

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده‌ی برق و کامپیوتر

تشخیص خواص مکانیکی ورق‌های فولاد دی کم کربن بر اساس پارامترهای مغناطیسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق

گرایش قدرت - سیستم

مریم افتخاری

استاد راهنما

دکتر مهدی معلم



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده‌ی برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق خانم مریم افتخاری
تحت عنوان

تشخیص خواص مکانیکی ورق‌های کم کربن براساس پارامترهای مغناطیسی

در تاریخ ۱۳۸۸/۱۲/۲۵ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر مهدی معلم

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه

دکتر سعید صدری

۲- استاد مشاور پایان‌نامه

دکتر جعفر قیصری

۳- استاد داور

دکتر حسین مناجاتی

۴- استاد داور

دکتر سید محمود مدرس هاشمی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

به نام یگانه هستی بخش

از دست و زبان که بر آید

کز عهده شکرش به در آید

اینک که به فضل الهی توفیقی حاصل شد تا در مقام دانش پژوهی کوچک در عرصه گسترده علم و دانش قدمی بگذارم، بر خود لازم می دانم، مراتب تشکر و قدردانی را از اساتید ارجمندم آقایان دکتر مهدی معلم و دکتر سعید صدری که در این راه با صبوری و مهرورزی یاری گر من بودند، ابراز نمایم و برای ایشان از درگاه ایزد منان آرزوی سلامت، عمری پر بار و توفیق روز افزون مسألت نمایم. همچنین از اساتید محترم داور، جناب آقای دکتر قیصری و جناب آقای دکتر مناجاتی که زحمت قرائت، تصحیح و داوری این پایان نامه را متقبل شدند، سپاس گذاری می کنم.

در ضمن لازم به ذکر است که این پروژه به سفارش بخش تحقیق و توسعه شرکت فولاد مبارکه اصفهان و با حمایت های مالی این شرکت انجام شده است و لذا نمونه آزمایشگاهی ساخته شده در این شرکت نصب و راه اندازی می شود.

در پایان از تمامی اعضاء خانواده ام که همواره در راه تحصیل و کسب علم و دانش مشوق من بوده و در این راه از هیچ کمک و یاری دریغ نکرده اند، تشکر نموده و سلامتی ایشان را از خداوند متعال خواهانم.

کلیه حقوق مادی مرتب بر نتایج مطالعات،
و ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم ہے

ہمسفر عزیزم امیر

بہترین ہمراہ من

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	پنج
چکیده	۱
فصل یکم: مقدمه	
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ مروری بر کارهای انجام شده	۴
۳-۱ روند مطالب ارائه شده	۷
فصل دوم: آشنایی با مفاهیم مغناطیسی	
۱-۲ مواد فرومغناطیس	۸
۲-۲ هیستریزیس	۹
۳-۲ نويز بار کهاوزن مغناطیسی (MBN)	۱۲
فصل سوم: آشنایی با شاخص‌های مکانیکی و ارتباط این شاخص‌ها با پارامترهای مغناطیسی	
۱-۳ مقدمه	۱۴
۲-۳ معرفی خواص مکانیکی	۱۴
۱-۲-۳ استحکام تسلیم	۱۵
۲-۲-۳ استحکام کششی	۱۶
۳-۲-۳ ازدیاد طول کل	۱۶
۳-۳ پارامترهای ریزساختاری تأثیرگذار بر خواص مکانیکی ورق‌های فولادی	۱۷
۱-۳-۳ نوع فاز و مقدار کمی آنها	۱۷
۲-۳-۳ دانسیته نابجایی	۱۸
۳-۳-۳ مرزدانه	۱۹
۴-۳-۳ کار سرد	۲۰
۵-۳-۳ استحکام دهی محلول جامد یا استحکام دهی از ذرات ریز	۲۱
۶-۳-۳ بافت	۲۱
۷-۳-۳ تنش باقیمانده	۲۳
۴-۳ تاثیر ریز ساختار بر شاخصهای مغناطیسی	۲۵
۱-۴-۳ اندازه دانه	۲۵
۲-۴-۳ دانسیته نابجاییها	۲۶
۳-۴-۳ رسوبات ریز	۲۷
۴-۴-۳ تنش باقیمانده	۲۷
۵-۴-۳ بافت	۲۸
۵-۳ بررسی چند نمونه تجربی از تأثیر تغییرات خواص ریزساختاری بر خواص مغناطیسی	۲۹
۶-۳ ارتباط خواص مکانیکی و مغناطیسی	۳۰

۳۱	نتیجه گیری.....	۷-۳
فصل چهارم: روش‌های اندازه‌گیری حلقه هیستریزس و انتخاب روش مناسب		
۳۲	بررسی روش‌های اندازه‌گیری منحنی هیستریزس	۱-۴
۳۳	روش حلقه بسته	۱-۱-۴
۳۳	روش اپشتاین	۲-۱-۴
۳۴	روش تست تک ورق	۳-۱-۴
۳۵	روش‌های دیگر.....	۴-۱-۴
۳۶	طرح‌های پیشنهادی و بررسی آنها	۵-۱-۴
۳۸	شیبه سازی طرح‌های پیشنهادی و بررسی نتایج آن	۲-۴
۳۸	آنالیز اجزاء محدود	۱-۲-۴
۳۹	مدلسازی طرح تهیه شده	۲-۲-۴
۴۲	شیبه سازی طرح‌های پیشنهادی	۳-۴
۴۲	مدل شماره ۱	۱-۳-۴
۴۳	مدل شماره ۲	۲-۳-۴
۴۶	مدل شماره ۳	۳-۳-۴
۴۸	مدل شماره ۴	۴-۳-۴
۵۰	مدل شماره ۵	۵-۳-۴
۵۲	مدل شماره ۶- روش انتخابی و نتایج شیبه سازی	۴-۴
فصل پنجم: پردازش سیگنال برای تشخیص مشخصه‌های پاسخ منحنی مغناطیسی		
۵۹	تبدیل فوریه	۱-۵
۶۱	تحلیل فوریه سیگنال با استفاده از تبدیل فوریه گسسته زمان	۲-۵
۶۵	اثر پنجره بندی روی تحلیل فوریه سیگنالهای تصادفی	۳-۵
۶۸	اثر نمونه برداری طیفی	۴-۵
۷۱	الگوریتمی سریع جهت محاسبه DFT	۵-۵
۷۲	استفاده از الگوریتم DFT در تعیین محتوای فرکانسی سیگنالهای استخراجی	۶-۵
فصل ششم: معرفی ساختار سیستم اندازه‌گیری و شرح نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های انجام شده		
۷۴	بررسی اولیه تجربی نتایج تئوری	۱-۶
۷۷	معرفی ساختار فنی دستگاه	۲-۶
۷۸	شرح برخی واحدها	۳-۶
۷۸	واحد پیشپردازش	۱-۳-۶
۷۸	شبکه عصبی مصنوعی	۲-۳-۶
۸۳	شرح شبکه عصبی به کار رفته	۳-۳-۶
۸۴	نتایج حاصل از تست ۱۰ نمونه ورق فولادی متفاوت	۴-۳-۶
۹۵	مقایسه تاثیر پارامترهای مغناطیسی بر پارامترهای مکانیکی	۵-۳-۶
۹۷	نتیجه گیری و پیشنهادات	۴-۶
۱۰۰	مراجع	

