

مشاوره، بررسی و تحقیق درخصوص هسته ترانسفورماتور مبتنی بر نانوذرات فریتی و ساخت



مدیر پروژه: سارا محسنی

محقق: علی عرب

مجری: نسترن ریاحی نوری

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مشاوره، بررسی و تحقیق در خصوص هسته ترانسفورماتور مبتنی بر نانوذرات فریتی و ساخت یک نمونه محصول آن

مدیر پروژه:

سارا محسنی

محقق:

علی عرب

همکار/همکاران پروژه:

ساره شفیعی

فائزه ملکوتی خواه

مجری:

نسترن ریاحی نوری

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۰

کد گزارش: NRI-ER-823-PNTPN13-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.315

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. مرکز توسعه فناوری نانو
مشاوره، بررسی و تحقیق در خصوص ورق هسته ترانسفورماتور مبتنی بر نانوذرات فریتی و
ساخت یک نمونه محصول آن/ مدیر پروژه: سارا محسنی، محقق: علی عرب. محل کارفرما: توانیر، ۱۴۰۰.
۳۶۳ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. همکاران پروژه: ساره شفیعی، فائزه ملکوتی خواه. ۲. مجری: نسترن ریاحی نوری.
۳. محور/ محورهای اصلی پروژه. نانوفناوری



انتشارات پژوهشگاه نیرو
مرکز توسعه فناوری نانو

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir



شماره:

تاریخ:

پیوست:

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب علی عرب متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران :

۱. علی عرب

۲. ساره شفیعی

۳. فائزه ملکوتی خواه

فهرست مطالب

چکیده	۲۸
فصل اول :	۳۰
چکیده	۸۳
مقدمه	۸۴
۱-۱- بررسی پیشینه پژوهش های مرتبط، جمع آوری اطلاعات و تجزیه و تحلیل آنها	۸۶
۱-۱-۱- ترانسفورماتور	۸۶
۲-۱-۱- ترانسفورماتور ایده آل	۸۶
۳-۱-۱- ترانسفورماتور واقعی	۸۷
۴-۱-۱- نقش ترانسفورماتور ها در تولید، انتقال و توزیع برق	۸۷
۵-۱-۱- اجزای ترانسفورماتور	۸۹
۱-۵-۱-۱- هسته	۸۹
۲-۵-۱-۱- سیم پیچ	۹۰
۳-۵-۱-۱- تانک اصلی	۹۰
۴-۵-۱-۱- عایق بندی	۹۱
۵-۵-۱-۱- سایر اجزاء ترانسفورماتور	۹۱
۱-۵-۵-۱-۱- تپ چنجر (لغزانه ترانسفورماتور)	۹۲
۲-۵-۵-۱-۱- بوشینگ (مقره)	۹۲
۳-۵-۵-۱-۱- وسایل خنک کننده	۹۴
۴-۵-۵-۱-۱- تانک انبساط یا تانک ذخیره روغن	۹۴
۵-۵-۵-۱-۱- وسایل اندازه گیری و حفاظتی	۹۴
۶-۵-۵-۱-۱- شیرها و واشرها	۹۴
۷-۵-۵-۱-۱- رطوبت گیر	۹۴
۸-۵-۵-۱-۱- جرقه گیر	۹۴
۹-۵-۵-۱-۱- تابلوی مارشالینگ	۹۴
۱۰-۵-۵-۱-۱- چرخ ها	۹۵
۱۱-۵-۵-۱-۱- پیچ های زمین	۹۵
۶-۱-۱- پیشینه پژوهش های مرتبط با پروژه	۹۵
۱-۶-۱-۱- ورق هسته سیلیکونی ترانسفورماتور	۹۵
۱-۶-۱-۱- اهمیت ورق هسته سیلیس دار ترانسفورماتور	۹۵
۲-۱-۶-۱-۱- وضعیت عرضه و تقاضا ورق هسته سیلیس دار ترانسفورماتور	۹۷
۳-۱-۶-۱-۱- روش های تولید و عرضه ورق هسته سیلیس دار ترانسفورماتور در کشور	۹۷
۲-۶-۱-۱- ورق هسته آمورف ترانسفورماتور	۹۷

- ۱-۱-۶-۲-۱- فناوری استفاده از هسته آمورف..... ۱۰۱
- ۱-۱-۶-۲-۲- فرآیند تولید مواد آمورف..... ۱۰۲
- ۱-۱-۶-۲-۳- مزایای استفاده از مواد آمورف..... ۱۰۲
- ۱-۱-۶-۲-۴- معایب استفاده از مواد آمورف..... ۱۰۲
- ۱-۱-۶-۳- مقایسه فناوری استفاده از هسته آمورف و هسته سیلیکونی..... ۱۰۳
- ۱-۱-۶-۴- فناوری استفاده از مواد ابررسانا..... ۱۰۴
- ۱-۱-۶-۶- تلفات ترانسفورماتورها..... ۱۰۸
- ۱-۲- انواع ترانسفورماتورهای قابل کاربرد در صنعت برق..... ۱۱۱
- ۱-۲-۱- مدل اول تقسیم بندی ترانسفورماتورها..... ۱۱۲
- ۱-۲-۱-۱- انواع ترانسفورماتور از نظر تغییرات ولتاژ..... ۱۱۲
- ۱-۲-۱-۲- انواع ترانسفورماتور از نظر نوع جریان..... ۱۱۲
- ۱-۲-۱-۳- انواع ترانسفورماتور از نظر تجاری..... ۱۱۲
- ۱-۲-۱-۴- انواع ترانسفورماتور از نظر ساختمان هسته..... ۱۱۲
- ۱-۲-۱-۵- انواع ترانسفورماتور از نظر نحوه خنک کردن..... ۱۱۳
- ۱-۲-۲- مدل دوم تقسیم بندی ترانسفورماتورها..... ۱۱۳
- ۱-۲-۳- مدل سوم تقسیم بندی ترانسفورماتورها..... ۱۱۴
- ۱-۲-۴- توصیف ترانسفورماتورهای صنعت برق..... ۱۱۵
- ۱-۲-۴-۱- ترانسفورماتورهای کاهنده..... ۱۱۵
- ۱-۲-۴-۲- ترانسفورماتورهای افزایشنده..... ۱۱۵
- ۱-۲-۴-۳- ترانسفورماتورهای تک فاز..... ۱۱۶
- ۱-۲-۴-۴- انواع ترانسفورماتورهای تک فاز..... ۱۱۶
- ۱-۲-۴-۵- ترانسفورماتورهای باچند ورودی و چند خروجی..... ۱۱۷
- ۱-۲-۴-۶- اتوترانسفورماتورها..... ۱۱۸
- ۱-۲-۴-۶-۱- عملکرد اتوترانسفورماتورها..... ۱۱۸
- ۱-۲-۴-۶-۲- محدودیت های اتوترانسفورماتورها..... ۱۱۸
- ۱-۲-۴-۶-۳- کاربردهای اتوترانسفورماتور در جریان پرفشار سه فاز..... ۱۱۹
- ۱-۲-۴-۶-۷- ترانسفورماتورهای سه فاز..... ۱۱۹
- ۱-۲-۴-۷-۱- ساختمان ترانسفورماتور سه فاز از منظر مغناطیسی و الکتریکی..... ۱۲۰
- ۱-۲-۴-۷-۲- مزایا و معایب ترانسفورماتورهای سه فاز با مدار مغناطیسی پیوسته..... ۱۲۱
- ۱-۲-۴-۷-۳- ساختمان ترانسفورماتور سه فاز از نقطه نظر عایق بندی و تهویه..... ۱۲۱
- ۱-۲-۴-۷-۴- مقایسه ترانسفورماتورهای تکفاز و سه فاز..... ۱۲۲
- ۱-۲-۴-۸- ترانسفورماتورهای قدرت..... ۱۲۳
- ۱-۲-۴-۸-۱- ترانسفورماتور ژنراتور..... ۱۲۳
- ۱-۲-۴-۸-۲- ترانسفورماتور نیروگاه..... ۱۲۳

- ۱-۲-۴-۸-۳- ترانسفورماتور دو ولتاژ..... ۱۲۴
- ۱-۲-۴-۸-۴- ترانسفورماتور سه سیم پیچه..... ۱۲۴
- ۱-۲-۴-۹- ترانسفورماتور توزیع..... ۱۲۵
- ۱-۲-۴-۹-۱- انواع ترانسفورماتورهای توزیع..... ۱۲۵
- ۱-۲-۴-۹-۲- اجزاء تشکیل دهنده ترانسفورماتور توزیع..... ۱۲۶
- ۱-۲-۴-۱۰- ترانسفورماتور زمین..... ۱۲۷
- ۱-۲-۴-۱۱- ترانسفورماتور مصرف داخلی..... ۱۲۸
- ۱-۲-۴-۱۲- ترانسفورماتورهای ابرسانا (HTS)..... ۱۲۸
- ۱-۲-۴-۱۳- تجهیزات با عایق گازی مورد استفاده در پستهای GIS..... ۱۳۰
- ۱-۲-۴-۱۳-۱- ترانسفورماتور قدرت گازی..... ۱۳۰
- ۱-۲-۴-۱۳-۲- ترانسفورماتور ولتاژ و جریان گازی..... ۱۳۱
- ۱-۳- بررسی انواع هسته های ترانسفورماتورهای قابل کاربرد در صنعت برق..... ۱۳۲
- ۱-۳-۱- انواع هسته ترانسفورماتور از نظر جنس..... ۱۳۲
- ۱-۳-۱-۱- فلزات جامد..... ۱۳۲
- ۱-۳-۱-۲- پودر فلزات..... ۱۳۳
- ۱-۳-۱-۳- فریت..... ۱۳۴
- ۱-۳-۱-۴- هوا..... ۱۳۵
- ۱-۳-۲- انواع هسته ترانسفورماتور از نظر شکل..... ۱۳۵
- ۱-۳-۲-۱- هسته های لایه لایه..... ۱۳۵
- ۱-۳-۲-۲- هسته های یکپارچه..... ۱۳۶
- ۱-۳-۲-۳- هسته های حلقوی..... ۱۳۶
- ۱-۳-۳- انواع هسته ترانسفورماتور از نظر ابعاد..... ۱۳۷
- ۱-۳-۴- انواع هسته های فریتی..... ۱۳۷
- ۱-۳-۴-۱- هسته EI..... ۱۳۸
- ۱-۳-۴-۲- مقاطع UI..... ۱۳۹
- ۱-۳-۴-۳- مقاطع EE..... ۱۳۹
- ۱-۳-۴-۴- مقاطع M..... ۱۳۹
- ۱-۳-۵- کاربردهای هسته های فریت..... ۱۳۹
- ۱-۳-۶- مزایای هسته فریتی..... ۱۴۰
- ۱-۳-۷- معایب هسته فریتی..... ۱۴۰
- ۱-۴- تعیین بازه های فرکانسی هسته های ترانسفورماتور..... ۱۴۱
- ۱-۴-۱- هسته های فریتی مورد استفاده در فرکانس پایین (در محدوده کیلو هرتز)..... ۱۴۲
- ۱-۴-۱-۱- سری های TRM..... ۱۴۳
- ۱-۴-۱-۲- سری های TRCB با پوشش پلاستیکی..... ۱۴۳

۱۴۳	MRFC سری های ۳-۱-۴-۱
۱۴۳	TRMH سری های ۴-۱-۴-۱
۱۴۳	۲-۴-۱- هسته های فریتی مورد استفاده در فرکانس های بالا
۱۴۴	۵-۱- بررسی مطالعات انجام شده درخصوص اثرات ذرات یا نانوذرات در هسته های فریتی
۱۵۴	۶-۱- بررسی ساختارهای انواع فریت ها
۱۵۵	۱-۶-۱- انواع فریت ها بر اساس ویژگی های مغناطیسی
۱۵۶	۲-۶-۱- انواع فریت ها براساس ساختار بلوری
۱۵۶	۱-۲-۶-۱- ساختارهای بلورین اسپینل
۱۵۷	۱-۱-۲-۶-۱- ساختار اسپینلی معمولی (یا عادی)
۱۵۸	۲-۱-۲-۶-۱- ساختار اسپینلی معکوس
۱۵۸	۳-۱-۲-۶-۱- ساختار اسپینلی جزئی معکوس شده
۱۵۸	۲-۲-۶-۱- ساختارهای بلورین شش گوشه
۱۵۹	۳-۲-۶-۱- ساختارهای بلورین پروسکایت
۱۶۰	۴-۲-۶-۱- ساختارهای بلورین گارنت
۱۶۰	۷-۱- تعیین نوع ماده هسته فریتی قابل کاربرد در ترانسفورماتور
۱۷۳	۸-۱- مطالعه و بررسی روش های سنتز ذرات قابل کاربرد در هسته فریتی
۱۷۴	۱-۸-۱- روش رسوب دهی از فاز بخار
۱۷۴	۱-۱-۸-۱- روش رسوب دهی فیزیکی از فاز بخار
۱۷۵	۲-۱-۸-۱- چگالش گاز خنثی
۱۷۵	۳-۱-۸-۱- روش رسوب دهی شیمیایی از فاز بخار
۱۷۶	۴-۱-۸-۱- پاشش شعله احتراقی
۱۷۶	۵-۱-۸-۱- قوس پلاسما
۱۷۷	۲-۸-۱- روش رسوب دهی از فاز مایع
۱۷۷	۱-۲-۸-۱- روش حلال آبی
۱۷۷	۲-۲-۸-۱- روش های غیر آبی
۱۷۷	۳-۲-۸-۱- روش هیدرولیز
۱۷۸	۴-۲-۸-۱- روش همرسوبی
۱۷۹	۵-۲-۸-۱- روش هیدروترمال
۱۸۰	۶-۲-۸-۱- روش نمک های مذاب
۱۸۰	۷-۲-۸-۱- روش سل-ژل
۱۸۱	۳-۸-۱- روش رسوب دهی از فاز جامد
۱۸۱	۱-۳-۸-۱- روش متداول سرامیکی
۱۸۲	۲-۳-۸-۱- روش مکانوشیمیایی
۱۸۳	۳-۳-۸-۱- آلیاژسازی مکانیکی

۱۸۴	۱-۸-۴-تولید نانوذرات با فرآیندهای تخریب حرارتی.....
۱۸۵	۱-۸-۵-تولید نانو ذرات در نانورآکتورهای مایسل.....
۱۸۶	۱-۸-۶-سنتز و پایداری نانوذرات مغناطیسی.....
۱۸۶	۱-۸-۷-روش هم‌رسوبی.....
۱۸۶	۱-۸-۸-میکروامولسیون.....
۱۸۷	۱-۸-۹-سنتز با استفاده از امواج فراصوت.....
۱۸۷	۱-۸-۱۰-روش‌های محافظت از نانوذرات مغناطیسی.....
۱۸۸	۱-۸-۱۱-پایداری به کمک پوشش‌های آلی.....
۱۸۸	۱-۸-۱۲-پوشش‌های معدنی.....
۱۸۹	۱-۸-۱۳-عامل دار کردن نانوذرات مغناطیسی.....
۱۸۹	جمع بندی.....
۱۹۰	منابع.....

فصل دوم : ۱۹۵.....

۱۹۶	چکیده.....
۱۹۷	مقدمه.....
۱۹۸	۱-۲-شناسایی و بررسی مبانی علمی، فنی و کاربردی طرح بر اساس نیاز وزارت نیرو.....
۱۹۹	۲-۱-۱-۲-اسناد بالادستی و سندهای مرتبط با فناوری نانو و صنعت برق.....
۱۹۹	۲-۱-۱-۲-۱-سند چشم انداز بیست ساله جمهوری اسلامی ایران در افق ۱۴۰۴.....
۲۰۰	۲-۱-۱-۲-۲-سیاست های کلی اقتصاد مقاومتی.....
۲۰۰	۲-۱-۱-۲-۳-سیاست های کلی نظام در بخش انرژی.....
۲۰۰	۲-۱-۱-۲-۴-سند چشم انداز و برنامه راهبردی بلندمدت وزارت نیرو.....
۲۰۲	۲-۱-۲-اهداف کلان سند توسعه فناوری نانو در صنعت برق.....
۲۰۳	۲-۱-۳-شناسایی حوزه های فناورانه نانو.....
۲۱۰	۲-۱-۴-نقش فریت ها در صنعت برق و انرژی.....
۲۱۴	۲-۲-امکان سنجی تولید ذرات در بازه فرکانسی تعریف شده.....
۲۱۹	۲-۳-تعیین روش سنتز و نوع ماده بهینه جهت بهره وری توان بالای هسته های فریتی.....
۲۱۹	۲-۳-۱-تعیین روش سنتز.....
۲۱۹	۲-۳-۱-۱-روش هم‌رسوبی.....
۲۱۹	۲-۳-۱-۲-روش سل-ژل.....
۲۲۰	۲-۳-۱-۳-روش خوداحتراقی.....
۲۲۰	۲-۳-۱-۴-روش هیدروترمال.....
۲۲۱	۲-۳-۲-تعیین نوع ماده بهینه.....
۲۲۳	۲-۴-بررسی و تعیین تجهیزات و امکانات و راهکار چگونگی ساخت هسته ترانسفورماتور متناسب با شرایط کشور.....

۲۲۳	۱-۴-۲- نحوه تهیه نانوپودرهای فریتی.....
۲۲۵	۲-۴-۲- نحوه تهیه هسته.....
۲۲۷	۵-۲- بررسی اثر اشکال مختلف هسته های فریتی در افزایش بهره وری و تعیین شکل مورد نظر.....
۲۳۴	۶-۲- بررسی قالب پرس پودرهای فریتی و جنس های مورد نظر.....
۲۳۴	۷-۲- تهیه مواد و تجهیزات مورد نیاز بر اساس نوع ماده هسته فریت تعیین شده.....
۲۳۷	۸-۲- مشخص نمودن آزمون های لازم برای تهیه پودرهای فریتی.....
۲۳۷	۱-۸-۲- پراش اشعه ایکس.....
۲۳۸	۱-۱-۸-۲- نحوه محاسبه ثابت شبکه.....
۲۳۸	۲-۱-۸-۲- نحوه محاسبه میانگین اندازه بلورک ها.....
۲۳۹	۲-۸-۲- میکروسکوپ الکترونی.....
۲۳۹	۱-۲-۸-۲- میکروسکوپ الکترونی عبوری.....
۲۴۰	۲-۲-۸-۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی.....
۲۴۲	۳-۸-۲- طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس.....
۲۴۲	۴-۸-۲- مغناطش سنج نیروی گرادیان متناوب.....
۲۴۳	۵-۸-۲- مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی.....
۲۴۴	۶-۸-۲- اندازه گیری دمای کوری.....
۲۴۴	۹-۲- مشخص نمودن آزمون های لازم برای ساخت نمونه هسته فریتی.....
۲۴۴	۱-۹-۲- محاسبه تراوایی (نفوذپذیری) به کمک دستگاه LCR متر.....
۲۴۵	۲-۹-۲- محاسبه فاکتور کیفیت به کمک دستگاه LCR متر.....
۲۴۶	جمع بندی.....
۲۴۷	منابع.....

فصل سوم : ۲۵۳.....

مقدمه..... ۲۵۴

۱-۳- سنتز نانوذرات هسته فریتی با روش تعیین شده براساس فرمول استوکیومتری..... ۲۵۵

۲-۳- سنتز ذرات جانشرانی شده هسته فریتی با روش تعیین شده بر اساس فرمول استوکیومتری..... ۲۵۶

۱-۲-۳- سنتز پودرهای فریتی..... ۲۵۹

۱-۱-۲-۳- فریت نیکل روی جانشرانی شده با روی، منیزیم و مس سنتز شده به روش خود احتراقی با فرمول

استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ ۲۵۹

۲-۱-۲-۳- فریت منگنز روی جانشرانی شده با نیکل و کبالت سنتز شده به روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری

$Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ ۲۶۱

۳-۱-۲-۳- فریت روی جانشرانی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با فرمول

استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ ۲۶۴

۴-۱-۲-۳- فریت منگنز نیکل روی با فرمول مولکولی $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ سنتز شده به روش هم رسوبی و حرارت داده شده در دماهای $900^{\circ}C$ ، $1000^{\circ}C$ ، $1100^{\circ}C$ ، $1200^{\circ}C$ و $1250^{\circ}C$	۲۶۵
۲-۲-۳- مقایسه مواد اولیه تهیه پودرهای فریتی.....	۲۶۶
۳-۲-۳- ساخت هسته فریتی.....	۲۶۷
۳-۳- انجام آزمون پراش پرتو ایکس (XRD).....	۲۶۸
۴-۳- انجام آزمون انجام آزمون میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM).....	۲۶۹
۵-۳- انجام آزمون میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FE-SEM).....	۲۷۰
جمع بندی.....	۲۷۰
منابع.....	۲۷۳

فصل چهارم : ۲۷۵.....

مقدمه.....	۲۷۶
۱-۴- تجزیه و تحلیل XRD.....	۲۷۷
۱-۱-۴- تجزیه و تحلیل XRD نمونههای تهیه شده.....	۲۷۷
الف- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$	۲۷۷
ب- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده به روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$	۲۷۹
ج- فریت روی جانشانی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$	۲۸۰
۱-۱-۴- مقایسه الگوهای پراش پرتو ایکس پودرهای فریتی تهیه شده به روش هم رسوبی و خوداحتراقی.....	۲۸۳
۲-۱-۴- تجزیه و تحلیل XRD مربوطه به نمونه تحت عملیات حرارتی قرار گرفته.....	۲۸۳
۲-۴- تعیین اندازه بلورک.....	۲۸۵
۱-۲-۴- اندازه بلورک نمونههای تهیه شده.....	۲۸۵
الف- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$	۲۸۵
ب- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده به روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$	۲۸۶
ج- فریت روی جانشانی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$	۲۸۶
۱-۲-۴- مقایسه میانگین اندازه بلورکها و پارامتر شبکه پودرهای فریتی تهیه شده.....	۲۸۷
۳-۴- تجزیه و تحلیل تصویرهای TEM و FE-SEM.....	۲۸۸
۱-۳-۴- تجزیه و تحلیل تصویرهای FE-SEM نمونههای تهیه شده.....	۲۸۸

- الف- فریت نیکل روی جانمایی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ ۲۸۸
- ب- فریت منگنز روی جانمایی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ ۲۹۳
- ج- فریت روی جانمایی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ ۲۹۸
- ۱-۱-۳-۴- مقایسه نتایج حاصل از بررسی آزمونهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی و طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه های فریتی تهیه شده..... ۳۰۳
- ۲-۳-۴- تجزیه و تحلیل تصویرهای FE-SEM نمونه تحت عملیات حرارتی قرار گرفته..... ۳۰۴
- ۴-۴- تجزیه و تحلیل اثر اندازه و شکل ذرات بر بازدهی ذرات هسته های ترانسفورماتور..... ۳۱۱
- ۵-۴- تجزیه و تحلیل ویژگیهای مغناطیسی و اتلافهای مربوط به آن..... ۳۱۳
- ۱-۵-۴- تجزیه و تحلیل ویژگیهای مغناطیسی مربوط به آزمونهای AGFM و دمای کوری..... ۳۱۳
- ۱-۱-۵-۴- ویژگیهای مغناطیسی مربوط به آزمونهای AGFM و دمای کوری نمونه های تهیه شده..... ۳۱۳
- الف- فریت نیکل روی جانمایی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ ۳۱۳
- ب- فریت منگنز روی جانمایی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ ۳۱۶
- ج- فریت روی جانمایی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ ۳۱۸
- ۱-۱-۱-۵-۴- مقایسه نتایج حاصل از بررسی آزمونهای AGFM و دمای کوری نمونه های فریتی تهیه شده..... ۳۲۰
- ۲-۱-۵-۴- ویژگیهای مغناطیسی مربوط به آزمونهای AGFM و دمای کوری تحت عملیات حرارتی قرار گرفته..... ۳۲۲
- ۲-۵-۴- تجزیه و تحلیل ویژگیهای مغناطیسی مربوط آزمون LCR متر..... ۳۲۶
- ۱-۲-۵-۴- ویژگیهای مغناطیسی مربوط به آزمون LCR متر نمونه های تهیه شده بدون عملیات حرارتی..... ۳۲۶
- الف- فریت نیکل روی جانمایی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ ۳۲۷
- ب- فریت منگنز روی جانمایی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ ۳۳۲
- ۱-۲-۲-۵-۴- مقایسه نتایج حاصل از بررسی آزمون LCR متر نمونه های فریتی تهیه شده بدون عملیات حرارتی ۳۳۵
- ۲-۲-۵-۴- ویژگیهای مغناطیسی مربوط به آزمون LCR متر نمونه تحت عملیات حرارتی قرار داده شده..... ۳۳۶
- ۳-۵-۴- تجزیه و تحلیل اتلاف در نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تحت عملیات حرارتی قرار گرفته..... ۳۳۸
- ۱-۳-۵-۴- اتلاف کل (P_t)..... ۳۴۰
- ۲-۳-۵-۴- اتلاف پسماند (P_h)..... ۳۴۱
- ۳-۳-۵-۴- اتلاف جریان گردابی..... ۳۴۳
- ۶-۴- تجزیه و تحلیل اثر اندازه بر روی ویژگیهای مغناطیسی..... ۳۴۴

- ۴-۷- تجزیه و تحلیل اثر جانمایی بر روی ویژگیهای مغناطیسی..... ۳۴۵
- الف- فریت نیکل روی جانمایی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O$ ۳۴۵
- ب- فریت منگنز روی جانمایی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ ۳۴۷
- ج- فریت روی جانمایی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ ۳۴۸
- ۴-۷-۱- مقایسه ویژگیهای مغناطیسی فریت های جانمایی شده..... ۳۵۰
- ۴-۸- تجزیه و تحلیل اثر عملیات حرارتی بر روی ویژگیهای مغناطیسی..... ۳۵۰
- ۴-۹- دستیابی به مشخصه های فریت با کاربردهای هسته های ترانسفورماتورها..... ۳۵۴
- ۴-۱۰- تجزیه و تحلیل فاکتور کیفیت..... ۳۵۴
- ۴-۱۱- تجزیه و تحلیل بسامد و ولتاژهای هسته فریتی..... ۳۵۶
- ۴-۱۲- بهینه سازی سنتز نانوذرات فریت..... ۳۶۱
- جمع بندی..... ۳۶۱
- منابع..... ۳۶۳

فصل پنجم : ۳۶۶

- مقدمه..... ۳۶۷
- ۵-۱- ساخت قالب بر اساس شکل هسته مشخص شده..... ۳۶۷
- ۵-۲- ساخت نمونه هسته فریتی..... ۳۶۹
- ۵-۳- نحوه سیم پیچی هسته..... ۳۷۰
- ۵-۴- انجام آزمون با مغناطیسسنج گرادیان نیروی متناوب (AGFM) و یا (VSM) و سنجش دمای کوری..... ۳۷۰
- ۵-۴-۱- ویژگیهای مغناطیسی مربوط به آزمونهای AGFM و دمای کوری نمونه های تهیه شده..... ۳۷۱
- الف- فریت نیکل روی جانمایی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O$ ۳۷۱
- ب- فریت منگنز روی جانمایی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ ۳۷۴
- ج- فریت روی جانمایی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ ۳۷۶
- ۵-۴-۱-۱- مقایسه نتایج حاصل از بررسی آزمونهای AGFM و دمای کوری نمونه های فریتی تهیه شده..... ۳۷۷
- ۵-۴-۲- ویژگیهای مغناطیسی مربوط به آزمونهای AGFM و دمای کوری تحت عملیات حرارتی قرار گرفته..... ۳۷۹
- ۵-۵- اندازه گیری پذیرفتاری مغناطیسی نمونه ها بر حسب دما..... ۳۸۴
- ۵-۶- تعیین قسمتهای حقیقی و موهومی تراوایی مغناطیسی (μ)..... ۳۸۷
- ۵-۶-۱- قسمت حقیقی تراوایی مغناطیسی..... ۳۸۷

- ۵-۶-۱-۱- قسمت حقیقی تراوایی مغناطیسی نمونه‌های تهیه شده بدون عملیات حرارتی..... ۳۸۷
- الف- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ ۳۸۷
- ب- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ ۳۹۲
- ۵-۶-۱-۱- مقایسه نتایج حاصل از بررسی آزمون LCR متر نمونه‌های فریتی تهیه شده بدون عملیات حرارتی..... ۳۹۴
- ۵-۶-۱-۲- قسمت حقیقی تراوایی مغناطیسی نمونه تحت عملیات حرارتی قرار گرفته..... ۳۹۶
- ۵-۶-۲- قسمت موهومی تراوایی مغناطیسی..... ۳۹۷
- ۵-۶-۱- اتلاف کل (P_t)..... ۳۹۸
- ۵-۶-۲- اتلاف پسماند (P_h)..... ۳۹۹
- ۵-۶-۳- اتلاف جریان گردابی..... ۴۰۱
- ۵-۷- تعیین اتلاف مغناطیسی..... ۴۰۳
- ۵-۷-۱- اتلاف کل (P_t)..... ۴۰۳
- ۵-۷-۲- اتلاف پسماند (P_h)..... ۴۰۳
- ۵-۷-۳- اتلاف جریان گردابی..... ۴۰۴
- ۵-۸- تعیین بازه فرکانسی در هسته‌های فریتی موردنظر..... ۴۰۵
- ۵-۹- سنجش فاکتورهای بسامد و ولتاژ هسته فریتی..... ۴۰۵
- ۵-۱۰- بهینه سازی ساخت هسته فریتی..... ۴۰۹
- منابع..... ۴۱۰

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- اعمال ولتاژ در یک ترانسفورماتور ایده آل..... ۸۶
- شکل ۲-۱- طرح واره کلی از تولید، انتقال و توزیع برق..... ۸۸
- شکل ۳-۱- انواع پست های برق..... ۸۸
- شکل ۴-۱- نحوه توزیع انرژی برق..... ۸۹
- شکل ۵-۱- ساختمان تپ‌چنجرهای قابل تغییر زیر بار..... ۹۲
- شکل ۶-۱- یک بوشینگ نوعی برای ترانسفورماتورهای قدرت..... ۹۳
- شکل ۷-۱- وسایل خنک کننده..... ۹۴
- شکل ۸-۱- کنسرواتور و اجزای مربوطه..... ۹۴
- شکل ۹-۱- فرآیند تولید ورق هسته سیلیس دار..... ۹۷
- شکل ۱۰-۱- حلقه های پسماند فویل های آمورف و نانو کریستالین پوشش داده شده FINEMET..... ۱۰۰
- شکل ۱۱-۱- مقایسه نحوه قرارگیری اتم‌ها در دو حالت بلوری (a) و آمورف (b) و الگوهای پراش اشعه X آلیاژهای بلوری (c) و آمورف (d)..... ۱۰۱
- شکل ۱۲-۱- حلقه هیستریزیس هسته آمورف و هسته سیلیکونی..... ۱۰۳
- شکل ۱۳-۱- مقایسه تلفات فوکو و هیستریزیس در مواد آمورف و سیلیکونی..... ۱۰۳
- شکل ۱۴-۱- نمای عبور جریان فوکو از مقطع هسته ترانسفورماتور..... ۱۰۸
- شکل ۱۵-۱- منحنی هیستریزیس در یک ماده مغناطیسی..... ۱۰۹
- شکل ۱۶-۱- تقسیم بندی تلفات در ترانسفورماتور..... ۱۱۰
- شکل ۱۷-۱- ترانس هسته ای و زرهی..... ۱۱۳
- شکل ۱۸-۱- ترانسفورماتور کاهنده..... ۱۱۵
- شکل ۱۹-۱- ترانسفورماتور افزایشنده..... ۱۱۶
- شکل ۲۰-۱- ترانسفورماتورهای تکفاز..... ۱۱۷
- شکل ۲۱-۱- ترانسفورماتور سه فاز..... ۱۱۹
- شکل ۲۲- ترانسفورماتور سه فاز با هسته های مجزا..... ۱۲۰
- شکل ۲۳-۱- هسته ترانسفورماتور سه فاز با ستون مشترک بهم چسبیده..... ۱۲۰
- شکل ۲۴-۱- ترانسفورماتور سه فاز هسته یکپارچه و هسته ستونی..... ۱۲۱
- شکل ۲۵-۱- انواع ترانسفورماتور از نظر نوع جریان؛ تک فاز و سه..... ۱۲۲
- شکل ۲۶-۱- نمایش ولتاژ و جریان سیستم های سه فاز و تک فاز..... ۱۲۲
- شکل ۲۷-۱- ترانسفورماتورهای دو ولتاژه..... ۱۲۴
- شکل ۲۸-۱- ترانسفورماتور سه سیم پیچه..... ۱۲۵
- شکل ۲۹-۱- اجزاء یک کابل ابررسانا..... ۱۲۹
- شکل ۳۰-۱- ساختمان کلی ترانسفورماتور ابررسانا..... ۱۳۰
- شکل ۳۱-۱- شماتیک کلی یک پست ۲۴ HTS کیلوولت یا ظرفیت ۱۰۰ مگاوات..... ۱۳۰
- شکل ۳۲-۱- نمونه‌ای از ترانسفورماتور گازی SF₆..... ۱۳۱

- شکل ۱-۳۳- آهن ورقه ورقه شده ۱۳۳
- شکل ۱-۳۴- آلیاژهای آهن برای ساخت هسته های مغناطیسی ۱۳۳
- شکل ۱-۳۵- آلیاژهای آهن برای ساخت هسته های پودر آهن ۱۳۴
- شکل ۱-۳۶- نمونه ای از یک هسته فریتی ۱۳۵
- شکل ۱-۳۷- نمونه ای از هسته هوا ترانسفورماتور ۱۳۵
- شکل ۱-۳۸- هسته لایه لایه ۱۳۶
- شکل ۱-۳۹- ترانسفورماتور هسته حلقوی کوچک ۱۳۷
- شکل ۱-۴۰- انواع هسته های فریتی ۱۳۸
- شکل ۱-۴۱- مقاطع EI ۱۳۸
- شکل ۱-۴۲- مقاطع UI ۱۳۹
- شکل ۱-۴۳- مقاطع EE ۱۳۹
- شکل ۱-۴۴- سری TRM ۱۴۳
- شکل ۱-۴۵- سری $TRCB$ ۱۴۳
- شکل ۱-۴۶- سری $MRFC$ ۱۴۳
- شکل ۱-۴۷- سری $TRMH$ ۱۴۳
- شکل ۱-۴۸- هسته های فریتی مورد استفاده در فرکانس های بالا ۱۴۴
- شکل ۱-۴۹- منحنی هیستریزیس پودر فریت تولیدی به روش سنتز احتراقی ۱۴۷
- شکل ۱-۵۰- طرح پراش پرتو ایکس نمونه $a Ni_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ قبل از پخت و b بعد از پخت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد ۱۴۸
- شکل ۱-۵۱- منحنی پسماند فریت نیکل روی قبل از پخت در دمای اتاق نمونه ۱۴۸
- شکل ۱-۵۲- منحنی پسماند فریت نیکل روی بعد از پخت در دمای اتاق نمونه ۱۴۹
- شکل ۱-۵۳- نتایج VSM از پودر نانو ساختار فریت منگنز روی ۱۵۰
- شکل ۱-۵۴- الگوی پراش پودر فریت منگنز-روی که به کمک روش تحلیل طیفی ریتولد آنالیز گردیده است ۱۵۱
- شکل ۱-۵۵- اگرورفرایتها با ساختار گوناگون بلورین و نمونه ای از آن ها با Sr ۱۵۴
- شکل ۱-۵۶- ساختار بلوری یک فریت مکعبی ۱۵۷
- شکل ۱-۵۷- جایگاه های بین نشین هشت وجهی، چهاروجهی و سه گوشه کاتیون های آهن در یاخته یکه فریت های شش گوشه ۱۵۹
- شکل ۱-۵۸- مقایسه روش بالا به پایین و روش پایین به بالا ۱۷۴
- شکل ۱-۵۹- شماتیک ساخت به روش چگالش فازگازی ۱۷۵
- شکل ۱-۶۰- شماتیک روش CVD ترموشیمیایی ۱۷۶
- شکل ۱-۶۱- طرحی از دستگاه سنتز نانوذرات با استفاده از پلاسمای تولید شده به وسیله RF ۱۷۷
- شکل ۱-۶۲- نمای کلی از واکنش هیدرولیز ۱۷۸
- شکل ۱-۶۳- فرآیند سنتز نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 به روش هم رسوبی ۱۷۹
- شکل ۱-۶۴- چیدمان وسایل مورد نیاز برای سنتز به روش هیدروترمال ۱۸۰

- شکل ۱-۶۵- طرح واره ای از مراحل سل - ژل..... ۱۸۱
- شکل ۱-۶۶- مراحل مختلف واکنش سل ژل..... ۱۸۱
- شکل ۱-۶۷- شماتیکی از گستردگی مواد پیشرفته تهیه شده به روش آلیاژسازی مکانیکی..... ۱۸۳
- شکل ۱-۶۸- نحوه کار آسیاب گلوله ای- ارتعاشی و اجزای آن..... ۱۸۴
- شکل ۱-۶۹- ساختارهای کمپلکسی کربونیل آهن و کربونیل کبالت به عنوان پیش ماده های سنتز تخریب حرارتی..... ۱۸۵
- شکل ۱-۷۰- شماتیکی از مایسل نرمال و معکوس..... ۱۸۵
- شکل ۱-۷۱- شماتیکی از روند سنتز نانوذرات با استفاده از روش میکروامولسیون..... ۱۸۶
- شکل ۱-۷۲- نحوه تشکیل میکروجت در نزدیکی سطوح فلزی..... ۱۸۷
- شکل ۱-۷۳- برخی از پوشش های آلی مورد استفاده جهت تضمین پایداری نانوذرات مغناطیسی..... ۱۸۸
- شکل ۱-۷۴- تصویر *TEM* از نانوذرات مغناطیسی پوشیده شده با سیلیکا..... ۱۸۹

- شکل ۲-۱- اهداف کلان توسعه فناوری نانو در صنعت برق..... ۲۰۲
- شکل ۲-۲- عناوین کاربردی نانوفناوری در حوزه تولید..... ۲۰۷
- شکل ۲-۳- عناوین کاربردی نانوفناوری در حوزه انتقال و توزیع..... ۲۰۸
- شکل ۲-۴- عناوین کاربردی نانوفناوری در حوزه مصرف..... ۲۰۹
- شکل ۲-۵- ترانسفورماتور الکترونیک قدرت (الف) طرحواره و (ب) مدار الکتریکی..... ۲۱۱
- شکل ۲-۶- (الف) مدار الکتریکی و یک نمونه منبع تغذیه سوئیچینگ و (ب) تغییرات ولتاژ-جریان در یک منبع تغذیه سوئیچینگ..... ۲۱۳
- شکل ۲-۷- فرآیند سنتز نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 به روش هم‌رسوبی..... ۲۱۹
- شکل ۲-۸- طرح واره ای از مراحل سل-ژل..... ۲۲۰
- شکل ۲-۹- چیدمان وسایل موردنیاز برای سنتز به روش هیدروترمال..... ۲۲۱
- شکل ۲-۱۰- روندنمای تهیه نانوذرات فریت نیکل روی..... ۲۲۴
- شکل ۲-۱۱- روندنمای تهیه نانوذرات فریت منگنز-روی..... ۲۲۵
- شکل ۲-۱۲- نمایی از دستگاه پرس هیدرولیک..... ۲۲۶
- شکل ۲-۱۳- هسته های حلقوی پس از عملیات تفجوشی..... ۲۲۷
- شکل ۲-۱۴- طرح-واره ای هسته حلقوی سیم پیچی شده..... ۲۲۷
- شکل ۲-۱۵- انواع هسته های فریتی..... ۲۲۸
- شکل ۲-۱۶- اشکال فریت های قابل استفاده در ترانسفورماتورهای منابع تغذیه سوئیچینگ..... ۲۳۲
- شکل ۲-۱۷- هسته فریتی EI شکل..... ۲۳۳
- شکل ۲-۱۸- محلول های اولیه و رسوب فریت تشکیل شده..... ۲۳۷
- شکل ۲-۱۹- طرح-واره ای از دستگاه پراش اشعه ایکس با هندسه $2\theta - \theta$ ۲۳۷
- شکل ۲-۲۰- دستگاه پراش اشعه ایکس..... ۲۳۹
- شکل ۲-۲۱- دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری..... ۲۴۰
- شکل ۲-۲۲- طرح-واره ای از عملکرد دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی..... ۲۴۱
- شکل ۲-۲۳- دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی..... ۲۴۱
- شکل ۲-۲۴- طرح-واره ای از عملکرد دستگاه $AGFM$ ۲۴۳
- شکل ۲-۲۵- طرح-واره ای از عملکرد دستگاه VSM ۲۴۴
- شکل ۲-۲۶- طرح-واره ای از دستگاه $LCR meter$ ۲۴۵
- شکل ۳-۱- روندنمای تهیه نانوذرات فریت نیکل روی به روش خوداحتراقی..... ۲۶۱
- شکل ۳-۲- محلول های اولیه و رسوب فریت تشکیل شده..... ۲۶۳
- شکل ۳-۳- روندنمای تهیه نانوذرات فریت منگنز روی..... ۲۶۳
- شکل ۳-۴- طرحواره هسته حلقوی سیم پیچی شده..... ۲۶۸

- شکل ۴-۱- الگوهای پراش پرتو ایکس نانوذرات فریت های نیکل روی $S_2, S_6, S_7, S_8, S_{10}$ ۲۷۸
- شکل ۴-۲- الگوهای پراش پرتو ایکس نانوذرات فریت نیکل روی $S_2, S_6, S_7, S_8, S_{10}$ ۲۷۸
- شکل ۴-۳- الگوی پراش پرتو ایکس برای نمونه های A_1, A_3, A_7 و A_9 و نمونه استاندارد با کد ۲۳۹۸-۰۷۴-۰۱ ۲۷۹
- شکل ۴-۴- موقعیت قله اصلی نمونه ها و تاثیر جانمایی نیکل و کبالت بر این موقعیت ۲۸۰
- شکل ۴-۵- الگوی پراش پرتو ایکس نمونه های $E_1, E_2, E_4, E_5, E_6, E_8, E_9, E_{10}, E_{13}, E_{14}, E_{15}, E_{16}$ ۲۸۱
- شکل ۴-۶- موقعیت قله اصلی نمونه ها و تاثیر جانمایی منگنز، نیکل، کبالت و مس بر این موقعیت ۲۸۳
- شکل ۴-۷- الگوهای پراش پرتو ایکس فریت $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تهیه شده در دماهای مختلف و نمونه استاندارد با کد ۲۳۹۸-۰۷۴-۰۱ ۲۸۴
- شکل ۴-۸- تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی نمونه S_7 با فرمول $(Ni_{0.5}(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})_{0.5}Fe_2O_4)$ (الف) بزرگنمایی ۴۰ هزار در مقیاس ۵۰۰ نانومتر، (ب) بزرگنمایی ۸۰ هزار برابر در مقیاس ۲۰۰ نانومتر، (ج) موقعیت مکان آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی، (د) نمودار آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی ۲۸۹
- شکل ۴-۹- تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی نمونه S_2 با فرمول $(Ni_{0.7}(Zn)_{0.3}Fe_2O_4)$ (الف) بزرگنمایی ۴۰ هزار در مقیاس ۵۰۰ نانومتر، (ب) بزرگنمایی ۸۰ هزار برابر در مقیاس ۲۰۰ نانومتر، (ج) موقعیت مکان آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی، (د) نمودار آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی ۲۹۰
- شکل ۴-۱۰- تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی نمونه S_{10} با فرمول $(Ni_{0.3}(Zn)_{0.7}Fe_2O_4)$ (الف) بزرگنمایی ۴۰ هزار در مقیاس ۵۰۰ نانومتر، (ب) بزرگنمایی ۸۰ هزار برابر در مقیاس ۲۰۰ نانومتر، (ج) موقعیت مکان آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی، (د) نمودار آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی ۲۹۱
- شکل ۴-۱۱- تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی نمونه S_8 با فرمول $(Ni_{0.5}(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})_{0.5}Fe_2O_4)$ (الف) بزرگنمایی ۴۰ هزار در مقیاس ۵۰۰ نانومتر، (ب) بزرگنمایی ۸۰ هزار برابر

- در مقیاس ۲۰۰ نانومتر، ج) موقعیت مکان آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی، د) نمودار آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی.
- ۲۹۱.....
- شکل ۴-۱۲ نقشه عنصری نانوذرات فریت نیکل-روی با کد نمونه S2..... ۲۹۳
- شکل ۴-۱۳- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی در بزرگمایی ۲۰۰ هزار از نانوذرات نمونه‌های
- (الف) A1، (ب) A3، (ج) A7 و (د) A9..... ۲۹۴
- شکل ۴-۱۴- تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتوایکس از نمونه $A_1: Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ ۲۹۵
- شکل ۴-۱۵- تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتوایکس از نمونه $A_2: Mn_{0.5}Zn_{0.5}[Ni]_{0.1}Fe_2O_4$ ۲۹۶
- شکل ۴-۱۶- تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتوایکس از نانوذرات نمونه $A_7: Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Co]_{0.3}Fe_2O_4$ ۲۹۷
- شکل ۴-۱۷- تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتوایکس از نمونه $A_9: Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co]_{0.5}Fe_2O_4$ ۲۹۸
- شکل ۴-۱۸- تصاویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی بزرگمایی ۲۰۰ هزار از نانوذرات..... ۲۹۹
- شکل ۴-۱۹- تصویر آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در
- نمونه $E_1 = ZnFe_2O_4$ ۳۰۰
- شکل ۴-۲۰- تصویر آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $E_4 =$
- $ZnFeNiO_4$ ۳۰۱
- شکل ۴-۲۱- تصویر آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $E_6 =$
- $Zn_{0.6}Fe_{1.6}[(Mn_{0.4}Ni_{0.6})_{0.4}(Co_{0.4}Cu_{0.6})_{0.6}]_{0.8}O_4$ ۳۰۱
- شکل ۴-۲۲- تصویر آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $Zn_{0.2}$
- $E_{11} = Fe_{1.2}[(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.2}]_{1.6}O$ ۳۰۲
- شکل ۴-۲۳- تصویر آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $E_{13} =$
- $CoFe_2O_4$ ۳۰۲
- شکل ۴-۲۴- تصویر آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $E_{16} =$
- Mn_2FeO_4 ۳۰۳
- شکل ۴-۲۵- تصاویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی هسته‌های فریتی تهیه شده در دماهای
- (الف) ۲۵°C، (ب) ۹۰۰°C، (ج) ۱۰۰۰°C، (د) ۱۱۰۰°C، (ح) ۱۲۰۰°C و (خ) ۱۲۵۰°C..... ۳۰۵
- شکل ۴-۲۶- تصویر آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه
- $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تهیه شده در دمای ۲۵°C..... ۳۰۶
- شکل ۴-۲۷- تصویر آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه
- $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ پخت داده شده در دمای ۹۰۰°C..... ۳۰۶
- شکل ۴-۲۸- تصویر آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در
- نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ پخت داده شده در دمای دمای ۱۰۰۰°C..... ۳۰۷
- شکل ۴-۲۹- تصویر آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه
- $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ پخت داده شده در دمای ۱۱۰۰°C..... ۳۰۷

- شکل ۴-۳۰- تصویر آزمون طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ پخت داده شده در دمای $1200^{\circ}C$ ۳۰۸
- شکل ۴-۳۱- تصویر آزمون طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ پخت داده شده در دمای $1250^{\circ}C$ ۳۰۸
- شکل ۴-۳۲- تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نمونههای تفجوشی شده (الف) تحت عملیات دومرحلهای در دمای مختلف و (ب) عملیات تکمرحلهای در دمای $1350^{\circ}C$ درجه سانتیگراد با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر. ۳۰۹
- شکل ۴-۳۳- نمودار میانگین اندازه دانه نمونه های تفجوشی شده تحت عملیات تکمرحلهای و دومرحلهای برحسب دما. ۳۱۰
- شکل ۴-۳۴- تغییرات مغناطش در حداکثر میدان اعمال شده برای نمونههای A_8 ، A_9 و A_{10} برحسب غلظت کاتیونهای نیکل و کبالت در (a) حالت تفجوشی نشده و (b) تفجوشی شده در دمای $900^{\circ}C$ ۳۱۱
- شکل ۴-۳۵- تغییرات نیروی وادارندگی برحسب غلظت کاتیونهای نیکل و کبالت جانشانی شده با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ ۳۱۲
- شکل ۴-۳۶- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل - روی $(Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4)$ برای $x = 0/3$ در حداکثر میدان $9Koe$ ۳۱۴
- شکل ۴-۳۷- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل - روی $(Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4)$ برای $x = 0/5$ در حداکثر میدان $9Koe$ ۳۱۴
- شکل ۴-۳۸- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل - روی $(Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4)$ برای $x = 0/7$ در حداکثر میدان $9Koe$ ۳۱۵
- شکل ۴-۳۹- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل - روی $(Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4)$ برای $x = 1$ در حداکثر میدان $9Koe$ ۳۱۵
- شکل ۴-۴۰- منحنی پسماند نانوذرات فریت $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار x و y متفاوت ۳۱۷
- شکل ۴-۴۱- منحنی پسماند نانوذرات فریت $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ با مقدار x و y متفاوت ۳۱۹
- شکل ۴-۴۲- منحنی پسماند نانو ذرات فریت $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ پخت داده شده در دماهای مختلف ۳۲۲
- شکل ۴-۴۳- تغییرات دمای کوری نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ برحسب دما. ۳۲۳
- شکل ۴-۴۴- نمودار حلقه های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه های تفجوشی شده در فرکانس $100 Hz$ ۳۲۴
- شکل ۴-۴۵- نمودار حلقه های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه های تفجوشی شده در فرکانس $500 Hz$ ۳۲۴
- شکل ۴-۴۶- نمودار حلقه های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه های تفجوشی شده در فرکانس $2500 Hz$ ۳۲۵
- شکل ۴-۴۷- نمودار حلقه های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه های تفجوشی شده در فرکانس $5000 Hz$ ۳۲۵
- شکل ۴-۴۸- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانسهای مختلف برای نمونه $S_1: NiFe_2O$ (غلظت $x = 0$) ۳۲۷

- شکل ۴-۴۹- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانسهای مختلف برای نمونههای $Ni_{1-x}(Zn_x)Mg_{y/2}Cu_{y/2}Fe_2O_4$ با غلظت $x = 0/3$ ۳۲۸
- شکل ۴-۵۰- نمودار نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانسهای مختلف برای نمونههای $Ni_{1-x}(Zn_x)Mg_{y/2}Cu_{y/2}Fe_2O_4$ با غلظت $x = 0/5$ ۳۲۹
- شکل ۴-۵۱- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانسهای مختلف برای نمونههای $Ni_{1-x}(Zn_x)Mg_{y/2}Cu_{y/2}Fe_2O_4$ با غلظت $x = 0/7$ ۳۳۰
- شکل ۴-۵۲- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانسهای مختلف برای نمونههای $Ni_{1-x}(Zn_x)Mg_{y/2}Cu_{y/2}Fe_2O_4$ با غلظت $x = 1$ ۳۳۰
- شکل ۴-۵۳- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0$ ۳۳۳
- شکل ۴-۵۴- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0.1$ ۳۳۳
- شکل ۴-۵۵- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0.3$ ۳۳۴
- شکل ۴-۵۶- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0.5$ ۳۳۴
- شکل ۴-۵۷- تراوایی مغناطیسی برای نمونههای $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تهیه شده در دماهای مختلف بر حسب فرکانس ۳۳۷
- شکل ۴-۵۸- نمودار تراوایی مغناطیسی حقیقی μ' نمونههای $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده در دماهای گوناگون بر حسب فرکانس های مختلف ۳۳۷
- شکل ۴-۵۹- نمودار تراوایی مغناطیسی موهومی نمونه های تفجوشی شده بر حسب فرکانس های مختلف ۳۳۹
- شکل ۴-۶۰- توان اتلاف کل (P_t) نمونههای $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تکمرحلهای و دو مرحلهای بر حسب فرکانسهای مختلف ۳۴۱
- شکل ۴-۶۱- توان اتلاف پسماند نمونههای $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تکمرحلهای و دو مرحلهای بر حسب فرکانس های مختلف ۳۴۲
- شکل ۴-۶۲- تغییرات توان اتلاف جریان گردابی مونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تکمرحلهای و دو مرحلهای بر حسب فرکانس های مختلف ۳۴۳
- شکل ۴-۶۳- تغییرات مغناطش نمونهها بر حسب میزان جانشانی کاتیونها با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_x)Mg_{y/2}Cu_{y/2}Fe_2O_4$ ۳۴۵
- شکل ۴-۶۴- تغییرات نیروی وادارندگی نمونهها بر حسب میزان جانشانی کاتیونها با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_x)Mg_{y/2}Cu_{y/2}Fe_2O_4$ ۳۴۶
- شکل ۴-۶۵- تغییرات مغناطش نمونهها در حداکثر میدان اعمال شده بر حسب غلظت کاتیونهای نیکل و کبالت جانشانی شده با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ ۳۴۷
- شکل ۴-۶۶- تغییرات مغناطش نمونههای $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ در حداکثر میدان اعمال شده بر حسب y ۳۴۹
- شکل ۴-۶۷- تغییرات نیروی وادارندگی نمونههای $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ بر حسب y ۳۴۹

- شکل ۴-۶۸- تغییرات مغناطش اشباع نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ بر حسب دما..... ۳۵۰
- شکل ۴-۶۹- تغییرات نیروی وادارندگی نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ بر حسب دما..... ۳۵۱
- شکل ۴-۷۰- نمودار مغناطش نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده در دماهای متفاوت و فرکانس های مختلف..... ۳۵۲
- شکل ۴-۷۱- نمودار نیروی وادارندگی نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده در دماهای متفاوت برای فرکانس های مختلف..... ۳۵۳
- شکل ۴-۷۲- تغییرات فاکتور کیفیت بر حسب فرکانس نمونه های $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ برای غلظت $x=0$ ۳۵۵
- شکل ۴-۷۳- تغییرات فاکتور کیفیت بر حسب فرکانس نمونه های $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ برای غلظت $x=0.1$ ۳۵۵
- شکل ۴-۷۴- تغییرات فاکتور کیفیت بر حسب فرکانس نمونه های $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ برای غلظت $x=0.3$ ۳۵۵
- شکل ۴-۷۵- تغییرات فاکتور کیفیت بر حسب فرکانس نمونه های $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ برای غلظت $x=0.5$ ۳۵۶
- شکل ۴-۷۶- ساختار کلی مبدل *Push Pull*..... ۳۵۸
- شکل ۴-۷۷- تلفات ویژه هسته فریت $PC40$ [۴۷]..... ۳۵۹
- شکل ۴-۷۸- مشخصات ابعاد هسته $PC40EI25-Z$ [۴۷]..... ۳۶۰
- شکل ۴-۷۹- lN متوسط طول یک دور سیم پیچ..... ۳۶۰

- شکل ۵-۱- هسته فریتی EI شکل ۳۶۸
- شکل ۵-۲- قالب هسته EI ساخته شده ۳۶۸
- شکل ۵-۳- قالب فلزی استفاده شده در این پروژه ۳۶۹
- شکل ۵-۴- دستگاه پرس هیدرولیک ۳۶۹
- شکل ۵-۵- هسته های ساخته شده از پودرهای تهیه شده (الف) هسته های حلقوی و (ب) هسته E شکل ۳۷۰
- شکل ۵-۶- هسته سیم پیچی شده ۳۷۰
- شکل ۵-۷- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل- روی $(Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4)$ برای $x = 0/3$ در حداکثر میدان $9Koe$ ۳۷۱
- شکل ۵-۸- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل- روی $(Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4)$ برای $x = 0/5$ در حداکثر میدان $9Koe$ ۳۷۲
- شکل ۵-۹- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل- روی $(Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4)$ برای $x = 0/7$ در حداکثر میدان $9Koe$ ۳۷۲
- شکل ۵-۱۰- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل- روی $(Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4)$ برای $x = 1$ در حداکثر میدان $9Koe$ ۳۷۳
- شکل ۵-۱۱- منحنی پسماند نانوذرات فریت $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار x و y متفاوت ۳۷۴
- شکل ۵-۱۲- منحنی پسماند نانوذرات فریت $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ با مقدار x و y متفاوت ۳۷۶
- شکل ۵-۱۳- منحنی پسماند نانو ذرات فریت $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ پخت داده شده در دماهای مختلف ۳۷۹
- شکل ۵-۱۴- تغییرات دمای کوری نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ بر حسب دما ۳۸۰
- شکل ۵-۱۵- نمودار حلقه های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه های تفجوشی شده در فرکانس $100 Hz$ ۳۸۱
- شکل ۵-۱۶- نمودار حلقه های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه های تفجوشی شده در فرکانس $500 Hz$ ۳۸۲
- شکل ۵-۱۷- نمودار حلقه های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه های تفجوشی شده در فرکانس $2500 Hz$ ۳۸۲
- شکل ۵-۱۸- نمودار حلقه های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه های تفجوشی شده در فرکانس $5000 Hz$ ۳۸۳
- شکل ۵-۱۹- تراوایی مغناطیسی برای نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تهیه شده در دماهای مختلف بر حسب فرکانس ۳۸۵
- شکل ۵-۲۰- نمودار تراوایی مغناطیسی حقیقی μ' نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تکمرحله ای و دومرحله ای بر حسب فرکانس های مختلف ۳۸۶
- شکل ۵-۲۱- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانسهای مختلف برای نمونه $S1: NiFe_2O_4$ (غلظت $x = 0$) ۳۸۸
- شکل ۵-۲۲- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانسهای مختلف برای نمونه های $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ جانشانیشده با غلظت $x = 0/3$ ۳۸۸
- شکل ۵-۲۳- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانسهای مختلف برای نمونه های $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ جانشانیشده با غلظت $x = 0/5$ ۳۹۰

- شکل ۵-۲۴- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانسهای مختلف برای نمونههای $Ni_{1-x}(Zn_x)Mg_{y/2}Cu_{y/2}Fe_2O_4$ جانشانیشده با غلظت $x=0.7$ ۳۹۰
- شکل ۵-۲۵- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانسهای مختلف برای نمونههای $Ni_{1-x}(Zn_x)Mg_{y/2}Cu_{y/2}Fe_2O_4$ جانشانیشده با غلظت $x=1$ ۳۹۱
- شکل ۵-۲۶- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0$ ۳۹۲
- شکل ۵-۲۷- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0.1$ ۳۹۳
- شکل ۵-۲۸- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0.3$ ۳۹۳
- شکل ۵-۲۹- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0.5$ ۳۹۴
- شکل ۵-۳۰- نمودار تراوایی مغناطیسی موهومی نمونههای $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده بر حسب فرکانسهای مختلف ۳۹۶
- شکل ۵-۳۱- نمودار تراوایی مغناطیسی موهومی نمونههای $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده بر حسب فرکانسهای مختلف ۳۹۷
- شکل ۵-۳۲- توان اتلاف کل (P_t) نمونههای $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تکمرحلهای و دو مرحلهای در فرکانسهای مختلف ۳۹۹
- شکل ۵-۳۳- توان اتلاف پسماند بر حسب دماهای تفجوشی متفاوت در فرکانسهای مختلف نمونههای $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تکمرحلهای و دو مرحلهای ۴۰۰
- شکل ۵-۳۴- تغییرات توان اتلاف جریان گردابی نمونههای $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تکمرحلهای و دو مرحلهای بر حسب فرکانسهای مختلف ۴۰۲
- شکل ۵-۳۵- ساختار کلی مبدل $Push Pull$ ۴۰۷
- شکل ۵-۳۶- تلفات ویژه هسته فریت $PC40$ [۲۳] ۴۰۸
- شکل ۵-۳۷- مشخصات ابعاد هسته $PC40EI25-Z$ [۲۳] ۴۰۸
- شکل ۵-۳۸- lN متوسط طول یک دور سیم پیچ ۴۰۹

