بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه شهرکرد
دانشکده‌ی فنی و مهندسی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی‌کاربردی

کاربرد مکانیک آسیب در پیش‌بینی بروز ترک در شکل‌دهی غلتکی سرد با استفاده از شبیه‌سازی اجزای‌محدود

استاد راهنما
دکتر مهدی سلمانی تهرانی

استاد مشاور
دکتر مهرداد پورسینا

پژوهشگر
مسلم قاسمی پیربلوطی

تابستان ۱۳۹۰

دانشگاه شهرکرد
دانشکده‌ی فنی و مهندسی

پایان‌نامه‌ی آقای مسلم قاسمی پیربلوطی جهت اخذ درجه‌ی کارشناسی‌ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی با عنوان « کاربرد مکانیک آسیب در پیش‌بینی بروز ترک در شکل‌دهی غلتکی سرد با استفاده از شبیه‌سازی اجزای‌محدود » در تاریخ ۹۰/۰۶/۰۱ با حضور هیأت داوران زیر بررسی و با نمره‌ی ۱۹/۲۰ مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. استاد راهنمای پایان‌نامه، دکتر مهدی سلمانی تهرانی با مرتبه‌ی علمی استادیار **امضا**

۲. استاد مشاور پایان‌نامه، دکتر مهرداد پورسینا با مرتبه‌ی علمی استادیار **امضا**

۳. استاد داور داخلی گروه دکتر حسین گلستانیان با مرتبه‌ی علمی دانشیار **امضا**

۴. استاد داور داخلی گروه دکتر یعقوب طادی بنی با مرتبه‌ی علمی استادیار **امضا**

دکتر بهزاد قاسمی
مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی و مهندسی

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

تشکر و قدردانی

لازم می‌دانم حس سپاس‌گذاری خود را نسبت به همه‌ی کسانی که در زندگانیم در نقش معلم ظاهر شدند و گاه برایم پیامبری بودند و هستند ابراز دارم.

من هنوز چشم انتظار همچون آنانم تا به روشنی‌های زندگی و بعد از آن برسم.

مسلم قاسمی پیربلوطی
تابستان ۱۳۹۰

تقدیم:

به مادرم که روشنی راه زندگی‌ام را از او دارم.
به پدرم که عظمت آزادگی را از او آموختم.
به انسان آزاده و روشنگر که ارزش دنیا در وجودی چون او است.

چکیده

شکل‌دهی غلتکی سرد فرایندی است که در آن نوار ورق در حالت سرد، با عبور پیوسته از بین مجموعه غلتک‌های دوار و بدون تغییر محسوس در ضخامت، به یک پروفیل با مقطع دلخواه شکل داده می‌شود. شکل‌دهی در چند مرحله و با ایجاد خم‌های طولی در نوار ورق انجام می‌شود. شکل‌دهی در ورق بر ایجاد ناحیه‌ی پلاستیک در محل خم استوار است. تغییر شکل بیشتر در محل خم بازگشت فنری را کاهش می‌دهد. اما امکان بروز ترک در محل خم نیز افزایش می‌یابد. بنابراین بررسی و تعیین پارامترهای موثر بر شکل‌دهی به‌صورت بهینه می‌تواند در این فرایند قابل توجه باشد. شبیه‌سازی اجزای محدود می‌تواند راه حل مناسبی برای بررسی پارامترهای شکل‌دهی در این فرایند باشد. شبیه‌سازی اجزای محدود ضمن این‌که هزینه‌ی آزمایش‌ها را کاهش دهد، می‌تواند در شناخت و بهینه کردن پارامترهای موثر کارآمد باشد.

در این پژوهش در قدم اول پارامترهای موثر در ایجاد ترک روی سطح بیرونی ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی می‌شوند. بدین منظور از معیارهای آسیب نرم و برشی ارئه شده در نرم‌افزار ABAQUS استفاده می‌شود. ماده‌ی انتخاب شده یک نوع سوپرآلیاژ آلومینیوم می‌باشد که خواص آسیب نرم و برشی آن در دست است. نتایج آسیب اولیه مطابقت خوبی با محل های مورد انتظار برای شروع ترک دارد. همچنین با فرض بروز ترک انتظار داریم گشتاور شکل‌دهی غلتک‌ها و انرژی کرنشی در ورق کاهش یابند که با نتایج به‌دست آمده هم‌خوانی خوبی دارد. با در نظر گرفتن ویژگی تمرکز محلی آسیب که متشابه با بروز ترک در ماده می‌باشد، شبیه-سازی‌ها با استفاده از معیار برشی نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

در قدم دوم به بررسی میزان تاثیر کمی پارامترهای موثر در بروز ترک پرداخته شده است. با توجه به این‌که نسبت شعاع خم به ضخامت در خمش ساده یک پارامتر موثر در سطوح تنش روی سطح ورق می‌باشد و همچنین اثر زاویه‌ی خم و ضخامت ورق در این فرایند ملموس می‌باشد. از این‌رو این پارامترها به‌عنوان پارامترهای اساسی در بروز ترک در نظر گرفته شده‌اند و به بررسی میزان رشد آسیب در تغییرات این پارامترها پرداخته شده است. نتایج در قالب نمودارهایی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد احتمال بروز ترک و پارگی در ابتدای ورق بیشتر است. در روی خط خم بعد از حدود ۱۰ برابر ضخامت ورق، نمودار آسیب تقریبا به شکل یک نمودار نوسانی حول یک عدد ثابت با دامنه‌ی نزولی در می‌آید. شاید بتوان گفت آسیب در یک المان نه تنها بر سطوح تنش در آن المان بلکه در سطوح تنش در المان‌های مجاور و میزان آسیب در آن‌ها تاثیرگذار می‌باشد.

