اطلاعات مربوط به رساله:

الف- عنوان تحقیق

۱- عنوان به زبان فارسی:

تحلیل مکانیک شکست الاستیک- پلاستیک خط لوله با استفاده از کوپل روش بدون المان درونیابی نقطه شعاعی و روش هم هندسی

۲- عنوان به زبان انگلیسی/(آلمانی، فرانسه، عربی):

تذکر: صرفاً دانشجویان رشته‌های زبان آلمانی،فرانسه و عربی مجازند عنوان رساله خود را به زبان مربوطه در این بخش درج نمایند و برای بقیه دانشجویان، عنوان بایستی به زبان انگلیسی ذکر شود.

Fracture mechanic analysis of pipeline elastic-plastic using couple approach of radial point interpolation meshless method and Isogeometric

ب – تعداد واحد رساله:

ج- بیان مسأله اساسی تحقیق به طور کلی (شامل تشریح مسأله و معرفی آن، بیان جنبه‌های مجهول و مبهم، بیان متغیرهای مربوطه و منظور از تحقیق) :

خطوط لوله نفت و گاز یکی از عوامل مهم در حمل و نقل سوخت‌های فسیلی می‌باشند. برای طراحی و ساخت خطوط لوله نفت و گاز، مهندسی مکانیک به عنوان یکی از حوزه‌های مهم مهندسی در این زمینه بکار می‌رود.تحلیل شکست لوله‌های نفت و گاز می‌تواند به دو شیوه تجربی و تحلیلی انجام شود. در روش تجربی، لوله نمونه زیر دستگاه آزمایشی قرار داده شده و به شکلی خاص به آن نیروهایی وارد می‌شود تا لوله شکسته شود. سپس با توجه به نتایج به دست آمده، تحلیلی انجام می‌شود.اما در روش تحلیلی، با استفاده از مدل‌سازی کامپیوتری و با توجه به مشخصات لوله، بارگذاری‌های مختلفی بر روی آن اعمال می‌شود تا مرز شکست به دست آید. در هر دو روش تحلیلی و تجربی، پارامترهایی مانند قطر و ضخامت لوله، شرایط حاکم بر محیط اطراف و همچنین فشار و دما وارد محاسبات و تحلیل شکست لوله نفت و گاز می‌شونددر دهه‌های گذشته، بیشتر سعی بر آن بود که تحلیل‌های پیش از ساخت توسط روش‌های تحلیلی انجام پذیرد. پیچیده‌تر شدن مسایل باعث گردید که در بسیاری از موارد روش‌های تحلیلی به علت ساده سازی‌های فراوان و بیش از حد، نسبتاکارایی خود را از دست بدهند. پس از آن، ابداع روش‌های حل عددی و پیشرفت تکنولوژی‌های مربوط به کامپیوترهای محاسباتی باعث گردید، روش‌هایی که اساس آن بر شبکه بندی هندسه ساختار مسایل بود از جمله المان محدود[1] تفاضل محدود[2] و روش‌های بدون المان[3] و... برای آنالیز قطعات به کار گرفته شوند. این امر باعث گردید تا بسیاری از نقص‌های موجود در روش‌های تحلیلی مرتفع گردند. بر اساس این روش‌ها صدها برنامه و نرم افزار جامع برای آنالیز موضوعات در زمینه‌های مختلف تدوین

[1] Finite Element Method
[2] Finite Difference Method
[3] Meshless Method

گردید. ولی این روش‌ها نیز به نوبه خود دارای مشکلات زیادی بودند، زیرا هر کدام از این روش‌ها نیازمند در نظر گرفتن تمهیدات و تدابیر خاصی در مدل سازی و پیش بینی تغییرات در ساختار شبکه خود بودند که در موارد متعددی انجام آن‌ها به سادگی امکان پذیر نبود. برای رفع این مشکلات، گروه جدیدی از روش‌های حل معادلات دیفرانسیلی ارائه گردید که در اینگونه روش‌ها نیازی به شبکه بندی متعارف مانند آنچه در روش‌های المان محدود نیاز بود، وجود ندارد. در این روش‌ها تقریب‌های عددی حل معادله دیفرانسیلی، نه بر مبنای المان‌ها و روابط پیوستگی بین آنها، بلکه بر مبنای مجموعه ای از نقاط انجام می پذیرد و هیچگونه المان بندی و یا مشخصات و ویژگی هایی برای پیوستگی نقاط مشترک برای ساخت معادلات گسسته سازی نیاز نیست. به این گونه روش‌ها اصطلاحاً روش‌های تحلیل بدون المان یا بدون شبکه گفته می‌شود. این مساله باعث می گردد که اینگونه تحلیل‌ها قابلیت سازگاری بیشتری با شکل‌های پیچیده و تغییر شکل‌های شدید و بیش از حد داشته باشند.

البته به علت اینکه پرداختن به این روش ها قدمت زیادی ندارد، می توان گفت اینگونه روش‌ها شکل استاندارد کاملی به خود نگرفته اند و چگونگی تحلیل و میزان همگرایی نتایج در این روش‌ها در برخی موارد به صورت بسیار شدید به انتخاب برخی پارامترهای دلخواه و اختیاری وابسته است که این مساله، همگرایی نتایج این روش را تحت الشعاع خود قرار می‌دهد. به همین دلیل استفاده از این روش‌ها برای افرادی که آشنایی کافی و مناسب با آنها را ندارند، بسیار دشوار می‌باشد. در ضمن این روش‌ها از لحاظ ساختاری شکل پیچیده‌تری نسبت به روش‌های مرسوم المان محدود و دیفرانسیل محدود دارند، که این موضوع خود باعث دشوارتر شدن استفاده از این روش‌ها می گردد. می‌توان با توسعه روش‌های بدون المان، گام موثری در بهینه سازی روش‌های حل عددی بنا نهاد. از لحاظ مفهومی تفاوت اساسی موجود میان روش‌های المان محدود و روش‌های بدون المان، ناشی از تفاوت میان مفاهیم تقریب و میانیابی می‌باشد[۱]. از جمله روش‌های حل روش بدون المان می‌توان به روش درون یابی نقطه شعاعی[1] اشاره کرد که امروزه یکی از پرکاربردترین روش‌های بدون المان برای تحلیل مسائل مکانیک محاسباتی می باشد. تقریب حداقل مربعات متحرک، برای ساخت توابع شکل و استفاده در فرم ضعیف گالرکین استفاده می شود. به دلیل عدم ارضای شرط تابع دلتای کرانکر در توابع شکل مورد استفاده در روش درون یابی نقطه شعاعی اعمال شرط مرزی اساسی با مشکلاتی همراه بوده و تکنیک های خاصی برای رفع این موضوع به کار می‌رود. در رابطه با روش هم هندسی[2] انگیزه انجام نخستین فعالیت‌ها در این زمینه شکاف موجود بین دنیای تحلیل اجزاء محدود و مدل‌سازی کامپیوتری بوده است. در مراحل ابتدایی، یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیق در تحلیل هم هندسی ، ایجاد ارتباط بین دو دسته طراحی و تحلیل، و همچنین مشخص‌سازی موانع و راه حل‌های ارائه شده موجود در هر دسته بوده است. مسلماً یکپارچه سازی تحلیل و هندسه یک مسئله دشوار است و به نظر می‌رسد که بایستی تغییرات اساسی برای یکپارچگی کامل طراحی مهندسی و فرایندهای آنالیز انجام شود. گرایشات اخیر در محاسبات مهندسی خواستار افزایش دقت و یکپارچگی کامل برای تمامی فرآیندهای مدل‌سازی – آنالیز می‌باشد. روش تحلیل هم‌هندسی در سال ۲۰۰۵ توسط هیوز و همکاران [۲] برای رفع نقص‌های بیان شده معرفی گردید. توابع هندسی محاسباتی زیادی وجود داشتند که می‌توانستند به عنوان توابع پایه اولیه درتحلیل

[1] Radial Point Interpolation Method or RPIM
[2] Isogeometric Analysis Method

هم‌هندسی به کار روند. انتخاب بی‌اسپیلاین[1] و نربز[2] به عنوان توابع پایه اولیه به دلیل پرکاربرد بودن این توابع هندسه محاسباتی، در طراحی مهندسی می‌باشد.

در ریاضیات، بی‌اسپیلاین یک تابع شامل ترکیبی خطی از یک سری توابع پایه می‌باشد که بر اساس الگوریتم کاکس-دی- بور[3]طی یک رابطه بازگشتی ساخته می‌شوند. توابع پایه بی‌اسپیلاین از بردارهای گرهی شامل مقادیر پارامتر، در فضای پارامتری تحت عنوان گره تشکیل می‌شود. نربزها به عنوان یک پایه برای آنالیز، نسبت به توابع پایه چند جمله ای قطعه قطعه مرسوم به راحتی تعمیم داده می‌شوند و اصلاح می‌گردند و برای مدل‌سازی دقیق مقاطع مخروطی شکل، استوانه‌ای، کره ای، و بیضی بسیار مناسب می‌باشند. این توانایی نربزها یعنی ترکیب توانایی‌های هندسی و توانایی‌های تحلیلی، به خوبی در تحلیل هم هندسی نمایان شده است. استفاده از توابع نربز به عنوان تابع پایه در تحلیل نیازمند ایجاد هندسه تحلیلی از مدل فیزیکی با استفاده از بردارهای گرهی و شبکه کنترلی می‌باشد و اجزاء مربوط به خود را در فضای تحلیلی دارد. منحنی، سطوح وحجم‌های بی‌اسپیلاین و نربز با استفاده از توابع پایه در فضای پارامتری و نقاط‌کنترلی در فضای فیزیکی، ساخته شده و هندسه جسم را تشکیل خواهند داد.

از این‌رو، در این تحقیق تحلیل الاستو پلاستیک با بکارگیری توابع شکل کوپل شده دو روش بدون المان و هم هندسی و ارائه روابط هندسی توسعه‌یافته در لوله تحت بارگذاری فشار داخلی تناوبی انجام خواهد شد.

د - اهمیت و ضرورت انجام تحقیق (شامل اختلاف نظرها و خلاءهای تحقیقاتی موجود، میزان نیاز به موضوع، فواید احتمالی نظری و عملی آن و همچنین مواد، روش و یا فرآیند تحقیقی احتمالاً جدیدی که در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد:

با توجه به درحال توسعه بودن روش‌های عددی بدون المان و هم هندسی و بالاتر بودن دقت محاسبات در مسائل دارای ناپیوستگی هندسی، همچنین امکان تسهیل آنالیز خطا ودقت در سازگاری شبکه در مسائل با مرزها و ناپیوستگی‌های متحرک در روش بدون المان، به ویژه نبود تحقیق درحالت سه بعدی با بارگذاری تناوبی به روش انتخابی، نتایج ناشی از انجام تحقیق می‌تواند در آینده کاربرد وسیع ومطلوبی در مکانیک شکست داشته باشد. مضاف بر اینکه رشد ترک در خطوط لوله‌که از جمله قطعات پرکاربرد در صنایع نفت و گاز هستند، به‌منظور جلوگیری و یا کاهش خسارات ناشی شکست ناگهانی و انجام عملیات‌های تعویض یا بازرسی‌های پیشگیرانه از آن، اهمیت زیادی دارد. به همین لحاظ مراقبت و امنیت خطوط انتقال نفت و گاز که تحت شرایط مختلف متحمل عیوب مختلفی می‌شوند یکی از عوامل مهم و قابل توجه است.

[1] B-Splines
[2] NURBS
[3] Cox–de Boor

ه- مرور ادبیات و سوابق مربوطه (بیان مختصر پیشینه تحقیقات انجام شده در داخل و خارج کشور پیرامون موضوع تحقیق و نتایج آنها و مرور ادبیات و چارچوب نظری تحقیق):

مکانیک شکست علم بررسی پاسخ سازه ترک خورده، تحت بارهای وارده و خرابی سازه در نتیجه رشد و توسعه ترک اولیه است. این علم تنها به بررسی اثرات وجود ترک در سازه پرداخته و درباره نحوه ایجاد ترک اولیه بحثی نمی‌کند. مکانیک شکست الاستیک خطی، حالت خاصی از مکانیک شکست است که بر پایه نادیده گرفتن پلاستیسیته نوک ترک انجام می‌شود. عموماً شکست سازه‌ها در دو حالت عمده بررسی می‌شود. شکست ترد که برای توصیف شکست های ناپایدار سریع به‌کار برده می‌شود و در آن انتشار سریع ترک‌ها بدون تغییر شکل پلاستیک و در تنشی کمتر از حد تسلیم ماده صورت می‌گیرد. دیگری شکست‌های پایدار از نوع خستگی و یا شکست های کند مثل تسلیم پلاستیک است که به این نوع شکست‌ها، شکست نرم اطلاق می‌گردد. به‌طورکلی، در خصوص بحث شکست ناشی از خستگی سازه های ترک دار تحقیقات وسیعی جهت نحوه تعیین ضرایب شدت تنش براساس هندسه ترک ، اثر و نوع بارگذاری بر سازه ترک دار، مدلسازی و انتخاب روش تحلیل سازه ترکدار (تجربی، عددی و یا تلفیقی) وجود دارد. نوع بارگذاری درقطعات با مقاطع دایروی بسته به نوع کاربردشان متفاوت است. بارگذاری می‌تواند تک محوره یا ترکیبی به شکل ساده یا نوسانی باشد بارگذاری ترکیبی می تواند ترکیبی از بارهای کشش، خمش و پیچش باشد. مک‌کلافین و فاطمی [۳]، تحلیلی تئوری بر مبنای نتایج آزمایشگاهی رشد ترک در میله هایی که تحت تنش پیچشی در سیکل های کاملاً پلاستیک قرار دارند ارائه نمود. او دریافت که در مقادیرکرنشی زیاد، ترک‌ها اغلب به انتشار و رشد به سمت مرکز سطح باقیمانده از سطح مقطع دارای‌ترک تمایل دارند. او انتشار ترک را(صرف نظر ازتعداد چرخه‌ها و مقدار افزایش کرنش در هر چرخه) وابسته به مقادیر افزایش تجمعی‌کرنش همچنین نرخ اولیه‌ی رشد ترک و مستقل از زاویه شکاف گزارش‌کرد. اردگان و راتوانی[۴]، خواص شکست خستگی را در پوسته های استوانه‌ای و کره ای که دارای ترک های مایل هستند مورد بررسی قرار دادند. آنها فرض کردند که این پوسته‌ها تحت فشار یا پیچش داخلی قرار دارند و میزان انحناء می‌تواند تاثیر قابل توجهی در ضریب شدت تنش در پوسته‌های ترک دار داشته باشد. هاشمی و مک‌کلینتاک[۵]، تاثیر بارگذاری متغیر در مود سوم رشد ترک خستگی را در قطعات استوانه ای دوار دارای شیارهای محیطی، تحت بارگذاری پیچشی چرخه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. لوان و رایر [۶]، ترک‌های سطحی در میله‌های دایروی را تحت بارگذاری‌های کششی، خمشی و پیچشی مد نظر قرار دادند و به روش‌عددی المان‌محدود، مقادیرضرایب شدت تنش را در هر نقطه‌ای از طول ترک و برای ابعاد و نسبت منظرهای مختلف حل نموده اند. کورونئو و رایر [۷]، تحقیقاتی با عنوان ساده‌سازی تئوری‌های تحلیل رشد ترک خستگی در میله های با سطح مقطع دایروی حاوی ترک‌های سطحی ارائه نمودند. طی‌آن رشد ترک خستگی در یک میله دایروی حاوی ترک سطحی تحت‌بارگذاری چرخه‌ای‌کششی یاخمشی مورد آزمایش قرارگرفت. آنها فرضیه‌های مختلفی مربوط به پیشانی ترک مورد توجه قرار دادند و اعتبار آنها را با استفاده از نتایج یک تحلیل‌عددی به روش المان محدود ارزیابی نمودند. ازدهه ۱۹۹۰ تا به‌حال، بررسی رشد ترک در بارگذاری های چند محوره، بیشتراز قبل مورد توجه قرار گرفته است. کیم و همکاران [۸]، روش‌هایی برای تخمین خواص خستگی فولادها تحت بارگذاری محوری و پیچشی ارائه

نمودند. آنها در تحقیق خود، از تست‌های خستگی پیچشی و محوری برای هشت نوع فولاد مختلف استفاده نمودند که از نتایج و نمودارهای مربوط به‌این تست‌ها می‌توان مقدار تنش‌ها و کرنش‌های معادل چرخه‌ای را با توجه به رابطه رابرگ-آزگود استخراج نمود و سپس به کمک آن، رابطه کرنش معادل با عمر خستگی را پیدا نمود. کارپینتری و همکاران[۹]، به شبیه‌سازی عددی رشد ترک در لوله‌های ضخیم و دارای ترک‌های سطحی و تحت بارگذاری خمشی دورانی پرداختند. نوع ترک‌ها به نحوی بود که تنها تا بخشی از ضخامت لوله نفوذ کرده‌اند. در تحقیق مزبور از یک تحلیل المان محدود سه بعدی برای به دست آوردن میدان تنش- کرنش در هر نقطه‌ی دلخواه از بخش ترک دار استفاده شده است. در طول رشد ترک فرض شده است که شکل جبهه ترک به صورت کمانی بیضوی است که این فرض با نتایج آزمایش‌های مختلف نیز منطبق است. دائو و سلمی [۱۰]، ضرایب شدت تنش و رشد ترک در لوله‌ی حفاری ترک دار، حین دوران و عملیات حفاری را به روش اجزاء محدود یافت نمودند.لوله های حفاری در نقطه‌ای از مسیر چاه که منحنی می‌شود، متحمل خمش و کشش می‌گردند.