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱- میزان صادرات کشورهای صادرکننده ورق هسته سیلیس دار.....	۹۶
جدول ۱-۲- میزان واردات کشورهای وارد کننده ورق هسته سیلیس دار.....	۹۶
جدول ۱-۳- خواص مغناطیسی فویل های آمورف و نانوکریستالین پوشش داده شده <i>FINEMET</i>	۱۰۰
جدول ۱-۴- مشخصات فنی <i>VITROPERM F500</i> و <i>VITROVAC 6030 F</i>	۱۰۱
جدول ۱-۵- مقایسه مولفه‌های مختلف تلفات هسته در ترانسفورماتورهای آمورف و فولادی.....	۱۰۴
جدول ۱-۶- پژوهش های انجام شده در خصوص هسته های فریتی.....	۱۰۶
جدول ۱-۷- بازده و تلفات ترانس های با ظرفیت های متفاوت.....	۱۱۱
جدول ۱-۸- کاربردهای هسته های فریتی با توجه به شکل و ویژگی آنها.....	۱۴۰
جدول ۱-۹- تراوایی مغناطیسی مواد مورد نظر.....	۱۴۲
جدول ۱-۱۰- خواص مغناطیسی نمونه ها.....	۱۴۹
جدول ۱-۱۱- مشخصات مغناطیسی پودر فریت تولیدی در ترکیب های شیمیایی مختلف.....	۱۵۰
جدول ۱-۱۲- مجموعه ای از تحقیقات انجام شده بر روی فریت ها.....	۱۵۲
جدول ۱-۱۳- ساختار بلوری و فرمول شیمیایی عمومی انواع فریت.....	۱۵۶
جدول ۱-۱۴- آرایش یون های فلزی در سلول واحد یک فریت $MO.Fe_2O_3$	۱۵۷
جدول ۱-۱۵- فرمول شیمیایی عمومی انواع فریت شش گوشه.....	۱۵۸
جدول ۱-۱۶- مقایسه فریت های نرم با سایر مواد مغناطیسی.....	۱۶۱
جدول ۱-۱۷- ویژگی های مواد مورد استفاده در هسته های فریتی.....	۱۶۲
جدول ۱-۱۸- برآورد کاربرد مواد مورد استفاده در هسته های فریتی ترانسفورماتور.....	۱۶۳
جدول ۱-۱۹- مشخصات فنی فریت های منگنز روی و نیکل روی مورد استفاده در هسته ترانسفورماتور.....	۱۶۴
جدول ۱-۲۰- موقعیت اندازه گیری.....	۱۷۲
جدول ۱-۲- موضوعات کلان اولویت دار نانو.....	۲۰۳
جدول ۲-۲- حوزه های فناورانه نانو در محور تولید.....	۲۰۴
جدول ۳-۲- حوزه های فناورانه نانو در محور انتقال و توزیع.....	۲۰۵
جدول ۴-۲- حوزه های فناورانه نانو در محور مدیریت مصرف.....	۲۰۶
جدول ۵-۲- نام گذاری های مختلف ترانسفورماتور الکترونیک قدرت.....	۲۱۱
جدول ۶-۲- محدوده فرکانسی قابل کاربرد برای فریت های منگنز روی و نیکل روی.....	۲۱۵
جدول ۷-۲- مشخصات فنی فریت های منگنز روی و نیکل روی.....	۲۱۶
جدول ۸-۲- مشخصات فنی فریت ها در کاربردهای قدرت.....	۲۱۷
جدول ۹-۲- بازه های فرکانسی فریت های نیکل روی و منگنز روی جانشانی شده با کاتیون های دو ظرفیتی.....	۲۱۸
جدول ۱۰-۲- واحدهای فرمولی نانو ذرات فریت نیکل روی با جانشانی های گوناگون عناصر کاتیونی.....	۲۲۱
جدول ۱۱-۲- واحدهای فرمولی نانو ذرات فریت منگنز روی با جانشانی های گوناگون عناصر کاتیونی.....	۲۲۲
جدول ۱۲-۲- واحدهای فرمولی نانو ذرات فریت منگنز روی با جانشانی های گوناگون عناصر کاتیونی.....	۲۲۲
جدول ۱۳-۲- مواد اولیه نمونه ها.....	۲۲۳

- جدول ۲-۱۴ - اشکال مختلف فریت ها قابل کاربرد در صنعت برق..... ۲۲۹
- جدول ۲-۱۵ - هسته های فریتی قابل کاربرد..... ۲۲۹
- جدول ۲-۱۶ - هسته های فریتی قابل کاربرد..... ۲۳۰
- جدول ۲-۱۷ - مشخصات فنی هسته های فریتی با شکل EI ۲۳۳
- جدول ۲-۱۸ - مشخصات مواد اولیه مورد نیاز برای تهیه فریت نیکل روی به روش خوداحتراقی..... ۲۳۵
- جدول ۲-۱۹ - مشخصات مواد اولیه مورد نیاز برای تهیه فریت منگنز روی به روش همرسوبی..... ۲۳۵
- جدول ۲-۲۰ - قدرت تفکیک پذیری، عمق میدان و بزرگنمایی برای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی و میکروسکوپ الکترونی روبشی..... ۲۴۰
- جدول ۲-۲۱ - مشخصات فنی هسته فریتی..... ۲۴۶
- جدول ۳-۱ - فریت های منگنز روی و نیکل روی قابل کاربرد در صنعت برق..... ۲۵۵
- جدول ۳-۲ - نمونه های فریتی سنتز شده به روش هم رسوبی و خوداحتراقی..... ۲۵۷
- جدول ۳-۳ - واحدهای فرمولی نانو ذرات فریت نیکل روی با جانشانی های گوناگون عناصر کاتیونی..... ۲۵۹
- جدول ۳-۴ - مشخصات مواد اولیه مورد نیاز برای تهیه فریت نیکل روی به روش خوداحتراقی..... ۲۶۰
- جدول ۳-۵ - نمونه های فریت منگنز روی تهیه شده در غلظت های گوناگون X و Y ۲۶۱
- جدول ۳-۶ - مشخصات مواد اولیه مورد نیاز برای تهیه فریت منگنز روی به روش همرسوبی..... ۲۶۲
- جدول ۳-۷ - واحدهای فرمولی نانو ذرات فریت روی با جانشانی های گوناگون عناصر کاتیونی..... ۲۶۴
- جدول ۳-۸ - مشخصات مواد اولیه مورد نیاز برای تهیه فریت روی به روش همرسوبی با جانشانی های گوناگون عناصر کاتیونی..... ۲۶۵
- جدول ۳-۹ - خصوصیات مواد اولیه مورد استفاده برای تهیه فریت منگنز نیکل روی..... ۲۶۵
- جدول ۳-۱۰ - برنامه حرارتی بر حسب زمان برای تفجوشی همدما..... ۲۶۶
- جدول ۳-۱۱ - مقایسه مواد اولیه نمونه های الف تا د..... ۲۶۷
- جدول ۳-۱۲ - شعاع کاتیونی، و گشتاور مغناطیسی برخی از عناصر فلز واسطه در ساختار مکعبی..... ۲۶۹
- جدول ۳-۱۳ - مشخصات فنی هسته فریتی..... ۲۷۱

- جدول ۴-۱- مکان قله اصلی در نمونه‌های تهیه شده و نمونه استاندارد..... ۲۸۰
- جدول ۴-۲- مکان قله اصلی در نمونه‌های تهیه شده و نمونه استاندارد..... ۲۸۲
- جدول ۴-۳- نمونه های استاندارد الگوی پراش پرتوایکس نمونه های فریتی و روش سنتز آن‌ها..... ۲۸۳
- جدول ۴-۴- مکان قله اصلی در نمونه تهیه شده و نمونه استاندارد..... ۲۸۵
- جدول ۴-۵- اندازه بلورک‌ها و پارامتر شبکه نمونه‌های نوعی فریت نیکل روی جانشانی شده با مس و منیزیم..... ۲۸۵
- جدول ۴-۶- مقدار میانگین اندازه بلورک‌ها و ثابت های شبکه از الگوهای پراش پرتو ایکس و نمونه استاندارد..... ۲۸۶
- جدول ۴-۷- میانگین اندازه بلورک‌ها و ثابت شبکه نمونه های فریتی..... ۲۸۷
- جدول ۴-۸- مقایسه میانگین اندازه نانوبلورک و پارامتر شبکه پودرهای فریتی تهیه شده به روش هم رسوبی و خوداحتراقی..... ۲۸۷
- جدول ۴-۹- میانگین اندازه ذرات نمونه های سنتز شده به روش خوداحتراقی..... ۲۹۲
- جدول ۴-۱۰- میانگین اندازه بلورک‌ها به دست آمده از طیف پراش اشعه ایکس و اندازه ذرات به دست آمده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی برای نمونه‌های منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم‌رسوبی..... ۲۹۵
- جدول ۴-۱۱- درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $A_1: Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ ۲۹۵
- جدول ۴-۱۲- درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $A_2: Mn_{0.5}Zn_{0.5}[Ni]_{0.1}Fe_2O_4$ ۲۹۶
- جدول ۴-۱۳- درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $A_7: Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Co]_{0.3}Fe_2O_4$ ۲۹۷
- جدول ۴-۱۴- درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نانوپودر تهیه شده نمونه $A_9: Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co]_{0.5}Fe_2O_4$ ۲۹۸
- جدول ۴-۱۵- میانگین اندازه بلورک‌ها به دست آمده از طیف پراش اشعه ایکس و اندازه ذرات به دست آمده از تصاویر میکروسکوپ..... ۳۰۰
- جدول ۴-۱۶- میانگین اندازه بلورک‌ها و میانگین اندازه ذرات نمونه های فریتی..... ۳۰۴
- جدول ۴-۱۷- میانگین اندازه ذرات نمونه های فریتی..... ۳۱۰
- جدول ۴-۱۸- ضخامت لایه مرده نمونه های A_8 و A_9 و A_{10} ۳۱۲
- جدول ۴-۱۹- ویژگی های مغناطیسی نانوذرات نیکل-روی سنتز شده به روش احتراقی..... ۳۱۶
- جدول ۴-۲۰- ویژگی های مغناطیسی نانوذرات فریت $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار x و y گوناگون..... ۳۱۷
- جدول ۴-۲۱- مقادیر دمای کوری نمونه‌های A_1, A_2, A_3, A_7 و A_9 ۳۱۸
- جدول ۴-۲۲- ویژگی های مغناطیسی نانوذرات فریت $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ با مقدار x و y گوناگون..... ۳۲۰
- جدول ۴-۲۳- ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات فریتی تهیه شده بدون عملیات حرارتی..... ۳۲۰
- جدول ۴-۲۴- ویژگی‌های مغناطیسی نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ سنتز شده در دماهای مختلف..... ۳۲۳
- جدول ۴-۲۵- مغناطش نمونه‌های $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ تفجوشی شده بر حسب emu/gr در دماها و..... ۳۲۴
- فرکانس‌های مختلف..... ۳۲۶
- جدول ۴-۲۶- نیروی وادارندگی (H_c) نمونه‌های $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ تفجوشی شده در دماها و فرکانس‌های مختلف..... ۳۲۶
- جدول ۴-۲۷- چگالی نمونه‌های فریت $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O$ تهیه شده به روش خود احتراقی..... ۳۲۹

- جدول ۴-۲۸- مقادیر مختلف تراوایی مغناطیسی در فرکانس های مختلف..... ۳۳۱
- جدول ۴-۲۹- مقدار تراوایی در فرکانس های مختلف و چگالی نانوذرات فریت $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با
جانشانیهای گوناگون کاتیونهای نیکل و کبالت..... ۳۳۲
- جدول ۴-۳۰- مقدار تراوایی مغناطیسی در فرکانسهای مختلف نانوذرات با جانشانیهای گوناگون تهیه شده به روش
همرسوبی و خوداحتراقی..... ۳۳۵
- جدول ۴-۳۱- تراوایی مغناطیسی نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده در دماهای مختلف در بازه های
فرکانسی مشخص شده..... ۳۳۶
- جدول ۴-۳۲- قسمت حقیقی تراوایی مغناطیسی نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت
تکمرحلهای و دو مرحلهای در فرکانسهای مختلف..... ۳۳۸
- جدول ۴-۳۳- قسمت موهومی تراوایی مغناطیسی نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت
تکمرحلهای و دو مرحلهای در فرکانسهای مختلف..... ۳۴۰
- جدول ۴-۳۴- توان اتلاف کل بر حسب W/kg نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت
تکمرحلهای و دو مرحلهای در فرکانسهای مختلف..... ۳۴۱
- جدول ۴-۳۵- توان اتلاف پسماند بر حسب W/kg نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت
تکمرحلهای و دو مرحلهای در فرکانسهای مختلف..... ۳۴۲
- جدول ۴-۳۶- توان اتلاف جریان گردابی بر حسب W/kg نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به
صورت تکمرحلهای و دو مرحلهای در فرکانس های مختلف..... ۳۴۴
- جدول ۴-۳۷- مغناطش اشباع نمونه های تهیه شده به کمک رابطه لانژوین..... ۳۴۸
- جدول ۴-۳۸- مشخصات فنی هسته های فریتی با شکل EI ۳۵۴
- جدول ۴-۳۹- ضریب مربوط به نوع مبدل..... ۳۵۶
- جدول ۴-۴۰- تغییرات دمایی متناظر با جنس هسته..... ۳۵۷

- جدول ۵-۱- مشخصات فنی هسته های فریتی با شکل EI ۳۶۸
- جدول ۵-۲- ویژگی های مغناطیسی نانوذرات نیکل-روی سنتز شده به روش احتراقی ۳۷۳
- جدول ۵-۳- ویژگی های مغناطیسی نانوذرات فریت $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار x و y گوناگون ۳۷۵
- جدول ۵-۴- مقادیر دمای کوری نمونه های A_1, A_2, A_3, A_7 و A_9 ۳۷۵
- جدول ۵-۵- ویژگی های مغناطیسی نانوذرات فریت $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ با مقدار x و y گوناگون ۳۷۷
- جدول ۵-۶- ویژگی های مغناطیسی نانوذرات فریتی تهیه شده بدون عملیات حرارتی ۳۷۷
- جدول ۵-۷- ویژگی های مغناطیسی نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ سنتز شده در دماهای مختلف ۳۸۰
- جدول ۵-۸- مغناطش نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ تفجوشی شده بر حسب emu/gr در دماها و فرکانس های مختلف ۳۸۳
- جدول ۵-۹- نیروی وادارندگی H_c نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ تفجوشی شده در دماها و فرکانس های مختلف ۳۸۳
- جدول ۵-۱۰- تراوایی مغناطیسی نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده در بازه های فرکانسی مشخص شده ۳۸۴
- جدول ۵-۱۱- قسمت حقیقی تراوایی مغناطیسی نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تکمرحله ای و دو مرحله ای در فرکانس های مختلف ۳۸۷
- جدول ۵-۱۲- چگالی نمونه های فریت $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ تهیه شده به روش خود احتراقی ۳۸۹
- جدول ۵-۱۳- مقادیر مختلف تراوایی مغناطیسی در فرکانس های مختلف ۳۹۱
- جدول ۵-۱۴- مقدار تراوایی در فرکانس های مختلف و چگالی نانوذرات فریت $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با جانشانی های گوناگون کاتیون های نیکل و کبالت ۳۹۲
- جدول ۵-۱۵- مقدار تراوایی مغناطیسی در فرکانس های مختلف نانوذرات با جانشانی های گوناگون ۳۹۴
- جدول ۵-۱۶- قسمت موهومی تراوایی مغناطیسی نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تکمرحله ای و دو مرحله ای در فرکانس های مختلف ۳۹۷
- جدول ۵-۱۷- قسمت موهومی تراوایی مغناطیسی نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تکمرحله ای و دو مرحله ای در فرکانس های مختلف ۳۹۸
- جدول ۵-۱۸- توان اتلاف کل بر حسب W/kg نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تکمرحله ای و دو مرحله ای در فرکانس های مختلف ۳۹۹
- جدول ۵-۱۹- توان اتلاف پسماند بر حسب W/kg نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تکمرحله ای و دو مرحله ای در فرکانس های مختلف ۴۰۱
- جدول ۵-۲۰- توان اتلاف جریان گردابی بر حسب W/kg در نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تکمرحله ای و دو مرحله ای در فرکانس های مختلف ۴۰۲
- جدول ۵-۲۱- ضریب مربوط به نوع مبدل ۴۰۵
- جدول ۵-۲۲- تغییرات دمایی متناظر با جنس هسته ۴۰۵

چکیده

با توجه به کاهش ذخایر نفتی و افزایش نیاز جهانی برای تامین انرژی، بکارگیری فناوری نانو در حوزه برق و انرژی مورد توجه فراوان قرار گرفته است. به منظور بهبود و کنترل ویژگی های مواد و همچنین افزایش کارایی آن ها در نمونه سازی، در سال های اخیر جانشانی کردن برخی کاتیون ها از یکسو و به اندازه های نانومتری رساندن آنها از سوی دیگر مورد توجه واقع شده است. یکی از حوزه های مهمی که با استفاده از این فناوری ها امکان تامین نیازهای صنعت با ویژگی های بهتر، کاهش هزینه ها و تلفات انرژی وجود دارد، صنعت برق است. ویژگی هایی همانند ویژگی های فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و غیره در سه بخش تولید (نیروگاه)، شبکه انتقال و شبکه توزیع حائز اهمیت است. کاربرد فناوری نانو در حوزه برق و انرژی را می توان به بخش های زیر تقسیم کرد:

- ساخت و تولید تجهیزات مورد نیاز صنعت برق با کارایی و خواص بهتر و هزینه کمتر؛
- ساخت و تولید تجهیزاتی که با فناوری های مرسوم امکان پذیر نمی باشد؛
- توسعه روش های بهره برداری، تعمیرات، نگهداری، بهسازی و نوسازی تاسیسات و تجهیزات صنعت برق؛
- کاهش تلفات برق در شبکه های انتقال و توزیع؛
- افزایش راندمان تجهیزات در صنعت برق؛
- افزایش توان و تولید.

رشد فناوری مستلزم توسعه و بهینه سازی مواد است که پایه های فناوری را شکل می دهند. یکی از موادی که در صنعت برق و صنایع مربوطه در تولید، انتقال و توزیع نقش برجسته ای دارد، ماده تشکیل دهنده هسته های مغناطیسی ترانس ها، القاگرها و سایر ادوات الکترومغناطیسی است. نقش این مواد تقویت شار مغناطیسی است. این مواد دسته ای از مواد فرومغناطیس هستند که به آنها مواد نرم مغناطیسی گفته می شوند. مشخصه خواص مغناطیسی این مواد، مغناطش اشباع بالا (MS) به همراه میدان پسماند زدای (HC) پایین می باشد. به طور کلی چالش اصلی در مورد کلیه مواد نرم مغناطیس تلفات انرژی ورودی می باشد. در تمامی بخش های صنعت برق (تولید، انتقال و توزیع) تلفات انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است به همین خاطر استفاده از مواد و روش هایی که باعث کاهش تلفات می شوند، بسیار مورد توجه هستند. لذا با توجه به توضیحات فوق، فازهای ذیل در پروژه در جهت ساخت هسته فریتی ترانسفورماتور قابل کاربرد در صنعت برق تعریف شده است:

۱- مطالعات

۲- امکان سنجی و طراحی ساخت هسته فریتی

۳- تهیه ذرات و شناسایی

۴- تجزیه و تحلیل داده ها

۵- ساخت و مشخصه یابی

هرفاز شامل بخش های متفاوت می باشد که در هر فصل به آن ها اشاره خواهد شد.

Abstract

Due to the reduction of oil reserves and increasing global demand for energy, the use of nanotechnology in the field of electricity and energy has received much attention. In order to improve and control the properties of materials as well as increase their efficiency in prototyping, in recent years, the replacement of some cations on the one hand and bringing them to nanometer sizes, on the other hand, has been considered. One of the important areas in which using these technologies can meet the needs of the industry with better features, reducing costs and energy losses, is the electricity industry. Properties such as physical, mechanical, chemical, etc. are important in the three sectors of production (power plant), transmission network, and distribution network. The application of nanotechnology in the field of electricity and energy can be divided into the following sections:

- Manufacturing and production of equipment required by the electricity industry with better efficiency and properties and lower costs;
- Construction and production of equipment that is not possible with conventional technologies;
- Development of methods of operation, repair, maintenance, improvement, and modernization of facilities and equipment of the electricity industry;
- Reduction of electricity losses in transmission and distribution networks;
- Increasing the efficiency of equipment in the electricity industry;
- Increase power and production.

The growth of technology requires the development and optimization of materials that form the basis of technology. One of the materials that play a prominent role in the electricity industry and related industries in the production, transmission, and distribution is the material that forms the magnetic cores of transformers, inductors, and other electromagnetic devices. The role of these materials is to amplify the magnetic flux. These materials are a group of ferromagnetic materials called soft magnetic materials. The characteristic of the magnetic properties of these materials is high saturation magnetization (MS) with low coercivity force (HC). In general, the main challenge for all soft magnetic materials is the input energy losses. In all sectors of the electricity industry (generation, transmission, and distribution) energy losses are of great importance, so the use of materials and methods that reduce losses is very important. Therefore, according to the above explanations, the following phases in the project for the construction of ferrite cores of transformers applicable in the electricity industry is defined:

- 1- Studies
- 2- Feasibility study and design of ferrite core construction
- 3- Particle preparation and identification
- 4- Data analysis
- 5- Construction and characterization

Each phase consists of different sections that will be referred to in each chapter.

فصل اول :

فاز اول – فاز مطالعاتی

چکیده

رشد فناوری مستلزم توسعه و بهینه سازی موادی است که پایه های فناوری را شکل می دهند. یکی از موادی که در صنعت برق و صنایع مربوطه در تولید، انتقال و توزیع نقش برجسته ای دارد، ماده تشکیل دهنده هسته های مغناطیسی ترانسها، القاگرها و سایر ادوات الکترومغناطیسی است. نقش این مواد تقویت شار مغناطیسی است. این مواد دسته ای از مواد فرومغناطیس هستند که به آن ها مواد نرم مغناطیسی گفته می شوند. مشخصه خواص مغناطیسی این مواد، مغناطش اشباع بالا (M_s) به همراه میدان پسماند زدای (H_c) پایین می باشد. طی چند دهه اخیر تحقیقات گسترده ای روی این مواد انجام شده است و خانواده های مختلفی از این مواد معرفی شده اند. فریت ها و فولادهای سیلیکونی از جمله خانواده های مرسوم این مواد هستند. فریت ها، به عنوان اکسیدهای سرامیکی مغناطیسی، به دلیل روش های ساده ساخت (متالورژی پودر) قابلیت ساخت در ابعاد و اشکال مختلف را با سهولت بیشتر دارند. گرچه فریت ها نسبت به فلزات مغناطیسی و آلیاژهای آن ها، به دلیل مغناطش کمتر، در رتبه پایین تری قرار دارند، اما می توانند در فرکانس های بالا مورد استفاده قرار گیرند. فریت ها کاربردهای وسیع در سیستم های ذخیره اطلاعات، منابع تغذیه سوئیچینگ، حسگرهای گاز، ابزارهای میکروویو، صنایع الکتریکی و حسگرهای رطوبتی دارند.

در این پژوهش سوابق پروژه های مرتبط با ساخت هسته های ترانسفورماتور از جمله هسته های سیلیکونی، آمورف و ... مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن مطالعاتی درخصوص انواع ترانسفورماتورها و هسته های قابل کاربرد در صنعت برق و مشخصات فنی آنها صورت گرفت و بازه های فرکانسی هسته های ترانسفورماتور به ویژه هسته فریتی تجزیه و تحلیل شد. پس از شناسایی ترانسفورماتورها و هسته های آن، ساختار فریت ها، اثرات نانوذرات در هسته های فریتی و نوع ماده هسته فریتی قابل کاربرد در ترانسفورماتور مورد بررسی قرار گرفت. در پایان روش های سنتز ذرات قابل کاربرد در هسته فریتی نیز مورد بحث قرار گرفت.

مقدمه

با پیشرفت فناوری و به کارگیری قطعات در دستگاه ها با عملکرد حساس و بالا، محققان را بر آن داشت تا موادی با خروجی قابل قبول و نویز خروجی بسیار کم برای استفاده در ترانسفورماتور طراحی کنند. این کار مستلزم استفاده از موادی با ویژگی نو با توان بالا بود که بر اساس محاسبات و پژوهش های گسترده، تجربیات محققان، مواد کشف شده و با توجه به قیمت و قابل دسترس بودن و همچنین انعطاف پذیری آن ها در شکل های درخواستی استفاده کنندگان، ماده ای به نام فریت معرفی شد که این ماده می تواند بسیاری از نیازها و درخواست های پژوهشگران و صنایع گوناگون را فراهم کند. فریت آن دسته از مواد مغناطیسی است که یکی از اجزاء اصلی تشکیل دهنده آن اکسید آهن است و پارامترهای مغناطیسی مطلوبی نظیر ضریب تراوایی مغناطیسی، اندوکسیون اشباع و مقاومت ویژه الکتریکی بالا از مهم ترین ویژگی های آن به شمار می رود. لذا کاربردهای چشمگیری در صنایع برق، الکترونیک، مخابرات، کامپیوتر و ... را به خود اختصاص داده است.

از آنجا که مواد مغناطیسی و فلزی، بالاترین ضریب نفوذپذیری مغناطیسی را دارند، به دلیل مقاومت الکتریکی پایین، امکان استفاده از آنها در فرکانس های بالاتر از ۱ KH وجود ندارد. لذا به کارگیری موادی که علاوه بر ویژگی های مغناطیسی، دارای مقاومت الکتریکی بالا باشند، فراهم شده است. براین اساس ترکیبات متعددی با ساختارهای بلوری متفاوت برای کاربردهای مختلف معرفی شده است. ویژگی های منحصر به فرد فریت ها نسبت به آهن و مواد فرومغناطیس، عایق بودن آنها است. برای مثال، مقاومت ویژه نوعی فریت ها ۱ تا ۱۰۴ اهم است، در صورتیکه آهن ۷-۱۰ اهم است. به دلیل مقاومت ویژه بالای فریت ها، این مواد در معرض جریان های گردابی قرار ندارند و می توان از آنها در فرکانس های بالا با کاربردهایی در پیچکهای If، ترانسفورماتورها و حافظه های مغناطیسی استفاده کرد. با توجه به اهمیت این موضوع، تهیه ذرات، طراحی و تولید هسته ها با استفاده از این ذرات با ماموریت کاربردی در ترانسفورماتور ضرورت دارد. لذا تولید و ساخت هسته های فریت یکی از اهداف و برنامه های اصلی کشورهای پیشرفته و در حال توسعه می باشد. همچنین کاهش تلفات و افزایش بهره وری در بخش های تولید، انتقال و توزیع نیرو همواره به عنوان یکی از مهمترین نیازهای صنعت برق در جهت کاهش هزینه تمام شده و افزایش بهره وری مطرح بوده است و بهره گیری از تجهیزات و فناوری های کاهش تلفات در سطح شبکه های انتقال و توزیع نیرو همواره از طرف بهره برداران شبکه پیگیری شده است. از جمله آثار کاهش تلفات توان در شبکه های توزیع از نقطه نظر اقتصادی می توان به کاهش هزینه تامین تلفات انرژی، کاهش هزینه های عملیاتی و سرمایه ای شبکه های توزیع، به تعویق انداختن زمان شبکه انتقال و کاهش هزینه های سرمایه ای و عملیاتی شبکه های انتقال و فوق توزیع قدرت، به تعویق انداختن زمان احداث واحدهای تولید و در نتیجه کاهش هزینه های سرمایه ای و عملیاتی بخش تولید اشاره نمود. همچنین سایر آثار ناشی از بکارگیری ترانسفورماتورهای کم تلفات از نقطه نظر اقتصادی، کاهش حجم آلاینده های نیروگاهی از طریق افزایش بهره وری خواهد بود. از این رو توسعه فناوری های کاهش تلفات در ترانسفورماتورها، اقدامی استراتژیک در راستای تحقق اهداف برنامه پنجم توسعه مبنی بر افزایش بهره وری در صنعت برق خواهد بود. به منظور بررسی و تحقیق در خصوص ورق هسته ترانسفورماتور مبتنی بر نانوذرات فریتی و امکان سنجی ساخت یک نمونه محصول آن، مطالعات بسیاری در این خصوص انجام شد که مطابق با موارد ذیل به آن اشاره می گردد:

۱-۱- بررسی پیشینه پژوهش های مرتبط، جمع آوری اطلاعات و تجزیه و تحلیل آنها

۱-۲- بررسی انواع ترانسفورماتورهای قابل کاربرد در صنعت برق

۱-۳- بررسی انواع هسته های ترانسفورماتورهای قابل کاربرد در صنعت برق

- ۴-۱- تعیین بازه های فرکانسی هسته های ترانسفورماتور
- ۵-۱- بررسی مطالعات انجام شده درخصوص اثرات ذرات یا نانوذرات در هسته های فریتی
- ۶-۱- بررسی ساختارهای انواع فریت ها
- ۷-۱- تعیین نوع ماده هسته فریتی قابل کاربرد در ترانسفورماتور
- ۸-۱- مطالعه و بررسی روش های سنتز ذرات قابل کاربرد در هسته فریتی

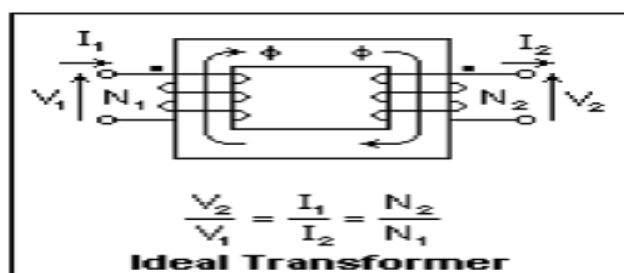
۱-۱- بررسی پیشینه پژوهش های مرتبط، جمع آوری اطلاعات و تجزیه و تحلیل آنها

۱-۱-۱- ترانسفورماتور

ترانسفورماتورها برخلاف ماشین های الکتریکی که انرژی الکتریکی و مکانیکی را به هم تبدیل می کنند، از طریق یک میدان مغناطیسی متغیر، انرژی الکتریکی را از یک سطح ولتاژ به انرژی الکتریکی در سطحی دیگر از ولتاژ، تبدیل می کند. لذا ترانسفورماتورها برای انتقال انرژی الکتریکی از یک مدار جریان متناوب (AC) به مدار دیگر (AC) بدون تغییر فرکانس مدار به کار می روند. به این صورت که جریان جاری در مدار اول (اولیه ترانسفورماتور) موجب به وجود آمدن یک میدان مغناطیسی در اطراف سیم پیچ اول می شود، این میدان مغناطیسی به نوبه خود موجب به وجود آمدن یک ولتاژ در مدار دوم می شود که با اضافه کردن یک بار به مدار دوم این ولتاژ می تواند به ایجاد یک جریان ثانویه منجر شود. یکی از کاربردهای بسیار مهم ترانسفورماتورها کاهش جریان پیش از خطوط انتقال انرژی الکتریکی است. دلیل استفاده از ترانسفورماتور در ابتدای خطوط این است که هادی های الکتریکی دارای میزان مشخصی مقاومت الکتریکی هستند، این مقاومت می تواند موجب اتلاف انرژی در طول مسیر انتقال انرژی الکتریکی شود. میزان تلفات در یک هادی با مجذور جریان عبوری از هادی رابطه مستقیم دارد و بنابر این با کاهش جریان می توان تلفات را به شدت کاهش داد. با افزایش ولتاژ در خطوط انتقال به همان نسبت جریان خطوط کاهش می یابد و به این ترتیب هزینه های انتقال انرژی نیز کاهش می یابد، البته با نزدیک شدن خطوط انتقال به مراکز مصرف برای بالا بردن ایمنی ولتاژ خطوط در چند مرحله و باز به وسیله ترانسفورماتورها کاهش می یابد تا به میزان استاندارد مصرف برسد. به این ترتیب بدون استفاده از ترانسفورماتورها امکان استفاده از منابع دور دست انرژی فراهم نمی آمد [۱].

۱-۱-۲- ترانسفورماتور ایده آل

ترانسفورماتور ایده آل عبارتست از دستگاهی که متشکل از دو سیم پیچ اولیه و ثانویه همراه با هسته باشد که می توان فرض کرد هیچ گونه تلفاتی در آن بوجود نمی آید. امروزه ترانسفورماتورهای واقعی بسیار نزدیک به این فرض هستند. به گونه ای که برخی از آنها دارای راندمانی حدود ۹۹٪ می باشند. بنابراین فرض ایده آل بودن در مورد اکثر ترانسفورماتورهای امروزی، فرض قابل قبولی خواهد بود [۲]. در شکل ۱-۱ ترانسفورماتور ایده آل نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- اعمال ولتاژ در یک ترانسفورماتور ایده آل [۲].

همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده در یک ترانسفورماتور ایده آل، ولتاژ با جریان نسبت عکس و با تعداد دورهای سیم پیچ رابطه مستقیم دارد. زمانی یک ترانسفورماتور ایده آل خواهد بود که:

۱. تمامی شار محدود به هسته باشد و از درون دو سیم پیچ اولیه و ثانویه به طور کامل عبور کند.
۲. مقاومت الکتریکی دو سیم پیچ قابل اغماض باشد.

۳. اتلاف انرژی در هسته ناچیز باشد.

۴. تراوایی مغناطیسی آنچنان زیاد باشد که تنها نیروی محرکه مغناطیسی کمی نیاز باشد تا شار مورد نظر تولید شود [۲].

۱-۱-۳- ترانسفورماتور واقعی

اگر چه در ترانسفورماتورهای طراحی شده می توان به نتایجی نزدیک به ترانسفورماتور ایده ال دست یافت اما به دلیل اینکه در ترانسفورماتور ایده ال، ۴ فرض اساسی وجود دارد که در ترانسفورماتورهای واقعی ممکن است وجود نداشته باشد، در ترانسفورماتورهای معمولی برخی آثار جنبی پدیدار می شود که متفاوت از ترانسفورماتورهای ایده ال خواهد بود.

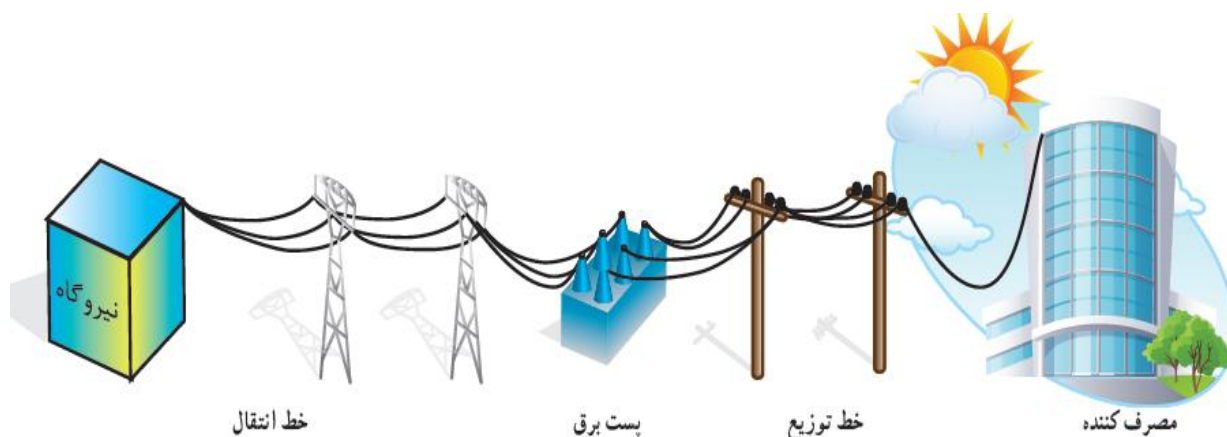
در ترانسفورماتورهای واقعی به دلیل مقاومت اهمی سیم پیچ های اولیه و ثانویه، مقداری تلفات به صورت حرارتی وجود خواهد داشت. علاوه بر این، مقداری تلفات انرژی در اثر جریان های گردابی در هسته و افت مغناطیسی نیز وجود دارد که به دلیل مقدار شار ناشی در طرف اولیه و ثانویه باعث ایجاد مقاومت ظاهری بیشتر در مدار می شود. این موارد باعث می شود که رفتار ترانسفورماتور واقعی، متفاوت از رفتار ترانسفورماتور ایده ال باشد.

یک ترانسفورماتور واقعی دارای مشخصات ذیل می باشد [۲]:

- **توان ظاهری در ثانویه:** این توان بر حسب ولت آمپر یا کیلو ولت آمپر بیان می شود و بیان کننده حداکثر توانی است که می توان از طرف ثانویه کشید. بیان توان ظاهری از این جهت ضروری است که ممکن است ترانسفورماتور در شرایطی قرار گیرد که ضریب توان مصرف کننده کم باشد و در حالی که توان مصرفی پایین است جریان کشیده شده از ترانس، بالاتر از حد توان ترانس باشد.
- **ولتاژ اسمی در اولیه:** حداکثر ولتاژ اعمال شده در اولیه بر حسب ولت یا کیلو ولت است. اعمال ولتاژ بالاتر از این حد ممکن است به ترانس آسیب برساند.
- **ولتاژ اسمی در ثانویه:** ولتاژی که در دو سر ترمینال های خروجی ترانسفورماتور قرائت شده در حالیکه به ورودی ولتاژ اولیه اعمال شده و توان اسمی مصرفی در ثانویه برابر توان اسمی باشد.
- **فرکانس:** اندازه هسته ترانسفورماتور مستقیماً تحت تاثیر فرکانس مدار می باشد به طوریکه کاهش فرکانس ممکن است سبب اشباع هسته شده و حداکثر شار متقابل مورد نیاز هسته فراهم نگردد.

۱-۱-۴- نقش ترانسفورماتور ها در تولید، انتقال و توزیع برق

نیروگاه ها انرژی الکتریکی را از تبدیل سایر انرژی ها به دست می آورند و به لحاظ زیست محیطی و دسترسی به انرژی، احداث آنها در داخل شهر امکان پذیر نمی باشد. از طرفی به این دلیل که اغلب مصرف کننده ها در شهر و حومه آنها متمرکز می باشند، فاصله بین نیروگاه ها و مصرف کننده های برق طولانی می باشد. بنابراین اگر بخواهیم برق تولید شده را با ولتاژ مورد نیاز مصرف کننده انتقال دهیم سهم زیادی از انرژی الکتریکی در خطوط انتقال به حرارت تبدیل می شود. ترانسفورماتورها می توانند با افزایش سطح ولتاژ و کاهش جریان با کمترین تلفات ممکن انرژی الکتریکی را از محل تولید که گاهی هزاران کیلومتر دورتر می باشد تا نقاط مصرف، برسانند این تغییر ولتاژ در محلی به نام پست برق صورت می گیرد. شکل ۱-۲ طرح واره ای از مراحل تولید، انتقال و مصرف انرژی الکتریکی را نشان می دهد [۳].



شکل ۱-۲- طرح واره کلی از تولید، انتقال و توزیع برق [۳].

نیروگاه ها برای تولید انرژی الکتریکی از ژنراتورهای سه فاز استفاده می کنند که ولتاژ خروجی آنها به صورت سه فاز می باشد و بسته به میزان قدرتشان، دارای سطح ولتاژی از 21 KV - 3 KV و در موارد خاص این ولتاژ تا 30 KV نیز می رسد. سپس در شبکه های انتقال برق به کمک ترانسفورماتور و در چند مرحله، این ولتاژ به ولتاژ هایی 400 KV ، 230 KV ، 132 KV و حتی در بعضی از کشورها تا 750 KV یا 1000 KV نیز تبدیل می شوند. در محل مصرف، مجدداً مقدار ولتاژ در چند مرحله توسط ترانسفورماتور به میزان مناسب کاسته می شود و به این ترتیب شرایط استفاده از انرژی الکتریکی تولید شده برای مصرف کننده ها را فراهم می کند [۳].

یک پست فشار قوی مجموعه ای از تجهیزات می باشد که به منظور تغییر سطح ولتاژ و یا به وجود آوردن امکان تغذیه نقاط مختلف و تقسیم انرژی الکتریکی بین آنها مورد استفاده قرار می گیرد. شکل ۱-۳ انواع پست های برق را نشان می دهد [۴].



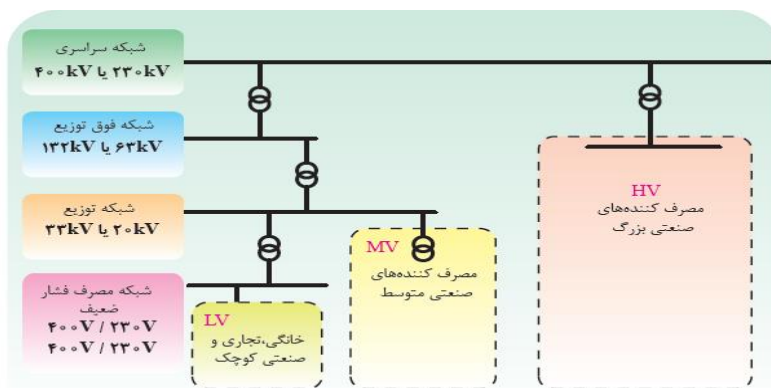
شکل ۱-۳- انواع پست های برق [۴].

با توجه به پست های برق اشاره شده در شکل ۱-۴، در شبکه برق ایران سطوح ولتاژ مختلفی تعریف شده است. این سطوح ولتاژ عبارتند از:

- سطح ولتاژ سراسری
- سطح ولتاژ فوق توزیع
- سطح ولتاژ توزیع

- سطح ولتاژ مصرف یا فشار ضعیف

برق تولیدی نیروگاه ها می بایست توسط ترانسفورماتور به شبکه سراسری متصل شود. این شبکه، برق را به تمام مناطق کشور می رساند سپس با توجه به نیاز هر مصرف کننده مطابق شکل ۱-۴ از سطح ولتاژ خاصی انشعاب گرفته می شود. با توجه به سطوح ولتاژ و نحوه توزیع انرژی برق، به ترانسفورماتوری که سطح ولتاژ MV (فشار متوسط ۲۰ KV) را به سطح ولتاژ LV (فشار ضعیف ۴۰۰ V یا ۳۸۰ V) تبدیل می کند، ترانسفورماتور توزیع گفته می شود. ترانسفورماتورهای توزیع از نوع کاهنده بوده و جهت تأمین مصارف صنایع کوچک، تجاری و خانگی استفاده می شوند. میزان ولتاژ مصرف در این شبکه به صورت سه فاز ۴۰۰ V و یا تک فاز ۲۳۰ V می باشد. تنوع سطوح ولتاژ هم در تولید، انتقال و مصرف وجود دارد [۴].



شکل ۱-۴- نحوه توزیع انرژی برق [۴].

۱-۵-۱- اجزای ترانسفورماتور

ترانسفورماتور از چهار بخش اصلی هسته، سیم پیچ، تانک اصلی و عایق بندی تشکیل می گردد [۵]:

۱-۵-۱-۱- هسته

هسته ترانسفورماتور، یک مدار مغناطیسی با حداقل فاصله هوایی و حداقل مقاومت مغناطیسی است تا شارهای مغناطیسی به راحتی از آن عبور کنند. کار مدارهای مغناطیسی، ایجاد میدان الکترومغناطیسی و ابقای آن جهت تبادل انرژی الکتریکی میان دو قسمت از شبکه می باشد. هسته ترانسفورماتور متشکل از ورقه های نازک است که سطح آنها با توجه به قدرت ترانسفورماتور ها محاسبه می شود. کیفیت ورق های هسته و عایق ورقه ای بین آن و سلف نامی می بایست بنا به نیازهای خاص و تأمین تلفات، نویز، بیش تحریکی و ... انتخاب گردد. همچنین با توجه به عدم تقارن هرچند کوچک هنگام بهره برداری و یا جریان های گردابی DC از سمت شبکه AC لازم است توجه ویژه ای به پسماند مغناطیسی شود. این پدیده را می توان با روش های همچون تقویت مسیرهای خنک کننده هسته و جلوگیری از تجمع شار گره ای در صفحات هسته، کنترل نمود.

به طور مثال، برای کم کردن تلفات، هسته آهنی ترانسفورماتور را نمی توان به طور یکپارچه ساخت. بلکه معمولاً آنها را از ورقه های نازک فلزی که نسبت به یکدیگر عایق اند، می سازند. ضخامت ورقه ها حدود ۰/۳-۰/۵ میلی متر و حتی کمتر از این حدود است. این ورقه ها از آهن بدون پسماند یا آلیاژی از سیلیسیم (حداکثر ۴/۵ درصد) که دارای قابلیت هدایت الکتریکی و قابلیت هدایت مغناطیسی زیاد است ساخته می شوند. در اثر زیاد شدن مقدار سیلیسیم، ورقه های دینام شکننده می شود. برای عایق کردن ورقه های هسته ترانسفورماتور، در گذشته از یک کاغذ نازک مخصوص که در یک سمت این ورقه چسبانده میشد، استفاده می کردند اما امروزه در هنگام ساخت و نورد این ورقه ها یک لایه

نازک اکسید فسفات یا سیلیکات به ضخامت ۲ تا ۲۰ میکرون را به عنوان عایق در روی آنها می‌مالند و به وسیله آن ورقه‌ها را می‌پوشانند. علاوه بر این، از لاک مخصوص نیز برای عایق کردن یک طرف ورقه‌ها استفاده می‌شود. به دلیل اینکه ورقه‌های هسته ترانسفورماتور دارای یک لایه عایق هستند، در هنگام محاسبه سطح مقطع هسته، می‌بایست سطح آهن خالص را لحاظ نمود. معمولاً ورقه‌های هسته ترانسفورماتورها را به ضخامت‌های ۰/۳۵ و ۰/۵ میلی‌متر و در اندازه‌های استاندارد می‌سازند. می‌بایست دقت نمود که سطح عایق شده ورقه‌های هسته ترانسفورماتور همگی در یک جهت باشند (مثلاً همه به طرف بالا). علاوه بر این، تا حد امکان نباید فضای خالی در داخل قرقره باقی بماند. لازم به ذکر است ورقه‌ها باید با فشار داخل قرقره جای بگیرند تا از ارتعاش و ایجاد صدا توسط آن نیز جلوگیری شود [۵].

۱-۱-۵-۲-سیم پیچ

ترانسفورماتور متشکل از دو یا چند سیم پیچ است که به دور یک هسته فرومغناطیس مشترک پیچیده شده‌اند. تنها اتصال این سیم پیچ‌ها میدان مغناطیسی است که در داخل هسته وجود دارد. یکی از سیم پیچ‌ها به منبع ولتاژ متناوب (شبکه) وصل می‌گردد تا شاری متناوب در هسته ایجاد نماید. دامنه این شار به ولتاژ اعمال شده به سیم پیچ و تعداد دور سیم پیچ بستگی دارد. سیم پیچی که به شبکه وصل می‌گردد به نام سیم پیچ اولیه یا ورودی و سیم پیچی که به بار (مصرف کننده) وصل می‌شود به نام سیم پیچ ثانویه یا خروجی نامیده می‌شود. ممکن است ترانسفورماتور دارای سیم پیچ دیگری نیز باشد که در آن صورت به آن سیم پیچ ثالث گویند. از سیم پیچ‌های اضافی جهت حصول سطوح مختلف ولتاژ در خروجی استفاده می‌شود. سیم پیچ‌ها می‌بایست دارای خصوصیات ذیل باشند [۶]:

- استحکام مکانیکی در مقابل نیروهای ناشی از اتصال کوتاه
 - مقاومت حرارتی در مقابل حرارت حاصله ناشی از اتصال کوتاه
 - استحکام عایقی مناسب
 - حداکثر هدایت الکتریکی یا به عبارت دیگر حداقل تلفات (مقاومت)
 - انواع اتصال سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه در ترانسفورماتور به صورت ستاره، مثلث و زیگزاک
- پارامترهای بسیاری اعم از محدودیت‌های حمل و نقل، ظرفیت توان، نسبت ترانس، ولتاژ اتصال کوتاه تا حداکثر تلفات قابل توجه در طراحی سیم پیچ‌ها مورد نظر قرار می‌گیرند.

۱-۱-۵-۳-تانک اصلی

تانک ترانسفورماتور نقش یک پوشش حفاظتی را برای هسته و سیم پیچ‌های ترانسفورماتور ایفا می‌کند. داخل این ظرف از روغن پر می‌شود، به طوریکه هسته و سیم پیچ کاملاً در روغن فرو می‌روند. سطح خارجی تانک، تلفات گرمایی داخل ترانسفورماتور را به بیرون منتقل می‌کند. از هر مترمربع سطح تانک حدوداً ۴۰۰ الی ۴۵۰ وات توان گرمایی به خارج منتقل می‌شود، به طوریکه در ترانسفورماتورهای کوچک، همین سطح برای خنک کاری کافی است و به تمهیدات دیگری نظیر رادیاتور و فن نیاز نمی‌باشد. هر چهار وجه ترانسفورماتور از یک ورق یکپارچه درست می‌شود و فقط در یک گوشه جوشکاری می‌گردد. تانک ترانسفورماتور بایستی موجب شود که موارد ذیل تأمین گردند [۷].

- حفاظتی برای هسته، سیم پیچ، روغن و سایر متعلقات داخلی باشد.
- دارای استقامت کافی باشد که در حین حمل و نقل و نیز در زمان اتصال کوتاه داخلی بتواند تنش‌های مکانیکی ایجاد شده را تحمل نماید.

- ارتعاشات و صدا در آن به حداقل برسد.
- ساختمان آن در برابر نشت روغن یا نفوذ هوا کاملاً آب‌بندی باشد.
- سطوح کافی برای دفع گرمای ناشی از تلفات ترانسفورماتور را تأمین کند.
- محلی برای نصب بوشینگ‌ها، تپ‌چنجر، مخزن ذخیره روغن و سایر متعلقات باشد.
- از نظر ابعاد در حدی باشد که به راحتی قابل حمل و نقل از طریق جاده یا راه آهن باشد.
- حداقل تلفات فوکو (جریان‌های گردابی) در آن ایجاد شود.
- حداقل میدان مغناطیسی در خارج از آن وجود داشته باشد.

۱-۵-۴- عایق‌بندی

عایق‌بندی ترانسفورماتور شامل عایق‌های روغن و کاغذ می‌باشد. پایه روغن‌های ترانسفورماتور براساس ترکیبات نفتیک یا پارانفتیک می‌باشد که در این میان ترکیبات نفتیک عملکرد بهتری در روغن ترانسفورماتور دارند. دلایل اصلی بکارگیری روغن‌ها در ترانسفورماتورها به صورت ذیل می‌باشد [۷].

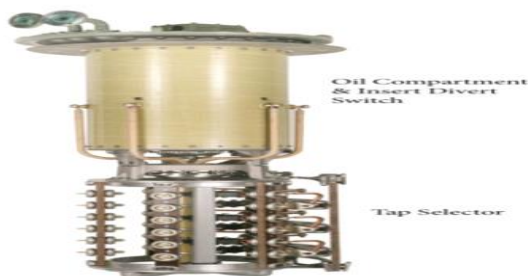
- عایق‌کاری الکتریکی
- کنترل درجه حرارت داخلی ترانسفورماتور و انتقال حرارت
- جلوگیری از خوردگی مواد عایق و قسمت‌های فلزی ترانسفورماتور
- طول عمر زیاده‌تر و تضمین پایداری شیمیایی برای ترانسفورماتور
- آب‌بندی و جمع‌آوری و حمل مواد ناخالص ناشی از کارکرد به خارج از محیط سیستم
- خاموش کردن جرقه الکتریکی
- برحسب شرایط سرویس در ترانسفورماتور، آنچه که از روغن‌های عایق انتظار می‌رود به شرح ذیل می‌باشد [۷].
- از لحاظ عایق بودن باید استقامت الکتریکی و مقاومت الکتریکی آن بالا باشد.
- ویسکوزیته روغن باید پائین باشد تا بتواند عمل انتقال حرارت را بطور موثر انجام دهد.
- به منظور رعایت اصول ایمنی، نقطه اشتعال آن بالا باشد.
- قابلیت انتقال حرارت خوب
- نسبت به مواد ساختمان ترانسفورماتور بی‌اثر باشد.
- در برابر درجه حرارت‌های موضعی و زیاد، مقاوم باشد.
- در مقابل اکسیداسیون و تولید ترکیبات اسیدی و تشکیل لجن مقاوم باشد.
- قابلیت کاربرد در درجه حرارت‌های پائین‌تر را داشته باشد.
- عاری از هرگونه آب و ناخالصی بوده و در ساخت آن از مواد افزودنی که در مجاورت مقدار بسیار کم آب، الکترولیز شده و تولید الکترولیت می‌نماید، استفاده نشده باشد تا بتواند به عنوان عایق مطلوب عمل نماید.
- ضریب تلفات عایق آن در طول سرویس ناچیز باشد.
- خواص الکتریکی خود را در مدت زمان نسبتاً طولانی سرویس حفظ نماید.

۱-۵-۵- سایر اجزاء ترانسفورماتور

به جز موارد فوق، اجزای دیگری نیز به شرح ذیل وجود دارند:

ابزاری است که با لغزیدن و جابجا شدن بر روی سیم پیچ ترانسفورماتور، تعداد دور سیم پیچ در ترانسفورماتورها را به گونه‌ای تغییر می‌دهد تا ولتاژ پایانه را به مقدار خواسته شده تنظیم کند. کنترل ولتاژ شبکه‌های توزیع و انتقال عمدتاً توسط تپ‌چنجر انجام می‌شود. تپ‌چنجرها بر روی سیم پیچی که از نظر اقتصادی و فنی مقرون به صرفه باشد جای می‌گیرند. اصولاً تپ‌چنجرها به سه طریق ذیل مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸].

- تپ چنجرهای سه فاز که بر روی سیم پیچ های با اتصال ستاره قرار می گیرند.
 - تپ چنجرهای سه فاز که بر روی سیم پیچ های با اتصال مثلث قرار می گیرند. در این حالت عایق بندی کامل بین فازها مورد نیاز است و به سه دستگاه تپ چنجر احتیاج است که با یک مکانیزم حرکتی مشترک کار کند.
 - تپ چنجرهای تک فاز که بر روی ترانسفورماتورهای تک فاز یا سه فاز مورد استفاده قرار می گیرند.
- تپ چنجرها برحسب نوع کار به دو دسته قابل تغییر در زیر بار (On Load) و غیر قابل تغییر در زیر بار (Off Load) (تقسیم می شوند. تپ چنجرهای غیر قابل تغییر در زیر بار، دارای ساختمان ساده ای بوده و جهت تغییر آن می بایست ترانس قدرت را از مدار خارج نمود. تغییرات این نوع تپ چنجرها معمولاً با توجه به نیاز و متناسب با نوسانات بار در فصول مختلف سال انجام می گیرد [۸]. در شکل ۱-۵ ساختمان تپ چنجرهای قابل تغییر زیر بار به طور نمونه نشان داده شده است.



شکل ۱-۵- ساختمان تپ‌چنجرهای قابل تغییر زیر بار [۸].

سره‌های خروجی سیم پیچ‌های فشار قوی و ضعیف باید نسبت به یکدیگر و بدنه ترانسفورماتور عایق کاری شوند. به این منظور از بوشینگ‌ها (مقره‌های عبوری) استفاده می‌شود. بوشینگ‌ها روی درپوش فوقانی ترانسفورماتور نصب می‌شوند و در موارد نادری روی دیواره جانبی تانک هم نصب می‌شوند. انتهای پایین بوشینگ در داخل تانک جای می‌گیرد در حالی که انتهای بالایی آن در بالای درپوش و در هوای آزاد واقع می‌شود. شکل ۱-۶ طرح واره ای از یک بوشینگ در ترانسفورماتورهای قدرت را نشان می‌دهد. شکل و اندازه بوشینگ‌ها به کلاس ولتاژ، محل استفاده ترانسفورماتور (داخلی یا بیرونی) و جریان نامی آن بستگی دارد. بوشینگ‌های داخلی نسبتاً کوچک هستند و سطح آنها صاف است، اما بوشینگ‌های بیرونی سپرهای چترمانندی دارند که برای مقابله با شرایط جوی مختلفی هم چون برف و باران و آلودگی بکار می‌روند. انواع بوشینگ‌ها به لحاظ ساختمانی عبارتند از:

- **بوشینگ های کمپوزیت :** عایق آن از دو یا چند لایه استوانه ای هم محور با مواد عایقی مختلف ساخته شده است.

- **بوشینگ های کمپوندی :** فضای بین عایق اصلی و لایه محافظ بیرونی بوشینگ (معمولا چینی) با ماده کمپوندی که دارای خواص عایقی خوبی است، پر شده است.
 - **بوشینگ های خازنی :** لایه های استوانه ای از جنس هادی بصورت هم مرکز روی هادی اصلی و در داخل یک ماده عایقی قرار گرفته اند. از این لایه های هادی برای کنترل توزیع میدان الکتریکی در داخل و روی سطح بوشینگ استفاده می شود.
- این بوشینگ ها نیز مطابق ذیل تقسیم می شوند [۷]:
- الف) بوشینگ هایی با عایق کاغذ -رزین
- ب) بوشینگ هایی با عایق کاغذ آغشته به روغن و ...
- بوشینگ های خشک یا پر نشده:** این نوع بوشینگ از یک محفظه چینی و بدون ماده پرکننده بین هادی و بدنه تشکیل شده است و در سطح KV ۲۵ و پایین تر استفاده می شود.
- بوشینگ های روغنی:** در این نوع بوشینگ ها فضای بین عایق اصلی روی هادی و سطح لایه داخلی (معمولا چینی) با روغن پر شده است.
- بوشینگ های غوطه ور در روغن:** از یک سیستم عایق اصلی تشکیل شده است و مجموعه این سیستم عایقی در روغن غوطه ور است.
- بوشینگ های با عایق کاغذ روغنی :** در ساختار آن از مواد سلولزی آغشته به روغن استفاده شده است.
- بوشینگ های با عایق کاغذ رزینی:** عایق اصلی آن از مواد سلولزی ساخته شده است که با رزین در برگرفته شده است.
- بوشینگ های جامد (سرامیکی) :** عایق اصلی آن از ماده سرامیکی ساخته شده است. حدود ۹۰ عیوب قابل پیشگیری بوشینگ، در اثر ورود رطوبت از طریق نشتی لاستیک های آب بندی و ترک های آن است. رطوبت داخلی باعث فساد تدریجی عایق بوشینگ شده و می تواند سبب انفجار بوشینگ و صدمه دیدن آن شود. مسائل دیگری همچون بروز جرقه و عیب های مکانیکی در ساختمان بوشینگ از جمله موارد بروز عیب در بوشینگ و در نتیجه در ترانسفورماتور است [۷].