در قدم سوم با هدف کاهش هزینه‌های شبیه‌سازی و بسط نتایج و همچنین بررسی بهتر تاثیر پارامترها، از شبکه‌های فازی-عصبی استفاده شده است. با استفاده از شبکه‌ی فازی-عصبی انطباقی ANFIS در نرم‌افزار MATLAB و داده‌های خروجی حاصل از شبیه‌سازی‌ها یک شبکه آموزش داده شده تا به منظور بسط نتایج مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از این سیستم علاوه بر بسط نتایج می‌توان رویه‌های آسیب را بر حسب هر دو پارامتر از پارامترهای ورودی ترسیم نمود. شایان ذکر است روند طی شده در این پژوهش را می‌توان به عنوان یک روند مناسب در جهت طراحی دقیق‌تر خطوط تولید و بهینه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی مشابه و افزایش کیفیت محصولات پیشنهاد نمود.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی غلتکی سرد، بروز ترک، معیارهای آسیب، شبیه‌سازی اجزای محدود، شبکه‌ی فازی-عصبی.

فهرست مطالب

عنوان **شماره‌ی صفحه**

فصل اول: مقدمه ۶

۱-۱ مقدمه ۶

۱-۲ فرایند شکل دهی غلتکی سرد: معرفی فرایند، تاریخچه، مزایا و بررسی بروز عیوب در محصولات ۶

۱-۲-۱ اصول فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد ۶

۱-۲-۲ امکان بروز برخی عیوب در محصولات: طرح مساله، اهمیت موضوع انتخابی ۹

۱-۳ کاربرد مکانیک آسیب برای در نظر گرفتن زوال ماده، پیش‌بینی شروع ترک ۹

۱-۴ کاربرد شبکه‌های فازی-عصبی در بسط نتایج ۱۰

۱-۵ مروری بر پژوهش‌ها ۱۰

۱-۵-۱ پژوهش های انجام شده بر مبنای شبیه‌سازی روند تولید ۱۰

۱-۵-۲ شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد در ایران ۱۲

۱-۵-۳ استفاده از مکانیک آسیب در فرایندهای شکل‌دهی فلزات ۱۲

۱-۶ اهداف و روند بررسی، جنبه‌ی نوآوری پایان‌نامه ۱۳

۱-۷ ساختار پایان نامه ۱۴

فصل دوم: شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد با در نظر گرفتن معیارهای آسیب در نرم‌افزار ABAQUS ۱۵

۲-۱ مقدمه ۱۵

۲-۲ بیان صورت مسأله، معرفی طرح کلی و پارامترهای هندسی ۱۵

۲-۳ بررسی مدل‌های آسیب موجود در نرم افزار ABAQUS ۱۶

۲-۴ شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد ۱۹

۲-۴-۱ هندسه و خصوصیات کلی مدل ۱۹

۲-۴-۲ ویژگی‌های رفتاری مواد ۲۰

۲-۴-۳ المان مورد استفاده و شبکه‌بندی ۲۱

۲-۴-۴ تعریف تماس ها و مدل اصطکاکی در مدل ۲۱

۲-۴-۵ قدم‌های تحلیل ۲۲

۲-۴-۶ شرایط مرزی و بارگذاری ۲۲

فصل سوم: ارزیابی صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای‌محدود آسیب فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد ۲۳

۳-۱ مقدمه ۲۳

۳-۲ بررسی همگرایی جواب‌ها و عدم وابستگی به مش ۲۳
۳-۳ شبیه‌سازی آزمایش باتاچاریا و اسمیت بدون مدل آسیب ۲۵
۳-۳-۱ جزئیات آزمایش ۲۵
۳-۳-۲ مدل اجزای محدود ۲۶
۳-۳-۳ ارزیابی و مقایسه‌ی نتایج ۲۹
۳-۴ شبیه‌سازی فرایند خمش سه نقطه‌ای با در نظر گرفتن مدل‌های آسیب ۳۰
۳-۴-۱ شبیه‌سازی اجزای محدود ۳۰
۳-۴-۲ نتایج و بحث ۳۲

فصل چهارم : کاربرد شبکه‌های فازی-عصبی در جمع‌بندی و بسط نتایج ۳۵
۴-۱ مقدمه ۳۵
۴-۲ مفهوم منطق فازی ۳۵
۴-۳ ویژگی‌های منطق فازی ۳۶
۴-۴ آموزش مدل و استنتاج با استفاده از ANFIS درنرم‌افزار MATLAB ۳۶
۴-۵ آموزش ANFIS با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها ۳۷
۴-۵-۱ وارد کردن داده‌ها به نرم‌افزار MATLAB و فراخوانی ANFIS ۳۷
۴-۵-۲ آموزش ANFIS ۳۹

فصل پنجم : بررسی و بسط نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای‌محدود آسیب فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد ۴۲
۵-۱ مقدمه ۴۲
۵-۲ بررسی نتایج به‌دست آمده با استفاده از معیارهای آسیب ۴۲
۵-۲-۱ پیش‌بینی شروع ترک در محصول ۴۲
۵-۲-۲ مقایسه نتایج حاصل از به کارگیری معیار های آسیب بر شبیه‌سازی: مقایسه با شبیه‌سازی‌ها بدون معیار آسیب ۴۷
۵-۳ بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر میزان آسیب با استفاده از شبیه‌سازی‌ها ۴۸
۵-۳-۱ بررسی اثرات زاویه‌ی خم θ بر میزان آسیب ۴۹
۵-۳-۲ بررسی اثرات پارامتر بی بعد نسبت شعاع خم R تقسیم بر ضخامت t، R/t بر میزان آسیب ۵۰
۵-۴ جمع‌بندی و بسط نتایج با استفاده از شبکه‌ی فازی-عصبی ۵۱

فصل ششم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۵۶
۶-۱ مقدمه ۵۶
۶-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۵۶
۶-۳ پیشنهادات ۵۶

مراجع ۵۸

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل **شماره‌ی صفحه**

شکل‌های فصل اول

شکل ۱-۱ فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد ۷
شکل ۱-۲ تغییر شکل نوار ورق در حین عبور از ایستگاه اول برای تولید مقطع کانال ۷
شکل ۱-۳ نمایش گل پروفیل لوله‌ی مربعی ۸
شکل ۱-۴ شکل طرح‌واره‌ی بروز ترک در اثر خم شدن ورق با شعاع کم ۹
شکل ۱-۵ شکل مفهومی طراحی بهینه به کمک کامپیوتر ۱۳

