخلی و شعاع خارجی دیسک می‌باشند،  $a \leq r \leq b$ .
۲. جنس دیسک: دیسک ساخته شده از مواد ناهمگن همراه با تغییرات خواص در راستای شعاع می‌باشد.
۳. بارگذاری مکانیکی: دیسک با سرعت زاویه‌ای ثابت می‌چرخد.
۴. بارگذاری حرارتی: دیسک تحت تنش حرارتی به دلیل اختلاف بین دمای شعاع داخلی ( $T_a$ ) و دمای شعاع خارجی ( $T_b$ ) می‌باشد.

#### متغیرهای وابسته:

۱. جابه‌جایی‌ها: شامل جابه‌جایی محوری و جابه‌جایی شعاعی می‌باشند.
۲. تنش‌ها: شامل تنش شعاعی و تنش محیطی می‌باشند.

### ۷- اهداف پژوهش

هدف از انجام این پژوهش، ارائه‌ی روش تحلیلی غیرخطی برای بررسی رفتار ترموالاستیک دیسک‌های چرخان ناهمگن متقارن محوری با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ، می‌باشد. اهداف به شرح زیر می‌باشند.

۱. محاسبه‌ی جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها با حل معادله دیفرانسیل حاکم بر مسأله با استفاده از تئوری الاستیسیته‌ی صفحه‌ای غیرخطی؛
  ۲. استفاده از پروفیل توانی به منظور مدل‌سازی هندسی دیسک و تأثیر پروفیل بر پاسخ‌های مسأله؛
  ۳. بررسی تأثیر دما بر جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها؛
  ۴. بررسی تغییرات جنس دیسک بر پاسخ‌های مسأله؛
  ۵. اعتبارسنجی و مقایسه‌ی پاسخ‌ها با حل اجزای محدود؛
- تحلیل الاستیک جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها با حل معادله دیفرانسیل حاکم بر مسأله با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی غیرخطی (در صورت امکان).

### ۸- کاربردها

نتایج این پژوهش در صنایع مختلف: صنایع هوافضا، صنایع نظامی، نیروگاه‌ها، خودروسازی، صنایع نفت و گاز، صنایع پتروشیمی، پره‌های توربین، هلیکوپترسازی و صنایع هسته‌ای کاربرد دارد.

### ۹- روند انجام پژوهش

۱. استخراج معادلات الاستیک دیسک با استفاده از تئوری الاستیسیته‌ی صفحه‌ای غیرخطی؛
۲. حل معادلات الاستیک دیسک با استفاده از تئوری الاستیسیته‌ی صفحه‌ای غیرخطی و مقایسه‌ی پاسخ‌ها؛
۳. استخراج و حل معادلات ترموالاستیک با استفاده از تئوری ذکر شده و مقایسه‌ی پاسخ‌ها؛
۴. حل عددی دیسک با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود؛
۵. مقایسه‌ی نتایج تحلیلی به دست آمده با حل عددی؛
۶. استخراج معادلات الاستیک دیسک با استفاده از اصل کار مجازی و تئوری تغییر شکل برشی غیرخطی (در صورت امکان)؛

۷. مقایسه نتایج حاصل از حل با استفاده از تئوری الاستیسیته‌ی صفحه‌ای و تئوری تغییرشکل برشی در دو حالت خطی و غیرخطی و همچنین مقایسه‌ی نتایج تحلیل‌های تئوری با حل عددی (در صورت امکان).

۱۰- زمان‌بندی پژوهش		
مدت زمان	زمان‌بندی مراحل انجام پژوهش (از زمان تصویب تا دفاع نهایی)	
۳ ماه	جمع‌آوری مطالب و مطالعه‌ی مراجع	مرحله ۱
۲ ماه	استخراج روابط به‌کمک تئوری الاستیسیته‌ی صفحه‌ای غیرخطی، بدون اعمال بار حرارتی	مرحله ۲
۲ ماه	حل تحلیلی (یا نیمه تحلیلی) مسأله	مرحله ۳
۴ ماه	اعمال بار حرارتی، استخراج روابط و حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسأله	مرحله ۴
۳ ماه	حل عددی مسأله و مقایسه‌ی نتایج	مرحله ۵
۳ ماه	استخراج و حل روابط الاستیک، به‌کمک و تئوری تغییرشکل برشی غیرخطی (در صورت امکان)	مرحله ۶
۳ ماه	جمع‌بندی و نگارش رساله	مرحله ۷
۲۰ ماه	زمان انجام به ماه:	

زمان (ماه)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
مرحله ۱																				
مرحله ۲																				
مرحله ۳																				
مرحله ۴																				
مرحله ۵																				
مرحله ۶																				
مرحله ۷																				

۱۱- وسایل پژوهش
-----------------

وسایل مورد نیاز برای این پژوهش به شرح زیر می‌باشد.