شکل ۱-۶- یک بوشینگ نوعی برای ترانسفورماتورهای قدرت [۷].

۱-۱-۵-۳- وسایل خنک کننده

از روش‌های مختلفی برای خنک کردن ترانسفورماتور استفاده می شود که در شکل ۷ وسایل خنک کننده ترانسفورماتورهای قدرت نشان داده شده است [۷]. همانگونه که از شکل زیر دیده می شود به سه طریق ذیل می توان ترانسفورماتور را خنک نمود:

الف) رادیاتور

ب) فن

ج) پمپ روغنی



ج) پمپ روغن

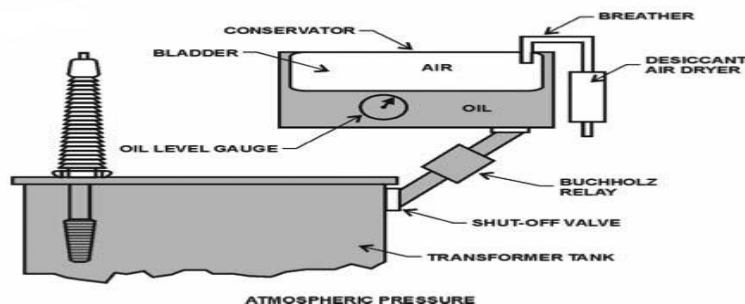
ب) فن

الف) رادیاتور

شکل ۷-۱- وسایل خنک کننده [۷].

۱-۱-۵-۴- تانک انبساط یا تانک ذخیره روغن

منبع ذخیره روغن که منبع انبساط و کنسرواتور نیز نامیده می شود، تانکی است که در بالاترین قسمت ترانسفورماتور نصب می شود. همانگونه که در شکل ۸-۱ کنسرواتور و اجزای آن نشان داده شده است این تانک در حین تغییرات بار روزانه، روغن ترانسفورماتور انبساط و انقباض می یابد و در حین انبساط وارد منبع ذخیره می شود [۷].



شکل ۸-۱- کنسرواتور و اجزای مربوطه [۷].

۱-۱-۵-۵- وسایل اندازه گیری و حفاظتی

نظیر رله بوخلهتس

۱-۱-۵-۶- شیرها و واشرها

۱-۱-۵-۷- رطوبت گیر

۱-۱-۵-۸- جرقه گیر

۱-۱-۵-۹- تابلوی مارشالینگ

۱-۱-۵-۵-۱۰-چرخ‌ها

۱-۱-۵-۵-۱۱-پیچ‌های زمین

اجزاء تمامی ترانسفورماتورها اعم از قدرت، زمین، جریان، ولتاژ و... تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد. در پست‌های انتقال، ترانسفورماتورهای قدرت، زمین، مصرف داخلی، جریان و ولتاژ کاربرد دارند که ترانسفورماتورهای جریان و ترانسفورماتورهای ولتاژ از اجزای سوییچگیر پست به شمار می‌آیند.

۱-۱-۶-۱-پیشینه پژوهش‌های مرتبط با پروژه

۱-۱-۶-۱-۱-ورق هسته سیلیکونی ترانسفورماتور

باتوجه به پیشرفت‌های اخیر در ساخت و تغییر خواص توسط نانو مواد، استفاده از این مواد در زمینه کاربردهای مغناطیسی افزایش چشم‌گیری پیدا کرده و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از کاربردهای عمده مواد مغناطیسی در حوزه صنعت برق، به خصوص مواد نرم مغناطیسی در هسته‌های ترانسفورماتورهای توزیع و ژنراتورها می‌باشد. اولین مواد مغناطیسی که برای ساخت ورق هسته ترانسفورماتورها استفاده گردید، فولاد سیلیکونی (حاوی ۳٪ سیلیسیم) می‌باشد که این نوع فولاد مزایایی همچون در دسترس بودن، ارزان بودن و سادگی فرآیند تولید را دارا می‌باشد [۹]. بعد از تولید اولین ترانسفورماتورها، تلاش‌های فراوانی در راستای بهبود مواد مورد استفاده در آنها با هدف افزایش کیفیت و بازده ترانسفورماتور شده است. از آنجایی که هسته ترانسفورماتور نقش حساسی در عملکرد آن دارد، لذا در گذشته تلاش فراوانی در جهت بهبود خواص ورق هسته مورد استفاده در ترانسفورماتور شده است [۱۰]. همانگونه که پیشتر به آن اشاره گردید، یکی از اجزای اصلی ترانسفورماتورها هسته ترانسفورماتور می‌باشد [۱۱]. هسته ترانسفورماتور متشکل از ورقه‌های نازک است که سطح آنها با توجه به قدرت ترانسفورماتور ها محاسبه می‌شود. برای کم کردن تلفات آهنی، هسته ترانسفورماتور را نمی‌توان به طور یکپارچه ساخت. بلکه معمولاً آنها را از ورقه‌های نازک فلزی که نسبت به یکدیگر عایق اند، می‌سازند. این ورقه‌ها از آهن بدون پسماند با آلیاژی از سیلیسیم (حداکثر ۴/۵ درصد) که دارای قابلیت هدایت الکتریکی و قابلیت هدایت مغناطیسی زیاد است ساخته می‌شوند. به این ورقه‌ها ورق هسته ای سیلیس دار می‌گویند که جنس آنها از فولاد سیلیسوم دار موسوم به مغناطیسی است. برای عایق کردن ورق‌های ترانسفورماتور، در گذشته از یک کاغذ نازک مخصوص که در یک سمت این ورقه چسبانده می‌شد، استفاده می‌کردند. اما امروزه در هنگام ساختن و نورد این ورقه‌ها یک لایه نازک اکسید فسفات یا سیلیکات به ضخامت ۲ تا ۲۱ میکرون به عنوان عایق در روی آنها می‌مالند و با آنها روی ورقه‌ها را می‌پوشانند. علاوه بر این، از لاک مخصوص نیز برای عایق کردن یک طرف ورقه‌ها استفاده می‌شود. ورقه‌های ترانسفورماتور دارای یک لایه عایق هستند. بیشترین استفاده از ورق‌های هسته ای سیلیس دار در ترانسفورماتورها می‌باشد. ورق هسته ای سیلیس دار هم در ترانسفورماتورهای قدرت و هم در ترانسفورماتورهای توزیع و همچنین در انواع دیگری از ترانس‌ها و ترانسفورماتورها بکار می‌رود که ترانسفورماتورها نیز خود بطور وسیع در مدار وسائل الکترونیکی و مدار دستگا ه های خودکار و وسایل راه اندازی موتورهای الکتریکی تطبیق ولتاژ مورد نیاز جهت تغذیه مصرف کننده ها و ایجاد سیستم های چند فازه از سیستم های دو فازه و تطبیق امپدانس بکار می‌رود [۱۱].

۱-۱-۶-۱-۱-اهمیت ورق هسته سیلیس دار ترانسفورماتور

ورق هسته سیلیس دار به عنوان یکی از قطعات اصلی ترانسفورماتورهای قدرت و توزیع می‌باشد، که این ترانسفورماتورها نقش اساسی در شبکه‌های انتقال برق در کشور را بر عهده دارند، از طرف دیگر ورق هسته سیلیس دار در ترانس‌ها و

ترانسفورماتورهای کوچک و خانگی نیز بکار می رود و نقش اساسی را در تنظیم ولتاژ وسایل برقی خانگی به عهده دارد. حدود ۱۵ کشور در جهان تکنولوژی تولید این محصول را دارند و عدم تولید این محصول در کشور باعث وابستگی صنعت برق و کارخانجات فعال در این زمینه به کشورهای تولید کننده این محصول شده است، که این امر باعث عدم ثبات در صنعت تولید ترانسفورماتور و تهدیدی برای صنعت برق کشور به حساب می آید. از طرف دیگر واردات این محصول در طول سالهای متمادی باعث خروج ارز بسیاری گردیده است. تولید این محصول در داخل کشور نه تنها صنعت برق و کارخانجات فعال در این زمینه را از وابستگی به سایر کشورهای تولید کننده این محصول رهایی می بخشد بلکه از خروج ارز جلوگیری کرده و با بازاریابی مناسب و صادرات این محصول در سالهای آتی می توان ارز آوری زیادی نیز برای کشور به همراه داشته باشد [۱۱]. بر اساس اطلاعات بدست آمده از مرکز تجارت جهانی کشورهای عمده تولید کننده آن عبارتند از آمریکا، آلمان، ژاپن، ایتالیا [۱۱]. جدول ۱-۱ میزان صادرات کشورهای صادرکننده این محصول در دنیا را نشان می دهد:

جدول ۱-۱- میزان صادرات کشورهای صادرکننده ورق هسته سیلیس دار [۱۱]

میزان صادرات مهمترین کشورهای صادرکننده ورق هسته سیلیس دار (هزار دلار)

کشور	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱
آمریکا	۸۳۰۰۷۶	۱۵۲۳۳۱۲	۹۹۲۵۷۴	۶۶۷۳۰۲	۶۵۳۶۱۱
ژاپن	۱۷۸۹۳۰۵	۲۱۳۵۶۸۲	۲۸۷۹۰۵۴	۱۸۸۶۹۱۵	۱۹۷۳۷۱۵
ایتالیا	۲۰۱۲۲	۵۲۱۰۷	۳۷۵۵۲	۳۵۰۹۹	۳۵۵۸۴
آلمان	۶۱۹۴۹۱	۷۰۸۶۰۱	۴۹۳۳۹۷	۳۵۹۱۸۳	۳۴۵۸۱۲

بر اساس اطلاعات بدست آمده از مرکز تجارت جهانی بیشترین مصرف ورق هسته ای سیلیس دار در جهان متعلق به کشورهای کانادا، ایتالیا، ترکیه، چین، آلمان، هند و سایر کشورهای صنعتی می باشد [۱۱]. جدول ۲-۱ کشورهای وارد کننده این محصول را به همراه میزان واردات آنها را نشان می دهد:

جدول ۲-۱- میزان واردات کشورهای وارد کننده ورق هسته سیلیس دار [۱۱]

میزان واردات مهمترین کشورهای واردکننده ورق هسته سیلیس دار (هزار دلار)

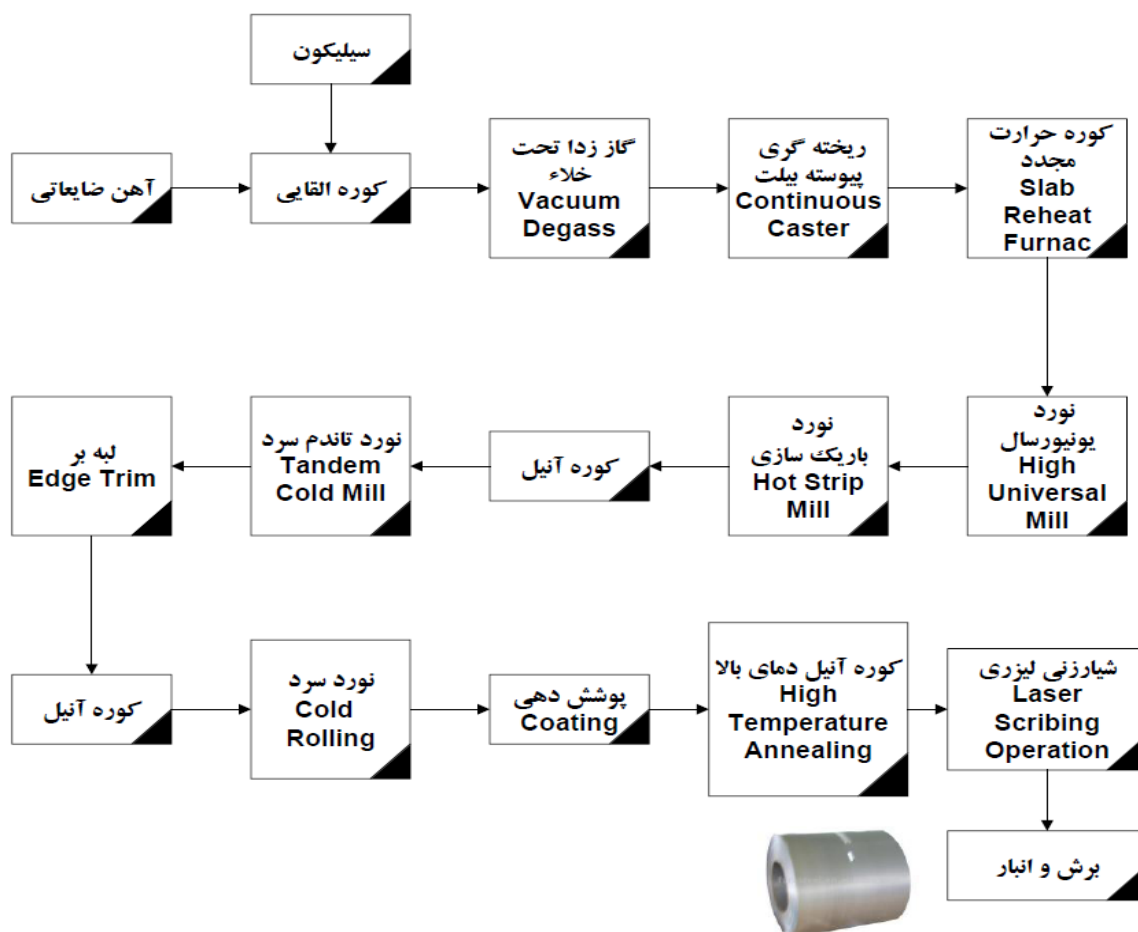
کشور	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱
ترکیه	۲۹۲۱۱۶	۴۱۷۱۴۵	۳۳۲۷۳۳	۲۹۳۷۴۰	۲۸۳۰۴۸
ایتالیا	۶۵۸۸۳۴	۹۱۳۰۵۷	۵۹۴۷۲۱	۵۱۷۱۰۰	۴۷۰۸۰۸
هند	۵۲۹۲۹۵	۷۹۴۶۵۶	۸۷۷۹۶۱	۶۷۶۲۵۵	۶۹۹۳۲۰
آلمان	۲۳۸۴۹۳	۱۸۹۸۲۵	۲۰۵۵۱۷	۱۵۸۵۰۱	۱۵۵۳۲۸
چین	۱۸۹۴۳۴۴	۳۰۲۵۳۵۰	۲۴۶۷۸۵۲	۱۲۵۲۰۹۶	۱۳۸۸۷۸۹
کانادا	۲۸۲۷۶۵	۲۹۶۹۸۲	۲۳۹۶۴۴	۲۰۲۱۶۳	۱۹۱۰۶۴

۱-۶-۱-۲- وضعیت عرضه و تقاضا ورق هسته سیلیس دار ترانسفورماتور

بر اساس اطلاعات بدست آمده از بانک اطلاعات صنایع وزارت صنعت، معدن و تجارت هیچ واحدی در کشور در زمینه تولید ورق هسته ای سیلیس دار فعال نمی باشد. از این رو سطح تکنولوژی و همچنین سطح بهره برداری و ... نیز در این مورد وجود ندارد. همچنین طرح های جدید و طرح های توسعه در دست اجرا در کشور در زمینه تولید ورق هسته ای سیلیس دار وجود ندارد [۱۱].

۱-۶-۱-۳- روش های تولید و عرضه ورق هسته سیلیس دار ترانسفورماتور در کشور

هسته ترانسفورماتورها از ورق فولادی سیلیس دار با دانه های جهت دار مغناطیسی^۱ منظم ساخته می شود که معمولاً با روش نورد سرد تولید و در هر دو طرف این ورق ها عایق مخصوص شده است. برش ورق ها در هسته به اشکال متنوع به صورت برش های ۴۵ درجه و ۹۰ درجه صورت می گیرد. ضخامت این نوع ورق ها در مقیاس تجاری ۰/۳-۰/۲۵ میلی متر است. فرآیند تولید ورق هسته سیلیس دار در شکل ۹-۱ نشان داده شده است.



شکل ۹-۱- فرآیند تولید ورق هسته سیلیس دار.

۱-۶-۱-۲- ورق هسته آمورف ترانسفورماتور

اولین آلیاژها با ساختار غیر کریستالی در سال ۱۹۵۰ میلادی توسط اداره ملی استاندارد آمریکا گزارش شد. از آن زمان تاکنون فعالیت های زیادی در جهت ارتقای کیفیت این نوع مواد و روش های بهینه تولید و اقتصادی تر کردن آن صورت

¹ Grain Oriented Silicon Electrical Steel

گرفته است. معرفی و توسعه فرایند انجماد سریع^۱ در سال ۱۹۶۰ که در آن سرعت انجماد فلز به حدود 10^6 K/s می‌رسد، باعث شد که امکان تولید نوارهای باریک آلیاژی آمورف فراهم شود. ضخامت این نوارها حدود ۲۵ تا ۵۰ میکرومتر است. تولید تجاری اولین نوار آمورف با عرض $1/7$ میلی متر در سال ۱۹۷۱ توسط شرکت الاید کمیکال^۲ انجام شد. امروزه این نوارها به صورت آزمایشگاهی تا ضخامت حدود ۳۰۰ میلی متر و به صورت تجاری تا ضخامت حدود ۲۱۳ میلی متر تولید شده‌اند [۱۰]. از دهه هفتاد میلادی به بعد با معرفی تجاری مواد مغناطیسی آمورف، تحولی در نوع ماده مورد استفاده در هسته ترانسفورماتورهای توزیع پدید آمد. آلیاژ آمورف باترکیب آهن، بُر و سیلیس دارای مقاومت الکتریکی و استحکام بالا ولی حد اشباع مغناطیسی پایین و نیز محدودیت دمای کاری در مقایسه با فولاد سیلیکونی است. در سال ۱۹۸۲ شرکت جنرال الکتریک در آمریکا اولین ترانسفورماتور با مواد آمورف را ساخت. متعاقب آن چند شرکت دیگر اقدام به ساخت انواعی از این نوع ترانسفورماتورها کردند. از آن زمان تاکنون فعالیت‌های فراوانی از سوی تولیدکنندگان بسیار محدود مواد آمورف در جهت اقتصادی کردن روش‌های تولید این نوع ماده و معرفی کردن آن به عنوان یک جایگزین مطمئن و مناسب به جای ورق‌های سیلیکونی انجام پذیرفته است. یکی از مهمترین جانشین‌های ورق هسته ای سیلیس دار، ورق‌های آلیاژ آمورف می باشد. برخی از خواص این آلیاژ عبارتند از: قابلیت تحمل تنش بالا، سختی بالا، قابلیت لوله شدن و مقاومت در برابر خوردگی که بسیار موردتوجه قرار گرفته است. خاصیت نرم مغناطیسی آلیاژ آمورف باعث توجه فراوان به این آلیاژ و کوشش فراوان در جهت توسعه آن شده است [۱۰]. استفاده از فلزات آمورف باعث کاهش حدود ۶۰-۷۰ درصدی تلفات هسته این نوع ترانسفورماتورها نسبت به ترانسفورماتورهای دارای هسته فولاد سیلیکونی می‌شود. آلیاژهای آمورف در رده موادهای سخت می باشد که سختی آنها حدود 1000 KgF/mm^2 بوده و حتی بعضی از آنها ۴ تا ۵ برابر فولاد سیلیس دار سختی دارند. علی رغم سختی این آلیاژ، شکل دهی آنها ساده و آسان می باشد. خاصیت نرم مغناطیسی این مواد باعث می شود که تلفات هیستریزیس هنگامی که آلیاژ آمورف در یک میدان مغناطیسی متغییر قرار می گیرد کاهش یابد. این امر بکارگیری این آلیاژ در هسته موتورهای و ترانس ها که در میدان 50 Hz کار می کنند را میسر ساخته است [۱۰].

طبق گزارش ارایه شده توسط انجمن تحقیقات مواد آمریکا تا پایان سال ۱۹۹۸ حدود ۱,۲۵۰,۰۰۰ ترانسفورماتور توزیع با هسته آمورف در کل جهان نصب شده است که گسترش این مساله کمک شایانی به بازده انتقال و توزیع برق در جهان خواهد کرد. البته باید توجه کرد که این ترانسفورماتورها از نوع کوچک بوده و هنوز انواع بزرگ آنها چندان توسعه پیدا نکرده است. در حال حاضر در آمریکا حدود ۵ درصد سفارشات ترانسفورماتور توزیع از نوع هسته آمورف است [۱۰].

علاوه بر مواردی که به آن اشاره گردید در ذیل به مواد تجاری معروف این هسته ها از جمله FINEMET و VITROPERM نیز اشاره می گردد:

آلیاژهای نرم مغناطیس نانوبلوری پایه آهن از خانواده Fe-Si-B-Nb-Cu در سال ۱۹۸۸ تحت نام تجاری FINEMET توسط Yoshizawa و دیگران معرفی شدند. این آلیاژ ابتدا در حالت آمورف با استفاده از فرایند مذاب ریسی به شکل نوار/ فویل تولید می‌شود. اعمال فرآیند نانوتبلور بر روی نوارها/ فویل‌های آمورف، منجر به دستیابی به خواص جالبی می‌شود که در حالت آمورف یا میکروکریستالین قابل حصول نمی‌باشد. از مشخصه‌های آلیاژهای نانوبلوری FINEMET می‌توان به القاء اشباع و نفوذپذیری مغناطیسی بالا، تلفات هسته پایین، تغییر بعد مغناطیسی

¹ . Rapid Solidification

² . Allied Chemical

پایین و امکان کنترل خواص مغناطیسی با اعمال عملیات حرارتی‌های مختلف اشاره کرد. خواص منحصر به فرد آلیاژهای نانو کریستال از تغییرات شیمیایی و ساختاری آنها در مقیاس نانومتری نشأت می‌گیرد. عملیات حرارتی این گروه از آلیاژها با ترکیب اسمی $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ، یک ساختار همگن از دانه‌های بسیار ریز $\alpha\text{-FeSi}$ با اندازه دانه تقریبی ۱۵-۱۰ نانومتر که در یک زمینه آمورف احاطه شده‌اند تولید می‌کند. در واقع تشکیل نانو کریستال‌های جفت شده توسط برهمکنش تبادلاتی، موجب کاهش قابل توجه تغییر بعد مغناطیسی اشباع، λ_s ، وادارندگی، H_c ، و افزایش نفوذپذیری مغناطیسی می‌شود. در این آلیاژ Cu به عنوان عامل جوانه زا عمل کرده و بر شدت جوانه‌زنی دانه‌های bcc می‌افزاید در حالیکه Nb مانع از رشد دانه فاز FeSi که در جریان فرآیند آنیل از زمینه‌ی آمورف متبلور می‌شود، می‌گردد. هنگامی که آلیاژ Fe-Si-B بدون افزودنی‌های Nb و Cu کریستالیزه می‌شود، خواص نرم مغناطیسی‌اش را از دست می‌دهد؛ اما خواص نرم مغناطیسی آلیاژهای FINEMET به جهت رسوب فاز نانو کریستالین به طور چشمگیری بهبود می‌یابد. وابستگی خواص مغناطیسی به ریزساختار، توسط مدل ناهمسانگردی تصادفی برای فرومغناطیس‌های آمورف بیان می‌شود. بدین ترتیب که هنگامی که اندازه دانه کمتر از طول تبادل فرومغناطیسی باشد، برهمکنش تبادلاتی بر انرژی ناهمسانگردی غلبه کرده و بردارهای آهنربایش را وادار می‌سازد که در چندین دانه با یکدیگر موازی گردند. چنین شرایطی منجر به بهبود قابل ملاحظه خواص نرم مغناطیسی می‌شود. با وجود اینکه کمتر از ۳۰ سال از ابداع این نانوکامپوزیت‌ها می‌گذرد، کاربردهای وسیعی در صنایع و تجهیزات الکترومغناطیسی مختلف پیدا کرده‌اند. از جمله مهمترین کاربردهای این مواد استراتژیک می‌توان به هسته‌های ترانسفورماتور جریان و ترانسفورماتور قدرت، حسگرهای جریان، حسگرهای میدان مغناطیسی، چوک‌ها، فیلترها و حفاظ‌های مغناطیسی، تقویت کننده‌های مغناطیسی و غیره اشاره کرد [۱۱].

فرآیند تولید این آلیاژها شامل دو مرحله اصلی تولید نوار- فویل آمورف با استفاده از تکنیک انجماد سریع به روش مذاب ریسی و عملیات حرارتی نانو کریستالیزاسیون نوارها- فویل‌های آمورف می‌باشد. واقع ساختار نانو کریستالین در آلیاژهای FINEMET توسط آنیل نوارها- فویل‌های انجماد سریع یافته در دماهای $497-597^\circ\text{C}$ حاصل می‌شود [۱۲]. این آلیاژها کاربردهای وسیعی در ترانسفورماتورها، حسگرها، چوک‌ها و غیره پیدا کرده‌اند. استفاده از این مواد استراتژیک در هسته ترانسفورماتورها موجب کاهش حدود ۷۰٪ تلفات هسته در مقایسه با فولادهای سیلیسی می‌گردد. این هسته‌ها با چینش ورقه ورقه‌ای یا حلقوی شکل چندین لایه نوار- فویل نانو کریستالین روی هم ساخته شده و برای جلوگیری از اتصال الکتریکی بین لایه‌ها و کاهش تلفات جریان گردابی، عایق کاری می‌شوند [۱۳]. بدون چنین عایقکاری، در فرکانس‌های بالا هسته مغناطیسی خواص الکتریکی مشابه یک بلوک فلزی بزرگ داشته و به دلیل جریان‌های گردابی تلفات توان بزرگی خواهد داشت [۱۴]. انتخاب جنس پوشش عایق برای مواد مغناطیسی مختلف، بر اساس معیارهای معینی از جمله حداقل اختلاف بین ضرایب انبساط حرارتی فلز و عایق انجام می‌شود. اختلاف ضرایب انبساط حرارتی، بطور قابل ملاحظه‌ای کارایی مغناطیسی هسته را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۳]. روش‌های متعددی برای پوشش دهی فویل‌ها توسعه یافته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مناسب ترین روشی که اخیرا برای دستیابی به پوشش‌های یکنواخت با ضخامت مناسب و قابل کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش اکسیداسیون در معرض بخار آب- اکسیژن می‌باشد [۱۲]. این روش شامل قرار دادن هسته در معرض بخار آب در حضور هوا (تقریباً ۲۰٪ اکسیژن) در دماهای بالا می‌باشد. بخار آب و هوا به داخل هسته نفوذ کرده و با

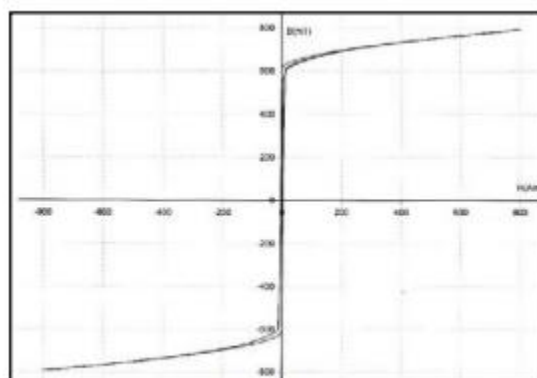
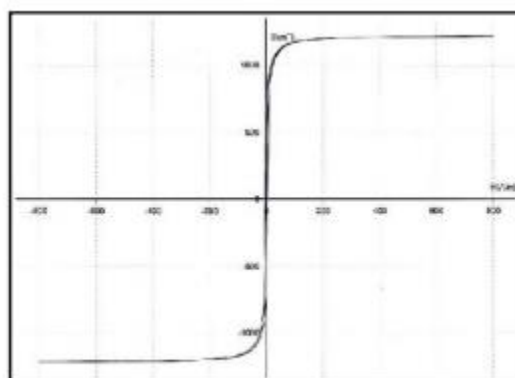
سطوح حرارت دیده نوار برخورد کرده و منجر به اکسیداسیون سریع سطح نوار فلزی و تشکیل یک لایه یا پوشش اکسید فلزی نازک روی سطح نوار فلزی می شود.

با مقایسه خواص مغناطیسی هسته های آمورف و نانوکریستالین مشخص شد که خواص نرم مغناطیسی هسته های نانوکریستالین بهبود قابل ملاحظه ای نسبت به هسته های آمورف داشته است. به عبارت دیگر، عملیات حرارتی هسته های آمورف منجر به کاهش نیروی پسماندزدا، افزایش قابل ملاحظه القای اشباع و افزایش چشمگیر نفوذپذیری اولیه و نفوذپذیری ماکزیمم می گردد [۱۱].

جدول ۱-۳- خواص مغناطیسی فویل های آمورف و نانوکریستالین پوشش داده شده *FINEMET*

خواص مغناطیسی فویل های آمورف و نانوکریستالین پوشش داده شده *FINEMET*

نمونه	نیروی پسماندزدا H_c (A/m)	القای اشباع B_s (mT)	القای پسماند B_r (mT)	تلفات هسته (J/m^3)	نفوذپذیری اولیه $\mu_r(i)$	نفوذپذیری ماکزیمم $\mu_r(m)$
آمورف	۳/۰۴	۷۹۲	۶۰۹/۵	۱۶/۳۷	۲۰۲۵	۹۰۷۹۸
F-21	۲/۹۷	۱۲۱۹	۷۱۴	۲۰/۴۷	۱۷۶۱۰	۱۳۱۴۶۲



حلقه های پسماند فویل های آمورف (سمت راست) و نانوکریستالین پوشش داده شده (سمت چپ) آلیاژ *FINEMET*

شکل ۱-۱- حلقه های پسماند فویل های آمورف و نانوکریستالین پوشش داده شده *FINEMET*

در ترانسفورماتورهای قدرت در منبع تغذیه سوئیچینگ، از ماده نانوکریستالی $500^\circ F$ VITROPERM و آلیاژ آمورف $6030^\circ F$ VITROVAC استفاده می شود که دارای مزایای منحصر به فردی به شرح ذیل می باشند:

- کاهش تلفات
 - چگالی شار اشباع بالا که تقریباً به طور کامل در دماهای بالا حفظ می شود.
 - نفوذ پذیری بالا و وابستگی کم آن به چگالی شار و درجه حرارت.
 - استحکام مکانیکی هسته های پوشش داده شده
- به طور معمول نانوکریستال های VITROPERM، با توجه به تراکم شار اشباع، عملکرد بهتر و هزینه کمتری نسبت به $6030^\circ F$ VITROVAC، داشته اند.
- نفوذپذیری بالای ترانسفورماتور VITROPERM ممکن است مشکلی را در فرکانس های بالا ایجاد نماید که توصیه می شود از $6030^\circ F$ VITROVAC استفاده شود. با این حال نفوذ پذیری بالا در بسیاری از موارد سودمند می باشد. در جدول ذیل مشخصات فنی $500^\circ F$ VITROPERM و $6030^\circ F$ VITROVAC نشان داده شده است.

جدول ۱-۴- مشخصات فنی VITROPERM F500 و VITROVAC 6030 F [۱۵]

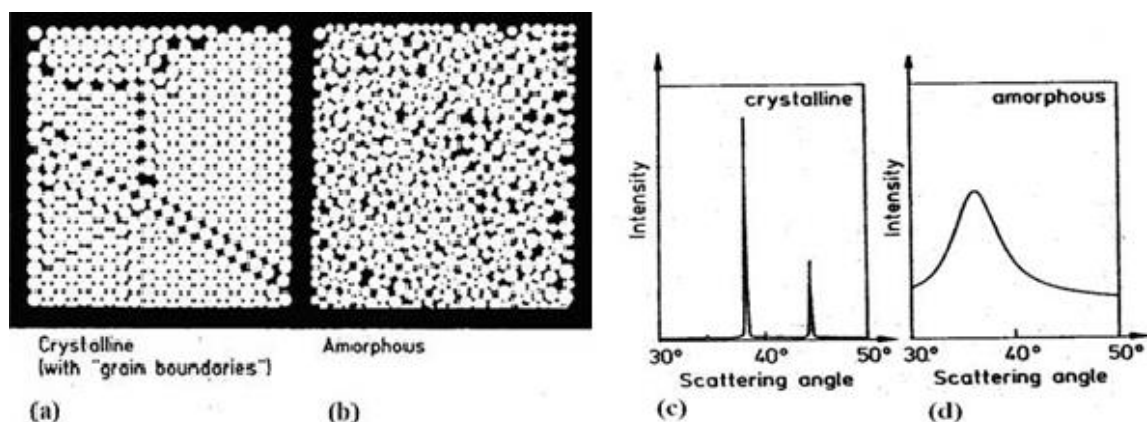
Information on core finish:				Material data of VITROPERM 500 F/ VITROVAC 6030 F (typical values):											
The cores are supplied epoxy coated (Fix 350) and are suitable for direct winding. The upper limiting temperature is 120 °C.				VITROPERM 500 F						VITROVAC 6030 F					
				Saturation flux density (25 °C), B_s	1.2 T	0.8 T	Saturation flux density (100 °C), B_s	1.1 T	0.75 T	Losses (f = 20 kHz, at $B_{max} = 0.2$ T)	1.4 W/kg	2 W/kg	Losses (f = 100 kHz, at $B_{max} = 0.2$ T)	35 W/kg	40 W/kg
				Curie temperature, T_c	600 °C	365 °C	Continuous upper operation temperature	120 °C	110 °C						

VITROPERM 500 F and VITROVAC 6030 F - cores for transformers in SMPS, standard sizes:															
core dimensions	finished dimensions (limiting values)			iron cross section and path length		core mass		A_L - value at 10 kHz typ.		winding cross section and turn length		thermal resistance	power at 20 kHz typical	part number, order code	
mm	O.D.	I.D.	H	A_{Fe}	l_{Fe}	m_{Fe}	m_{Fe}	A_L	A_L	A_{Cu}	l_{Cu}	R_{th}	P	VITROPERM 500 F	VITROVAC 6030 F
mm	mm	mm	mm	cm ²	cm	g	g	μH	μH	cm ²	cm	K/W	W	T60004-L2	T60004-E3
16x10x6	17.6	8.3	8	0.14	4.08	4.3	4.6	11	1.3	0.2	3.18	33	50	016-W373	016-F002
20x12.5x8	22	10.5	10	0.24	5.11	9	9.5	14	1.8	0.32	3.97	23	100	020-W374	020-F008
25x16x10	27	14	12	0.36	6.44	17	18	17	2.1	0.58	4.80	16	170	025-W375	025-F006
30x20x15	32.3	17.8	17.8	0.57	7.85	33	37	20	2.7	0.93	6.41	11	350	030-W376	030-F003
40x25x15	42.3	22.5	17.3	0.86	10.2	64		23		1.49	7.21	7.5	600	040-W433	-
50x40x20	52.3	37.1	22.8	0.76	14.1	79		15		4.05	9.0	4.5	1 200	050-W434	-
52x40x25	54.3	37.1	27.8	1.14	14.5	121		22		4.05	10.2	4.1	2 000	052-W827	-
55x40x25	57.5	37.1	27.8	1.43	14.9	156		26		4.05	10.5	3.9	2 500	055-W848	-
63x50x25	65.6	46.6	27.8	1.24	17.8	161		19		6.40	11.1	3.1	2 500	063-W435	-
80x63x25	83.5	59.3	27.8	1.62	22.5	267		20		10.4	12.6	2.2	4 000	080-W436	-
100x80x25	104.5	74.5	28.5	1.9	28.3	395		19		16.4	14.6	1.6	6 000	100-W342	-
130x100x25	135.5	94.5	28.5	2.85	36.1	757		22		26.3	17.2	1.1	11 000	130-W352	-
160x110x25	165	105	28.5	4.75	36.1	1480		31		32.5	19.9	0.8	16 000	160-W758	-

* VITROVAC 6030 F *** At a winding factor of 0.5 **** Thermal resistance values are calculated based on an imaginary component using typical windings and a moulded design. No forced cooling. Values are valid for core- and windings losses and understood for a rough orientation only.

۱-۱-۶-۲- فناوری استفاده از هسته آمورف

ورقه‌های آمورف در هسته ترانسفورماتورها از دهه هفتاد میلادی در بسیاری از کارخانجات سازنده ترانسفورماتور به کار رفته‌اند. مواد آمورف نوع جدیدی از مواد هستند که دارای ساختار کریستالی نیستند. این موضوع به این معناست که اتم‌ها به صورت منظم در کنار یکدیگر قرار نگرفته‌اند. آلیاژهای آمورف، آلیاژهایی هستند که در هنگام سرد شدن سریع از حالت مذاب، اتم‌های آن‌ها فرصت لازم برای قرار گرفتن در مواضع بلوری را پیدا نکرده و بدون تشکیل آرایش‌های منظم اتمی (شبکه بلوری) در جای خود محبوس شده‌اند. نظم موجود در این آلیاژها نظم کوتاه برد و تا حدودی شبیه نظم اتم‌ها در حالت مذاب است. به همین دلیل در آلیاژهای مذکور دانه‌های بلوری و مرز دانه وجود ندارد. در شکل ۱-۱ نحوه قرارگیری اتم‌ها در دو حالت آمورف و بلوری به صورت شماتیک نشان داده شده و الگوهای پراش اشعه X آن‌ها مقایسه شده است [۱۶].



شکل ۱-۱-۱- مقایسه نحوه قرارگیری اتم‌ها در دو حالت بلوری (a) و آمورف (b) و الگوهای پراش اشعه X آلیاژهای بلوری (c) و آمورف (d) [۱۶].

حد اشباع مغناطیسی مواد آمورف در محدوده ۱/۵ تسلا و در فولادهای الکتریکی سیلیکونی ۲/۱ تسلا است. فلز آمورف مورد استفاده در هسته ترانسفورماتور نازک تر، سخت تر و شکننده تر از فولاد سیلیکونی است. این مواد علاوه بر سختی بالا، دارای خواص مغناطیسی عالی هستند. همچنین تلفات هسته آمورف ۵۰-۲۵ درصد فولاد الکتریکی سیلیکونی است. استفاده از فلزات آمورف باعث کاهش حدود ۶۰-۷۰ درصدی تلفات هسته ترانسفورماتورها نسبت به ترانسفورماتورهای دارای هسته فولاد سیلیکونی می شود [۱۰ و ۱۶].

۱-۱-۶-۲-فرآیند تولید مواد آمورف

فناوری تولید این نوع مواد پیچیده بوده و به طور کلی شامل موارد ذیل است:

- مواد اولیه به خوبی مخلوط و در داخل یک کوره القایی ریخته می شوند.
- مواد مذاب به داخل یک محفظه متراکم کننده هدایت می شوند.
- جریان باریکی از مواد بر روی یک قالب تزریق می شود. سرعت انجماد در این قالب بسیار بالا و در حدود یک میلیونیم ثانیه است. محصول این بخش نوار باریک آمورف است.
- ابعاد (ضخامت و عرض) نوارهای تولیدی در بخش های قبل کنترل شده و نهایتاً نوار تولید به صورت رول پیچیده می شود.

۱-۱-۶-۳-مزایای استفاده از مواد آمورف

به طور کلی مزایای این نوع مواد به شرح ذیل می باشد:

- کاهش بیشتر تلفات هسته نسبت به فولادهای سیلیکونی: به دلیل بیشتر بودن مقاومت الکتریکی (حدود ۳ برابر) آن ها و نیز کاهش ضخامت (حدود ۰/۱) در مجموع به میزان حدود ۶۰ درصد [۱۶].
- کاهش آلودگی محیط زیست به دلیل کاهش مصرف انرژی در نیروگاه: یکی از مزایای استفاده از ترانسفورماتورها با هسته آمورف کمک به کاهش مشکلات زیست محیطی و آلودگی هواست. چرا که کاهش تلفات در ترانسفورماتور که به واسطه استفاده از این نوع مواد ایجاد می شود مستقیماً باعث کاهش مصرف مواد سوختی که انرژی از آن ها حاصل می شود شده و نهایتاً آلودگی محیط زیست کمتر می شود [۱۷].

۱-۱-۶-۴-معایب استفاده از مواد آمورف

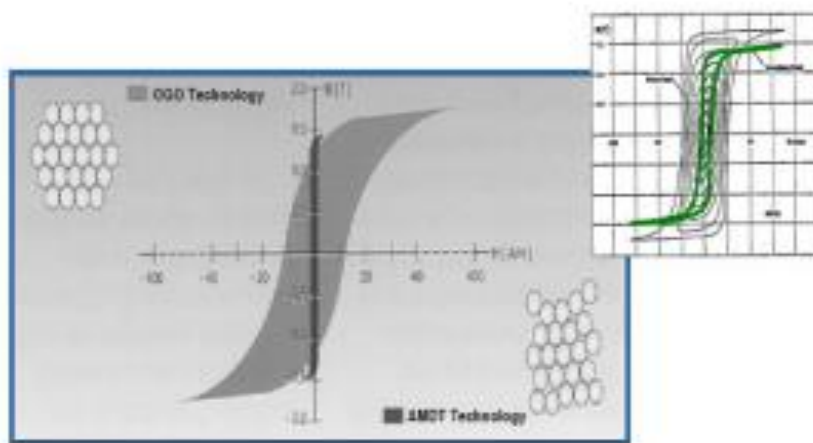
- حد اشباع شار مغناطیسی پایین: حد اشباع مغناطیسی مواد آمورف در محدوده ۱/۵ تسلا و در فولادهای الکتریکی جهت دار، ۲/۱ تسلا است و این موضوع در راستای استفاده از نوارهای آمورف در ترانسفورماتورهای بزرگتر از محدوده توزیع، محدودیت ایجاد می کند.
- مشکلات تولید و نیز تولیدکنندگان بسیار محدود مواد آمورف: نرخ سرعت انجماد بسیار بالا (۱۰۶ k/s) نیز یکی دیگر از مسائلی است که در مجموع فرآیند تولید آنرا با مشکل روبرو ساخته است [۱۶].
- عدم امکان سهولت در برش به دلیل سختی بسیار بالا: سختی نوارهای آمورف زیاد است. همین مساله باعث محدودیت برش در نوارهای تولیدی است. سختی این نوارها به طور متوسط ۴ تا ۵ بار بیشتر از سختی فولادهای الکتریکی سیلیکونی است. که این مساله باعث می شود نرخ سایش در ابزار برش چنین موادی حدود ۱۰۰۰ بار بیشتر از نرخ سایش فولادهای الکتریکی سیلیکونی باشد. برای برش چنین نوارهایی باید از روش های نوین نظیر روش لیزری و یا EDM^۱ استفاده کرد [۱۸].

¹Electrical discharge machining

- فاکتور چینش کم: ضخامت نوار آمورف به طور متوسط 0.1 ورق سیلیکونی است. به همین دلیل فاکتور چینش ورق‌های آمورف حدود $75-85$ درصد و در ورق‌های فولادی سیلیکونی حدود 95 درصد است. لذا این مساله باعث افزایش حجم هسته می‌شود [۱۸].
- حساسیت ویژه در حین استفاده به دلیل ضخامت بسیار کم: اعمال هرگونه نیروی نامناسب باعث ایجاد تنش‌های پسماند در این نوارها و نهایتاً افزایش تلفات خواهد شد.
- افزایش قیمت اولیه ترانسفورماتور: قیمت مواد آمورف حدود $2-3$ برابر ورق‌های الکتریکی سیلیکونی است. همچنین به دلیل ضخامت کم مواد آمورف نهایتاً قطر هسته افزایش یافته و میزان مواد مصرفی مانند مس، مواد عایقی و... افزایش می‌یابد. این موضوع باعث افزایش قیمت اولیه ترانسفورماتور می‌شود [۱۶].

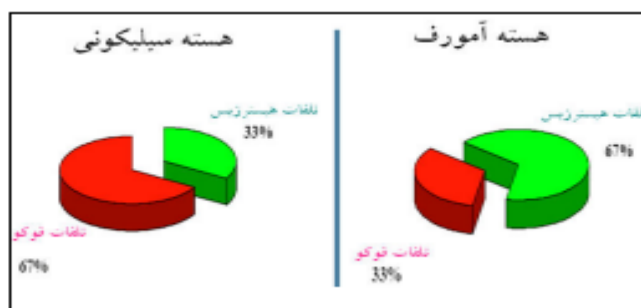
۱-۶-۳- مقایسه فناوری استفاده از هسته آمورف و هسته سیلیکونی

حلقه هیستریزیس هسته آمورف و هسته سیلیکونی در شکل ۱۲ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همانگونه که در شکل ۱-۱۲ مشاهده می‌گردد سطح حلقه هیستریزیس مواد سیلیکونی بیشتر از مواد آمورف می‌باشد و هر چقدر سطح این منحنی بیشتر باشد تلفات بیشتر خواهد شد.



شکل ۱-۱۲- حلقه هیستریزیس هسته آمورف و هسته سیلیکونی [۱۶].

در شکل ۱-۱۳ درصد تلفات فوکو و هیستریزیس در مواد آمورف و سیلیکونی نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود تلفات فوکو در هسته سیلیکونی و تلفات هیستریزیس در هسته آمورف بیشترین مقدار را داشته است.



شکل ۱-۱۳- مقایسه تلفات فوکو و هیستریزیس در مواد آمورف و سیلیکونی [۱۶].

به عنوان نمونه، مولفه‌های مختلف تلفات یک ترانسفورماتور 250 کیلوولت‌آمپر با هسته آمورف با هسته فولادی در جدول زیر مقایسه شده‌اند.

جدول ۱-۵- مقایسه مولفه‌های مختلف تلفات هسته در ترانسفورماتورهای آمورف و فولادی [۱۶]

تلفات	ترانسفورماتور ۲۵۰ کیلوولت آمپر با هسته آمورف	ترانسفورماتور ۲۵۰ کیلوولت آمپر با هسته فولادی
تلفات هیستریزیس (W)	۹۹	۱۵۵
تلفات جریان گردابی (W)	۳۳	۳۱۱
مجموع تلفات هسته (W)	۱۳۲	۴۶۶

همانگونه که در جدول ۱-۵ دیده می شود، ترانسفورماتورهای توزیع با هسته آمورف اگر چه گرانتز از ترانسفورماتورهای دارای هسته فولاد سیلیکونی هستند، اما می توانند در بسیاری از شبکه های توزیع مقرون به صرفه باشند.

۱-۶-۴- فناوری استفاده از مواد ابررسانا

ابرسانایی پدیده ای است که در بعضی از مواد در دمای بسیار پایین اتفاق می افتد. در حالت ابرسانایی مقاومت الکتریکی ماده دقیقاً صفر می شود و ماده خاصیت دیامغناطیس کامل پیدا می کند؛ یعنی میدان مغناطیسی را از درون خود طرد می کند. طرد میدان مغناطیسی تنها تفاوت اصلی ابررسانا با رسانای کامل است، زیرا در رسانای کامل انتظار می رود میدان مغناطیسی ثابت بماند، در حالی که در ابررسانا میدان مغناطیسی همواره صفر است. مقاومت الکتریکی هادی های فلزی معمول، مثل مس و نقره، نیز با کاهش دما کم می شود، با این حال در اثر وجود ناخالصی در این هادی ها، حتی در دمای صفر مطلق نیز، مقاومت الکتریکی آن ها صفر نخواهد بود. اما مقاومت الکتریکی ابررسانا، با کاهش دمای آن به زیر دمای مشخصی، که دمای بحرانی (T_c) نامیده می شود، به صفر خواهد رسید. خاصیت ابرسانایی در مواد مختلفی، شامل عناصر ساده همانند آلومینیوم و قلع، آلیاژهای فلزی مختلف و بعضی از نیمه هادی ها که به شدت به آن ها ناخالصی افزوده شده است، رخ می دهد. لیکن این خاصیت در فلزات نجیب مانند طلا و نقره، و در فلزات فرو مغناطیسی اتفاق نمی افتد. بعضی از خواص فیزیکی مواد ابررسانا با یکدیگر متفاوت است. از جمله این خواص، ظرفیت گرمایی و دمای بحرانی است که در آن خاصیت ابرسانایی از دست می رود. از طرفی خواص دیگری نیز وجود دارد که مستقل از نوع ماده به کار رفته می باشد. برای مثال تمامی ابررساناها در نبود میدان مغناطیسی، دارای مقاومت الکتریکی صفر هستند. در این فناوری بر حسب میزان نیاز به کاهش تلفات می توان از مواد ابررسانا در ساخت ورقه های هسته و شمش ها و کابل های مورد استفاده در سیم پیچ استفاده کرد [۱۹].

توجه جدی به ترانسفورماتورهای ابررسانا از زمان شناخت ابررساناهای دمای پایین LTS (اعم از Nb-Ti و Nb₃-Sn) از اوایل دهه ۱۹۶۰، آغاز شد. مطالعاتی که در آن زمان بر روی این ترانسفورماتورها انجام شد، نشان داد که جهت بهره برداری از این ترانسفورماتورها، باید آنها را در دمای ۴.۲K نگه داشت که انجام چنین کاری اقتصادی نیست. بهمین دلیل گامها بسوی کشف موادی با قابلیت ابرسانایی در دماهای بالاتر، برداشته شد. از سال ۱۹۸۰، توسعه ترانسفورماتورهای LTS توسط شرکت های ABB، GEC-Alsthom، در اروپا و چند شرکت صنعتی و مرکز دانشگاهی در ژاپن، مورد پیگیری قرار گرفت. پیشرفت های بعمل آمده در تولید هادی های طویل Nb-Ti و مواد با مقاومت بالا (Cu-Ni) بر کاهش تلفات ac تاثیر زیادی داشته است. مساله عملی بودن کاهش وزن و افزایش راندمان نیز بر روی ترانسفورماتورهای با قدرتهای کمتر از ۱۰۰KVA (تکفاز Alsthom 80KVA)، (Toshiba) 30KVA و

سه فاز 40KVA (دانشگاه Osaka) مورد بررسی قرار گرفت. هم چنین ترانسفورماتورهای بزرگتری نیز ساخته شده و آزمایشهای مربوطه را با موفقیت پشت سر گذاشتند. در یک ترانسفورماتور تکفاز 330KVA ساخت ABB پیش بینی های لازم برای محدود سازی جریان خطا و حفاظت در برابر یخ زدگی در نظر گرفته شد. شرکت برق Kansai Electric نیز گزارشی از ترانسفورماتور LTS با هادی Nb3Sn با قدرت 2000 KVA ارائه نموده است [۲۰].

ترانسفورماتور HTS در واقع ترانسفورماتوری است که به جای سیم پیچ های مسی در آن، از سیم های HTS استفاده می شود. سیم HTS از مواد ابررسانا تشکیل شده است و با توجه به ساختار ابررساناها باید حداکثر در دمای ۱۲۵ درجه کلوین، خنک نگه داشته شود. البته در عمل این دما بستگی به جریان عبوری از آن دارد. بنابراین به طور کلی فرق بین ترانسفورماتورهای HTS و ترانسفورماتورهای معمولی، استفاده از مواد ابررسانا است که باعث عبور جریان بیشتر و در نتیجه انتقال قدرت زیاد می شود. شرکت بروکر آمریکا ساخت ابررساناهای دما بالا را از سال ۲۰۰۸ در آلمان آغاز کرده است. اولین ترانسفورماتور ابررسانای دما-بالا 5/10 کیلوولت به ۴۰۰ ولت، سه فاز به ظرفیت ۶۳۰ کیلوولت آمپر و روش خنک سازی LN2 (کلوین ۷۷) با هسته غیربلورین در جهان است که در سال ۲۰۰۵ در شبکه قدرت سینکیانگ بهره برداری شد و دارای قابلیت اطمینان عملکرد بالا در دراز مدت است. سیم استفاده شده از نوع Bi 2223 است و سیم پیچ اولیه به صورت سلونوئید و ثانویه پنکیک دابل است.

در شرکت ابررسانای آمریکا (American Superconductor) کابل های جدید HTS دارای ۴ مشخصه هستند که آنها را از کابل های معمولی مسی متمایز می کنند [۲۰]:

- ظرفیت انتقال توان بالا
- امپدانس خیلی کم
- سادگی نصب و راه اندازی
- انتخاب گزینه محدود کننده جریان خودکار

۱-۶-۵- پژوهش های انجام شده در خصوص هسته های فریتی

مجموعه ای از تحقیقات انجام شده بر روی فریت ها در جدول ۱-۶ آورده شده است.

جدول ۱-۶- پژوهش های انجام شده در خصوص هسته های فریتی

شماره مرجع	شماره	فرمول شیمیایی	نوع ساختار	نوع سنتز	کاتیون جانشانی شده	مغناطش M (emu/g)	نیروی وادارندگی Hc (Oe)	ضریب تراوایی مغناطیسی μ	ناحیه فرکانسی (GHz)
۱۶	۱	$Ni_xCu_yZn_{1-x-y}Fe_2O_4$	اسپینلی	همرسویی	Cu		0.7		۱MHz
۱۷	۲	$(Ni_{0.25}Cu_{0.20}Zn_{0.55})Fe_2O_4$	اسپینلی	خودا حتراف قس اتوماتیک	Mg			۲۴-۰.۱۸ ۲۰	۱-۱۰ Hz MHz
۱۸	۳	$Li_xCu_{0.1}Co_{0.1}Zn_{0.8-2x}Fe_{2-x}O_4$	اسپینلی	خودا حتراف قس اتوماتیک	Li	۷۸.۹۴۱۱ ۸		۶۱-۰.۱۰	۱-۱۰۰ Hz MHz
۱۹	۴	$Zn_{1-x}Cd_xFe_2O_4$	اسپینلی	احتراف مایکروویو	Cd	۴۵.۶۲۲	۲۱.۱۵۲		۱-۱۰۰ Hz MHz
۲۰	۵	$(Ni_{0.4}Co_{0.2}Zn_{0.4})Fe_2O_4$	اسپینلی	مایکروویو	Co				۱۸-۰.۵ GHz
۲۱	۶	$Ni_{0.4}La_{0.1}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	اسپینلی	همرسویی	La-Ni		۷۱.۲		۱-۱۰۰ Hz MHz
۲۲	۷	$Ni_{0.4}Mn_{0.1}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	اسپینلی	همرسویی	Mn-Ni		۱۶۹.۴		۱-۱۰۰ Hz MHz
۲۳	۸	$Ni_{0.4}Co_{0.1}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	اسپینلی	همرسویی	Co-Ni		۱۸۵.۳		۱-۱۰۰ Hz MHz
۲۴	۹	$Ni_{0.4}Cu_{0.1}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	اسپینلی	همرسویی	Cu-Ni		۱۷۹.۴		۱-۱۰۰ Hz MHz
۲۵	۱۰	$Ni_xZn_{1-x}Fe_2O_4$	اسپینلی	احترافی	Ni=۰.۵	۶۷.۶۲	۸۱.۰۹	۸۰۰	۱MHz
۲۶	۱۱	$MgFe_2O_4$	اسپینلی	SHS			۴۰		
۲۷	۱۲	$Li_{0.5-x}Cd_xFe_{2.5-x/2}O_4$	اسپینلی	سرامیکی	Li-Cd	۳۱۰.۴۵ ۵.۲۳			۱-۱۰۰ Hz MHz
۲۸	۱۳	$Mg_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	اسپینلی	FSS	Mg		۸۰	۶۵۰	۱ MHz
۲۹	۱۴	$Mg_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	اسپینلی	سرامیکی	Mg		۸۰	۵۸۰	۱ MHz
۳۰	۱۵	$Mg_{0.2}Cu_{0.2}Zn_{0.62}Fe_{1.98}O_{3.99}$	اسپینلی	FSS	Mg-Cu		۸۰	۶۰۰	۱ MHz
۳۱	۱۶	$Mg_{0.2}Cu_{0.2}Zn_{0.62}Fe_{1.98}O_{3.99}$	اسپینلی	سرامیکی	Mg-Cu		۸۰	۶۹۰	۱ MHz
۳۲	۱۷	$Mg_{0.9}Mn_{0.1}In_xFe_{2-x}O_4$	اسپینلی	سرامیکی	Mg-Mn-In				۱۰ kHz to ۱۰ MHz

مرجع	کاربرد	فرکانس (Hz)	تراوایی (μ)	نیروی وادارندگی Hc (Oe)	مغناطش M_s (emu/g)	میدان اعمال شده	کاتیون جانشانی ی شده	اندازه ذرات (nm)	نوع سنتز	سال	فرمول شیمیایی	
۲۷		$\geq 4G$		16 (x=0.0)	40 (x=0.1)		Al	70-100	همرسویی	2016	$Mg_{0.9}Mn_{0.2}Al_xFe_{2-x}O_4$	1
۲۸	فرکانس عملکرد بالا و پایین			84.32 (x=0.05)	31.48 (x=0.03)	21.7(x=0.0) 23.9(x=0.1) (تسلل)	Sc	21-23	solution combustion	2017	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Sc_xFe_{2-x}O_4$	2
۲۹				0.6 K 18 K			Zn Co		سل-ژل	2017	نانوذرات فریتی	3
۳۰	Hyper thermia			119.59 (x=0.01)	47.99 (x=0.015)	-600-600 Oe	Sm Gd	31.5-38.2	sol-gel auto- combustion	2016	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Sm_xGd_{0.02-x}Fe_{1.98}O_4$	4
۳۱					2.2 (x=0.05)		La		همرسویی	2016	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}La_xFe_{2-x}O_4$	5
۳۲	بررسی بهترین توزیع کاتیون نیکل در فریت منگنز-روی						Ni		citrate method	2016	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	6
۳۳				32 (x=0.40)	55.6 (x=0.40)		Zn		همرسویی	2015	فریت Ni-Co-Mn-Mg	7
۳۴			111-442		60.5		Nd		ceramic method	2013	$Mn_{0.5}Ni_{0.1}Zn_{0.4}Nd_xFe_{2-x}O_4$	8
۳۵				91.8 158.5 501.7	100.3 104.2 95.9				سل-ژل اختراقی	2013	$M_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ M= Ni M= Mn M= Cu	9
۳۶				22 ± 0.01	49.55 ± 0.01	20 KOe	Mn		همرسویی	2013	$Co_{0.5-x}Mn_xZn_{0.5}Fe_2O_4$	10
۳۷	فرکانس های بالا	1-10 M	30-35 1814.91- 2285.49				In Al		citrate precursor Conventional ceramic	2009	$Mg_{0.9}Mn_{0.1}In_xFe_{2-x}O_4$ $Mg_{0.9}Mn_{0.1}Al_yFe_{2-y}O_4$	11
۳۸	سنتز و بررسی خواص نمونه برای فرکانس های بالا							8.50-13.44	Hydrothermal	2008	$Mn_xZn_{1-x}Fe_2O_4$	12
۳۹		1 M		55 200	23.0 11.7			2-16	co- precipitation	2006	$Ni_{0.65}Zn_{0.35}Fe_2O_4$	13
۴۰				223 303	54.1 48.1		Zn	8.8-11.1 8.5-11.3	chemical coprecipitation	2005	$Co_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ $Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_4$	14
۴۱	بررسی خواص مغناطیسی نمونه						Gd		chemical coprecipitation	2005	$Mn_xZn_y[Fe_{2-x}Gd_x]O_4$ $Mn_xZn_yFe_2O_4$	15
۴۲		100-400 M							standard ceramic technology	2015	composites of Ni-Zn ferrite	16

۱-۶-۶-۱- تلفات ترانسفورماتورها

ترانسفورماتور وسیله ای است که انرژی ورودی را با ماهیت الکتریکی از شبکه برق دریافت کرده و در خروجی نیز آن را با همان ماهیت الکتریکی به بار تحویل می دهد. اما همه انرژی جذب شده از شبکه برق تحویل بار نمی شود، بلکه بخشی از آن در هسته و سیم پیچ به گرما تبدیل می شود. به مقدار انرژی الکتریکی که در واحد زمان در ترانسفورماتور به گرما تبدیل می شود تلفات گویند. بنابراین تلفات ترانسفورماتور مربوط به هسته و سیم پیچ می باشد [۲۱]. به طور کلی توان در ترانسفورماتورها به دو صورت تلف می شود:

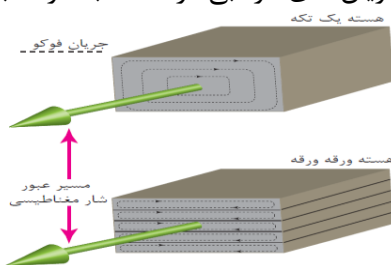
الف- تلفات مسی یا اهمی

به علت وجود مقاومت اهمی در سیم پیچ ها در اثر عبور جریان الکتریکی مقداری از توان به صورت حرارت در سیم پیچ ها از بین می رود.