شکل‌های فصل دوم

شکل ۲-۱ مدل‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد ۱۶
شکل ۲-۲ مکانیزم‌های سه‌گانه‌ی شکست فلزات (الف) شکست نرم (ب) شکست برشی (پ) ناپایداری گلویی شدن ۱۸
شکل ۲-۳ آرایش اولیه ۲۰
شکل ۲-۴ المان C3D8R ۲۲
شکل ۲-۵ شبکه‌بندی ورق ۲۲

شکل‌های فصل سوم

شکل ۳-۱ آسیب نرم روی خط خم برای تعداد المان‌های مختلف ۲۴
شکل ۳-۲ آسیب برشی روی خط خم برای تعداد المان‌های مختلف ۲۴
شکل ۳-۳ هندسه غلتکها در آزمایش باتاچاریا و اسمیت (ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند) ۲۵
شکل ۳-۴ موقعیت کرنش‌سنجها و هندسه مقطع در آزمایش باتاچاریا و اسمیت ۲۵
شکل ۳-۵ نمایش شماتیک مدل اجزای محدود ورق در دید از بالا، برای مقطع کانال متقارن ۲۷
شکل ۳-۶ نمودار تنش حقیقی بر حسب کرنش پلاستیک حقیقی، برای فولاد SAE 1020 ۲۸
شکل ۳-۷ مقایسه کرنش طولی غشایی محاسبه شده از شبیه‌سازی ABAQUS، با نتایج تجربی باتاچاریا و اسمیت و تحلیل مشابه در مرجع [۳۱]، برای چهار زاویه‌ی خم، الف-θ=۲۰°، ب-θ=۳۰°، ج-θ=۴۰° و د-θ=۵۰° ۲۹
شکل ۳-۸ هندسه‌ی مدل ۳۱
شکل ۳-۹ نمودار تنش- کرنش پلاستیک ۳۱
شکل ۳-۱۰ کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب بر حسب نسبت سه‌محوری و نرخ کرنش ۳۱
شکل ۳-۱۱ مدل تغییر شکل یافته‌ی ورق ۳۲
شکل ۳-۱۲ آسیب در ضخامت ورق ۳۲
شکل ۳-۱۳ نیروی شکل‌دهی با استفاده از معیارهای آسیب و بدون استفاده از معیارهای آسیب ۳۳

شکل ۳-۱۴ آسیب نرم در محل خم ۳۴
شکل ۳-۱۵ آسیب برشی در محل خم ۳۴

شکل‌های فصل چهارم

شکل ۴-۱ سیستم فازی-عصبی انطباقی ANFIS ۴۰
شکل ۴-۲ بار گذاری داده‌ها در سیستم فازی-عصبی انطباقی ANFIS ۴۰
شکل ۴-۳ تولید خودکار سیستم فازی-عصبی و تنظیم پارامترها ۴۱
شکل ۴-۴ انتخاب روش بهینه‌سازی، تلرانس خطا و تعداد مراحل آموزش ۴۱

شکل‌های فصل پنجم

شکل ۵-۱ کانتور آسیب برشی روی ورق ۴۳
شکل ۵-۲ کانتور آسیب نرم روی ورق ۴۳
شکل ۵-۳ تنش نرمال بر سطح مقطع ورق در روی خط خم ۴۴
شکل ۵-۴ آسیب نرم روی سطح بیرونی ورق روی خط خم ۴۵
شکل ۵-۵ آسیب برشی روی سطح بیرونی ورق روی خط خم ۴۵
شکل ۵-۶ تنش ون‌میزز روی بال ورق ۴۶
شکل ۵-۷ انرژی کرنشی با استفاده و بدون استفاده از معیارهای آسیب ۴۷
شکل ۵-۸ گشتاور شکل‌دهی با استفاده و بدون استفاده از معیارهای آسیب ۴۸
شکل ۵-۹ وابستگی میزان آسیب نرم به زاویه‌ی شکل‌دهی ۴۹
شکل ۵-۱۰ وابستگی میزان آسیب برشی به زاویه‌ی شکل‌دهی ۵۰
شکل ۵-۱۱ وابستگی میزان آسیب نرم به پارامتر R/t ۵۰
شکل ۵-۱۲ وابستگی میزان آسیب برشی به پارامتر R/t ۵۱
شکل ۵-۱۳ نتایج خروجی شبکه‌ی فازی عصبی در مقابل داده‌های مورد استفاده در آموزش شبکه ۵۱
شکل ۵-۱۴ نتایج خروجی شبکه فازی عصبی در مقابل داده‌های مورد استفاده برای آزمودن شبکه ۵۲
شکل ۵-۱۵ ساختار نمادین سیستم واسط فازی-عصبی ۵۳
شکل ۵-۱۶ رویه‌ی آسیب برشی بر اساس شعاع خم به ضخامت و ضخامت ورق ۵۳
شکل ۵-۱۷ رویه‌ی آسیب برشی بر اساس زاویه‌ی خم و ضخامت ورق ۵۴
شکل ۵-۱۸ رویه‌ی آسیب برشی بر اساس زاویه‌ی خم و نسبت شعاع خم به ضخامت ورق ۵۴
شکل ۵-۱۹ شبیه‌سازی با استفاده از کنترل‌کننده‌ی منطق فازی برای شبکه‌ی آموزش دیده‌ی آسیب برشی ۵۵

