



هفتمین سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی

۲۶ و ۲۷ اردیبهشت ماه ۸۵

دانشکده مهندسی مواد- دانشگاه صنعتی اصفهان

کاربرد شبیه‌سازی کامپیوتری در مهندسی سطح و عملیات حرارتی

سید رحمان حسینی و فخرالدین اشرفی زاده

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

کاربرد مدل‌سازی و شبیه‌سازی کامپیوتری در سیستم‌های مهندسی سطح و عملیات حرارتی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، انتشارات پژوهشی معتبر در این زمینه مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته و مواردی از شبیه‌سازی‌های انجام شده به صورت مطالعه موردی ارائه شده است. یک سیستم کامل طراحی در مهندسی سطح دارای سه رکن اساسی شامل شبیه‌سازی فرایند، شبیه‌سازی خواص و شبیه‌سازی رفتار در شرایط کاربری است که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته‌اند. در زمینه شبیه‌سازی فرایندهای عملیات حرارتی، تحقیقات عمدتاً بر شبیه‌سازی فرایند کوئنچ متمرکز بوده و در خصوص کربوره و نیتروبه کردن فعالیت کمتری صورت گرفته است. با وجود آنکه فعالیت‌های تحقیقاتی گسترده‌ای در زمینه نیتراسیون پلاسمایی صورت گرفته ولی تعداد مقاله‌های مرتبط با مدل‌سازی این فرایند محدود است. مدل‌های ارائه شده در زمینه سختی پوشش‌ها عموماً تحلیلی هستند و تاکنون مدل عددی مناسبی برای شبیه‌سازی این خاصیت مهم ارائه نشده است. با توجه به ضرورت انجام شبیه‌سازی در سیستم‌های مهندسی سطح و تحقیقات محدودی که در این خصوص صورت گرفته است، زمینه‌های گسترده‌ای برای انجام فعالیت‌های تحقیقاتی در این حوزه وجود دارد.

مقدمه

مدل سازی و شبیه سازی فرایندها ابزاری است اثربخش که میتواند موجب صرفه جویی در زمان و هزینه های تولید گردد. در سالهای اخیر، توجه زیادی به مدل سازی فرآوری مواد معطوف گشته و یافته های تحقیقاتی در این زمینه بصورت کتاب و مقاله های علمی تدوین یافته و مدل های ارائه شده توانسته است تا حد قابل توجهی سبب بهبود فرایندها گردد[۱]. در خصوص فرایندهای مهندسی سطح، گرچه اخیراً در دنیا رویکردهایی به سمت مدل سازی بوجود آمده است، ولی در کشور ما هنوز توجه کافی جهت بکارگیری این ابزار مهم مبذول نشده است.

وجود تنوع در سیستم های مهندسی سطح، فرصت های فراوانی را برای افزایش بازدهی عملکرد اجزای مختلف در شرایط متفاوت محیطی فراهم می آورد. با وجود این، بدلیل عدم وجود مدل های ریاضی و سیستم های طراحی قابل اعتماد برای مهندسی سطح، معمولاً نیازمندی های پوشش سطحی برای کاربردهای مشخص بر اساس آزمون ها و فرمول های تجربی تعیین می گردد. خطاهای بزرگ ناشی از کاربرد روش های تجربی ممکن است از یک سو باعث محافظه کاری و از سوی دیگر موجب تخریب های جبران ناپذیر شود. بنابراین، ضرورت دارد که سیستم های طراحی مناسب برای مهندسی سطح توسعه داده شوند به گونه ای که شامل مدل سازی فرایندها، پیش بینی خواص حاصل و همچنین رفتار در شرایط عملکرد سیستم های مهندسی سطح باشد[۲]. این موضوع بصورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

در این مقاله ضمن ارائه توضیح مختصری راجع به شبیه سازی فرایند^۱، شبیه سازی خواص^۲ و شبیه سازی رفتار در شرایط عملکرد^۳، مثال هایی از شبیه سازی مهندسی سطح بصورت مطالعات موردی بخصوص در زمینه شبیه سازی عملیات حرارتی، نیتراسیون پلاسمایی و سختی پوشش ها ارائه می گردد.

شبیه سازی فرایند در مهندسی سطح

شبیه سازی فرایند می تواند اطلاعات فنی مهم و تغییرات ساختاری مرتبط با داده هایی را فراهم نماید که توسط فرایند مشخصی بوجود می آید. این موضوع نه تنها می تواند در انتخاب یک فرایند مناسب به طراحان کمک نماید، بلکه می تواند منجر به بهینه سازی و کنترل فرایندهای آتی گردد. میزان موفقیت در توسعه مدلی واقعی برای یک فرایند مشخص، بستگی به میزان استنباط و فرموله نمودن واکنش های مختلف فیزیکی، شیمیایی و متالورژیکی دارد که در خلال فرایند بوقوع می پیوندد.