۱. کتاب‌ها، مقاله‌ها و پایان‌نامه‌های مرتبط با استفاده از پایگاه‌های موجود
۲. نرم‌افزار ریاضی Maple
۳. نرم‌افزار اجزای محدود Ansys
۴. پردازشگر هشت هسته‌ای با رم هشت گیگابایتی

۱۲- هزینه‌ها		
مبلغ به ریال	هزینه‌های مواد و وسایل	
	هزینه خرید مواد و وسایل	۱
	هزینه تهیه مقاله‌ها و کتاب‌ها	۲
	هزینه استفاده از کامپیوتر پرسرعت	۳
	هزینه ساخت دستگاه	۴
	هزینه استفاده از آزمایشگاه	۵
	جمع کل به ریال:	



- [1] Eraslan A.N. and Argeso H. (2002): Limit angular velocities of variable thickness rotating disks, *International Journal of Solids and Structures*, 39(12), pp. 3109–3130.
- [2] Ugural A.C. and Fenster S.K.: *Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity*, 5<sup>th</sup> Edition, Pearson Education, London, 2011.
- [3] Timoshenko S.P.: *Strength of Materials; Part II (Advanced Theory and Problems)*, 3<sup>rd</sup> Edition, Van Nostrand Reinhold, New York, 1954.
- [4] Naghdi P. and Cooper R. (1956): Propagation of elastic waves in cylindrical shells, including the effects of transverse shear and rotatory inertia, *Journal of the Acoustical Society of America*, 28(1), pp. 56-63.
- [5] Mirsky I. and Herrmann G. (1958): Axially symmetric motions of thick cylindrical shells, *Journal of Applied Mechanics*, 25(1), pp. 97-102.
- [6] Greenspon J.E. (1960): Vibrations of a thick- walled cylindrical shell-comparison of the exact theory with approximate theories, *Journal of the Acoustical Society of America*, 32(8), pp. 571-578.
- [7] Donnell L.H.: Stability of thin-walled tubes under torsion, NACA Report, No. NACA TR-479, 1933.
- [8] Boresi P., Chong K. and Lee J.D.: *Elasticity in Engineering Mechanics*, 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley, 2010.
- [9] Lekhnitskii S.G.: *Theory of Elasticity of An Anisotropic Body*, Mir Publication, Moscow, 1981.
- [10] Vinson J.R. and Chou T.: *Composite Materials and Their Use in Structures*, John Wiley, New York, 1975.
- [11] Tutuncu N. (1995): Effect of anisotropy on stresses in rotating discs, *International Journal of Mechanical Sciences*, 37(8), pp. 873-881.
- [12] Suresh S. and Mortensen A.: *Fundamentals of Functionally Graded Materials*, Cambridge Publication, London, 1998.
- [13] Obata Y. and Noda N. (1994): Steady thermal stresses in a hollow circular cylinder and a hollow sphere of a functionally gradient material, *Journal of Thermal Stresses*, 17(3), pp. 471-487.
- [14] Horgan C.O. and Chan A.M. (1999): The pressurized hollow cylinder or disk problem for functionally graded isotropic linearly elastic materials, *Journal of Elasticity*, 55(1), pp. 43-59.
- [15] Yang Y.Y. (2000): Time-dependent stress analysis in functionally graded materials, *International Journal of Solids and Structures*, 37(51), pp. 7593-7608.
- [16] Tarn J.Q. (2001): Exact solutions for functionally graded anisotropic cylinders subjected to thermal and mechanical loads, *International Journal of Solids and Structures*, 38(46-47), pp. 9189-9206.
- [17] Eraslan A.N. and Orsan Y. (2002): Elastic-plastic deformation of a rotating solid of exponentially varying thickness, *Mechanics of Materials*, 34(7), pp. 423-432.
- [18] Jabbari M., Sohrabpour S. and Eslami M.R. (2002): Mechanical and thermal stresses in a functionally graded hollow cylinder due to radially symmetric loads, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 79(7), pp. 493-497.
- [19] Jabbari M., Sohrabpour S. and Eslami M.R. (2003): General Solution for Mechanical and Thermal Stresses in a Functionally Graded Hollow Cylinder due to Non-axisymmetric Steady-State Loads, *Journal of Applied Mechanics*, 70(1), pp. 111-118.
- [20] Hosseini Kordkheili S.A. and Naghdabadi R. (2007): Thermoelastic analysis of a functionally graded rotating disk, *Composite Structures*, 79(4), pp. 508-516.
- [21] Hojjati M.H. and Hassani A. (2008): Theoretical and numerical analyses of rotating discs of non-uniform thickness and density, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(10), pp. 694– 700.
- [22] Tutuncu N. and Temel B. (2009): A Novel Approach to Stress Analysis of Pressurized FGM Cylinders, Disks and Spheres, *Composite Structures*, 91(3), pp. 385-390.
- [23] Bayat M., Sahari B.B., Saleem M., Ali A. and Wong S.V. (2009): Thermoelastic solution of a functionally graded variable thickness rotating disk with bending based on the first-order shear deformation theory, *Thin-Walled Structures*, 47(5), pp. 568-582.