۱) پیشینه تحقیق پیرامون روش عددی هم هندسی :

تحلیل هم هندسی برای اولین بار توسط هیوز و همکارانش انجام شد. ایده اصلی توابع پایه معمولا با عنوان نربز نامیده می‌شوند که به معرفی دقیق هندسه استوانه و صفحات می‌پردازد. این توابع بطور مستقیم با درونیابی متغیرهای مجهول مورد استفاده قرار می‌گیرد.در زمینه تحلیل تنش به روش هم هندسی پژوهش‌های زیادی در سال‌های اخیر در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است و جنبه‌های مختلف این موضوع از زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه به برخی از این پژوهش‌ها اشاره خواهد شد.

به منظور بهره برداری از امکان ساده‌سازی در جهت کاهش مرتبه توابع پایه بی اسپیلاین، ورهوسل[1][۱۱] ناپیوستگی‌های دلخواه را در تحلیل هم هندسی معرفی نمود. نیان و همکاران [۱۲]، روش هم هندسی توسعه‌یافته را جهت بررسی ترک در پوسته جدار نازک بر پایه تئوری کیرشهوف-لاو، به کار گرفتند. آنها میدان جابجایی در نوک ترک را با توابع غنی‌ساز و همچنین مسیر ترک را با تابع هویساید[2] غنی سازی نمودند. کارایی روابط به دست آمده دراین روش با ذکر چند نمونه ارائه شده است. گانگ و همکاران[۱۳]، روش هم‌هندسی و روش المان مرزی را کوپل کرده و روش جدید IGABEM را برای حل مسائل سه بعدی انرژی، ارائه کردند. نیان و همکاران[۱۴]، روش المان مرزی گالرکین متفارن[3](SGBEM) را بر اساس روش هم‌هندسی و توابع پایه نربز، برای مسائل دو بعدی الاستیسیته شامل مسائل شکست، ارائه نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از توابع پایه نربز به جای توابع لاگرانژ، دقت و همگرایی بهتری در جواب‌ها خواهد داشت ولی به‌طورکلی این روش به دلیل حل انتگرال های دوگانه، هزینه‌های محاسباتی زیادی دارد. شجاعی و دانشمند[۱۵]، برای تحلیل ترک در ورق مدرج تابعی، از روش هم‌هندسی توسعه‌یافته استفاده نمودند. آنها از روش انتگرال اندرکنش[4]برای محاسبه ضریب شدت تنش استفاده کردند. در نهایت، دقت روش هم‌هندسی توسعه‌یافته در مقایسه با روش‌های اجزاء محدود

[1] Verhoosel
[2] Heaviside Function
[3] Symmetric Galerkin Boundary Element Method
[4] Interaction Integral

و اجزاء محدود توسعه‌یافته با ذکر حل چند مساله، نشان داده شده است. بو[۱۶]، روش هم‌هندسی توسعه‌یافته را برای مسائل شکست دو بعدی در مواد پیزوالکتریک تحت بارهای دینامیکی و استاتیکی، به کار گرفت. او جهت ایجاد ناپیوستگی در طول ترک و تکینگی در نوک آن از توابع هویساید و غنی‌ساز استفاد نمود. در نهایت رشد ترک در اینگونه مسائل بررسی شده است. بارداج و همکاران[۱۷]، رشد ترک و عمر خستگی در ورق با مواد ناهمگن را به روش هم‌هندسی توسعه‌یافته، بررسی کردند. در روش ارائه شده، ایجاد ناپیوستگی در طول ترک با تابع هویساید و تکینگی در نوک با توابع غنی‌ساز مدل‌سازی شد. ضریب شدت تنش با استفاده ار روش انتگرال اندرکنش محاسبه شده و در نهایت برای محاسبه عمر خستگی، قانون پاریس[1] به‌کارگرفته شده است. چوی و همکاران[۱۸]، از روش هم‌هندسی جهت محاسبه ضریب شدت تنش در مسائل دارای ترک منحنی شکل، استفاده نمودند. در این تحقیق، ورق دارای ترک میانی بررسی شده و مقادیر ضریب شدت تنش به دست آمده از روش هم‌هندسی با نتایج اجزاء محدود مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش هم هندسی از دقت مطلوبی نسبت به روش اجزاء محدود، برخوردار است. بارداج و همکاران[۱۹]، روابطی کلی برای اعمال روش هم‌هندسی توسعه یافته و استفاده از توابع پایه نربز، برای مسائل دارای ترک صفحه‌ای، ارائه کردند. آنها موثر بودن این روش را با محاسبه ضریب شدت تنش در یک ورق با ترک لبه‌ای، نشان دادند. یون و چوی[۲۰]، روش هم هندسی و معادلات انتگرال مرزی را کوپل نموده و روابط جدیدی جهت آنالیز حساسیت مدل[2] در مسائل الاستیسیته صفحه‌ای، به نام معادلات انتگرال مرزی هم‌هندسی[3] ارائه نمودند. با ارائه چند مثال کاربردی، نتایج نشان دادند که استفاده از توابع پایه نربز در این روش، نتایج بهتر و دقیق‌تری نسبت به توابع پایه چندجمله‌ای لاگرانژ، خواهد داشت. امباتی و لارا[۲۱]، یک مدل فازی[4] برای شکست ترد پوسته‌ها با استفاده از روش هم هندسی مبتنی بر نربز، ارائه نمودند. آنها یک مدل فازی را برای شکست ترد با استفاده از المان solid-shell اجزاء محدود، بررسی کردند، با این تفاوت که در گسسته‌سازی روابط این نوع المان از توابع پایه نربز استفاده نمودند. قرشی و همکاران[۲۲] از روش هم هندسی توسعه یافته جهت تحلیل شکست در ورق ایزوتروپیک[5] دارای ترک منحنی شکل، استفاده نمودند. ضریب شدت تنش در یک ورق تحت کشش با ترک منحنی شکل در وسط، محاسبه شد. نیان و همکاران[۲۳]، با استفاده از روش هم هندسی و توابع پایه نربز، یک روش عددی جدید، جهت شبیه‌سازی لایه‌های یک کامپوزیت لمینت را پیشنهاد دادند. آنها با استفاده از خاصیت درج گره[6] در بردارهای گرهی، ناپیوستگی بین لایه‌های کامپوزیت را مدل‌سازی نمودند.

۲) پیشینه تحقیق پیرامون روش‌های عددی بدون المان درون‌یابی شعاعی (RPIM) در تحلیل مسائل:

در زمینه روش بدون المان پژوهش‌های زیادی در سال‌های اخیر صورت گرفته است و جنبه‌های مختلف این موضوع از زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه به برخی از این پژوهش‌ها اشاره خواهد شد. سیپسون[۲۴]، بر پایه مفاهیم روش بدون المان ذره‌ای PU، روش توسعه یافته المان محدود را برای محاسبه دقیق ضریب شدت تنش، ارائه نموده

[1] Paris low
[2] Design Sensitivity Analysis
[3] Isogeometric Boundary Integral Equation Method
[4] Phase-field Modeling
[5] Isotropic
[6] Knot Insertion

و نتایج حاصله از تحلیل المان محدود را بهبود بخشید. بلیستچکو و بلاک[۲۵]، با واردکردن و قیاس نمودن جواب‌های تحلیلی با نتایج تقریبی بدست آمده از روش المان محدود، بر مبنای مفاهیم روش PU، روش المان محدود توسعه یافته[1] را بنیان نهادند. با انتشار این مقاله، موجی جدید در مکانیک شکست محاسباتی به منظور استفاده از روش XFEM در مسائل مختلف مهندسی به راه افتاد که تاریخچه آن را می‌توان در تحقیق مروری بلیستچکو[۲۶]، یافت. بیشترین کاربرد روش XFEM در مدلسازی شکست بوده است و اخیرا بیشترین توجهات به تاثیرات اندازه در شکست قطعات و همچنین مدل‌سازی چند مقیاسه[2] بوده است. رانو و همکاران[۲۷]، نوعی روش المان محدود توسعه یافته را برای مدل‌سازی ترک سه‌بعدی ارائه دادند که در این روش از پالایش سازگار چندترازه[3] درالمان‌های پیرامون سطح‌ترک استفاده می‌شد. ولیکن هنوز هم حل مسائل مربوط به ترک در مسیرهای دلخواه و پیچیده با استفاده از روش اجزا محدود به سختی انجام می‌شود. چرا که در این روش مرز بین‌المان‌ها یک مسیر پیش فرض برای توسعه ترک به شمار می‌رود و برای اینکه مرز بین المان‌ها بر مسیر حقیقی ترک منطبق گردد، باید مساله مرحله به مرحله حل شود و در هر مرحله شبکه المان‌ها مجددا تولید شود. این امر باعث افزوده شدن حجم خطاها ناشی از انتقال حل میدانی از المان‌بندی قبلی به المان‌بندی جدید می‌گردد. در مقابل، حل مسئله در روش‌های بدون المان، مبتنی بر توزیع دلخواه شبکه‌ای از نقاط گره‌ای که در سطح دامنه پراکنده شده‌اند درحل مسئله انتشار ترک، شکست و تغییرشکل‌های بزرگ با مشکلات کمتری مواجه و از دقت مطلوب‌تری برخوردار هستند. روش بدون المان درون‌یابی شعاعی، یکی از روش‌های عددی نسبتا نوین، بدون المان و کارا، برای حل مسایل غیرخطی می‌باشد.

روش عددی بدون المان درونیابی نقطه‌ای شعاعی یا RPIM ازجمله روش‌های عددی مبتنی بر فرم ضعیف حل و بحث معادلات دیفرانسیل جزئی است که درشمول روش‌های باقیمانده وزنی می‌باشد. امروزه روش باقیمانده وزنی روشی کارآمد و رایج در روش‌های حل عددی مورد استفاده در حل معادلات دیفرانسیل معمولی و جزئی بکار می‌رود. جی‌آرلیو[۲۸]، ابتدا در فرم عمومی به درونیابی نقطه‌ای بر پایه توابع پایه‌ای شعاعی جهت جامدات دو بعدی پرداخت، سپس وانگ و لیو[۲۹-۳۱]، به بررسی نحوه استفاده از روش درونیابی نقطه‌ای جهت حل مسائل الاستیک-پلاستیک پرداختند.آنگاه ازطریق بکارگیری توابع‌شعاعی، درونیابی نقطه‌ای را توسعه داده و به بهینه‌سازی پارامترهای شکل در توابع پایه‌ای شعاعی جهت استفاده در معادلات دو بعدی پرداختند. روش‌عددی بدون المان یادشده مبتنی بر دو دسته توابع جهت تعریف توابع شکل‌است. دسته اول توابع پایه‌ای شعاعی و دسته دوم توابع پایه‌ای چند جمله‌ای می‌باشند. جی‌آرلیو و ژو[۳۲و۳۳]، روش بدون المان نقطه شعاعی را اولین بار درفرم محلی مطرح نمودند. آنها کارایی این روش را درحل مسائل‌دو بعدی تحلیل تنش به اثبات رسانده ، سپس آن را جهت تحلیل مسائل ارتعاش آزاد دو بعدی امکان سنجی و روش آزمایی نمودند. لذا این روش در دو بحث تحلیل تنش و ارتعاش آزاد در مکانیک جامدات دو بعدی توسعه پیدا کرد. سپس روش بدون المان درونیابی نقطه‌ای محلی مطرح شده را زائو و همکاران همچنین لیو و ژو[۳۴-۳۷]، در قالب کاربرد توابع پایه‌ای شعاعی در توابع وزن محلی یا LRPIM را مطرح نمودند. آنها ازطریق مقایسه کاربردی این روش درحل مسائل مختلف نشان دادند

[1] Extended Finite Element Method
[2] Multi Scale Modeling
[3] Multilevel Adaptive Refinement

که ایـن روش توسعه یافته درتحلیل تنش سازه‌ها و تحلیل ارتعاشی جامدات دو بعدی، مورد اقبال است.کریستینا و اوتووان[۳۸]، روش عددی بدون المان درونیابی نقطه شعاعی را برای حل معادله هلم‌هولتز دو بعدی بکاربردند و نشان دادندکه این روش نسبت به حل روش اجزاء محدود که در مسائل دارای طول موج بالا دچـار پراکندگی و اغتشاش است از دقت و نتایج مطلوب‌تری برخوردار است. وانگ‌وای[۳۹]، توپولوژی بکار گرفته شده در روش بـدون المـان درونیـابی نقطه شعاعی را در حالت کلی برای یک محیط پیوسته با بکارگیری توابع گوس و اضافه‌کردن جملاتی به فرم صریح روش بـدون المـان درونیـابی نقطه شعاعی بهبود بخشید. جـی آر لیو و همکاران[۴۰]، به ارائه‌ی یک روش الحاقی خطی جهت آنالیز تنش درحالت دو بعـدی پرداختنـد. در ایـن روش هـر گـره توسـط میـدانی متشکل از یک چندضلعی محصور شده جهت‌تقریب زنی‌میدان جابجایی درکنار توابع پایه‌ای شعاعی با جملات خطی‌که دارای خواص دلتای‌کرونکر بودند، به منظورتعریف توابع شکل‌درحل دستگاه معادلات در فرم ضعیف گالرکین استفاده شد. نتایج با حل تحلیلی و حل اجـزاء محـدود مقایسه شده و حکایت از دقت بالای روش دارد. موسائی و ثوریا[۴۱]، به مطالعه‌ی عـددی تـاثیر پـارامترهـای مـوثر در روش بـدون المـان درونیـابی نقطه شعاعی در الاستیسیته خطی از طریق مطالعه مسئله دو بعدی دریک ورق الاستیک مستطیل شکل همگن پرداختند. با افزایش و کاهش تعـداد گـره ها پارامترهای شکلی در دامنه و دقت همگرایی‌خیز ورق را محاسبه کردند. دانیاس و همکاران[۴۲]، روش بدون المان درونیابی نقطه‌ای شـعاعی را با استفاده از نربزها و ترکیب روش اجزاء محدود جهت تحلیل سه بعدی جامدات بهبود بخشیدند. غفاری و همکاران[۴۳]، به مطالعه نحوه آسیب انتشار موج خمشی در تیر اویلر برنولی با استفاده از روش بـدون المـان درونیـابی نقطه شعاعی با استفاده از توابع درونیاب شعاعی هرمیتی پرداختند. سپس‌نتایج را با حـل اجزاء محدود و حل تحلیلی مقایسه نمودند. ژو و همکاران[۴۴]، به‌غنی سازی روش بـدون المـان درونیـابی نقطه شعاعی از طریق اضافه‌کـردن توابـع سینوسـی و کسینوسی درتوابع پایه‌ای چند جمله‌ای به منظور تحلیل میدان نوک ترک جهت استفاده در مدلسازی مکانیک شکست پرداختند. جی‌بلین‌ها و همکاران[۴۵]، با بهره‌گیری از توابع نربزی با ویژگی‌های منحصر به فردشان و تلفیق روش بدون المان نقطه‌ای بر مبنای توابـع درونیـاب نقطه شـعاعی جهت ساخت توابع شکل به منظور محاسبه انتگرال‌های دامنه تاثیرگسسته سازی شده به منظور تعیین الگوریتم شبیه‌سازی مسیر رشـد ترک برمبنای تحلیل تنش‌پایه در مکانیک شکست محاسباتی پرداختند.

۳) پیشینه تحقیقات کوپل روش‌های عددی:

لیو و همکاران [۴۶] کوپل روش بدون المان پتروف گالرکین محلی(MLPG) را با روش اجزا محدود و المان مرزی ارائه کردند. برای ایجاد تابع شکل از تقریب حداقل مربعات متحرک استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که این روش هزینه محاسباتی کمتری دارد. گو و همکاران [۴۷] با استفاده از کوپل روش بدون المان EFG و اجزا محدود به این نتیجه رسیدند که توابع شکل دامنه EFG در امتداد مرز دارای ویژگی تابع دلتا هستند و مشخص شد که همگرایی دقت روش کوپل EFG و المان مرزی در مقایسه با اجزا محدود و المان مرزی مناسب تر است. چن و راجو [۴۸] دو روش بدون المان MLPG و اجزا محدود را کوپل کردند. برای مدلسازی نمونه ها از دو نوع رابط استفاده گردید، ابتدا سطح اینترفس سطح منطقه را قطع می‌کند و از مرز منطقه عبور می‌کند. سپس رابط یک حلقه بسته را تشکیل می‌دهد و از مرز منطقه عبور نمی‌کند. ژیائو