¹ - Process Simulation

² - Property Simulation

³ - Service Behaviour Simulation

هیچ مدل یکنواختی وجود ندارد که قابل کاربرد برای تمام فرایندهای مهندسی سطح باشد و لذا برای هر فرایند مورد نظر باید مدل خاصی توسعه داده شود. از جمله فرایندهای مهندسی سطح که تاکنون مدل هایی برای آنها ارائه شده است می توان به فرایندهای کربوره کردن، نیترووره کردن و پوشش دهی فیزیکی از فاز بخار اشاره نمود.

شبیه سازی خواص

شبیه سازی خواص حاصل از فرایندهای مهندسی سطح شاید مشکل ترین حالت (در مقایسه با شبیه سازی فرایند و شبیه سازی رفتار) باشد. در واقع، فرایندهای گوناگون باعث ایجاد تغییرات خواص متفاوتی در اجزای سیستم می گردند. خواص مکانیکی و شیمیایی مهم تابع پیچیده ای از ساختار، تغییرات ساختار، جهات مرجح، زبری سطح، محیط و مواردی از این قبیل است. بدون یک استنباط عمیق از رابطه بین خواص و چنین عوامل مؤثری، شبیه سازی خواص مواد در مهندسی سطح غیرممکن است. باوجوداین، شبیه سازی شاخص هایی از خواص نظیر سختی و تنش های باقیمانده (که مهمترین اثرات را بر شرایط کاربردی دارند)، برای فرایندهای معینی امکان پذیر است و تاکنون مدل هایی در این زمینه ارائه شده است.

شبیه سازی رفتار در شرایط عملکرد

شبیه سازی رفتار در شرایط کاربردی برای یک سیستم مهندسی سطح، مرحله کلیدی در طراحی مهندسی سطح است. سیمای ساختاری و خاصیتی یک سیستم را میتوان بصورت تجربی ارزیابی نمود، حتی اگر نتوان آنها را مدل سازی نمود. باوجوداین، بسیار مشکل است که رفتار یک سیستم در شرایط کاربردی را بصورت تجربی ارزیابی نمود زیرا معمولاً آزمایش ها نیاز به یک دوره زمانی معینی دارند. گرچه تاکنون مجموعه ای از آزمایش های میدانی توسعه داده شده اند، ولی آنها معمولاً تحت شرایط بار اضافی بمنظور تسریع در آزمایش ها اجرا می شوند. بنابراین، طراحی اجزای سیستم نیازمند توسعه یک الگوی طراحی و همچنین مدل های ریاضی مناسب است تا رفتار در شرایط عملکرد را بصورت واقعی شبیه سازی نماید. روش های طراحی و الگوهای مرسوم که برای حجم مواد بکار برده می شود، برای مهندسی سطح مواد کاربرد ندارد. تغییرات ساختاری و خواص ناشی از مهندسی سطح، بر توزیع و اشاعه تنش در یک جزء مهندسی بارگذاری شده مؤثر است. از جمله موارد شبیه سازی رفتار در شرایط عملکرد که تا حدی به آن پرداخته شده است می توان به شرایط بارگذاری تماسی^۱ و بارگذاری سیکلی (خستگی)^۲ اشاره نمود.

¹ - Contact Loading Condition

² - Cyclic Loading (Fatigue) Condition

مثال هایی از شبیه سازی در مهندسی سطح

در خلال دو دهه گذشته تعدادی از فرایندهای سخت کاری و عملیات حرارتی بوسیله روش های عددی بخصوص بوسیله روش های المان محدود (FEMs)^۱ شبیه سازی شده اند [۳]. برای شبیه سازی این فرایندها ضرورت دارد حوزه های مهندسی مختلف نظیر مکانیک سیالات، انتقال حرارت، تبرید، گرمایش و سایر فرایندهای متالورژیکی بعلاوه روش های عددی کامپیوتری شناخته شوند. تاکنون فرایندهای مختلف سخت کردن و عملیات حرارتی از جمله کوئنچ، سخت کردن (سطحی)، آنیل کردن، بازگشت دادن، کربوره کردن و نیترووره کردن به روش های FEMs مدل سازی شده اند. شکل ۲ تعداد مقالات منتشر شده در این زمینه را بصورت مقایسه ای نشان می دهد. چنانچه ملاحظه می شود از تعداد ۳۵۰ مقاله منتشر شده در این خصوص (طی سالهای ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۱ میلادی)، بیش از ۲۰۰ مقاله مربوط به کوئنچ، حدود ۷۰ مقاله مربوط به سخت کردن (سطحی) است و سهم بقیه فرایندها (از جمله کربوره و نیترووره کردن) بسیار ناچیز است.