ب- تلفات هسته آهنی

مقدار انرژی الکتریکی که در هسته ترانسفورماتور به گرما تبدیل می شود را تلفات هسته گویند و چون جنس هسته عموماً آهن است به آن تلفات آهنی نیز می گویند. توان در هسته به سه صورت تلف می شود که عبارتند از:

- **تلفات فراری یا پراکندگی:** مقداری از شار مغناطیسی بدون آنکه در داخل هسته و در سیم پیچ ثانویه مفید واقع شود به بیرون از هسته نشت کرده و پراکنده می شود و باعث کاهش توان می گردد.
- **تلفات فوکو:** در اثر تغییرات شار مغناطیسی در هسته، جریانی به نام جریان فوکو در هسته ایجاد می شود که بر طبق قانون لنز با جریان به وجود آورنده خود مخالفت می کند و باعث کاهش آن می شود. بنابراین با کاهش جریان، توان ترانسفورماتور افت پیدا می کند. جریان فوکو یک جریان گردابی است و باعث گرم شدن هسته نیز می شود. برای کاهش جریان فوکو، هسته را از ورقه هایی که نسبت به همدیگر عایق هستند می سازند. مسیر حرکت جریان القایی هسته عمود بر مسیر عبور شار و مانند گرداب در مقطع هسته می باشد به همین خاطر آن را جریان گردابی^۱ می گویند. در شکل ۱-۱۴ برش مقطعی از یک هسته و مسیر جریان گردابی نشان داده شده است. با جاری شدن جریان گردابی در هسته، بدلیل وجود مقاومت الکتریکی آن، هسته ترانسفورماتور گرم می شود. مقدار انرژی که در واحد زمان ناشی از جریان های گردابی در هسته به گرما تبدیل می شود را تلفات فوکو گویند.



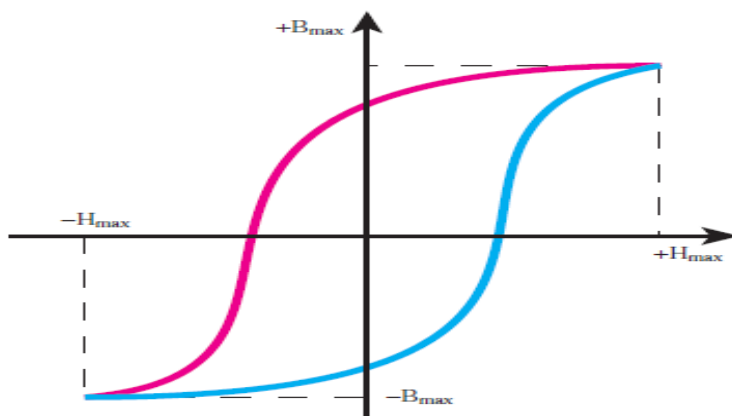
شکل ۱-۱۴- نمای عبور جریان فوکو از مقطع هسته ترانسفورماتور [۲۲].

همان طور که در شکل ۱-۱۴ مشاهده می شود با ورقه کردن هسته و عایق کردن آنها از یکدیگر مقاومت الکتریکی هسته را افزایش می دهند تا تلفات فوکو کاهش یابد. مقدار تلفات فوکو به حجم هسته، مقاومت الکتریکی و ضخامت ورقه های هسته و همچنین مجذور ولتاژ اعمال شده به ورودی ترانسفورماتور بستگی دارد. چون ولتاژ شبکه ثابت است و هسته نیز جزو ساختمان ترانسفورماتور محسوب می شود پس این تلفات نیز در ترانسفورماتور بدون تغییر بوده و

¹. Eddy Current

ثابت می باشد. به مجموع تلفات هیستریزیس و فوکو، تلفات هسته ترانسفورماتور گویند و از آنجا که هر ترانسفورماتور در یک ولتاژ نامی و فرکانس نامی به کار گرفته می شود. بنابراین تلفات هسته ثابت خواهد بود. از طرفی چون جنس هسته ترانسفورماتور از ترکیبات آهنی است، به تلفات هسته، تلفات آهنی نیز گفته می شود. به دلیل ثابت بودن تلفات هسته ترانسفورماتور در محاسبات آن را به عنوان تلفات ثابت ترانسفورماتور در نظر می گیرند [۲۲].

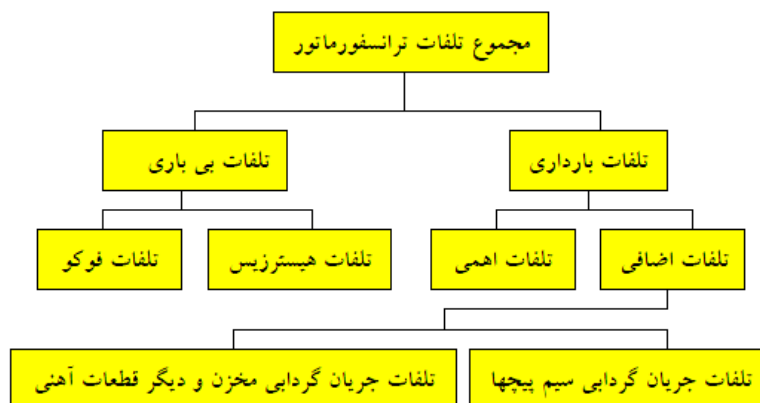
• **تلفات هیستریزیس:** تلفاتی است که در اثر کاهش و افزایش حوزه مغناطیسی در هسته به وجود می آید. به این ترتیب که، جریان در لحظه ای که مثبت است حوزه ای مغناطیسی در یک جهت معین در هسته به وجود می آید و وقتی که جهت جریان عوض شود، جهت حوزه مغناطیسی نیز عوض می شود. در نتیجه عوض شدن جهت حوزه مقداری از حوزه که در قسمت مثبت هسته باقی مانده بود، باید حذف شود و جهت تغییر کند. این مقدار باقی مانده را پسماند مغناطیسی می گویند. حذف پسماند مغناطیسی و عوض شدن جهت آن و ادامه این عمل باعث تلفات هیستریزیس می شود. به زبان ساده وقتی جریان تغییر جهت می دهد گشتاورهای مغناطیسی هسته نیز تغییر جهت می دهند این تغییر جهت باعث گرم شدن هسته و ایجاد تلفات هیستریزیس می گردد. در شکل ۱-۱۵ منحنی هیستریزیس در یک ماده مغناطیسی نشان داده شده است. اگر نیروی محرکه مغناطیسی در مدار مغناطیسی به طور متناوب تغییر جهت دهد در این صورت منحنی $B-H$ یعنی چگالی میدان مغناطیسی بر حسب شدت میدان مغناطیسی مطابق شکل ۱-۱۵ خواهد شد.



شکل ۱-۱۵- منحنی هیستریزیس در یک ماده مغناطیسی [۲۳].

حلقه نشان داده شده در شکل بالا را حلقه هیستریزیس می گویند. این حلقه بیانگر آن است که در هر سیکل برای تغییر جهت میدان مغناطیسی در مولکول های هسته انرژی الکتریکی لازم است. هرچه حلقه باریک تر باشد مساحت آن کمتر و در نتیجه انرژی تلف شده به صورت گرما در آن کمتر خواهد بود و بالعکس. به مقدار انرژی الکتریکی که در واحد زمان صرف تغییر جهت شار مغناطیسی در هسته می شود تلفات هیستریزیس گویند. مقدار تلفات هیستریزیس به فرکانس و جنس هسته بستگی دارد. برای کاهش تلفات هیستریزیس جنس هسته از مواد فرومغناطیس با پسماند کم انتخاب می شود. هرچه فرکانس شبکه بیشتر باشد عمل تغییر جهت میدان مغناطیسی سریع تر صورت می گیرد. لذا افزایش فرکانس باعث افزایش تلفات هیستریزیس می شود اما از آنجا که فرکانس شبکه جنس هسته جزء ثابت ساختمان ترانسفورماتور هستند پس مقدار این تلفات ثابت می باشد [۲۳].

به طور کلی تقسیم بندی تلفات در ترانسفورماتور در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود مجموع تلفات ترانسفورماتور به دو دسته تلفات بارداری و تلفات بی باری تقسیم بندی می شود که هریک به زیر مجموعه های اشاره شده در شکل ۱-۱۶ نیز تقسیم بندی می شوند.



شکل ۱-۱۶- تقسیم بندی تلفات در ترانسفورماتور [۱۶].

در میان ماشین های ساخت دست بشر بالاترین راندمان متعلق به ترانسفورماتورها است که بسته به ظرفیتشان بین ۹۸٪ تا ۹۹٪ است. اگر چه این راندمان بسیار بالا است، اما با افزایش قدرت ترانسفورماتور مسئله دفع حرارت و انرژی تلف شده در ترانسفورماتورها اهمیت پیدا می کند. در یک ترانسفورماتور با ظرفیت ۱۰۰ MVA و راندمان ۹۹٪ با فرض ضریب قدرت یک در هر ساعت یک مگاوات انرژی تبدیل به حرارت می شود، با توجه به اثر مخرب حرارت بروی عایق ترانسفورماتورها روش های دفع حرارت ایجاد شده و حفظ درجه حرارت قسمت های داخلی ترانس در حد مجاز موجب افزایش راندمان ترانسفورماتور می شود. در ترانسفورماتورها انرژی الکتریکی در مس سیم پیچها، آهن هسته، تانک ترانس و سازه های نگهدارنده به صورت حرارت تلف می شود. حتی در زمانی که ترانسفورماتور بدون بار است، در هسته تلفات بی باری به وجود می آید. تلفات بی باری بخشی از تلفات ذاتی و ثابت ترانسفورماتور است که میزان آن به تکنولوژی و مواد به کار رفته در هسته آهنی ترانسفورماتور وابسته بوده و با بهبود کیفیت ورق های فولاد سلیکونی به کار رفته در هسته می توان تا حدود ۲۲۴/۳۶۸۲ میلیون کیلووات ساعت انرژی در سال صرفه جویی نمود [۱۶]. اما تلفات باردار ترانسفورماتور قدرت ناشی از میزان بار مصرفی ترانسفورماتور است و شامل تلفات مسی (اهمی) سیم پیچ های ترانسفورماتور، تلفات فن ها، پمپ ها، تلفات ناشی از جریان فوکو در سیم پیچها و تلفات ناشی از فلوی سرگردان ایجاد شده در بخش های فلزی مانند تانک است. تلفات ترانسفورماتورهای قدرت معمولاً در حدود ۲/۵٪ ظرفیت نامی ترانسفورماتور بیان می شود و جز بهینه سازی در طراحی و ساخت راهی دیگر جهت کاهش این تلفات به کار نمی رود و آن را جزئی بدیهی و لاینفک در نظر می گیرند. البته ایجاد نقص در سیستم تهویه ترانسفورماتور می تواند افزایش تلفات را از این میزان قابل قبول به همراه داشته باشد. هنگامی که توان انتقالی از ۱۰ MVA فراتر می رود، طراحی های خاصی برای غلبه بر فشارهای مکانیکی ناشی از جریان های اتصال کوتاه، سطوح عایقی بالاتر و خنک سازی بیشتر لازم است. در این محدوده توان ها غالباً از ترانس های پر شده با مایع استفاده می شود. عایق های بین سیم پیچی در ولتاژهای بالا بسیار مقاوم تر می شوند. در ترانس های پر شده با مایع، گرما از طریق دیواره های مخزن با انتقال حرارت و یا توسط جریان همرفت طبیعی و یا اعمالی از بین می رود. امروزه با استفاده از کیفیت خاص فولاد مغناطیسی و طراحی بهبود یافته بازده ترانسفورماتور تا ۹۹/۸۵٪ به دست آمده است. تلفات گرمایی حتی در این بازدهی زیاد، همچنان برای یک واحد ۴۰۰ MVA دارای اهمیت است. به طوریکه این مقدار معادل ۶۰۰ kw در حالت بار کامل است. لذا سیستم خنک سازی، وزن و ابعاد سیستم ها باید به دقت انتخاب شود و اینها از جمله محدودیت های اصلی در کشورهای مختلف است. ترانسفورماتورهای قدرت، دارای راندمان بسیار زیادند و بزرگترین آنها دستگاهی با بالاترین راندمان است.

با این وجود نقطه نظرانی برای بهبود این بازدهی مطرح شده است. هر گونه بهبود در عملکرد ترانسفورماتورهای بزرگ، عامل بالقوه‌ای برای سود خالص اقتصادی است چرا که توان عملیاتی و کار مداوم نشان می‌دهد که انرژی اتلافی آنها همچنان بالاست [۱۶]. در جدول ۱-۷ بازده و تلفات ترانس‌های با ظرفیت‌های متفاوت نشان داده شده است.

جدول ۱-۷- بازده و تلفات ترانس‌های با ظرفیت‌های متفاوت [۱۶]

نوع ترانسفورماتور	توان مرتبط	بازده در		تلفات در	
		۱۰۰٪ بار نامی	۵۰٪ بار نامی	۱۰۰٪ بار نامی	۵۰٪ بار نامی
نیروگاهی	۱۱۰۰ MVA	۹۹٪/۶۰	۹۹٪/۷۵	۴۴۰۰ KW	۱۳۷۵ KW
نیروگاهی	۴۰۰ MVA	۹۹٪/۶۰	۹۹٪/۷۵	۱۶۰۰ KW	۵۰۰ KW
پست	۴۰ MVA	۹۹٪/۴۰	۹۹٪/۶۰	۲۴۰ KW	۸۰ KW
توزیع	۱ MVA	۹۸٪/۶۰	۹۹٪	۱۴ KW	۵ KW

ترانسفورماتورهای توزیع یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر میزان تلفات انرژی الکتریکی هستند. با وجود اینکه راندمان آن‌ها نسبت به تجهیزات دیگر نسبتاً بالا است اما با توجه به تعداد زیاد آن‌ها در شبکه‌های توزیع و با عنایت به اینکه در تمامی ساعات سال فعال هستند و حتی در حالت بی باری نیز انرژی مصرف می‌کنند، تلفات آن‌ها در مقایسه با سایر تجهیزات قابل ملاحظه بوده و افزایش جزئی بازده، این تجهیزات می‌تواند مزایای اقتصادی زیادی به همراه داشته باشد. ترانسفورماتورهای توزیع بسته به طراحی، نحوه ساخت، کیفیت مواد اولیه مورد استفاده و نوع بهره‌برداری دارای تلفات متفاوتی هستند و امروزه با پیشرفت تکنولوژی ساخت و تأمین مواد اولیه مناسب می‌توان بیش از ۷۰ درصد تلفات آن‌ها را کاهش داد. به کارگیری و استفاده بهینه از ترانسفورماتورهای کم تلفات در شبکه‌های توزیع به جای احداث و توسعه شبکه، صرفه‌جویی قابل توجهی در سرمایه‌گذاری اولیه جهت احداث نیروگاه‌ها و توسعه شبکه‌های انتقال و توزیع و سوخت مصرفی ایجاد می‌کند. بنابراین ارزیابی تلفات واقعی ترانس‌های توزیع در طول عمر مفید آن‌ها کمک می‌کند تا در طراحی، خرید و بهره‌برداری ترانس‌ها با دید بازتری اقدام نمود و امکان مقایسه واقعی گزینه‌های مختلف ترانس‌ها و خرید اقتصادی‌ترین آن‌ها به وجود آید [۲۴]. به دلیل تعداد بسیار زیاد ترانسفورماتورهای توزیع در شبکه و درصد تلفات بالای آن‌ها نسبت به ظرفیت آن‌ها، بررسی و کاهش تلفات آن‌ها اهمیت دارد. به گونه‌ای که در صورت اصلاح طراحی و ساخت این ترانسفورماتورها و کاهش تلفات آن‌ها می‌توان در مصرف انرژی الکتریکی صرفه‌جویی نمود. لازم به ذکر است حدود ۷۰ درصد تلفات شبکه ایران را تلفات شبکه توزیع تشکیل می‌دهد که در این میان سهم ترانسفورماتورهای توزیع بیش از ۳۰ درصد از این تلفات می‌باشد. به عبارت دیگر تلفات ترانسفورماتورهای توزیع در حدود ۲ درصد از کل مصرف انرژی الکتریکی است. امروزه امکان طراحی و ساخت ترانسفورماتورهای توزیع با تلفات پایین در دنیا فراهم شده است. علیرغم این که توانایی طراحی و ساخت این ترانسفورماتورها با استفاده از بعضی از فناوری‌های موجود دنیا، در داخل کشور وجود دارد، متأسفانه به دلیل قیمت بالاتر این ترانسفورماتورها در مقایسه با ترانسفورماتورهای معمولی، چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند.

۱-۲- انواع ترانسفورماتورهای قابل کاربرد در صنعت برق

ترانسفورماتورها علاوه بر اینکه از نظر اندازه بسیار متنوع می‌باشند از جهات مختلف دیگری نیز به اشکال مطرح شده در ذیل تقسیم بندی می‌گردند:

۱-۲-۱- مدل اول تقسیم بندی ترانسفورماتورها :

۱-۲-۱-۱ انواع ترانسفورماتور از نظر تغییرات ولتاژ:

- **ترانسفورماتورهای افزایشده :** ولتاژ خروجی بیشتر از ولتاژ ورودی باشد. این ترانسفورماتورها در ابتدای خطوط انتقال قرار می گیرند.
- **ترانسفورماتورهای کاهشده :** ولتاژ خروجی کمتر از ولتاژ ورودی باشد. این ترانسفورماتورها در انتهای خطوط انتقال قرار می گیرند.

۱-۲-۱-۲ انواع ترانسفورماتور از نظر نوع جریان :

- ترانسفورماتورهای تک فاز
- ترانسفورماتورهای سه فاز

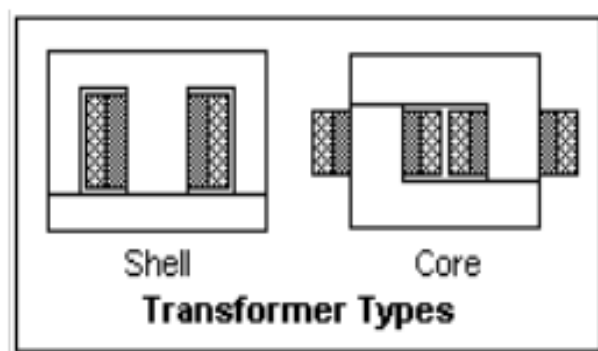
۱-۲-۱-۳ انواع ترانسفورماتور از نظر تجاری:

- **ترانسفورماتورهای قدرت:** در ابتدا و یا انتهای خطوط انتقال فشار قوی قرار می گیرند. ترانسفورماتورهایی که در شبکه اصلی قرار می گیرند بیشتر از ۱۱۰ KV و ترانسفورماتورهایی که در خطوط فرعی قرار می گیرند حدود ۳۵KV-۲ می باشند. ترانسفورماتورهای قدرت به چند دسته ذیل تقسیم می گردند:
 - ✓ ترانسفورماتورها و اتوترانسفورماتورهای پست های فشار قوی
 - ✓ ترانسفورماتورهای نیروگاهی
 - ✓ ترانسفورماتورهای سه سیم پیچ
 - ✓ ترانسفورماتورهای دو ولتاژه
- **ترانسفورماتورهای توزیع :** در اول خطوط مصرف قرار می گیرند و ولتاژ خروجی آنها با توجه به ولتاژ رایج هر کشوری ممکن است ۲۲۰، ۲۰۸، ۱۱۰ ولت باشد. ترانسفورماتورهای توزیع نیز به چند دسته ذیل تقسیم بندی می شوند:
 - ✓ ترانسفورماتورهای توزیع خشک رزینی
 - ✓ ترانسفورماتورهای توزیع روغنی: این نوع ترانسفورماتورها، دو نوع هرمتیک و دارای منبع انبساط را در بر می گیرد.

۱-۲-۱-۴ انواع ترانسفورماتور از نظر ساختمان هسته:

- **ترانسفورماتورهای هسته ای یا ستونی :** در این نوع هسته دارای دو ستون بوده که هر کدام از سیم پیچ ها بر روی یکی از ستون ها پیچیده می شود. به عبارت دیگر سیم پیچ ها بصورت استوانه های متحدالمرکز روی هسته قرار می گیرند، به طوریکه اگر یکی از سیم پیچ ها بسوزد می توان آن را به تنهایی عوض کرد. در صورتیکه در نوع زرهی اگر یکی بسوزد هر دو سیم پیچ می بایست تعویض گردد.
- **ترانسفورماتورهای جداری یا زرهی :** در این نوع هر دو سیم پیچ روی ستون وسط پیچیده می شوند و دو ستون کناری مانند جدار یا زرهی دور ستون وسط را می گیرند. به عبارت دیگر سیم پیچ ها بصورت تناوبی یا ساندویچی روی هم قرار دارند و هسته زرهی، سیم پیچ ها را در برمی گیرد. بنابراین پراکندگی شار کم بوده و لذا تلفات ناشی از نشت شار به اطراف کم می شود. به طوریکه راندمان این نوع از انواع ستونی بیشتر می باشد. برای اینکه اندکسیون در تمام نقاط مدار مغناطیسی ثابت باشد ضخامت ستون وسط را دو برابر می گیرند.

معمولاً ترانسفورماتورهای زرهی به دو صورت استوانه ای و صفحه ای می باشند. در نوع استوانه ای سیم پیچ فشار قوی روی سیم پیچ فشار ضعیف پیچیده می شود. در نوع صفحه ای سیم پیچ فشار قوی و ضعیف به صورت لایه هایی بر روی هم قرار می گیرند. نوع استوانه ای چون ارتفاع کمتری دارد ارجح تر است. این طریقه سیم پیچی زحمت بیشتری دارد و در عوض استحکام مکانیکی آن بیشتر است [۲۵]. شکل ۱-۱۷ نشان دهنده دو مدل ترانسفورماتور با سیم پیچ های جدا می باشد.



شکل ۱-۱۷- ترانس هسته ای و زرهی [۲۵].

ترانسفورماتورها از نقطه نظر نوع سیم پیچی به سه صورت سیم پیچ جدا، اتو ترانسفورماتور (ترانسفورماتوری که حداقل دو سیم پیچ آن دارای بخش مشترک می باشد) و ترانسفورماتور بوستر (ترانسفورماتوری که یک سیم پیچ آن با مدار تغیردهنده ولتاژ، سری می شود و سیم پیچ دوم آن به عنوان سیم پیچ تغذیه مورد استفاده قرار می گیرد) تقسیم می گردند [۲۵].

۱-۲-۵- انواع ترانسفورماتور از نظر نحوه خنک کردن

- ترانسفورماتورهای هوا خنک یا خشک
- ترانسفورماتورهای روغنی

ترانسفورماتورها به دلیل داشتن تلفات اهمی در اثر جریان گردابی و تلفات مغناطیسی در اثر پدیده پس ماند گرم می شوند که بایستی به نحوی حرارت از ترانسفورماتور خارج شود. در نوع خشک، خنک کردن خودبخود یا به کمک پنکه ایجاد می شود. در ترانسفورماتورهای فشار قوی و پر قدرت به دلیل حرارت زیاد آنها را در داخل روغن غوطه ور می کنند. در این حالت یک پمپ وظیفه چرخش روغن و خنک کردن آنها را به عهده دارد. روغن مورد استفاده باید ضمن اینکه غیر قابل اشتعال باشد عایق نیز باشد. روغن هایی مثل کلوفن و پیرانول می توانند در ولتاژهای بالاتر از ۶۰ کیلو ولت کار نمایند.

۱-۲-۲- مدل دوم تقسیم بندی ترانسفورماتورها

به دلیل وجود کاربردهای متفاوت برای ترانسفورماتورها، آنها را بر حسب پارامترهای متفاوتی مطابق با موارد ذیل طبقه بندی می کنند:

بر حسب رده توان : از کسری از ولت- آمپر تا بیش از هزار مگا ولت-آمپر.

بر حسب محدوده بسامد : بسامد قدرت، بسامد صوتی، بسامد رادیویی

بر حسب رده ولتاژ : از چند ولت تا چند صد کیلوولت

بر حسب نوع خنک‌کنندگی : خنک‌کننده هوا، روغنی، خنک‌کنندگی با فن، خنک‌کنندگی آب.

بر حسب نوع کاربرد : منبع تغذیه، تطبیق امپدانس، تثبیت‌کننده ولتاژ و جریان خروجی یا ایزوله کردن مدار.

بر حسب هدف نهایی کاربرد : توزیع، یکسوسازی، ایجاد قوس الکتریکی، ایجاد تقویت‌کننده.

بر حسب نسبت سیم‌پیچ‌ها : افزاینده، کاهنده، ایزوله‌کننده (با نسبت تقریباً یکسان در دوسیم‌پیچ)، متغیر.

بر حسب نوع سیم‌پیچ و جریان

۱-۲-۳- مدل سوم تقسیم‌بندی ترانسفورماتورها

ترانسفورماتورها نه تنها به عنوان اجزاء اصلی سیستم‌های انتقال و پخش انرژی مطرح هستند بلکه در تغذیه مدارهای الکترونیک، یکسوسازی و اندازه‌گیری نیز نقش مهمی بر عهده دارند.

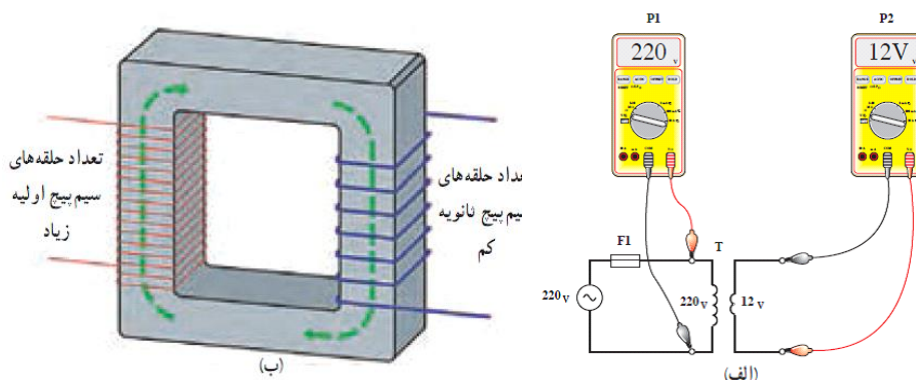
- انواع ترانسفورماتورها را میتوان برحسب وظایف آنها بصورت ذیل تقسیم بندی نمود:
 - ✓ ترانسفورماتورهای قدرت در نیروگاه ها و پستهای فشار قوی
 - ✓ ترانسفورماتورهای توزیع در پستهای توزیع زمینی و هوایی ، برای پخش انرژی در سطح شهرها و کارخانه ها
 - ✓ ترانسفورماتورهای قدرت برای مقاصد خاص مانند کوره های ذوب آلومینیم ، یکسوسازها و واحدهای جوشکاری
 - ✓ اتو ترانسفورماتورها جهت تبدیل ولتاژ با نسبت کم و راه اندازی موتورهای القایی
 - ✓ ترانسفورماتورهای الکترونیک
 - ✓ ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان جهت مقاصد اندازه گیری و حفاظت
 - ✓ ترانسفورماتورهای زمین برای ایجاد نقطه صفر و زمین کردن نقطه صفر
 - ✓ ترانسفورماتورهای آزمایشگاه فشار قوی و...
 - از نظر ماده عایقی و ماده خنک‌کننده نیز ترانسفورماتورها را می‌توان به صورت زیر تقسیم بندی نمود:
 - (الف) ترانسفورماتورهای روغنی
 - (ب) ترانسفورماتورهای خشک
 - (ج) ترانسفورماتورهای با عایق گازی
 - ترانسفورماتورهای خاص : ترانسفورماتورهای ذیل را ترانسفورماتورهای خاص گویند.
 - ✓ ترانسفورماتورهای موبایل
 - ✓ ترانسفورماتورهای یکسوساز
 - ✓ ترانسفورماتورهای مخصوص کوره های قوس الکتریک
 - ✓ ترانسفورماتورهای مخصوص تست
 - ✓ ترانسفورماتورهای زمین
- برخی از راکتورهای روغنی نیز مطابق با موارد ذیل در رده ترانسفورماتورها نیز قرار می گیرند :
- راکتورهای شنت
 - راکتورهای سری
 - راکتورهای زمین
 - نقطه نوترال‌کننده

۱-۲-۴- توصیف ترانسفورماتورهای صنعت برق

حال که انواع ترانسفورماتورهای قابل کاربرد در صنعت برق شناسایی شدند در ذیل توضیحات لازم در این خصوص بیان می گردد:

۱-۲-۴-۱- ترانسفورماتورهای کاهنده

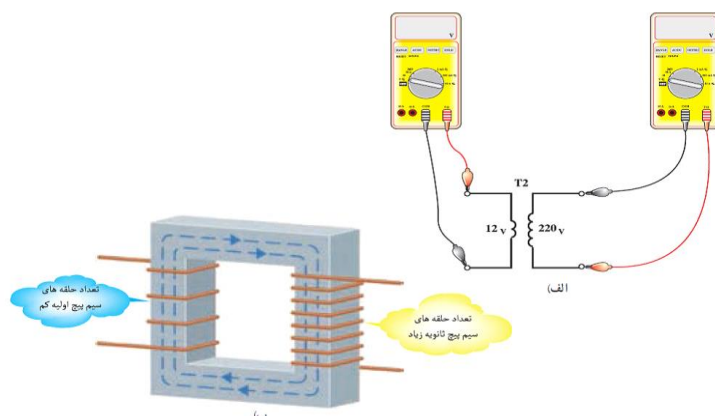
به ترانسفورماتورهایی گفته می شود که ولتاژ ثانویه آن کمتر از ولتاژ اولیه ($V_2 < V_1$) است؛ بر پایه این تعریف و رابطه ضریب تبدیل می توان نتیجه گرفت که در ترانسفورماتورهای کاهنده تعداد دور سیم پیچ های ثانویه از سیم پیچ های اولیه کمتر ($N_2 < N_1$) است؛ یک ترانسفورماتور کاهنده در شکل ۱-۱۸ نشان داده شده است. همانگونه که از شکل ۱۶ مشاهده می شود، سمتی که ولتاژ بیش تری دارد (اولیه)، دارای تعداد دور سیم پیچ بیشتری است. معمولاً از این ترانسفورماتورها زمانی استفاده می شود که ولتاژ کار مصرف کننده از ولتاژ منبع تغذیه کمتر باشد، مانند ترانس های جوش کاری و ترانسفورماتورهایی که در دستگاه های جوش کاری و لوازم خانگی مانند رادیو ضبط به کار می روند. در برخی آداپتورها نیز از این نوع ترانسفورماتور استفاده می شود [۲۶].



شکل ۱-۱۸- ترانسفورماتور کاهنده [۲۶].

۱-۲-۴-۲- ترانسفورماتورهای افزایشنده

به ترانسفورماتورهایی گفته می شود که ولتاژ ثانویه آن بیشتر از ولتاژ اولیه است ($V_2 > V_1$). با توجه به تعریف فوق و رابطه ضریب تبدیل، می توان نتیجه گرفت که در ترانسفورماتورهای افزایشنده تعداد دور سیم پیچ های ثانویه از سیم پیچ های اولیه بیشتر است. شکل ۱-۱۹ یک ترانسفورماتور افزایشنده را نشان می دهد. همانگونه که از شکل مشاهده می شود، سمتی که ولتاژ بیش تری دارد (ثانویه) دارای تعداد دور سیم پیچ بیشتری است. از این ترانسفورماتورها در مواردی که مصرف کننده به ولتاژی بیش تر از ولتاژ منبع تغذیه (شبکه برق) نیاز داشته باشد، استفاده می شود. از جمله این موارد میتوان ترانسفورماتورهای انتقال انرژی الکتریکی در شبکه های برق یا ترانسفورماتور جرقه مشعل های گازوئیلی را نام برد. در مشعل گازوئیلی ترانسفورماتور جرقه، ولتاژ ۲۲۰ ولت را تا حدود ۱۰۰۰۰ ولت افزایش می دهد [۲۶].



شکل ۱-۱۹- ترانسفورماتور افزایشنده [۲۶].

۱-۲-۳- ترانسفورماتورهای تک فاز

یک ترانسفورماتور تک فاز از دو سیم پیچ و یک هسته آهنی ساخته می شود. سیم پیچها اغلب از جنس مس و در بعضی موارد از جنس آلومینیوم انتخاب می شود. هسته ترانسفورماتور از ورقه های آهن نرم سیلیس دار ساخته می شود. سیم پیچی که به شبکه برق وصل می شود سیم پیچ اولیه و سیم پیچی که به مصرف کننده وصل می شود، سیم پیچ ثانویه نامیده می شود [۲۶].

۱-۲-۴- انواع ترانسفورماتورهای تک فاز

امروزه نقش آنها به خصوص در شبکه های توزیع به منظور پایین آوردن تلفات شبکه بسیار پررنگ تر شده است. با توجه به افزایش قیمت انرژی در کشور، استفاده از ترانسفورماتورهای تکفاز که دارای تلفات بی باری کمتری نسبت به ترانسفورماتورهای سه فاز هستند، سرمایه گذاری و هزینه های کمتری دربر دارد. بنابراین برای بارهای تکفاز کوچک، ترانسفورماتورهای تکفاز اقتصادی ترین گزینه می باشند. در شکل ۱-۲۰ ترانسفورماتورهای تکفاز و مشخصات فنی آنها به شرح ذیل نشان داده شده است [۲۶]:

- فرکانس نامی: 50 ، 60 هرتز
- تعداد فازها: یک فاز
- نوع سیستم خنک کنندگی: ONAN
- ظرفیت: از 5 تا 100 کیلو ولت آمپر
- رده ولتاژ: ≤ 36 کیلو ولت



شکل ۱-۲۰- ترانسفورماتورهای تک فاز [۲۷].

باتوجه به کارایی ترانسفورماتور در جریان متناوب تک فاز، آن ها را به گروه های متفاوت دسته بندی می کنند:

۱- ترانسفورماتورهای کاهنده

۲- ترانسفورماتورهای افزایشده

۳- ترانسفورماتورهای یک به یک :

در این نوع ترانسفورماتور تعداد دورسیم پیچ اولیه و تعداد دورسیم پیچ ثانویه باهم برابر هستند. بدین علت ضریب تبدیل این ترانسفورماتورها برابر یک است. اگر در سیستم مصرفی، بخواهند ارتباط الکتریکی مصرف کننده ها را برای مسایل حفاظتی از شبکه الکتریکی قطع کنند از ترانسفورماتورهای یک به یک استفاده می کنند. در این حالت مصرف کننده ها، از طریق ارتباط مغناطیسی به شبکه متصل می شوند. اگر در طرف شبکه الکتریکی اتصال کوتاه یا نوسانات ناخواسته ایجاد شود، مصرف کننده هایی که با ترانسفورماتورهای یک به یک به شبکه وصل شده اند، از خطرات احتمالی، مصون خواهند ماند. به این نوع ارتباط ایزوله کردن می گویند.

۱-۲-۴-۵- ترانسفورماتورها با چند ورودی و چند خروجی

تنوع استاندارد ولتاژ در کشورهای مختلف، ایجاب می کند هر کشور براساس ولتاژ استاندارد خود، مصرف کننده های خود را تولید کند. برای آن که بتوان از مصرف کننده های مختلف با استاندارد تولیدی متفاوت در سایر کشورها نیز استفاده کرد، می توان از ترانسفورماتورهای چند ورودی و چند خروجی برای تغذیه آن ها استفاده کرد. لازم به توضیح است این نوع استفاده ها برای بارهای اهمی توصیه می شود و برای مصرف کننده های موتوری (گردنده) و مصرف کننده های خازنی و سلفی توصیه نمی شود. مگر آن که فرکانس شبکه های تغذیه یکی باشند. کاربرد دیگر ترانسفورماتورهای چند ورودی و چند خروجی، فراهم کردن امکان اتصال مصرف کننده هایی با ولتاژ نامی متفاوت به شبکه برق است. اگر یک شبکه الکتریکی با نوسانات ولتاژ بیشتری روبرو باشد با تغییر رنج ولتاژ ترانسفورماتورهای چند ورودی، ولتاژ نامی مصرف کننده را می توان تهیه کرد. به طور مثال اگر در یک کشور استاندارد ولتاژ فازی آن ۱۱۰ ولت و در یک کشور دیگر استاندارد ولتاژ آن ۲۲۰ ولت باشد می توان یک ترانسفورماتور با دوسیم پیچ ورودی ساخت که ۲۲۰ ولت و ۱۱۰ ولت را پشتیبانی کند. در کشور ایران ولتاژ خطی ۳۸۰ ولت و ولتاژ فازی ۲۲۰ ولت است. ترانسفورماتورهای جوشکاری را برای دو ورودی ۲۲۰ و ۳۸۰ ولت طراحی می کنند. اگر در یک منطقه برق سه فاز نباشد وضعیت ورودی را برای برق

تک فاز یعنی ۲۲۰ ولت تغییر می دهند. در شبکه های سه فاز از وضعیت ۳۸۰ ولت استفاده می شود. در ترانسفورماتورهای چند ورودی و چند خروجی ممکن است خروجی ها مستقل یا غیرمستقل باشند [۲۸].

۱-۲-۴-۶- اتوترانسفورماتورها

در اتوترانسفورماتورها، به جای دوسیم پیچ از یک سیم پیچ استفاده می شود. بدین ترتیب از یک سیم پیچ در اتوترانسفورماتورها صرفه جویی می شود. در اتوترانسفورماتور بین سیم اولیه و سیم پیچ ثانویه علاوه بر ارتباط مغناطیسی، ارتباط الکتریکی نیز وجود دارد. قسمت زیاد انرژی از طریق ارتباط الکتریکی و قسمت کم از طریق الکترومغناطیس به بار منتقل می شود. از آن جایی که مقدار انتقال انرژی از طریق هسته کم است لذا وزن هسته به کاررفته در اتوترانسفورماتورها کم است و تلفات هسته نیز کم خواهد شد

- حذف یک سیم پیچ و کاهش وزن هسته چند ویژگی را به اتوترانسفورماتور خواهد داد [۲۸].
- وزن اتوترانسفورماتور در مقایسه با ترانسفورماتورهای مشابه سبکتر می شود.
- تلفات مسی و تلفات آهنی کاهش می یابد.
- هزینه ساخت اتوترانسفورماتور کم می شود.
- راندمان ترانسفورماتور زیاد می شود.

در اتوترانسفورماتورها به سیم پیچ بین سیم اولیه و ثانویه سیم پیچ مشترک و به سیم پیچ خاص اولیه یا ثانویه، سیم پیچ سری می گویند. به سبب آنکه از سیم پیچ مشترک تفاضل جریان اولیه و ثانویه عبور می کند، می توان سطح مقطع این قسمت از سیم پیچ را کمتر در نظر گرفت. اتوترانسفورماتورها مانند ترانسفورماتورهای معمولی به صورت افزایشده یا کاهشده طراحی می شوند.

۱-۲-۴-۶- عملکرد اتوترانسفورماتورها

در برق تک فاز، اتوترانسفورماتور بازدهی معادل ۴۰ الی ۱۱۵ درصد ولتاژ ورودی را دارد. نسبت ولتاژهای ثانویه به اولیه برابر است با نسبت تعداد دورهای سیم پیچی که ولتاژ به آن وصل می شود. برای مثال، وصل شدن به مرکز و پایین سیم پیچ اتوترانسفورماتور، ولتاژ را نصف می کند (حدود ۵۰ درصد). بسته به شرایطی که اتوترانسفورماتور قرار است در آن کار کند، آن قسمت از سیم پیچ که تنها در ولتاژ زیاد (جریان کم) استفاده می شود ممکن است با سیم های کم ضخامت تر ساخته شده باشد، با این وجود کل سیم پیچ مستقیماً به هم اتصال الکتریکی دارد [۲۸].

۱-۲-۴-۶- محدودیت های اتوترانسفورماتورها

بر خلاف ترانسفورماتورهای معمولی که سیم پیچ اولیه و ثانویه آن ها از نظر الکتریکی ایزوله (جدا) هستند، در اتوترانسفورماتورها بین این دو ارتباط الکتریکی وجود دارد. بروز اشکال در عایق بندی سیم پیچ یک اتوترانسفورماتور می تواند منجر به اعمال کل ولتاژ ورودی بر خروجی گردد. قطعاً به هنگام استفاده از اتوترانسفورماتور با کاربردهای ذکر شده، قضیه عایق بندی یک مسئله ایمنی بسیار مهم است.

از آنجایی که اتوترانسفورماتورها به سیم پیچ های کوتاهتر و هسته کوچکتری نیاز دارند، برای کاربرد هایی که قدرت در آن مهم است، بهتر و به صرفه تر از ترانسفورماتورهای معمولی هستند. همچنین نسبت بازده ولتاژی آن سه برابر ترانسفورماتور معمولی است؛ با این وجود از لحاظ اقتصادی ترانسفورماتور معمولی به نسبت ارزانتر از اتوترانسفورماتور است.

۱-۲-۴-۶-۳- کاربردهای اتو ترانسفورماتور در جریان پرفشار سه فاز

یک اتوترانسفورماتور محدودیت های خاصی به منظور جلوگیری از جریان های هم سو دارد. اتوترانسفورماتورهای سه فاز بزرگ ممکن است سیم پیچ های دفن شده زیر خاک داشته باشند که اتصالی به بیرون مخزن ندارند، این سیم پیچ ها به منظور جذب جریان های هم سو، زیر خاک دفن می شوند. نوع خاصی از اتوترانسفورماتور که به آن زیگزاگ می گویند به منظور زمین کردن بر روی سیستم سه فاز استفاده می شود که هیچ نوع اتصالی به زمین ندارد. یک ترانسفورمر زیگزاگ مسیری را برای عبور جریانی که در سه فاز مشترک است، فراهم می کند که به این نوع جریان، جریان مؤلفه صفر می گویند.

همچون ترانسفورماتورهای چندسیم پیچه، در اتوترانسفورماتورها نیز از خاصیت میدان مغناطیسی متغیر با زمان برای تبدیل ولتاژ استفاده می شود و بنابراین اتوترانسفورماتورها در جریان های مستقیم کاربردی ندارند. اتوترانسفورماتورها در بسیاری از موارد در کاربردهای قدرتی برای به کار انداختن سیستم های به هم پیوسته با ولتاژهای مختلف استفاده می شود. برای مثال در ولتاژ عبوری $138kV$ تا $66kV$.

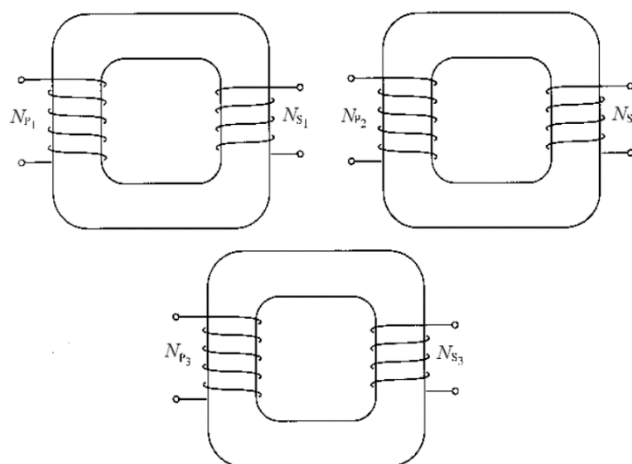
کاربرد دیگر اتوترانسفورماتور در صنعت برای یک سو ویک جهت ساختن ولتاژ در ماشین آلات مختلف است برای مثال، برای تبدیل ولتاژ ورودی 480 ولت به 600 ولت.

در کاربردهای صوتی از اتوترانسفورماتورهای نصب شده به منظور هما هنگ کردن گوینده با سیستم صوتی با ولتاژ دائمی استفاده می شود و همچنین در مورد مقاومت ها، آن را بین میکروفن با مقاومت پایین و یک تقویت کننده با مقاومت بالا قرار می دهند [۲۹].

۱-۲-۴-۷- ترانسفورماتورهای سه فاز

امروزه در اکثر نیروگاه های دنیا ژنراتورهای سه فاز وظیفه تولید انرژی الکتریکی را به عهده دارند. همچنین خطوط انتقال انرژی از نیروگاه تا مراکز بار وظیفه انتقال انرژی الکتریکی را به دوش می کشند. لذا نیاز به ترانسفورماتورهای سه فاز برای افزایش یا کاهش ولتاژ در طول مسیر نیروگاه تا بار به شدت احساس می شود. همانگونه که در شکل ۱-۲۱ یک ترانسفورماتور سه فاز نشان داده شده، از نظر ساختمان ظاهری بر دو نوع اند [۲۵]:

- ترانسفورماتور های سه فاز سه پارچه که از سه ترانسفورماتور تک فاز تشکیل شده اند.
- ترانسفورماتور های سه فاز یک پارچه که حاوی یک هسته مشترک می باشد.



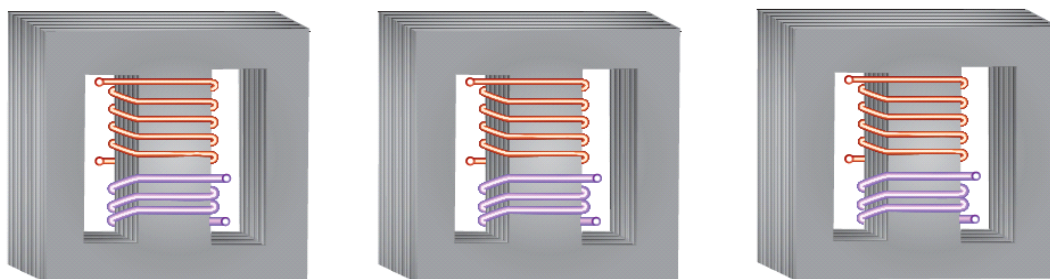
شکل ۱-۲۱- ترانسفورماتور سه فاز [۲۵].

۱-۲-۴-۷-۱- ساختمان ترانسفورماتور سه فاز از منظر مغناطیسی و الکتریکی

اجزای اصلی ترانسفورماتور سه فاز نیز همان هسته و سیم پیچ می باشند.

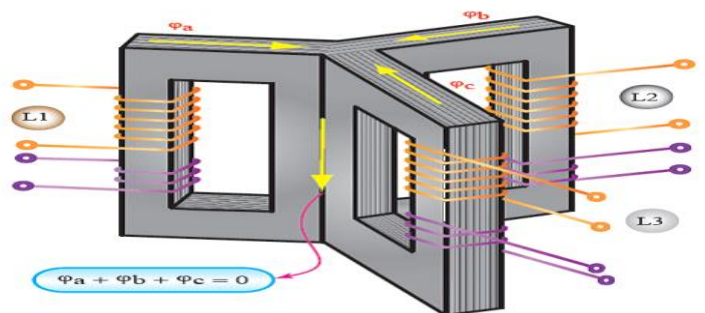
هسته: در ترانسفورماتورهای سه فاز نیز مانند ترانسفورماتور تک فاز جهت عبور شار مغناطیسی و انتقال انرژی الکتریکی از یک سمت به سمت دیگر باید از هسته آهنی استفاده شود. ترانسفورماتورهای سه فاز را با توجه به نوع هسته به دو دسته مجزا و یکپارچه تقسیم می کنند.

الف) هسته های مجزا: ساده ترین راه ایجاد ترانسفورماتور سه فاز استفاده از سه ترانسفورماتور مشابه تک فاز است. این سیستم را بانک ترانسفورماتور سه فاز گویند. بنابراین هسته های هر فاز مجزا از یکدیگر می باشند و مدار مغناطیسی جدا از هم دارند. در شکل ۲۲-۱ ترانسفورماتور سه فاز با هسته های مجزا نشان داده شده است. مطابق شکل ۱-۲۲ سه ترانسفورماتور تک فاز کنار هم قرار می گیرند و ورودی و خروجی آنها با یکی از اتصالات سه فاز سربندی می شوند. بدین ترتیب سه بوبین اولیه به فازهای L_1, L_2, L_3 به شبکه وصل می شوند. چون هسته مغناطیسی هر فاز مجزا است، جریان های مغناطیس کننده هر فاز در هسته مربوط به خود، فورانی متناظر با همان جریان ایجاد می نماید. به عبارتی در هسته اول Φ_A ، در هسته دوم Φ_B ، و در هسته سوم، Φ_C گردش می کنند. به همین دلیل این ترانسفورماتورها به ترانسفورماتور با هسته مجزا یا بانک معروف هستند [۲۹].



شکل ۲۲- ترانسفورماتور سه فاز با هسته های مجزا [۲۹].

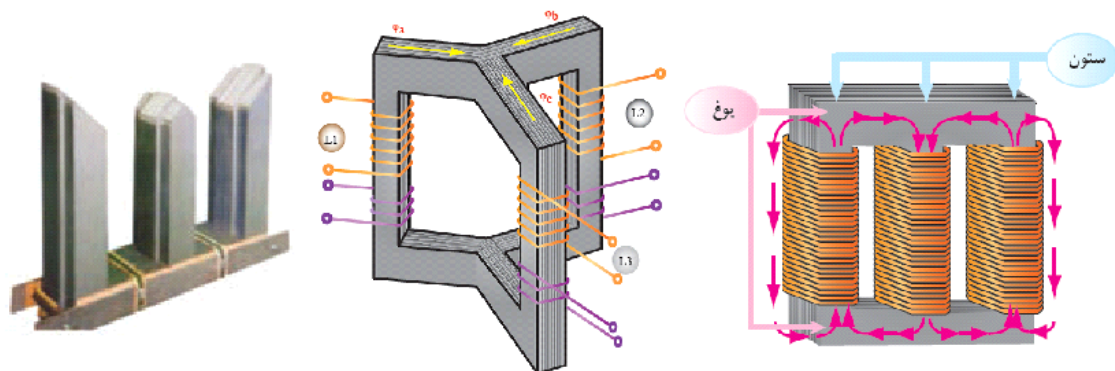
در گذشته این نوع ترانسفورماتورها در شبکه های توزیع استفاده می شد. در این ترکیب معمولاً در کنار سه ترانسفورماتور، یک دستگاه ترانسفورماتور اضافی نیز به عنوان یدکی قرار می گیرد. تا در زمان خرابی از آن استفاده شود. در حال حاضر به دلیل بالا رفتن تکنولوژی عایق بندی و دستیابی به عایق های خوب و به دلایلی که اشاره خواهد شد از این ترکیب به ندرت استفاده می شود. هسته ترانسفورماتور سه فاز با ستون مشترک بهم چسبیده نیز در شکل ۱-۲۳ نشان داده شده است. اگر هسته های آهنی سه ترانسفورماتور تک فاز مطابق شکل ۱-۲۳ در کنار هم قرار داده شوند، شارهای مغناطیسی جاری شده در هر بازو Φ_A, Φ_B و Φ_C (مربوط به فاز مستقل) از بازوی مشترک نیز عبور می کنند [۲۹].



شکل ۱-۲۳- هسته ترانسفورماتور سه فاز با ستون مشترک بهم چسبیده [۲۹].

همان طور که مجموع جریان های سه فاز با دامنه مساوی متعادل برابر صفر است (مجموع سه بردار مساوی با اختلاف سه فاز ۱۲۰ صفر می شود)، مجموع شارهای مغناطیسی سه فاز که از بازوی وسط هسته می گذرند نیز صفر می شود؛ بنابراین میتوان از بازوی وسط هسته صرف نظر و آن را حذف نمود. به این ترتیب هسته ترانسفورماتور را می توان به صورت یکپارچه مطابق شکل ۱-۲۴ ساخت.

ب) هسته های یکپارچه: در عمل، ترانسفورماتورهای سه فاز با هسته یکپارچه به صورت شکل ۱-۲۴ ساخته می شوند.



شکل ۱-۲۴- ترانسفورماتور سه فاز هسته یکپارچه و هسته ستونی [۲۹].

در این ترکیب هسته از سه ستون تشکیل شده و سیم پیچ ها در آن قرار می گیرند، سپس دو یوغ طرفین آن را مهار می کنند. بنابراین هر سیم پیچ روی یک ستون قرار میگیرد. به این نوع هسته، هسته ستونی می گویند [۲۹].

۱-۲-۴-۷-۲- مزایا و معایب ترانسفورماتورهای سه فاز با مدار مغناطیسی پیوسته

مزایا و معایب ترانسفورماتورهای سه فاز با مدار مغناطیسی پیوسته نسبت به سه ترانسفورماتور تک فاز مشابه که به صورت سه فاز سربندی و در یک قدرت یکسان استفاده می شوند عبارتند از:

الف) مزایا:

- در ترانسفورماتور سه فاز یکپارچه از آهن کمتری استفاده شده است.
- وزن آن سبک تر و حجم آن کوچک تر است.
- قیمت تمام شده آن کمتر است.
- راندمان بیشتری دارد.
- در عمل به سیم پیچ، اتصالات و عایق بندی کمتری نیاز دارد.

ب) معایب:

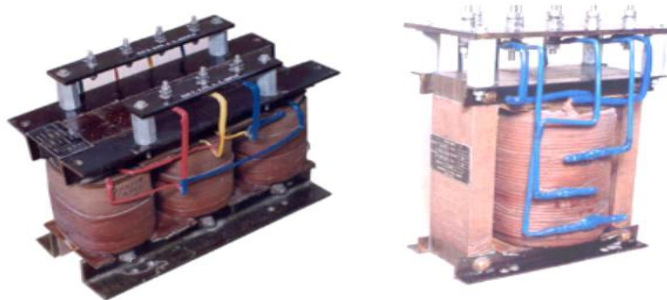
- هزینه نگهداری و تعمیر آن بیشتر است.
- با ایجاد اشکال حتی در یک فاز ترانسفورماتور، باید کل ترانسفورماتور از مدار خارج و جهت تعمیر آن اقدام شود. در صورتی که اگر از سه ترانسفورماتور تک فاز استفاده شده بود به راحتی فقط ترانسفورماتور معیوب از مدار خارج می شد و ترانسفورماتور ذخیره جای آن را می گرفت [۲۹].

۱-۲-۴-۷-۳- ساختمان ترانسفورماتور سه فاز از نقطه نظر عایق بندی و تهویه

با توجه به اینکه چگونگی خنک سازی ترانسفورماتورها با هم متفاوت است به همین دلیل لازم است نحوه تهویه ترانسفورماتور با یک کد مشخص بر روی پلاک درج شود. انواع پر کاربرد روش های خنک سازی عبارتند از:

- خنک سازی با گردش عادی هوا
- خنک سازی با گردش اجباری هوا (از طریق فن)
- خنک سازی با گردش عادی روغن
- خنک سازی با گردش اجباری روغن (از طریق پمپ روغن)

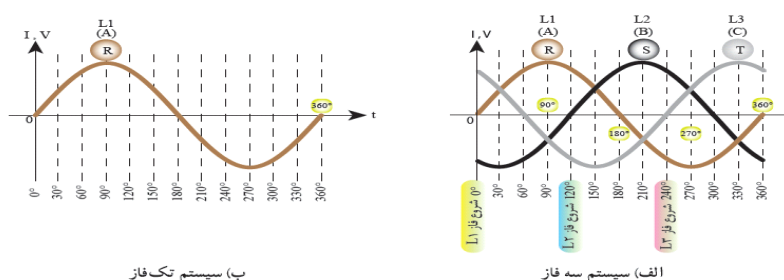
ترانسفورماتورهای قدرت تک فاز و سه فاز سه سیم پیچه در موارد مختلفی از قبیل ترانسفورماتور پست ژنراتور و ترانسفورماتور شبکه برای مرتبط کردن سه سطح ولتاژ که غالباً سیم پیچ سوم به عنوان ثالثیه برای سیم پیچ های اصلی محسوب می شود مورد استفاده قرار می گیرند. در شکل ۱-۲۵ انواع ترانسفورماتور از نظر نوع جریان؛ تک فاز و سه فاز نشان داده شده است. در جریان های سه فاز می توان برای هر فاز از یک ترانسفورماتور تک فاز مجزا و یا یک ترانسفورماتور سه فاز استفاده نمود. اگر از سه ترانسفورماتور مجزا استفاده شود، در صورت خرابی یکی از ترانسفورماتورها هنوز می توان از دو ترانسفورماتور دیگر استفاده نمود. با این وجود ترانسفورماتورهای سه فاز چون فقط دارای یک هسته هستند ارزانتر می باشند، ولی اگر خراب شوند کل ترانسفورماتور باید تعویض یا تعمیر گردد [۲۹].



شکل ۱-۲۵- انواع ترانسفورماتور از نظر نوع جریان؛ تک فاز و سه [۲۹].

۱-۲-۴-۷-۴- مقایسه ترانسفورماتورهای تکفاز و سه فاز

در سیستم سه فاز، سه ولتاژ در اختیار می باشد، که دامنه آنها با هم یکسان ولی از نظر مکانی هر یک با دیگری 120° اختلاف فاز دارند. شکل ۱-۲۶ مقایسه کلی بین شکل موج ولتاژ سیستم تک فاز با سیستم سه فاز را نشان می دهد. همان طور که دیده می شود مقدار لحظه ای ولتاژ در سیستم تک فاز لحظاتی به صفر می رسد ولی در شبکه های سه فاز اینگونه نیست. لذا در زمان صفر شدن ولتاژ لحظه ای شبکه های تک فاز، توان صفر می شود اما در شبکه های سه فاز هیچ گاه توان لحظه ای به صفر نمی رسد. از این رو استفاده از سیستم سه فاز در شبکه های تولید، انتقال و مصرف، اقتصادی می باشد. بنابراین با توجه به سه فاز بودن شبکه برق لازم است ترانسفورماتور نیز به صورت سه فاز طراحی شود تا قابلیت اتصال به این شبکه را دارا باشد [۲۵].