چکیده

علاوه بر رشد روز افزون صنعت فولاد، افزایش کیفیت محصولات تولیدی به منظور بقا در بازار رقابتی امروز جهان، باعث شده نیاز بیشتری به روش‌های جدید کنترل کیفیت تولید احساس شود. لذا شرکت‌های تولید کننده فولاد، تمایل زیادی به جایگزینی روش‌های مخرب (که بسیار پر هزینه و وقت گیر می‌باشند) با روش‌های غیرمخرب که در کنار خط تولید و یا به صورت آنلاین انجام می‌شوند، دارند. به این ترتیب، روش‌های غیرمخرب امکان کنترل تولید در تمام طول فرایند تولید را فراهم می‌کنند. از آنجا که در صنعت فولاد پارامترهای مکانیکی از جمله استحکام تسلیم^۱ و استحکام حدنهایی^۲ به عنوان شاخص‌های تعیین کیفیت محصول به کار می‌روند، در این پروژه در ابتدا با بررسی ریزساختار آلیاژهای فولادی فرومغناطیس و ارتباط آن با پارامترهای مکانیکی از یک طرف و نیز تاثیر این ریزساختارها بر خواص مغناطیسی فولاد از طرف دیگر، برقراری ارتباط مابین پارامترهای مغناطیسی و مکانیکی ممکن شد. بررسی‌ها نشان داد پارامترهای حلقه هیستریزس می‌توانند شاخص‌های مناسبی جهت تخمین پارامترهای استحکام تسلیم و استحکام حدنهایی باشند. لذا سیستمی جهت تعیین پارامترهای مذکور طراحی و ساخته شد. همچنین اندازه‌گیری و تست نمونه‌های مختلف نشان داد، هارمونیک‌های فرد جریان سیم‌پیچ تحریک و ولتاژ سیم‌پیچ اندازه‌گیر را می‌توان به عنوان شاخص‌هایی برای پیش‌بینی خواص مکانیکی استفاده کرد. به این ترتیب شاخص‌های تعیین پارامترهای مکانیکی انتخاب شدند و به عنوان ورودی‌های شبکه عصبی طراحی شده جهت تخمین خواص مکانیکی مورد استفاده قرار گرفتند. آموزش، اعتبارسنجی و تست شبکه عصبی طراحی شده براساس داده‌های مربوط به تست ۵۰۰ نمونه متفاوت از ورق‌های فولادی شرکت فولاد مبارکه انجام شد و نشان داد این سیستم قادر است با خطای قابل قبولی به تخمین پارامترهای مکانیکی بپردازد.

کلمات کلیدی: ۱- اندازه‌گیری خواص مکانیکی ۲- پارامترهای مغناطیسی ۳- خواص ریزساختاری ورق‌های فولادی فرومغناطیس

¹ Yeild

² Ultimate Tensile Strength

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

موفقیت یا شکست بسیاری از فعالیت‌های مهندسی بستگی به انتخاب موادی دارد که دارای ویژگی‌هایی متناسب با نیاز خاص ما باشد. تمدن‌های ابتدایی محدود به مواد طبیعی موجود در محیط بودند و با ویژگی‌های نامناسب این مواد نیز کنار می‌آمدند. با پیشرفت تمدن گستره مواد وسیع‌تر شد، به گونه‌ای که هم‌اکنون، موادی با ویژگی‌های متنوع و قابل تغییر ساخته می‌شوند. آلیاژ سازی و عملیات حرارتی و پختن سرامیک‌ها در کوره بعضی از شیوه‌هایی هستند که اساساً خواص ماده را تغییر می‌دهند. آنچه اکنون پیشرفت در تولید مواد گوناگون را نسبت به گذشته سرعت می‌بخشد، دانش حاصل شده از ارتباط مستقیم خواص مواد با تغییرات در ساختار آن‌ها می‌باشد؛ در حالی که که موفقیت‌های نخستین در تغییر مواد، به میزان زیادی از آزمایش و خطا نتیجه شده بود. به این ترتیب، اکنون که امکان تهیه مواد با ویژگی‌های متنوع فراهم شده، امکان اجرای طرح‌های بزرگ نیز به وجود آمده است. از دیدگاه تولید، فلزات مهمترین دسته مواد هستند. بیش از ۵۰ عنصر شناخته شده در طبقه فلزات قرار می‌گیرند و در حدود چهل فلز اهمیت تجاری دارند. فلزات دارای خواصی از جمله استحکام، قابلیت هدایت زیاد گرما و برق، جلا، قابلیت تغییر شکل زیاد، بدون شکستن و جرم ویژه نسبتاً زیاد هستند که این کاربرد مهندسی‌شان را افزایش می‌دهد.