و همکاران [۴۹] مرور تکنیک های مختلف کوپل روش بدون المان EFG و اجزا محدود را مورد بحث قرار دادند. و مثال های استاتیک و دینامیک با استفاده از کوپل و حالت های مختلف برای کاربردهای خاص حل نمودند. ژانگ و گو [۵۰] روش بدون المان و اجزا محدود برای یک ورق ترکدار با استفاده از روش ضریب لاگرانژ برای اطمینان از سازگاری و شیب آنها استفاده نمودند. وانگ و همکاران [۵۱] از کوپل بدون المان EFG و اجزا محدود از روش کوپل سازگاری استفاده کردند. آنها نشان دادند مدل‌های کوپل بدون المان و اجزا محدود از نظر عددی در برخورد با تغییرشکل‌های بزرگ نسبت به مدل‌های اجزا محدود عملکرد بهتری دارند. ساین و همکاران [۵۲]، روش بدون المان‌گالرکین را برای حل مسائل ترک لبه‌ای چندگانه اصلاح و غنی‌سازی نموده و این روش را برای مدل‌کردن مسائل‌ترک استاتیکی و رشدآن معرفی نمودند. این روش فرمولاسیون روش‌گالرکین را در ارتباط با اجرای دقیق شرایط مرزی و ضروری همراه با یک تابع وزن جدید، درگیر می‌کند. درتحقیق یاد شده، انتشار ترک به خوبی توصیف و تحلیل به طور چشمگیری نسبت به روش المان محدود ساده شد. سپس برای شبیه سازی انتشارترک، به ارائه یک روش‌کوپل در روش بدون المان گالرکین با روش‌المان‌محدود برای تجزیه و تحلیل ساختارترک الاستیک خطی، جهت مود اول یا مود ترکیبی پرداختند. ولی زاده و همکاران [۵۳] کوپل دو روش هم هندسی و بدون شبکه را مورد مطالعه قراردادند. ایشان از تابع پایه نربز برای روش هم هندسی و از RKPM برای روش بدون شبکه استفاده نمودند. نتایج خواص همگرایی بهینه فرمول IGA-RKPM کوپل شده و اثربخشی آن را در ساخت گسسته‌های حجمی برای اجسام با هندسه پیچیده نشان می‌داد. ژو و همکاران [۵۴] تحلیل غیرخطی هندسی سازه‌های پوسته‌ای جدار نازک را با رویکرد کوپل دو روش بدون شبکه با تابع شکل MLS و روش هم هندسی با تابع پایه نربز بررسی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که رویکرد کوپل می‌تواند به نرخ همگرایی بالاتری نسبت به روش‌های IGA و بدون شبکه به دلیل تحقق پالایش محلی دست یابد. معماری و آذر [۵۵] روش کوپل MLPG-FE را برای شبیه سازی انتشار ترک شبه استاتیک برای مسائل دو بعدی مورد مطالعه قرار دادند و رویکرد ساده ای برای تعیین نوک ترک و اضافه کردن نقاط محاسباتی ارائه نمودند. مسایل مختلفی نیز برای نشان دادن کارایی روش ارائه شده در این پژوهش ارائه شد. لی و همکاران [۵۶] به تحلیل تطبیقی انتشار ترک در سازه‌های جدار نازک از طریق رویکرد کوپل روش بدون شبکه با تابع پایه MLS و روش هم هندسی با تابع پایه نربز پرداختند. نتایج نشان داد که استراتژی پالایش تطبیقی باعث می‌شود رویکرد کوپل ارائه شده نسبت به روش‌های IGA و روش بدون شبکه به نرخ همگرایی و کارایی محاسباتی بالاتری دست یابد.کران و همکاران [۵۷] تحلیل کمانش صفحات و پوسته های سه بعدی ارتوتروپیک ترک خورده با استفاده از کوپل روش های هم هندسی با تابع پایه نربز و روش بدون شبکه RKPM را انجام دادند. رویکرد کوپل حاصل نه تنها دقت هندسه را حفظ می‌کند و یک تقریب مرتبه بالاتر را بر اساس توابع پایه IGA ارائه می دهد بلکه اجازه انعطاف‌پذیری اصلاح محلی را نیز می دهد. مخترم و همکاران [۵۸] از کوپل روش های هم هندسی با تابع پایه نربز و روش بدون شبکه RPIM برای تیرهای دارای بازشو در جان تیر استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که روش کارآمد عمل می‌کند و عملکرد مطلوبی را در برابر اجزا محدود ارائه می‌کند و حل سریع‌تر همگرا می‌شود. بنابراین پتانسیل N-RPIM برای توسعه در آینده برجسته می‌شود. اولاه و همکاران [۵۹] یک روش کوپل

شده بر اساس توابع پایه گالرکین از روش بدون شبکه و تابع پایه شعاعی (RBF) برای بهینه‌سازی توپولوژی مبتنی بر مجموعه سطح ارائه نمودند.

جایگاه تحقیق حاضر در میان تحقیقات قبلی:

با بررسی پژوهش‌های پیشین می‌توان بیان نمود که تحلیل کوپل بدون المان وهم هندسی یک روش عددی جدید در تحلیل مسائل مهندسی است. این روش بالقوه دارای ویژگی‌های منحصر بفرد و مناسبی است و با بررسی موضوعات در این زمینه می‌توان دریافت که هیچ گونه تحقیقی در مدل‌های سه بعدی در مسائل ترک انجام نگرفته است. همچنین تحلیل مکانیک شکست الاستو پلاستیک در حالت سه بعدی با استفاده از کوپل روش بدون المان با تابع پایه درونیابی نقطه شعاعی و روش هم هندسی تاکنون انجام نگرفته است.

فهرست مراجع:

[1] T. Belytschko, Y. Y. Lu, and L. Gu, "Element-free Galerkin methods," International journal for numerical methods in engineering, vol. 37, no. 2, pp. 229-256, 1994.

[2] T. J. Hughes, J. A. Cottrell, and Y. Bazilevs, "Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement," Computer methods in applied mechanics and engineering, vol. 194, no. 39-41, pp. 4135-4195, 2005.

[3] D. McClaflin and A. Fatemi, "Torsional deformation and fatigue of hardened steel including mean stress and stress gradient effects," International Journal of Fatigue, vol. 26, no. 7, pp. 773-784, 2004.

[4] F. Erdogan and M. Ratwani, "Fracture of cylindrical and spherical shells containing a crack," Nuclear Engineering and Design, vol. 20, no. 1, pp. 265-286, 1972.

[5] H. Nayeb-Hashemi, F. McClintock, and R. Ritchie, "Influence of overloads and block loading sequences on mode III fatigue crack propagation in A469 rotor steel," Engineering Fracture Mechanics, vol. 18, no. 4, pp. 763-783, 1983.

[6] A. Levan and J. Royer, "Part-circular surface cracks in round bars under tension, bending and twisting," International Journal of Fracture, vol. 61, pp. 71-99, 1993.

[7] N. Couroneau and J. Royer, "Simplifying hypotheses for the fatigue growth analysis of surface cracks in round bars," Computers & Structures, vol. 77, no. 4, pp. 381-389, 2000.

[8] K. Kim, X. Chen, C. Han, and H. Lee, "Estimation methods for fatigue properties of steels under axial and torsional loading," International journal of fatigue, vol. 24, no. 7, pp. 783-793, 2002.

[9] A. Carpinteri, R. Brighenti, and A. Spagnoli, "Fatigue growth simulation of part-through flaws in thick-walled pipes under rotary bending," International Journal of Fatigue, vol. 22, no. 1, pp. 1-9, 2000.

[10] N. H. Dao and H. Sellami, "Stress intensity factors and fatigue growth of a surface crack in a drill pipe during rotary drilling operation," Engineering Fracture Mechanics, vol. 96, pp. 626-640, 2012.

[11] C. V. Verhoosel, M. A. Scott, R. De Borst, and T. J. Hughes, "An isogeometric approach to cohesive zone modeling," International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 87, no. 1-5, pp. 336-360, 2011.

[12] N. Nguyen-Thanh *et al.*, "An extended isogeometric thin shell analysis based on Kirchhoff–Love theory," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 284, pp. 265-291, 2015.

[13] Y. Gong, C. Dong, and X. Qin, "An isogeometric boundary element method for three dimensional potential problems," Journal of Computational and Applied Mathematics, vol. 313, pp. 454-468, 2017.
[14] B. Nguyen, H. Tran, C. Anitescu, X. Zhuang, and T. Rabczuk, "An isogeometric symmetric Galerkin boundary element method for two-dimensional crack problems," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 306, pp. 252-275, 2016.
[15] S. Shojaee and A. Daneshmand, "Crack analysis in media with orthotropic functionally graded materials using extended isogeometric analysis," Engineering Fracture Mechanics, vol. 147, pp. 203-227, 2015.
[16] T. Q. Bui, "Extended isogeometric dynamic and static fracture analysis for cracks in piezoelectric materials using NURBS," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 295, pp. 470-509, 2015.
[17] G. Bhardwaj, S. Singh, I. V. Singh, B. Mishra, and T. Rabczuk, "Fatigue crack growth analysis of an interfacial crack in heterogeneous materials using homogenized XIGA," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 85, pp. 294-319, 2016.
[18] M.-J. Choi and S. Cho, "Isogeometric analysis of stress intensity factors for curved crack problems," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 75, pp. 89-103, 2015.
[19] G. Bhardwaj, I. V. Singh, and B. Mishra, "Numerical simulation of plane crack problems using extended isogeometric analysis," Procedia Engineering, vol. 64, pp. 661-670, 2013.
[20] M. Yoon and S. Cho, "Isogeometric shape design sensitivity analysis of elasticity problems using boundary integral equations," Engineering Analysis with Boundary Elements, vol. 66, pp. 119-128, 2016.
[21] M. Ambati and L. De Lorenzis, "Phase-field modeling of brittle and ductile fracture in shells with isogeometric NURBS-based solid-shell elements," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 312, pp. 351-373, 2016.
[22] S. S. Ghorashi, N. Valizadeh, S. Mohammadi, and T. Rabczuk, "Extended isogeometric analysis of plates with curved cracks," in Proceedings of the eighth international conference on engineering computational technology, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, 2012.
[23] V. P. Nguyen, P. Kerfriden, and S. P. Bordas, "Two-and three-dimensional isogeometric cohesive elements for composite delamination analysis," Composites Part B: Engineering, vol. 60, pp. 193-212, 2014.
[24] R. Simpson, "Enrichment of the boundary element method through the partition of unity method for fracture analysis using local and global formulations," Durham University, 2010.
[25] T. Belytschko and T. Black, "Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing," International journal for numerical methods in engineering, vol. 45, no. 5, pp. 601-620, 1999.
[26] T. Belytschko, R. Gracie, and G. Ventura, "A review of extended/generalized finite element methods for material modeling," Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, vol. 17, no. 4, p. 043001, 2009.
[27] J. Rannou, A. Gravouil, and M. Baïetto-Dubourg, "A local multigrid X-FEM strategy for 3-D crack propagation," International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 77, no. 4, pp. 581-600, 2009.
[28] G.-R. Liu and Y. Gu, "A point interpolation method for two-dimensional solids," International journal for numerical methods in engineering, vol. 50, no. 4, pp. 937-951, 2001.
[29] J. Wang and G. Liu, "Radial point interpolation method for elastoplastic problems," in ICSSD 2000: 1 st Structural Conference on Structural Stability and Dynamics, 2000, pp. 703-708.
[30] J. Wang and G. Liu, "A point interpolation meshless method based on radial basis functions," International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 54, no. 11, pp. 1623-1648, 2002.

[31] J. Wang and G. Liu, "On the optimal shape parameters of radial basis functions used for 2-D meshless methods," Computer methods in applied mechanics and engineering, vol. 191, no. 23-24, pp. 2611-2630, 2002.
[32] G. Liu and Y. Gu, "A local point interpolation method for stress analysis of two-dimensional solids," Structural engineering and mechanics: An international journal, vol. 11, no. 2, pp. 221-236, 2001.
[33] G. Liu and Y. Gu, "A local radial point interpolation method (LRPIM) for free vibration analyses of 2-D solids," Journal of Sound and vibration, vol. 246, no. 1, pp. 29-46, 2001.
[34] G. Liu and Y. Gu, "Vibration analyses of 2-D solids by the Local Point Interpolation Method(LPIM)," in *ICSSD* 2000: 1 st Structural Conference on Structural Stability and Dynamics, 2000, pp. 411-416.
[35] G. Liu and Y. Gu, "Comparisons of two meshfree local point interpolation methods for structural analyses," Computational Mechanics, vol. 29, pp. 107-121, 2002.
[36] J. Xiao and M. McCarthy, "A local Heaviside weighted meshless method for two-dimensional solids using radial basis functions," Computational Mechanics, vol. 31, pp. 301-315, 2003.
[37] J. Xiao and M. McCarthy, "On the use of radial basis functions in a local weighted meshless method," in Computational Fluid and Solid Mechanics 2003: Elsevier, 2003, pp. 2182-2185.
[38] C. Wenterodt and O. von Estorff, "Dispersion analysis of the meshfree radial point interpolation method for the Helmholtz equation," International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 77, no. 12, pp. 1670-1689, 2009.
[39] Y. Wang, Z. Luo, and N. Zhang, "Topology optimization using a radial point-based interpolation method," in International Conference on Computational Methods, 2012: University of Queensland.
[40] G. Liu, Y. Li, K. Dai, M. Luan, and W. Xue, "A linearly conforming radial point interpolation method for solid mechanics problems," International Journal of Computational Methods, vol. 3, no. 04, pp. 401-428, 2006.
[41] A. Moussaoui and T. Bouziane, "Numerical study of the shape parameter dependence of the local radial point interpolation method in linear elasticity," MethodsX, vol. 3, pp. 178-187, 2016.
[42] L. Dinis, R. N. Jorge, and J. Belinha, "Analysis of 3D solids using the natural neighbour radial point interpolation method," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 196, no. 13-16, pp. 2009-2028, 2007.
[43] H. Ghaffarzadeh, M. Barghian, A. Mansouri, and M. Sadeghi, "Study on meshfree hermite radial point interpolation method for flexural wave propagation modeling and damage quantification," Latin American Journal of Solids and Structures, vol. 13, pp. 2606-2627, 2016.
[44] Y. Gu, W. Wang, L. Zhang, and X.-Q. Feng, "An enriched radial point interpolation method (e-RPIM) for analysis of crack tip fields," Engineering Fracture Mechanics, vol. 78, no. 1, pp. 175-190, 2011.
[45] J. Azevedo, J. Belinha, L. Dinis, and R. N. Jorge, "Crack path prediction using the natural neighbour radial point interpolation method," Engineering Analysis with Boundary Elements, vol. 59, pp. 144-158, 2015.
[46] G.-R. Liu and Y. Gu, "Meshless local Petrov–Galerkin (MLPG) method in combination with finite element and boundary element approaches," Computational Mechanics, vol. 26, no. 6, pp. 536-546, 2000.
[47] Y. Gu and G.-R. Liu, "A coupled element free Galerkin/boundary element method for stress analysis of two-dimensional solids," Computer methods in applied mechanics and engineering, vol. 190, no. 34, pp. 4405-4419, 2001.
[48] T. Chen and I. Raju, "A coupled finite element and meshless local Petrov–Galerkin method for two-dimensional potential problems," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 192, no. 41-42, pp. 4533-4550, 2003.

[49] T. Rabczuk, S. P. Xiao, and M. Sauer, "Coupling of mesh-free methods with finite elements: basic concepts and test results," Communications in numerical methods in engineering, vol. 22, no. 10, pp. 1031-1065, 2006.
[50] Y. Gu and L. Zhang, "Coupling of the meshfree and finite element methods for determination of the crack tip fields," Engineering Fracture Mechanics, vol. 75, no. 5, pp. 986-1004, 2008.
[51] H.-P. Wang, C.-T. Wu, Y. Guo, and M. E. Botkin, "A coupled meshfree/finite element method for automotive crashworthiness simulations," International Journal of Impact Engineering, vol. 36, no. 10-11, pp. 1210-1222, 2009.
[52] I. V. Singh, B. Mishra, and M. Pant, "A modified intrinsic enriched element free Galerkin method for multiple cracks simulation," Materials & Design, vol. 31, no. 1, pp. 628-632, 2010.
[53] N. Valizadeh, Y. Bazilevs, J.-S. Chen, and T. Rabczuk, "A coupled IGA–Meshfree discretization of arbitrary order of accuracy and without global geometry parameterization," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 293, pp. 20-37, 2015.
[54] W. Li, N. Nguyen-Thanh, and K. Zhou, "Geometrically nonlinear analysis of thin-shell structures based on an isogeometric-meshfree coupling approach," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 336, pp. 111-134, 2018.
[55] A. Memari and M. R. K. Azar, "A hybrid FE-MLPG method to simulate stationary dynamic and propagating quasi-static cracks," International Journal of Solids and Structures, vol. 190, pp. 93-118, 2020.
[56] W. Li, N. Nguyen-Thanh, J. Huang, and K. Zhou, "Adaptive analysis of crack propagation in thin-shell structures via an isogeometric-meshfree moving least-squares approach," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 358, p. 112613, 2020.
[57] R. Kiran, N. Nguyen-Thanh, J. Huang, and K. Zhou, "Buckling analysis of cracked orthotropic 3D plates and shells via an isogeometric-reproducing kernel particle method," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 114, p. 102993, 2021.
[58] M. Mokhtaram, M. M. Noor, M. J. Abd Nazir, A. Z. Abidin, and A. M. Yassin, "Coupling of NURBS and Meshfree RPIM for plane stress of web with openings," Engineering Analysis with Boundary Elements, vol. 138, pp. 266-279, 2022.
[59] B. Ullah, W. Khan, and Z. Ullah, "A coupled meshless element-free Galerkin and radial basis functions method for level set-based topology optimization," Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 44, no. 3, p. 89, 2022.

و – جنبه جدید بودن و نوآوری در تحقیق:

درخصوص تحلیل مکانیک شکست با استفاده از روش‌های عددی تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است ولی مرور پیشینه پژوهش ها نشان داد که تاکنون پژوهشی در رابطه با کوپل روش هم‌هندسی و بدون المان درونیابی نقطه شعاعی (RPIM) در زمینه مکانیک شکست انجام نشده است. با توجه به اینکه ادغام توابع پایه هم هندسی با تابع پایه RKPM در پژوهش‌های پیشین نشان داده که روش حاصله از دقت بالاتر و زمان محاسباتی کمتری از هر دو روش قبل از کوپل دارد. لذا انتظار می‌رود ایده پیشنهادی یعنی اینکه ادغام توابع پایه نربز با روش RPIM نیز دقت بالاتر و زمان محاسباتی کمتری برای غنی سازی نوک ترک از هر دو روش قبل از کوپل ارائه دهد و از این جنبه علاوه بر جدید بودن و نوآوری می‌تواند به بهبود محدودیت‌های مذکور در روش بدون شبکه در پلاستیسیته نوک ترک گردد.

در بهره‌گیری از این روش، جنبه‌های نوآوری بشرح زیر می‌باشد:

- ✓ توسعه روش هم هندسی و بدون المان درون یابی نقطه شعاعی RPIM در تحلیل ترک.