(ب) سیستم تک فاز

(الف) سیستم سه فاز

شکل ۱-۲۶- نمایش ولتاژ و جریان سیستم های سه فاز و تک فاز [۲۵].

- ترانسفورماتورهای تکفاز فضای نسبتاً بیشتری نسبت به ترانس سه فاز اشغال می‌کند.
- سه ترانسفورماتور تکفاز بستگی به قدرت و نوع طرح پست از یک ترانس سه فاز در بعضی موارد گرانتر تمام می‌شود.
- ترانسفورماتورهای سه فاز از نظر فضا، فونداسیون، تأسیسات جانبی مثل تپ چنجر، تابلوی کنترل و غیره نسبت به ترانس تکفاز بهتر می‌باشند.
- حمل و نقل ترانسفورماتور تکفاز به علت سبکی نسبت به طرح سه فاز آسانتر است.
- در قدرتهای بالا در ترانسفورماتور سه فاز مشکل ساخت وجود دارد که در طرح تکفاز این مشکلات کمتر است.
- اتصالات سیم پیچ‌ها در طرح تکفاز باید در خارج از ترانسفورماتور انجام گیرد که خود هزینه ای اضافی جهت احداث سوئیچ آن می‌طلبد [۲۵].

۱-۲-۴-۸- ترانسفورماتورهای قدرت

ترانسفورماتورهای قدرت وظیفه تغییر ولتاژ برق قدرت را برای انتقال برق از نیروگاه تا نزدیک مصرف کنندگان و توزیع برق بین مصرف کنندگان را بر عهده دارند. انرژی الکتریکی به وسیله نیروگاه‌های حرارتی که معمولاً در کنار ذخایر سوختی بزرگ ایجاد می‌شوند و نیروگاه‌های آبی که در نواحی دارای منابع آبی قابل ملاحظه احداث می‌شوند تولید می‌شود. برای انتقال آن به نواحی صنعتی که ممکن است صدها و هزاران کیلومتر دورتر از نیروگاه باشند خطوط انتقال زیادی بین نیروگاه‌ها و مصرف کننده‌ها لازم است. در ذیل به طور مختصر به معرفی انواع ترانسفورماتورهای قدرت پرداخته می‌گردد [۳۰].

۱-۲-۴-۸-۱- ترانسفورماتور ژنراتور

این ترانسفورماتور به عنوان بزرگترین ترانسفورماتور نیروگاه بوده و وظیفه آن انتقال انرژی از ژنراتور به شین اصلی نیروگاه می‌باشد. نکته قابل توجه در اینجا این است که به علت بالا بودن وزن و حجم بودن این ترانسفورماتور در واحدهای با توان بالا، از سه ترانسفورماتور تک فاز استفاده می‌شود. معیارهای مهم در طراحی ترانسفورماتور ژنراتور [۳۰]:

- دارای جریان زیاد در سیم پیچ فشار ضعیف
- درصد امپدانس
- طراحی تپ چنجر
- پی ریزی مناسب
- قابلیت اطمینان و در دسترس بودن
- پایین بودن تلفات بار داری و بی باری
- استحکام بالا در اتصال به فشار قوی
- میزان صدای ترانسفورماتور
- ظرفیت اضافه بار

۱-۲-۴-۸-۲- ترانسفورماتور نیروگاه

وظیفه این ترانسفورماتور عبارت است از :

- تامین انرژی مصرف داخلی نیروگاه در زمان راه اندازی سیکل ترمودینامیکی
 - تغذیه بارهای غیر مرتبط با واحد تولیدی ژنراتور
- این ترانسفورماتور ها به شبکه متصل می‌شوند.

عوامل مهم در طراحی ترانسفورماتورهای نیروگاه عبارتند از :

- طراحی طرف فشار قوی متناسب با ولتاژ اتصالی
- طرف فشار ضعیف متناسب با ولتاژ مصرف داخلی
- طراحی میزان امپدانس مناسب
- طراحی تپ چنجر
- کم بودن تلفات هسته

۱-۲-۴-۸-۳- ترانسفورماتور دو ولتاژه

الف - ترانسفورماتورهای دو ولتاژه در سمت فشار قوی:

برای مناطقی که ولتاژ شبکه توزیع در آن در حال تغییر است و قابلیت عملکرد با دو سطح ولتاژ فشار قوی، به صورت غیر همزمان را دارد، استفاده می گردد. این نوع ترانسفورماتورها در شرایطی که نیاز به استفاده از دو ولتاژ مختلف در سمت فشار قوی باشد، مورد استفاده قرار می گیرد.

ب- ترانسفورماتورهای دو ولتاژه در سمت فشار ضعیف:

در مواردی که نیز به در دسترس بودن دو ولتاژ مختلف در سمت فشار ضعیف می باشد، ترکیب دوتایی از سطح ولتاژهای ۳، ۶، ۱۱ و ۲۰ کیلو ولت (استفاده غیر همزمان) طراحی و تولید می شود. در شکل ۱-۲۷ ترانسفورماتورهای دو ولتاژه به همراه مشخصات فنی آنها به شرح ذیل نشان داده شده است [۳۱]:

- فرکانس نامی: ۵۰، ۶۰ هرتز - تعداد فازها: سه فاز - نوع سیستم خنک کنندگی: ONAN ، ONAF - رده ولتاژ: تا ۳۶ کیلو ولت آمپر



شکل ۱-۲۷- ترانسفورماتورهای دو ولتاژه.

۱-۲-۴-۸-۴- ترانسفورماتور سه سیم پیچه

این ترانسفورماتورها اغلب برای اتصال سه شبکه با ولتاژهای مختلف به کار می روند. چنانچه شبکه ای با ولتاژ مشخص به دو شبکه با ولتاژ و گروه اتصال متمایز وصل و به صورت همزمان بهره برداری گردد، از ترانسفورماتورهای سه سیم پیچه استفاده می گردد. از دیگر کاربردهای عمده این دسته ترانسفورماتورها، استفاده به عنوان ترانسفورماتور یکسو ساز ۶، ۱۲ و ۲۴ پالسه می باشد. این ترانسفورماتور از یک سیم پیچ اولیه و دو سیم پیچ ثانویه و یا از دو سیم پیچ اولیه و یک سیم پیچ ثانویه تشکیل شده است. در مواردی که نیاز به ارتباط دو ژنراتور با یک شین واحد و یا ارتباط یک شین با دو شین دیگر باشد و یا ارتباط بین دو شین با ولتاژ مختلف یا مساوی با یک ژنراتور مورد نیاز باشد، استفاده از این ترانسفورماتور مقرون به صرفه است [۳۰].

شکل ۱-۲۸ ترانسفورماتور سه سیم پیچه با مشخصات فنی آن به شرح ذیل را نشان می دهد:

- فرکانس نامی: ۵۰ هرتز - تعداد فازها: سه فاز - نوع سیستم خنک کنندگی: ONAN ، ONAF - رده ولتاژ: تا ۳۶ کیلو ولت



شکل ۱-۲۸- ترانسفورماتور سه سیم پیچه.

۱-۲-۴-۹- ترانسفورماتور توزیع

نوعی ترانسفورماتور است که تبدیل نهایی ولتاژ را در شبکه توزیع برق انجام می‌دهد. این ترانسفورماتور، ولتاژ شبکه توزیع فشار متوسط را کاهش داده و سطح ولتاژ مورد نیاز مشترکان را فراهم می‌کند (ولتاژ برق شهر). این ترانسفورماتورها دارای توان‌های مختلفی هستند. در مواقعی که ترانسی با توان پایین نیاز است، آن را بر بالای تیر برق یا بین دو تیر نصب می‌کنند اما اگر ترانسی با قدرت بالا نیاز باشد (بیش از ۴۰۰ کیلو ولت‌آمپر) آن را درون اتاق مخصوصی قرار می‌دهند تا ایمنی شهروندان حفظ شود. اختراع این نوع ترانسفورماتورهای با بازده بالا که به سال ۱۸۸۲ میلادی بازمی‌گردد، توزیع برق را میسر و آسان می‌سازد. ترانسفورماتورهای توزیع به طور معمول دارای توان‌های از ۵۰ کیلو ولت‌آمپر تا ۱۲۵۰ کیلو ولت‌آمپر و بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر چه در برخی از استانداردها، ترانسفورماتورهای تا توان ۵۰۰۰ کیلو ولت‌آمپر را نیز به عنوان ترانسفورماتور توزیع طبقه‌بندی می‌کنند. به دلیل اینکه ترانسفورماتورهای توزیع در ۲۴ ساعت شبانه روز (حتی زمانی که باری را تغذیه نمی‌کنند) فعال هستند، کاهش تلفات آهنی از اهمیت بالایی در طراحی‌ها برخوردار است. همچنین چون این ترانسفورماتورها معمولاً در حالت بار کامل کار نمی‌کنند (۸۰ درصد توان نامی)، لذا طوری طراحی می‌شوند که حداکثر راندمان را در بارهایی کمتر از مقدار ماکزیمم داشته باشند. این ترانسفورماتورها معمولاً در مناطقی با تراکم جمعیت بالا نصب می‌شوند. خصوصاً سه فاز فشار متوسط (۲۰ کیلوولت یا ۱۱ کیلوولت یا ۳۳ کیلوولت) به اولیه این ترانس‌ها وصل می‌شوند و خطوط برق شهری با ولتاژ ۲۳۰ ولت تک‌فاز و ۴۰۰ ولت سه فاز از ثانویه آنها دریافت و به صورت هوایی یا زمینی تحویل مشترکان داده می‌شود. گاهی به اشتباه ۲۲۰ ولت تک‌فاز و ۳۸۰ ولت سه فاز گفته می‌شود. تعداد مشترکانی که به هر ترانسفورماتور وصل می‌شود متناسب با توان آن تعیین می‌شود و ترانس توزیع در مقابل اضافه بار توسط مدارشکن‌ها و فیوزها، حفظ می‌شود [۳۲و۳۰].

۱-۲-۴-۹-۱- انواع ترانسفورماتورهای توزیع

ترانسفورماتورهای توزیع شامل دو نوع ترانسفورماتورهای توزیع خشک رزینی و ترانسفورماتورهای توزیع روغنی می‌باشد.

- **ترانسفورماتورهای خشک رزینی:** بهترین گزینه برای توزیع انرژی الکتریکی با درجه بالای ایمنی می‌باشند. علاوه بر آنکه خودشان آتشگیر نیستند، سبب انتشار آتش نیز نبوده و در صورت آسیب دیدن آن، خطر نشت مواد آتشزا با آلوده کننده ای مثل روغن وجود دارند. این موارد باعث می‌شود که ترانس‌های خشک رزینی ایمن‌ترین و قابل اطمینان‌ترین نوع ترانس در بازار باشد.

اینگونه ترانسفورماتورها دارای مزایایی همچون: مناسب برای فضای محدود، تلفات پایین، استقامت بالا در برابر اتصال کوتاه و نصب آسان می باشند. کاربرد آن در ساختمان های بلند و برج های مسکونی، تجاری، کارخانجات سیمان، راه آهن و فرودگاه ها مورد استفاده قرار می گیرد.

• **ترانسفورماتورهای توزیع روغنی:** از نقطه نظر ارتباط روغن با بیرون (تنفس ترانسفورماتور) به دو دسته نوع هرمتیک و نوع دارای منبع انبساط می توان تقسیم کرد.

✓ **ترانسفورماتورهای توزیع هرمتیک:** دارای سیستم نگهداری روغنی هستند که از تماس روغن عایق، اکسیژن و رطوبت که عوامل اصلی فساد روغن و کاهش استقامت الکتریکی آن می باشد جلوگیری می کند. ترانسفورماتورهای هرمتیک برای نصب در محیط های مرطوب، مواردی که محدودیت عملیات نگهداری وجود دارد و ترانس های با نصب هوایی و فضاهای محدود مثل پست های پکیج بر انواع معمولی برتری دارند.

✓ **ترانسفورماتورهای توزیع منبع انبساط:** در زمان تغییرات درجه حرارت روغن ترانس و در نتیجه تغییرات در حجم روغن کنسرواتور نوسانات در حجم روغن را متعادل و کنترل می کند [۳۰ و ۳۲].

۱-۲-۴-۹-۲- اجزاء تشکیل دهنده ترانسفورماتور توزیع

در این بخش مختصری درباره اجزاء تشکیل دهنده ترانسفورماتور توزیع توضیح داده می شود و سپس با آگاهی از آنها به نقش ترانسفورماتورهای توزیع در شبکه های برق و اهمیت تلفات آنها پرداخته می شود.

الف) هسته :

هسته ترانسفورماتورهای توزیع جهت کاهش تلفات آهن و بی باری از ورق های آهن مخصوص سیلسیم دار با شبکه کریستالی تنظیم شده، بوجود آمده است. این ورقها به طریق نورد سرد تهیه شده و در طرفین دارای پوششی از عایق می باشد. ضخامت این ورق ها معمولاً حدود ۰/۳ میلیمتر است. عرض این ورقها متفاوت بوده و به این نحو ایجاد هسته ای با سطح مقطع تقریباً دایره شکل را ممکن می سازد. جهت به هم فشردن و همبستگی این ورق ها به یکدیگر از تعدادی پیچ به منظور کاهش تلفات بی باری استفاده می شود [۳۰ و ۳۲].

ب) سیم پیچ:

سیم های مورد استفاده در این ترانسفورماتورها از بهترین و مرغوبترین مس الکترولیت به وجود آمده و سطح مقطع بعضی از آنها گرد و برخی دیگر مستطیل شکل است. عایق روکش سیم ها در دو نوع کاغذی و لاک می باشد. در سیم پیچها کانال های موازی با محور و یا شعاعی پیش بینی شده که توسط آنها گرمای حاصله از تلفات مس و آهن به خارج هدایت شده و از تمرکز و ازدیاد گرما در نقاط سیم پیچ جلوگیری می شود.

ج) مواد عایق:

عایق بندی این ترانسفورماتورها توسط بهترین مواد عایق مانند کاغذ عایق (جهت عایق بندی کابل) مقوای سخت و فیبر استخوانی صورت می گیرد. این مواد دارای استحکام الکتریکی کافی در مقابل ولتاژهای یکنواخت دائمی و ولتاژهای دائمی و ولتاژهای مضاعف می باشد. رطوبت هوای محیط که به مرور در مواد عایق راه یافته به کمک دستگاه های خشک کننده با دقت از مواد عایق جدا می گردد و به نحوی که مواد عایق موجود در ترانسورماتور کاملاً خشک و عاری از رطوبت می باشد. ایجاد این مواد بر اساس تجربیات و نتایج حاصله از مطالعات تئوریک و اندازه گیری های ولتاژهای ضربه ای در نقاط مختلف در آزمایشگاه های فشار قوی استوار است.

(د) مخزن:

مخزن ترانسفورماتورها از ورق فولاد و با جوش الکتریکی ساخته می شود. برای خنک شدن روغن داخل ترانسفورماتور سطح جانبی ترانسفورماتور را بوسیله کنگره یا لوله افزایش می دهند. ترانسفورماتورهای تا قدرت اسمی ۴۰۰ کیلو ولت آمپر دارای مخزنی از ورق های کنگره دار و با قدرت اسمی بیش از ۵۰۰ کیلو ولت آمپر دارای مخزنی با لوله های خنک کننده می باشد. قسمت تحتانی مخزن محکم تر از سایر نقاط آن ساخته شده و شاسی مجهز به چرخ های انتقال به آن جوش داده شده است. این چرخ ها را به سادگی می توان در جهت حرکت دلخواه (طولی یا عرضی) قرار داد. مفره های فشار قوی و ضعیف، قرارگاه حرارت سنج، کلیه تنظیم ولتاژ و منبع انبساط روی مخزن اصلی نصب می شود.

(ر) روغن ترانسفورماتور

روغن ترانسفورماتور از نوع روغن های معدنی تقطیر و تصفیه شده با غلظت کم است. جرم مخصوص آن ۰/۸۸ گرم بر سانتیمتر مکعب (در دمای ۲۰ درجه) و نقطه اشتعال آن ۱۴۰ الی ۱۶۰ درجه سانتی گراد می باشد. روغن ترانسفورماتور دو کار مهم انجام می دهد.

الف- تبادل حرارت هسته ترانسفورماتور با محیط خارج بوسیله روغن ترانسفورماتور صورت می گیرد (نقش خنک کننده دارد).

ب- روغن ترانسفورماتور عایق الکتریکی مناسبی است. وجود آن در ترانسفورماتور موجب می شود که فواصل سیم پیچ ها کمتر و در نتیجه حجم کلی ترانسفورماتور کوچکتر شود که خود سبب پائین آمدن هزینه ساخت ترانس می شود.

(ز) انشعابات سیم پیچ و قابلیت تنظیم ولتاژ

تغییرات جزئی ولتاژ شبکه را می توان توسط تغییر نقاط اتصال سیم پیچ فشار قوی برطرف کرد به نوعی که ولتاژ مورد استفاده ثابت بماند. تغییر دادن نقاط اتصال و استفاده از سایر انشعابات در حالت قطع توسط کلیه تنظیم ولتاژ صورت می گیرد. این کلید ها تا ۵ درصد می تواند ولتاژ را تغییر دهد.

علاوه بر قسمت های فوق در ترانسفورماتور توزیع، از وسایل تکمیلی نظیر رله بوخهلتس ترموتر و رطوبت گیر نیز استفاده می شود. ترانسفورماتورهای توزیع مورد استفاده در کشور در بخش های مختلفی نظیر بخش های خانگی، صنعتی، تجاری و کشاورزی در حال بهره برداری می باشند که اگر چه تعداد نسبتاً زیادی از آنها متعلق به شبکه سراسری برق می باشند اما تعدادی نیز در تملک سایر شرکت ها و مؤسسات دولتی و خصوصی نظیر پالایشگاه ها و پتروشیمی ها، صنایع فلزی و غیر فلزی می باشند.

۱-۲-۴-۱۰- ترانسفورماتور زمین

در پستهای فشار قوی برای محدود نمودن جریان اتصال کوتاه تکفاز، ثابت نگهداشتن ولتاژ نقطه صفر و از همه مهمتر ایجاد نقطه صفر مصنوعی برای اتصال مثلث طرف ثانویه یا ثالثیه ترانسفورماتورهای قدرت از وسیله ای بنام ترانسفورماتور زمین باید استفاده شود. انواع ترانسفورماتورهای زمین- کمکی از نظر ساختمان ترانسفورماتورهای زمین به دو صورت زیر ساخته می شود:

- ترانسفورماتور زمین با یک سیم پیچ زیگزاگ که نقطه اتصال زمین (نوترال) آن بطور مستقیم و یا توسط یک امپدانس به زمین متصل می شود.
- ترانسفورماتور زمین با دو سیم پیچ اولیه و ثانویه که سیم پیچ اولیه آن با اتصال زیگزاگ بوده و نقطه نوترال آن می تواند بطور مستقیم یا توسط یک امپدانس به زمین متصل شود و سیم پیچ ثانویه آن با اتصال نوع ستاره و با توان پیوسته مشخص جهت تغذیه کمکی در پست بکار می رود.

اگر سیم پیچ دیگری با اتصال ستاره با نقطه صفر جهت تأمین مصارف داخلی به ترانسفورماتور زمین افزوده شود چنین ترانسفورماتوری را ترانسفورماتور زمین - کمکی می نامند. ترانسفورماتور زمین - کمکی معمولاً در طرف ثانویه یا ثالثیه ترانسفورماتورهای قدرت نصب می گردد و ولتاژ اولیه آن ۶۳، ۲۰، ۳۳ یا ۱۱ کیلو ولت بوده و طرف ثانویه آن ۲۳۰ الی ۴۰۰ ولت می باشد. ترانسفورماتور زمین - کمکی باید از نوع هسته ای، سه فاز روغنی و خنک شونده طبیعی بوده و دارای دو سیم پیچ اولیه و ثانویه جداگانه باشد. سیم پیچ اولیه (فشار قوی) آن باید دارای اتصال زیگزاگ باشد و نقطه نوترال آن می تواند بطور مستقیم یا با مقاومت به زمین متصل شود. سیم پیچ ثانویه (فشار ضعیف) باید دارای اتصال ستاره با نوترال باشد. طرف فشار قوی بطور مستقیم به ترانسفورماتور قدرت متصل می گردد [۳۰]. ترانسفورماتور و تجهیزات وابسته به آن باید چنان باشند که به راحتی نیروهای وارده ناشی از عملیات حمل و نقل، نصب و بهره برداری را تحمل نماید. به طور کلی این ترانسفورماتور در جاهایی که نقطه اتصال زمین (نوترال) در دسترس نمی باشد جهت ایجاد نقطه نوترال استفاده می شود.

۱-۲-۴-۱۱- ترانسفورماتور مصرف داخلی

از ترانسفورماتور مصرف داخلی برای تغذیه مصارف داخلی پست استفاده می شود. تغذیه ترانسفورماتور مصرف داخلی شامل قسمت های زیر است :

- تغذیه موتور پمپ تپ چنجر، تغذیه کلید قدرت های ۲۰ کیلوولت، تغذیه فن و سیستم خنک کننده، شارژ باتری ها، مصارف روشنایی، تهویه ها
- معمولاً نوع اتصال سیم پیچ ها در این ترانسفورماتورها به صورت مثلث - ستاره می باشد.

۱-۲-۴-۱۲- ترانسفورماتورهای ابررسانا (HTS)

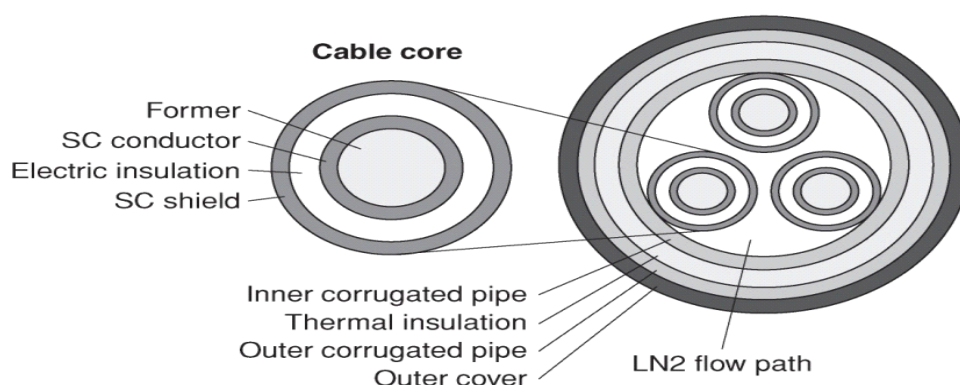
ابررساناهای دمای بالا که در اواسط دهه ی ۱۹۸۰ کشف شدند، موادی هستند که مقاومت الکتریکی خود را در دمای بالاتر از دمای ذوب نیتروژن مایع از دست می دهند. این دما از آن رو اهمیت دارد که نیتروژن مایع، سردکننده های ارزان قیمت و در عین حال فراوان است. این مواد به طور معمول از اکسیدهای مس ساخته شده اند که دارای مواد دیگری در ترکیب خود هستند. از آن جا که این مواد اکسیدی هستند، شکننده بوده و نمی توان آن ها را در عمل به صورت معمول بکار گرفت. تلاش های اخیر در جهت پوشش دهی این مواد با هدف تبدیل آن ها به موادی انعطاف پذیر استوار بوده است.

با این حال باید توجه کرد که تنوع ترکیبات شرکت کننده در ساختار ابررسانا حاکی از تفاوت های عملکردی آن ها خواهد بود که به منظور بکارگیری از آن ها، بایستی مطالعه شوند تا به این ترتیب امکان انتخاب ترکیبان مناسب فراهم آید. البته این موضوع همچنان در حال مطالعه و بررسی است.

استفاده از فناوری های مبتنی بر ابررسانای دمای بالا در صنعت برق طی چند سال اخیر در کشورهای توسعه یافته مورد توجه قرار گرفته اند. هدف از این فناوری ها در شبکه ی انتقال برق، افزایش ظرفیت انتقال برق در شبکه هایی است که به لحاظ ظرفیت انتقال با محدودیت هایی مواجه هستند و طبیعتاً جوابگوی رشد مصرف کنندگان نیستند. زیرا مواد ابررسانا دارای ظرفیت بیشتر انتقال انرژی الکتریکی هستند. در این نوع فناوری ها به سیستم خنک کننده احتیاج است که عموماً نیتروژن مایع به کار می رود و به این ترتیب هزینه سیستم بسیار کمتر از هزینه تجهیزات مبتنی بر ابررسانای دمای پایین خواهد بود، زیرا در فناوری LTS خنک سازی توسط گاز یا مایع هلیوم که گران تر است صورت می گیرد.

کابل ابررسانا به عنوان یکی از راهکارهای مناسب که می‌تواند ظرفیت انتقال را افزایش دهد در کشورهایی چون آمریکا، ژاپن و کره مورد توجه بوده است. ساختار معمول هسته این نوع کابل‌ها که در شکل ۱-۲۹ نشان داده شده است شامل اجزاء زیر است:

- هادی که توسط قرار دادن سیم‌های ابررسانا به شکل مارپیچ در قالب فرم می‌گیرد [۲۸]
- بخش عایقی که شامل کاغذ ورقهای پلیپروپیلن (که در دمای پایین، خواص عایقی مناسب و تلفات دیالکتریک پایینی دارد) و نیتروژن مایع (که البته نقش خنک کننده را هم دارد) می‌شود.
- لایه بیرونی که شامل سیم‌ها ابررسانا به صورت مارپیچی است که لایه شیلد را ایجاد می‌کند.



شکل ۱-۲۹- اجزاء یک کابل ابررسانا [۷].

مزایای کابل‌های ابررسانا به قرار زیر است و از همین رو در صنعت برق مورد توجه بوده است:

- ظرفیت بالای انتقال الکتریسیته در ابعاد فشرده
- تلفات الکتریکی پایین
- عدم هرگونه نشتی یا میدان الکترومغناطیسی به بیرون
- امیدانس پایین

باید توجه داشت که در مورد خواص عایقی این نوع کابل‌ها در بهره برداری بلندمدت همچنان عدم قطعیت‌هایی وجود دارد، به خصوص که هنوز دانش کافی در مورد تخلیه جزئی در این نوع کابل‌ها بدست نیامده و تعمیر و نگهداری پیشگویانه برای این نوع تجهیزات در حال مطالعه و بررسی است.

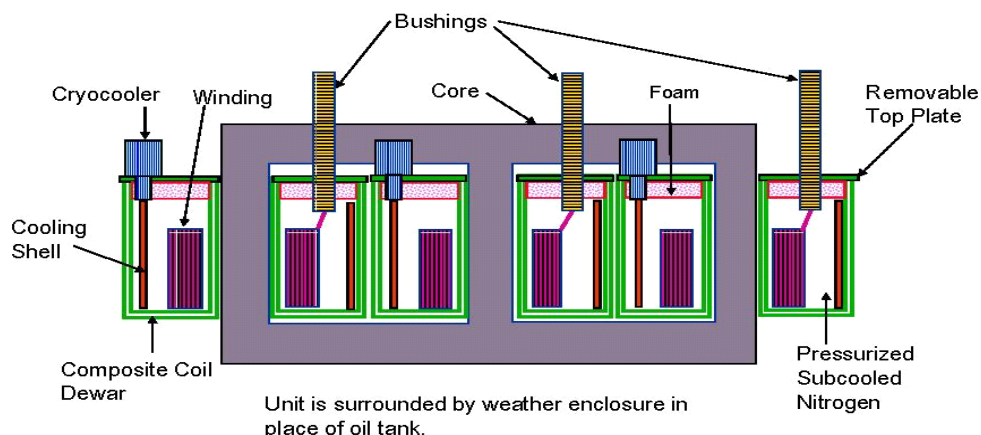
ترانسفورماتورهای ابررسانا نیز نسلی از ترانسفورماتورها هستند که طی چند سال اخیر در بسیاری از کشورها مورد توجه قرار داشته‌اند. ساختار کلی این نوع ترانسفورماتورها در شکل ۱-۳۰ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، این نوع فناوری شامل اجزاء کلی زیر است [۷]:

- سیم پیچ ترانسفورماتور که جنس آن‌ها از مواد ابررسانا و شامل صدها دور سیم‌پیچی است.
- هسته مغناطیسی که برای این نوع ترانسفورماتورها از طراحی‌های خاصی استفاده می‌شود تا تلفات را کاهش دهد.

• ماده عایقی کریوژنیک همانند نیتروژن که معمولاً به صورت ترکیبی و همراه با پلاستیک تقویت شده توسط فیبر به شکل چنبره‌ای شکل مورد استفاده قرار می‌گیرد و به آن کریوستات گفته می‌شود. این ترکیب، هم نقش عایق الکتریکی و هم عایق حرارتی را ایفا می‌نماید.

- سیستم خنک‌کننده حاوی نیتروژن

• سایر اجزاء ترانسفورماتور

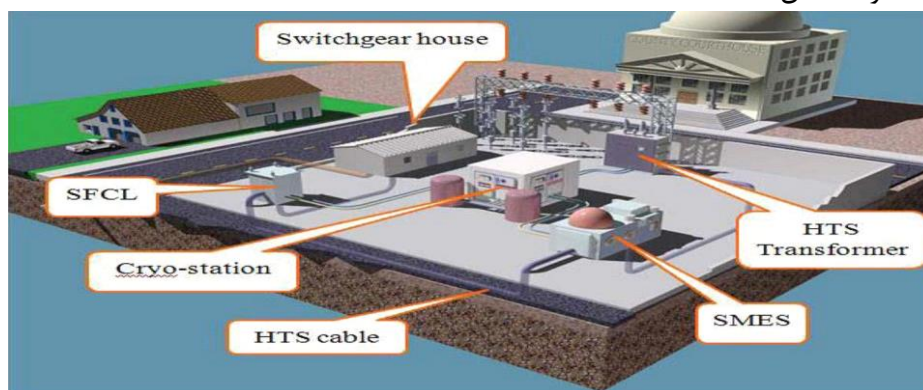


شکل ۱-۳۰- ساختمان کلی ترانسفورماتور ابرسانا [۷].

بکارگیری ترانسفورماتور HTS به علت مزایای ذیل مورد توجه است:

- توانایی تحمل اضافه بار بدون تشدید قابل ملاحظه در روند پیرشدگی و کاهش عمر عایق
- کاهش ابعاد و وزن ترانسفورماتور
- افزایش بازده
- حذف روغن

با این حال در خصوص ترانسفورماتورهای ابرسانا باید گفت که مطالعات زیادی در مورد اثرات پیرشدگی ناشی از تخلیه جزئی در آنها انجام شده و همچنان در حال انجام است تا بدین ترتیب دانش لازم جهت افزایش راندمان و صرفه اقتصادی آنها در آینده‌ای نزدیک حاصل شود. در شکل ۱-۳۱ شماتیک کلی یک نمونه پست HTS ۲۴ کیلوولت با ظرفیت ۱۰۰ مگاوات نشان داده شده است.



شکل ۱-۳۱- شماتیک کلی یک پست ۲۴ HTS کیلوولت یا ظرفیت ۱۰۰ مگاوات [۷].

۱-۲-۴-۱۳- تجهیزات با عایق گازی مورد استفاده در پستهای GIS

۱-۲-۴-۱۳-۱- ترانسفورماتور قدرت گازی

در ترانسفورماتورهای قدرت گازی که می‌توانند در پستهای GIS مورد استفاده قرار گیرند، به جای استفاده از روغن که در ترانسفورماتورهای نوع روغنی نقش عایق‌کنندگی و خنک‌کنندگی را به عهده دارد، از گاز SF₆ استفاده می‌شود

که هم نقش عایقی و هم نقش خنک‌کنندگی را ایفا می‌نماید. این ترانسفورماتورها بیشتر در کشور ژاپن مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مزایای استفاده از این ترانسفورماتورها در صورت استفاده در پست‌های GIS به قرار ذیل است:

- سازگاری بهتر با تجهیزات GIS
- عدم نیاز به استفاده از پوشش‌های پر هزینه روغنی یا گازی.
- حذف فرایند تصفیه‌ی عایق مایع روغنی
- کاهش حجم و ارتفاع ترانسفورماتور به علت حذف منبع انبساط
- کاهش وزن ترانسفورماتور به علت استفاده از گاز SF_6 بجای روغن
- کاهش زمان نصب ترانسفورماتور

کاهش نویز تولیدی به علت بکارگیری فناوری‌های متفاوت ساخت شامل هسته‌های دارای خاصیت مغناطیسی بهتر، دقت بالای برش ورقه‌های هسته و استفاده از صفحات فشرده‌ی عایق صوتی به علت کوچکتر بودن ظرفیت گرمایی SF_6 نسبت به روغن، در ترانسفورماتور قدرت گازی برخی تمهیدات مانند عریض‌تر کردن کانال عبور گاز SF_6 ، بالا بردن فشار SF_6 ، استفاده از فن‌های با قدرت زیاد برای به گردش درآوردن گاز و استفاده از مواد عایقی مقاوم در برابر حرارت ناشی از دمای سیم‌پیچ‌ها انجام می‌شود. نمونه‌ای از ترانسفورماتور گازی SF_6 در شکل ۱-۳۲ نشان داده شده است [۷].



شکل ۱-۳۲- نمونه‌ای از ترانسفورماتور گازی SF_6 [۷].

۱-۲-۴-۱۳-۲- ترانسفورماتور ولتاژ و جریان گازی

در ترانسفورماتورهای ولتاژ مورد استفاده در پست‌های GIS، سیم‌پیچ اولیه توسط گاز عایق شده و به ترمینال متصل است و سیم‌پیچی ثانویه نیز هسته را احاطه کرده است. اما در ترانسفورماتور جریان گازی، سیم‌پیچی ثانویه مستقیماً درون محفظه گاز قرار نگرفته است. زیرا در صورتیکه اتصال سیم‌پیچی ثانویه قطع شود و ترانسفورماتور جریان گازی به صورت مدار باز در مدار قرار گیرد به علت اینکه شار مخالفی وجود ندارد که با شار ناشی از جریان اولیه مخالفت کند، کل این شار مغناطیسی بر روی هسته به عنوان مغناطیس کننده عمل کرده و هسته در هر سیکل به اشباع می‌رود. سرعت بالای تغییرات شار هسته که از نقطه صفر نیز عبور می‌کند باعث تولید ولتاژ بالایی در ثانویه می‌شود که می‌تواند باعث شکست عایقی گاز SF_6 شده و موجب خرابی ترانسفورماتور جریان گازی شود. در عین حال بخاطر اینکه سیم‌پیچی ثانویه محفظه را در بر گرفته است باعث ایجاد یک جریان مغناطیسی درون پوسته آن، ایجاد تلفات و گرم شدن محفظه می‌شود که ممکن است زمینه شکست الکتریکی گاز را پدید می‌آورد. بنابراین برای جلوگیری از

ایجاد این جریان القایی، شکافی در محفظه ایجاد می‌نمایند و آن را با مواد عایقی پر می‌کنند. همچنین اطراف هسته با قالبی از رزین پر شده است [۷].

۱-۳- بررسی انواع هسته های ترانسفورماتورهای قابل کاربرد در صنعت برق

ترانسفورماتورها انرژی الکتریکی را از طریق میدان مغناطیسی از یک سیم پیچ به سیم پیچ دیگر منتقل می‌کنند. برای اینکه این انتقال انرژی به صورت متمرکزتر و در ابعاد کوچکتری صورت بگیرد، در میان سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور یک هسته مغناطیسی قرار می‌گیرد. وظیفه این هسته متمرکز کردن شارهای مغناطیسی و هدایت آنها به عبور از هر دو سیم‌پیچ است. نبود هسته باعث می‌شود که شارهای تولیدی توسط سیم‌پیچ اولیه در هوا پراکنده شوند و فقط قسمتی از آنها از سیم‌پیچ ثانویه عبور کنند. در نتیجه توان به خوبی منتقل نمی‌گردد و برای انتقال یک توان مشخص به ابعاد بزرگتری از سیم‌پیچ نیاز است. هسته مغناطیسی یک قطعه از ماده مغناطیسی با ضریب تراوایی مغناطیسی بالا است که در ادوات مغناطیسی مانند سلف، ترانسفورماتور، ماشین‌های الکتریکی و ... جهت هدایت و متمرکز کردن شارهای مغناطیسی در یک مسیر خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. هسته‌ها از مواد فرومغناطیس نرم مانند آهن و فریت ساخته می‌شوند. با توجه به مقدار توان انتقالی، فرکانس و ولتاژ مورد استفاده، هسته‌ها در انواع مختلفی از نظر جنس، شکل و ابعاد ساخته می‌شوند. در ادامه انواع هسته ترانسفورماتور از جهات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۳-۱- انواع هسته ترانسفورماتور از نظر جنس

هسته ترانسفورماتور بسته به کاربرد ترانسفورماتور از جنس‌های مختلف ساخته می‌شود. در ذیل به این نوع هسته‌ها اشاره می‌گردد:

۱-۳-۱-۱- فلزات جامد

✓ آهن: از هسته آهنی در آهن رباهای الکتریکی جریان مستقیم و برخی موتورهای الکتریکی استفاده می‌شود. در عمل برای کاهش مقاومت آهن در برابر مغناطیسی شدن، آن را گرمادیده می‌کنند که به آن آهن نرم می‌گوییم. آهن می‌تواند تا ۲ تسلا میدان مغناطیسی را بدون اشباع شدن تحمل کند. از آنجایی که آهن یک رسانای الکتریکی است، در کاربردهای AC مانند ترانسفورماتورها، سلف‌ها و موتورهای AC اگر از آهن «یک تکه» استفاده شود، تلفات زیادی به واسطه جریان‌های گردابی در آن ایجاد می‌شود. برای جلوگیری از این تلفات، در این کاربردها از آهن ورقه ورقه شده یا پودر آهن و یا مواد نارسانا مانند فریت‌ها استفاده می‌شود.

✓ آهن ورقه ورقه شده: برای کاهش تلفات ناشی از جریان‌های گردابی در کاربردهای AC به جای آهن یک تکه از آهن ورقه ورقه شده استفاده می‌گردد. با اضافه کردن کمی سیلیکون به آهن، مقاومت آن در برابر جریان‌های گردابی بیشتر نیز می‌شود. بر روی ورقه‌ها نیز یک لایه نازک عایق الکتریکی وجود دارد. این ورقه ورقه کردن باعث می‌شود که جریان گردابی مجبور به عبور از سطح مقطع نازک یک ورقه باشد که مقاومت بالایی دارد و چون تلفات جریان گردابی با مجذور جریان آن رابطه مستقیم دارد، مقدار این تلفات بسیار کاهش می‌یابد.



شکل ۱-۳۳- آهن ورقه ورقه شده .

✓ **آلیاژهای آهن:** از آلیاژهای دیگر آهن مانند *mu-metal*، *permalloy* و *suppermalloy* که ترکیبات مختلفی از آهن و نیکل هستند نیز برای ساخت هسته‌های مغناطیسی استفاده می‌شود. هرکدام از این آلیاژها ویژگی‌های خاصی دارد که در کاربردی خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد. فلزات شیشه ای^۱ که به آن‌ها *non-crystalline* هم گفته می‌شود، ظاهری شبیه شیشه دارند و ترکیبی از فلزاتی مانند آهن، نیکل و کبالت هستند که به خاطر تلفات جریان گردابی کم و هسته هیستریزیس کوچک در ساخت ترانسفورماتورهای فرکانس بالا با بازده زیاد مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در شکل زیر نمونه‌ای از این آلیاژ نشان داده شده است.



شکل ۱-۳۴- آلیاژهای آهن برای ساخت هسته های مغناطیسی.

۱-۳-۱-۲- پودر فلزات

این نوع هسته‌ها از خرده‌های فلزات تشکیل می‌شوند که با چسب به هم متصل و فشرده شده‌اند. هرچه این خرده‌ها فشرده‌تر باشند، ضریب نفوذپذیری و جریان گردابی هسته بیشتر است. برای کاهش جریان گردابی، سطح خرده‌های فلزات را با یک عایق الکتریکی می‌پوشانند تا جریان گردابی به یک ذره فلز محدود شود. چسب بین ذرات در دمای بالا تخریب شده و باعث تغییر در مشخصات هسته می‌شود. دمایی که چسب تحمل می‌کند به جنس آن بستگی دارد، به عنوان مثال چسب از نوع اپوکسی تحمل دمای ۱۲۵ درجه سانتیگراد را دارد. جنس خرده‌های فلز، مشخصات مغناطیسی هسته را مشخص می‌کند.

در ادامه برخی از مواد تشکیل دهنده خرده‌ها و مشخصات آن‌ها را بررسی می‌کنیم. این هسته‌ها معمولاً به شکل تروئید در بازار موجود هستند. رنگ این هسته‌ها معرف نوع ماده به کار رفته در آن‌ها است.

✓ **آهن:** ارزان‌ترین نوع هسته پودر فلز، هسته‌های پودر آهن هستند که نسبت به هسته‌های دیگر ابعاد بزرگتری دارند. این هسته‌ها در چگالی شاری بین ۱ تا ۱/۵ تسلا به اشباع می‌روند. به خاطر تلفات بالای هیستریزیس و جریان گردابی، از هسته‌های پودر آهن در فرکانس‌های پایین‌تر استفاده می‌شوند. از این هسته‌ها در

¹ glassy metal

کمتر از ۱۰۰ kHz در فیلتر خروجی، چک‌های مد دیفرانسیلی و اصلاح ضریب توان و ترانسفورماتورهای پالس و ضریب توان سلف استفاده می‌شود.

✓ **آلیاژهای آهن:** از آلیاژهای مختلف آهن نیز برای ساخت هسته‌های پودر آهن استفاده می‌شود. آهن کربونیل که از آهن خالص ساخته شده است، تحمل دمایی بیشتر و سطح اشباع بالاتری دارد و در فرکانس بالاتری قابل استفاده است. از این نوع هسته‌ها در سلف‌ها و ترانسفورماتورهای فرکانس بالا استفاده می‌شود. نام دیگر آن‌ها هسته‌های RF است.

✓ هسته مغناطیسی MPP آلیاژی از آهن و نیکل است که در مدارات فرکانس بالا تا ۱ MHz مورد استفاده قرار می‌گیرد. High-flux نیز آلیاژی از آهن و نیکل است که چگالی شار اشباعی تا ۱/۵ تسلا و شار پسماند ناچیزی دارد و تا فرکانس ۲۰۰ kHz قابل استفاده است. از این نوع هسته‌ها در کاربردهایی که چگالی شار اشباع بالا یا پسماند کم مورد نیاز است، استفاده می‌شود.

✓ هسته مغناطیسی Sendust آلیاژی از آهن، آلومینیم و سیلیکون است که دارای چگالی شار اشباع ۱ تسلا است و قابلیت تحمل حرارتی بالا دارد. همچنین نویز بسیار پایینی تولید می‌کند. از این هسته تا فرکانس ۱ MHz و در ترانسفورماتورهای پالس و سوئیچینگ و موارد دیگری که پایین بودن سطح نویز اهمیت دارد استفاده می‌شود. هسته‌های نانو کریستال ترکیبی از آهن، بور و سیلیکون است که در فرکانس‌های پایین عملکرد بسیار مطلوبی دارند. از این هسته‌ها در کاربرهای توان بالا در اینورترها استفاده می‌شود.



شکل ۱-۳۵- آلیاژهای آهن برای ساخت هسته‌های پودر آهن.

۱-۳-۱-۳- فریت

فریت‌ها ترکیباتی از اکسید آهن، روی، منگنز (یا نیکل) هستند. این مواد ضریب نفوذپذیری بالایی دارند. از آنجایی که از نظر الکتریکی تقریباً نارسانا هستند، تلفات جریان گردابی آن‌ها ناچیز است و در نتیجه در کاربردهای فرکانس بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. چگالی شار اشباع این هسته‌ها حدود ۰.۳ تسلا است. در سلف‌ها و ترانسفورماتورهای RF و منابع تغذیه سوئیچینگ از این نوع هسته‌ها استفاده می‌شود. در ذیل نمونه‌ای از هسته فریتی آورده شده است. انواع آن مختلف می‌باشد که در ادامه گزارش در مورد آن توضیح داده خواهد شد.



شکل ۱-۳۶- نمونه ای از یک هسته فریتی.

۱-۳-۴- هوا

در برخی موارد از هسته مغناطیسی در وسط سیم‌پیچ استفاده نمی‌شود. به این گونه سیم‌پیچ‌ها سیم‌پیچ با هسته هوا گفته می‌شود. ویژگی اصلی این هسته‌ها نبود تلفات هسته و پدیده اشباع است. بنابراین در کاربردهایی که نیاز به بالا رفتن چگالی شار است یا فرکانس بسیار بالا می‌باشد از هسته هوا استفاده می‌شود.



شکل ۱-۳۷- نمونه ای از هسته هوا ترانسفورماتور.

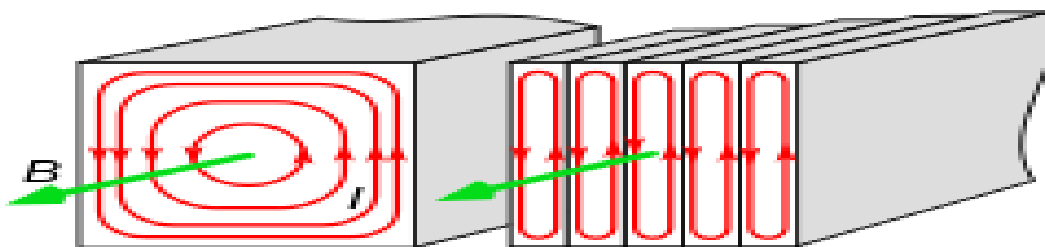
۱-۳-۲- انواع هسته ترانسفورماتور از نظر شکل

هسته های ترانسفورماتور از نظر شکل و نوع کاربرد به صورت ذیل دسته بندی می گردند:

۱-۳-۲-۱- هسته های لایه لایه

ترانسفورماتورهای مورد استفاده در کاربردهای قدرت یا بسامد بالا (رادییوی) معمولاً از هسته باجنس فولاد سیلیکاتی با قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی بالا استفاده می‌کنند. قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی در فولاد بارها بیشتر از نفوذپذیری در خلاء است؛ به این ترتیب با استفاده از هسته‌های فولادی جریان مغناطیس کننده مورد نیاز برای هسته به شدت کاهش می‌یابد و شار در مسیری کاملاً نزدیک به سیم‌پیچ‌ها محبوس می‌شود. سازندگان ترانسفورماتورهای اولیه به سرعت متوجه این موضوع شدند که استفاده از هسته یک پارچه باعث افزایش تلفات گردابی در هسته ترانسفورماتور می‌شود و در طراحی‌های خود از هسته‌هایی استفاده کردند که از دسته‌های عایق شده آهن تولید شده بود. در طراحی‌هایی بعدی با استفاده از ورق‌های نازک آهن که نسبت به یکدیگر عایق شده بودند، تلفات در ترانسفورماتور باز هم کاهش یافت. از این روش در ساخت هسته امروزه نیز استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از معادله عمومی

ترانسفورماتور می‌توان نتیجه گرفت که کمترین سطح اشباع در هسته با سطح مقطع کوچکتر ایجاد می‌شود. گرچه استفاده از هسته‌های با لایه‌های نازک‌تر تلفات را کاهش می‌دهد، اما از طرفی هزینه ساخت ترانسفورماتور را افزایش می‌دهد؛ بنابراین از هسته‌های با لایه‌های نازک معمولاً در بسامدهای بالا استفاده می‌شود. با استفاده از برخی انواع هسته‌های با لایه‌های بسیار نازک امکان ساخت ترانسفورماتورهایی برای کاربرد در مصارف تا ۱۰ کیلوهرتز پدید می‌آید. نوعی متداول از هسته‌های لایه لایه، از قطعاتی E شکل که با قطعاتی I شکل یک هسته را به وجود می‌آورند تشکیل شده است. این هسته‌ها را هسته‌های E-I می‌نامند. این هسته‌ها گرچه تلفات را افزایش می‌دهند اما به علت آسانی مونتاژ، هزینه ساخت هسته را کاهش می‌دهند. نوع دیگری از هسته‌ها، هسته‌های C شکل هستند. این هسته از قرار دادن دو قطعه C شکل در مقابل یکدیگر تشکیل می‌شود. این هسته‌ها این مزیت را دارند که تمایل شار برای عبور از هر قطعه از هسته برابر است و این مزیت باعث کاهش یافتن مقاومت مغناطیسی می‌شود.



شکل ۱-۳۸- هسته لایه لایه.

پسماند در یک هسته فولادی به معنای باقی‌ماندن خاصیت مغناطیسی در هسته پس از قطع شدن توان الکتریکی است. زمانی که جریان دوباره در هسته جاری می‌شود این پسماند باقی‌مانده در هسته تا زمانی که کاهش یابد موجب به وجود آمدن یک جریان هجومی در ترانس می‌شود. تجهیزات حفاظتی مانند فیوزها باید طوری انتخاب شوند که به این جریان هجومی اجازه عبور دهند. ترانسفورماتورهای توزیع می‌توانند با استفاده از هسته‌های با قابلیت نفوذ پذیری مغناطیسی بالا تلفات بی‌باری را کاهش دهند. هزینه اولیه هسته بعدها با صرفه‌جویی که در مصرف انرژی و افزایش طول عمر ترانس می‌شود جبران خواهد شد. لایه لایه کردن هسته ترانس جریان گردابی را به شدت کاهش می‌دهد.

۱-۳-۲- هسته‌های یکپارچه

هسته‌هایی که از آهن پودر شده ساخته شدند در مدارهایی که با بسامد بالاتر از بسامد شبکه تا چند ده کیلوهرتز کار می‌کنند کاربرد دارند. این هسته دارای قابلیت نفوذ پذیری مغناطیسی بالا و همچنین مقاومت الکتریکی بالا هستند. برای بسامدهایی بالاتر از باند VHF از هسته‌های غیر رسانای فریت استفاده می‌شود. برخی از ترانسفورماتورهای بسامد رادیویی از هسته‌های متحرک استفاده می‌کنند که این امکان را به وجود می‌آورد که ضریب اتصال هسته قابل تغییر باشد.

۱-۳-۲-۳- هسته‌های حلقوی

ترانسفورماتورهای حلقوی دور حلقه‌ای ساخته می‌شوند. جنس این هسته بسته به بسامد مورد استفاده ممکن است از نوارهای بلند فولاد سیلیکاتی، پرمالوی پیچیده شده دور یک چنبره، آهن تقویت شده یا فریت باشد. ساختار نواری باعث چینش بهینه مرزدهانه‌ها می‌شود که این امر با کاهش رلوکتانس هسته موجب افزایش بهره‌وری ترانسفورماتور می‌گردد. شکل حلقوی بسته باعث از بین رفتن فاصله هوایی در هسته‌هایی با ساختار E-I می‌شود. سطح مقطع حلقه عموماً به صورت مربعی یا مستطیلی می‌باشد، البته

هسته‌هایی با سطح مقطع دایروی با قیمت بالا نیز وجود دارند. سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه به صورت فشرده پیچیده می‌شوند و تمام سطح حلقه را می‌پوشانند.



شکل ۱-۳۹- ترانسفورماتور هسته حلقوی کوچک .

با این کار می‌توان طول سیم مورد نیاز را به حداقل رساند. در توانهای برابر ترانسفورماتورهای حلقوی از انواع E-I بازده بیشتری دارند. دیگر مزایای ترانسفورماتورهای حلقوی به قرار زیرند: اندازه کوچکتر (در حدود نصف)، وزن کمتر (در حدود نصف)، اغتشاش پائین (ایده‌آل برای استفاده در تقویت کننده‌های صوتی)، میدان مغناطیسی کمتر (در حدود یک دهم)، تلفات بی باری پائین (مناسب برای مدارها در حالت آماده بکار). از معایب آنها به قیمت بیشتر و توان نامی محدود می‌توان اشاره کرد. در بسامدهای بالا هسته‌های حلقوی فریت مورد استفاده قرار می‌گیرند. فریت قابلیت کار در بسامدهای چند ده کیلوهرتز تا یک مگا هرتز را دارا می‌باشد. با بکارگیری فریت تلفات، اندازه فیزیکی، و وزن منبع تغذیه سوئیچینگ کاهش می‌یابد. ایراد دیگر ترانسفورماتورهای حلقوی هزینه بالای سیم پیچی در آنهاست. در نتیجه آنها در توان‌های نامی بیشتر از چند کیلوولت آمپر کاربرد بسیار کمی دارند [۳۳].

✓ هسته‌هایی از جنس ورقه آهن، معمولاً به شکل UI، EI و EE می‌باشند.

✓ هسته‌های پودر فلزات به شکل حلقوی یافت می‌شوند.

✓ هسته‌های فریت اشکال متنوع‌تری دارند که شامل EE، UU، RM، ETD، EFD و ... می‌باشند.

۱-۳-۳- انواع هسته ترانسفورماتور از نظر ابعاد

هرچه توان انتقالی هسته بیشتر باشد، ابعاد آن نیز می‌بایست بیشتر باشد. بنابراین هسته‌ها را علاوه بر اشکال مختلف، در ابعاد مختلف نیز می‌سازند. به عنوان مثال هسته فریت UU در سایزهای U120، U93، U80 و ... موجود است. عددی که جلوی نام هسته وجود دارد معمولاً به اندازه یکی از ابعاد آن هسته اشاره می‌کند. مثلاً هسته U120 دارای پهنایی به اندازه ۱۲۰ میلی‌متر است.

۱-۳-۴- انواع هسته های فریتی

هسته‌های فریتی از انواع هسته‌های مغناطیسی هستند که از آنها برای ساخت ترانسفورماتورها و سلف‌های فرکانس بالا (فرکانس سوئیچینگ) استفاده می‌شود. فریت آلیاژی از اکسید آهن، روی و منگنز یا نیکل است که در دسته بندی مواد مغناطیسی در دسته فرومغناطیس نرم قرار می‌گیرد. این هسته‌ها دارای ضریب نفوذپذیری بالا و هدایت الکتریکی کم هستند. کم بودن هدایت الکتریکی منجر به تلفات جریان گردابی بسیار ناچیزی در این هسته‌ها می‌گردد. بنابراین می‌توان از فریت‌ها در فرکانس‌های بالا تا چند مگاهرتز هم استفاده کرد. در الکترونیک، هسته فریت یک نوع هسته مغناطیسی ساخته شده از اکسید آهن است که در سیم پیچ ترانسفورماتورهای الکتریکی و دیگر اجزای سیم پیچی شده مانند القاکننده ها نقش مهمی دارند. هسته های فریت به خاطر خواص اشباع مغناطیسی بالایشان همراه

با قابلیت هدایت الکتریکی کم (که به جلوگیری از جریانهای گردابی کمک می کند) مورد استفاده قرار می گیرند. به دلیل تلفات نسبتاً کم در فرکانس های بالا، به عنوان هسته ترانسفورماتورهای RF و سلف ها در منبع تغذیه سوئیچ شده و آنتن برای گیرنده های رادیویی AM استفاده می شوند [۳۳]. هسته های فریتی را می توان با توجه به شکل ظاهری به دسته های ذیل تقسیم کرد [۳۳]:

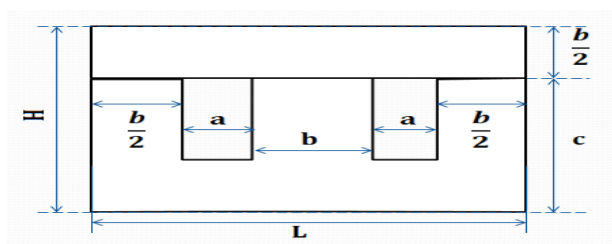


شکل ۱-۴۰- انواع هسته های فریتی.

در ذیل برخی از هسته های اشاره شده در فوق معرفی می گردد:

۱-۳-۴-۱- هسته EI

این مدار را اصطلاحاً مدار مغناطیسی جداری می نامند. غالباً مقطع هسته ی مرکزی دو برابر هر یک از هسته های طرفین است. در ترانسفورماتور با هسته جداری سیم پیچ های اولیه و ثانویه روی هسته مرکزی پیچیده می شود [۳۳].



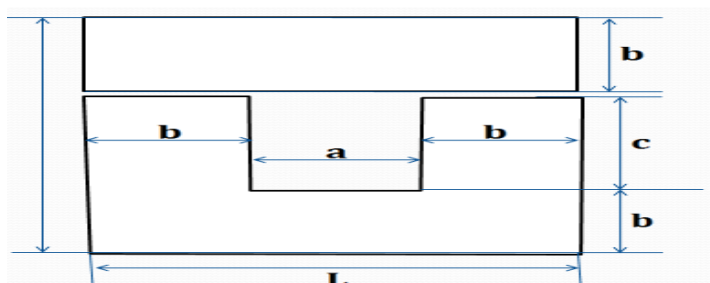
$$\begin{aligned} a &= \frac{L}{6} & b &= \frac{L}{3} \\ c &= \frac{L}{2} & H &= \frac{L}{1.2} \end{aligned}$$

شکل ۱-۴۱- مقاطع EI.

۱-۳-۲-۴-۲-۱ UI مقاطع

مدار مغناطیسی با شکل مربع مستطیل که شامل دو هسته است و به نام مدار مغناطیسی هسته ای نامیده می شود. مقطع سیم پیچ برای هر یک از دو شکل مدار مغناطیسی گفته شده مربع کامل یا مربع مستطیل است. سیم پیچ های اولیه و ثانویه را روی بدنه ای می پیچند که آن را قالب می نامند. قالب دارای یک بدنه و دو گونه ی چپ و راست است که در داخل قالب هسته مغناطیسی قرار می گیرد. سیم پیچ های اولیه و ثانویه به وسیله شارلاک و کاغذ پرشمان از یکدیگر عایق هستند.

در حالتی که مدار مغناطیسی شامل دو هسته است هر یک از سیم پیچ ها را روی یک هسته و یا نصفی از هر سیم پیچ را روی یک هسته و نصف دیگر آنها را روی هسته دیگر می پیچند. مقطع این بوبین ها نیز به شکل مربع یا مربع مستطیل است. برای جلوگیری از پراکندگی خطوط نیروی مغناطیسی و در نتیجه پیشگیری از افت فشار الکتریکی باید سیم پیچ ثانویه را نزدیک سیم پیچ اولیه پیچید [۳۳].