هنگامی که فلزات در اثر سرد شدن جامد می‌شوند، اتم‌ها در موقعیت‌های منظم شبکه‌های هندسی قرار می‌گیرند و به عبارتی متبلور می‌شوند. اغلب فلزات فقط به یک شکل متبلور می‌شوند و تنها تعداد کمی از آن‌ها در حالت جامد دارای دو یا چند شبکه بلورین می‌باشند این فلزات را چندگونه می‌گویند. جالب‌ترین نمونه چندگونگی در آهن دیده می‌شود و به سبب همین خاصیت است که آهن از مهمترین فلزات می‌باشد. به عبارت

دیگر می‌توان گفت که آلیاژهای آهنی حکم ستون فقرات صنعت را در تمدن بشری داشته‌اند و انواع فراوانی از آن‌ها در طی سال‌ها برای رفع نیازهای مختلف صنعتی به وجود آمده‌اند. یکی از این آلیاژها، فولادهای کم‌کربن است. فولادهای کم‌کربن حاوی کمتر از ۰/۲ درصد کربن هستند و دارای قابلیت شکل‌پذیری (با کار سرد می‌توان استحکامشان را بالا برد) و جوشکاری مناسب می‌باشند [۱]. از آنجا که این ترکیب محصول عمده بسیاری از کارخانجات تولید فولاد و از جمله شرکت فولاد مبارکه اصفهان را تشکیل می‌دهد، حل مسائل مربوط به تولید این آلیاژ مورد توجه بسیار قرار گرفته و این پروژه نیز در راستای افزایش کیفیت این محصول تعریف شده است.

از آنجا که تضمین کیفیت ورق‌های سردنوردیده، نیازمند تکنولوژی تولید پایدار و مانیتورینگ دائمی کیفیت محصولات می‌باشد، تعیین مشخصات مکانیکی نمونه‌های فولادی ضروری است. بدین منظور آزمایش‌های مختلفی از جمله کشش تک محوری برای بررسی خواصی چون حد نهایی کشش، استحکام تسلیم^۱ و ازدیاد طول^۲ بر روی فولاد تولیدی انجام می‌شود. برای تعیین این خواص نمونه‌های استاندارد از ابتدا، میان و انتهای کلاف تهیه می‌شود و آزمایش به صورت مخرب، انجام می‌گیرد. این بدین معناست که در روش مخرب، خواص مکانیکی نقاط ابتدایی، میانی و انتهای کلاف، به تمام طول آن اختصاص می‌یابد و گرید^۳ کل کلاف براساس اطلاعات این سه نقطه تعیین می‌گردد که در بسیاری از موارد منجر به اختصاص گرید کمتری به کل کلاف شده و به این ترتیب کلاف به قیمت پایین‌تری به فروش می‌رسد و یا گرید آن توسط آزمایشگاه تولید مورد قبول قرار گرفته، در حالی که قسمت زیادی از طول آن دارای مشخصه‌های مکانیکی لازم نبوده و رضایت مشتریان را برآورده نمی‌کند. همچنین از آنجا که این روش دارای فرآیندی زمان‌بر و پرهزینه است و نیازمند از بین بردن مقادیر زیادی از ورق‌های تولید شده می‌باشد، تلاش زیادی برای یافتن روش‌های مناسب‌تر انجام گرفته است. به عنوان نمونه در آغاز دهه ۱۹۶۰، در کارخانه متالورژی Magneto garsk مصرف فلز برای انجام آزمایشات تعیین کیفیت حدود ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ تن در سال بوده است که ۲۰۰ نفر پرسنل نیز در انجام این آزمایش‌ها مشارکت داشته‌اند. از طرفی تأخیر ایجاد شده در مرحله انجام آزمایش‌های مکانیکی باعث تأخیر در خروج محصولات نیز خواهد شد که باعث کاهش بهره‌وری می‌گردد [۲]. به این ترتیب روشن است که استفاده از روش‌های غیرمخرب جهت تشخیص خواص مکانیکی، در کنترل کیفیت سریع و دقیق محصولات بسیار سودمند بوده و گذشته از این می‌توان به کمک این روش تمام نقاط محصول را از نظر کیفی ارزیابی کرد.

دو کاربرد عمده برای ارزیابی‌های غیرمخرب^۴ (NDT) وجود دارد. اولین کاربرد تشخیص عیوب ماده مانند خراش‌ها، ترک‌ها و غیره است که پیشینه طولانی دارد. اما کاربرد دوم که کاربرد جدیدی محسوب می‌شود، تعیین خواص مکانیکی مواد است.

از جمله روش‌های غیرمخرب موجود می‌توان به روش‌های مافوق صوت^۵، آکوستیکی^۱ و روش‌های مغناطیسی تست جریان گردابی^۲، اندازه‌گیری حلقه هیستریزس و نویز بارکهاوزن^۳ مغناطیسی اشاره کرد. مقایسه

¹ Yield Strength

² Elongation

³ Grade

⁴ Non-Destructive Testing

⁵ Ultrasonic test

روش‌های گوناگون نشان می‌دهد که روش‌های مافوق صوت، آکوستیکی و جریان گردابی جهت تعیین خرابی‌ها، روش‌های مناسب‌تری هستند و روش‌های اندازه‌گیری حلقه هیستریزس و نویز بارکهاوزن مغناطیسی از مناسب‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های تشخیص پارامترهای مکانیکی می‌باشند.