- ✓ اعمال بارگذاری تناوبی بر هندسه ترک دار و بررسی میزان شدت تنش در نسبت منظرهای مختلف با استفاده از این کوپل
- ✓ ارائه و به کارگیری روابط غنی سازی در نوک ترک و طول ترک در محدوده پلاستیک به کمک کوپل ارائه شده.

ز- اهداف مشخص تحقیق (شامل اهداف آرمانی، کلی، اهداف ویژه و کاربردی):

- ➢ یافتن و ارائه روابط و معادلات حاکم برتحلیل برای حالت سه‌بعدی جهت جبهه ترک در روش کوپل هم هندسی و بدون المان.
- ➢ ارائه توابع شکل مناسب برای تقریب‌زنی میدان جابجایی اطراف ترک به روش کوپل هم هندسی و بدون المان درحالت سه بعدی.
- ➢ محاسبه ضرایب شدت تنش‌تحت بارگذاری تناوبی با استفاده از یکی از روش‌های آن سوی الاستیک خطی

ح – در صورت داشتن هدف کاربردی، نام بهره‌وران (سازمان‌ها، صنایع و یا گروه ذینفعان) ذکر شود (به عبارت دیگر محل اجرای مطالعه موردی):

نتایج تحقیق ضمن کمک به تکمیل مطالعات در خصوص نشان دادن‌کارآیی‌کاربرد روش‌های عددی در مکانیک جامدات، می تواند در مبحث مکانیک شکست محاسباتی به‌ویژه ارائه توابع شکل مناسب برای تقریب زنی میدان‌جابجایی اطراف ترک به روش انتخابی در حالت سه‌بعدی مورد استفاده قرارگیرد. همچنین نتایج ناشی از انجام تحقیق می‌تواند درآینده کاربرد وسیع و مطلوبی در ارزیابی خطوط لوله نفت و گاز دارای عیب به همراه داشته باشد. این موضوع با توجه به اهمیت بهره‌برداری ایمن و مداوم از منابع نفت و گاز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

ط- سؤالات تحقیق:

- روابط تعادل و حاکم برتحلیل در روش کوپل بدون المان و هم هندسی در لوله دارای ترک چگونه هستند؟
- توابع شکل، پارامترها و ثوابت توابع شکل چگونه انتخاب، بهینه یابی و تعریف می‌شوند؟
- نحوه مدل‌سازی محور ترک‌دار در حالت سه بعدی در روش بدون المان درونیابی نقطه ای شعاعی و هم هندسی چگونه خواهد بود؟
- توابع پایه جهت مدل‌سازی لوله ترک دار در حالت سه بعدی و استفاده در فضای تحلیل چیست؟
- غنی‌سازی روابط در این روش در حالت سه بعدی جهت رشد ترک به ویـژه در حالت بارگذاری تناوبی و در محدود پلاستیک چگونه است؟
- ضریب شدت تنش لوله دارای ترک اولیه تحت بارگذاری تناوبی در این روش چه میزان می باشد؟

ی- فرضیه‌های تحقیق:

۱) محور دارای ترک اولیه سطحی با هندسه نیم بیضوی است.
۲) بارگذاری تحت فشارداخلی تناوبی با دامنه ثابت در نظرگرفته می‌شود.
۳) از اثرات متقابل بارهای دینامیکی و تاثیر عوامل خارجی صرف نظر می‌گردد.
۴) به منظور تعریف توابع شکل درگسسته‌سازی و حل‌دستگاه معادلات از فرم ضعیف گالرکین استفاده می‌شود.
۵) برای تغییر شکل نوک ترک فرض می‌شود تئوری مکانیک شکست الاستیک-پلاستیک[1] حاکم است.
۶) جنس مواد ایزوتروپیک همگن فرض می‌گردد.
۷) رشد ترک در صفحه ترک صورت میگیرد، در نتیجه خط و جبهه ترک در صفحه خود باقی خواهد ماند.

ک- تعریف واژه‌ها و اصطلاحات فنی و تخصصی (به صورت مفهومی و عملیاتی):

- روش بدون المان درون یابی نقطه شعاعی
- روش هم هندسی
- روش کوپل هم هندسی و بدون المان
- توابع پایه چندجمله‌ای و نقطه شعاعی
- تابع پایه نربز
- غنی سازی نوک ترک
- بارگذاری تناوبی
- تابع وزن
- تابع شکل
- میدان جابجایی
- میدان تنش
- ضریب شدت تنش

۵-روش شناسی تحقیق:

الف- شرح کامل روش تحقیق بر حسب هدف، نوع داده ها و نحوه اجراء (شامل مواد، تجهیزات و استانداردهای مورد استفاده در قالب مراحل اجرایی تحقیق به تفکیک):

۱) فرمولاسیون و یافتن معالات دیفرانسیلی تعادل.
۲) مشخص کردن مدل ریاضی با ساده سازی ممکن و فرضیات قابل قبول.
۳) بیان نمودن مدل ریاضی در یک الگوریتم عددی مناسب برای اجرای کد نویسی.
۴) انتخاب روش کوپل بدون المان و هم‌هندسی مبتنی بر فرم ضعیف درمعالات دیفرانسیل با هدف ایجاد سیستم معادلات جبری برای گسسته سازی تمام دامنه مسئله.
۵) ایجاد هندسه لوله با استفاده از توابع پایه کوپل دو روش

[1] Elastic–Plastic Fracture Mechanics

۶) ایجاد هندسه ترک

۷) توزیع گره‌ها و مشخص نمودن دامنه اثر.

۸) غنی‌سازی میدان جابجایی گرهی نوک ترک با استفاده از توابع غنی‌ساز

۹) انتخاب تابع وزن در داخل محدوده گره‌ای و سطوح مرزی(توابع وزن مورد استفاده در فرمول بندی درجه پیوستگی تابع شکل و در نتیجه کیفیت درونیابی انجام شده تاثیر فراوانی دارد).

۱۰)مشخص کردن متغیرهای گره‌ای یا همان مولفه‌های جابجایی متناسب با سیستم مختصات انتخابی جهت تحلیل.

۱۱)اعمال شرایط مرزی اصلی(جابجایی) و شرایط مرزی طبیعی.

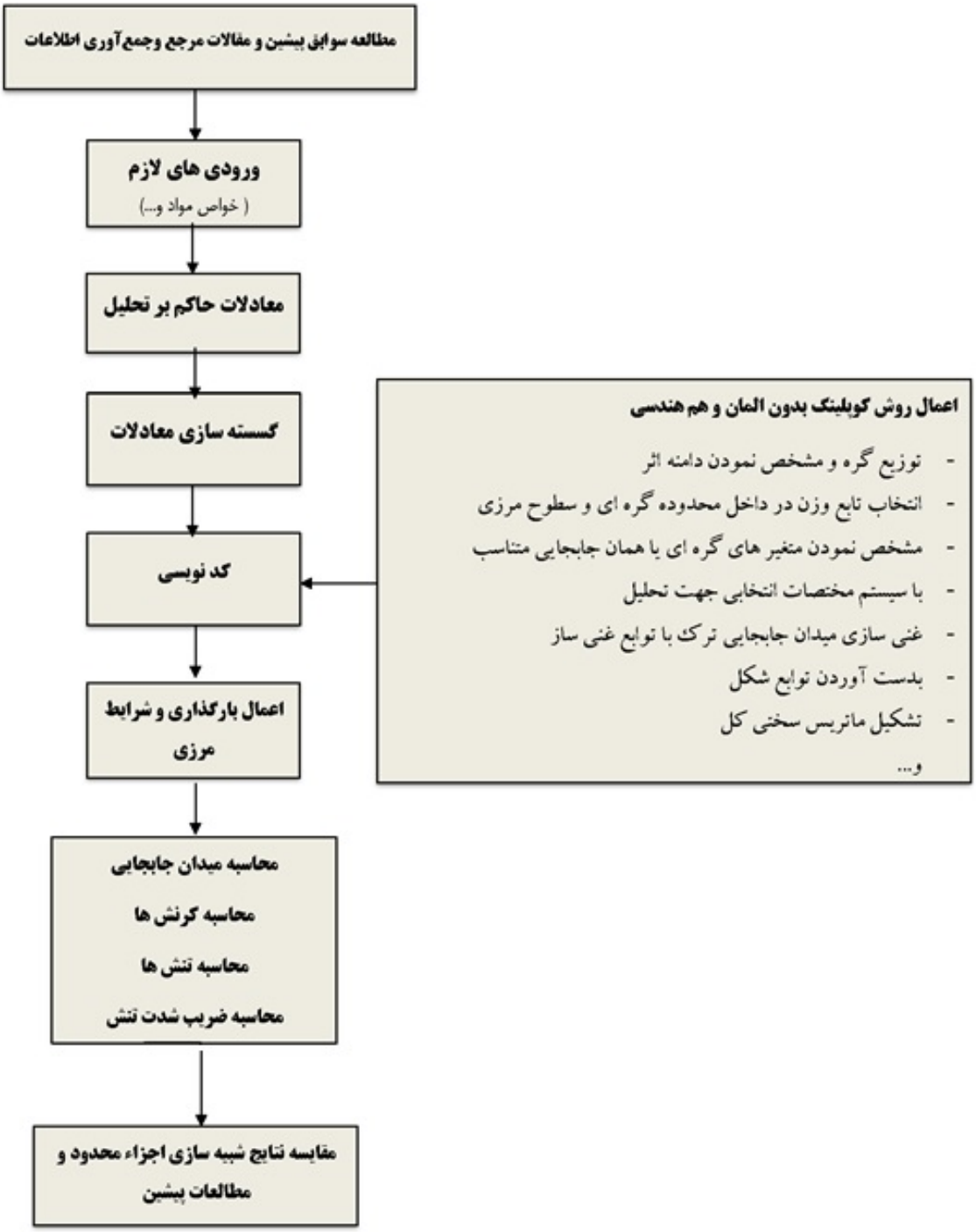
۱۲)به دست آوردن معادلات گسسته سازی شده.

۱۳)محاسبه مقادیرمیدان جابجایی.

۱۴)محاسبه میدان های تنش.

۱۵)محاسبه ضریب شدت تنش.

فهرست مراحل کار به ترتیب در شکل (۱) ذکر گردیده است



شکل۱: مراحل تحقیق

ب- متغیرهای مورد بررسی در قالب یک مدل مفهومی و شرح چگونگی بررسی و اندازه‌گیری متغیرها:

ـ نسبت منظر ترک

ـ چینش گره ای

ـ دامنه تاثیر و نحوه همگرایی

ـ تعداد لایه های پیرامون ترک

ـ توابع وزن

ـ توزیع گره ای و نقاط کنترلی در روش کوپل

ج – شرح کامل روش (میدانی، کتابخانه‌ای) و ابزار (مشاهده و آزمون، پرسشنامه، مصاحبه، فیش‌برداری و غیره) گردآوری داده‌ها :

- جمع آوری اطلاعات و دانش موجود در زمینه این فناوری از طریق منابع کتابخانه‌ای و همچنین مقالات معتبر و استفاده از نتایج تحقیقات محققین در این زمینه.
- جداول، نمودارها و روابط موجود در کتب مرجع و استانداردها.
- استفاده از تحلیل عددی به روش مورد نظر(کدنویسی) جهت محاسبه و استخراج نتایج لازم و داده پردازی‌های مورد نیاز.

د – جامعه آماری، روش نمونه‌گیری و حجم نمونه (در صورت وجود و امکان):

تحقیق تحلیل آماری ندارد.

هـ - روش‌ها و ابزار تجزیه و تحلیل داده‌ها:

- نرم افزارها و محیط‌های برنامه نویسی.
- ترسیم نمودارهای مورد نیاز.
- مقایسه نتایج با مقالات مرجع مرتبط با موضوع.

۶- استفاده از امکانات آزمایشگاهی واحد:

آیا برای انجام تحقیقات نیاز به استفاده از امکانات آزمایشگاهی واحد اهواز می‌باشد؟ بلی ■ خیر □

در صورت نیاز به امکانات آزمایشگاهی لازم است نوع آزمایشگاه، تجهیزات، مواد و وسایل مورد نیاز در این قسمت مشخص گردد.

نوع آزمایشگاه	تجهیزات مورد نیاز	مواد و وسایل	مقدار مورد نیاز
مرکز تحقیقات محاسبات پیشرفته	سرور با توان تحلیل بالا		

امضاء استاد راهنما: **امضاء مدیرگروه تخصصی:**

۷- زمان بندی انجام تحقیق:

الف- تاریخ شروع: **پس از تصویب پروپوزال** ب- مدت زمان انجام تحقیق: **ماه** ج- تاریخ اتمام:.....

تذکر: لازم است کلیه فعالیت‌ها و مراحل اجرایی تحقیق (شامل زمان ارائه گزارشات دوره‌ای) و مدت زمان مورد نیاز برای هر یک، به تفکیک پیش‌بینی و در جدول مربوطه درج گردیده و در هنگام انجام عملی تحقیق، حتی‌الامکان رعایت گردد.

۴- اطلاعات مربوط به رساله:

الف- عنوان تحقیق

۱- عنوان به زبان فارسی:

تحلیل شکست خطوط لوله دارای تنش پسماند با استفاده ازکوپل روش بدون المان و هم هندسی بر اساس عملگر بیزیر

۲- عنوان به زبان انگلیسی/(آلمانی، فرانسه، عربی):

تذکر: صرفاً دانشجویان رشته‌های زبان آلمانی،فرانسه و عربی مجازند عنوان رساله خود را به زبان مربوطه در این بخش درج نمایند و برای بقیه دانشجویان، عنوان بایستی به زبان انگلیسی ذکر شود.

Fracture analysis of pipelines with residual stress using couple of meshless and isogeometric methods based on the Bezier operator

ب – تعداد واحد رساله:

ج- بیان مسأله اساسی تحقیق به طور کلی (شامل تشریح مسأله و معرفی آن، بیان جنبه‌های مجهول و مبهم، بیان متغیرهای مربوطه و منظور از تحقیق) :

اکنون بسیاری از سازه‌های ساخته شده آن‌چنان حساس و دارای اهمیت هستند که باید ریسک از کار افتادن یا خرابی قطعات در آنها بسیار اندک باشد. یکی از مواردی که توجه به آن بسیار مهم و ضروری می باشد تحلیل های مربوط به شکست قطعات می باشد، که نکته اصلی در اینگونه مسایل نیز بررسی و آنالیز ترک‌های موجود در قطعات می‌باشد. به همین دلیل در تحلیل و شبیه‌سازی فرایندهای خرابی مواد، نیاز به مدلی است که بتواند گسترش ترک را در مسیرهای پیچیده و دلخواه میسر سازد. ممکن است باگذشت زمان، وجود ترک در بعضی از تجهیزات و سازه‌ها باعث کم شدن مقاومت سازه و در نهایت شکست آن شود. زمانی که جلوگیری از ایجاد ترک مشکل باشد، روش مکانیک شکست می‌تواند در کمک به انتخاب مواد و طراحی قطعات استفاده شود تا احتمال شکست کمینه شود. مطالعه وکاربرد مکانیک شکست ازنظر مهندسی بسیار مهم است، زیرا ترک‌ها و عیوب ترک مانند در قطعات صنعتی(از قبیل لوله انتقال نفت و گاز) زیاد رخ می‌دهند[۱]. دلیل عمده خطرناک بودن شکست خستگی این است که بدون آگاهی قبلی و قابل رویت بودن رخ می‌دهد. تحلیل تنش پسماند در لوله‌های انتقال نفت و گاز بسیار مهم است زیرا در صورت عدم توجه به آن، احتمال شکست لوله‌ها و نشت گاز یا نفت افزایش می‌یابد که می‌تواند عوارض جبران ناپذیری برای محیط زیست و انسان داشته باشد. در این زمینه، شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از روش‌های عددی می‌تواند به عنوان یک ابزار کاربردی برای تحلیل تنش پسماند در لوله‌های انتقال نفت و گاز مورد استفاده قرار گیرد. تنش پسماند که به علت گرم و سرد شدن قطعات در حین فرآیند جوشکاری و تغییر فرم‌های برگشت ناپذیر به وجود می‌آید نیز تاثیر بسزایی در شکست قطعه دارد. تنش‌های پسماندکششی بزرگ ممکن است در ناحیه نزدیک جوش باعث ایجاد شکست‌های ترد، کاهش عمرخستگی و توسعه ترک‌هایی شوند که در اثر تنش‌های ناشی از خوردگی به وجود می‌آیند. از این رو بررسی این پدیده‌ها و هر روشی‌که منجر به تخمین شکست قطعات در صنعت شود، حائز اهمیت خواهد بود. از آنجا که

ارائه حل دقیق برای مسائل دارای تنش پسماند و ترک، دشوار و گاه غیر ممکن است روش های عددی در این زمینه مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. روش المان محدود در دهه‌های اخیر توانایی خود را در عرصه‌های مختلف محاسباتی نشان داده و به همین دلیل به عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌های حل معادلات دیفرانسیل جزیی مورد استفاده محققین و متخصصین مختلف قرار گرفته است. در حال حاضر این روش، عمومی‌ترین روش در میان روش‌های عددی شناخته شده در تحلیل‌ها به شمار می‌رود که در آن دامنه مساله به نواحی کوچکتری به نام المان تقسیم شده، معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم بوسیله یک مجموعه از معادلات جبری برای هر المان تقریب زده می‌شود. رهیافت المان محدود به طور گسترده برای تحلیل میدان دمایی و تنش پسماند ناشی از جوشکاری و همچنین تعیین ضرایب شدت تنش ترک‌ها تحت بارگذاری‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. با وجود دقت بالا و عمومی بودن روش المان محدود، در مواردی مانند آنالیز الاستیک-پلاستیک حرارتی و مطالعه رشد خستگی ترک که نیاز به تعداد زیادی محاسبه ضریب شدت تنش تحت شرایط مختلف بارگذاری است، این تحلیل‌ها بسیار زمان‌بر می‌باشند. همچنین این روش در عین مفید بودن دارای مشکلات خاص خود می باشد که مربوط به ارتباط تنگاتنگ این روش با المان‌بندی مساله است. در مورد موضوع مطرح شده، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱) تنش محاسبه شده به علت وجود ناپیوستگی مشتق از یک المان به المان دیگر دارای دقت بالایی نمی باشد.