نیتراسیون (گازی و پلاسمایی) از جمله فرایندهای مهندسی سطح است که در سالهای اخیر به مدل سازی آن توجه ویژه ای مبذول شده است. در سال ۱۹۹۶، مدل سازی نیتراسیون توسط آقایان «بل و سان» مطرح شد [۴]. آنها نشان دادند که میتوان فرایند نیتراسیون پلاسمایی را بوسیله روش های کامپیوتری مدل سازی نمود. تأکید آنها در این پژوهش بر مدل سازی ظرفیت بارپذیری قطعات نیتریده شده بمنظور کاربردهای تریبولوژیکی بوده است. آنها در سال ۱۹۹۷ با توجه به تشکیل لایه سفید در سطح قطعات نیتریده شده، مدل خود را تا حدی توسعه دادند به گونه ای که توزیع غلظت نیتروژن و شرایط مرزی مرتبط با آن از جمله پتانسیل نیتروژن در سطح مورد بررسی قرار گیرد [۵]. آنها همچنین با مدل سازی نیتراسیون در مورد دو فولاد کم آلیاژ، تلاش نمودند تا نقش عناصر آلیاژی را نیز در مدل خود لحاظ نمایند ولی فرضیات و ساده سازی های زیاد، باعث دور شدن مدل از شرایط واقعی فرایند شده بود [۶]. این محققین فرض نموده بودند که تمام عناصر نیتریدزا بصورت آزادانه در فاز فریت حل می شوند. به عبارت دیگر، آنها از واکنش بین عناصر آلیاژی با کربن و نیتروژن صرفنظر نموده اند. در سال ۱۹۹۹ دیمیتروف و همکاران، مدلی برای نیتراسیون پلاسمایی در آهن خالص ارائه نمودند [۷]. ادعا شده است که این مدل قابلیت پیش بینی ضخامت لایه های سطحی (لایه های ترکیبی) بر حسب زمان نیتراسیون را دارد. با توجه به عدم لحاظ نمودن حضور کربن و سایر عناصر، مدل آنها برای نیتراسیون فولادهای ساده کربنی و یا آلیاژی قابل کاربرد نیست.

«گان» و همکارانش در سال ۲۰۰۰، مدلی برای بررسی و تحلیل فرایند نیتراسیون در آلیاژهای Fe-V و Fe-Mn ارائه نمودند [۸]. در این مدل که بر اساس روش حجم محدود^۲ استوار است، توجه خاصی به محاسبات ترمودینامیکی و دیاگرامهای فازی شده است. با وجود آنکه در این مدل تا حدودی به عناصر آلیاژی

¹ - Finite Element Methods

² - Finite Volume Method (FVM)

نیتريدزا توجه شده ولی وجود کربن بطور کلی نادیده گرفته شده است. گروه آقایان «بل و سان» با همکاری «یان و زیا» در سال ۲۰۰۰، مدل های قبلی [۴-۶] خود را برای شرایط نیتراسیون پلاسمایی پالسی توسعه دادند [۹]. در این مدل نیز همانند مدل های قبلی تمرکز بر توزیع غلظت نیتروژن در فاز فریت بوده است. «موفویان و جیانگ یان» از گروه آقای بل با ارایه مدل دیگری تلاش نمودند تا توزیع غلظت نیتروژن در لایه های ترکیبی را پیش بینی نمایند [۱۰]. این مدل نیز برای نیتراسیون پالسی آهن خالص ارائه شده و لذا نقش کربن و عناصر آلیاژی در آن نادیده گرفته شده است. بلمونته و همکارانش نیز مدل سازی نیتراسیون را در آهن خالص انجام داده اند [۱۱]. با وجود آنکه در مدل ایشان نقش کربن و عناصر آلیاژی نادیده گرفته شده است ولی آنها موفق شده اند مویلیته و ضریب نفوذ نیتروژن در لایه های ترکیبی دوتایی را محاسبه نمایند.