۲-۱ مروری بر کارهای انجام شده

بر اساس آنچه جی.وی.بیدا^۴ در مقاله [۳] در مروری بر کارهای گذشته ذکر کرده، در سال ۱۹۴۵ ارتباط خواص مکانیکی و پارامتر نیروی ضد مغناطیسی (H_c) برای فولاد KII ۱۰ توسط لیکن^۵ اثبات شد و حساسیت دستگاه اندازه‌گیری H_c نسبت به فاز سمیتت خالص، اندازه دانه‌های فریتی و درصد کربن ملاحظه گردید. در این زمان ارتباط مستقیم پارامتر استحکام تسلیم و H_c دیده شد. در اواسط دهه ۱۹۶۰ مطالعاتی مبنی بر ارتباط مابین استحکام حد نهایی، استحکام تسلیم، سختی و ازدیاد نسبی طول لوله‌های فولادی کربن دار و پارامتر مغناطیسی آن توسط میخیو^۶ و همکارانش انجام شد و نشان داده شد، با افزایش پارامتر H_c ، پارامتر استحکام تسلیم افزایش و پارامتر ازدیاد نسبی طول کاهش می‌یابد.

استوارتزنדרوبر^۷ و همکارانش در سال ۱۹۹۷ نشان دادند، در فولاد کم کربن H_c با مجذور کرنش پلاستیک^۸ افزایش می‌یابد [۴].

جی.وی.بیدا در مقاله [۵] با نگاهی بر کارهای انجام شده در کنترل کیفیت قطعات فولادی کربن دار و کم آلیاژ سخت شده و عملیات حرارتی دیده، نشان داد، پارامترهای H_c و نفوذپذیری مغناطیسی با افزایش دمای عملیات حرارتی کاهش می‌یابند و به عبارتی تغییر پارامترهای مغناطیسی با تغییر خواص ریزساختاری را مطرح کرد. از دیگر اقدامات او می‌توان به بررسی کاربرد اندازه‌گیری H_c در تعیین استحکام و پارامترهای پلاستیکی و ویسکوزیتی فولادهای کم کربن و پر کربن در سال ۲۰۰۰ اشاره کرد. وی توانست عمق و سختی لایه‌های سطحی سخت شده در ورق‌های فلزی را با اندازه‌گیری H_c تعیین کرده و بر آن اساس فولادهای مختلف را دسته‌بندی کند [۶].

وی.اف.نویکف^۹ و همکارانش در سال ۲۰۰۰ توانستند، به ارتباطی تحلیلی مابین تغییرات پارامتر H_c (اندازه‌گیری شده در جهت تنش کششی و در جهت عمود بر آن) و اندازه تنش دست پیدا کنند و صحت این رابطه را برای فولادهای کم کربن نشان دادند [۷].

¹ Acoustic test

² Eddy Current test

³ Magnetic Barkhausen noise

⁴ G.V.Bida

⁵ Leikin

⁶ Mikheev

⁷ Swartzendruber

⁸ Plastic strain

⁹ V.F.Novikov

در سال ۲۰۰۴ وی.جی.کالیو^۱ و همکارانش به اندازه‌گیری H_c در فولادهای کم کربن در شرایط کشش پلاستیک و فشار الاستیک در شرایط اعمال فشار با سرعت کم و به طور ناگهانی پرداختند و نشان دادند، کمی افزایش در مقدار H_c در زمان اعمال بار به سبب افزایش چگالی نابجایی‌ها است، در حالی که افزایش ناگهانی این پارامتر بعد از برداشتن کشش پلاستیک به سبب تنش باقیمانده در نمونه می‌باشد. همچنین نشان دادند تغییرات H_c در زمان اعمال بار به ازای تغییر شکل کمتر از ۲/۵٪ بسیار مشهود بوده در حالی که برای تغییر شکل بالاتر از ۱۰٪ ناچیز می‌باشد [۸].

آرای.ساوری^۲ در سال ۲۰۰۵ مقایسه‌ای مابین روش‌های مغناطیسی و روش تفرق اشعه ایکس جهت تخمین کسر حجمی فاز آستنیت باقیمانده در ورق‌های آلیاژی فولادی با استحکام بالا در جهت محور تنش کششی در دمای $(-40^{\circ}C) - 20^{\circ}C$ انجام داد و به این نتیجه رسید که در صورت کم بودن میزان آستنیت (کمتر از ۵-۷٪) روش مغناطیسی روش مناسب‌تری است [۹].

کمال داوت^۳ در سال ۲۰۰۶ تلاش کرد، خواص فولاد عملیات حرارتی دیده را به کمک نوین بارکهاوزن مغناطیسی استخراج کند و در واقع سعی کرد خواص ریزساختاری این فولاد را به کمک روش غیرمخرب نوین بارکهاوزن مغناطیسی بدست آورد [۱۰].

پالا^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ نشان دادند، تغییر گرید فولادهای کم کربن با اعمال تنش‌های پلاستیکی بعد از بار برداری منجر به تغییر پوش سیگنال نوین بارکهاوزن مغناطیسی و پهن شدگی حلقه هیستریزس می‌شود [۱۱].

تاکاهاشی^۵ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ توانستند نشان بدهند، بین پارامتر H_c و مقدار اندازه‌گیری شده سختی (در مقیاس ویکرز) و دمای انتقال تردی به نرمی برای فولاد کم کربن ارتباط خطی وجود دارد [۱۲]. همچنین ورتسی^۶ و همکارانش در سال ۲۰۰۷ با اندازه‌گیری روی نمونه‌های تغییر شکل پلاستیک یافته به روش نورد سرد ۵ مرحله‌ای، توانستند ارتباط خطی سختی (در مقیاس ویکرز) و دمای انتقال تردی به نرمی را ثابت کنند [۱۳].

استپاکف^۷ و همکارانش در سال ۲۰۰۷ ارتباط نفوذپذیری مغناطیسی و نوین بارکهاوزن مغناطیسی را برای فولادهای کم کربن بررسی کردند. هدف آنها استخراج پارامترهای گسترده‌تر در تست‌های غیرمخرب و استاندارد کردن تکنیک اندازه‌گیری نوین بارکهاوزن برای فولاد بود [۱۴].