فهرست جدول‌ها

عنوان جدول **شماره‌ی صفحه**

جدول‌های فصل دوم

جدول ۲-۱ پارامترهای هندسی شبیه‌سازی ۱۶

جدول ۲-۲ جنس و مشخصات مادی ۲۰

جدول ۲-۳ خواص پلاستیک ورق ۲۰

جدول ۲-۴ خواص آسیب برای معیار نرم ۲۱

جدول‌های فصل سوم

جدول ۳-۱ مشخصات هندسی مدل اجزای محدود آزمایش باتاچاریا و اسمیت ۲۶

جدول ۳-۲ مشخصه‌های مکانیکی فولاد SAE 1020 ۲۸

جدول ۳-۳ مقایسه عددی اطلاعات شکل ۳-۷ ۳۰

جدول ۳-۴ خواص الاستیک ۳۱

جدول‌های فصل چهارم

جدول ۴-۱ داده‌های مورد استفاده در آموزش شبکه‌ی فازی-عصبی ۳۷

جدول ۴-۲ داده‌های مورد استفاده در آزمودن شبکه‌ی فازی-عصبی ۳۸

جدول‌های فصل پنجم

جدول ۵-۱ میزان آسیب روی خط خم روی سطح بیرونی ورق ۴۸

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

در این فصل در ابتدا فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد معرفی، تاریخچه، مزایا و معایب آن بیان می‌گردد. در این قسمت به برخی ازعیوب به وجود آمده در محصولات اشاره شده، زمینه انتخابی برای این پژوهش معرفی می‌شود. سپس به معرفی مکانیک آسیب و امکان استفاده از آن در این پژوهش پرداخته، ایده‌ی استفاده از شبکه‌های فازی-عصبی در بسط نتایج مطرح می‌گردد. در ادامه به برخی از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود. پس از آن اهداف و روند بررسی و جنبه‌ی نوآوری در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان ساختار کلی پایان‌نامه توضیح داده شده است.

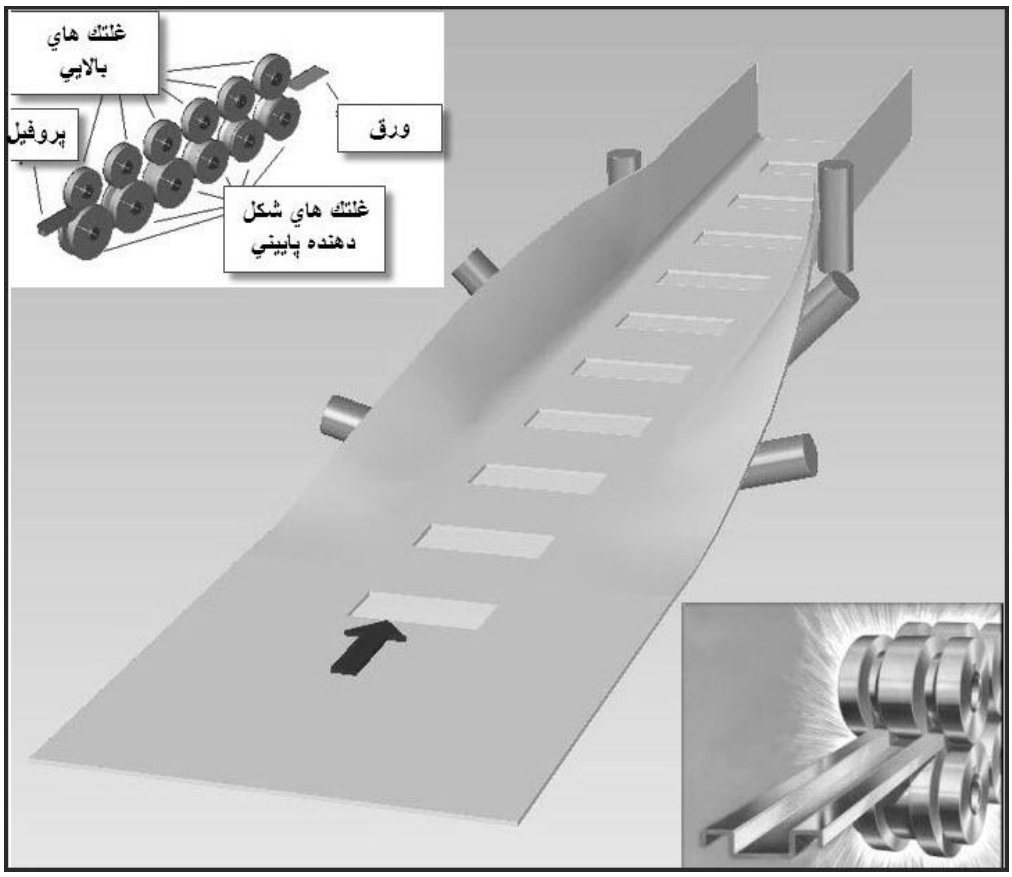
۱-۲ فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد: معرفی فرایند، تاریخچه، مزایا و بررسی بروز عیوب در محصولات

۱-۲-۱ اصول فرایند شکل دهی غلتکی سرد

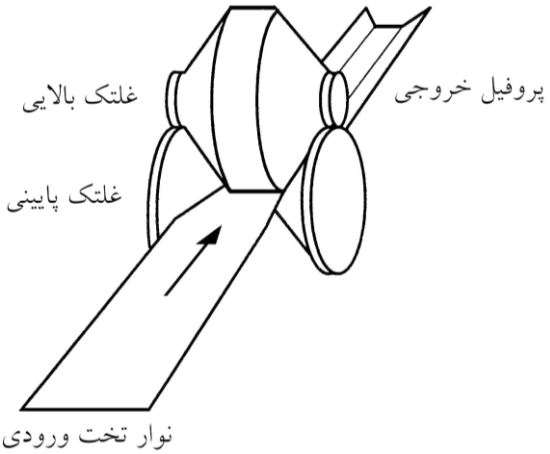
"شکل‌دهی غلتکی سرد"[1] فرایندی است که در آن نوار ورق در حالت سرد، با عبور پیوسته از بین مجموعه غلتک‌های دوار و بدون تغییر محسوس در ضخامت، به یک پروفیل با مقطع دلخواه شکل داده می‌شود. شکل ۱-۱. شکل‌دهی در چند مرحله و با ایجاد خم‌های طولی در نوار ورق انجام می‌شود. هر مجموعه غلتک که بخشی از عمل شکل‌دهی را انجام می‌دهد شامل یک غلتک بالایی، یک غلتک پایینی، و درصورت نیاز، غلتک‌های جانبی می‌باشد. به هر مجموعه از این غلتک‌ها یک "ایستگاه غلتکی"[2] یا ایستگاه