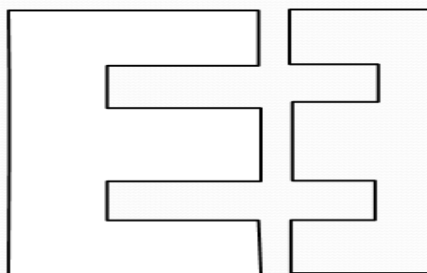
$$L = \frac{3}{5}H \quad C = \frac{3}{5}H$$

$$a = b = \frac{1}{5}H$$

شکل ۱-۴۲-۱ مقاطع UI

۱-۳-۴-۳-۱ EE مقاطع

ورق نوع EE مانند ورق نوع EI در داخل قرقره بوبین قرار می گیرد. این ورق ها دارای دو E یکی E کامل و دیگری E ناقص است (پایه های E ناقص کوتاه است). بوبین های اولیه و ثانویه روی هسته وسط پیچیده می شوند. محاسبات این مدل هسته نیز مانند مدل EI است [۳۳].



شکل ۱-۴۳-۱ مقاطع EE

۱-۳-۴-۴-۱ M مقاطع

این ورق یک پارچه است و سیم پیچ ها بطور متحدالمحور روی هسته ی میانی پیچیده می شوند.

۱-۳-۵-۱ کاربردهای هسته های فریت

هسته های فریت با توجه به ابعاد و فرکانس کارکرد در دو زمینه ذیل مورد استفاده قرار می گیرند:

- ✓ ترانسفورماتور سیگنال، که دارای سائز کوچک و فرکانس بالا هستند.
- ✓ ترانسفورماتورهای قدرت که دارای اندازه های بزرگ و فرکانس پایین می باشند.

در جدول ۸-۱ کاربردهای هسته های فریتی با توجه به شکل و ویژگی آنها آورده شده است.

جدول ۸-۱- کاربردهای هسته های فریتی با توجه به شکل و ویژگی آنها [۳۳]

Applications	Desired Properties	Preferred Materials	Available Shapes
Broadband Transformers	Low loss, High μ (permeability), Good frequency response	J, W	Pot cores, Toroids, E, U & I cores, RM, EP cores
Common Mode Chokes	Very high μ	J, W	Toroids, E cores
Converter and Inverter Transformers	Low losses, High saturation	F, L, P, R, T	Toroids, E, U & I cores, Pot cores, RS cores, Planar cores
Differential Mode Inductors	Low losses, High temperature stability, Good stability across load conditions	F, P, R, T	Gapped pot cores, EP cores, E cores, RM cores, Planar cores, PQ cores
Narrow Band Transformers	Moderate Q, High μ , High stability	F, J	Pot cores, Toroids, RM cores, EP cores
Noise Filters	High μ , Good frequency response	J, W	Toroids
Power Inductors	Low losses at high flux densities and temperatures, High saturation, Good stability across load conditions	F, L, P, R	Pot cores, E cores, PQ cores, RM cores, Planar cores
Power Transformers	High μ and low losses at high flux densities and temperatures, High saturation, Low exciting currents	F, L, P, R, T	Ungapped pot cores, E, U & I cores, Toroids, EP cores, RS cores, DS cores, PQ cores, Planar cores
Pulse Transformers	High μ , Low loss, High B saturation	J, W	Toroids
Telecom Inductors	Low losses, High temperature stability, Good stability across load conditions	F, P, R, T	Pot cores, EP cores, E cores, RM cores, Planar cores

۱-۳-۶- مزایای هسته فریتی

- ✓ خاصیت القایی خوب،
- ✓ ضدآب بودن،
- ✓ تولید نویز کم،
- ✓ سبک بودن.

۱-۳-۷- معایب هسته فریتی

- ✓ شکننده بودن،
- ✓ قابل انعطاف نبودن

۱-۴- تعیین بازه های فرکانسی هسته های ترانسفورماتور

به طور کلی مواد مغناطیسی به دو دسته سخت مغناطیس (نظیر آهنرباهای دائم) و نرم مغناطیس (نظیر مواد مغناطیسی با پسماند مغناطیسی کم) تقسیم بندی می شوند:

- مواد مغناطیسی سخت (دائم) به دسته ای از مواد اطلاق می شود که خاصیت مغناطیسی خود را پس از حذف میدان مغناطیسی خارجی حفظ می کنند و کاربردهای وسیعی را به خود اختصاص داده اند که در یخچال ها، موتورهای جریان مستقیم، نگهدارنده ها، دستگاه های سنجش، بلندگوها و ... کاربرد دارند. فریت های هگزاگونالی خواص ویژه ای دارند که آنها را برای استفاده در فرکانس های بالا ($< 100 \text{ MHz}$) مناسب کرده است.

- مواد نرم مغناطیس با اعمال میدان های ضعیف مغناطیسی، خاصیت مغناطیسی از خود نشان می دهند. وقتی نیروی اعمالی حذف می شود، خاصیت مغناطیسی باقیمانده در آن ها تضعیف می گردد. مواد نرم مغناطیس در سیستم های توزیع نیرو، تغییر انرژی الکتریکی به مکانیکی و ارتباطات میکروویو مورد استفاده قرار می گیرند. آنها همچنین به عنوان مبدل های الکتریکی و مواد فعال جهت ذخیره سازی اطلاعات در بسیاری از سیستم های اطلاع رسانی عمل می کنند. بسیاری از کاربردهای جدید آنها در اثر بهبود خواص و ویژگی های این مواد بوده است. نرم مغناطیس ها بر اساس محدوده فرکانسی نیز تقسیم بندی می شوند:

الف) فریت های غیر میکروویو برای فرکانس هایی از محدوده شنوایی تا 500 MHz

ب) فریت های میکروویو برای فرکانس هایی در محدوده $500 \text{ MHz} - 100 \text{ GHz}$

فریت های میکروویو، فراهم کننده یک محیط غیرفعال با تلفات کم می باشند که اجازه انتشار امواج را با تلفات ناچیز فراهم می کنند. در حقیقت با توجه به اینکه امواج الکترومغناطیس از دو مولفه الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده اند، با برهم کنش مولفه مغناطیسی موج با ممان های مغناطیسی ماده و مولفه الکتریکی موج با مولفه دی الکتریکی فریت، رفتار موج الکترومغناطیس تحت تاثیر پارامترهایی نظیر قابلیت نفوذ مغناطیسی، قابلیت نفوذ دی الکتریکی و آهنربایش ماده قرار می گیرد. با به کار بردن یک میدان مغناطیسی DC خارجی، واکنشی بین سینگال میکروویو و محیط انتشار موج (فریت) صورت می پذیرد که امکان کنترل آن را فراهم می سازد. بیش از ۱۰۰ نوع ترکیبات فریتی به عنوان فریت های میکروویو برای تولید تجهیزات مخابراتی معرفی شده اند. مواد فریتی نرم مغناطیس در وسایلی نظیر: مبدل ها، موتورها، ژنراتورها، سولنوئیدها، رله های DC و حفاظ های مغناطیسی بکار برده می شوند. با وجود مقاومت الکتریکی بالا و خواص مغناطیسی خوب، از این فریت ها به عنوان یک هسته عالی برای فیلتر ها در محدوده فرکانسی $450 - 50 \text{ KHz}$ استفاده می شود. فریت های غیر میکروویو به دو بخش زیر تقسیم می شوند:

۱- فریت ها با حلقه هیستریزیس مستطیلی شکل برای حافظه های کامپیوتری

۲- فریت های خطی (مربک از فریت های منگنز- روی و نیکل- روی) برای مبدل ها و سلف ها در فیلترها عملکرد فریت منگنز- روی ترجیحاً برای فرکانس هایی تا 1 MHz می باشد. بقیه فریت های اسپینیلی نظیر منیزیم- منگنز، نیکل- روی و فریت های لیتیومی در تجهیزات میکروویو، مورد استفاده قرار می گیرند. کاربردهای دیگر مربوط به فریت های نرم مغناطیس شامل هسته های حافظه، سنسورهای دمایی، اجزاء موتورهای الکتریکی، هسته های ترانسفورماتورها و حذف کننده های نویز الکتریکی می باشند.

فریت های نیکل- روی برای فرکانس های بالاتر از فرکانس کاربردی فریت های منگنز- روی (بالاتر از 1 MHz) ترجیح داده می شوند، زیرا دارای هدایت الکتریکی پائین تری می باشند. از فریت ها معمولاً به عنوان آنتن های گیرنده

در رادیو ها استفاده می شود و به جرأت می توان گفت تقریباً تمام گیرنده های رادیویی AM از این آنتن ها استفاده می کنند.

نکته قابل ذکر دیگر اینکه، شکل هسته های فریتی با توجه به خواص مکانیکی و مغناطیسی ویژه طراحی می شود. به عنوان مثال اشکال مختلفی از هسته برای سلف های دارای ضریب کیفیت بالا^۱ و اتلاف پایین مورد نیاز می باشد. توسعه بازار مربوط به فریت های میکروویو، وابسته به توسعه سیستم ها و تجهیزات مخابراتی و نظامی نظیر رادار و غیره می باشد. فریت های میکروویو نظیر گارنت ایتريم- آهن به عنوان هدایت کننده های امواج برای انتشار امواج الکترومغناطیس و جابجاکننده های فازی^۲ استفاده می شوند. از دیگر کاربردهای فریت های میکروویو می توان به ایزولاتورها، سیرکلاتورها، اسیلاتورها، سوئیچ ها و فیلتر ها اشاره کرد. بنابراین می بایست مواد را متناسب با کاربردهایشان انتخاب نمود. به طوریکه فریت برای یک منبع تغذیه سوئیچینگ ۱۰۰ کیلو هرتز (با القای بالا، تلفات کم و فرکانس پایین) بسیار متفاوت تر از یک ترانسفورماتور RF (با فرکانس بالا، تلفات کم) می باشد. در جدول ۱-۹ به برخی از بازه های فرکانسی مرتبط با برخی هسته های اشاره می گردد:

جدول ۱-۹- تراوایی مغناطیسی مواد مورد نظر

Medium	Susceptibility, volumetric, SI, χ_m	Permeability, μ (H/m)	Relative permeability, μ/μ_0	Magnetic field	Frequency, max.
Iron (99.95% pure Fe annealed in H)		2.5×10^{-1}	[۳۴200000]		
Mu-metal		2.5×10^{-2}	[۳۵20000]	At 0.002 T	
Mu-metal		6.3×10^{-2}	50000		
Iron (99.8% pure)		6.3×10^{-3}	[۳۴5000]		
Ferrite (manganese zinc)		$>8.0 \times 10^{-4}$	640 (or more)		Approx. 100 kHz – 1 MHz
Ferrite (nickel zinc)		$2.0 \times 10^{-5} - 8.0 \times 10^{-4}$	16 – 640		Approx. 100 kHz – 1 MHz[citation needed]
Nickel		$1.26 \times 10^{-4} - 7.54 \times 10^{-4}$	[۳۵100– 600]	At 0.002 T	
Aluminum	[۳۶2.22 $\times 10^{-5}$]	1.256665×10^{-6}	1.000022		

۱-۴-۱- هسته های فریتی مورد استفاده در فرکانس پایین (در محدوده کیلو هرتز)

علاوه بر موارد فوق، برخی از هسته های فریتی با فرکانس پایین در حدود کیلوهرتز، با ویژگی های منحصر به فرد آنها مورد بررسی قرار گرفتند که در ذیل به آن اشاره شده است. همچنین موادی که فریتها توسط آن ساخته می شوند می

^۱. Q-Factor

^۲. Phase Shifter

بایست دارای تراوایی مغناطیسی و توان بالا باشند به طوریکه در ترانسفوماتورهای قدرت تراوایی مغناطیسی به شکل زیر می باشد.

۱-۴-۱-۱- سری های TRM

دارای ویژگی های ذیل :



شکل ۱-۴۴- سری TRM.

✓ امپدانس بالا

✓ دارای بازه فرکانسی پایین حدود کیلوهرتز تا مگاهرتز

✓ تهیه شده از فریت نرم منگنز روی با اپوکسی کوتینگ

۱-۴-۱-۲- سری های TRCB با پوشش پلاستیکی

دارای ویژگی های ذیل :



شکل ۱-۴۵- سری TRCB.

✓ امپدانس بالا

✓ دارای بازه فرکانسی پایین حدود کیلوهرتز تا مگاهرتز

۱-۴-۱-۳- سری های MRFC

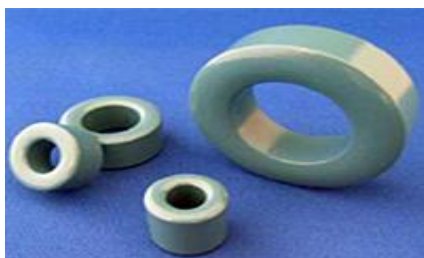
✓ دارای بازه فرکانسی 30MHz - 150KHz



شکل ۱-۴۶- سری MRFC.

۱-۴-۱-۴- سری های TRMH

دارای ویژگی های ذیل :



شکل ۱-۴۷- سری TRMH.

✓ امپدانس بالا

✓ بازه فرکانسی کمتر از ۱ MHz

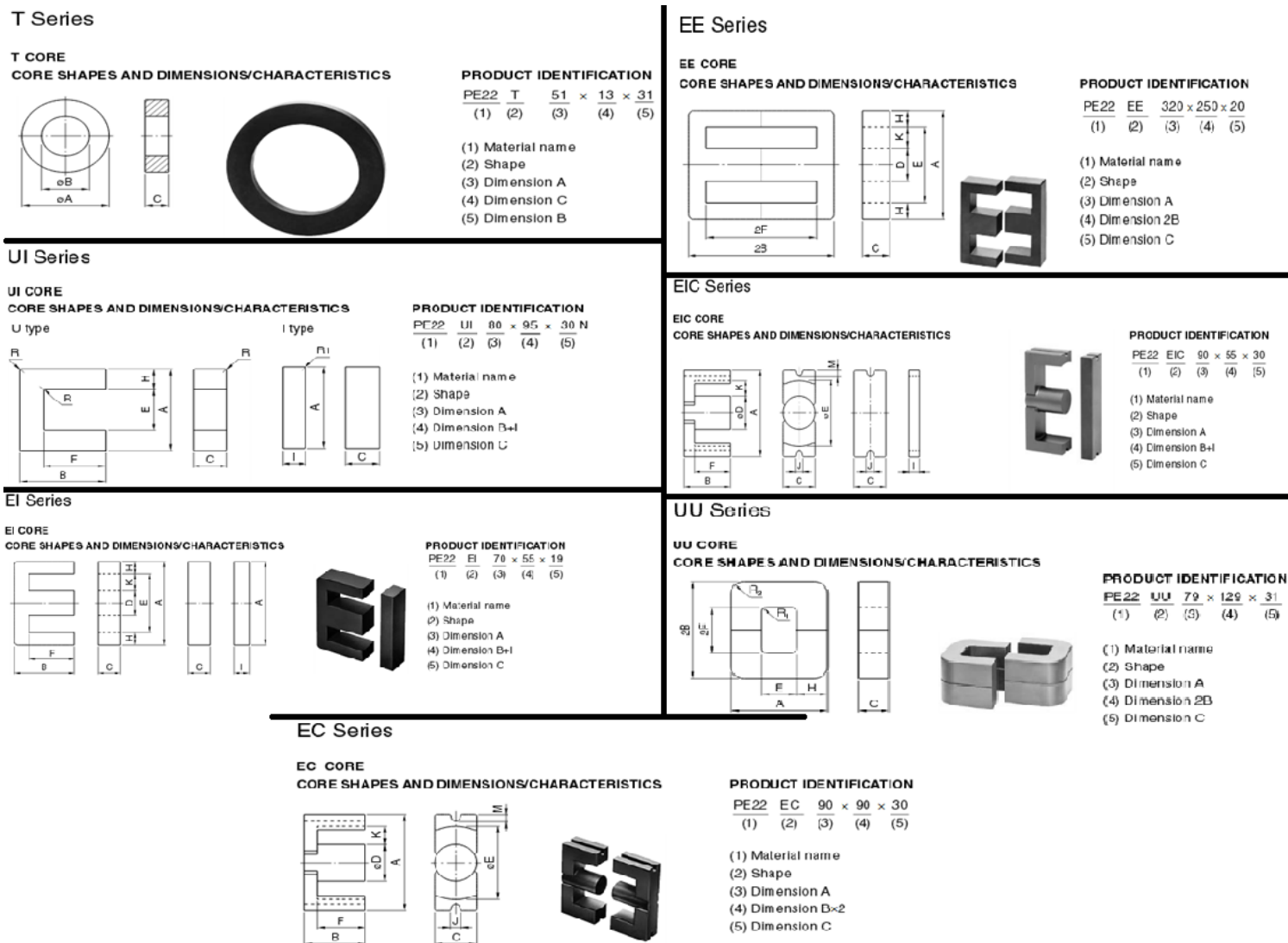
✓ تراوایی مغناطیسی بالا

۱-۴-۲- هسته های فریتی مورد استفاده در فرکانس های بالا

در فرکانس های بالا از هسته های فریتی سایز بزرگ به شرح ذیل تحت عنوان سری های ذیل استفاده می گردد [۳۷]:

T/UU/UI/EC/EIC/EE/EI/DT/PQ/SP series

در ذیل به چند نمونه از این هسته های فریتی سایز بزرگ اشاره می گردد:



شکل ۱-۴۸- هسته های فریتی مورد استفاده در فرکانس های بالا.

۱-۵- بررسی مطالعات انجام شده درخصوص اثرات ذرات یا نانوذرات در هسته های فریتی

فناوری نانو یا نانتوتکنولوژی رشته ای از دانش کاربردی و فناوری است که موضوعات گسترده ای را پوشش می دهد. موضوع اصلی آن فرآوری مواد یا کار کردن با تجهیزاتی در ابعاد کمتر از یک میکرومتر، معمولاً حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. نانو تکنولوژی به سبب بهبود کیفیت ابزارها، مصرف کمتر مواد اولیه، مصرف کمتر انرژی، کاهش تولید مواد زائد و افزایش سرعت تولید به عنوان مهمترین روش تولید و ساخت مطرح می باشد. با توجه به اینکه هدف نانو تکنولوژی طراحی، ساخت و استفاده از محصولات در ابعاد بسیار ریز می باشد، می توان با تکیه بر علم نانو و بکارگیری شیوه های جدید در افزایش بازدهی صنایع مختلف از جمله صنعت برق نقش مؤثری ایفا نمود. همانگونه که مطرح گردید، یکی از حوزه های مهمی که با استفاده از این فناوری امکان تامین نیازهای صنعت با خواص بهتر، کاهش هزینه ها و تلفات انرژی وجود دارد، صنعت برق است. این خواص شامل خواص فیزیکی، مکانیکی، متالورژیکی، شیمیایی و ... در پنج بخش تولید (نیروگاه)، شبکه انتقال، شبکه توزیع، الکترونیک و مهندسی مواد است که پیش بینی می شود با بهره

گیری از فن آوری نانو، تولید برق به میزان ۲۵-۲۰ درصد تا سال ۲۰۲۰ افزایش یابد [۳۸]. اهمیت مقیاس نانو در تغییر خواص و ویژگی های مواد در این ابعاد است. خواصی که مواد در ابعاد معمولی دارند و مشخصه یک ماده هستند مانند استحکام، انعطاف پذیری، رسانایی الکتریکی، خواص مغناطیسی، رنگ، واکنش پذیری و غیره، در ابعاد نانو تغییر کرده و ویژگی های جدیدی به وجود می آید. دلایل مختلفی برای تغییر خواص مواد در مقیاس نانو وجود داشته که در ذیل به آن اشاره می گردد:

- **تغییر قوانین فیزیکی :** رفتار اجسامی که با سرعتی کمتر از سرعت نور حرکت می کنند، تحت قوانین فیزیک کلاسیک می باشد که با کاهش اندازه اجسام در حد نانو، روابط جدیدی طبق قوانین فیزیک کوانتوم بر رفتار اجسام حاکم می گردد که عملکرد این قوانین با فیزیک کلاسیک متفاوت است. هر چه اندازه ذرات و اجسام کوچکتر شود، اثرات کوانتومی نیز قوی تر می گردد [۳۹].
- **طول موج طیف نور مرئی :** اجسام به رنگ نوری دیده می شوند که از آنها منعکس می شود. طول موج نورهای مرئی بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر است. بعضی از نانومواد که از ذرات کوچکتری تشکیل شده اند، نور مرئی را از خود عبور داده و در نتیجه شفاف دیده می شوند. به عنوان مثال می توان به ذرات اکسید تیتانیوم اشاره کرد که در حالت عادی سفید رنگ هستند اما نانوذرات آن، که در کرم های ضد آفتاب استفاده می شوند، بی رنگند.
- **تغییر نسبت سطح به حجم:** زمانی که اندازه کاهش می یابد، اتم های موجود در سطح، درصد زیادی از اتم های نانوذرات را تشکیل می دهند. این موضوع به نوعی بیانگر اهمیت سطح و در نتیجه اثرات سطحی می باشد. با توجه به نسبت بالای اتم های سطحی در مقایسه با اتم های توده ماده، بدیهی است که اسپین های سطحی نقش مهمی در خاصیت مغناطیسی ایفا خواهند نمود. این شکستن موضعی تقارن (منظور تقارن در تعداد اسپین های سطحی و دیگر اسپین های موجود در ذره می باشد) ممکن است موجب تغییرات در خواصی مانند ثابت بلوری، کوئوردیناسیون اتم و ... شود. با این حال، اتم های سطحی محیط متفاوتی از اتم های موجود در هسته ذره را تجربه می کنند [۴۰]. همچنین اگر یک مکعب به مکعب های کوچک تر تقسیم شود، سطح آن نسبت به حجمش بیشتر خواهد شد. در هر وجه مکعب به ضلع یک میکرومتر (۱۰۰۰ نانومتر) تقریباً یک میلیارد مولکول وجود دارد که تنها ۶ درصد آن روی سطح است. اما یک مکعب با ضلع ۱۰ نانومتر، در مجموع ۱۰۰۰ مولکول دارد که ۵۰ درصد آن بر روی سطح قرار دارد. این مسئله سبب بروز رفتارهای متفاوت می گردد. نانوذرات واکنش پذیرترند، سریعتر ذوب می شوند، مولکول های بیشتری را جذب می کنند و به راحتی مشتعل می شوند. اگر قرار باشد هر یک از این مکعب ها با ماده دیگری واکنش دهند، مولکول هایی بیشتر در واکنش شرکت می کنند که روی سطح قرار دارند. به طوریکه از مکعب اول ۶ درصد مولکول و از مکعب دوم ۵۰ درصد مولکول واکنش می دهند. به طور مثال، طلا عنصری نسبتاً بی اثر است که با عناصر محدودی ترکیب می شود. اما این عنصر در مقیاس نانو به یک واکنشگر بسیار قوی تبدیل می گردد که کاربردهای کاتالیستی بسیاری دارد.

یکی از موادی که انتظار می رود فناوری نانو اثر بیشتری بر پیشرفت آن داشته باشد، مواد مغناطیسی است. با ورود نانو فناوری به علم و صنعت مغناطیس، بهبود زیادی در کیفیت مواد مغناطیس ایجاد شده و مواد مغناطیسی با ابعاد کوچک و نیروی مغناطیسی بسیار ساخته شده اند. در مواد مغناطیسی نرم با کاهش اندازه دانه ها سطح زیر منحنی هیستریزس به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد به طوری که ممکن است کاملاً حذف شود. در این شرایط، از آنجا که اندازه ذرات بسیار کوچک اند، هر حوزه مغناطیسی در داخل یک ذره قرار دارد و بنابراین چرخش آن ها در داخل میدان به

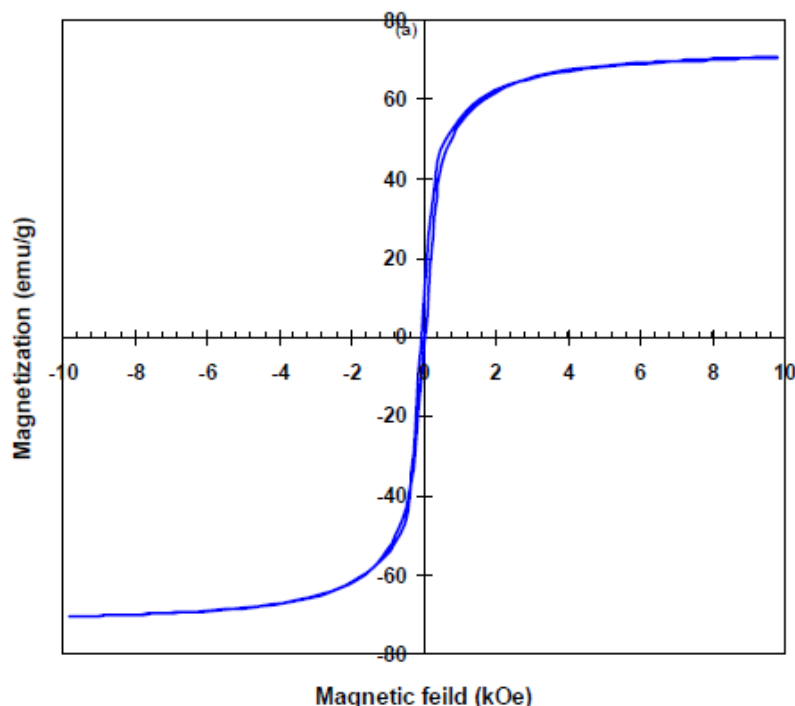
راحتی و بدون اتلاف انرژی انجام می شود. از جمله خواص بهینه مغناطیس های نانوساختار می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- استحکام مکانیکی بالا
- مغناطش اشباع بالا
- کاهش اتلاف هسته
- نفوذپذیری بالا
- کاهش نفوذپذیری با افزایش فرکانس
- کنترل B-H حلقه هیستریزیس در حین آنیل کردن
- عدم تغییر خواص در اثر اعمال عملیات مکانیکی و ارتعاشات و...
- تغییر دمایی کم
- پایداری دمایی خوب
- خواص فرکانسی خوب
- دمای کارکرد بالاتر

با توجه به بررسی های انجام شده در خصوص اثر ذرات یا نانوذرات در هسته های فریتی، مشخص گردید که بیشترین مواد مورد استفاده در هسته های فریتی، فریتهای نیکل روی و فریت های منگنز روی می باشند که اثرات ذرات یا نانوذرات آنها مطابق با بررسی های انجام شده در ذیل اشاره می گردد:

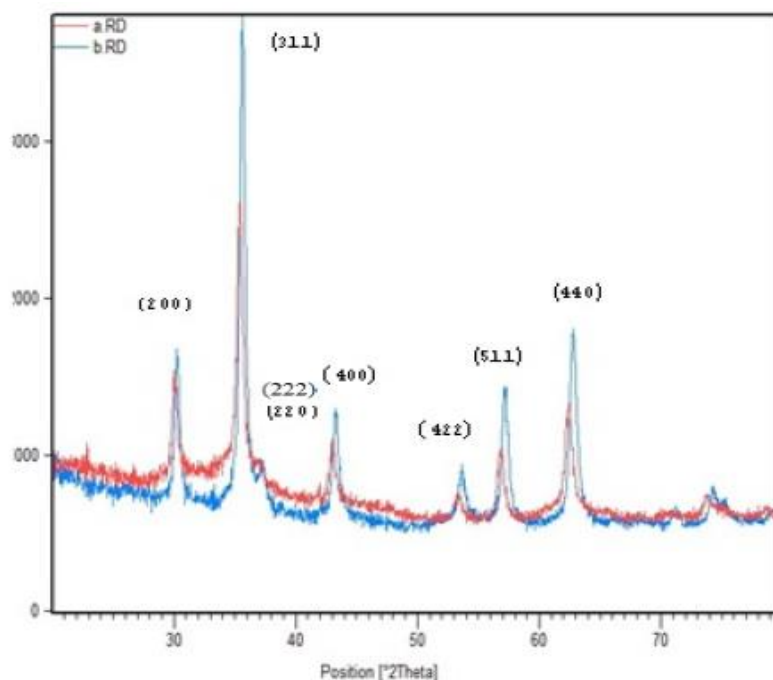
۱- فریت نیکل-روی با نفوذپذیری مغناطیسی بالا، مغناطش اشباع بالا و تلفات مغناطیسی اندک، مورد توجه گسترده در صنایع مغناطیس قرار گرفته است [۴۱]. با بررسی ویژگی های ساختاری و مغناطیسی فریت نانوساختار نیکل-روی تولیدی به روش سنتز احتراقی گلیسین-نیترات نتایج ذیل در خصوص اثر نانو شدن ذرات فریتی نیکل-روی حاصل شد:

- اندازه متوسط دانه ۱۵ نانومتر و ذرات ۲۰۰ نانومتر با بررسی های ریزساختار الکترونی
 - مغناطش اشباع پودر تولیدی مشابه با پودر آسیاکاری شده و میدان پسماندزدای بهتر آن نسبت به پودر آسیاکاری
 - بهبود خواص ساختاری و مغناطیسی این پودر با تغییر سه متغیر ترکیب شیمیایی، نسبت مولی گلیسین به مول های فلزی و انجام عملیات حرارتی بر روی این پودرها
- در در شکل ۱-۴۹ منحنی هیستریزیس مربوط به تست مغناطیسی انجام شده بر روی پودرها نشان داده شده است. از این منحنی، شاخصه های مغناطیسی نظیر مغناطش اشباع و میدان پسماند زدای مغناطیسی قابل استنتاج است.



شکل ۱-۴۹- منحنی هیستریزس پودر فریت تولیدی به روش سنتز احتراقی [۴۱].

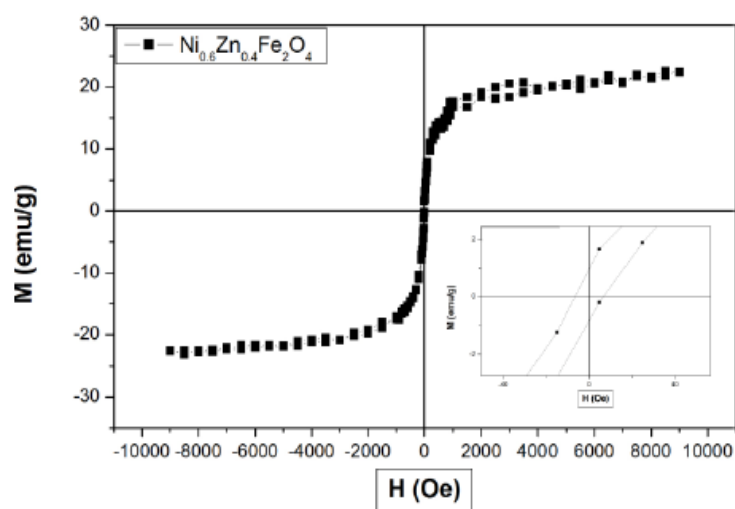
مقایسه نتایج نشان می دهد که فریت تهیه شده به روش سنتز احتراقی، مغناطش اشباع قابل مقایسه با پودرهای آسیا شده تولیدی از روش متداول در تولید سرامیک ها را دارا است و میدان پسماند زدایی به مراتب بهتر را ارائه می دهد. ۱- نانوذرات فریت نیکل -روی به روش همرسوبی نیز مورد بررسی قرار گرفتند. پودرهای تهیه شده در این خصوص پس از خشک کردن و کوبیدن در هاون، یک بار بدون پخت و یک بار بعد از پخت به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد مورد آنالیز قرار گرفتند. در نمودار ذیل طیف پراش پرتو ایکس از نمونه تهیه شده قبل و بعد از پخت در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است. همانگونه که دیده می شود بازپخت تحرک اتمی را افزایش داده و انرژی بیشتری به دانه ها برای رشد کردن می دهد. بنابراین انتظار می رود با افزایش دمای پخت، بلورینگی افزایش یابد. پیک های متناظر با الگوی پراش بعد از پخت، تیزتر و شدت پیک ها افزایش یافته است که نشان دهنده افزایش اندازه بلورک ها و افزایش بلورینگی می باشد. کاهش در پهنای نصف ماکزیمم پیک ها، نیز نشان دهنده افزایش بلورینگی و افزایش اندازه ذرات می باشد. منحنی پسماند مغناطیسی نیز قبل از پخت و بعد از پخت در ۶۰۰ درجه سانتی گراد نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود بعد از پخت دادن فریت، مغناطش اشباع نمونه افزایش یافته که ناشی از افزایش نظم کریستالی می باشد. همچنین چون وادارندگی با اندازه ذرات رابطه مستقیم دارد و ذرات فریت هم در اینجا کوچک می باشند انتظار می رود با افزایش اندازه ذرات، میزان وادارندگی نیز افزایش یابد. در ذیل به نتایج حاصل از بررسی ها اشاره می گردد:



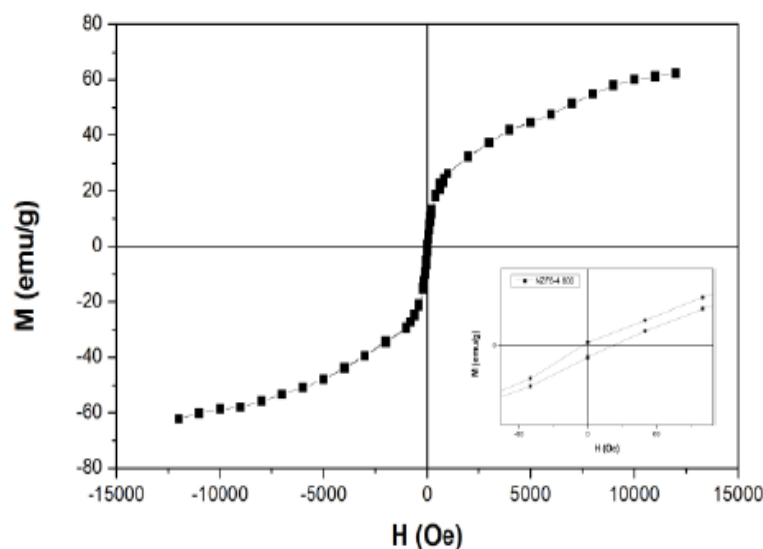
شکل ۱-۵- طرح پراش پرتو ایکس نمونه $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (a) قبل از پخت و (b) بعد از پخت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد [۴۲].

• نتایج آنالیز XRD و FT-IR تشکیل نانوذرات اسپینلی فریت نیکل روی را تایید نمود. با افزایش دما اندازه نانوذرات افزایش یافت و چون برای ذرات کوچک، وادارندگی رابطه مستقیمی با اندازه ذرات دارد، HC نیز افزایش پیدا نمود.

• مغناطش اشباع نمونه نیز به دلیل کاهش عیوب کریستالی و کرنش های داخلی، افزایش یافت. منحنی پسماند فریت نیکل روی در شکل خای زیر در مراحل قبل و بعد از پخت نشان داده شده است. همانطور که از نمودارها ملاحظه می گردد بعد از پخت دادن فریت، مغناطش اشباع نمونه افزایش یافته که ناشی از افزایش نظم کریستالی می باشد [۴۲].



شکل ۱-۵- منحنی پسماند فریت نیکل روی قبل از پخت در دمای اتاق نمونه [۴۲].

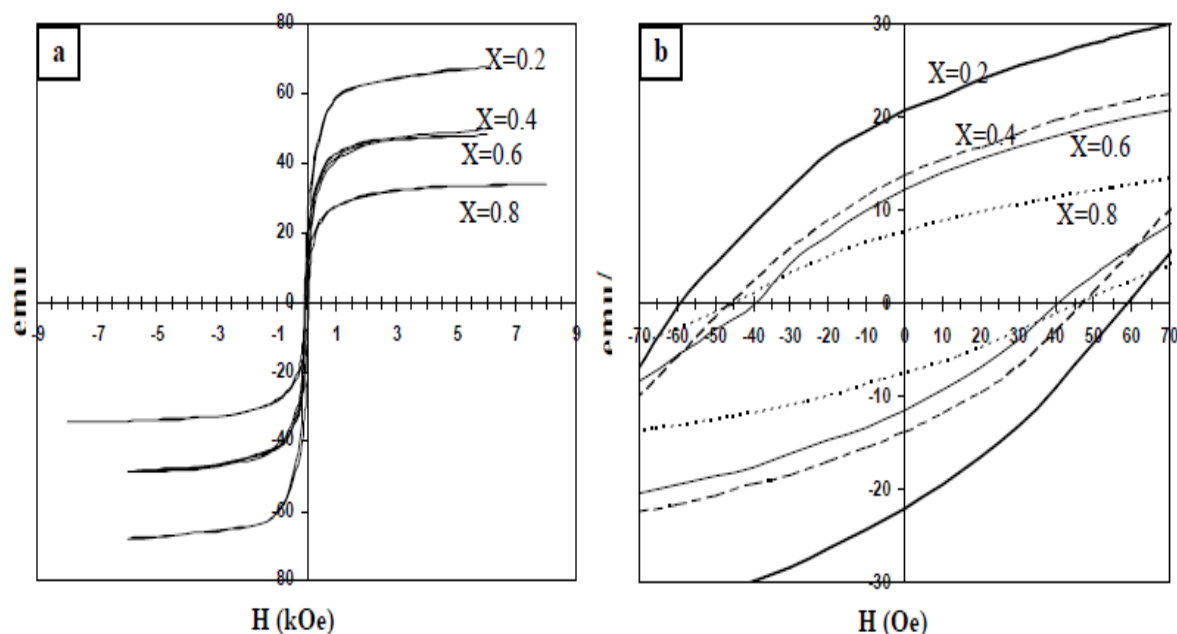


شکل ۵۲-۱- منحنی پسماند فریت نیکل روی بعد از پخت در دمای اتاق نمونه [۴۲].

جدول ۱-۱- خواص مغناطیسی نمونه ها [۴۲]

نمونه	$D_{XRD}(nm)$	M_s	$H_c(Oe)$
$Ni_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ قبل پخت	۱۱/۹۶	۲۲	۶
$Ni_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ بعد پخت	۲۲/۳۵	۶۲	۱۲

۱- ساختار و رفتار مغناطیسی فریت نانوساختار منگنز- روی تولیدی به روش سنتز خود احتراقی گلیسین-نیترات پودر نانوکریستال فریت منگنز- روی با ترکیب شیمیایی به روش سنتز خود احتراقی گلیسین - نیترات تولید شد. نتایج تست VSM نشان داد که فریت منگنز- روی با مغناطش اشباع ۶۹ emu/g بهترین رفتار مغناطیسی را داراست. با توجه به سادگی پروسه تولید فریت - منگنز روی به روش سنتز خود احتراقی - گلیسین نیترات و عدم نیاز به آسیاب کاری پودرهای تولیدی با این روش و نیز خواص مطلوبی که چنین پودرهایی از خود نشان می دهد، این روش می تواند به عنوان یک فرایند صنعتی برای تولید انبوه پودرهای نانوساختار فریتی مورد استفاده قرار گیرد. در شکل ۱-۵۳ نتایج VSM از پودر نانو ساختار فریت منگنز روی نشان داده شده است.



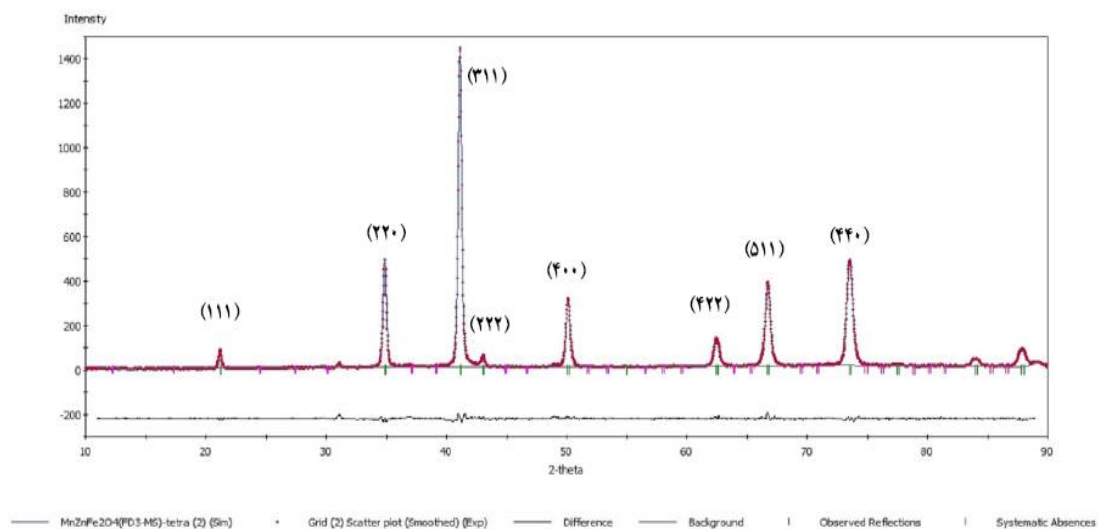
شکل ۱-۵۳- نتایج VSM از پودر نانو ساختار فریت منگنز روی.

جدول ۱-۱۱- مشخصات مغناطیسی پودر فریت تولیدی در ترکیب های شیمیایی مختلف

نمونه	پسماند مغناطیسی (emu/g)	میدان پسماند (Oe)	مغناطش اشباع (emu/g)	نفوذ پذیری (emu/gkOe)
$Mn_{0.8}Zn_{0.2}Fe_2O_4$	۶۹	۶۰	۲۱/۲۵	۳۵۴
$Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$	۴۹/۶	۴۷	۱۴	۲۹۷
$Mn_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$	۴۸	۴۰	۱۲	۳۰۰
$Mn_{0.2}Zn_{0.8}Fe_2O_4$	۳۴	۴۵	۸	۱۷۷

با توجه به اینکه در فازهای بعدی پروژه سنتز نانوذرات انجام و نسبت به تعیین نوع ماده هسته فریتی قابل کاربرد در ترانسفورماتور بررسی های لازم صورت خواهد گرفت، تاثیرات ذرات یا نانوذرات بر هسته فریتی به طور دقیق در فازهای بعدی مشخص خواهد شد.

۱- پودر فریت نانو ساختار منگنز-روی با به روش ساخت احتراقی با کمک حرارت مایکروویو تولید گردید. توزیع کاتیونی، پارامتر موقعیت شبکه ای اکسیژن، پارامتر شبکه و اندازه بلورک پودر تولیدی به کمک روش برتات و روش تحلیل طیفی ریتولد از روی الگوی پراش پرتو ایکس بدست آمد. فواصل بین یونی و زاویه پیوندها با استفاده از پارامتر شبکه و پارامتر موقعیت اکسیژن محاسبه شد. نتایج نشانگر تولید موفقیت آمیز پودر فریت نانو ساختار منگنز-روی با اندازه بلورک حدود 39 نانومتر است. شکل زیر الگوی پراش پرتو ایکس نمونه تولید شده را نشان می دهد. الگوی پراش به دست آمده نشان می دهد که ساختار تک فاز اسپینل بدون هیچگونه ناخالصی قابل تشخیصی شکل یافته است [۴۳].



شکل ۱-۵۴- الگوی پراش پودر فریت منگنز-روی که به کمک روش تحلیل طیفی ریتولد آنالیز گردیده است [۴۳].
 با توجه به شکل، الگوی پراش شبیه سازی شده به خوبی با الگوی پراش واقعی منطبق گردیده است [۴۳].
 مجموعه ای از تحقیقات انجام شده بر روی فریت ها در جدول ۱-۱۲ آورده شده است.

مجموعه ای از تحقیقات انجام شده بر روی فریت ها

شماره مرجع	شماره	فرمول شیمیایی	نوع ساختار	نوع سنتز	کاتیون جانشانی شده	M مغناطش (emu/g)	نیروی وادارندگی Hc (Oe)	ضریب تراوایی مغناطیسی μ	ناحیه فرکانسی (GHz)
۱۶	۱	$Ni_xCu_yZn_{1-x-y}Fe_2O_4$	اسپینلی	همرسویی	Cu		0.7		۱MHz
۱۷	۲	$(Ni_{0.25}Cu_{0.20}Zn_{0.55})Fe_2O_4$	اسپینلی	خودا اختراقی اتوماتیک	Mg			۲۴-۰.۱۸ ۲۰	۱۰Hz- ۱۰MHz
۱۸	۳	$Li_xCu_{0.1}Co_{0.1}Zn_{0.8-2x}Fe_{2-x}O_4$	اسپینلی	خودا اختراقی اتوماتیک	Li	۷۸.۹۴۱۱ ۸		۶۱-۰.۱۰	۱۰۰Hz- ۱۰۰MHz
۱۹	۴	$Zn_{1-x}Cd_xFe_2O_4$	اسپینلی	اختراقی مایکروویو	Cd	۴۵.۶۲۲	۲۱.۱۵۲		۱۰۰Hz- ۱۰۰MHz
۲۰	۵	$(Ni_{0.4}Co_{0.2}Zn_{0.4})Fe_2O_4$	اسپینلی	مایکروویو	Co				۰.۵-۱۸ GHz
۲۱	۶	$Ni_{0.4}La_{0.1}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	اسپینلی	همرسویی	La-Ni		۷۱.۲		۱۰۰Hz- ۱۰۰MHz
۲۲	۷	$Ni_{0.4}Mn_{0.1}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	اسپینلی	همرسویی	Mn-Ni		۱۶۹.۴		۱۰۰Hz- ۱۰۰MHz
۲۳	۸	$Ni_{0.4}Co_{0.1}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	اسپینلی	همرسویی	Co-Ni		۱۸۵.۳		۱۰۰Hz- ۱۰۰MHz
۲۴	۹	$Ni_{0.4}Cu_{0.1}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	اسپینلی	همرسویی	Cu-Ni		۱۷۹.۴		۱۰۰Hz- ۱۰۰MHz
۲۵	۱۰	$Ni_xZn_{1-x}Fe_2O_4$	اسپینلی	اختراقی	Ni=۰.۵	۶۷.۶۲	۸۱.۰۹	۸۰۰	۱MHz
۲۶	۱۱	$MgFe_2O_4$	اسپینلی	SHS			۴۰		
۲۷	۱۲	$Li_{0.5-x/2}Cd_xFe_{2.5-x/2}O_4$	اسپینلی	سرامیکی	Li-Cd	۳۱۰.۴۵ ۵.۲۳			۱۰۰Hz- ۱۰۰MHz
۲۸	۱۳	$Mg_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	اسپینلی	FSS	Mg		۸۰	۶۵۰	۱MHz
۲۹	۱۴	$Mg_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	اسپینلی	سرامیکی	Mg		۸۰	۵۸۰	۱MHz
۳۰	۱۵	$Mg_{0.2}Cu_{0.2}Zn_{0.62}Fe_{1.98}O_{3.99}$	اسپینلی	FSS	Mg-Cu		۸۰	۶۰۰	۱MHz
۳۱	۱۶	$Mg_{0.2}Cu_{0.2}Zn_{0.62}Fe_{1.98}O_{3.99}$	اسپینلی	سرامیکی	Mg-Cu		۸۰	۶۹۰	۱MHz
۳۲	۱۷	$Mg_{0.9}Mn_{0.1}In_xFe_{2-x}O_4$	اسپینلی	سرامیکی	Mg-Mn-In				۱۰kHz to ۱۰MHz

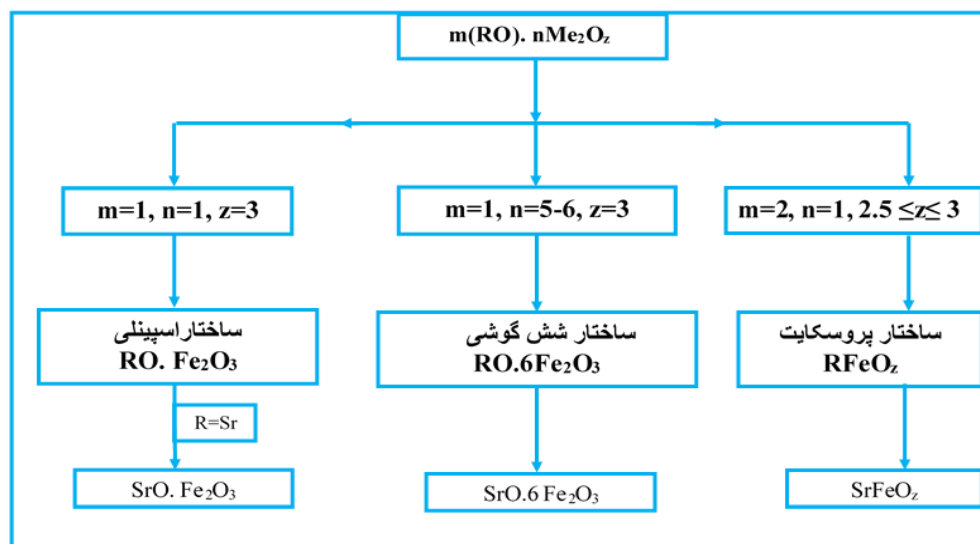
مرجع	کاربرد	فرکانس (Hz)	تراوایی (μ)	نیروی واپارندگی Hc (Oe)	مغناطش M _s (emu/g)	میدان اعمال شده	کاتیون جانشانی ی شده	اندازه ذرات (nm)	نوع سنتز	سال	فرمول شیمیایی	
۲۷		≥ 4 G		16 (x=0.0)	40 (x=0.1)		Al	70-100	همرسویی	2016	Mg _{0.8} Mn _{0.2} Al _x Fe _{2-x} O ₄	1
۲۸	فرکانس عملکرد بالا و پایین			84.32 (x=0.05)	31.48 (x=0.03)	21.7(x=0.0) 23.9(x=0.1) (تسلا)	Sc	21-23	solution combustion	2017	Mn _{0.5} Zn _{0.5} Sc _x Fe _{2-x} O ₄	2
۲۹				0.6 K 18 K			Zn Co		سل-ژل	2017	نانوذرات فریتی	3
۳۰	Hyper thermia			119.59 (x=0.01)	47.99 (x=0.015)	-600-600 Oe	Sm Gd	31.5-38.2	sol-gel auto- combustion	2016	Mn _{0.5} Zn _{0.5} Sm _x Gd _{0.02-x} Fe _{1.98} O ₄	4
۳۱					2.2 (x=0.05)		La		همرسویی	2016	Mn _{0.5} Zn _{0.5} La _x Fe _{2-x} O ₄	5
۳۲	بررسی بهترین توزیع کاتیون نیکل در فریت منگنز-روی						Ni		citrate method	2016	Mn _{0.5} Zn _{0.5} Fe ₂ O ₄	6
۳۳				32 (x=0.40)	55.6 (x=0.40)		Zn		همرسویی	2015	فریت Ni-Co-Mn-Mg	7
۳۴			111-442		60.5		Nd		ceramic method	2013	Mn _{0.5} Ni _{0.1} Zn _{0.4} Nd _x Fe _{2-x} O ₄	8
۳۵				91.8 158.5 501.7	100.3 104.2 95.9				سل-ژل احتراقی	2013	M _{1-x} Zn _x Fe ₂ O ₄ M=Zn M=Mn M=Co	9
۳۶				22 ±0.01	49.55 ±0.01	20 KOe	Mn		همرسویی	2013	Co _{0.5-x} Mn _x Zn _{0.5} Fe ₂ O ₄	10
۳۷	فرکانس های بالا	1-10 M	30-35 1814.91- 2285.49				In Al		citrate precursor Conventional ceramic	2009	Mg _{0.9} Mn _{0.1} In _x Fe _{2-x} O ₄ Mg _{0.9} Mn _{0.1} Al _x Fe _{2-x} O ₄	11
۳۸	سنتز و بررسی خواص نمونه برای فرکانس های بالا							8.50-13.44	Hydrothermal	2008	Mn _x Zn _{1-x} Fe ₂ O ₄	12
۳۹		1 M		55 200	23.0 11.7			2-16	co- precipitation	2006	Ni _{0.65} Zn _{0.35} Fe ₂ O ₄	13
۴۰				223 303	54.1 48.1		Zn	8.8-11.1 8.5-11.3	chemical coprecipitation	2005	Co _{1-x} Zn _x Fe ₂ O ₄ Mn _{1-x} Zn _x Fe ₂ O ₄	14
۴۱	بررسی خواص مغناطیسی نمونه						Gd		chemical coprecipitation	2005	Mn _x Zn _y [Fe _{2-z} Gd _z]O ₄ Mn _x Zn _y Fe ₂ O ₄	15
۴۲		100-400 M							standard ceramic technology	2015	composites of Ni-Zn ferrite	16

۱-۶- بررسی ساختارهای انواع فریت ها

اکسید های آهن به عنوان یکی از مهم ترین و پرکاربردترین مواد در زندگی بشر به شمار می روند. اکسیدهای آهن شامل سه فاز اصلی اکسیدی از آهن سه ظرفیتی (مگنتایت Fe_3O_4 ، هماتایت $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ و مگهمایت $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) و یک فاز اکسید آهن دو ظرفیتی (وستایت FeO) هستند [44]. گروه بزرگی از ترکیب های اکسید آهن که ویژگی الکتریکی و مغناطیسی یکتایی دارند؛ به اگزوفررایتها^۱ با فرمول $m\text{RO} \cdot n\text{Me}_2\text{O}_z$ معروفند که در آن R عنصری از گروه عناصر خاکی کمیاب، Me یک یون از عناصر واسطه است. بسته به گزینش m ، n و z در فرمول عمومی ساختارهای گوناگون اگزوفررایت ها به دست می آیند که معروفترین آن ها عبارتند از [۴۴]:

- ساختارهای بلورین اسپینل
- ساختارهای بلورین شش گوشه
- ساختارهای بلورین پروسکایت
- ساختارهای بلورین گارنت^۲

شکل ۱-۵۵ ساختارهای گوناگون بلورین را که به ازای مقادیر معینی از m ، n و z در فرمول عمومی به دست می آیند نشان می دهد.



شکل ۱-۵۵- اگزوفررایتها با ساختار گوناگون بلورین نمونه ای از آن ها با Sr [۴۴].

همان گونه که از شکل بالا مشخص است، اگر آهن به عنوان عنصر فلز واسطه (Me) و R یک کاتیون دو ظرفیتی انتخاب شود، ترکیب های اکسیدی از آهن به دست می آیند که به آن ها فریت گویند. فریت ها اکسیدهای سرامیکی شامل ترکیبات آهن هستند و به دلیل وجود برهمکنش های ابر تبادلی بین الکترون های یون های فلزات و اکسیژن، جهت گیری گشتاورهای مغناطیسی اسپینی یون ها در حضور میدان خارجی معمولاً در یک راستا و خلاف یک دیگر است، از اینرو از نظر ویژگی های مغناطیسی در دسته ی مواد فری مغناطیس قرار می گیرند؛ یعنی فریت ها دارای یک مغناطش ذاتی در دمای اتاق می باشند. از نظر ویژگی های ظاهری، فریت ها موادی سخت به رنگ قهوه ای تیره یا خاکستری هستند که انعطاف پذیری خوبی ندارند؛ به همین دلیل معمولاً به صورت پودر در دسترس قرار می گیرند [۴۵]. رفتار مغناطیسی فریت ها با فلزات فرومغناطیس متفاوت است. به دلیل اینکه فریت ها در شرایط محیطی اتاق

^۱ . Oxo ferrates

^۲ . Garnet

نارسانای خوبی هستند، ائتلاف های رسانشی و جریان گردابی آن ها بسیار کمتر از فرومغناطیس هاست. بیشترین کاربرد فریت ها در هسته های ترانسفورماتورها، آهنرباها و وسایل مورد استفاده در ارتباط های مخابراتی است [۴۵].

فریت ها ترکیبات یونی هستند و خواص مغناطیسی آن ها ناشی از یون های مغناطیسی موجود در آن هاست؛ پس لازم است بدانیم که یون فلزی خاص باید چه نوع ممان مغناطیسی داشته باشد. این اطلاعات توسط قانون هوند ۱ ارائه می شود؛ طبق این قانون اسپین ها در یک اوربیتال نیمه پر به صورتی تنظیم می شوند که بیشترین ناپایداری اسپینی را ایجاد کنند که این امر با اصل طرد پائولی مطابقت دارد. در فریت ها چون سهم اوربیتال دارای اهمیت نیست، قانون هوند فقط از لحاظ اسپین بیان می شود. به عبارت دیگر قانون هوند برگرفته از مطالعات انجام شده روی طیف های نوری است و آرایش اسپینی که این قانون بیان می کند ناشی از نیروهای تبادلی که درون اتم یا یون عمل می کنند، می باشد [۴۶].

۱-۶-۱- انواع فریت ها بر اساس ویژگی های مغناطیسی

فریت ها بر اساس ویژگی های مغناطیسی به دو دسته کلی نرم و سخت تقسیم می شوند. این نام گذاری به زیاد و یا کم بودن نیروی وادارندگی (Hc) و مغناطش پسماند (Mr) در حلقه پسماند بستگی دارد. مقدار وادارندگی، مغناطش پسماند و مساحت محصور بین نمودار حلقه پسماند فریت های نرم بسیار کم است. برعکس مقدار وادارندگی، مغناطش پسماند و مساحت محصور بین نمودار حلقه پسماند فریت های سخت زیاد است که این ویژگی برای آهنرباهای دائم مطلوب است. از دیگر ویژگی های فریت های سخت، می توان به عبور دادن شارمغناطیسی از خود در شرایط اشباع مغناطیسی، تراوایی مغناطیسی μ بالا اشاره کرد [۴۵]. مگنتیت (یا فریت آهن) Fe_3O_4 یک نمونه از فریت نرم و فریت های استرانسیوم ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) و باریم ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) نمونه هایی از فریت سخت می باشند [۴۵ و ۴۶]. مهمترین ویژگی فریت های نرم عبارتند از:

نفوذ پذیری بالا، القای اشباع شده بالا، افت انرژی هیستریزیسی پایین، افت جریان ادی پایین، ثبات نفوذ پذیری مغناطیسی با درجه حرارت، قیمت، دسترسی، استحکام، مقاومت در برابر خوردگی و سهولت تولید و سایر عوامل بر انتخاب یک ماده مغناطیسی نرم تأثیرگذار می باشد [۴۴].

مواد مغناطیسی نرم شامل آهن با خلوص بالا، فولادهای سیلیسی، آلیاژهای آهن، نیکل، آلیاژهای آهن، کبالت، آلیاژهای آهن - کرم - فریتی و فریت ها به مقدار زیاد تولید می شوند. با توجه به توسعه صنایع مخابرات الکترونیک صنعتی، رادیو و تلویزیون و دستگاههای جنبی آن و توسعه صنعت الکترونیک در بخشهای مختلف صنایع مانند مهندس پزشکی، الکترونیک خودرو اتوماسیون، کامپیوتر و غیره که تقریباً در همه صنایع یافت می شوند. همچنین باید به تجهیزات الکترونیکی در بخشهای گوناگون صنایع دفاعی کشور مانند جنگهای الکترونیک، مخابرات زیر سطحی، سیستمهای الکترونیک موشکی و فضایی و غیره اشاره نمود. با پیش بینیهای انجام گرفته توسط منابع بین المللی به نظر می رسد ایران سالانه به ۱۰۰۰ تن انواع فریتهای نرم احتیاج دارد [۴۴].