مارتینز.دی.گورنو^۸ در سال ۲۰۰۶ تلاش کرد، به کمک تعیین پارامترهای حلقه هیستریزس و نوین بارکهاوزن مغناطیسی به تعیین پارامترهای ریزساختاری در زمان انجام عملیات حرارتی بر روی فولادهای کم کربن نورد سرد شده پیردازد و اثر بازیابی و تبلور مجدد را به کمک پارامترهای حلقه هیستریزس و نوین بارکهاوزن

¹ V.G.Kuleev

² R.A.Savray

³ Kemel Davut

⁴ J.Pala

⁵ S.Takahashi

⁶ G.Vertesy

⁷ O.Stupakov

⁸ A.Martinez-de-Guerenu

مغناطیسی بر روی تغییر ساختار بررسی کند. وی وابستگی این پارامترها به خواص ریزساختاری را نشان داد. بررسی اثر بازیابی و تبلور مجدد بر روی تغییر ساختار قبلاً به کمک میکروسکپ‌های الکترونی عبوری^۱ انجام شده بود [۱۵]. همچنین وی در سال ۲۰۰۷ نشان داد که چگونه پارامترهای وابسته به ساختار فولادهای کم‌کربن در زمان بازیابی و تبلور مجدد به کمک پارامترهای مغناطیسی H_c و B_r قابل تعیین است. در این بررسی نشان داده شده H_c با افزایش زمان عملیات حرارتی در زمان بازیابی و تبلور مجدد کاهش یافته و B_r و نفوذپذیری مغناطیسی افزایش می‌یابد [۱۶].

هاوسر^۲ نیز در سال ۲۰۰۸ به بررسی چند نمونه با درصد کاهش ضخامت و زمان بازپخت متفاوت پرداخت و پارامترهای مغناطیسی آن‌ها از جمله H_c و B_r را در شرایطی که نمونه تا حد اشباع مغناطیس شده بود، استخراج کرد. مشاهدات نشان داد H_c (B_r) با افزایش (کاهش) درصد کاهش ضخامت افزایش می‌یابد. همچنین مدت زمان بازپخت در دمای $450^{\circ}C$ اثر چندانی بر مقدار H_c ندارد؛ اما در حالت کلی برای نمونه نورد سرد شده، H_c با افزایش زمان بازپخت کاهش می‌یابد [۱۷].

توجه به عناوین ذکر شده در مراجع بالا نشان می‌دهد، در تمامی این تحقیقات، تلاش برای برقراری ارتباط بین پارامترهای مغناطیسی و ریزساختار انواع فولاد به منظور انجام انواع آزمایش‌های غیرمخرب بوده است. در تمامی این بررسی‌ها هدف پیدا کردن رابطه تحلیلی بین پارامترهای مغناطیسی و خواص ریزساختاری می‌باشد. اما هم‌اکنون با باز شدن مبحث شبکه‌های عصبی مصنوعی، در تخمین پارامترهای مکانیکی نیازی به در دست داشتن رابطه تحلیلی نیست و می‌توان با آموزش یک شبکه عصبی مناسب براساس داده‌های جمع‌آوری شده تخمین مناسبی از انواع پارامترهای ریزساختاری بدست آورد.

کاربن^۳ و همکارانش در سال ۲۰۰۷ موفق شدند، پارامترهای مکانیکی فولاد را با داشتن ترکیبات شیمیایی نمونه و پارامترهایی از جمله، دمای نهایی، دمای کلاف پیچی و ضخامت اسمی محصول نهایی نورد گرم به کمک شبکه عصبی بدست آورند. خطای تخمین برای فولاد ۱۰G۲FB برابر ۶/۱٪ و برای فولاد ۱۷G۱SA-U برابر ۲-۹٪ است [۱۸]. همچنین بطلانی اصفهانی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ توانستند پارامترهای مکانیکی فولاد را براساس ترکیب شیمیایی آن و ویژگی‌های پروسه تولید تخمین بزنند و نیز نحوه تغییرات پارامترهای مکانیکی را بر اساس پارامترهای ورودی بررسی کنند [۱۹].

به این ترتیب با توجه به وابستگی خواص مغناطیسی و ریزساختارهای محصولات فولادی، در این پروژه ابتدا امکان برقراری ارتباط بین خواص مکانیکی و پارامترهای مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت و پس از اطمینان از این ارتباط، روش‌های موجود اندازه‌گیری پارامترهای مغناطیسی در کنار روش‌های پیشنهادی بررسی شد و نهایتاً با انجام شبیه‌سازی و نیز آزمایش‌های اولیه به کمک دستگاه اپشتاین فولاد مبارکه، روش مناسب انتخاب گردید و نمونه آزمایشگاهی آن ساخته شد. از آنجا که قصد داشتیم از روش‌های هوشمند جهت تخمین خواص مکانیکی بر

¹ Transmission Electron Microscopy

² H.Hauser

³ V.V.Kurban

اساس پارامترهای مغناطیسی استفاده کنیم، پس از ساخت نمونه آزمایشگاهی تست‌های عملی بر روی نمونه‌های فولادی با خواص مکانیکی معین انجام شد و داده‌های مورد نیاز جهت آموزش و تست شبکه عصبی فراهم گردید.

۳-۱ روند مطالب ارائه شده

در فصل دوم به آشنایی با خواص مغناطیسی مواد فرومغناطیس و معرفی حلقه هیستریزس و نویز بارکهاوزن مغناطیسی پرداخته و مهمترین شاخص های مغناطیسی مؤثر در تشخیص خواص مکانیکی، معرفی می‌شوند. همچنین برخی مفاهیم مغناطیسی مورد نیاز در این پروژه نیز به طور مختصر شرح داده خواهند شد.

در فصل سوم شاخص های مکانیکی ورق های نورد شده معرفی شده و ارتباط این پارامترها با ریز ساختار و نیز ارتباط ریزساختار با پارامترهای مغناطیسی بررسی می‌شود و نهایتاً امکان تعیین پارامترهای مکانیکی بر اساس پارامترهای مغناطیسی تایید می‌گردد.

در فصل چهارم روش های اندازه گیری پارامترهای مغناطیسی معرفی شده و پس از مقایسه آنها با روش های پیشنهادی به کمک شبیه سازی های انجام شده، مناسب ترین روش انتخاب شده است.