[1] Cold roll-forming
[2] Roll station

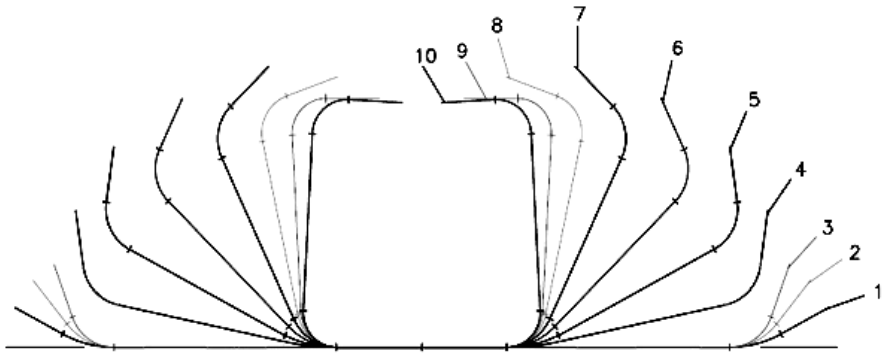
گفته می‌شود. هر چه شکل مقطع نهایی پیچیده‌تر باشد، برای انجام موفقیت‌آمیز فرایند به تعداد ایستگاه‌های بیشتری نیاز است. در این فرایند بر خلاف بسیاری از فرایندهای شکل‌دهی فلزات، شکل‌دهی شدید و ناگهانی نیست. در واقع غلتک‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که جریان فلز از یک ایستگاه به ایستگاه بعد به صورت ملایم انجام شود. شکل ۱-۲ تغییر شکل نوار ورق را در حین عبور از ایستگاه اول برای تولید مقطع کانال نشان می‌دهد. نیروی لازم برای حرکت رو به جلوی پروفیل به‌وسیله‌ی اصطکاک بین غلتک و پروفیل تأمین می‌شود. به‌همین دلیل اصطکاک نقش مهمی در تحلیل این فرایند دارد.



شکل ۱-۱: فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد



شکل ۱-۲: تغییر شکل نوار ورق در حین عبور از ایستگاه اول برای تولید مقطع کانال



شکل ۱-۳: نمایش گل پروفیل لوله‌ی مربعی

برای بهتر نشان دادن ترتیب ایجاد خم‌ها می‌توان سطح مقطع پروفیل خروجی از ایستگاه‌های متوالی را به صورت برهم‌نهاده[1] رسم کرد. به شکل حاصل "الگوی گل"[2] یا "گل پروفیل" مقطع گفته می‌شود. طراحی گل پروفیل بهینه، به عنوان اولین قدم در طراحی خط تولید یک محصول جدید، یک مرحله اساسی در روند طراحی این فرایند شناخته می‌شود. شکل ۱-۳ گل پروفیل لوله با مقطع مربعی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که شکل‌دهی در یازده ایستگاه(ایستگاه صفر به عنوان ایستگاه نگهدارنده) انجام شده است.

مهمترین مزایای فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد عبارتند از:

۱- در مقایسه با روش‌های دیگر، سرعت تولید بالاتر است.

۲- سطح مقطع محصول صیقلی است. زیرا در حین شکل‌دهی هیچ‌گونه خراش و آسیبی به سطح نوار فلز وارد نمی‌شود. به همین دلیل شکل‌دهی نوارهای فلزی رنگ شده یا آبکاری شده، بدون آسیب دیدن پوشش، با این روش امکان‌پذیر است.

۳- طول محصول محدودیتی ندارد. در نتیجه می‌توان در این روش تولید پیوسته و با حجم زیاد را برنامه‌ریزی کرد.

۴- فرایند انعطاف‌پذیر است. به این معنی که با یک ماشین شکل‌دهی می‌توان گستره‌ی وسیعی از محصولات را تولید کرد.

۵- از لحظه‌ی ورود نوار فلز به ماشین تا هنگام خروج محصول، به عملیات جابه‌جایی مواد نیازی نیست.

۶- محصولات این روش نسبت به پروفیل‌های تولید شده به روش نورد گرم استحکام بیشتری نسبت به تغییرشکل دارند. زیرا در عملیات شکل‌دهی سرد هنگام ایجاد خمش پلاستیک، کار سختی فلز افزایش می‌یابد.

۷- بیشتر مواد مانند فولادهای پرکربن، فولادهای ضد زنگ، آلیاژهای آلومینیوم و مس و روی را می‌توان به این روش شکل داد. حتی می‌توان با استفاده از ترکیب فلز و غیر فلز، پروفیل با ماده مرکب تولید کرد.

[1] Superposed
[2] Flower pattern

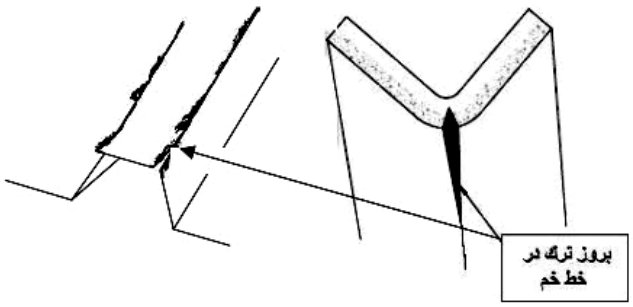
۱-۲-۲ امکان بروز برخی عیوب در محصولات

به‌طور کلی عیوب مختلفی ممکن است در فرایند شکل‌دهی غلتکی مثل موج‌دار شدن لبه‌ها، بازگشت فنری یکنواخت و نایکنواخت، پیچیدن و مانند آن ایجاد شود. یکی از این عیوب ترک خوردن ورق در خطوط خم است(شکل ۱-۴). در این روش تولید، تنش‌ها در خطوط خم باید از حد تسلیم فراتر روند تا تغییرشکل دائمی در ورق ایجاد شود. برای رسیدن به این مقصود طراحان غلتک ترجیح می‌دهند خطوط خم را با شعاع کم طراحی کنند. برخی مواد را می‌توان با شعاع خم صفر شکل داد. اما در بقیه موارد شعاع خم باید ضریبی از ضخامت ورق باشد تا از بروز ترک در ماده جلوگیری شود. معمولا شعاع‌های خمش کمینه‌ی قابل‌حصول با یک آزمایش از نوع فشاری[1] تعیین می‌شوند که استفاده از آن‌ها برای این فرایند قابل اطمینان است. جدول‌های متعددی توسط تولیدکنندگان برای شعاع خم مجاز کمینه برای مواد مختلف تهیه شده است. تدوین این جدول‌ها نشان‌دهنده‌ی اهمیت بروز ترک در این فرایند است. اما تا کنون بیشتر به‌صورت تجربی با این موضوع برخورد شده است [۱].