۲) در برخی مسائل که در آنها هندسه دامنه مساله در طی فرآیند حل تغییر کند به مانند مسائلی با مرز متحرک و یا تغییر شکل های بزرگ لزوم مش بندی جدید وجود دارد.

۳) متوقف شدن تحلیل در تغییر شکل‌های بزرگ و اعوجاج های غیرمجاز المان‌ها.

۳) نیاز به فضای حافظه‌ای اضافه جهت المان بندی‌های مجدد.

۴) محدودیت‌هایی در مسائل رشد ترک که مسیر پیشروی ترک بر روی مرز المان‌ها منطبق نباشد.

آنالیز سازه‌ای جوشکاری براساس روش الاستیک-پلاستیک المان محدود می‌تواند برای مدت زمان کم جوشکاری نقش درستی ایفا کند. اما اگر مدت زمان جوشکاری زیاد و منبع حرارتی در حال حرکت باشد، در آنالیز به دلیل نیاز به تولید شبکه مجدد مشکلاتی بوجود می‌آید. همچنین مسائل مربوط به ترک در مسیرهای دلخواه و پیچیده با استفاده از روش اجزاء محدود به سختی انجام می‌شود. چرا که در این روش مرز بین المان‌ها یک مسیر پیش‌فرض برای توسعه ترک به‌شمار می‌رود و برای اینکه مرز بین المان‌ها بر مسیر حقیقی ترک منطبق گردد، باید مساله مرحله به مرحله حل شود و در هر مرحله شبکه المان‌ها مجدداً تولید شود. این امر باعث افزوده شدن حجم خطای محاسباتی ناشی از انتقال حل میدانی از المان‌بندی قبلی به المان بندی جدید می‌گردد. در طی سال‌های اخیر برای حل این مشکلات، دسته جدیدی از روش‌های محاسباتی ارائه شده است که بر خلاف روش المان محدود، برای حل مسأله به شبکه بندی ناحیه مسأله احتیاج ندارند. این دسته از روش‌ها را روش‌های بدون المان یا روش‌های بدون مش می‌نامند. در اینگونه از روش‌ها، تنها از مجموعه‌ای از گره‌ها که در ناحیه مسأله بصورت دلخواه توزیع شده، برای ساخت توابع تقریب، گسسته سازی و حل معادلات دیفرانسیل جزئی استفاده می‌شود. اخیراً روش‌های بدون المان جهت تحلیل مسائل مکانیک شکست و به ویژه مسائل مربوط به رشد ترک مورد توجه قرارگرفته‌اند. نکته مهم در روش‌های تحلیل بدون المان امکان

تسهیل آنالیز خطا و دقت در سازگاری شبکه در مسائل با مرزها و ناپیوستگی‌های متحرک است. به نحوی‌که در مسائل مربوط به گسترش ترک می‌توان به تعداد دلخواه نقاط فراوان حول نوک ترک اضافه کرد تا ضرایب شدت تنش با دقت مطلوبی محاسبه گردند. بطورکلی در روش‌های عددی بدون المان، نیاز به هیچ المان از پیش تعریف شده‌ای برای تقریب‌زدن میدان‌های مجهول وجود ندارد. این‌روش‌های عددی را می‌توان جزو گروهی ازروش‌های حل‌عددی وگسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل جزئی به حساب آورد که در آن تنها نیاز به اطلاعات گره‌ای است. می‌توان روشهای بدون المانی‌که تا به‌حال ارائه شده‌اند را در یکی از سه گروه زیر دسته‌بندی نمود:

۱) روش‌هایی‌که برای انتگرال‌گیری نیاز به شبکه بندی عمومی از پیش تعیین شده در پس‌زمینه دارند.

۲) روش‌هایی‌که نیاز به شبکه بندی از پیش تعیین شده در پس زمینه ندارند اما برای انتگرال‌گیری نیاز به محدوده های محلی در زمان تحقیق دارند.

۳) روش‌هایی‌که نیاز به هیچ نوع شبکه بندی عمومی یا محلی برای انتگرال‌گیری ندارند.

روش‌های عددی بدون المان را بر مبنای فرم حل معادله دیفرانسیل نیز تقسیم‌بندی نموده‌اند:

- روش‌های حل بدون المان مبتنی بر حل قوی معادلات دیفرانسیل حاکم برتحلیل نظیر:

* روش بدون المان ترتیبی[۱]

* روش بدون المان ترکیبی- ترتیبی [۲]

- روش‌های حل بدون المان مبتنی بر حل ضعیف معادلات دیفرانسیل حاکم بر تحلیل نظیر :

* روش بدون المان پتروف – گالرکین محلی[۳]

* روش بدون المان درونیابی نقطه ای[۴]

* روش بدون المان درونیابی نقطه ای شعاعی[۵]

* روش بدون المان ذرات یکپارچه[۶]

* روش بدون المان گالرکین[۷]

* روش بازتولید نقطه با هسته[۸]

روش بدون المان انتخابی در این تحقیق، یکی از روش‌های EFG, MLPG, RKPM مبتنی بر حل ضعیف معادلات حاکم برتحلیل است. در مقایسه با فرم‌های ضعیف، فرم‌های قوی مزایایی از نظر کارایی محاسباتی و اصلاح شرایط مرزی ضروری را نشان می‌دهند. فرم‌های ترکیبی، که هدف آنها ترکیب مزایای هر دو شکل ضعیف و قوی است عمدتاً برای مسائل دو بعدی به کار رفته است.

[1] Mesh Free Collocation Method
[2] Mesh Free mixe Collocation Method
[3] Meshless Local Petrov Galerkin Mehtod (MLPG)
[4] Point Interpolation Method (PIM)
[5] Radial Point Interpolation Method (RPIM)
[6] Particle Unity (PU)
[7] Element Free Galerkin (EFG)
[8] Reproducing Kernel Particle Method (RKPM)

با توجه به اینکه روش کار در این تحقیق کوپل دو روش عددی بدون المان و هم هندسی می‌باشد در ارتباط با روش هم هندسی می‌توان بیان نمودکه تابع پایه بیزیز ابزاری برای تجزیه مجموعه توابع نربز به چندجمله‌ای‌های برنشتاین[1]است. استفاده از عملگر بیزییر[2]بر این اساس است که هر تابع پایه بی اسپیلاین یا نربز را می‌توان از نظر ریاضی به صورت یک ترکیب خطی از چند جمله‌ای برنشتاین[3]نوشت. در واقع این عملگر تابع چند جمله‌ای برنشتاین را به تابع بی اسپیلاین نگاشت می‌کند. این تبدیل این امکان را فراهم می‌کند که از المان‌های قطعه قطعه بیزییر با پیوستگی C^0[4] (همانند روش اجزا محدود) استفاده کرد. در آنالیز هم‌هندسی مرسوم(اولیه)، توابع پایه به یک المان محدود نمی‌شوند بلکه روی یک محدوده تعریف می‌شوندکه باعث پیچیدگی در پیاده‌سازی آن‌ها می‌شود. عملگر بیزییر با تجزیه این توابع به ترکیب خطی از چندجمله‌ای برنشتاین، آن‌ها را بسیار شبیه به چند جمله‌ای‌های لاگرانژ نموده و اجازه می‌دهد که روی المان‌های پیوسته بیزییر تولید شوند. لذا ساختاری المانی مشابه روش اجزا محدود فراهم می نماید که برنامه نویسی به روش هم هندسی را تسهیل می نماید. المان بیزیر روی بازه [۰ و ۱] گسترده می‌شود و از بردارگرهی بدون نقاط گرهی داخلی شکل می‌گیرد. بردار گرهی شامل تعداد (p+1) صفر و (p+1) یک است که p مرتبه چندجمله ای است. توابع پایه بیزیرکه با این بردار شکل می گیرد چندجمله ای های برنشتاین هستند.

درجستجوی یک حل تقریبی برای یک مسئله که تحت اثر معادلات دیفرانسیل جزئی و شرایط مرزی است، اولین نیاز تقریب تابع میدانی مجهول توسط تابع شکل می‌باشد. برای ایجاد هندسه دارای ترک در مسائل مکانیک شکست و تحلیل آن با روش کوپل هم هندسی و بدون المان، باید از روش کوپل هم هندسی و بدون المان توسعه‌یافته استفاده شود.

وجود یک گرادیان دمای یکنواخت در سرتاسر هندسه دارای ترک نیز باعث ایجاد یک ناپیوستگی در میدان جابجایی ناشی از بار حرارتی در طول ترک و پرش در میدان کرنش حاصل از آن در محل سطوح مشترک در مدل می‌شود. همچنین میدان تنش و شار حرارتی(در صورت وجود) در نوک ترک تکینه خواهند بود. بنابراین برای پیش‌بینی میدان دما و میدان جابجایی در وجود گرادیان دما نیز باید از غنی‌سازی در روابط استفاده شود. فرایند و توابع غنی‌سازی استفاده شده برای میدان دما می‌تواند با موارد استفاده شده برای میدان جابجایی در غیاب گرادیان دما و تنش‌های ناشی از آن یکسان باشد. جابجایی و کرنش در وجود بارهای ترمومکانیکی شامل دو بخش است که یک بخش آن مربوط به بارگذاری مکانیکی و بخش دیگر ناشی از بار حرارتی است که از مجموع این دو بخش، میدان جابجایی و کرنش بدست خواهد آمد. هر کدام از بخش‌های مکانیکی و حرارتی با توجه به شرایط موجود و در نظر گرفتن درجات آزادی اضافه شده ناشی از غنی سازی در طول و نوک ترک محاسبه می‌شوند. همچنین تنش پسماند جوشکاری خواص مکانیکی اجزای سازه را کاهش می‌دهد و ممکن است منجر به برخی مکانیسم‌های واماندگی و شکست مانند شکستگی ترد و خستگی شود.

---

[1] Berneshtain
[2] Bézier extraction operator
[3] Bernstein polynomial
[4] piecewise C^0 Bézier elements

در تحقیق حاضر هدف محاسبه ضریب شدت تنش در مسائل سه بعدی تحت بارگذاری مکانیکی تناوبی درحضور تنش پسماند ناشی از جوشکاری، با استفاده از کوپل روش‌های بدون المان و هم‌هندسی بر اساس عملگر بیزییر بر پایه توابع نربز است. به این منظور از یک لوله دارای ترک که تحت تاثیر بارگذاری تناوبی قرار دارد جهت بررسی روش کوپل بدون المان و هم هندسی استفاده می‌شود و با استفاده از مدل‌های مورد استفاده در مکانیک شکست الاستیک- پلاستیک، نتایج حاصل شده با نتایج بدست آمده از روش اجزا محدود یا نتایج مراجع مورد مقایسه و بررسی قرار می گیرد.

د - اهمیت و ضرورت انجام تحقیق (شامل اختلاف نظرها و خلاءهای تحقیقاتی موجود، میزان نیاز به موضوع، فواید احتمالی نظری و عملی آن و همچنین مواد، روش و یا فرآیند تحقیقی احتمالاً جدیدی که در این تحقیق مورد استفاده قرار می گیرد:

از آنجا که تحلیل شکست در پیشرفت طراحی بسیاری از سازه‌های مهندسی(از جمله لوله انتقال نفت و گاز) اهمیت بسزایی دارد، تحلیل ترک پیش‌بینی عمر، به یکی از موضوعات تحقیقاتی مهم در سال‌های اخیر تبدیل شده است. در این راستا، روش‌های عددی به سرعت در حال توسعه می‌باشند و روش تحلیل عددی بدون المان و هم‌هندسی جزء بهترین و پرکاربردترین روش‌های عددی در این خصوص هستند. به همین جهت ارائه روشی برای بکارگیری این نوع تحلیل عددی در مسائل ترک و مکانیک شکست(سه بعدی) ضروری به نظر می‌رسد. بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که تا به امروز روش تحلیل کوپل دو روش بدون المان و هم‌هندسی بر اساس عملگر بیزییر در تحلیل ترک در مسائل سه بعدی با بارگذاری تناوبی انجام نگرفته است. لذا با درنظر گرفتن ماهیت مسئله و پیچیدگی‌های هندسه، ترک و بارگذاری، نیاز به یافتن روابط در حالت سه بعدی می باشد. همچنین با توجه به اینکه این روش به دلیل دارا بودن مزایای بسیار، شاید در آینده‌های نه‌چندان دور بتواند جایگزین روش‌های عددی متداول گردد، نتایج ناشی از انجام این تحقیق (شامل ارائه روابط، امکان سنجی، اصلاح و غنی‌سازی در استفاده از روش کوپل بدون المان و هم‌هندسی براساس عملگر بیزییر در هندسه سه بعدی و دارای ترک به ویژه در حالت بارگذاری ترکیبی و تناوبی) می‌تواند در آینده کاربرد وسیع و مطلوبی در مکانیک شکست داشته باشد. با مطالعه و بررسی تحقیقات گسترده انجام شده درمورد ترک سه‌بعدی و شکست ناشی از آن مشخص است که از مهمترین دلایل این شکست بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی تناوبی و تنش‌های ناشی از آن‌ها است. لذا هدف این تحقیق بدست آوردن میزان تاثیر هر یک از این بارگذاری‌ها و درنهایت تاثیر ترکیب آن‌ها در شکست است که به ارائه راهکارهایی جهت کنترل وکاهش این تاثیرات منجر می‌شود. این تحقیق با کد نویسی روابط حاکم بر مبنای روش کوپل بدون المان و هم هندسی انجام خواهد شد. در تحقیق حاضر استفاده از کوپل یکی از روش بدون مش و تابع پایه بیزیر انجام می‌شود تا از مزایای هر دو روش یعنی دقت هندسی، انعطاف پذیری و تقریب‌های مناسب آنها استفاده شود.

ه- مرور ادبیات و سوابق مربوطه (بیان مختصر پیشینه تحقیقات انجام شده در داخل و خارج کشور پیرامون موضوع تحقیق و نتایج آنها و مرور ادبیات و چارچوب نظری تحقیق):

۱-تحقیقات انجام شده درباره روش بدون شبکه:

اگرچه در دهه اخیر روش‌های بدون شبکه با موفقیت اعمال می‌شوند اما دو مشکل فنی عمده هنوز به درستی حل نشده است. اولین مشکل فنی، در اجرای شرط مرزی ضروری است. دلیل آن این است که تابع تقریب دارای ویژگی دلتای کرونکر نیست. دومین مشکل فنی، پیچیدگی موجود در تجزیه و تحلیل دامنه‌های نامنظم، که در آن تعداد زیادی گره اغلب برای گرفتن هندسه به اندازه کافی مورد نیاز است و این همان مسئله ای است که روش اجزا محدود نیز با آن مواجه است. محققانی چون لیو وگای [۳,۲] و وانگ و همکاران [۴] روش درون‌یابی نقطه‌ای بدون مش (PIM) برای رسیدگی به موضوع اول پیشنهاد دادند. PIM از چند جمله ای‌ها به عنوان توابع پایه خود استفاده می‌کند که در آنها تعداد تابع شکل با تعداد گره‌ها یکسان است. از این رو، توابع شکل PIM دارای ویژگی دلتای کرونکر هستند. با این حال، PIM دارای نقاط ضعفی است که در آن ماتریس لحظه ای توابع شکل می‌تواند منفرد باشد. بنابراین تکنیک‌های خاصی برای غلبه بر این مشکل مورد نیاز است. وانگ و لیو [۶,۵] توابع پایه شعاعی (RBF) را برای غلبه بر مشکل تکینگی پیشنهاد کردند و به عنوان PIM شعاعی (RPIM) نامیده شدند. ثابت شده است که ماتریس گشتاور درون یابی های RBF برای ساخت توابع شکل در PIM معکوس است. روش درونیابی نقطه شعاعی اخیراً در روش راه حل‌های بدون شبکه پیشرفت چشمگیری داشته است. تابع تقریب آن از هر نقطه گره در حوزه نفوذ عبور می‌کند، بنابراین اجرای شرایط مرزی ضروری را بسیار آسان‌تر می‌کند و پیچیدگی را در الگوریتم های عددی نسبت به سایر روش‌های بدون شبکه کاهش می دهد. در برجسته سازی مشکل فنی دوم، مطالعات متعددی برای بهبود فرآیند نگاشت در روش‌های عددی انجام شده است. یکی از مطالعات عمده، ادغام تکنیک‌های تجزیه و تحلیل با توابع پایه غالب مورد استفاده در طراحی به کمک رایانه یعنی بی اسپیلاین منطقی غیر یکنواخت نربزبود. تابع پایه نربز یک مدل ریاضی است که یک الگوریتم کارآمد و از نظر عددی پایدار ارائه می‌کند که می‌تواند دقیقاً تمام بخش‌های مخروطی را نشان دهد و امکان مدل‌سازی بسیار انعطاف‌پذیر را فراهم می‌کند و با بهینه‌سازی نقاط و وزن‌ها، طراحی انعطاف‌پذیر انواع شکل‌های هندسی را ممکن می‌سازد. در مطالعات هیوز و همکاران[۷] ، کاترل و همکاران [۸] و بازیلوس و همکاران[۹] انواع شکل‌های هندسی با تابع پایه نربز بررسی شده است. در میان اولین تلاش‌ها برای بهبود پاسخ‌ها، روزولن و آرویو [۱۰] چند شبکه حداکثر آنتروپی محلی (LME) و نربز را از طریق تحمیل شرایط بازتولید ارائه کردند و فرآیند نگاشت را در روش‌های بدون شبکه ارائه نمودند.کار آنها بر روی صفحه بی نهایت با سوراخ دایره ای نشان می‌دهدکه استفاده از IGA-LME به طور قابل توجهی دقیق‌تر از LME معمولی است. وانگ و ژانگ[۱۱] یک روش ذرات هسته بازتولید کننده RKPM نربز را با کمک شرایط بازتولید برای اطمینان از سازگاری معرفی کردند. رفتارهای همگرایی برای گسسته‌سازی بدون مش منظم و نامنظم نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که NURBS-RKPM می‌تواند به نرخ همگرایی دست یابد که به راه حل دقیق بسیار نزدیک است. با این حال، ویژگی‌های غیر درون‌یابی روش‌های بدون مش در مطالعه آنها، ادامه کار پژوهشگران چی و لین [۱۲] را بیشتر بر بهبود تحمیل شرایط مرزی متمرکز کرده است.