در فصل پنجم به شرح روش به کار رفته جهت پردازش سیگنال برای تشخیص مشخصه های پاسخ منحنی مغناطیسی پرداخته شده و مشخصات روش به کار رفته در استخراج هارمونیک های سیگنال ذکر گردیده است.

در فصل ششم شرح ساختار سیستم اندازه گیری، مفاهیم شبکه عصبی و مشخصات شبکه طراحی شده، به همراه نتایج حاصل از اندازه گیری ها آورده شده است. در انتها نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد برای ارتقاء سیستم در فصل هفتم ارائه می‌شود.

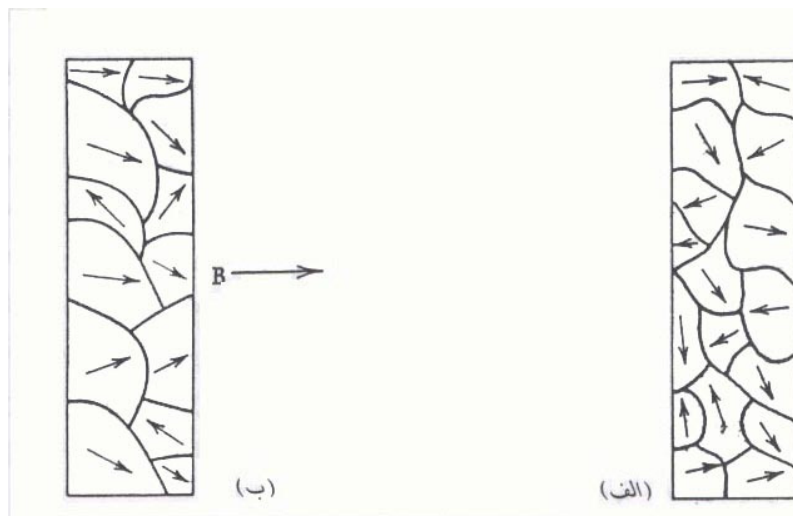
فصل دوم

آشنایی با مفاهیم مغناطیسی

۱-۲ مواد فرومغناطیس

برخی اجسام مانند آهن، نیکل، کبالت و آلیاژهای آنها تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی خارجی به شدت در جهت میدان اعمال شده مغناطیس می‌شوند، به طوری که میدان مغناطیسی در درون این گونه اجسام به مراتب بزرگ‌تر از میدان اعمال شده به آنها است (تا چندین هزار و حتی چندین صدهزار برابر بزرگ‌تر). ماهیت چنین رفتاری در اجسام مزبور به تشکیل خود به خودی حوزه‌های مغناطیسی در نواحی کوچک میکروسکوپی با ابعادی در حدود میکرون تا میلیمتر و حتی سانتیمتر نسبت داده می‌شود که در ادامه به شرح آن خواهیم پرداخت. پدیده مغناطیس شدن خود به خودی را فرومغناطیس و اجسامی را که این پدیده در آنها روی می‌دهد، اجسام فرومغناطیس می‌نامند. پدیده فرومغناطیس، در دمای صفر مطلق به بیشترین میزان خود رسیده و در درجه حرارت بحرانی موسوم به درجه حرارت کوری به صفر می‌رسد. در درجات بالاتر از درجه حرارت کوری خاصیت فرومغناطیسی از بین رفته و جسم به صورت پارامغناطیس رفتار می‌کند. توجه رفتار اجسام فرومغناطیس به کمک نظریه دانشمندی به نام وایس، که در سال ۱۹۰۶ ارائه گردید، امکان پذیر است. براساس این نظریه، در اجسام فرومغناطیس، یک میدان بسیار قوی ناشی از اندرکنش دو قطبی‌های مجاور، کلیه آنها را در نواحی کوچکی موسوم به حوزه، در یک امتداد قرار می‌دهد. حوزه‌ها در حقیقت مغناطیس‌های دائمی بسیار کوچکی هستند که در غیاب یک میدان مغناطیسی خارجی در همه جهات به طور تصادفی توزیع می‌شوند. توزیع تصادفی حوزه‌ها، در شکل (۱-۲-الف) نشان داده شده است. این پدیده ناشی از اصل تمایل همه سیستم‌ها در طبیعت، به باقی ماندن در وضعیت حداقل انرژی است؛ به این ترتیب، یک قطعه جسم فرومغناطیس از نظر مغناطیسی خنثی است (البته بدون در نظر گرفتن پدیده هیستریزیس که در همین فصل شرح آن خواهد آمد). با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی،

حوزه‌هایی که از ابتدا هم‌جهتی بیشتری با میدان خارجی دارند، در ازای کوچک‌تر شدن بقیه حوزه‌ها، گسترش می‌یابند. در صورتی که میدان خارجی به اندازه کافی قوی باشد، برخی حوزه‌ها چرخیده و با میدان خارجی هم‌جهت می‌شوند. شکل (۲-۱-ب) هم‌جهتی نسبی حوزه‌ها با میدان خارجی را نشان می‌دهد. ایجاد حوزه‌های نسبتاً وسیع و هم‌جهت (به طور نسبی) با میدان خارجی به معنای به‌وجود آمدن یک میدان مغناطیسی بسیار قوی‌تر از میدان خارجی در درون جسم است. اگر میدان خارجی ضعیف باشد، پس از برداشتن آن، حوزه‌ها و در نتیجه خود جسم به وضعیتی نزدیک به وضعیت قبل از اعمال میدان برمی‌گردند، ولی اگر میدان خارجی به اندازه کافی قوی باشد، گسترش حوزه‌ها به حدی می‌رسد که دیگر بازگشت به حالت اولیه غیرممکن می‌شود و پس از برداشتن میدان خارجی، جسم مقداری از مغناطیس‌القاء شده در خود را حفظ می‌کند [۲۰].