۱-۳ کاربرد مکانیک آسیب برای در نظر گرفتن زوال ماده، پیش‌بینی شروع ترک

بهره‌گیری از علم مکانیک آسیب[2] در پیش‌بینی پدیده‌ی بروز ترک در این روش تولید می‌تواند در بهبود کیفیت محصولات مؤثر باشد. این در حالی است که پشتوانه‌ی تجربی خوبی در قالب جدول‌های حداقل شعاع خم، توان مورد نیاز و مانند آن در دسترس است.

مکانیک آسیب تا نقطه‌ای پیشرفت کرده‌است که به یک ابزار مهندسی با کاربرد وسیع در صنعت تبدیل شده است. مکانیک آسیب سعی در بیان روند بازگشت‌ناپذیر شکسته شدن پیوندها با شروع از مطالعه‌ی ریزترک‌ها و ریزحفره‌ها[3] در مجاورت سطوح داخلی عیوب در مقیاس میکرو[4]دارد که در ادامه رشد و یکی‌شدن ریزترک‌ها و ریزحفره‌ها را، که در مقیاس مزو[5](مقیاسی که معادلات مکانیک محیط پیوسته در آن نوشته می شوند) اتفاق می‌افتد، در نظر می‌گیرد که باعث شروع ترک در مقیاس ماکرو[6](مقیاس ساختار ها و سازه های مهندسی) می‌گردد. البته بررسی پدیده رشد ترک بر عهده‌ی مکانیک شکست[7] خواهد بود.



شکل ۱-۴: شکل طرح‌واره‌ی بروز ترک در اثر خم شدن ورق با شعاع کم [۱]

[1] Press-type
[2] Damage mechanics
[3] Micro cracks&microvoids
[4] Micro scale
[5] Meso scale
[6] Macro scale
[7] Fracture mechanics

مکانیک آسیب معادلات ساختاری را به معادلاتی پویا تبدیل می‌کند. آسیب بروز ریزترک‌ها و ریزحفره‌ها و پیشرفت تدریجی آن‌ها را در معادلات ساختاری باز می‌تاباند. متغیر آسیب را می‌توان به‌صورت همسانگرد یا ناهمسانگرد در نظر گرفت. برای بیان آسیب در حالت کلی به شکل ناهمسانگرد به یک تانسور مرتبه‌ی چهارم نیاز است. آسیب همسانگرد را تنها با یک اسکالر D نشان می‌دهند. این اسکالر وارد معادلات ساختاری ماده شده، تنش معمول را به تنش موثر تبدیل می‌کند. هر چه آسیب در ماده بیشتر باشد تنش مؤثر هم بیشتر می‌شود. در این میان به یک معادله‌ی سینتیک رشد آسیب $d(D)/dt$، نیاز است تا با شرایط اولیه معلوم، آسیب ماده در هر گام محاسبه شود و معادلات ساختاری به‌هنگام شوند. پارامتر t می‌تواند زمان یا هر متغیر پیش‌رونده در طول فرایند باشد.

مفهوم آسیب نخستین بار توسط کاچانوف[1] در ۱۹۵۸ ارائه شد اما خود واژه‌ی "مکانیک آسیب" را هالت[2] در ۱۹۷۲ معرفی کرد [۲].

۱-۴ کاربرد شبکه‌های فازی-عصبی در بسط نتایج

سال‌های اخیر شاهد رشد سریعی در تعداد و تنوع استفاده از منطق فازی[3] بوده است. دامنه‌ی کاربرد آن از تولیدات صنعتی، دوربین‌های فیلم‌برداری، ماشین‌های لباس‌شویی و میکروویوها گرفته تا کنترل فرایندهای صنعتی، وسایل پزشکی، ابزاردقیق و انتخاب سهام گسترش یافته است. منطق فازی-شبکه‌های عصبی در سیستم‌های تخصصی، سیستم‌های کنترل و غیره کاربرد دارند. اگرچه این کاربردها کاملا متفاوت به نظر می‌رسند، مشترکات زیادی دارند. این تکنیک‌ها روشی برای روند مدل‌سازی برای یادگیری از یک سری داده فراهم می‌کنند تا پارامترهای توابع عضویت[4] که به بهترین شکل ورودی را به خروجی مرتبط می‌کنند محاسبه شوند.

با توجه به این‌که نتایج شبیه‌سازی‌های اجزای محدود آسیب فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد می‌تواند به پارامترهای ورودی متعددی بستگی داشته باشد و با فرض این‌که میزان آسیب روی خطوط خم به‌عنوان پارامتر خروجی (پیش‌بینی‌کننده‌ی بروز ترک) باشد در مجموع بررسی بروز ترک با استفاده از شبیه‌سازی‌ها به سمت تعداد زیادی شبیه‌سازی میل می‌کند که هزینه‌ی زمانی زیادی تحمیل می‌کند. از این رو استفاده از روشی کم هزینه در بسط نتایج با استفاده از نتایج یک سری شبیه‌سازی ضروری می‌نماید. یکی از این راه‌ها می‌تواند استفاده از شبکه‌های فازی-عصبی باشد.

از این‌رو در این تحقیق با تبدیل نتایج شبیه‌سازی‌ها به‌صورت پارامترهای ورودی مانند شعاع خم، به خروجی (آسیب نرم یا برشی) یک سری داده‌ی اولیه برای آموزش به یک شبکه‌ی فازی-عصبی تهیه شده است. بعد از آموزش شبکه، به بسط و بررسی بیشتر نتایج پرداخته شده است.