در سال ۲۰۰۲ «ابراسونیس» و همکارانش به مدل سازی تحلیلی نیتراسیون فولاد زنگ نزن پرداخته اند [۱۲]. اساس مدل سازی آنها بر حرکت جاهای خالی و جایگزینی نیتروژن و عناصر آلیاژی استوار بوده است. به نظر می رسد محاسبات ریاضی ارائه شده توسط آنها بسیار ساده بوده و مدل آزمایشی ایشان از شرایط واقعی فرایند دور است. «دانگ» به مدل سازی عددی قطعات نیترووره شده در فرایند عملیات حرارتی با تأکید بر تحولات حین سرد کردن سریع (کوئنچ) پرداخته است [۱۳]. در مدل ایشان، تحولات ساختاری و تنش های باقیمانده در حین عملیات ترموشیمیایی مورد توجه واقع شده است. در سال ۲۰۰۴ یک محقق روسی نیز به مدل سازی فرایندهای نیتراسیون متمایل شده ولی به نظر می رسد کار تحقیقاتی مهمی در این زمینه انجام نداده است [۱۴]. بنابراین فقط به ذکر مقدمات، فواید، اهمیت و لزوم انجام مدل سازی در فرایند نیتراسیون پرداخته است.

«کدام» و همکارانش مدل سازی نیتراسیون گازی را برای آهن خالص انجام داده اند [۱۵]. آنها سپس با توسعه مدل و با لحاظ نمودن نقش برخی از عناصر نیتريدزا، به مدل سازی فرایند نیتراسیون گازی در آلیاژهای Fe-1%V و Fe-0.5%V پرداخته و دستاوردهای حاصل را با مدل مربوط به نیتراسیون آهن خالص مقایسه نموده اند [۱۶]. در مدل های ایشان نیز نقش کربن و سایر عناصر آلیاژی نادیده گرفته شده است. «وانگ» و «یانگ» نیز به مدل سازی توزیع غلظت نیتروژن در لایه های ترکیبی و نفوذی در مورد آهن خالص روی آورده اند [۱۷]. ظاهراً، تمایز مدل اخیر با مدل های ارائه شده توسط سایر محققین در دمای پایین فرایند نیتراسیون (۳۰۰ °C) است.

«بلمونته» و همکارانش در ادامه تحقیق قبلی [۱۱]، مدل سازی توزیع غلظت در نیتراسیون پلاسمایی را برای آهن خالص انجام داده اند [۱۸] و در تحقیق اخیر از دستگاه طیف سنج نشر نوری^۱ برای بررسی توزیع غلظت نیتروژن در سطح استفاده نموده اند. اواخر سال ۲۰۰۴، «دای یان» و همکارانش مدلی برای رشد لایه

^۱ - Optical Emission Spectroscopy

ترکیبی در فرایند نیتراسیون پلاسمایی یک فولاد کم آلیاژ ارائه نمودند [۱۹]. آنها از دستگاه^۱ GDS برای رسم توزیع غلظت نیتروژن در سطح فولاد مورد نظر استفاده نموده‌اند. در تحقیق ایشان، اکثر متغیرهای فرایند نظیر درجه حرارت و ترکیب گاز ثابت در نظر گرفته شده و عملیات نیتراسیون را در دو زمان ثابت ۲ و ۲۴ ساعت انجام داده‌اند.

در اوایل سال ۲۰۰۵، «کداما» و همکارانش مدلی ساده برای پیش بینی سرعت رشد ترکیب میانی گاماپریم (Fe₄N) در نیتراسیون گازی آهن خالص ارائه نمودند [۲۰]. این مدل همانند بسیاری از مدل‌های دیگر، برای پیش بینی فرایند نیتراسیون پلاسمایی در یک فولاد حاوی کربن و عناصر آلیاژی کاربرد ندارد. در اواسط سال ۲۰۰۵، «کامینگا» و همکارش به ارایه مدلی برای فرایند نیتراسیون در آلیاژهای آهنی شامل Fe-1.62%Mn و Fe-0.55%V مبادرت ورزیدند [۲۱]. آلیاژهای انتخاب شده توسط آنها همان آلیاژهایی است که قبلاً توسط «گان» و همکارانش [۸] جهت مدل سازی نیتراسیون انتخاب شده بود، با این تفاوت که ادعا گردیده مدل اخیر دقیق‌تر از مدل قبلی است. در اواخر سال ۲۰۰۵، «کامینگا» و همکارش تلاش نمودند تا توزیع غلظت نیتروژن را در دو فولاد کم آلیاژ و یک فولاد پرآلیاژ محاسبه نمایند [۲۲]. آنها بسیاری از اطلاعات آزمایشی مورد نیاز را از مراجع دیگر استخراج نموده و با مدل خود مقایسه نموده‌اند. مقایسه مدل با نتایج آزمایشی نشان داده است که مدل آنها نمی‌تواند پاسخگوی شرایط واقعی فرایند باشد. یکی از علل مهم این عدم تطابق ناشی از پیچیدگی‌های مرتبط با تشکیل کاربید و نیتريد‌های آلیاژی است.