۲- تحقیقات انجام شده درباره استفاده از روش هم هندسی در تحلیل مسائل ترک:

قرشی و همکاران [۱۳] ، روشی برای تحلیل هم‌هندسی ترک‌های ثابت و رشد یافته دوبعدی برمبنای ترکیب روش‌های هم هندسی و اجزا محدود ارائه کردند. در این روش که از توابع نربز برای تقریب مدل غیر یکپارچه (دارای ترک) برای انجام تحلیل استفاده شد، می‌توان انواع مدهای ترک و پارامترهای مختلف آن را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج حاصل با ارائه مثال‌هایی با شرایط مختلف و مدهای چندگانه ترک مورد بررسی و مقایسه با سایر روش‌ها قرار گرفت. دی لرنزیس و همکاران [۱۴] ، روش فرمول‌بندی برای محاسبه تغییر شکل بزرگ سه بعدی سطح تماس با استفاده از روش هم‌هندسی بر پایه توابع نربز را ارائه نمودند. آن‌ها با بررسی چند مثال عددی دقت تحلیل و پیش بینی فرمول بندی ارائه شده را نشان دادند. بارداج و همکاران [۱۵] ، روابطی کلی برای اعمال روش هم‌هندسی توسعه‌یافته و استفاده از توابع پایه نربز، برای مسائل دارای ترک صفحه‌ای، ارائه‌کردند. آنها موثر بودن این روش را با محاسبه ضریب شدت تنش در یک ورق با ترک لبه‌ای، نشان دادند.

۳- تحقیقات انجام شده درباره استفاده از عملگر بیزیر:

نیان [۱۶] ، آنالیز هم‌هندسی را با استفاده از عملگر بیزیر روی توابع پایه، انجام داد. در این تحقیق روند و نتایج حاصل از تحلیل به سه روش اجزا محدود و هم‌هندسی سنتی و هم‌هندسی بر اساس عملگر بیزیر برای مدل‌های ساده و دو بعدی ارائه شده و مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که به دلیل راه‌حل ساده و مستقیم و هندسه دقیق، استفاده از این عملگر ضمن داشتن هزینه تحلیلی کمتر و درنتیجه زمان کوتاه‌تر برای پاسخ، جواب‌های دقیق‌تری نیز ارائه می‌دهد. استفان و همکاران[۱۷] ، روشی برای تعیین وابستگی خطی، نشان دادن خاصیت جزء واحد و رفتار توابع پایه تی- اسپیلاین به هر درجه (زوج یا فرد) و فرایند اصلاح مش‌بندی ایجاد شده با این توابع، براساس استفاده از عملگر بیزیر ارائه کردند. همچنین آن‌ها[۱۸] ، روش هم‌هندسی بر اساس عملگر بیزیر برای توابع پایه مختلف بر پایه تئوری کیرشهوف-لاو، به کارگرفتند. کارایی روابط به دست آمده در این روش با ذکر چند مثال ارائه شده است. هنینگ و همکاران[۱۹] ، روش اعمال عملگر بیزیر را روی نوع خاصی از توابع پایه و کاربرد آن در بهبود تحلیل هم هندسی را ارائه دادند. آن‌ها با استفاده از روش ارائه شده برای تحلیل چند مدل، بهبود روند انجام تحلیل و دقت بالای آن را نشان دادند. نیان و همکاران [۲۰] ، یک فرمول‌بندی از آنالیز هم‌هندسی بر اساس عملگر بیزیر برای تئوری مرتبه بالای برشی در ورق‌های کامپوزیتی ارائه دادند. آنها نیز با مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تحقیقات مشابه نشان دادند که روش و روابط ارائه شده علاوه نیاز به حجم محاسبات کمتر، جواب‌های دقیق‌تری را ارئه می‌دهد. هوانگ و همکاران [۲۱] ، از آنالیز هم‌هندسی بر اساس عملگر بیزیر برای آنالیز کمانش ورق استفاده کردند. آن‌ها با بررسی شرایط مختلف هندسه، بارگذاری و شرایط مرزی و مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تحقیقات قبلی در خصوص کمانش ورق‌ها، نشان دادند که این روش اولا نتایج بدست آمده با نتایج مرجع کاملا تطابق دارند، ثانیا این روش قادر به ایجاد هندسه دقیق از سطوح پیچیده است و ثالثا این روش به راحتی برای ورق‌های ضخیم و هم برای ورق‌های نازک قابل استفاده است. روش دیگری برای اصلاح محلی مش‌بندی با اعمال عملگر بیزیر برای توابع پایه تی- اسپیلاین توسط بورست و چن [۲۲] ، ارائه شد. آن‌ها برای نشان دادن صحت، دقت کارایی روش خود، آن را روی چند مدل مختلف اعمال کردند. هیان و

همکاران [۲۳] ، یک روش تحلیل عددی به روش هم هندسی بر اساس عملگر بیزییر برای سازه‌های تحت تاثیر نیروهای چندگانه و با شرایط خاص ارائه دادند. نتایج نشان داد که این روش دارای نتایج با دقت بیشتر و با همگرایی سریعتر نسبت به سایر روش‌ها از جمله روش اجزا محدود است. آن‌ها برای تحقیقات بعدی در این زمینه، بررسی خطوط لوله و زانوها و مخازن تحت فشار دارای بارهای پیچیده بررسی اعمال روش روی سایر توابع پایه و بررسی شرایط بارگذاری پیچیده مانند بارگذاری حرارتی و مکانیکی را پیشنهاد دادند.

۴-تحقیقات انجام شده درباره کوپل روش‌های عددی :

بلچیتکو و همکاران [۲۴] پیشنهاد کوپل اجزا محدود و روش گالرکین بدون المان را ارائه نمودند و در این روند کوپل با استفاده از معرفی المان میانجی مابین ناحیه اجزا محدود و ناحیه گالرکین بدون المان به انجام رسید. در المان میانجی یک تقریب جابجایی دو رگه (هایبرید) تعریف می‌شود که پیوستگی جابجایی را در طول مرزهای آن را ارضا می‌کند. کرونگاوز و همکاران [۲۵] پیشنهاد کوپل اجزا محدود و روش بدون المان را برای اعمال شرایط مرزی اساسی در روش های بدون المان که در اعمال این شرط دچار مشکل هستند، ارائه نمودند. این کار بدین صورت انجام گرفت که یک رشته از المان‌های اجزا محدود در طول مرزهای اساسی قرار داده شد. سپس توابع شکل در این المان‌ها با روش بدون المان ترکیب می‌شوند، به نحوی که شرایط مرزی اساسی بتوانند همانند اجزا محدود اعمال شود. هیگن [۲۶] ایده کوپل با استفاده از ضرایب لاگرانژ توسط دو دامنه مجزا را از طریق فرم ضعیف با هم کوپل کرد. یک دامنه برای بخش اجزا محدود و یک دامنه برای بخش بدون المان، در نتیجه این روند با روش های دیگر کاملا متفاوت است. در این روند هیچ تابع شکل کوپل شده ای ایجاد نشده است. لیو و همکاران [۲۷] کوپل روش المان مرزی و روش بدون المان را با استفاده از ضریب لاگرانژ ارائه نمودند. به این نتیجه رسیدند که ماتریس بدست آمده متقارن است و هیچ پیش نیازی برای روش تقارن ماتریس وجود ندارد. لاکرویس و همکاران [۲۸] کوپل روش بدون المان EFG و اجزا محدود را بهینه کردند. تحلیل حساسیت یک فرآیند بهینه سازی سازه را با استفاده از روش کوپل بدون المان و اجزا محدود تغییر داد. برای به حداقل رساندن تنش فون مایزز در یک غشای دوبعدی ثابت در یک انتها و بارگذاری شده در انتهای دیگر با یک سوراخ بیضوی در زاویه تتا حساسیت ها با تفاوت های محدود بر اساس پاسخ های ساختاری برآورد شده با استفاده از روش FE و EFG محاسبه شده است. گونگ و همکاران [۲۹] کوپل روش بدون المان EFG و اجزا محدود را ارائه دادند.

۵-تحقیقات انجام شده درباره کوپل روش‌های هم هندسی و بدون المان :

ولی زاده و همکاران [۳۰] یک رویکرد کوپل بدون المان- هم هندسی را با استفاده از شرایط سازگاری مرتبه بالاتر در فضای فیزیکی ایجاد کردند، که ترتیب تقریب دلخواه توابع پایه کوپل را حفظ می‌کند. در این کار از رویکرد کوپل بدون المان – هم هندسی برای توسعه فرمول‌های تحلیل برای ورق ها و پوسته‌های FGM استفاده می‌شود. ژانگ و همکاران [۳۱] برای مطالعه رفتار استاتیکی و دینامیکی صفحات کیرشهف از روش کوپل بدون المان و هم هندسی استفاده کردند. ژانگ و همکاران [۳۲] رفتار ارتعاش آزاد صفحات نازک ترک خورده را با استفاده از روش شبه محدب کوپل شده هم هندسی- بدون المان مورد مطالعه قرار دادند. روش پیشنهادی از توابع شکل بدون مش شبه

محدب استفاده می‌کند که نه تنها توابع پایه هم هندسی را تقلید می‌کنند، بلکه انعطاف‌پذیری آرایش گره‌ای بدون المان را نیز ارائه می‌دهند. لی و همکاران [۳۳] یک روش کوپل بر اساس توابع هم هندسی و بدون المان برای بررسی پاسخ غیر خطی پوسته ها بر اساس نظریه کیرشهف-لاو ارائه دادند. لی و همکاران [۳۴] به تحلیل تطبیقی انتشار ترک در سازه‌های جدار نازک از طریق رویکرد کوپل روش بدون شبکه با تابع پایه MLS و روش هم‌هندسی با تابع پایه نربز پرداختند. نتایج نشان داد که استراتژی پالایش تطبیقی باعث می‌شود رویکرد کوپل ارائه شده نسبت به روش‌های هم هندسی و روش بدون شبکه، به نرخ هم‌گرایی و کارایی محاسباتی بالاتری دست یابد. کران و همکاران [۳۵] تحلیل کمانش صفحات و پوسته های سه بعدی ارتوتروپیک ترک خورده با استفاده از کوپل روش‌های هم هندسی با تابع پایه نربز و روش بدون شبکه با تابع پایه RKPM را انجام دادند. رویکرد کوپل حاصل نه تنها دقت هندسه را حفظ می‌کند و یک تقریب مرتبه بالاتر را بر اساس توابع پایه هم هندسی ارائه می دهد بلکه اجازه انعطاف‌پذیری اصلاح محلی را نیز می دهد. مخترم و همکاران [۳۶] از کوپل روش‌های هم هندسی با تابع پایه نربز و روش بدون شبکه تابع پایه درونیابی نقطه شعاعی برای تیرهای دارای بازشو در جان تیر استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که روش کارآمد عمل می‌کند و عملکرد مطلوبی را در برابر اجزا محدود ارائه می‌کند و حل سریع‌تر همگرا می‌گردد. اولاه و همکاران [۳۷] یک روش کوپل شده بر اساس توابع پایه گالرکین از روش بدون شبکه و تابع پایه شعاعی (RBF) برای بهینه‌سازی توپولوژی مبتنی بر مجموعه سطح ارائه نمودند. نتایج نشان داد که روش ارائه شده اصلاحات توپولوژیکی مناسب، یعنی ایجاد حفره، شکافتن، ادغام و غیره را به طور موثر انجام می دهد. راه‌حل‌های بهینه مسائل معیار قابلیت اطمینان و سازگاری رویکرد پیشنهادی را در مقابل تکنیک‌های مبتنی بر مش موجود در ادبیات بهینه‌سازی ساختاری نشان می‌دهد.

با مرور پژوهش‌های فوق نتیجه گرفته می‌شود که با بهره‌گیری از توانایی روش بدون المان برای برازش دقیق گره‌های دامنه، کوپل روش بدون المان با روش هم‌هندسی بر اساس عملگر بیزیر نیاز به بررسی دارد چون در پژوهش‌های پیشین تاکنون بررسی نشده است. لذا کوپل این دو روش به عنوان موضوع ارائه می‌گردد.

۶-پیشینه تحقیق پیرامون اندازه گیری تنش پسماند:

در جوشکاری، تنش پسماند به علت گرم و سرد شدن قطعات در حین فرآیند جوشکاری و تغییر فرم‌های برگشت ناپذیر به وجود می‌آید. در صورت عدم استفاده از فرآیند مناسب و رعایت پارامترهای مربوطه، ساختارهای تولید شده عاری از عیب نخواهند بود. تنش‌های پسماند و اعوجاج جوشکاری تقریبا جز مهم‌ترین مسائلی است که در زمینه جوشکاری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به واسطه گرمای موضعی و سرد شدن نایکنواخت حاصل از جوشکاری، توزیع پیچیده‌ای از تنش‌های پسماند در ناحیه اطراف اتصال ایجاد و اغلب باعث تغییرشکل و اعوجاج نامطلوب در سازه می شود. این تنش‌های پسماند و اعوجاج باعث ایجاد ترک و عدم انطباق در ساختار می‌شوند. تنش‌های پسماند کششی بالا در نواحی نزدیک جوش ممکن است منجر به شکست ترد، خستگی و یا خوردگی تنشی شود و از طرفی تنش-های پسماند فشاری و اعوجاج اولیه ممکن است منجر به کاهش استحکام پیچشی اجزای ساختار شود. در زمینه اندازه-گیری تنش پسماند و محاسبه ضریب شدت تنش در میدان تنش پسماند، تحقیقات گسترده‌ای بصورت عددی(غالبا اجزا محدود) و آزمایشگاهی صورت پذیرفته است. تنگ و چنک[۳۸]، تحقیقی در مورد تنش پسماند ناشی از جوشکاری

انجام دادند که در آن به نحوه توزیع دما در جوشکاری، تنش پسماند تأثیر آن بر عمر خستگی و تحلیل عمر خستگی تا شکست ماده پرداخته شده است. آنها برای تعیین تنش‌های پسماند از تحلیل الاستوپلاستیک بهره بردند. در بعضی مقالات توزیع دما ناشی از جوشکاری با استفاده از روش المان محدود مورد تجزیه وتحلیل قرار گرفته است. ماهاپاترا و همکاران[۳۹]، توزیع دمای ناشی از جوشکاری قوسی با فلز محافظ قرار دادند. همچنین با کدنویسی در محیط اجزا محدود میدان دمایی بهینه را برای آلیاژهای آلومینیوم بدست آوردند. همچنین اتصالات جوش پلاسما را توسط روش اجزا محدود الاستوپلاستیک–حرارتی مطالعه کردند و تنش‌های پسماند را برای ورق‌های جوش داده شده محاسبه نمودند. آنها نشان دادندکه نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نتایج کار تجربی دارای تطابق خوبی می‌باشد. دنگ و همکاران[۴۰]،از روش المان محدود برای پیش بینی توزیع گرما و تنش های پسماند بهره بردند. آنها به کمک این روش بسیاری از پدیده‌های فیزیکی مرتبط با جوشکاری را شبیه‌سازی کردند و اثرمتغیرهای مختلف جوشکاری بر تنش‌های پسماند را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که تنش‌های پسماند باعث ایجاد ترک و عدم انطباق در ساختار می‌شوند. تنش‌های پسماند کششی بالا در نواحی نزدیک جوش ممکن است منجر به شکست ترد، خستگی و یا خوردگی تنشی شود و از طرفی تنش‌های پسماند فشاری و اعوجاج اولیه ممکن است منجر به کاهش استحکام پیچشی اجزای ساختار شود. سورش و همکاران[۴۱]، شبیه‌سازی عددی از تنش پسماند در فرایند جوشکاری جوش نقطه‌ای در ورق‌های فولادی کم‌کربن که منتج به نمایش میزان توزیع دما و تنش پسماند موجود در قطعه‌کار شد. می و همکاران[۴۲]، اتصالات جوش پلاسما را توسط روش اجزا محدود الاستوپلاستیک–حرارتی مطالعه نمودند و تنش های پسماند را برای ورق‌های جوش داده شده محاسبه نمودند. آنها نشان دادند که نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نتایج کار تجربی دارای تطابق خوبی می‌باشد. یوگوآنگ و همکاران[۴۳]، مطالعه اجزاء محدود پیرامون ضرایب تمرکز تنش در اتصالاتK شکل دارای تنش پسماند جوش انجام دادند. آنها با استفاده از نرم افزار انسیس فرایند جوش را با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی، شبیه‌سازی کردند. همچنین با استفاده از تکنیک تولد و مرگ المان‌ها، شبیه سازی میدان دمایی، میزان تنش پسماند و مکان نقاط داغ در جوش را بدست آوردند. نتایج نشان دهنده تنش پسماندی بالاتر از نقطه تسلیم ماده بود که با انجام عملیات حرارتی بهبود یافت. ادوارد و همکاران[۴۴]، تاثیرخواص حرارتی مکانیکی مواد در دسته های مختلف فولاد بر روی تنش پسماند و اعوجاج را بررسی کردند. آنها نیز با استفاده از نرم افزار انسیس به تحلیل حرارتی مکانیکی مواد مذکور جهت ارزیابی تنش پسماند و اعوجاج پرداختند و دریافتند که به منظور ارزیابی تنش پسماند، می توان دمای اتاق را ثابت در نظرگرفت. از سویی متوجه شدند که در فولادهای کربنی، ظرفیت گرمایی برای تحلیل حرارتی جزو پارامترهای مهم می باشد و تمامی خواص مواد وابسته به دما هستند. وو و همکاران [۴۵]،تاثیرات تنش پسماند ناشی از جوشکاری را روی شکست ترد ورق های فولادی دارای ترک های سطحی بررسی نمود . همچنین از روش تابع وزن و اجزا محدود برای محاسبه ضریب شدت تنش موثر بهره برد و نرخ رشد ترک خستگی را بدست آورد. آیتو وهمکاران[۴۶]، با استفاده از روش اجزاء محدود، نرخ رشد ترک خستگی ناشی از میدان تنش پسماند جوشکاری قوسی با فلز محافظ بررسی کردند. آنها ضمن محاسبه ضریب شدت تنش، نرخ شدت تنش و عمر اتصالات جوشی ذکر شده را بدست آوردند. تنگ و همکاران[۴۷]، تحقیقی در مورد تنش پسماند ناشی از جوشکاری انجام

دادند که در آن به نحوه توزیع دما در جوشکاری، تنش پسماند، تأثیر آن بر عمر خستگی و تحلیل عمر خستگی تا شکست ماده پرداخته شده است. باوو و همکاران[۴۸]، تاثیر میدان تنش‌های پسماند را روی ضریب شدت تنش بررسی نمودند. آنها برای این منظور از روش اجزا محدود و تابع وزن جهت محاسبه ضریب شدت تنش استفاده نمودند. تحقیقات آنها برای موقعیت‌های مختلف ترک در صفحه انجام شده است. نتایج تحقیق آنها تطابق خوبی را نشان می-دهد. سیفی[۴۹]، تاثیر تنش پسماند بر روی پارامترهای شکست در اتصالات جوشی دارای ترک را بررسی نمود و رابطه اصلاح شده‌ای برای محاسبه تنش پسماند معرفی نمود. همچنین برای محاسبه تنش‌های پسماند، ضریب شدت تنش و انتگرال J را بصورت عددی حل نمود.