شکل ۲-۱- اجسام فرومغناطیسی (الف) توزیع تصادفی حوزه‌ها در غیاب میدان خارجی (ب) گسترش و چرخش حوزه‌ها پس از اعمال میدان خارجی و هم‌جهتی نسبی آنها با میدان [۲۰]

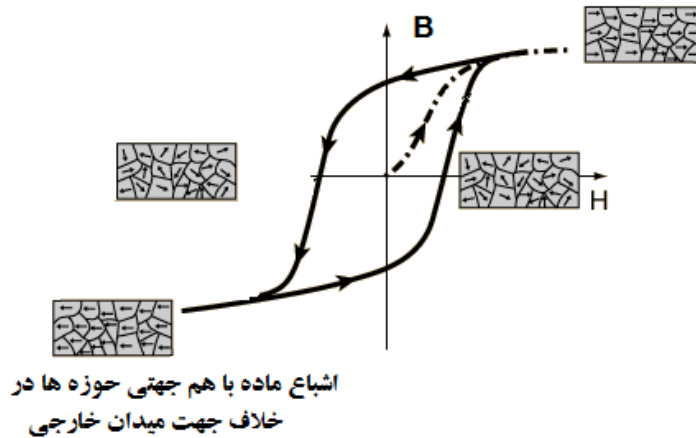
بنابراین، اگر یک جسم فرومغناطیس تحت یک میدان مغناطیسی قوی قرار داده شود، پس از حذف میدان جسم به صورت مغناطیس دائم (آهنربا) عمل می‌کند. این پدیده را که وضعیت کنونی جسم، از نظر مغناطیس بودن به وضعیت مغناطیسی گذشته‌اش بستگی داشته باشد، هیستریزیس می‌نامند (هیستریزیس یک کلمه یونانی به معنای تأخیر است). به عبارتی در اجسام فرومغناطیس بازگشت حوزه‌ها به حالت اولیه توأم با تأخیر است. مبحث هیستریزیس به طور مشروح‌تری در قسمت بعدی مطالعه خواهد شد.

۲-۲ هیستریزیس

قابلیت نفوذ مواد فرومغناطیس، تابعی از میدان بوده و مقدار ثابتی ندارد. در حقیقت، رابطه بین میدان‌های \bar{H} و \bar{B} در این گونه اجسام غیرخطی و توأم با هیستریزیس است. از این رو رابطه بین \bar{H} و \bar{B} عموماً به روش ترسیمی بیان می‌شود. شکل (۲-۲) یک نوع منحنی $\bar{B} - \bar{H}$ را برای اجسام فرومغناطیس نشان می‌دهد. این منحنی،

منحنی هیستریزیس نامیده می‌شود. محور افقی این نمودار شدت میدان مغناطیسی بر حسب آمپر دور بر متر بوده و محور عمودی چگالی شار، بر حسب تسلا می‌باشد.

اشباع ماده تا هم جهت شدن حوزه‌ها
در جهت میدان مغناطیسی



شکل ۲-۲- نمایش حلقه هیستریزیس

این شکل به خوبی نشان می‌دهد که مغناطیس شدن اجسام فرومغناطیس طی مراحل زیر به صورت زیر به ترتیب عبارتست از:

۱- گسترش برگشت پذیر حوزه‌ها

۲- گسترش برگشت ناپذیر حوزه‌ها

۳- چرخش حوزه‌ها

پدیده دیگری که در این شکل به خوبی نمایان است، حافظه‌دار بودن حلقه هیستریزیس است. اکنون به خوبی آشکار است که اگر یک جسم فرومغناطیس در اختیار داشته باشیم، وضعیت مغناطیسی کنونی آن به تاریخچه گذشته‌اش بستگی دارد (به این معنی که قبلاً تحت تأثیر چه میدانی و به چه نحو قرار داشته است). پس از معرفی ماهیت حلقه هیستریزیس، به شناخت پارامترهای متمایز کننده حلقه‌های هیستریزیس می‌پردازیم.

پارامترهای مغناطیسی که به طور عمومی برای ارزیابی مواد فرومغناطیس بکار برده می‌شوند، اغلب برگرفته از حلقه هیستریزیس می‌باشند. این پارامترها عبارتند از: پسماند^۱ (B_r)، نیروی ضد مغناطیس^۲ (H_c)، نفوذپذیری مغناطیسی^۳، اشباع^۴ و تلفات انرژی مغناطیسی در حلقه^۵ (Wh)، که تعریف هر کدام از آنها در زیر آمده است.

Br: مفهوم فیزیکی پسماند، میزان چگالی شار مغناطیسی در ماده فرومغناطیس، در غیاب میدان مغناطیسی خارجی است؛ که از مغناطیس شدگی قبلی، باقی مانده است. نمایش این پارامتر، محل برخورد حلقه هیستریزیس با

¹ Remnance

² Coercive force

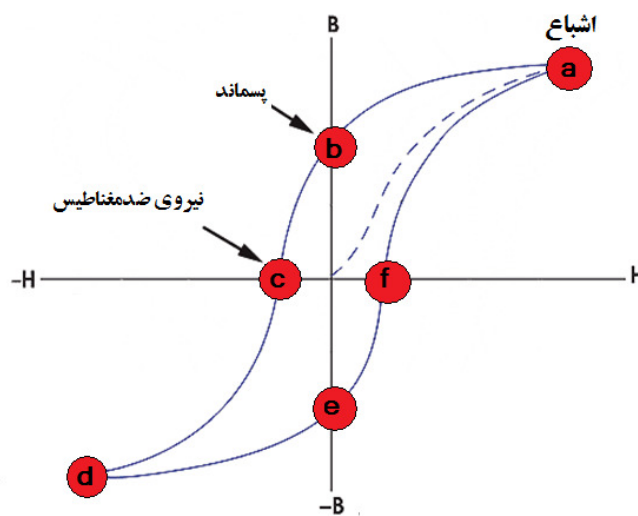
³ Permeability

⁴ Saturation

⁵ Hysteresis loss

محور چگالی شار مغناطیسی (نقاط b و e در شکل (۲-۳)) می‌باشد. این کمیت با واحد Wb/m^2 بیان می‌شود و به حداکثر شدت میدان اعمال شده وابسته است. وجود شار پسماند در یک ماده فرومغناطیس، وجود آهنرباهای دائم را ممکن می‌سازد