۱-۵ مروری بر پژوهش‌های انجام شده

پژوهش‌های انجام شده‌ی مرتبط با این پژوهش در سه بخش زیر آورده شده است: شبیه‌سازی فرایند

[1] kachanov
[2] Hult
[3] Fuzzy Logic
[4] Membership functions

شکل‌دهی غلتکی سرد ، شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد در ایران و استفاده از مکانیک آسیب در فرایندهای شکل‌دهی فلزات.

۱-۵-۱ پژوهش های انجام شده بر مبنای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد

بخشی از پژوهش های انجام شده در این زمینه که بر مبنای شبیه‌سازی روند تولید بوده است در زیر آمده است و از ارائه‌ی کارهای تحلیلی و تجربی صرف‌نظر شده است.

"برونت"[1] روشی بر اساس تحلیل اجزای‌محدود کرنش صفحه‌ای برای بررسی تنش پس‌ماند و عیوب ناشی از آن ارائه داد[۳]. "هریتوس"[2] وهمکارانش یک برنامه‌ی "تولید شبکه"[3] بهینه تدوین کردند[۴]. "ون"[4] و "پیک"[5] مدلی برای پیش‌بینی کمانش محلی لبه با استفاده از نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار ABAQUS ارائه دادند[۵]. "سنانایاک"[6] و همکارانش یک مقطع کانال U شکل به‌روش "زاویه‌ی شکل‌دهی"[7] و شکل‌دهی"[7] و شبیه‌سازی با نرم‌افزار MARC/MENTAT طراحی کردند[۶]. "گیر"[8] و "استریکر"[9] فرایند را با با استفاده از نرم‌افزار MARC شبیه‌سازی کردند[۷]. "ربلو"[10] و همکارانش و همچنین "مک‌کلور"[11] و "لی"[12] فرایند ساخت کانال U شکل با نرم‌افزار ABAQUS را شبیه‌سازی کردند[۸و۹]. "هیزلیتز"[13] و همکارانش فرایند تولید کانال را با استفاده از نرم‌افزار PAM-STAMP شبیه‌سازی کردند[۱۰]. "اشموخل"[14] و "سیتزمان"[15] برای برنامه‌ریزی طراحی خط تولید فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد از تحلیل اجزای محدود استفاده نمودند[۱۱]. "دونگ"[16] و "اونی‌پده"[17] شکل‌دهی مقاطع عریض را با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA شبیه‌سازی کردند[۱۲]. "سلدمایر"[18] و "تان"[19] نرم‌افزار DTM را بر اساس تئوری پوسته نازک تدوین کردند[۱۳]. "تویوکا"[20] یک برنامه کامپیوتری برای شبیه‌سازی شکل‌دهی لوله‌ی گرد تدوین نمود[۱۴]. "اونودا"[21] وهمکارانش مشخصه‌های تغییر شکل را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود صلب-پلاستیک و نتایج تجربی بررسی کردند[۱۵]. "السمحان"[22]، "هارتلی"[23] و "پیلینگر"[24] شکل‌دهی غلتکی کانال متقارن را

---

[1] Brunet
[2] Haritos
[3] Mesh generator
[4] Wen
[5] Pick
[6] Senanayake
[7] Forming angle
[8] Geyer
[9] Stricker
[10] Rebelo
[11] McClure
[12] Li
[13] Heislitz
[14] Schmoeckel
[15] Sitzmann
[16] Dong
[17] Onipede
[18] Seldmaier
[19] Taan
[20] Toyooka
[21] Onoda
[22] Alsamhan
[23] Hartley
[24] Pillinger

با استفاده از برنامه درون دانشگاهی خود به نام EPFEP3 تحلیل کردند[۱۶]. "هان"[1]، "لیو"[2] و همکارانشان یک برنامه کامپیوتری با استفاده از "روش نوار محدود"[3]و بر اساس فرمولبندی "لاگرانژی به‌هنگام شده" در توصیف تغییر شکل‌های بزرگ تدوین کردند[۱۷]. "جون زنگ"[4] و همکارانش شبیه‌سازی اجزای محدود دینامیکی شکل‌دهی به یک لوله‌ی مخروطی را انجام دادند[۱۸و۱۹].

۱-۵-۲ شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد در ایران

در ایران تاکنون فعالیتهای محدودی بر روی شبیه سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد انجام شده است. در زیر خلاصه‌ای از کار های انجام شده آمده است :

"مدینه" بر مبنای روش نیمه تجربی-تحلیلی "باتاچاریا"، برنامه‌ای کامپیوتری تدوین کرده است که در قسمتی از آن طول تغییر شکل به دست آمده و مقادیر کرنش طولی بیشینه در لبه‌های بال مقطع در ایستگاههای مختلف شکل‌دهی برای مقاطع کانال و کلاهی شکل، تعیین شده‌اند[۲۰]. "سلمانی تهرانی" یک حد کرنش جدید به نام "حد کرنش کمانشی"[5] در فرایند شکل‌دهی غلتکی معرفی کرده و محاسبه این حد کرنش بر پایه تحلیل اجزای محدود غیرخطی مادی و هندسی را ارائه کرده است[۲۱]. "مسلمی نایینی" شبیه‌سازی عددی نو و ساده برای تحلیل دو بعدی تغییر شکل الاستیک-پلاستیک لوله در فرایند شکل‌دهی مجدد لوله‌های گرد به مقاطع غیر گرد با استفاده از ترکیب روش اجزای محدود و روش تفاضل محدود را ارائه کرده است[۲۲]. محمدرضا متین‌پور فرایند شکل دهی غلتکی سرد لوله های گرد را به کمک رایانه طراحی کرده است[۲۳]. "سلمانی تهرانی"،"مسلمی نایینی"،" هارتلی" از شبیه سازی اجزای محدود در پیش‌بینی کمانش موضعی در لبه‌های ورق استفاده کردند[۲۴].