تحقیق حاضر:

با در نظرگرفتن موارد اشاره شده، مشاهده می‌گردد که در خصوص تاثیر تنش پسماند بر روی پارامترهای شکست به کمک روش‌های عددی بصورت مجزا تحقیقاتی انجام شده است. اما تحلیل هندسه‌های دارای ترک در بارگذاری تناوبی به روش کوپل روش بدون المان وهم‌هندسی بر اساس عملگر بیزییر بدون تنش پسماند و یا دارای تنش پسماند تاکنون تحقیقی انجام نشده است.

فهرست مراجع:

[1] N. E. Dowling, "Mechanical behavior of materials/engineering methods for deformation, fracture, and fatigue NE Dowling," *Int. J. Fatigue,* vol. 19, no. 96, 1999.

[2] G.-R. Liu and Y. Gu, "A point interpolation method for two-dimensional solids," *International journal for numerical methods in engineering,* vol. 50, no. 4, pp. 937-951, 2001.

[3] G. Liu and Y. Gu, "A local radial point interpolation method (LRPIM) for free vibration analyses of 2-D solids," *Journal of Sound and vibration,* vol. 246, no. 1, pp. 29-46, 2001.

[4] J. Wang, G. Liu, and Y. Wu, "A point interpolation method for simulating dissipation process of consolidation," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* vol. 190, no. 45, pp. 5907-5922, 2001.

[5] J. Wang and G. Liu, "A point interpolation meshless method based on radial basis functions," *International Journal for Numerical Methods in Engineering,* vol. 54, no. 11, pp. 1623-1648, 2002.

[6] J. Wang and G. Liu, "On the optimal shape parameters of radial basis functions used for 2-D meshless methods," *Computer methods in applied mechanics and engineering,* vol. 191, no. 23-24, pp. 2611-2630, 2002.

[7] T. J. Hughes, J. A. Cottrell, and Y. Bazilevs, "Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement," *Computer methods in applied mechanics and engineering,* vol. 194, no. 39-41, pp. 4135-4195, 2005.

[8] J. A. Cottrell, A. Reali, Y. Bazilevs, and T. J. Hughes, "Isogeometric analysis of structural vibrations," *Computer methods in applied mechanics and engineering,* vol. 195, no. 41-43, pp. 5257-5296, 2006.

[9] Y. Bazilevs, L. Beirao da Veiga, J. A. Cottrell, T. J. Hughes, and G. Sangalli, "Isogeometric analysis: approximation, stability and error estimates for h-refined meshes," *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences,* vol. 16, no. 07, pp. 1031-1090, 2006.

[10] A. Rosolen and M. Arroyo, "Blending isogeometric analysis and local maximum entropy meshfree approximants," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* vol. 264, pp. 95-107, 2013.
[11] D. Wang and H. Zhang, "A consistently coupled isogeometric–meshfree method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* vol. 268, pp. 843-870, 2014.
[12] S.-W. Chi and S.-P. Lin, "Meshfree analysis with the aid of NURBS boundary," *Computational Mechanics,* vol. 58, pp. 371-389, 2016.
[13] S. S. Ghorashi, N. Valizadeh, and S. Mohammadi, "Extended isogeometric analysis for simulation of stationary and propagating cracks," *International Journal for Numerical Methods in Engineering,* vol. 89, no. 9, pp. 1069-1101, 2012.
[14] L. De Lorenzis, P. Wriggers, and G. Zavarise, "A mortar formulation for 3D large deformation contact using NURBS-based isogeometric analysis and the augmented Lagrangian method," *Computational Mechanics,* vol. 49, pp. 1-20, 2012.
[15] G. Bhardwaj, I. V. Singh, and B. Mishra, "Numerical simulation of plane crack problems using extended isogeometric analysis," *Procedia Engineering,* vol. 64, pp. 661-670, 2013.
[16] T. N. Nguyen, "Isogeometric finite element analysis based on Bézier extraction of NURBS and T-splines," Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for …, 2011.
[17] S. May, J. Vignollet, and R. De Borst, "The role of the Bézier extraction operator for T-splines of arbitrary degree: linear dependencies, partition of unity property, nesting behaviour and local refinement," *International Journal for Numerical Methods in Engineering,* vol. 103, no. 8, pp. 547-581, 2015.
[18] S. May, J. Vignollet, and R. d. Borst, "Powell–Sabin B-splines and unstructured standard T-splines for the solution of the Kirchhoff–Love plate theory exploiting Bézier extraction," *International Journal for Numerical Methods in Engineering,* vol. 107, no. 3, pp. 205-233, 2016.
[19] P. Hennig, S. Müller, and M. Kästner, "Bézier extraction and adaptive refinement of truncated hierarchical NURBS," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* vol. 305, pp. 316-339, 2016.
[20] L. B. Nguyen, C. H. Thai, and H. Nguyen-Xuan, "A generalized unconstrained theory and isogeometric finite element analysis based on Bézier extraction for laminated composite plates," *Engineering with Computers,* vol. 32, pp. 457-475, 2016.
[21] J. Huang, N. Nguyen-Thanh, and K. Zhou, "Extended isogeometric analysis based on Bézier extraction for the buckling analysis of Mindlin–Reissner plates," *Acta Mechanica,* vol. 228, pp. 3077-3093, 2017.
[22] R. de Borst and L. Chen, "The role of Bézier extraction in adaptive isogeometric analysis: Local refinement and hierarchical refinement," *International journal for numerical methods in engineering,* vol. 113, no. 6, pp. 999-1019, 2018.
[23] H. V. Do and H. Nguyen-Xuan, "Limit and shakedown isogeometric analysis of structures based on Bézier extraction," *European Journal of Mechanics-A/Solids,* vol. 63, pp. 149-164, 2017.
[24] T. Belytschko, D. Organ, and Y. Krongauz, "A coupled finite element-element-free Galerkin method," *Computational Mechanics,* vol. 17, no. 3, pp. 186-195, 1995.
[25] T. Belytschko, Y. Krongauz, D. Organ, M. Fleming, and P. Krysl, "Meshless methods: an overview and recent developments," *Computer methods in applied mechanics and engineering,* vol. 139, no. 1-4, pp. 3-47, 1996.
[26] D. Hegen, "Element-free Galerkin methods in combination with finite element approaches," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* vol. 135, no. 1-2, pp. 143-166, 1996.
[27] G.-R. Liu and Y. Gu, "Coupling of element free Galerkin and hybrid boundary element methods using modified variational formulation," *Computational Mechanics,* vol. 26, no. 2, pp. 166-173, 2000.

[28] D. Lacroix and P. Bouillard, "Improved sensitivity analysis by a coupled FE–EFG method," *Computers & structures,* vol. 81, no. 26-27, pp. 2431-2439, 2003.
[29] S. Gong, G. Xie, J. Zhang, S. Nie, and Y. Li, "Sensitivity analysis and shape optimization based on FE–EFG coupled method," *Research in Engineering Design,* vol. 20, pp. 117-128, 2009.
[30] N. Valizadeh, Y. Bazilevs, J.-S. Chen, and T. Rabczuk, "A coupled IGA–Meshfree discretization of arbitrary order of accuracy and without global geometry parameterization," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* vol. 293, pp. 20-37, 2015.
[31] H. Zhang, D. Wang, and W. Liu, "Isogeometric-meshfree coupled analysis of Kirchhoff plates," *Advances in Structural Engineering,* vol. 17, no. 8, pp. 1159-1176, 2014.
[32] H. Zhang, J. Wu, and D. Wang, "Free vibration analysis of cracked thin plates by quasi-convex coupled isogeometric-meshfree method," *Frontiers of Structural and Civil Engineering,* vol. 9, pp. 405-419, 2015.
[33] W. Li, N. Nguyen-Thanh, and K. Zhou, "Geometrically nonlinear analysis of thin-shell structures based on an isogeometric-meshfree coupling approach," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* vol. 336, pp. 111-134, 2018.
[34] W. Li, N. Nguyen-Thanh, J. Huang, and K. Zhou, "Adaptive analysis of crack propagation in thin-shell structures via an isogeometric-meshfree moving least-squares approach," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* vol. 358, p. 112613, 2020.
[35] R. Kiran, N. Nguyen-Thanh, J. Huang, and K. Zhou, "Buckling analysis of cracked orthotropic 3D plates and shells via an isogeometric-reproducing kernel particle method," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics,* vol. 114, p. 102993, 2021.
[36] M. Mokhtaram, M. M. Noor, M. J. Abd Nazir, A. Z. Abidin, and A. M. Yassin, "Coupling of NURBS and Meshfree RPIM for plane stress of web with openings," *Engineering Analysis with Boundary Elements,* vol. 138, pp. 266-279, 2022.
[37] B. Ullah, W. Khan, and Z. Ullah, "A coupled meshless element-free Galerkin and radial basis functions method for level set-based topology optimization," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,* vol. 44, no. 3, p. 89, 2022.
[38] T.-L. Teng and P.-H. Chang, "Effect of residual stresses on fatigue crack initiation life for butt-welded joints," *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 145, no. 3, pp. 325-335, 2004.
[39] M. Mahapatra, G. Datta, B. Pradhan, and N. Mandal, "Three-dimensional finite element analysis to predict the effects of SAW process parameters on temperature distribution and angular distortions in single-pass butt joints with top and bottom reinforcements," *International journal of pressure vessels and piping,* vol. 83, no. 10, pp. 721-729, 2006.
[40] D. Deng and H. Murakawa, "Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements," *Computational materials science,* vol. 37, no. 3, pp. 269-277, 2006.
[41] V. J. Varghese, M. Sumanth, and M. Suresh, "Numerical Simulation of Residual Stress in a Spot Welded Low Carbon Steel Plate," *Procedia engineering,* vol. 38, pp. 2913-2921, 2012.
[42] G. Mi, C. Li, Z. Gao, D. Zhao, and J. Niu, "Finite element analysis of welding residual stress of aluminum plates under different butt joint parameters," *Engineering Review: Međunarodni časopis namijenjen publiciranju originalnih istraživanja s aspekta analize konstrukcija, materijala i novih tehnologija u području strojarstva, brodogradnje, temeljnih tehničkih znanosti, elektrotehnike, računarstva i građevinarstva,* vol. 34, no. 3, pp. 161-166, 2014.
[43] Y. Cao, Z. Meng, S. Zhang, and H. Tian, "FEM study on the stress concentration factors of K-joints with welding residual stress," *Applied Ocean Research,* vol. 43, pp. 195-205, 2013.

[44] L. Edwards, M. Fitzpatrick, P. E. Irving, I. Sinclair, X. Zhang, and D. Yapp, *An integrated approach to the determination and consequences of residual stress on the fatigue performance of welded aircraft structures*. ASTM International, 2006.
[45] X. Wu and J. Carlsson, "Welding residual stress intensity factors for half-elliptical surface cracks in thin and thick plates," *Engineering fracture mechanics,* vol. 19, no. 3, pp. 407-426, 1984.
[46] Y. Itoh, S. Suruga, and H. Kashiwaya, "Prediction of fatigue crack growth rate in welding residual stress field," *Engineering Fracture Mechanics,* vol. 33, no. 3, pp. 397-407, 1989.
[47] T.-L. Teng and C.-C. Lin, "Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds," *International Journal of Pressure vessels and piping,* vol. 75, no. 12, pp. 857-864, 1998.
[48] R. Bao, X. Zhang, and N. A. Yahaya, "Evaluating stress intensity factors due to weld residual stresses by the weight function and finite element methods," *Engineering Fracture Mechanics,* vol. 77, no. 13, pp. 2550-2566, 2010.
[49] R. Seifi, "Effect of Residual Stress on Fracture Parameters of through Cracks in Welded Plates," *Procedia Engineering,* vol. 10, pp. 1895-1900, 2011.

و – جنبه جدید بودن و نوآوری در تحقیق:

مرور پیشینه پژوهش‌ها نشان داد که تاکنون تحقیقی در رابطه با کوپل روش‌های هم‌هندسی با تابع پایه بیزیر و روش بدون شبکه در مکانیک شکست انجام نشده است. همچنین پژوهشی در خصوص تاثیر تنش پسماند نیز به کمک کوپل مذکور ارائه نشده است. با توجه به اینکه کوپل توابع پایه دو روش عددی در پژوهش‌های پیشین نشان داده که روش کوپله حاصله از دقت بالاتر و زمان محاسباتی کمتری از هر دو روش قبل از کوپل دارد، لذا انتظار می‌رود ایده پیشنهادی یعنی کوپل توابع پایه بیزیری با روش بدون المان نیز دقت بالاتر و زمان محاسباتی کمتری از هر دو روش قبل از کوپل ارائه دهد. با توجه به ماهیت مسئله و هندسه و نوع بارگذاری، نیاز به یافتن روابط کوپل انتخابی در حالت سه بعدی می باشد. به این دلیل که استفاده از روش‌های عددی در موضوع ترک بیشتر محدود به حالت های دوبعدی و شرایط بارگذاری، هندسه و ترک ساده بوده است. در خصوص امکان سنجی و اصلاح و غنی‌سازی در استفاده از این کوپل در هندسه سه بعدی و دارای ترک به ویژه در حالت بارگذاری تناوبی هیچ گونه تحقیقی مشاهده نشده است. لذا در این تحقیق پس از بدست آورن روابط مورد نیاز و تعیین روند تحلیل برای لوله تحت شرایط بارگذاری تناوبی با استفاده از روش کوپل روش بدون المان وهم‌هندسی بر اساس عملگر بیزییر انجام خواهد شد.

نوآوری‌های این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱) ارائه روابط حاکم بر تحلیل برای حالت سه بعدی کوپل روش هم هندسی با تابع پایه بیزیر و روش بدون المان شامل ایجاد هندسه مدل دارای ترک.
۲) ارائه و به‌کارگیری روابط غنی‌ساز در نوک و طول ترک در روش کوپل ارائه شده برای هندسه‌های سه بعدی
۳) اعمال بارگذاری تناوبی و ترکیب آنها برای به دست آورن روابط و تعیین روند تحلیل جهت بررسی شکست در هندسه مورد نظر.
۴) بررسی تاثیر تنش پسماند در محاسبه ضریب شدت تنش با استفاده از روش کوپل بدون المان و هم‌هندسی
۵) توسعه روش کوپل بدون المان و هم هندسی در اندازه گیری تنش پسماند.