تعداد مقاله‌های منتشر شده تا پایان سال ۱۳۸۴ در زمینه نیتراسیون پلاسمایی، مدل سازی نیتراسیون، مدل سازی نیتراسیون پلاسمایی و مدل سازی توزیع غلظت در نیتراسیون (که در بزرگترین بانک الکترونیک علمی جهان^۲ یعنی ScienceDirect جستجو شده) بصورت مقایسه‌ای در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۴ تعداد مقاله‌های منتشر شده (توسط Science Direct) تا پایان سال ۱۳۸۴ در زمینه مدل سازی نیتراسیون (معمولی و پلاسمایی) بر زیرلایه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. بررسی نمودارهای اخیر نشان می‌دهد با وجود آنکه تعداد مقالات منتشر شده تاکنون در زمینه نیتراسیون پلاسمایی بیش از ۶۵۰ مورد است لیکن تعداد مقاله‌های مرتبط با مدل سازی این فرایند خیلی محدود است.

از طرف دیگر، مقاله‌های مرتبط با مدل سازی فرایند نیتراسیون عموماً در مورد زیرلایه‌های مختلف (آهن خالص، تیتانیوم و ...) است و در مورد مدل سازی نیتراسیون پلاسمایی برای فولادهای کم آلیاژ، تحقیقات اندکی انجام گرفته است.

¹ - Glow Discharge Spectroscopy

² - The world's largest electronic collection of science, technology and medicine full text and bibliographic information.

سختی یکی از خاصیت های مهم در مهندسی سطح قطعات صنعتی است که در دهه اخیر مورد توجه خاصی قرار گرفته و مدل های مختلفی برای آن ارائه شده است [۲۳-۳۰]. مدل های ارائه شده در این زمینه عموماً تحلیلی هستند و تاکنون مدل عددی مناسبی برای شبیه سازی سختی پوشش ها ارائه نشده است. بنظر می رسد شبکه های عصبی مصنوعی ابزار مناسبی برای شبیه سازی سختی پوشش ها باشد که نتایج تحقیقات انجام شده توسط نویسندگان در این خصوص در مقاله جداگانه ای ارائه شده است [۳۱].

جمع بندی و نتیجه گیری

از مجموع مطالعات انجام شده و بررسی های بعمل آمده در زمینه کاربرد شبیه سازی در عملیات حرارتی و مهندسی سطح می توان نتایج و پیشنهادهای زیر را بطور خلاصه ارائه نمود:

۱- شبیه سازی فرایند، شبیه سازی خواص و شبیه سازی رفتار در شرایط کاربرد، سه رکن اساسی در شبیه سازی کامل یک سیستم مهندسی سطح است.

۲- فعالیت های تحقیقاتی انجام شده در زمینه شبیه سازی فرایندهای عملیات حرارتی عمدتاً بر شبیه سازی فرایند کوئنچ متمرکز بوده است و در خصوص سایر فرایندها از جمله کربوره و نیترووره کردن فعالیت کمتری صورت گرفته است.

۳- با وجود آنکه فعالیت های تحقیقاتی گسترده ای در زمینه نیتراسیون پلاسمایی صورت گرفته است ولی تعداد مقالات مرتبط با مدل سازی این فرایند خیلی محدود است. مقالات مرتبط با مدل سازی این فرایند نیز عموماً برای زیرلایه های پراکنده بوده است و در مورد مدل سازی نیتراسیون پلاسمایی بر زیرلایه فولاد کم آلیاژ، تحقیقات اندکی انجام گرفته است.

۴- مدل های ارائه شده در زمینه سختی پوشش ها عموماً تحلیلی هستند و تاکنون مدل عددی مناسبی برای شبیه سازی این خاصیت مهم ارائه نشده است.

۵- با توجه به ضرورت انجام شبیه سازی در سیستم های مهندسی سطح و تحقیقات محدودی که در این خصوص صورت گرفته است، زمینه های گسترده ای برای انجام فعالیت های تحقیقاتی در این حوزه وجود دارد.