H_c : این پارامتر محل برخورد حلقه هیستریزس با محور شدت میدان مغناطیسی می‌باشد (نقاط c و f در شکل (۲-۳)). در واقع برای صفر کردن چگالی شار مغناطیسی یک نمونه و یا به عبارتی برگرداندن حوزه‌های مغناطیسی به طوری که چگالی شار مغناطیسی نمونه صفر شود، لازم است، شدت میدان مغناطیسی H_c در جهت مخالف اعمال شود. H_c مورد نیاز، نیروی ضد مغناطیسی نامیده می‌شود و بر حسب A/m بیان می‌گردد. این کمیت نیز به حداکثر مقدار شدت میدان مغناطیسی اعمال شده وابسته است.



شکل ۲-۳- منحنی هیستریزس [۲۱]

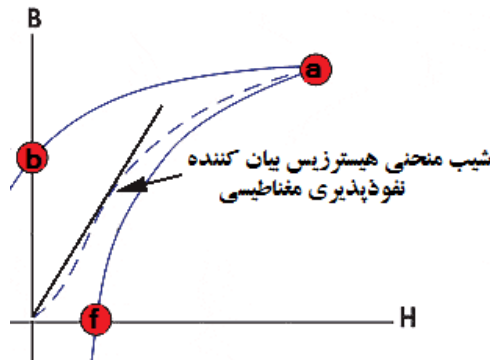
اشباع: اشباع در تئوری به صورت حداکثر میدان اعمال شده در ماده فرومغناطیس که در آن تغییرات چگالی شار بسیار کم است، تعریف می‌شود. در این نقطه $H_{Sat} = H_m \approx 10 - 20H_c$ است (نقاط a و d در شکل (۲-۳)). در واقع در اشباع با افزایش میدان مغناطیسی اعمالی، تغییرات چگالی شار مغناطیسی بسیار کم است. این پدیده را می‌توان این گونه توجیه کرد که، افزایش میدان مغناطیسی اعمالی و متناسب با آن هم راستا شدن حوزه‌های مغناطیسی تا زمانی ادامه می‌یابد که حوزه‌هایی برای هم راستا شدن وجود داشته باشند. بنابراین زمانی که اغلب حوزه‌ها هم راستا شده باشند، افزایش بیشتر میدان اعمالی تاثیری در هم راستا شدن حوزه‌های بیشتر نداشته و بنابراین چگالی شار مغناطیسی در ماده فرومغناطیس افزایش نخواهد یافت. از این رو مقادیر H_m و B_m نیز به عنوان دو شاخص از منحنی استخراج شده که برابر مقدار بیشینه میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی هستند، مطرح می‌باشند.

تلفات: کمیت مغناطیسی دیگر، تلفات انرژی مغناطیسی در حلقه هیستریزس است. در واقع تلفات هیستریزس، انرژی از دست رفته به شکل حرارت در غلبه بر اصطکاک موجود به هنگام حرکت دیواره حوزه‌ها و

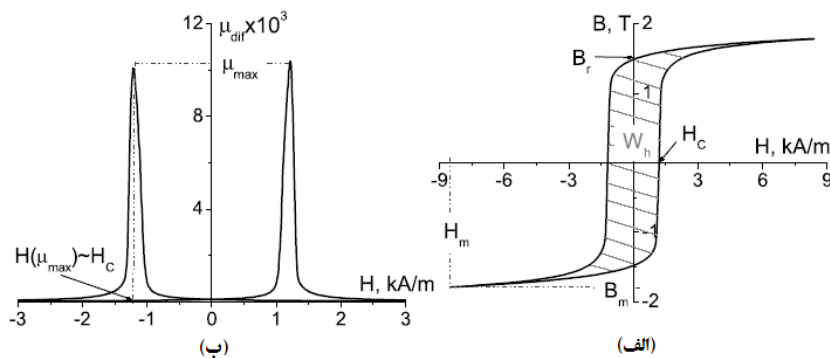
گردش حوزه‌هاست. سطح حلقه هیستریزس، متناظر با تلفات هیستریزس و به عبارتی انرژی در واحد حجم در یک سیکل است. بنابراین می‌توان این پارامتر را از رابطه $Wh = \oint_{hyst} HdB$ محاسبه کرد.

شیب: شیب منحنی هیستریزس و یا نفوذپذیری مغناطیسی از دیگر پارامترهای حلقه هیستریزس است که از

رابطه $\mu_0\mu_{dif} = \frac{dB}{dH}$ پیروی می‌کند. نمایش این پارامتر را در شکل‌های (۴-۲) و (۵-۲) می‌توان دید [۲۰].



شکل ۴-۲- نمایش نفوذ پذیری مغناطیسی بر روی منحنی هیستریزس [۲۱]



شکل ۵-۲- نمایش پارامترهای مغناطیسی (الف) حلقه هیستریزس. (ب) نفوذ پذیری مغناطیسی بر حسب میدان مغناطیسی [۲۲]

۳-۲ نويز بار کهاوزن مغناطیسی^۱ (MBN)

مواد فرومغناطیس در زیر دمای کوری دارای گشتاور مغناطیس ذاتی بزرگی می‌باشند که دلیل آن جهت گیری مشترک اسپین الکترونهاي غیر مزدوج در یک امتداد می‌باشد. نواحی مغناطیسی با جهت گیری‌های مختلف توسط مرزهایی از هم جدا می‌شوند که با نام Bloch Wall شناخته می‌شوند. هنگامی که ماده فرومغناطیس تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی خارجی قرار بگیرد، این مرزها شروع به حرکت می‌کنند و نواحی هم جهت با میدان بزرگتر می‌شوند.

^۱ Magnetic Barkhausen Noise