مغناطیس های دائمی شامل آلیاژهای مختلف، مواد بین فلزی و سرامیکها می باشد. این مغناطیس ها در حالت تکی مورد استفاده قرار می گیرند و نسبت به اثرات درجه حرارت، شوکهای مکانیکی و میدانهای غیر مغناطیسی حساس نمی باشند [۴۴]. مغناطیس های دائمی عموماً شامل انواع خاصی از فولادها، آلینکو، آلیاژهای آهن - کبالت حاوی وانادیم، مولیبدن، پلاتین، کبالت مانند آهن رباهای آهن - نئودیمیوم - بور و آهن رباهای Sm-Co، فریت های سخت شامل: فریتهای باریم و استرانسیوم و آلیاژهای عناصر نادر خاکی می باشند. هر یک از مواد مغناطیسی، خواص

¹. Hund's Rule

مغناطیسی، مکانیکی، خوردگی و دمای سرویس دهی منحصر به فردی دارند که سبب ایجاد محدودیت در کاربرد هر یک از آنها می شود. این محدودیتها به نحوی است که معمولاً هیچ آهن ربایی را نمیتوان به جای آهن ربای دیگری بکاربرد. همچنین سایر محدودیتها به هزینه های مواد خام و تولید بر می گردد. برای مثال آهن رباهایی که دارای کبالت هستند بسیار گران می باشند و آهن رباهای سرامیکی ارزانتر هستند [۴۴].

از فریتهای سخت به عنوان تولید کننده میدانهای مغناطیسی دائمی و از فریتهای نرم در کاربردهای فرکانسی مانند ارتباطات، مخابرات و قدرت استفاده میگردد. در ساخت مغناطیس های سرامیکی دائمی (فریتهای سخت) اساساً از اکسید آهن و کربناتهای باریوم و استرانسیم همراه با افزودنیهای استفاده می شوند و مهمترین می باشد. در ساخت سرامیکهای مغناطیسی نرم از اکسید آهن، DC مصرف این آهنرباها در ساخت موتورهای اکسید منگنز، اکسید نیکل و اکسید روی استفاده می گردد [۴۴].

۱-۶-۲- انواع فریت ها براساس ساختار بلوری

همان طور که بیان شد براساس ساختار بلورین، فریت ها به چهار دسته شش گوشه (هگزگونال)، پروسکایت، اسپینل و گارنت تقسیم می شوند [۳۹ و ۴۰]. در جدول ۱۳ ساختار شیمیایی و فرمول عمومی هر ساختار بیان شده است. در این جدول A نماد عنصر دوظرفیتی و R نماد عنصر سه و گاهی دو ظرفیتی است [۴۵ و ۴۷].

جدول ۱-۱۲- ساختار بلوری و فرمول شیمیایی عمومی انواع فریت [۴۵ و ۴۷]

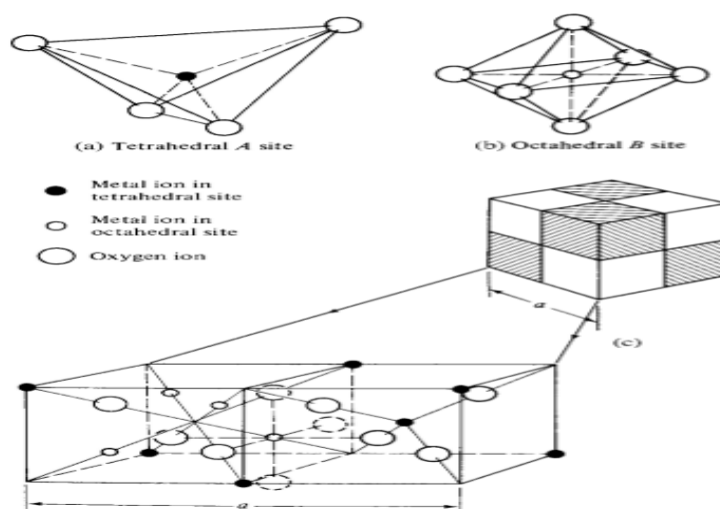
نوع فریت	ساختار بلوری	فرمول عمومی	مثال
اسپینل	مکعبی	AFe_2O_4	A: Mn, Zn, Fe, Ni, Mg, Co, Li
گارنت	مکعبی	$R_3Fe_5O_{12}$	R: Y, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er
اورتوفريت	پروسکایت	$RFeO_3$	R: Y, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, La, Sr
هگزگونال	شش گوشه	$AFe_{12}O_{19}$	A: Ba, Sr, Pb, Ca

همانطور که در جدول ۱-۱۳ بیان شده است، فریت های اسپینل و گارنت ساختار بلوری مکعبی دارند. اگرچه فریت های اسپینل اولین مواد میکروموجی بودند، گارنت ها اتلاف کمتری دارند و در بسیاری از کاربردها ترجیح داده می شوند [۴۷]. ساختار اورتوفريت ها پروسکایت است و یاخته یکه آن ها ممکن است بر اساس یکی از ساختارهای بلوری راست گوشه یا لوزی توصیف شود [۴۵]. در ذیل هر یک از ساختارهای بلورین به طور جداگانه بیان می شود.

۱-۶-۲-۱- ساختارهای بلورین اسپینل

همانطور که از شکل ۱-۵۵ مشخص است، اگر در فرمول عمومی اگزوفريت ها یعنی $mRO.nMe_2O_z$ مقدار $m=1$ ، $n=1$ و $z=3$ و $Me=Fe$ انتخاب شود، فریت حاصل ساختار اسپینلی خواهد داشت؛ زیرا ساختمان بلوری آن بسیار شبیه ساختمان بلوری اسپینل معدنی $MgO.Al_2O_3$ است [۴۶]. فرمول عمومی فریت های اسپینلی به صورت $RO.FeO_3$ است و در آن R یک کاتیون دوظرفیتی است. به جز فریت کبالت که از لحاظ مغناطیسی سخت است، بقیه فریت های اسپینلی از لحاظ مغناطیسی نرم می باشند [۴۶]. این فریت ساختمان پیچیده دارد، چون در آن ۸ واحد فرمولی یا در کل ۵۶ یون به ازای هر سلول واحد وجود دارد. به عبارت دیگر سلول واحد اسپینل ها از ۳۲ یون اکسیژن تشکیل شده که در میان آن ها یون های اکسیژن با آرایش یک مکعب مرکز وجوه (FCC)، کاملاً به هم فشرده اند و یون های فلزی که شعاع کوچکتری دارند، فضای بین آن ها را اشغال کرده اند. این فضا دو نوع می باشد؛ یکی از فضاها، فضای چهاروجهی یا موضع A است که در مرکز یک چهاروجهی که گوشه های آن با یون های اکسیژن پر شده است، قرار

دارد. فضای دیگر، فضای هشت وجهی یا موضع B است که در مرکز یک هشت وجهی که در گوشه های آن با یون های اکسیژن پر شده است، قرار دارد. به طور کلی ۶۴ فضای تتراهدرال (A) و ۳۲ فضای اکتاهدرال (B) وجود دارد که کاتیون ها در آن ها توزیع می گردند. چگونگی توزیع کاتیونی در ساختار اسپینل تاثیر قابل توجهی بر خواص مغناطیسی آن می گذارد. شکل ۴۶ این مواضع را نشان می دهد [۴۶ و ۴۸]. سلول واحد شامل تعداد زیادی یون است بطوری که یک طرح دوبعدی از یک سلول کامل بسیار پیچیده و غیر قابل استفاده خواهد بود؛ پس به جای آن می توان از سلول واحد با طول یال a که به هشت قسمت یک هشتمی تقسیم شده است (طبق قسمت C شکل ۱-۴۸)، استفاده کرد [۴۶].



شکل ۱-۵۶- ساختار بلوری یک فریت مکعبی [۴۶].

در عمل، تمام مواضع ممکن توسط یون های فلزی اشغال نخواهد شد، بلکه همانطور که در جدول ۱-۱۴ نشان داده شده است، فقط یک هشتم مواضع A و نصف مواضع B اشغال می شوند.

جدول ۱-۱۳- آرایش یون های فلزی در سلول واحد یک فریت $\text{MO.Fe}_2\text{O}_3$ [۴۶]

Kind of Site	Number Available	Number Occupied	Occupants	
			Normal Spinel	Inverse Spinel
Tetrahedral (A)	64	8	8M^{2+}	8Fe^{3+}
Octahedral (B)	32	16	16Fe^{3+}	8Fe^{3+} 8M^{2+}

بسته به آرایش کاتیون های فلزی دو و سه ظرفیت، سه حالت اسپینلی مختلف به وجود خواهد آمد:

۱-۶-۲-۱- ساختار اسپینلی معمولی (یا عادی)

در این نوع ساختار مانند اسپینل معدنی، کاتیون های دوظرفیتی تماما در مواضع A (فضای چهاروجهی) و کاتیون های سه ظرفیتی در مواضع B (فضای هشت وجهی) قرار می گیرند [۴۱]. فریت های روی و کادمیم دارای این نوع ساختار هستند.

۱-۶-۲-۱- ساختار اسپینلی معکوس

در این نوع ساختار کاتیون های دوظرفیتی در موضع B و کاتیون های سه ظرفیتی به طور مساوی بین مواضع A و B تقسیم می شوند. کاتیون های دوظرفیتی و سه ظرفیتی موضع B را معمولاً به صورت تصادفی اشغال می کنند، لذا ساختمان فریت های معکوس بی نظم است. فریت های آهن، کبالت و نیکل دارای این نوع ساختار می باشند [۴۶].

۱-۶-۲-۳- ساختار اسپینلی جزئی معکوس شده

پراش اشعه X و پراش نوترونی نشان داده است که ساختارهای میانی هم می تواند وجود داشته باشد. بسیاری از فریت های اسپینلی ساختاری مابین ساختار اسپینلی معمولی و ساختار اسپینلی معکوس شده دارند. در این نوع ساختار، علاوه بر اینکه کاتیون های سه ظرفیتی، کاتیون های دوظرفیتی هم بین مواضع A و B تقسیم می شوند [۴۶ و ۴۸]. لازم به ذکر است که فریت ها ممکن است از دو یا چند نوع یون دوظرفیتی ساخته شده باشند، که به آن ها فریت های مخلوط می گویند مانند $(\text{Ni}, \text{Zn}) \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. اکثر فریت های اسپینلی تجاری، فریت های مخلوط هستند [۴۶ و ۴۸]. به دلیل اینکه ترتیب لایه ها در این فریت ها به صورت ABCABC... است؛ یعنی این فریت ها از لایه های شامل یون های اکسیژن به ترتیب ABCABC... روی هم قرار گرفته اند و کاتیون های دو و سه ظرفیتی در فواصل میان آن ها هستند، تشکیل شده اند، به همین دلیل ساختمان این فریت ها مکعب مرکز وجوه پر (FCC) می باشد [۴۶].

۱-۶-۲-۲- ساختارهای بلورین شش گوشه

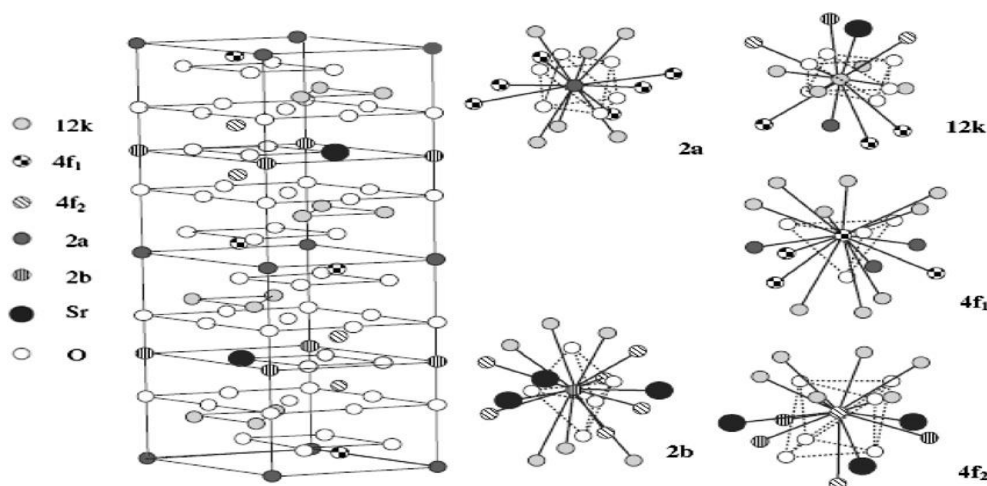
فریت های شش گوشه دسته ای از ابر ساختارهای مغناطیسی با ساختار شش وجهی بوده و دارای یک نوع نظم و تقارن ساختاری می باشند. بسته به این نظام و تقارن، شکل و انواع مختلفی از فریت های شش گوشه پدید می آیند که به شش دسته کلی M، Y، Z، W، X و U تقسیم بندی می شوند. در این میان فریت های شش گوشه نوع M به دلیل دارا بودن مغناطش اشباع بالا، میدان ناهمسانگردی زیاد، پایداری حرارتی بالا و مقاومت به خوردگی زیاد، نسبت به سایر انواع فریت های شش گوشه دیگر از اهمیت بسیار ویژه ای برخوردار است. در جدول ۱-۱۵ انواع فریت شش گوشه با فرمول شیمیایی عمومی آن ها بیان شده است [۴۵ و ۴۹].

جدول ۱-۱۴- فرمول شیمیایی عمومی انواع فریت شش گوشه [۴۵]

فرمول عمومی	نوع فریت شش گوشه
$\text{AFe}_{12}\text{O}_{19}$	M
$\text{A}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$	Y
$\text{AMe}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$	W
$\text{A}_3\text{Me}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$	Z
$\text{A}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{28}\text{O}_{46}$	X
$\text{A}_4\text{Me}_2\text{Fe}_{36}\text{O}_{60}$	U

فریت های اسپینلی دارای ساختار بلوری FCC بوده و به دلیل دارا بودن فرکانس قطع پایین، تنها می توانند در محدوده چند صد مگاهرتز تا چند گیگاهرتز مورد استفاده قرار بگیرند در حالی که فریت های شش گوشه و خصوصاً فریت شش گوشه باریم نوع M دارای تشدید فرو مغناطیس در فرکانس های بالا هستند و در محدوده فرکانس های گیگا هرتز، میزان نفوذپذیری بالایی هستند [۴۹]. فریت های شش گوشه زیادی وجود دارند، اما تنها فریت باریم $(\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19})$ و فریت استرانسیوم $(\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19})$ که فریت های شش گوشه نوع M می باشند، از نظر تجاری اهمیت دارند [۴۹].

ساختار فریت های شش گوش، مگنتوپلومبیت^۱ (مغناطوسربی) نام دارد؛ زیرا ساختار آن ها مشابه ساختمان بلوری کانی معدنی مینرال می باشد. یون های Fe در فریت های شش گوشه همان مواضعی را اشغال می کنند که مخلوط یون های Ti, Al, Mn, Fe در مگنتوپلومبیت اشغال می کنند [۴۶]. این ساختارها یک محور آسان (ارجح) به نام محور c و یک محور a دارد که طول محور c بلندتر از a است. وجود محور آسان برای استفاده از یک ماده ی مغناطیسی برای ساخت آهنربای دائم مهم است [۴۵]. هر مولکول ساختار شش گوش دارای ۳۲ اتم (شامل ۱۹ یون اکسیژن، ۱۲ یون از گروه فلز واسطه و یک یون از گروه خاکی کمیاب) است. یون های اکسیژن روی ۵ لایه به صورت ساختار تنگ پکیده شش گوشه (hcp) روی هم چیده می شوند. در لایه سوم ۳ یون اکسیژن و یکی از یون های Sr^{2+} , Ba^{2+} و Pb^{2+} قرار می گیرد و چهار لایه دیگر هر کدام شامل چهار یون اکسیژن است، بنابراین هر یاخته یکه شامل ۳۸ یون اکسیژن و ۲ یون از یون های خاکی کمیاب و ۲۴ یون از گروه واسطه (Fe^{3+}) است که بر روی ۱۰ لایه قرار گرفته اند [۴۴ و ۴۵]. این لایه ها به صورت ABAB... روی هم چیده شده اند و ساختمان حاصل یک شش وجهی فشرده است [۴۴ و ۴۵]. در ساختار شش گوشه، کاتیون ها جایگاه های بین نشین را که به زیر شبکه های هشت وجهی، چهاروجهی و سه گوشه شناخته می شوند، اشغال می کنند. جایگاه های چهاروجهی شامل زیر شبکه ی $4f_1$ ، جایگاه های هشت وجهی از سه نوع زیر شبکه ی $2a$ و $12k$ ، $4f_2$ و جایگاه های سه گوشه از یک زیر شبکه $2b$ تشکیل شده اند. شکل ۱-۵۷ ساختار یکه ی یک شش گوش که بیان کننده ی جایگاه های کاتیون های آهن است، نشان می دهد [۴۴ و ۴۵].



شکل ۱-۵۷- جایگاه های بین نشین هشت وجهی، چهاروجهی و سه گوشه کاتیون های آهن در یاخته یکه فریت های شش گوشه [۴۴ و ۴۵].

۱-۶-۲-۳- ساختارهای بلورین پروسکایت

گروه دیگری از ترکیب های اکسیدی به صورت ساختار پروسکایت (نامی از کانیهای معدنی) متبلور می شوند. این ساختار دارای فرمول عمومی $RMeO_3$ است که در آن R یک یون از گروه های عناصر خاکی کمیاب (همانند سزیوم، کلسیم، سدیم و استرانسیم) و Me یک یون از گروه فلز واسطه (تیتانیوم، آهن و...) می باشد و Z عددی بین ۲/۵ تا ۳ است. با انتخاب Z در این گستره، ساختار پروسکایت با شبکه های بلورین گوناگون به دست می آید.

^۱ . Magneto plumbite

۱-۶-۲-۴- ساختارهای بلورین گارنت

گارنت ها که از زمان کشفشان در طبیعت به عنوان سنگ های نیمه قیمتی شناخته می شوند، دارای فرمول شیمیایی کلی $P_3Q_2R_3O_{12}$ می باشند. ساختار بلوری گارنت، مکعبی است که هر یاخته واحد آن شامل ۸ واحد فرمولی یا ۹۶ یون اکسیژن است. کاتیون ها جایگاه های بین نشین را اشغال می کنند اما در این مورد برخلاف اسپینل ها سه نوع جایگاه وجود دارد. کاتیون هایی که با Q و R نشان داده شده اند جایگاه های a یا هشت وجهی و d یا چهاروجهی را اشغال می کنند که به ترتیب توسط شش و چهار یون اکسیژن احاطه می شوند. دیگر یون های فلزی P توسط هشت یون اکسیژن که در گوشه های یک مکعب مایل قرار گرفته اند، احاطه می شوند. این مکعب یک دوازده وجهی نامیده می شود. مکان چنین بین نشینی هایی را جایگاه c می نامند. در حقیقت شبکه بلوری گارنت را می توان به صورت چندوجهی های اکسیژن-فلز در نظر گرفت که هر چهاروجهی به چهار هشت وجهی و هر هشت وجهی به شش چهاروجهی متصل است، به این ترتیب یک کاواک دوازده وجهی ایجاد می شود [۴۸]. با جایگزینی برخی از یون های سه ظرفیتی با مخلوطی از یون های دو ظرفیتی (Mn^{2+}) و یون های چهار ظرفیتی (Si^{4+}) در گارنت طبیعی، امکان ساخت گارنت بدون سیلیسیم با ترکیب $M_2O_{3.5}Fe_2O_3$ فراهم می آید. جالب توجه ترین نوع این گارنت های سنتزی از لحاظ مغناطیسی، آن هایی هستند که در آن ها M منحصر ایتروم (Y) یا یکی از فلزات خاکی نادر از گادولینیم (Gd) تا لوتتیم (Lu) است. همه این گارنت ها فری مغناطیس هستند، اما نسبتا ضعیف می باشند؛ در نتیجه σ_s در دماهای نزدیک دمای محیط کمتر از 10 emu/g یا 8 mT/Kg است [۴۶].

گارنت ها به طور گسترده ای در دهه های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ در اثنای ظهور حافظه های کامپیوتری غیر فرار و سیستم های پردازشگر بر پایه ی نواحی مغناطیسی متحرک مرسوم به سامانه های حبابی ۱ مورد تحقیق و بررسی قرار گرفتند. مقدار زیادی مواد با کیفیت بالا مورد استفاده قرار گرفت و کارهای مهندسی زیادی انجام شد، اما این سیستم ها از نظر تجاری موفق نبود؛ به همین دلیل این پژوهش به فراموشی سپرده شد [۴۶].

۱-۷- تعیین نوع ماده هسته فریتی قابل کاربرد در ترانسفورماتور

هسته فریت یک نوع هسته مغناطیسی ساخته شده از اکسید آهن است که در سیم پیچ ترانسفورماتورهای الکتریکی و دیگر اجزای سیم پیچی شده مانند القا کننده ها نقش مهمی دارند. هسته های فریت به خاطر خواص اشباع مغناطیسی بالایشان همراه با قابلیت هدایت الکتریکی کم (که به جلوگیری از جریانه های گردابی کمک می کند) مورد استفاده قرار می گیرند. به دلیل تلفات نسبتا کم در فرکانس های بالا، به عنوان هسته ترانسفورماتورهای RF و سلف ها در منبع تغذیه سوئیچ شده و آنتن برای گیرنده های رادیویی AM استفاده می شوند. از مهمترین ویژگی قابل توجه مواد فریتی، تراوایی مغناطیسی بالا حدود ($15000 - 9000 \mu$) و انعطاف پذیری بالا می باشد و به اشکال مختلف قابل دسترس می باشند. فریت ها ترکیبات سرامیکی از فلزات واسطه با اکسیژن هستند که دارای خواص مغناطیسی اما غیر رسانا می باشند. فریت های مورد استفاده در ترانسفورماتور یا هسته های الکترومغناطیسی، شامل اکسید های آهن در ترکیب با عناصر نیکل، روی و یا منگنز می باشند. در جدول ۱-۱۶ ویژگی های فریت ها در مقایسه با مواد مغناطیسی دیگر از جمله آلایژ، پودر آهن و آمورف نشان داده شده است. در فرکانس های بالا، فریتها مزایای بیشتری نسبت به مواد مغناطیسی دیگر دارند که از آن جمله می توان به بهبود خواص مکانیکی آنها اشاره نمود [۵۰].

¹. Buble domains

جدول ۱-۱۵- مقایسه فریت های نرم با سایر مواد مغناطیسی [۵۰]

MAGNETIC MATERIALS				
	FERRITES	ALLOYS	IRON POWDER	AMORPHOUS
Initial permeability range	5 to 15,000	5000 to 300,000	5 to 150	3000 to 150,000
Curie temperature range (°C)	100 to 500	500	750	210 to 485
Saturation flux density range (k gauss)	3 to 5	8 to 24	10 to 12	5.5 to 10
Coercive force (oersted)	.05	.003 to 3		.003 to 3
Loss factor $\tan \delta/\mu_i \times 10^{-6}$				
	at f= 10 kHz	5	8	25
	100 kHz	10	80	30
	1 MHz	25	4000	100
Resistivity (Q-cm)	10^7 to 10^8	10^{-5}	10^4	1.4×10^{-4}

همچنین مزایا و معایب فریت ها با دیگر مواد مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است به طوریکه در ذیل به اهم مزایا و معایب آن اشاره می گردد [۵۰]:

الف) مزایا

- مقاومت بالا
- پهنای فرکانسی بالا
- کاهش تلفات به نفوذپذیری بالا
- پایدار نسبت به تغییر دما و زمان
- متفاوت بودن اشکال هسته
- کم هزینه بودن

ب) معایب

- چگالی شار اشباع پایین
- هدایت حرارتی ضعیف
- استحکام کششی کم
- شکنندگی مواد

از جمله مواد مورد استفاده در هسته های فریتی طبق مطالعات و بررسی های انجام شده می توان به فریت منگنز روی و فریت نیکل روی اشاره نمود که ویژگی های آن در جدول ۱۷ آورده شده است:

- فریت منگنز روی :

فریت منگنز روی با فرمول $(\text{Mn}_a\text{Zn}_{(1-a)}\text{Fe}_2\text{O}_4)$ ، جزو فریتهای نرم می باشد که به دلیل سطح نفوذپذیری و اشباعی بالاتر از فریت نیکل روی، بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. این نوع فریتهای در کمتر از ۲ مگاهرتز مورد استفاده قرار می گیرد [۵۰].

- فریت نیکل روی:

فریت نیکل روی با فرمول $(\text{Ni}_a\text{Zn}_{1-a})\text{Fe}_2\text{O}_4$ جزو فریتهای نرم بوده که مقاومت بیشتری نسبت به فریت منگنز روی دارد. به دلیل مقاومت بالای آن در فرکانس هایی از ۲ مگاهرتز تا چندین صد مگاهرتز مورد استفاده قرار می گیرند [۵۰].

جدول ۱-۱۶- ویژگی های مواد مورد استفاده در هسته های فریتی [۵۰]

TYPICAL FERRITE MATERIALS									
PARAMETER	MANGANESE-ZINC				NICKEL-ZINC				
Initial permeability range	1400 to 3500	750 to 3500	3500 to 4500	4500 to 15,000	10 to 75	75 to 200	200 to 1000		
Curie temperature range (°C)	180 to 280	150 to 250	130 to 150	120	250 to 500	200 to 500	90 to 200		
Flux density range (gauss) at H (oersted)	3500 to 5200	2400 to 4750	3000 to 5000	3000 to 5000	1000 to 2500	2500 to 3500	2800 to 3500		
Power loss density (mW/cm ³) at 100 kHz - 1000 G	< 100				100	50	25		
Loss factor $\tan \delta / \mu_i \times 10^{-6}$ at f - 30 kHz	30								
100 kHz	10	5	20						
300 kHz									
1 MHz		25							
3 MHz									
10 MHz									
30 MHz									
100 MHz									
**Typical frequency range kHz	10 to 500	10 to 2000	10 to 200	10 to 100	50-200 100-1500 400-2000	100			
MHz					10-150	2-30	1.5-5		

*Materials for power applications

**This frequency range does not apply for ferrite materials used in EMI suppression applications.

هسته های فریت با توجه به ابعاد و فرکانس کارکرد در دو زمینه کلی زیر بطور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند:

- ترانسفورماتور سیگنال، که دارای سائز کوچک و فرکانس بالا هستند.
 - ترانسفورماتورهای قدرت که دارای اندازه های بزرگ و فرکانس پایین می باشند.
- با توجه به اینکه در فاز های بعدی پروژه قرار است بسیاری از مواد فریتی قابل کاربرد در ترانسفورماتورها سنتز و مورد بررسی قرار گیرد نمونه های بیشتری در این خصوص طی تجربیات عملی شناسایی خواهد شد.

در جدول ۱-۱۸ مواد فریتی مورد استفاده در هسته های ترانسفورماتور به همراه کاربرد، شکل هسته و بازه فرکانسی مورد نظر طبقه بندی شده اند. با توجه به اینکه این فاز از پروژه مطالعاتی می باشد کلیه مشخصات فنی مربوط به هسته های ترانسفورماتور آورده شده است.

جدول ۱-۱۷- برآورد کاربرد مواد مورد استفاده در هسته های فریتی ترانسفورماتور [۵۱]

Material application survey				
Usage	Frequency range	Material	Specific application	Core type
High Q inductors in resonant circuits and filters	up to 0.1 MHz	N48	Filters in telephony, MW IF filters	Gapped RM, P, adjusting cores
	0.2 – 1.6 MHz	M33		
	1.5 – 12 MHz	K1		
Current transformers	up to 3 MHz	T36	Energy meters	Toroids
Broadband transformers (e.g. antenna transformers, ISDN transformers, digital data transformers (xDSL, LAN)	up to 3 MHz	T46	Impedance and matching transformers (ISDN, xDSL using paired core shapes with air gap)	Toroids
		T38		EP, RM, toroids
		T66		
		N45		
	up to 10 MHz	M33	Radio-frequency transformers	Double aperture, toroids
	up to 100 MHz	T57	LAN (also suitable for xDSL in paired core shapes)	Toroids
		M33	Balun transformers	Double aperture, toroids
Electromagnetic Interference (EMI)	up to 3 MHz	T38	Current-compensated chokes	E, toroids
		T37		
		T36		
		T35		
		T65		
	up to 5 MHz	N30		E, toroids
	up to 100 MHz	M13	Line attenuation, current-compensated chokes	Toroids
		K8		
		K10		
	Sensors, ID systems	up to 1 MHz	N22	Inductive proximity switches
up to 2 MHz		M33		
Medium and high frequency switch-mode power supplies	up to 100 kHz	N27	Power transformers and chokes	E, ETD, ER, EQ, EFD, EV, ELP, RM, RM LP, PM, PQ, U
	up to 500 kHz	N87		
		N88		
		N95		
		N96		
		N97		
		PC47		
	300 kHz to 1 MHz	N49		
	up to 100 kHz	N41	Chokes	E, ETD, ER, EQ, EFD, EV, ELP, RM, RM LP, PM
		N51		
	up to 500 kHz	N92	High voltage transformers and power chokes	
	up to 200 kHz	N72	Electronic lamp ballast devices	E, ETD

در جدول ۱-۱۹ با توجه به ماده مورد استفاده در هسته فریتی با اشکال مختلف، که شامل فریت های منگنز روی و نیکل روی می باشد مشخصات فنی مربوط به هریک از آنها آورده شده است.

جدول ۱-۱۸- مشخصات فنی فریت های منگنز روی و نیکل روی مورد استفاده در هسته ترانسفورماتور [۵۱]

Material properties						
Preferred application			Resonant circuit inductors			Inductors for line attenuation
Material			K1	M33 ¹⁾	N48	K10
Base material			NiZn	MnZn	MnZn	NiZn
Color code (adjuster)			violet	white	—	—
	Symbol	Unit				
Initial permeability (T = 25 °C)	μ_i		80 ±25%	750 ±25%	2300 ±25%	800 ±25%
Meas. field strength	H	A/m	5000	2000	1200	5000
Flux density (near saturation) (f = 10 kHz)	B _S (25 °C) B _S (100 °C)	mT mT	310 280	400 310	420 310	320 240
Coercive field strength (f = 10 kHz)	H _c (25 °C) H _c (100 °C)	A/m A/m	380 350	80 65	26 19	40 25
Optimum frequency range	f _{min} f _{max}	MHz	1.5 ... 12	0.2 ... 1.0	0.01 ... 0.1	0.1 ... 1.0
Relative loss factor at f _{min} at f _{max}	tan δ/μ _i	10 ⁻⁶ 10 ⁻⁶	<40 <120	<12 <20	<4 <6	<15 <60
Hysteresis material constant	η _B	10 ⁻⁶ /mT	<36	<1.8	<0.4	<5
Curie temperature	T _C	°C	>400	>200	>170	>150
Relative temperature coefficient at 25 ... 55 °C at 5 ... 25 °C	α _F	10 ⁻⁶ /K	2 ... 8 7 ... 1	0.5 ... 2.6 —	0.3 ... 1.3 0.3 ... 1.3	— —
Mean value of α _F at 25 ... 55 °C		10 ⁻⁶ /K	4	1.6	0.70	10.0
Density (typical values)		kg/m ³	4800	4700	4700	5000
Disaccommodation factor at 25 °C	DF	10 ⁻⁶	20	8	2	—
Resistivity	ρ	Ωm	10 ⁵	5	3	10 ⁵
Core shapes			RM, P, Toroid, P core half	RM, P, Toroid, Double-aperture, P core half	RM, P	Toroid, Double-aperture
Other material properties (graphs) see page			52	57	70	55

1) For threaded cores $\mu_i = 600 \pm 20\%$

Material properties (continued)

Preferred application			Inductors for line attenuation		Proximity switches
Material			K8	M13	N22
Base material			NiZn	NiZn	MnZn
Color code (adjuster)			—	—	red
	Symbol	Unit			
Initial permeability (T = 25 °C)	μ_i		860 $\pm 25\%$	2300 $\pm 25\%$	2300 $\pm 25\%$
Meas. field strength	H	A/m	1200	1200	1200
Flux density (near saturation) (f = 10 kHz)	B_S (25 °C) B_S (100 °C)	mT mT	340 240	280 135	370 260
Coercive field strength (f = 10 kHz)	H_c (25 °C) H_c (100 °C)	A/m A/m	40 25	12 8	18 14
Optimum frequency range	f_{min} f_{max}	MHz	0.1 ... 0.5	0.001 ... 0.1	0.001 ... 0.2
Relative loss factor	at f_{min} at f_{max}	$\tan \delta / \mu_i$	10^{-6} 10^{-6}	<20 <20	<2 <20
Hysteresis material constant	η_B	$10^{-6}/mT$	<4.5	<4.0	<1.4
Curie temperature	T_C	°C	>150	>105	>145
Relative temperature coefficient at 25 ... 55 °C at 5 ... 25 °C	α_F	$10^{-6}/K$	— —	— —	— —
Mean value of α_F at 25 ... 55 °C		$10^{-6}/K$	9.2	3.7	0.9
Density (typical values)		kg/m ³	5100	5200	4700
Disaccommodation factor at 25 °C	DF	10^{-6}	—	—	4
Resistivity	ρ	Ωm	10^5	10^5	1
Core shapes			Toroid	Toroid, Double-aperture	P core half
Other material properties (graphs) see page			54	56	59

Material properties (continued)

Preferred application			Broadband transformers			
Material			N45	T57	N30	T65
Base material			MnZn	MnZn	MnZn	MnZn
	Symbol	Unit				
Initial permeability ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	μ_i		3800 $\pm 25\%$	4000 $\pm 25\%$	4300 $\pm 25\%$	5200 $\pm 30\%$
Meas. field strength	H	A/m		1200	1200	1200
Flux density (near saturation) ($f = 10\text{ kHz}$)	$B_S (25\text{ }^{\circ}\text{C})$ $B_S (100\text{ }^{\circ}\text{C})$	mT mT	550 435	430 270	380 240	460 320
Coercive field strength ($f = 10\text{ kHz}$)	$H_C (25\text{ }^{\circ}\text{C})$ $H_C (100\text{ }^{\circ}\text{C})$	A/m A/m	15 21	14 12	12 8	12 11
Optimum frequency range	$f_{\min}$ $f_{\max}$	MHz	0.01 ... 0.10	0.01 ... 0.5	0.01 ... 0.40	0.01 ... 0.20
Relative loss factor at $f_{\min}$ at $f_{\max}$	$\tan \delta / \mu_i$	10^{-6} 10^{-6}	<1.0 <2.0	<5 <70	<2 <60	<1.5 <25
Hysteresis material constant	η_B	$10^{-6}/\text{mT}$	<0.3	<0.3	<1.1	<1.1
Curie temperature	T_C	$^{\circ}\text{C}$	>255	>140	>130	>160
Relative temperature coefficient at $25 \dots 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ at $5 \dots 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	α_F	$10^{-6}/\text{K}$	-8 ... -5.0 1.5 ... 3.0	— —	— —	— —
Mean value of α_F at $25 \dots 55\text{ }^{\circ}\text{C}$		$10^{-6}/\text{K}$	—	0.5	0.6	-0.5
Density (typical values)		kg/m^3	4900	4900	4900	4900
Disaccommodation factor at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	DF	10^{-6}	—	—	—	—
Resistivity	ρ	Ωm	11	3	0.5	0.30
Core shapes			ER, EP, RM	RM, P, EP, Toroid	RM, P, EP, E, Toroid, Double- aperture	RM, P, Toroid, EP
Other material properties (graphs) see page			68	113	63	115

Material properties (continued)					
Preferred application			Broadband transformers		
Material			T35	T37	T36
Base material			MnZn	MnZn	MnZn
	Symbol	Unit			
Initial permeability ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	μ_i		6000 $\pm 25\%$	6500 $\pm 25\%$	7000 $\pm 25\%$
Meas. field strength	H	A/m	1200	1200	1200
Flux density (near saturation) ($f = 10\text{ kHz}$)	$B_S (25\text{ }^{\circ}\text{C})$ $B_S (100\text{ }^{\circ}\text{C})$	mT mT	390 270	380 240	400 240
Coercive field strength ($f = 10\text{ kHz}$)	$H_C (25\text{ }^{\circ}\text{C})$ $H_C (100\text{ }^{\circ}\text{C})$	A/m A/m	12 9	9 8	22 24
Optimum frequency range	$f_{\min}$ $f_{\max}$	MHz	0.01 ... 0.20	0.01 ... 0.30	0.05 kHz... 100 kHz
Relative loss factor at $f_{\min}$ at $f_{\max}$	$\tan \delta / \mu_i$	10^{-6} 10^{-6}	<4 <60	<2 <60	<3 <30
Hysteresis material constant	η_B	$10^{-6}/\text{mT}$	<1.1	<1.1	<1.1
Curie temperature	T_C	$^{\circ}\text{C}$	>130	>130	>130
Relative temperature coefficient at $25 \dots 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ at $5 \dots 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	α_F	$10^{-6}/\text{K}$	— —	— —	— —
Mean value of α_F at $25 \dots 55\text{ }^{\circ}\text{C}$		$10^{-6}/\text{K}$	0.8	- 0.3	0.5
Density (typical values)		kg/m^3	4900	4900	4950
Disaccommodation factor at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	DF	10^{-6}	—	—	—
Resistivity	ρ	Ωm	0.2	0.2	0.2
Core shapes			RM, P, EP, Toroid	Toroid	Toroid
Other material properties (graphs) see page			103	107	105

Material properties (continued)

Preferred application			Broadband transformers		
Material			T38	T66	T461)
Base material			MnZn	MnZn	MnZn
	Symbol	Unit			
Initial permeability (T = 25 °C)	μ_i		10000 $\pm 30\%$	13000 $\pm 30\%$	15000 $\pm 30\%$
Meas. field strength	H	A/m	1200	1200	1200
Flux density (near saturation) (f = 10 kHz)	B _S (25 °C) B _S (100 °C)	mT mT	430 260	360 —	400 240
Coercive field strength (f = 10 kHz)	H _C (25 °C) H _C (100 °C)	A/m A/m	8 7	8 7	7 6
Optimum frequency range	f _{min} f _{max}	MHz	0.01 ... 0.10	0.01 ... 0.10	0.01 ... 0.10
Relative loss factor at f _{min} at f _{max}	tan δ/μ_i	10 ⁻⁶ 10 ⁻⁶	<2.0 <20	<1 <30	<8 <100
Hysteresis material constant	11 _B	10 ⁻⁶ /mT	<0.3	<0.3	<2.0
Curie temperature	T _C	°C	>130	>100	>130
Relative temperature coefficient at 25 ... 55 °C at 5 ... 25 °C	α_F	10 ⁻⁶ /K	— —	0.78 0.40	— —
Mean value of α_F at 25 ... 55 °C		10 ⁻⁶ /K	- 0.2	—	- 0.6
Density (typical values)		kg/m ³	4900	4950	4950
Disaccommodation factor at 25 °C	DF	10 ⁻⁶	—	—	—
Resistivity	π	Θm	0.1	0.8	0.01
Core shapes			RM, P, EP, ER, Toroid, E	EP, Toroid, RM	Toroid, E
Other material properties (graphs) see page			109	117	111

Material properties (continued)

Preferred application			Power transformers		
Material			N49	N92	N27
Base material			MnZn	MnZn	MnZn
	Symbol	Unit			
Initial permeability (T = 25 °C)	$\square_i$		1500 $\square 25\%$	1500 $\square 25\%$	2000 $\square 25\%$
Flux density (H = 1200 A/m, f = 10 kHz)	B _S (25 °C) B _S (100 °C)	mT mT	490 400	500 440	500 410
Coercive field strength (f = 10 kHz)	H _C (25 °C) H _C (100 °C)	A/m A/m	38 33	24 13	23 19
Optimum frequency range		kHz	300 ... 1000	25 ... 500	25 ... 150
Hysteresis material constant	$\square \square B$	10 ⁻⁶ /mT	<0.4	<1.4	<1.5
Curie temperature	T _C	°C	>240	>280	>220
Mean value of $\square F$ at 25 ... 55 °C		10 ⁻⁶ /K	—	—	3

Density (typical values)		kg/m ³	4750	4850	4800
Relative core losses (typical values)	P _V	kW/m ³	—	70	155
25 kHz, 200 mT, 100 °C		kW/m ³	—	410	920
100 kHz, 200 mT, 100 °C		kW/m ³	330	410	—
300 kHz, 100 mT, 100 °C		kW/m ³	80	230	—
500 kHz, 50 mT, 100 °C		kW/m ³	475	—	—
1 MHz, 50 mT, 100 °C		kW/m ³			
Resistivity	□	□ m	17	8	3
Core shapes			RM, EFD, ELP, Toroid, EQ, ER	RM, ETD, EFD, ER, E, ELP, Toroid, EQ, ER	P, PM, ETD, ER, E, U, Toroid
Other material properties (graphs) see page			72	88	60

Material properties (continued)

Preferred application			Power transformers		
Material			N87	N97	N72
Base material			MnZn	MnZn	MnZn
	Symbol	Unit			
Initial permeability (T = 25 °C)	□ _i		2200 □25%	2300 □25%	2500 □25%
Flux density (H = 1200 A/m, f = 10 kHz)	B _S (25 °C)	mT	490	510	480
	B _S (100 °C)	mT	390	410	370
Coercive field strength (f = 10 kHz)	H _C (25 °C)	A/m	21	21	15
	H _C (100 °C)		13	12	11
Optimum frequency range		kHz	25 ... 500	25 ... 500	25 ... 300
Hysteresis material constant	□□B	10 ⁻⁶ /mT	<1.0	<1.0	<1.4
Curie temperature	T _C	°C	>210	>230	>210
Mean value of □F at 25 ... 55 °C		10 ⁻⁶ /K	4	4	3
Density (typical values)		kg/m ³	4850	4850	4750
Relative core losses (typical values)	P _V	kW/m ³	57	45	80
25 kHz, 200 mT, 100 °C		kW/m ³	375	300	540
100 kHz, 200 mT, 100 °C		kW/m ³	390	340	500
300 kHz, 100 mT, 100 °C		kW/m ³	215	205	—
500 kHz, 50 mT, 100 °C		kW/m ³			
Resistivity	□	□ m	10	8	12
Core shapes			RM, P, PM, ETD, EFD, E, ER, EP, EQ, ELP, U, Toroid	RM, PM, ETD, EFD, ER, EQ, E, ELP, Toroid	E, EFD
Other material properties (graphs) see page			81	97	78

Material properties (continued)

Preferred application			Power transformers		
Material			N881)	N961)	PC472)
Base material			MnZn	MnZn	MnZn
	Symbol	Unit			
Initial permeability ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	μ_i		1900 $\mu_{25\%}$	2900 $\mu_{25\%}$	2500 $\mu_{25\%}$
Flux density ($H = 1200\text{ A/m}$, $f = 10\text{ kHz}$)	$B_S (25\text{ }^{\circ}\text{C})$ $B_S (100\text{ }^{\circ}\text{C})$ $B_S (140\text{ }^{\circ}\text{C})$	mT mT mT	500 400 340	500 410	530 420
Coercive field strength ($f = 10\text{ kHz}$)	$H_C (25\text{ }^{\circ}\text{C})$ $H_C (100\text{ }^{\circ}\text{C})$ $H_C (140\text{ }^{\circ}\text{C})$	A/m A/m A/m	16 10 12	16 15	13 6
Optimum frequency range		kHz	25 ... 500	25 ... 500	10 ... 500
Hysteresis material constant	μH	$10^{-6}/\text{mT}$	<1.5	<0.5	<1
Relative loss factor at $f_{\min}$ at $f_{\max}$	$\tan \delta / \mu_i$	10^{-6} 10^{-6}	<10 <30	<2 <20	<10 <20
Curie temperature	T_C	$^{\circ}\text{C}$	>220	>240	>230
Mean value of μ_F at $25 \dots 55\text{ }^{\circ}\text{C}$		$10^{-6}/\text{K}$	4	1	4
Density (typical values)		kg/m^3	4900	4850	4900
Relative core losses (typical values) 100 kHz, 200 mT, 25 $^{\circ}\text{C}$ 100 kHz, 200 mT, 60 $^{\circ}\text{C}$ 100 kHz, 200 mT, 100 100 kHz, 200 mT, 140 300 kHz, 100 mT, 100	P_V	kW/m^3 kW/m^3 kW/m^3 kW/m^3 kW/m^3	720 — 380 340 —	325 330 390 — —	600 — 270 — 360
Resistivity	ρ	$\Omega \cdot \text{m}$	10	10	4
Core shapes			E, ER, ETD, U	E, EQ, PQ, ETD	E, EQ, PQ, ETD
Other material properties (graphs) see page			84	94	100

Preliminary data (')
For cores up to 100 g (r

Material properties (continued)

Preferred application			Power transformers		
Material			N41	N51	N95
Base material			MnZn	MnZn	MnZn
	Symbol	Unit			
Initial permeability ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)	μ_i		2800 $\mu_{25\%}$	3000 $\mu_{25\%}$	3000 $\mu_{25\%}$
Flux density ($H = 1200\text{ A/m}$, $f = 10\text{ kHz}$)	$B_S (25\text{ }^{\circ}\text{C})$ $B_S (100\text{ }^{\circ}\text{C})$	mT mT	490 390	480 380	525 410
Coercive field strength ($f = 10\text{ kHz}$)	$H_C (25\text{ }^{\circ}\text{C})$ $H_C (100\text{ }^{\circ}\text{C})$	A/m	22 20	5 5	18 19
Optimum frequency range		kHz	25 ... 150	25 ... 150	25 ... 500

Hysteresis material constant	$\square\square B$	$10^{-6}/mT$	<1.4	<0.4	<0.6
Curie temperature	T_C	$^{\circ}C$	>220	>220	>220
Mean value of $\square F$ at 25 ... 55 $^{\circ}C$		$10^{-6}/K$	4	2	2
Density (typical values)		kg/m^3	4750	4800	4900
Relative core losses (typical values)	P_V	kW/m^3	—	75	—
25 kHz, 200 mT, 25 $^{\circ}C$		kW/m^3	—	450	425
100 kHz, 200 mT, 25 $^{\circ}C$		kW/m^3	—	400	455
300 kHz, 100 mT, 25 $^{\circ}C$		kW/m^3	—	—	250
500 kHz, 50 mT, 25 $^{\circ}C$		kW/m^3	180	110	—
25 kHz, 200 mT, 100 $^{\circ}C$		kW/m^3	1400	700	350
100 kHz, 200 mT, 100 $^{\circ}C$		kW/m^3	—	630	410
300 kHz, 100 mT, 100 $^{\circ}C$		kW/m^3	—	—	250
500 kHz, 50 mT, 100 $^{\circ}C$		kW/m^3	—	—	250
Resistivity	$\square$	$\square m$	2	6	6
Core shapes			RM, P	E, ER, ETD	E, ER, ETD
Other material properties (graphs) see page			65	75	91

Material properties (continued)

Preferred application			Film	
Material			Ferrite polymer composite (FPC)	
Base material			C350	C351
	Symbol	Unit		
Initial permeability $f = 1 \text{ MHz}$	$\square_i$		$9 \pm 20\%$	$9 \pm 20\%$
Flux density (near saturation) $H = 25 \text{ kA/m}$ $f = 10 \text{ kHz}$	$B_S (25 \square C)$	mT	255	255
Remanent induction $H = 25 \text{ kA/m}$ $f = 10 \text{ kHz}$	$B_r (25 \square C)$	mT	9	9
Coercive field strength $H = 25 \text{ kA/m}$ $f = 10 \text{ kHz}$	$H_C (25 \square C)$	A/m	600	600
Relative loss factor $f = 1 \text{ MHz}$ $f = 100 \text{ MHz}$ $f = 1 \text{ GHz}$	$\tan \square / \square_i$		<0.005 <0.400	<0.005 <0.400
Hysteresis material constant	$\square\square B$	$10^{-3}/mT$	<2	<2
Temperature coefficient	$\square = \square$ $\square\square/\square\square$ $\square T$	1/K	< $5 \cdot 10^{-5}$	< $5 \cdot 10^{-5}$

Density		kg/m ³	2930	2930
Resistivity	□	□ m		
f = 1 kHz			500	500
f = 10 kHz				
f = 10 MHz			100	100
Relative permittivity	□ r			
f = 1 kHz			700	700
f = 10 kHz				
f = 10 MHz			21	21
Maximum operating temperature	T _{max}	□ C	120	200
Dielectric strength		kV/mm	1	0.8
Tensile strength ¹⁾	□ □ Z	N/mm ²	1.5	2.5
Tearing resistance ¹⁾		%	25	25
Compressibility ¹⁾	□	N/mm ²	70	70
Other material properties (graphs) see page			—	—

1) T = 23 °C and 50% relative humidity

با توجه به مشخصات فنی موادی که در فوق به آن اشاره گردید بر اساس نوع هسته و موقعیت آن که در جدول ۱-۲۰ نشان داده شده است بازه فرکانسی، چگالی شار و دما نیز نشان داده شده است.

جدول ۱-۱۹- موقعیت اندازه گیری [۵۱]

Properties (valid only for ring cores of sizes R 10 to R 36)			Measuring conditions			
			Frequency	Field strength (material-dependent)	Max. flux density	Temperature
	Symbol	Unit	kHz	kA/m	mT	°C
Initial permeability	□ _i		□ □ 10		□ □ 0.25	25
Flux density near to saturation	B	mT	□ □ 10	◆ 1.2		25; 100
Coercive field strength	H _C	A/m kA/m	□ □ 10	◆ 1.2	near saturation	25; 100
Relative loss factor	tan □/□ _i		—		□ □ 0.25	25
Hysteresis material constant	□ □ B	10 ⁻⁶ /mT	10 (□ _i ◆ 500) 100 (□ _i □ □ 500)		B ₁ 1.5 B ₂ 3.0 0.3 1.2	25
Curie temperature	T _C	°C	□ □ 10		□ □ 0.25	
Relative temperature coefficient	□ F	10 ⁻⁶ /K	□ □ 10		□ □ 0.25	5 ... 25 25 ... 55
Density		kg/m ³				25

<i>Disaccommodation factor</i>	<i>DF</i>	10^{-6}	10^{-10}		0.25×10^{-10}	$25; 60^1)$
<i>Resistivity</i>		m	<i>DC</i>			25

The following properties are given only for materials for power applications:

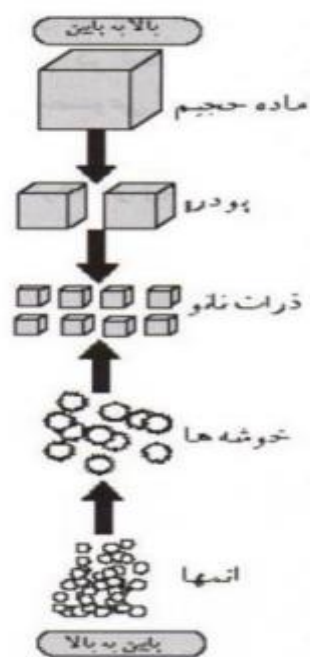
<i>Power loss</i>	<i>P_V</i>	<i>kW/m³</i>	25 100 300 500 1000		200 200 100 50 50	100

۱-۸- مطالعه و بررسی روش های سنتز ذرات قابل کاربرد در هسته فریتی

در سال های اخیر مطالعه بسیاری در خصوص بستگی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی مواد به اندازه ذرات صورت گرفته است. به همین دلیل پیشرفت گسترده ای در روش های جدید تولید ذرات با اندازه های گوناگون به وجود آمده است [۴۷]. به طور کلی روش های سنتز نانو مواد بر مبنای نوع واکنش و روش تولید به دو بخش کلی تقسیم می شوند:

الف) روش های فیزیکی: معمولاً به رویکرد بالا به پایین مرسوم اند: با سایش و خرد کردن یک ساختار، ابعاد ذرات آن کاهش پیدا می کند تا به ابعاد نانومتری مورد نظر برسد. این کار اغلب و نه همیشه شامل حذف بعضی از مواد به شکل ضایعات است، مانند ماشین کاری یک بخش فلزی از یک موتور یا نانو ساختاری کردن فلزات به طریق شکل دهی (که شامل ضایعات نیست) [۴۷].

ب) روش های شیمیایی: که به رویکرد پایین به بالا مرسوم اند: با کنترل آرایش و چیدمان اتم ها و مولکول ها می توان به محصول مورد نظر دست یافت [۴۷]. روش های شیمیایی سنتز نانومواد، از آن جهت که از رویکردهای پایین به بالا محسوب می شوند، توانایی مهندسی نانو ساختار و همچنین اصلاح سطح را فراهم می آورند. روش های شیمیایی در مقایسه با روش های فیزیکی اساساً به امکانات ساده تر و ارزانتری نیازمندند که این خود یک مزیت عمده در مقیاس تحقیقات آزمایشگاهی و همچنین تولیدات صنعتی محسوب می شود. به طور کلی نانوذرات را می توان از فاز بخار، فاز مایع و یا فاز جامد به دست آورد [۴۷]. روش بالا به پایین و پایین به بالا در شکل ۱-۵۸ نشان داده شده است.



شکل ۱-۵۸- مقایسه روش بالا به پایین و روش پایین به بالا [۴۷].

در ذیل به انواع روش های سنتز در این خصوص اشاره می گردد:

۱-۸-۱- روش رسوب دهی از فاز بخار

شامل فرآیندهایی است که طی آن مواد در حالت بخار از طریق تراکم و واکنش شیمیایی به حالت جامد بر می گردند. این فرآیند برای پوشش دهی قطعات مختلف و رسیدن به خواص نوری، الکتریکی، گرمایی، مکانیکی و مقاومت خوردگی ماده به کار می رود. این روش همچنین برای تشکیل فیلم ها و الیافی که برای فیلتر کردن مواد کامپوزیت مصرف می شوند، کاربرد دارد. فرآیندهای رسوب دهی گازی به طور معمول در محفظه خلاء به دست می آید. رسوب دهی شیمیایی و فیزیکی بخار از مهم ترین روش های رسوب دهی فاز گازی هستند.

۱-۱-۸-۱- روش رسوب دهی فیزیکی از فاز بخار^۱

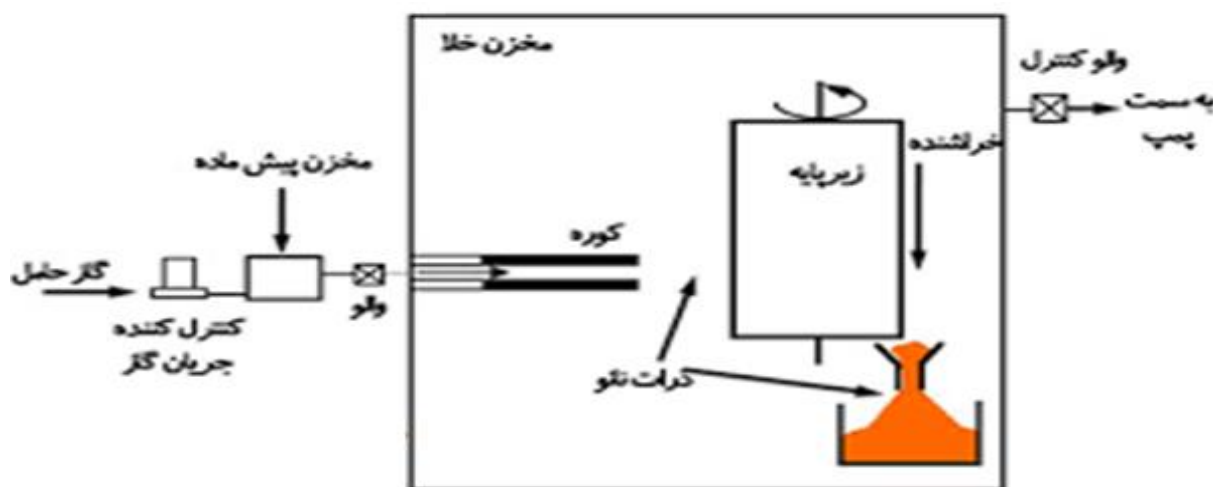
این روش برای تولید فیلم های نازک با کنترل اندازه اتمی مناسب است. اخیراً از این روش برای تولید نانوذرات نیز استفاده می شود. این روش برای ساخت قطعاتی که شامل اجزاء نیمه هادی هستند کاربرد دارد. از روش های مختلف PVD می توان به تبخیر^۲، کندوپاش^۳، سایش لیزری^۴ و اعمال پرتوهای یونی اشاره کرد [47]. شماتیک ساخت به روش چگالش فاز گازی در شکل ۱-۵۹ نشان داده شده است.

^۱ . PVD: Physical Vapor Deposition

^۲ . Evaporation

^۳ . Sputtering

^۴ . Laser ablation



شکل ۱-۵۹- شماتیک ساخت به روش چگالش فازگازی [۴۷].

۱-۸-۲- چگالش گاز خنثی^۱

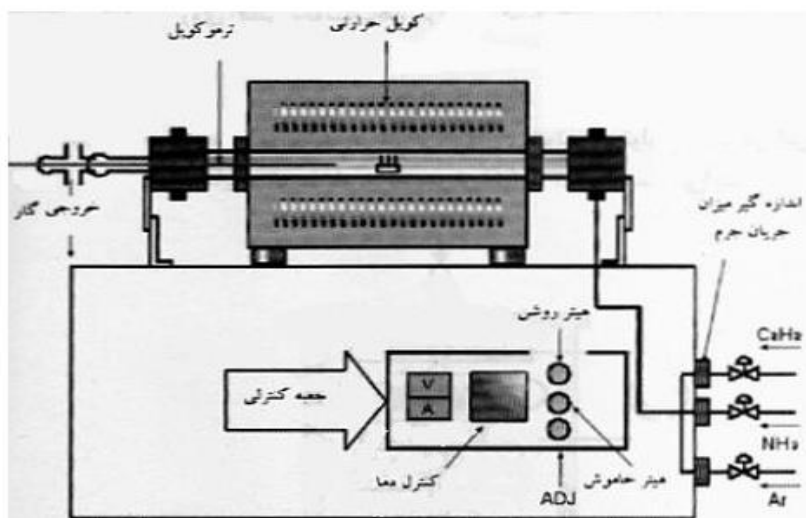
در این روش نانوذرات برپایه ی تبخیر در محیط فوق اشباع و سرد سازی آن در مجاورت یک گاز خنثی، تولید می شوند. اندازه، شکل و سرعت رشد خوشه ها در این روش به سه عامل آهنگ رساندن اتم ها به ناحیه فوق اشباع، آهنگ از دست رفتن انرژی اتم های داغ و آهنگ تولید خوشه ها از بخار تولیدی در ناحیه فوق اشباع بستگی دارد. در روش توسعه یافته این روش، از ترکیب سایش لیزری با چگالش گاز استفاده می شود [۴۷].

۱-۸-۳- روش رسوب دهی شیمیایی از فاز بخار^۲

این روش بسیار پیچیده تر از روش فیزیکی برای تولید پوشش ها و ذرات نانومتری است. از مزایای این روش می توان به تولید پوشش های چگال یکنواخت با خلوص بسیار زیاد، قابلیت تولید ذرات خالص و آهنگ تولید قابل قبول اشاره کرد [۴۷]. این روش به طور خلاصه شامل شش مرحله اصلی است که عبارتند از: انتقال گاز واکنش دهنده به سطح مورد نظر، جذب گاز در سطح مذکور، واکنش سطحی غیریکنواخت، نفوذ ذرات سطحی در ماده به عنوان مرکز رشد، جوانه زنی و رشد لایه و جمع آوری و خارج کردن محصولات جانبی واکنش از سطح [47]. شماتیک روش CVD ترموشیمیایی در شکل ۱-۶۰ نشان داده شده است.