ز- اهداف مشخص تحقیق (شامل اهداف آرمانی، کلی، اهداف ویژه و کاربردی):

- یافتن روابط حاکم بر مدلسازی و تحلیل سه بعدی در روش کوپل ارائه شده
- یافتن و ارائه روابط توابع پایه جهت حالت سه بعدی فضاهای هندسه و تحلیل
- یافتن و ارائه روابط و معادلات حاکم بر تحلیل برای حالت سه بعدی جهت ایجاد جبهه ترک در روش کوپل ارائه شده
- یافتن و ارائه روابط در اعمال روش کوپل ارائه شده جهت غنی سازی میدان جابجایی در مسیر و نوک ترک
- بررسی و مقایسه شرایط مختلف اعمال بارگذاری تناوبی و ترکیب آنها به هندسه سه بعدی ترک دار از طریق روش آنالیز کوپل ارائه شده
- بررسی شکست از طریق محاسبه ضریب شدت تنش در هندسه سه بعدی تحت بارگذاری تناوبی
- تحلیل یک لوله ترک دار تحت بارگذاری تناوبی با حضور تنش پسماند به کمک روش کوپل ارائه شده

ح – در صورت داشتن هدف کاربردی، نام بهره‌وران (سازمان‌ها، صنایع و یا گروه ذینفعان) ذکر شود (به عبارت دیگر محل اجرای مطالعه موردی):

این پژوهش علاوه برکمک به تکمیل تحقیقات در خصوص کوپل دو روش هم هندسی و بدون المان و زیر مجموعه‌های آن، در مبحث مکانیک شکست محاسباتی و بررسی شرایط شکست و پیش‌بینی عمر اجسام در فضای سه بعدی و تحت بارگذاری‌های پیچیده حرارتی و مکانیکی تناوبی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس در همه صنایعی که دارای قطعات تحت شرایط بارگذاری پیچیده (حرارتی و مکانیکی و ترکیب آنها) و وجود احتمال ترک و شکست این قطعات در شرایط کاری هستند به لحاظ پیش‌بینی شرایط و احتمال شکست، درکاهش و حتی جلوگیری از ضررهای اقتصادی انسانی ناشی از شکست ناگهانی قطعه و آسیب رسیدن به سایر قطعات جانبی سیستم، مفید واقع می‌شود. مضاف اینکه نتایج ناشی از انجام تحقیق می‌تواند درآینده کاربرد وسیع و مطلوبی در ارزیابی خطوط لوله نفت و گاز دارای عیب به همراه داشته باشد. این موضوع با توجه به اهمیت بهره‌برداری ایمن و مداوم از منابع نفت و گاز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

ط- سؤالات تحقیق:

- روابط حاکم بر تحلیل در روش کوپل ارائه شده در هندسه سه بعدی ترک دار با داشتن تنش پسماند ناشی از جوشکاری چگونه به دست می‌آیند؟
- تابع شکل در حالت سه بعدی در روش کوپل ارائه شده چگونه خواهند بود؟

- توابع پایه جهت مدل‌سازی در حالت سه بعدی چگونه بدست می‌آیند و استفاده از آنها در فضای تحلیل چگونه است؟
- ایجاد هندسه ترک و تعیین مسیر آن چگونه انجام می‌شود؟
- حول نوک ترک و طول آن غنی سازی در حالت‌های مختلف بارگذاری با چه توابعی انجام می‌شود؟
- استفاده از روش کوپل ارائه شده چه تاثیری روی دقت ضریب شدت تنش محاسبه شده برای اجسام دارای ترک تحت شرایط مختلف بارگذاری تناوبی دارد؟
- بررسی و مراحل آنالیز شکست با داشتن تنش پسماند ناشی از جوشکاری در کوپل ارائه شده چگونه است؟

ی- فرضیه‌های تحقیق:

۱) محور دارای ترک اولیه سطحی با هندسه نیم بیضوی است.
۲) بارگذاری تحت فشارداخلی تناوبی با دامنه ثابت در نظرگرفته می‌شود.
۳) از اثرات متقابل بارهای دینامیکی و تاثیر عوامل خارجی صرف نظر می‌گردد.
۴) تنش پسماند ناشی از جوشکاری در نظر گرفته می‌شود.
۵) جنس مواد ایزوتروپیک همگن فرض می‌گردد.
۶) رشد ترک در صفحه ترک صورت میگیرد، در نتیجه خط و جبهه ترک در صفحه خود باقی خواهد ماند.

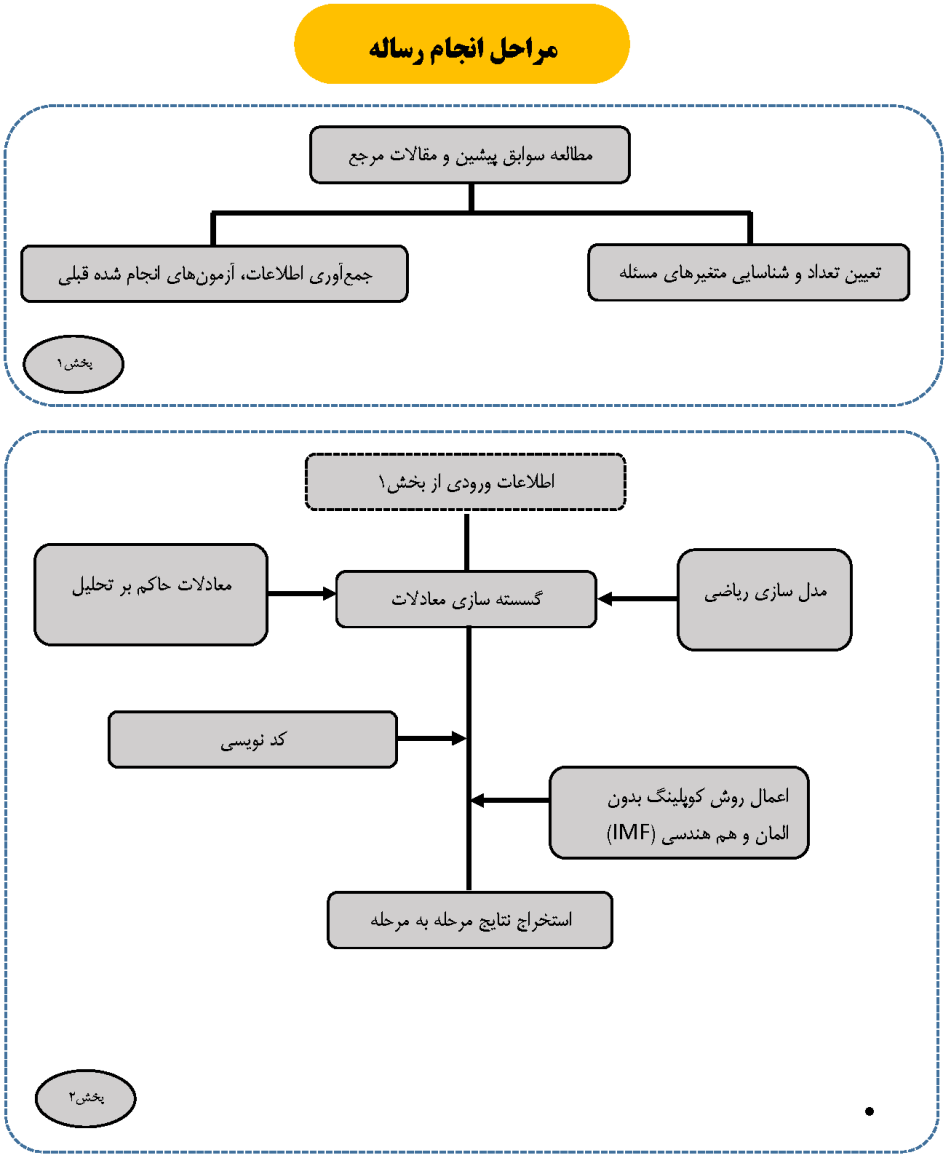
ک- تعریف واژه‌ها و اصطلاحات فنی و تخصصی (به صورت مفهومی و عملیاتی):

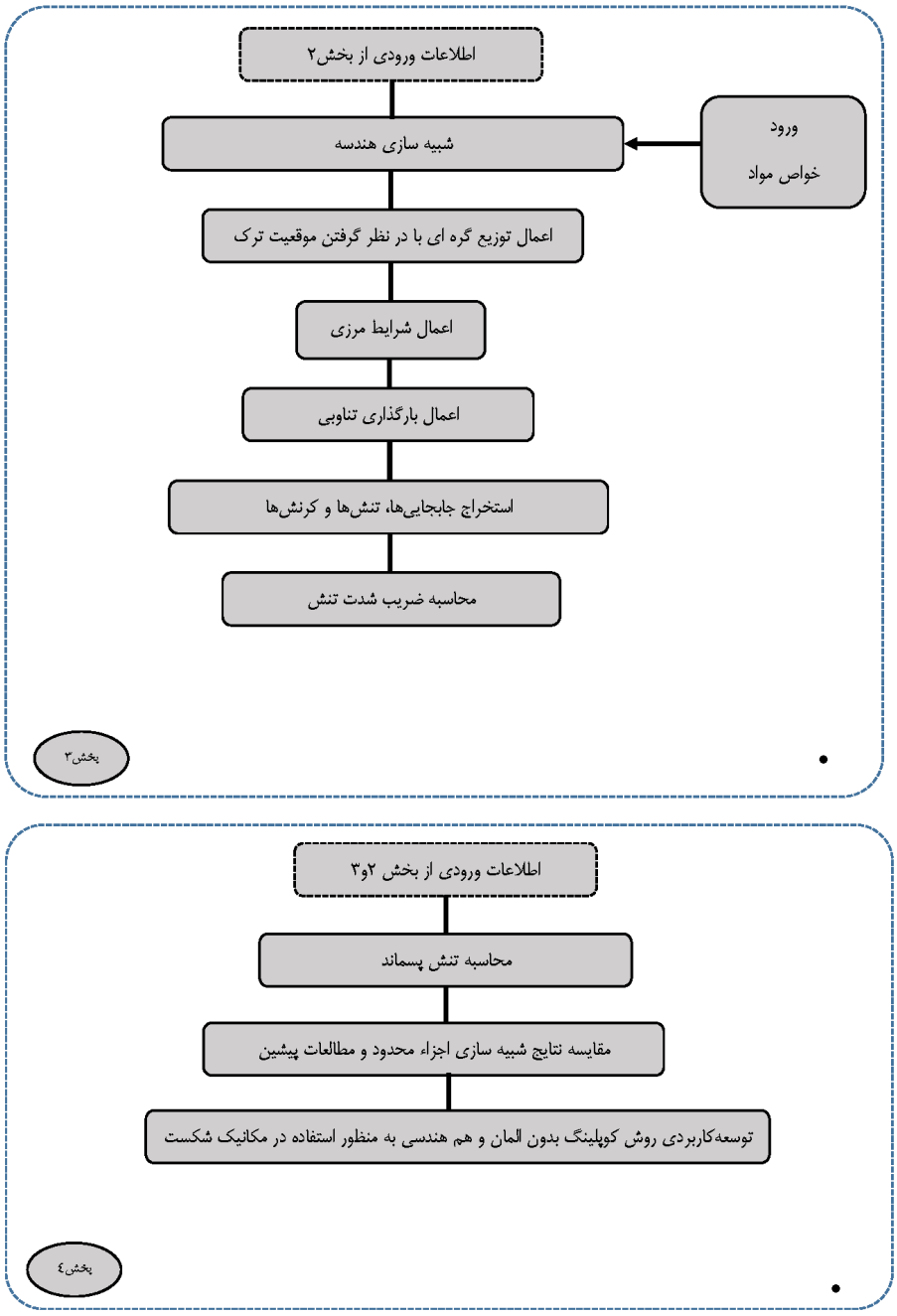
- روش بدون المان
- روش هم هندسی
- روش کوپل هم هندسی و بدون المان
- توابع پایه چندجمله‌ای
- تابع پایه با عملگر بیزیر
- غنی سازی نوک ترک
- بارگذاری حرارتی
- بارگذاری تناوبی
- تابع وزن
- تابع شکل
- تنش پسماند
- میدان جابجایی
- میدان تنش
- ضریب شدت تنش

۵-روش شناسی تحقیق:

الف- شرح کامل روش تحقیق بر حسب هدف، نوع داده ها و نحوه اجراء (شامل مواد، تجهیزات و استانداردهای مورد استفاده در قالب مراحل اجرایی تحقیق به تفکیک):

تذکر: درخصوص تفکیک مراحل اجرایی تحقیق و توضیح آن، از به کار بردن عناوین کلی نظیر، «گردآوری اطلاعات اولیه»، «تهیه نمونه‌های آزمون»، «انجام آزمایش‌ها» و غیره خودداری شده و لازم است در هر مورد توضیحات کامل در رابطه با منابع و مراکز تهیه داده‌ها و ملزومات، نوع فعالیت، مواد، روش‌ها، استانداردها، تجهیزات و مشخصات هر یک ارائه گردد. به طور کلی چارچوب روش ارائه شده را می‌توان به صورت فلوچارت شکل ۱ نشان داد:





شکل ۱: مراحل انجام تحقیق

در این پژوهش، شکست لوله دارای تنش پسماند ناشی از جوشکاری تحت تأثیر بارگذاری تناوبی به روش کوپل تابع بیزیر از روش هم هندسی و روش بدون شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. . فرآیند جوشکاری با ایجاد یک منبع حرارتی

متحرک در مسیر مدنظر تعریف شده و تنش پسماند ناشی از آن محاسبه می‌شود. در فرآیند جوشکاری بدلیل نرخ شدید افزایش دما و مقدار پایین تنش تسلیم در دماهای بالا، در ماده کرنش پلاستیک بوجود می‌آید. برای محاسبه توزیع تنش پسماند جوشکاری، ابتدا باید توزیع دما در حین فرآیند جوشکاری بدست آید. بعد از محاسبه توزیع دما درحین فرآیند جوشکاری، تاریخچه دمایی بدست آمده بعنوان بارگذاری دمایی به مدل لوله اعمال شده و توزیع تنش پسماند از تحلیل سازه‌ای بدست خواهد آمد. در ادامه ضریب شدت تنش با استفاده از روش پیشنهاد شده محاسبه می‌شود. در حضور تنش پسماند، ضریب شدت تنش موثر (کل) برابر با برآیند ضریب شدت تنش ناشی از بارگذاری مکانیکی یا دمایی و ضریب شدت تنش ناشی از تنش پسماند است. باید توجه داشت که با بدست آوردن روابط لازم درکوپل مدنظر و تعیین روند تحلیل در آن، انجام تحلیل برای هندسه‌های سه‌بعدی مختلف دارای ترک تحت تاثیر بارگذاری تناوبی و شرایط مرزی مختلف قابل انجام خواهد بود.

لذا می‌توان بیان نمود که مراحل انجام تحقیق عبارتند از:

- مطالعه مراجع پیشین
- یافتن معادلات دیفرانسیل و معادلات حاکم بر تحلیل
- ایجاد هندسه دقیق با استفاده از توابع پایه
- محاسبه و استفاده از عملگر بیزیر جهت نگاشت تابع پایه
- پخش نمودن گره‌ها و انتخاب تعداد لایه‌ها و تراکم گره ای
- بدست آوردن توابع شکل با بکارگیری از روش‌های تقریب‌زنی یا درونیابی‌جهت تخمین میدان گره‌ها براساس مقدار دقیق گره‌ها
- یافتن تابع شکل وپارامترهای موثر درکوپل دو روش هم هندسی و بدون المان
- مدلسازی هندسه ترک غنی سازی میدان جابجایی در نوک ترک و طول ترک با توابع غنی ساز
- محاسبه ماتریس سختی با توابع شکل
- اعمال بارگذاری حرارتی ناشی از جوشکاری
- محاسبه تنش پسماند
- اعمال بارگذاری تناوبی و اعمال شرایط مرزی و استفاده از روش کوپل ارائه شده
- محاسبه مقادیر جابجایی لبه های ترک
- محاسبه ضریب شدت تنش
- بررسی و نتیجه گیری شرایط شکست
- صحت سنجی نتایج با روش‌های عددی دیگر یا مراجع معتبر

ب- متغیرهای مورد بررسی در قالب یک مدل مفهومی و شرح چگونگی بررسی و اندازه گیری متغیرها:

متغییرهای مورد بررسی عبارتند از:

- نرخ توزیع دما در فرایند جوشکاری

ـ نسبت منظر ترک

ـ چینش گره ای

ـ دامنه تاثیر و نحوه همگرایی

ـ تعداد لایه های پیرامون ترک

ـ توزیع گره ای و نقاط کنترلی در روش کوپل ارائه شده

ج – شرح کامل روش (میدانی، کتابخانه‌ای) و ابزار (مشاهده و آزمون، پرسشنامه، مصاحبه، فیش‌برداری و غیره) گردآوری داده‌ها :

- جمع آوری اطلاعات و دانش موجود در زمینه این فناوری از طریق منابع کتابخانه‌ای و همچنین مقالات معتبر و استفاده از نتایج تحقیقات محققین در این زمینه.
- جداول، نمودارها و روابط موجود در کتب مرجع و استانداردها.
- استفاده از تحلیل عددی به روش مورد نظر(کدنویسی) جهت محاسبه و استخراج نتایج لازم و داده پردازی‌های مورد نیاز.

د – جامعه آماری، روش نمونه‌گیری و حجم نمونه (در صورت وجود و امکان):

تحقیق تحلیل آماری ندارد.

هـ - روش‌ها و ابزار تجزیه و تحلیل داده‌ها:

- استفاده از معادلات و روابط حاکم جهت تحلیل اطلاعات با استفاده از کدنویسی به روش کوپل بیزیر و بدون المان
- استفاده از نرم افزارها و محیطهای برنامه نویسی
- ترسیم نمودارهای مورد نیاز
- تحلیل نتایج به دست آمده جهت صحت سنجی

۶- استفاده از امکانات آزمایشگاهی واحد:

آیا برای انجام تحقیقات نیاز به استفاده از امکانات آزمایشگاهی واحد علوم و تحقیقات می‌باشد؟ بلی ☒ خیر☐

در صورت نیاز به امکانات آزمایشگاهی لازم است نوع آزمایشگاه، تجهیزات، مواد و وسایل مورد نیاز در این قسمت مشخص گردد.

نوع آزمایشگاه	تجهیزات مورد نیاز	مواد و وسایل	مقدار مورد نیاز
مرکز محاسبات پیشرفته	سرور و تجهبرات پردازش سریع		

امضاء استاد راهنما: **امضاء مدیرگروه تخصصی:**

۷- زمان بندی انجام تحقیق:

الف- تاریخ شروع: **پس از تصویب پروپوزال** ب- مدت زمان انجام تحقیق: **۲۴ ماه** ج- تاریخ اتمام:.....

تذکر: لازم است کلیه فعالیت‌ها و مراحل اجرایی تحقیق (شامل زمان ارائه گزارشات دوره‌ای) و مدت زمان مورد نیاز برای هر یک، به تفکیک پیش‌بینی و در جدول مربوطه درج گردیده و در هنگام انجام عملی تحقیق، حتی‌الامکان رعایت گردد.