- [24] Batra R.C. and Nie G.J. (2010): Stress analysis and material tailoring in isotropic linear thermoelastic incompressible functionally graded rotating disks of variable thickness, *Composite Structures*, 92(3), pp. 720-729.
- [25] Wauer J. and Schweizer B. (2010): Dynamics of rotating thermoelastic disks with stationary heat source, *Applied Mathematics and Computation*, 215(12), pp. 4272-4279.
- [26] Sharma J., Sharma D. and Kumar Sh. (2012): Stress and strain analysis of rotating FGM thermoelastic circular disk by using FEM, *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 74(3), pp. 339-352.
- [27] Jabbari M., Ghannad M. and Nejad M.Z. (2016): Effect of thickness profile and FG function on rotating disks under thermal and mechanical loading, *Journal of Mechanics*, 32(1), pp. 35-46.
- [28] Nejad M.Z., Jabbari M. and Ghannad M. (2017): A general disk form formulation for thermoelastic analysis of functionally graded thick shells of revolution with arbitrary curvature and variable thickness, *Acta Mechanica*, 228(1), pp. 215-231.
- [29] Parhizkar Yaghoobi M. and Ghannad M. (2021): Electro-elastic analysis of finite length FGPM cylinders subjected to electromechanical loading using first-order electric potential theory, *Mechanics of Advanced Composite Structures*, 8(1), pp. 15-31.
- [30] Ghadimi M. and Ghannad M. (2024): Elastoplastic analysis of pressurized FG rotating thick cylinders based on high-order shear deformation theory and radial return method, *Mechanics of Advanced Composite Structures*, 11(1), pp. 119-130.
- [31] Abdalla H.M.A., Casagrande D. and Moro L. (2020): Thermo-mechanical analysis and optimization of functionally graded rotating disks, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 55(5-6), pp.159–171.
- [32] Vishvajeet F.A., Muneesh S. and Tripathi R.K. (2021): Thermo-mechanical analysis of disk brake using finite element analysis, *Materials Today: Proceedings*, 47(14), pp. 4316-4321.
- [33] Chaudhry H.R. and Gupta U.S. (1992): Rotation of hyperelastic annular and solid disks of variable thickness, *International Journal of Non-linear Mechanics*, 3(27), pp. 341-346.
- [34] Eraslan A.N. (2003): Elastic-plastic deformations of rotating variable thickness annular disks with free, pressurized and radially constrained boundary conditions, *International Journal of Mechanical Sciences*, 45(4), pp. 643-667.
- [35] Shariyat M. and Mohammadjani R. (2013): Three-dimensional compatible finite element stress analysis of spinning two-directional FGM annular plates and disks with load and elastic foundation non-uniformities, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 10(5), pp. 859– 890.