منابع مراجعه

- [1] O. J. Ilegbusi, M. Iguchi & W. Wahnsiedler; Mathematical and physical modeling of materials processing operations; CHAMPMAN & HALL; 1999.
- [2] T. Bell, K. Mao, Y. Sun, Surface engineering design: modelling surface engineering systems for improved tribological performance, Surface and Coatings Technology 108-109 (1998) 360-368.

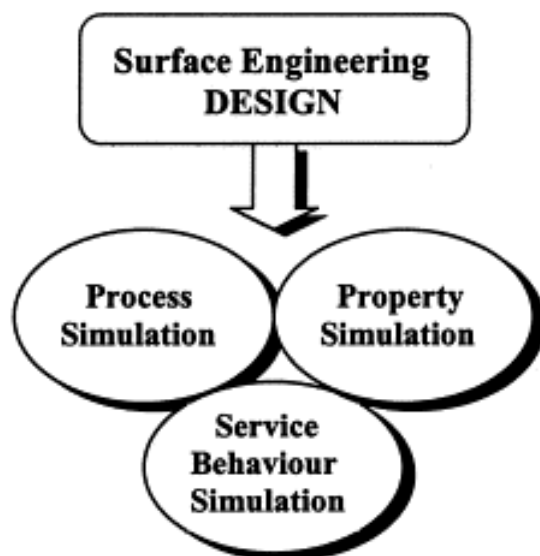
- [3] J. Mackerle, Finite element analysis and simulation of quenching and other heat treatment processes - A bibliography (1976–2001), Computational Materials Science 27 (2003) 313–332.
- [4] T. Bell, Y. Sun, K. Mao and P. Buchhagen, "Modelling plasma nitriding", Advanced Materials & Processes, 150 (2) (Aug. 1996) 40Y-40BB.
- [5] Y. Sun and T. Bell, "Computer prediction of threshold nitriding potential curves", Heat Treatment of Metals, 24 (2) (1997) 43-49.
- [6] Y. Sun and T. Bell, "A numerical model of plasma nitriding of low alloy steels", Mater. Sci. Eng., A224 (1997) 33-47.
- [7] Dimitrov, J. D'Haen, G. Knuyt, C. Quaeys, L.M. Stals, "Modeling of nitride layer formation during plasma nitriding of iron", Computational Materials Science 15 (1999) 22-34.
- [8] M. Goune, T. Belmonte, J.M. Fiorani, S. Chomer, H. Michel, Modelling of diffusion-precipitation in nitrided alloyed iron, Thin Solid Films 377-378 (2000) 543-549.
- [9] M. Yan, J. Yan, L. Xia, Y. Sun and T. Bell, "Mathematical models and computer simulation of nitrogen concentration profiles in pulsed ion nitrided layers", J. Shanghai Jiaotong University, Vol.E-5 (1) (2000) 294-297.
- [10] Mufu Yan et al, Numerical simulation of nitrided layer growth and nitrogen distribution in ϵ -Fe₂-3N, γ '-Fe₄N and α -Fe during pulse plasma nitriding of pure iron, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 8 (2000) 491-496.
- [11] T. Belmonte, M. Goune, H. Michel, Numerical modeling of interstitial diffusion in binary systems, Application to iron nitriding, Materials Science and Engineering A302 (2001) 246–257.
- [12] G. Abrasonis, P. Meheust, J.P. Riviere, L. Pranevicius, C. Templier, Tentative modelling of nitriding with ion beams, the role of surface Effects, Surface and Coatings Technology 151–152 (2002) 344–348.
- [13] Dong-Ying Ju, Chuncheng Liu, Tatsuo Inoue, Numerical modeling and simulation of carburized and nitrided quenching process, Journal of Materials Processing Technology 143–144 (2003) 880–885.
- [14] M. G. Krukovich, Simulation of the Nitriding Process, Metal Science and Heat Treatment, Volume 46, Issue 1-2 (2004) 25 – 31.
- [15] M. Keddam, M.E. Djeghlal, L. Barrallier, & E. Salhi, "Computer simulation of nitrided layers growth for pure iron", Computational Materials Science 29 (2004) 43–48.
- [16] M. Keddam, M. E. Djeghlala, L. Barrallierb and R. Hadjadja, "A computer simulation of nitrogen profiles in Fe–V–N ternary system", Journal of Alloys and Compounds, Volume 378, Issues 1-2, (2004) 163-166.
- [17] Hongtao Wang, Wei Yang, Nitriding simulation for polycrystals of grain size gradient, Scripta Materialia 50 (2004) 529–532.
- [18] T. Belmonte, C. Jaoul, J.N. Borges, Modelling nitrogen atom flux in post-discharge nitriding processes, Surface & Coatings Technology 188–189 (2004) 201–206.