۱-۵-۳ استفاده از مکانیک آسیب در فرایندهای شکل‌دهی فلزات

همچنین در سال‌های اخیر کارهایی در زمینه استفاده از مکانیک آسیب در فرایندهای شکل‌دهی فلزات صورت پذیرفته است که تعدادی از آن‌ها را در زیر ارائه شده است:

"هامبلی"و "بیدی لِوت" آسیب و شکست را در فرایند اکستروژن شبیه‌سازی کرده‌اند[۲۵]. "چو" و نمودار حد شکل‌دهی را برای AL6111-T4 پیش‌بینی کردند[۲۶]. "بهرنز" و "جاست" مدل آسیب تنش‌های موثر درعملیات آهنگری[6] را با استفاده ازشبیه‌سازی اجزای‌محدود و آزمایش درستی‌سنجی کردند[۲۷]."سونگ" و همکاران شکل‌دهی فلزات وگسترش ترک در صفحه را با استفاده ازمدل آسیب نرم را با استفاده از روش اجزای محدود شبیه‌سازی کردند[۲۸]. "چو" و همکاران شبیه‌سازی اجزای‌محدود شکل‌دهی ورق (کشش عمیق) را ارائه کردند[۲۹]. "آندراده پایر"و همکاران شبیه‌سازی عددی آسیب پلاستیک نرم درفرایند شکل دهی فلزات را ارائه کردند[۳۰]. "گو" و همکاران یک روند معکوس-کاذب کارآمد برای مدل آسیب در شکل‌دهی ورق را ارائه کردند[۳۱]. "شن" و همکاران یک معیار آسیب ناهمسانگرد و استفاده از آن در شکل‌دهی فلزات را ارائه کردند[۳۲]. "مدیاویلا" و همکاران یک راه حل پیوسته- ناپیوسته انتگرالی در مهندسی آسیب در شکل‌دهی ورق را ارائه کردند[۳۳]. "تیکسیرا" " و همکاران پیش‌بینی اجزای‌محدود شکست نرم در شکل‌دهی فلزات را ارائه کردند[۳۴]. "هاداگ" و همکاران تحلیل تمرکز محلی کرنش با استفاده از یک مدل الاستیک-پلاستیک ناهمسانگرد با تغییر شکل زیاد را ارائه کردند[۳۵]. "تاسان" و

---

[1] Han
[2] Liu
[3] Finite strip method
[4] Jun Zeng, Zhaoheng Liu, Henri Champliaud
[5] Buckling limit of strain
[6] forging

همکاران به تحلیل آزمایشگاهی منحنی کرنش وابسته به مکانیک آسیب و حد شکل‌دهی پرداختند[۳۶]. "بودیفا" و همکاران یک مدل میکرومکانیکی برای پیش‌بینی آسیب نرم غیرالاستیک در مواد چند-بلوری[1] برای شکل‌دهی فلزات ارائه دادند[۳۷].

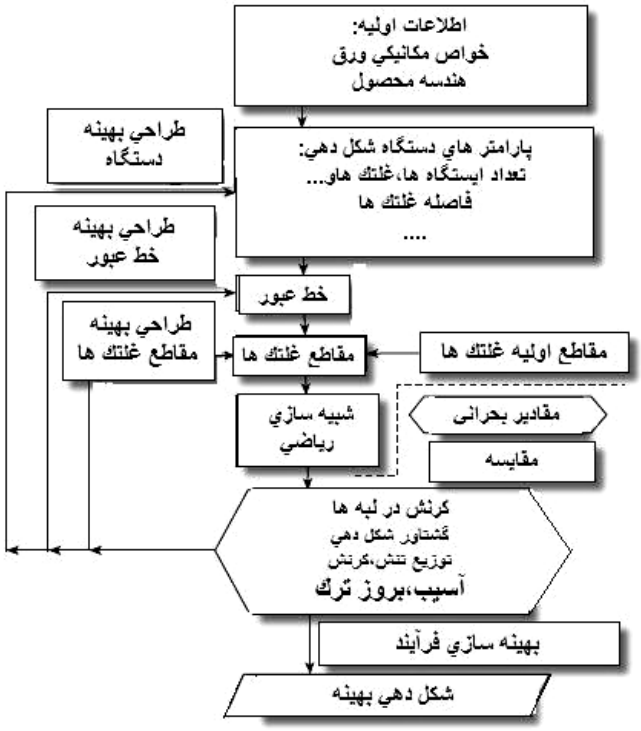
با توجه به آنچه در بالا ارائه شد می‌توان گفت تا کنون از معیار های آسیب در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد استفاده نشده است و این کار می‌تواند آگاهی‌های بیشتری در مورد این فرایند بدست دهد.

۱-۶ اهداف و روند بررسی؛ جنبه‌ی نوآوری پایان‌نامه

با توجه به اهمیت این روش تولید، حرکت درجهت بهبود روند تولید و کیفیت محصول تولیدی باید صورت پذیرد. یک درک کامل از رفتار و تغییر شکل ورق همواره اساس طراحی بهینه است. شکل ۱-۵ مراحل کلی طراحی بهینه‌ی فرایند به کمک کامپیوتر را بیان می‌کند.

آنچه در این طرح می‌تواند قابل‌توجه باشد این است که شبیه‌سازی اجزای‌محدود با استفاده از مدل‌های مکانیک آسیب قادر خواهد بود میزان آسیب و تباهی ماده را به طور کمی (بین صفر و یک) در نقاط مختلف محصول تولیدی بیان کند و حتی حالت‌هایی نزدیک به بروز ترک اما بدون نشانه بیرونی را نیز پیش‌بینی نماید.

محدودیت‌ها و اثر عوامل مختلف که از شبیه‌سازی بدست می‌آید را می‌توان با اطلاعات تجربی (مثل جدول‌های حداق شعاع خم وتوان مورد نیاز و مانند آن) مقایسه و درستی‌سنجی کرد و در صورت لزوم به سمت تصحیح یا تغییر مدل مورد استفاده وانتخاب بهترین مدل آسیب حرکت کرد.



شکل ۱-۵: شکل مفهومی طراحی بهینه به کمک کامپیوتر [۱]

[1] polycrystalline