- [19] DIA Ya-nan, YAN Mu-fu, LEI Ting-quan & WU Kun, "Numerical prediction of compound layer growth of steel En40B during plasma nitriding", Transaction of materials and heat treatment, Vol. 25, No. 5, (2004), 776-778.
- [20] M. Keddama, M.E. Djeghlalb and L. Barrallier, A simple diffusion model for the growth kinetics of γ' iron nitride on the pure iron substrate, Applied Surface Science, Volume 242, Issues 3-4, (2005) 369-374.
- [21] J.-D. Kammingaa and G.C.A.M. Janssenb, "Calculation of nitrogen depth profiles in nitrided Fe-Mn and Fe-V", Surface and Coatings Technology, Volume 200, Issues 1-4 (2005) 909-912
- [22] J.-D. Kammingaa, and G.C.A.M. Janssenb, "Calculation of nitrogen depth profiles in nitrided multi-component ferritic steel", Surface and Coatings Technology, Article in Press, Corrected Proof, 2005.
- [23] J.A. Williams, Analytical models of scratch hardness, Tribology International 29-8 (1996) 675-694.
- [24] A. Iost & R. Bigot, Hardness of coatings, Surface And Coating Technology 80 (1996) 117-120 .
- [25] E.S. Puchi-Carbera, A new model for the computation of the composite hardness of coated systems, Surface And Coating Technology 160 (2002) 177-186.
- [26] J.V. Fernades et al; A model for coated surface hardness; Surface and Coating Technology 131 (2000) 457-461.
- [27] J.R. Tuck et al, Modelling of the hardness of electroplated nickel coating on copper substrate, Surface And Coating Technology 127 (2000) 1-8 .
- [28] S.K. Bull et al, Modelling of the indetation response of coatings and surface treatments, Wear 256 (2004) 857-866 .
- [29] C.K. Lin et al, Simulation of hardness testing on plasma-sprayed coatings, J. Am. Cerm. Soc. 78-5 (1995) 1406-1410 .
- [30] Z.H. Hu, Mechanical charaterisation of coatings and composites- Depth sensing indentation and finite element modelling, Doctoral Dissertaion, Royal Institute Of Technology, Stockholm, Sweden, 2004.

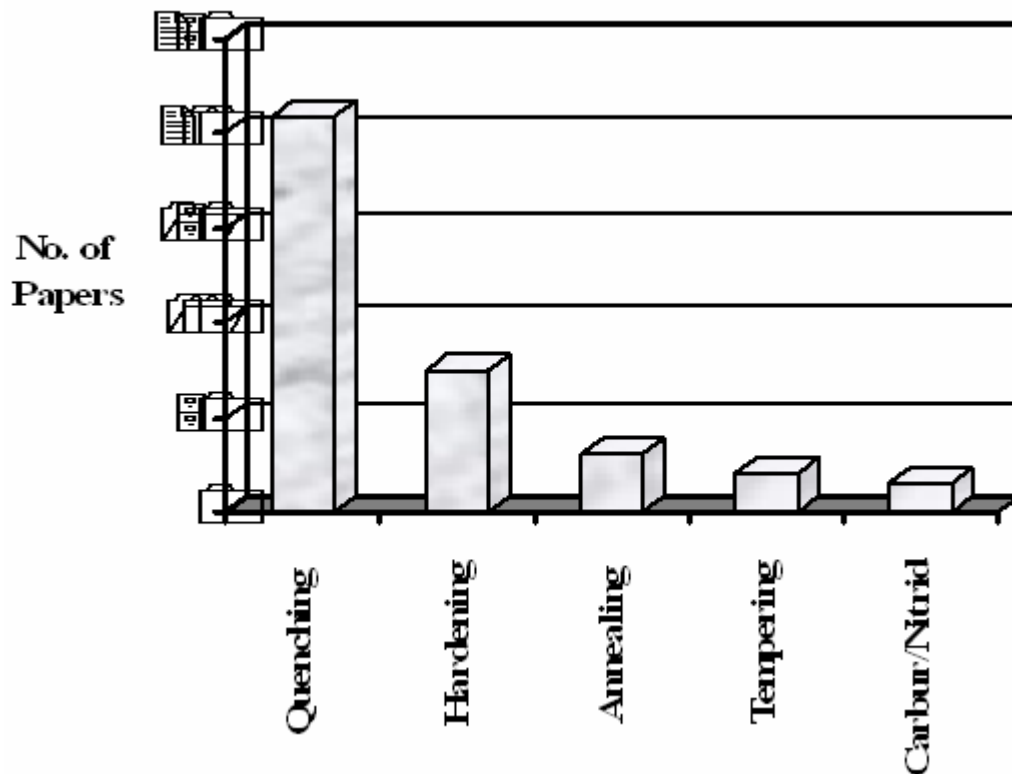
[۳۱] سید رحمان حسینی و احمد کرمانپور، مدل سازی سختی پوشش ها و کاربرد شبکه های عصبی

مصنوعی، هفتمین سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.

۱۶۰۰ کاربرد شبیه‌سازی کامپیوتری در مهندسی سطح و عملیات حرارتی

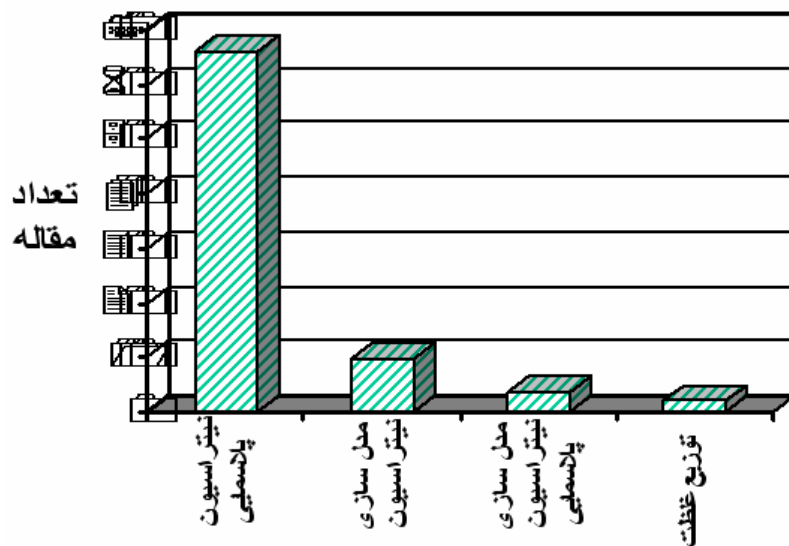


شکل ۱- تصویر شماتیک از شاخه‌های طراحی و شبیه‌سازی در مهندسی سطح [۲].

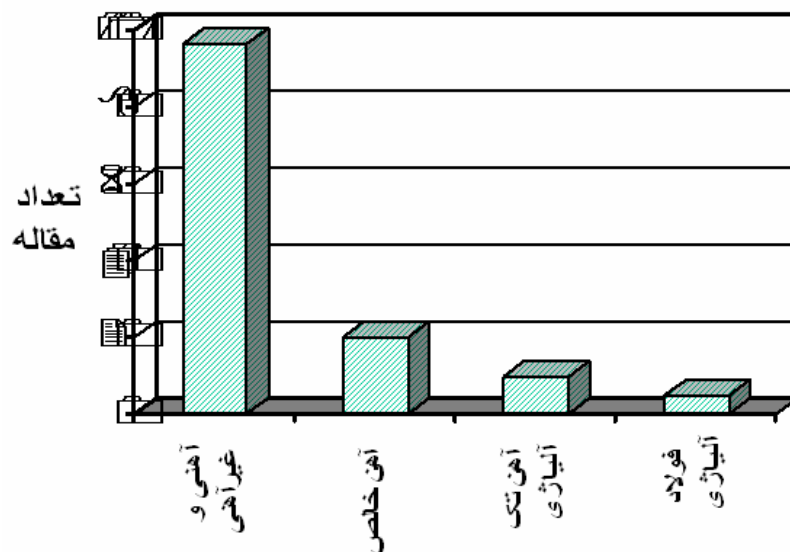


شکل ۲- تعداد مقاله‌های منتشر شده در زمینه شبیه‌سازی فرایندهای عملیات حرارتی به روش المان محدود در سالهای

۱۹۷۶ تا ۲۰۰۱ میلادی [۳]



شکل ۳- تعداد مقاله های منتشر شده در زمینه نیتروژن پلاسمایی، مدل سازی نیتروژن، مدل سازی نیتروژن پلاسمایی و مدل سازی توزیع غلظت در نیتروژن



شکل ۴- تعداد مقاله های منتشر شده (توسط Science Direct) در زمینه مدل سازی نیتروژن (معمولی و پلاسمایی) بر زیرلایه های مختلف.