¹ . Inert Gas Condensation

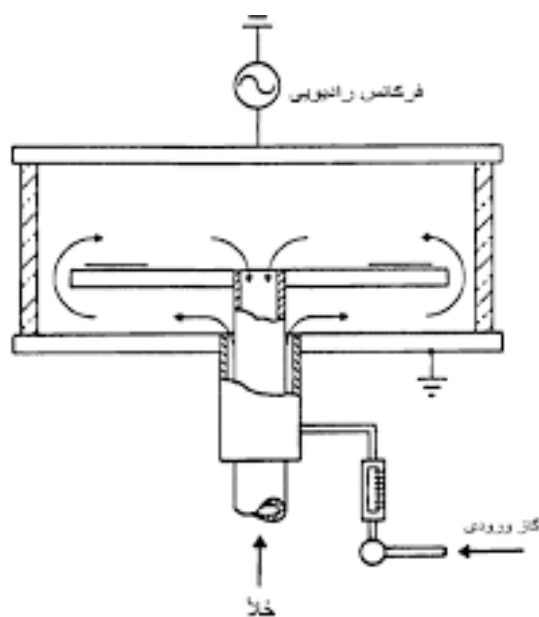
² . CVD: chemical Vapor Deposition



۱-۸-۱-۴- یاشش شعله احتراقی،^۱

۱-۸-۱-۵- قوس یلا سما^۲

2. Combustion Flam Spraying



شکل ۱-۶۱- طرحی از دستگاه سنتز نانوذرات با استفاده از پلاسمای تولید شده به وسیله RF [۲].

۱-۸-۲- روش رسوب دهی از فاز مایع

محیط های مایع در کل به سه دسته محیط هایی با واکنش اسیدی/بازی، محیط های رسوبی و محیط های اکسایش و احیاء، تقسیم می شوند. واکنشگرها می توانند جامد، مایع، گاز و یا هر نوع ترکیبی از آن ها باشند [۴۷]. از این فرآیند برای تشکیل پوشش و رسیدن به خواص مختلف رسانایی، گرمایی، نوری، مقاومت در برابر خوردگی و خواص مکانیکی استفاده می شود. متداول ترین این روش ها عبارتند از :

۱-۸-۲-۱- روش حلال آبی

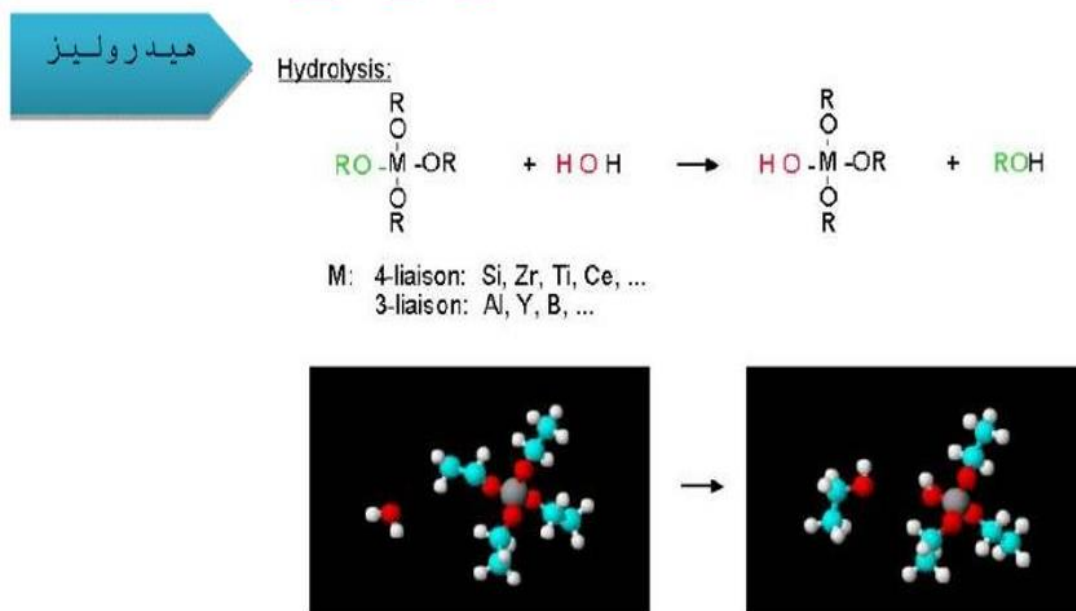
در این روش از آب به عنوان حلال مواد قطبی استفاده می شود؛ بنابراین بسیاری از واکنش های شیمیایی در محیط آبی انجام می شود [۴۲].

۱-۸-۲-۲- روش های غیر آبی

در این روش پودر اولیه به جاب آب در اتیلن گلیکول یا دی اتیلن گلیکول حل می شود و سپس تحت عملیات حرارتی قرار می گیرد. بسیاری از نانوبلورهای فلزی که به روش حل در محیط آبی تولید می شوند، به این روش هم قابل تولید هستند [۴۷].

۱-۸-۲-۳- روش هیدرولیز

برای تشکیل هیدروکسیدهای غیر محلول، از این روش استفاده می شود که در اثر حرارت و آگیری، آن ها را به اکسیدشان تبدیل می کند [۴۲]. نمای کلی از واکنش هیدرولیز در شکل ۱-۶۲ نشان داده شده است.

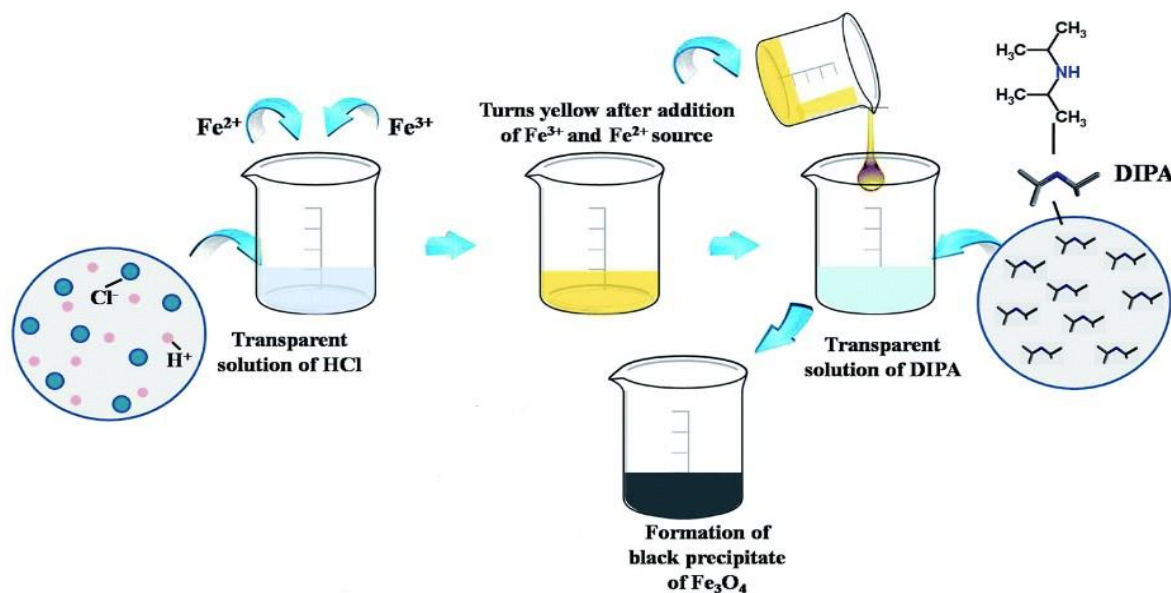


شکل ۱-۶۲- نمای کلی از واکنش هیدرولیز [۴۷].

۱-۸-۲-۴- روش هم‌رسوبی^۱

اگر در عمل رسوب‌گیری دو یا چند ماده به طور هم‌زمان رسوب کنند، واکنش را هم‌رسوبی گویند که در این حالت رسوب حاصل مخلوط بسیار همگن از این مواد خواهد بود [۴۷]. رسوب از دو طریق هسته‌زایی و رشد ذره انجام می‌شود. رقابت بین این دو مرحله، می‌تواند ذرات با اندازه‌های مختلف را تولید کند. اگر هسته‌زایی بر رشد غلبه کند، رسوب شامل ذرات کلونیدی خواهد بود و اگر رشد بر هسته‌زایی غلبه کند، رسوب از ذرات درشت بلوری تشکیل خواهد شد. انحلال‌پذیری رسوب، دما، غلظت، pH و آهنگ مخلوط‌سازی واکنش‌دهنده‌ها، از عوامل موثر بر اندازه ذرات تولیدی می‌باشد. روش هم‌رسوبی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های ساخت نانوذرات است. مزیت این روش ارزان بودن و وقت‌گیر نبودن آن است و همچنین می‌توان در حجم کم واکنش مقدار زیادی نانوذره ساخت [۵۵-۵۲]. نمونه‌ای از فرآیند سنتز نانوذرات به این روش در شکل ۱-۶۳ نشان داده شده است.

^۱ . Co-Precipitation method



شکل ۱-۶۳- فرآیند سنتز نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 به روش هم‌رسوبی [۵۵].

۱-۸-۲-۵- روش هیدروترمال

این روش ابزاری قدرتمند در تولید نانو مواد محسوب می‌شود. زیرا از نظر شرایط ملایم و مناسب برای تولید مواد پیشرفته (از تک بلور توده ای تا ذرات خیلی ریز و در نهایت نانو بلور یا نانو ذرات) است. فرایند هیدروترمال در دمایی بالاتر از دمای اتاق $350-100$ درجه سانتیگراد و در فشارهای بالا (15 MPa) موثر است [۴۷]. از مزایای این روش می‌توان به استفاده از ظرف واکنش بزرگتر، ذخیره انرژی، سادگی، قیمت ارزان، تقریباً بدون آلودگی، کنترل هسته‌زایی بهتر، سرعت بالای واکنش، دمای واکنش پایین و... اشاره کرد. پودرهای تولید شده به وسیله ی فرآیند هیدروترمال آگلومره نبوده، با این حال دانه ریز، با خلوص بالا، مورفولوژی کنترل شده، دارای توزیع اندازه ذرات باریک و شامل تک بلورها می‌باشد [۴۷]. در روش هیدروترمال محلول آبی از مواد اولیه، معمولاً اکسیدها، هیدروکسیدها، اسیدها، بازها و یا نمک‌های دیگر فلزات را در داخل اتوکلاو قرار می‌دهند. مخلوط آبی در دمای واکنش مورد نظر تحت فشار، حرارت داده می‌شود و از واکنش مواد اولیه طی فرایند انحلال و رسوب گیری مجدد، محصول تشکیل می‌شود. پارامترهای موثر بر اندازه ذرات در این روش دما، pH، فشار، زمان و... می‌باشند [۴۷]. نحوه چیدمان وسایل مورد نیاز برای سنتز در روش هیدروترمال در شکل ۱-۶۴ نشان داده شده است.



شکل ۱-۶۴- چیدمان وسایل مورد نیاز برای سنتز به روش هیدروترمال [۴۷].

۱-۸-۲-۶- روش نمک های مذاب^۱

این روش یکی از روش های نوین برای تهیه پودرها از فاز مایع یا گاز می باشد. در این روش ابتدا مواد خام با گونه ای از نمک ها که برای تهیه محصول نهایی مناسب هستند، مخلوط شده و برشته می شوند. وجود نمک در محیط باعث پایین آمدن دمای تشکیل فاز شده و محصولی با ذرات بسیار ریز تهیه می شود. پس از تشکیل محصول مورد نظر، نمک ها با عمل شست و شو از محیط خارج می شوند [۴۷ و ۵۵].

۱-۸-۲-۷- روش سل-ژل^۲

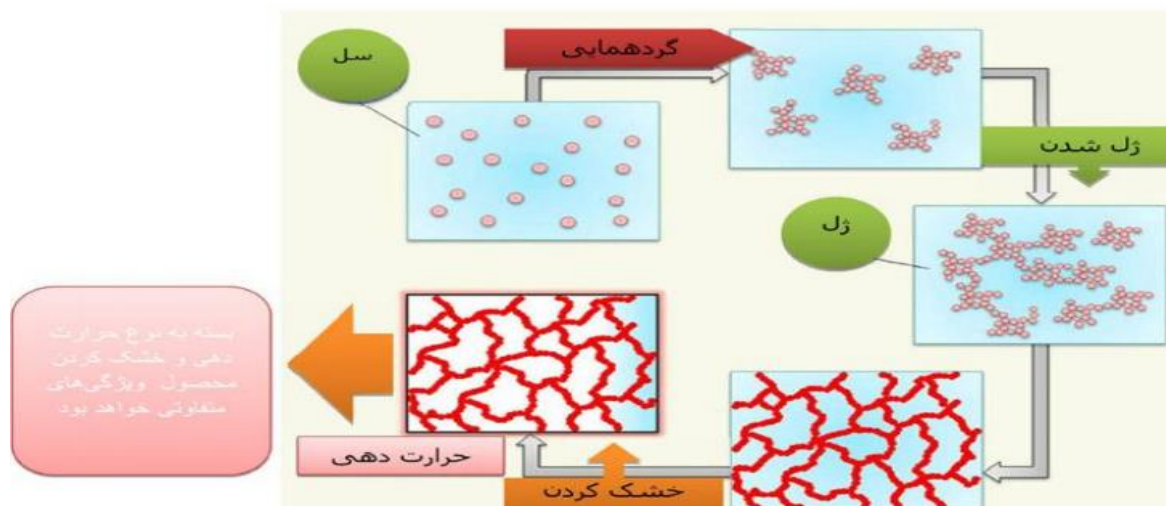
فرآیند های سل-ژل اولین بار در اواخر قرن نوزدهم کشف شد و از اوایل دهه ۴۰ به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفتند. پس از آن برای ساخت ژل ها در دماهای پایین و تبدیل آنها به شیشه فرآیندهایی توسعه یافتند و فرآیندهای سل-ژل روالی همه کاره برای ساخت مواد سرامیکی و شیشه ای از محلول ها یا کلئیدها می باشد [۵۵]. فرآیند سل-ژل یک روش شیمیایی تر برای سنتز انواع نانو ساختار ها به ویژه نانوذرات اکسید فلزی می باشد. در این روش پیش ماده مولکولی (معمولاً آلکوکسید فلزی) در آب یا آکل حل شده و با حرارت و همزدن در اثر هیدرولیز/ الکلز به ژل تبدیل می شود. حال باید ژل را خشک کرد که برای محلول الکلی می تواند با سوختن الکلی انجام پذیرد. پس از خشک کردن ژل آنرا پودر می کنند و پودر حاصله را جهت کلسینه شدن^۳ حرارت می دهند [۵۶]. روش سل-ژل روش ارزانی است و به دلیل دمای پایین واکنش می توان کنترل مناسبی بر ترکیب شیمیایی محصولات داشت. سل-ژل می تواند در فرآیند ساخت سرامیک ها به عنوان ماده قالب گیری در قالب استفاده شود و یا به عنوان حد واسطه فیلم های خیلی نازک از اکسیدهای فلزی برای فرآیندهای مختلف استفاده شود. مواد حاصل از روش تهیه سل-ژل می تواند در کاربردهای متفاوت نوری، الکترونیک، انرژی، سطح، سنسورهای زیستی، دارویی و تکنولوژی جداسازی (مثل کروماتوگرافی) به کار برده شود. این روش هم اکنون می تواند نانو ذراتی با کیفیت بالا (ذرات با اندازه یکسان) را در حجمی بالا تولید کند. این روش قادر است همزمان دو یا چند نوع نانو ذره را با هم تولید کند. از دیگر دلایل محبوبیت

^۱ . Salt-melt method

^۲ . Sol-gel method

^۳ . Calcination

این روش، سنتز در دمای پائین، ابزار انجام آن ساده است، تهیه محصولاتی با خلوص بالا، راندمان تولید بسیار بالا، تولید قطعات اپتیکی با اشکال پیچیده و.... می باشد [۵۶]. طرح واره ای از مراحل سل ژل در شکل ۱-۶۵ نشان داده شده است.



شکل ۱-۶۵- طرح واره ای از مراحل سل-ژل [۵۶].

در این روش با ساخت یک محلول سل خوب (شفاف و پایدار) و تبدیل آن به ژل طی فرآیند هیدرولیز و در پی آن تراکم به محصول ژل خیس رسیده و با یکی از روش هایی که برای خشک کردن ژل خیس وجود دارد، ژل را خشک کرده و به محصول نهایی که یک ساختار جامد متخلخل است می رسیم. نحوه خشک کردن بستگی مستقیم به نوع محصول و ویژگی های آن دارد [۴۹ و ۵۰]. مراحل مختلف این واکنش در شکل ۱-۶۶ نشان داده شده است.



شکل ۱-۶۶- مراحل مختلف واکنش سل ژل [۵۶].

۱-۸-۳- روش رسوب دهی از فاز جامد

۱-۸-۳-۱- روش متداول سرامیکی^۱

در این روش ابتدا مواد با نسبت های وزنی مناسب در یک دستگاه مخلوط کن و در یک بازه زمانی مشخص مخلوط می شوند تا مواد اولیه به طور کاملاً همگن با یکدیگر مخلوط شوند، سپس مواد اولیه مخلوط شده در دمای نسبتاً پایینی پخت داده می شوند که باعث ساده شدن عملیات آسیاب کاری^۲ بعدی می شود [۴۷]. بعد از پخت، محصول

^۱ . Conventional method

^۲ . Ball mill

کلوخه ای خواهد بود (اندازه ذرات در حدود میلیمتر است)، برای کاهش اندازه ذرات در حد نانومتر، بسته به سختی ذرات آن ها را باید مجدداً با آسیاب های گلوله ای و یا سایشی و یا آسیاب های پرانرژی (آسیاب سیاره ای^۱ و یا اسپکس^۲)، آسیاب کرد. برای شکل دهی پودرها، آن ها را در قالب های مناسب ریخته و پرس می کنند. برای افزایش استحکام پودرهای پرس شده، معمولاً از چسب های مواد آلی استفاده می شود و همچنین برای کاهش اصطکاک ذرات پودر با یکدیگر و بدنه قالب، از مواد روان ساز (همانند استئارت) می توان استفاده کرد. سرانجام قطعه حاصل از فشرده سازی، بسته به نوع ترکیب مواد اولیه در یک بازه زمانی مناسب تفجوشی^۳ می شود و قطعه شکل نهایی خود را به دست می آورد [۴۷]. برای دستیابی به یک نمونه با ریزساختار مناسب باید فرآیند تفجوشی مانند آهنگ های گرمایش، سرمایش و مدت زمان پخت به طور دقیق کنترل شود [۴۴].

۱-۸-۳-۲-روش مکانوشیمیایی^۴

می دانیم فرآیندهای فیزیکی (فشار، سایش و...) می توانند با ایجاد نواقص بلوری در ساختار کرنش ایجاد کنند. مکانوشیمیایی علمی است که به بررسی برهمکنش هایی که در جامدات در اثر عوامل مکانیکی ایجاد می شوند، می پردازد. در این روش آسیاب های گلوله ای پرانرژی برای تسریع واکنش شیمیایی به کار می روند. برای تهیه نانوپودر به روش مکانوشیمیایی باید از مواد اولیه مناسب استفاده کرد. اغلب اکسیدها، کربنات ها، سولفات ها، کلریدها، هیدروکسیدها و مانند آن ها می توانند به عنوان مواد اولیه در این فرآیند به کار برده شوند. آسیاب کاری با انتقال انرژی جنبشی لازم به پودر، علاوه بر مخلوط کردن مواد اولیه و تغییر اندازه ذرات، باعث انجام واکنش شیمیایی در طول مدت آسیاب کاری می شود؛ بنابراین واکنش های شیمیایی که اغلب به دمای بالا نیاز دارند در محدوده دمای اتاق انجام می گیرند [۴۷]. تفاوت بین آسیاب کاری مکانیکی و آسیاب کاری مکانوشیمیایی آن است که در روش مکانوشیمیایی واکنش شیمیایی یا تبدیلات فازی در طول فعالیت مکانیکی اتفاق می افتد [۴۴]. تغییراتی که در ماده با عملیات مکانیکی و عمدتاً آسیاب کاری انجام می شود، به سه گروه تقسیم می شود:

۱- با حروف مخفف MM^5 نشان داده می شوند و شامل عملیاتی است که هدفشان خرد و ریز کردن یک ماده خالص تا حد مورد نظر به وسیله آسیاب کاری می باشد.

۲- با حروف مخفف MA^6 نشان داده می شوند و به معنی آلیاژسازی مکانیکی است. هدف این عملیات ها مخلوط کردن دو یا چند ماده اولیه (معمولاً دو یا چند فلز یا اکسید فلزی) می باشد.

۳- با حروف مخفف MR^7 نشان داده می شوند و هدف این عملیات ها ایجاد برهمکنش های شیمیایی بین دو یا چند ماده اولیه به وسیله آسیاب کاری می باشد [۴۷].

اثرات فرآیند مکانوشیمیایی تهیه مواد جدید به ویژه در مقیاس نانو، واکنش های اکسایش-کاهش و واکنش های تبادلی، تجزیه و ترکیب، تبدیل فاز در جامدات معدنی و آلی می باشد. این فرآیند عموماً در آسیاب های پرانرژی مانند آسیاب های اسپکس انجام می شود [۴۴].

¹. Planetary mill

². Sepx high energy mill

³. Sintering

⁴. Mechanochemical method

⁵. Mechanical milling

⁶. Mechanical alloying

⁷. Mechanical reaction

۱-۸-۳-آلیاژسازی مکانیکی

در ابتدا این روش فقط برای تولید کامپوزیت ها استفاده می شد، ولی بعدا از این روش در حالت های غیر تعادلی برای تولید مواد آمورف و نیز مواد نانوساختار استفاده گردید. آلیاژسازی مکانیکی فرآیند پودری است که معمولا تحت اثر یک گاز خنثی و در یک آسیاب گلوله ای پر انرژی انجام می گیرد. در این فرآیند در اثر برخوردهای مکرر گلوله-پودر، گلوله-گلوله و دیواره ظرف، ذرات به صورت صفحات پهن درآمده و سردجوشی^۱ بین آن ها رخ می دهد. سپس این جوش ها شکسته شده ولی در ادامه فرآیند مجددا رخ می دهد. در بعضی موارد لازم است فرآیند برای آسیاب شدن کامل مواد اولیه و جلوگیری از چسبیدن پودرها به دیواره، تحت اثر گاز خنثی مثل آرگون انجام شود [۴۷]. روش آلیاژسازی مکانیکی روش ساده ای است که به طور گسترده برای تولید آلیاژهای نانوساختار، ساختارهای آمورف و نانو کامپوزیت ها مورد استفاده قرار می گیرد [۵۷]. شماتیکی از گستردگی مواد پیشرفته تهیه شده به روش آلیاژسازی مکانیکی در شکل ۶۷-۱ نشان داده شده است.



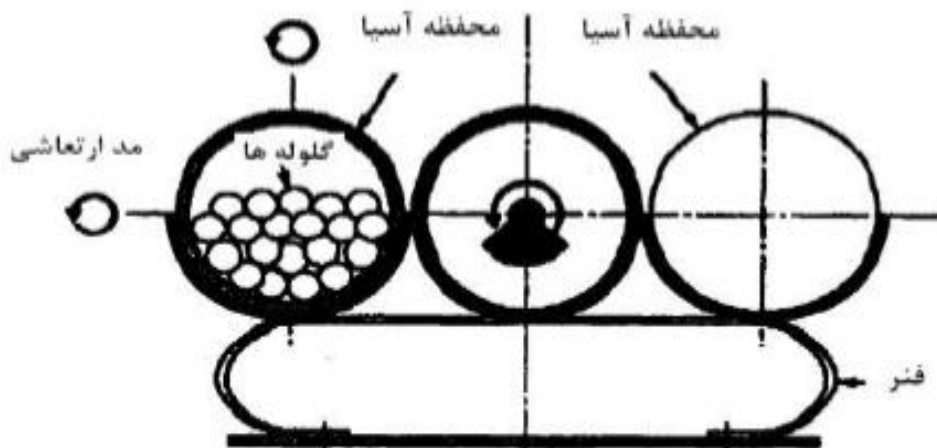
شکل ۶۷-۱- شماتیکی از گستردگی مواد پیشرفته تهیه شده به روش آلیاژسازی مکانیکی [۵۷].

عواملی همچون نوع آسیاب، مخزن آسیاب، میزان انرژی، آهنگ ارتعاش، زمان آسیاب کاری، جنس و اندازه گلوله، تعداد گلوله، نسبت وزنی گلوله به پودر، اتمسفر آسیاب و... در این روش بسیار مؤثرند [۴۴]. آسیاب کاری دارای روش های متفاوتی از جمله آسیاب گلوله ای-ارتعاشی^۲، آسیاب افقی غلتان^۳، آسیاب سیاره ای و... می باشد. نحوه کار آسیاب گلوله ای-ارتعاشی و اجزای آن در شکل ۶۸-۱ نشان داده شده است.

¹ . Cold welding

² . Vibratory Ball Mill

³ . Tumbler Horizontal Mill



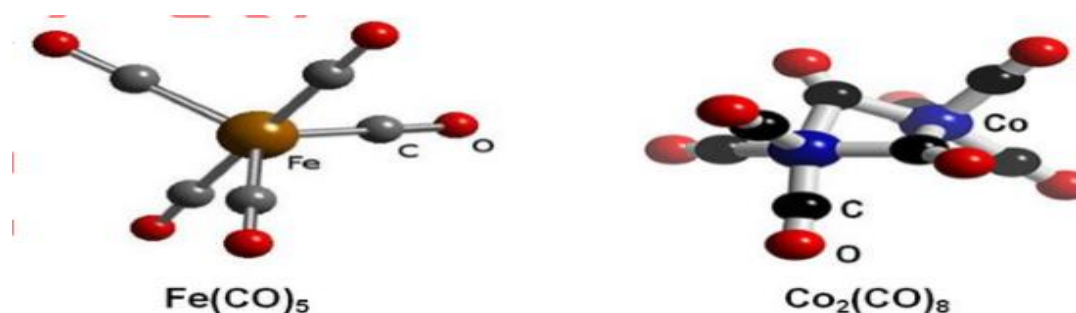
شکل ۱-۶۸- نحوه کار آسیاب گلوله ای- ارتعاشی و اجزای آن [۴۴].

۱-۸-۴- تولید نانوذرات با فرآیندهای تخریب حرارتی^۱

سنتز با روش تخریب حرارتی برپایه واکنش های گرماکافت اتفاق می افتد. هرگاه محصول واکنش گرماکافت در محیط واکنش به صورت رسوب باشد، کل فرآیند یک واکنش هم رسوبی به حساب آمده و می تواند جهت سنتز نانوذرات (البته در حضور عوامل پایدار کننده) مورد استفاده قرار گیرد. در این مورد از ترکیبات پیش ماده فلز-آلی با پایداری حرارتی پایین و یک حلال با پایداری حرارتی بالا استفاده می شود. با انتخاب نوع پیش ماده (از نظر عدد اکسایش فلز مرکزی و نوع لیگاند متصل به فلز مرکزی)، نوع حلال، ترکیبات افزودنی و اتمسفر مورد استفاده بر راکتور سنتز، می توان به نانوذرات فلزی خالص و یا اکسیدهای فلزی دست یافت. در صورتی که روند تخریب های حرارتی در دمای بالا صورت بگیرد، معمولاً بخشی از محصول به فرم اکسیدی بدست می آید. هرچند این رویکرد می تواند برای تهیه نانوذرات خالص (اکسید نشده) یک عیب به حساب آید، در مقابل می تواند مسیری برای تهیه بسیاری از اکسیدهای فلزی باشد. فرآیند اکسیداسیون می تواند در حضور عوامل اکسندة مختلف از جمله هوا و یا اکسندة های شیمیایی صورت بگیرد. یکی از عوامل مهم در تعیین ساختار شیمیایی محصول نهایی، انتخاب پیش ماده فلز-آلی اولیه است. استفاده از پیش ماده هایی با عدد اکسایش صفر (یا پایین) برای عنصر مرکزی، منجر به سنتز ذرات غیر اکسیدی می شود (برای مثال کمپلکس های کربونیل آهن). برهمن اساس، انتخاب پیش ماده هایی که در آن ها فلز عدد اکسایش بالا دارد (فلز مرکزی یک کاتیون باشد مثل کمپلکس های آهن (III) می تواند منجر به سنتز محصولات اکسید فلز شود. از جمله کمپلکس های مورد استفاده برای سنتز مستقیم نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن، ساختارهای فلزآلی حاوی لیگاند استیل استونات^۲ می باشد. در این ساختار، عدد اکسایش آهن III است. همچنین می توان برای سنتز مستقیم اکسیدهای مغناطیسی آهن از تخریب حرارتی کمپلکس هایی از آهن با اولئیک اسید، اولیل آمین، اسیدهای چرب و فنول اثر در محلول های غیرآبی استفاده کرد. به طور کلی نسبت اولیه واکنش گرما (پیش ماده آلی-فلزی، سورفکتانت و حلال) نقش اساسی در کنترل اندازه و ریخت شناسی محصول نهایی دارد. ساختارهای کمپلکسی کربونیل آهن و کربونیل کبالت به عنوان پیش ماده های سنتز تخریب حرارتی در شکل ۵۹ نشان داده شده است.

^۱ Thermal Decomposition

^۲ Acetylacetonate-acac

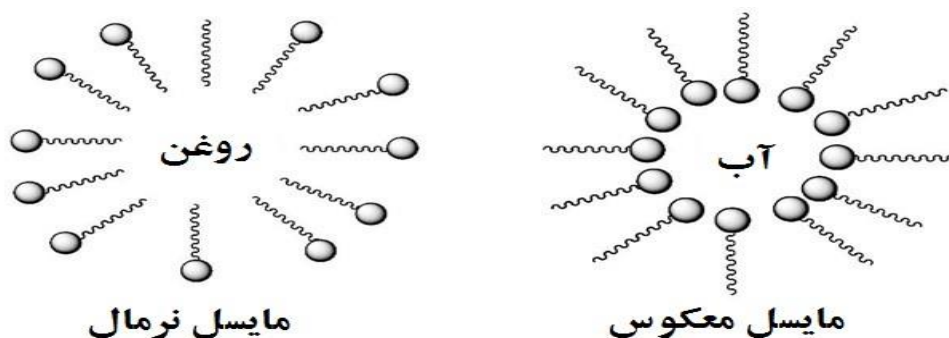


شکل ۱-۶۹- ساختارهای کمپلکسی کربونیل آهن و کربونیل کبالت به عنوان پیش ماده های سنتز تخریب حرارتی [۵۸].

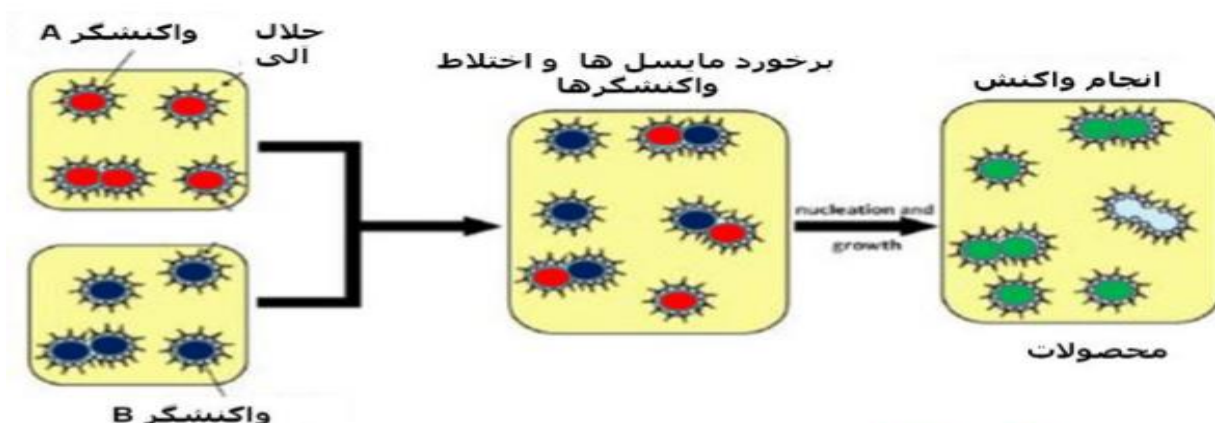
۱-۸-۵- تولید نانو ذرات در نانورآکتورهای مایسل

استفاده از میکروامولسیون ها و خصوصا مایسل معکوس یکی از راه های سنتز کنترل شده نانوذرات است. بسیاری از نانوذرات در نانورآکتورهای مایسلی و تحت واکنش هایی نظیر فرآیندهای رسوبی، کاهش و هیدرولیز سنتز می شوند. سنتز در میکروامولسیون ها می تواند منجر به ایجاد ذرات تک پخش با پخش اندازه محدود شود. میکروامولسیون ها از لحاظ ترمودینامیکی پایدارند و به همین دلیل نیز می توانند به عنوان نانورآکتور مورد استفاده قرار گیرند. همچنین نانوذرات می توانند در محیط نانورآکتورهای مایسلی سنتز شوند. شکل و پخش اندازه ذرات سنتز شده در این نانورآکتورها، به شکل، اندازه و برهم کنش های میان مایسل های مورد استفاده بستگی دارد. از آنجا که معمولا پیش ماده های اولیه (به خصوص در تشکیل نانوذرات معدنی محلول در آب هستند، از مایسل معکوس جهت سنتز به عنوان نانورآکتور استفاده می شود [۵۹].

به طور عمومی سنتز نانوذرات در ساختارهای مایسلی به دو روش صورت می پذیرد. روش اول شامل مخلوط کردن دو محصول با ساختار مایسل معکوس اما حاوی واکنش گرهای مختلف است. واکنش با برخورد نانورآکتورها به یکدیگر، تلفیق آن ها و تبادل مواد بین دو مایسل صورت می پذیرد. در روش دوم، تنها از یک محلول مایسل معکوس استفاده می شود. در این حالت واکنش بین واکنش گر حل شده در مایسل و واکنشگر حل شده در حلال آلی اتفاق می افتد [۵۹].



شکل ۱-۷۰- شماتیکی از مایسل نرمال و معکوس [۵۹].



شکل ۱-۷۱- شماتیکی از روند سنتز نانوذرات با استفاده از روش میکروامولسیون [۵۹].

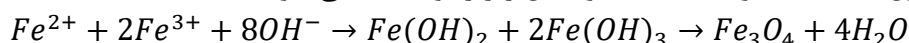
۱-۸-۶- سنتز و پایداری نانوذرات مغناطیسی

در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی برای تهیه و سنتز نانوذرات مغناطیسی جهت کاربرد آن‌ها در زمینه‌های متنوعی مانند بیوتکنولوژی، دارورسانی، کامپیوتر و ... انجام شده است. به طور کلی عملکرد و کاربرد این نانوذرات تحت تاثیر طراحی و سنتز مناسب آن‌ها است. تاکنون نانوذرات مغناطیسی مختلفی سنتز شده اند از جمله نانوذرات فلزی خالص (Fe, Co, Ni)، اکسیدهای فلزی ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4)، فریت‌ها (MFe_2O_4 , M = Cu, Ni, Mn, Mg, etc.) و آلیاژهای فلزی (FePt, CoPt) اشاره کرد.

در هنگام سنتز این نانوذرات بایستی برخی شرایط کلیدی مانند خواص مغناطیسی ذاتی، اندازه و شکل نانوذرات، پوشش سطحی و بار سطحی نانوذرات، پایداری در محیط آبی و همچنین غیرسمی بودن آن‌ها مورد توجه قرار گیرند. با انتخاب یک روش سنتز مناسب می‌توان اندازه، شکل، پوشش سطحی و پایداری کلوییدی نانوذرات مغناطیسی را به صورت مطلوب کنترل کرد. در انتخاب ماده مغناطیسی، اکسیدهای آهن معمولاً حرف اول را می‌زنند. از یک سو این اکسیدها نسبت به دیگر نانوذرات مغناطیسی خواص مغناطیسی خوبی دارند و از سوی دیگر پایداری بالایی در برابر تخریب از خود نشان می‌دهند. همچنین این نانوذرات سمیت پایین‌تری را نیز دارند. تا به امروز روش‌های گوناگونی جهت سنتز نانوذرات مغناطیسی ارائه و بهبود داده شده‌اند.

۱-۸-۷- روش هم‌رسوبی

ساده‌ترین و کارآمدترین روش شیمیایی برای سنتز نانوذرات مغناطیسی (اکسیدهای فلزی و فریت‌ها) است. مزیت اصلی هم‌رسوبی، توانایی آن در سنتز تعداد زیادی از نانوذرات است. هرچند، کنترل توزیع اندازه ذرات در این روش محدود است و فاکتورهای سینتیکی رشد ذرات را کنترل می‌کنند. به عنوان مثال برای تولید نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن به این روش، یون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} تحت واکنش زیر رسوب داده می‌شوند [۶۰]:



۱-۸-۸- میکروامولسیون

میکروامولسیون مجموعه‌ای غیرقابل اختلاط از حلال آبی، حلال آلی است که به وسیله سورفاکتانت پایداری می‌شوند. در این حالت قطراتی از حلال آبی که توسط لایه‌ای از سورفاکتانت پوشیده شده‌اند در بین حلال آلی به وجود می‌آید و به مجموعه آن‌ها مایسل گفته می‌شود. اگر قسمت آبگریز مولکول (به اصطلاح قسمت هیدروکربنی) سورفاکتانت به

¹. Surfactant

². Micelle

سمت بیرون و حلال آلی باشد به آن‌ها مایسل معکوس^۱ می‌گویند. اندازه مایسل بدست آمده با نسبت مولی آب به سورفاکتانت تعیین می‌شود. از میکروامولسیون آب در روغن به طور وسیعی برای سنتز یکنواخت نانوذرات استفاده می‌شود. با مخلوط کردن آب، روغن و مواد واکنش‌دهنده، به صورت مداوم قطراتی تشکیل شده، با هم برخورد کرده، ادغام می‌شوند و مجدداً شکسته می‌شوند که در نهایت منجر به تشکیل رسوب خواهد شد. با افزودن حلال‌هایی مانند استون و یا اتانول، می‌توان رسوب‌ها را لخته نمود و سپس با فیلتر کردن و یا سانتریفوژ، آن‌ها را از میکروامولسیون جدا نمود. از جمله معایبی که کارآمدی این فرآیند را کم می‌کند، استفاده زیاد از حلال می‌باشد.

روش میکروامولسیون روشی مناسب جهت تهیه و پایدارسازی نانوذرات بوده و جهت تولید موادی با توزیع باریکی از اندازه ذرات در ابعاد نانو و خلوص بالا بوده و دارای قابلیت کنترل دقیق بر مورفولوژی می‌باشد [۶۰].

۱-۸-۹- سنتز با استفاده از امواج فراصوت

سنتز نانومواد با استفاده از روش‌های سونوشیمیایی می‌باشد. مبنای استفاده از این روش، بر پایه فرآیندی به نام حفره زای^۲ استوار است که بر اثر تشکیل، رشد و انفجار حباب‌ها در داخل مایع صورت می‌پذیرد. در اثر انفجار درونی این حباب‌ها، گرمای موضعی زیادی به وجود می‌آید که می‌توان از آن جهت انجام واکنش‌های مختلف بهره برد. در اثر اعمال امواج فراصوت به سطح فلزی، فرآیند حفره زایی درون قطره آب صورت گرفته و به صورت غیر کروی پیشرفت می‌کند که باعث تولید میکروجت می‌شود و به سطح فلز صدمه می‌زند. نحوه تشکیل میکروجت در نزدیکی سطوح فلزی در شکل ۱-۷۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۷۲- نحوه تشکیل میکروجت در نزدیکی سطوح فلزی.

۱-۸-۱۰- روش‌های محافظت از نانوذرات مغناطیسی

هر چند تا به حال، روش‌های متعددی در جهت پیشرفت و بهبود روش‌های سنتز نانوذرات مغناطیسی ارائه شده است، پایدار ماندن این نانوذرات برای مدت طولانی در برابر انباشته شدن و رسوب دادن آن‌ها موضوعی مهم و قابل توجه است. چرا که پایداری این نانوذرات امری مهم در به کارگیری آن‌ها است. نانوذرات مغناطیسی به دلیل سطح ویژه بزرگی که دارند در برابر اکسیداسیون و انباشتگی بسیار حساس و همچنین از لحاظ شیمیایی بسیار واکنش پذیر هستند. در دما و فشار معمولی، سطح نانوذرات به سرعت اکسید شده و در نتیجه لایه‌ای نازک از اکسید بر روی آن تشکیل می‌شود که به شدت خواص آن‌ها را تغییر می‌دهد. انباشتگی طبیعی نانوذرات مشکل دیگری است که کاربرد گسترده نانوذرات مغناطیسی را با محدودیت مواجه می‌کند. از طریق تعادل بین نیروهای دافعه و جاذبه بین نانوذرات،

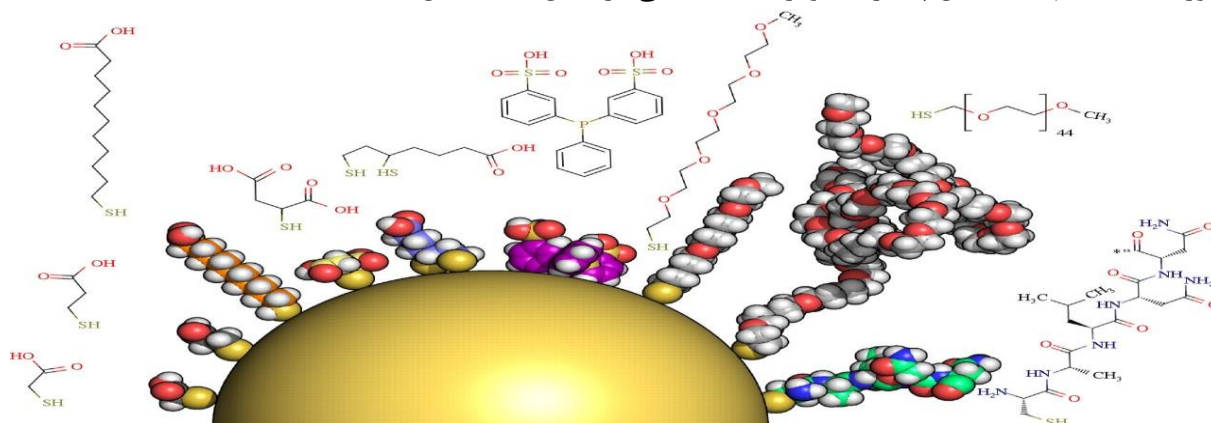
^۱ . Reverse Micelle

^۲ . Cavitation

ویا قرار دادن پوشاننده‌های آلی هیا معدنی بر روی سطح نانوذرات مغناطیس می توان نانوذرات مغناطیسی را پایدار کرد.

۱-۸-۱۱- پایداری به کمک پوشش‌های آلی^۱

تا به امروز اغلب مطالعات بر روی توسعه پوشش با سورفاکتانت‌ها متمرکز شده بود، اما امروزه بیشتر توجهات بدلیل ایجاد دافعه بیشتر به سمت پوشش دهی با پلیمرها معطوف شده است. روش‌های متعددی برای پایداری نانوذرات مغناطیسی با استفاده از سورفاکتانت‌ها و پلیمرها چه در حین سنتز و چه بعد از سنتز نانوذرات ارائه شده است. با ایجاد یک یا دو لایه بر روی آن سبب ایجاد دافعه و پراکنده ماندن نانوذرات مغناطیسی می‌شوند. جهت جلوگیری از اکسید شدن نانوذرات مغناطیسی، بایستی پوشش‌دهی به صورت متراکم باشد، زیرا یک یا دو لایه نازک در محیط اسیدی به راحتی از سطح نانوذرات جدا می‌شوند و سبب از دست رفتن خاصیت مغناطیسی می‌گردد. برخی از پوشش‌های آلی مورد استفاده جهت تضمین پایداری نانوذرات مغناطیسی در شکل ۱-۷۳ نشان داده شده است.



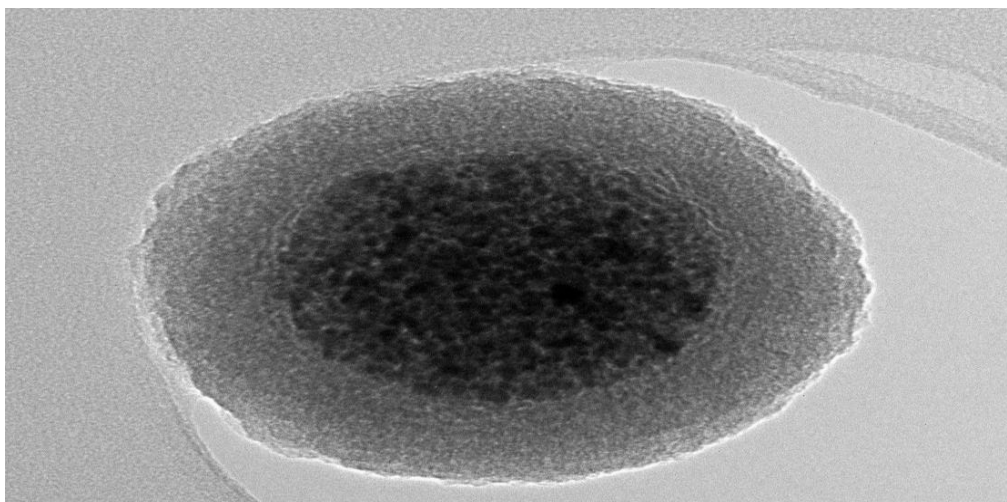
شکل ۱-۷۳- برخی از پوشش‌های آلی مورد استفاده جهت تضمین پایداری نانوذرات مغناطیسی [۵۸].

۱-۸-۱۲- پوشش‌های معدنی^۲

سطح نانوذرات مغناطیسی را می‌توان با پوشش‌های معدنی همچون اکسیدهای فلزی، سیلیکا، فلزات گرانبها و کربن پوشاند. یک راه بسیار ساده برای محافظت نانوذرات مغناطیسی، استفاده از اکسیدهای فلزی متفاوت از هسته اصلی به عنوان پوشش آن‌ها است. همچنین فلزات گرانبها مانند طلا، به دلیل واکنشپذیری کم و توانایی ایجاد پل با دیگر گروه‌های عاملی، را نیز می‌توان برای محافظت از هسته‌های مغناطیسی مورد استفاده قرار داد. در این حوزه استفاده از پوشش‌هایی با جنس سیلیکا و کربن نیز به دلیل مسائلی همچون ارزان قیمت بودن، سمیت کم، خصلت زیست سازگاری مناسب و... توجه بسیاری را به خود منعطف نموده‌اند. به طور نمونه تصویر TEM از نانوذرات مغناطیسی پوشیده شده با سیلیکا در شکل ۱-۷۴ نشان داده شده است.

^۱ . Organic Coating

^۲ . Inorganic Coatings



شکل ۱-۷۴- تصویر TEM از نانوذرات مغناطیسی پوشیده شده با سیلیکا [۵۸].

۱-۸-۱۳- عامل دار کردن نانوذرات مغناطیسی^۱

برهمکنش‌های بین نانوذرات و محیط اطراف آن‌ها به شدت تحت تأثیر سطح و گروه‌های سطحی نانوذرات است. توسعه روش‌های اصلاح سطح نانوذرات مغناطیسی جهت عامل‌دار کردن شیمیایی آن‌ها و کنترل حلالیتشان مهم است و به شدت متاثر از نوع کاربرد مورد نظر است. به طور مثال برای کاربردهای بیولوژیکی اغلب سطح نانوذرات مغناطیسی با مولکول‌های زیستی مانند پروتئین‌ها اصلاح می‌شوند. اکثر کاربردهای نانوذرات مغناطیسی نیازمند پایداری شیمیایی، یکنواختی در اندازه و پراکندگی مناسب آن‌ها در محیط مایع است. لذا سطح نانوذرات باید با گروه‌های مناسب اصلاح شوند. جذب شیمیایی الکترواستاتیکی یا افزودن لیگاند (مولکولی است که قادر است به یک فلز یا چند فلز خاص متصل شده و تشکیل یک کمپلکس دهد) و اتصال کووالانسی (تعویض لیگاند) از جمله روش‌هایی هستند که برای تغییر و اصلاح سطح نانوذرات استفاده می‌شوند [۶۱].

جمع بندی

با توجه به اینکه این فاز از پروژه به صورت مطالعاتی بوده، بررسی‌های لازم در خصوص انواع ترانسفورماتورها، هسته‌های قابل کاربرد در ترانسفورماتورها، مواد مورد استفاده در هسته‌های فریتی، ساختار فریت‌ها و روش‌های سنتز انجام گرفت. در خصوص نتایج حاصل از مطالعات انجام شده مقرر گردید امکان سنجی و طراحی ساخت هسته فریتی در فاز دوم پروژه انجام شود که با توجه به نتایج بررسی شده در فاز ۲ روش سنتز مناسب و نوع ماده فریتی مورد نظر تشخیص داده خواهد شد.

^۱ . Functionalization of Magnetic Nanoparticles

منابع

- [1]. GE Digital energy- ITI, instrument transformer basic technical information and application, Florida, 1970.
- [2]. J King Delson, Networks involving ideal transformers, California institute of technology, 1953.
- [۳]. علی عراقی، ماشین‌های الکتریکی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، تهران، ۱۳۹۴.
- [۴]. ترانسفورماتورهای قدرت، سازمان ملی استاندارد ایران، قسمت ۱ کلیات، چاپ اول، تهران، ۱۳۶۶.
- [۵]. یوسف بابایی، ترانسفورماتور و انواع آن، گروه برق قدرت، مونتاز شبکه- شبکه هوایی، ۱۳۹۱.
- [6]. IMA-STD-100, Soft Ferrite Cores, The International Magnetics Association, Cleveland, OH 44115 U.S.A., 2011.
- [۷]. ایران ترانسفو، ترانسفورماتورهای توزیع روغنی، ۱۳۹۴.
- [۸]. بررسی ساختمان تپ چنجر ترانسفورماتور و پایداری ولتاژ توسط آن، ۱۳۹۶.
- [۹]. مسعود یوسفی، بررسی عملیات حرارتی فولاد مغناطیسی آمورف جهت دستیابی به ساختار نانو، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۳.
- [۱۰]. هوشنگ علی‌وردیلو، الهام امین نیا و غلام رضا باکری، "بررسی مواد آمورف مورد استفاده در هسته ترانسفورماتورهای توزیع"، موسسه تحقیقات ترانسفورماتور ایران، ۱۳۸۵.
- [۱۱]. سیما میرزایی، علی جزایری قره باغ و علیرضا عبدالهی، ایجاد نانو پوشش عایق روی فویل‌های نانوکریستالین پایه آهن FINEMET، نانومواد، ۱۳۹۴-۱۰۰-۱۹۱.
- [۱۲]. سیما میرزایی، "تولید آزمایشگاهی هسته‌های نانوکریستالین ترانسفورماتور"، طرح پژوهشی، پژوهشکده توسعه تکنولوژی، سازمان جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، تیر ۱۳۹۴.
- [13]. R. Hasegawa, C.E. Kroger, "Magnetic Implement Using Magnetic Metal Ribbon Coated with Insulator", US Patent 2005/0221126 A1, Oct. 6, 2005.
- [14]. M.E. McHenry, M.A. Willard, D.E. Laughlin, Progress in Materials Science, 44, 1999, 291
- [15]. nanocrystalline VITROPERM 500F Toroidal Cores for Common Mode Chokes and EMC applications.
- [۱۶]. افسون پرهیزکار، تدوین سند راهبردی طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی ترانسفورماتورهای با تلفات پایین، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۹۴.
- [17]. Katsutoshi Ingaki, Masanao Kuwabara, Kohei Sato, Kazuyuki Fukui, Shin Nakajima, Daichi Azuma, "Amorphous transformer contribution to global environmental protection", Hitachi Review, Vol. 60, No. 5, pp. 250-256, 2011.
- [18]. Mohamed Mostafa Saied, "Feasibility of using magnetic amorphous metals as core materials in power transformers", Electric Machines and Power Systems, Vol. 12, Issue 4-5, pp. 325-341.
- [19]. A.P. Malozemoff et al, "Progress in HTS coated conductors and their applications", American Superconductor Corp, March 2007.
- [20]. <http://power-factor.blogfa.com>
- [21]. IEEE Std C57.110-1998, "IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Non sinusoidal Load Currents", IEEE Publication, Piscataway, NJ, USA, 1998.

- [22]. V. Molcette, J. L. Kotny, J. P. Swan and J. F. Brudny, "Reduction of inrush current in single phase transformer using virtual air gap technique," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 34, no. 4, pp. 1192-1194, Jul 1998.
- [23]. H. Patel and V. Agarwal, "A Single-Stage Single-Phase Transformer-Less Doubly Grounded Grid-Connected PV Interface," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no. 1, pp. 93-101, 2009.
- [24]. A.H. Al-Badi, A. Elmoudi, I. Metwally, A. Al-wahabi, A;-Ajmi, M. AlBulushi, "Lossess reduction in distribution transformers", procedding of the international multiconference of engineering and computer scientists , March 16-18, Hong kong, IMEC 2011.
- [25]. R. W. A. A. De Doncker, D. M. Divan and M. H. Kheraluwala, "A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 1, pp. 63-73, Jan/Feb 1991.
- [۲۶]. شرکت ایران ترانسفو، ترانسفورماتورهای تکفاز و سه فاز .
- [27]. <http://itr.ir/content/special> [27] ۹۹
- [۲۸]. سید محمد طالقانی، ترانسفورماتور، انتشارات فرهنگ، سال ۱۳۶۲.
- [29]. J. Turowski, M. Turowski and M. Kopec, "Method of three-dimensional network solution of leakage field of three-phase transformers," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, no. 5, 2911-2919, 1990.
- [30]. Schneider Electric, Power and distribution transformer, Australian catalogue, 2014.
- [۳۱]. وحید ماسوری، آشنایی با ترانسفورماتور اندازه گیری ولتاژ ، ۱۳۹۵.
- [۳۲]. امین لاتویی، بررسی بازار ترانسفورماتورهای توزیع در کشور و استراتژی قابل استفاده برای ورود به این بازار.
- [33]. Magnetics, Ferrite cores –Catalog, 2013.
- [34]. "Magnetic Properties of Ferromagnetic Materials", "Iron"". C.R Nave Georgia State University, Retrieved 2013.
- [35]. "Relative Permeability", "Hyperphysics"". Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu, Retrieved 2011.
- [36]. Richard A. Clarke. "Clarke, R. "Magnetic properties of materials", surrey.ac.uk". Ee.surrey.ac.uk.16 Retrieved 2011.
- [37]. TDK, Large size ferrite cores for high power, 2013.
- [۳۸]. محصولات فناوری نانو در صنعت برق، معاونت علمی فناوری ریاست جمهوری و ستاد ویژه توسعه فناوری نانو، ویرایش اول، ۱۳۹۴.
- [۳۹]. فاطمه موید، فائقه اسلامی پور، محمدمبین مرادی، دنیای نو ، باشگاه دانش آموزی نانو با همکاری انتشارات آتنا، ۱۳۸۸.
- [40]. Awschalom, D.D., Buhrman, R.A., Daughton, J.M., von Molnár, S., Roukes, M.L. "Spin Electronics, Chapter 3: Fabrication and Characterization of Magnetic Nanostructures", Springer, 2004.
- [۴۱]. قیصری، خلیل اله، جواد پور، سیروس، بررسی ویژگی های ساختاری و مغناطیسی فریت نانو ساختار نیکل - روی تولیدی به روش سنتز احتراقی گلیسین- نیترات، مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران، ۱۳۸۹.

- [42]. ابراهیم عنبری، سهراب منوچهری، محمد حسن یوسفی، تهیه نانوذرات فریت نیکل - روی به روش هم رسوبی و بررسی خصوصیات جذب میکروویوی، سومین همایش سراسری کاربردهای دفاعی علوم نانو، دانشگاه جامع امام حسین، ۱۳۹۲.
- [43]. محسنی، حسین؛ زندی خواجه، محمد علی؛ قیصری، خلیل الله، تخمین توزیع کاتیونی و پارامترهای ساختاری پودر نانوبلور فریت منگنز-روی تولیدی به روش ساخت احتراقی به کمک انرژی میکروویو، مقاله نامه ی اولین کارگاه تخصصی نانومغناطیس، 4 و 5 اردیبهشت 1392، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [44]. علی عرب، جمشید عمیقان، مرتضی مظفری، تهیه پودرهای نانومتری اکسیدهای مغناطیسی استرانسیوم- آهن $m(\text{SrO}).n\text{Fe}_2\text{O}_3-z$ به روش مکانوشیمیایی و بررسی تاثیر جانشانی کاتیونهای دیگر به جای آهن و استرانسیوم بر ویژگی های مغناطیسی آن ها، رساله دکتری رشته فیزیک گرایش ماده چگال، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، ۱۳۸۸.
- [45]. محمد رضا مردانه، علی عرب، تهیه نانوذرات استرانسیوم شش گوشه جانشانی شده با کاتیون های La-Ni و بررسی برخی ویژگی های جذب میکروویو آن، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد رشته نانوفیزیک، دانشکده فیزیک کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۲.
- [46]. B. D. Cullity, C. D. Graham, Introduction to magnetic material, John Wiley and Sons, New Jersey, 2009.
- [47]. محمد باقری، علی عرب، تهیه نانوذرات گارنت ایتربوم آهن با جانشانی های کاتیونی بیسموت و منگنز به روش مکانوشیمیایی و بررسی ویژگی های ساختاری و مغناطیسی آن ها، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد رشته نانوفیزیک، دانشکده فیزیک کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۵.
- [48]. A. Goldman, Modern ferrite technology, second edit. Pittsburgh: Springer; 2006.
- [49]. زینب ترابی، علی عرب، تهیه نانوذرات فریت باریوم شش گوشه جانشانی شده با کاتیون های Mn-Co-Gd و بررسی ویژگی های ساختاری، مغناطیسی و جذب میکروویو، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد رشته نانوفیزیک، دانشکده فیزیک کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۵.
- [50]. Magnetic materials producers association, A user's guide, Soft ferrites, MMPA SFG-98, 1998.
- [51]. Ferrites and Accessories, Epcos data book, 2013.
- [52]. حسین اثنا عشری ایوری و هادی عربی، سنتز نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن به روش هم رسوبی و بررسی تاثیر نسبت غلظت مواد واکنش دهنده بر اندازه و خواص مغناطیسی ذرات، علم و مهندسی سرامیک، جلد ۲، شماره ۱، ۷۷-۸۴، ۱۳۹۲.
- [53]. Kandasamy Velmurugan, Vellaiyappan Sangli Karuppanan Venkatachalapathy, Sechassalom Sendhilnathanc, Synthesis of Nickel Zinc Iron Nanoparticles by Coprecipitation Technique, Materials Research; 13(3): 299-303, 2010.
- [54]. I.H. Gul, W. Ahmed, A. Maqsood, Electrical and magnetic characterization of nanocrystalline Ni-Zn ferrite synthesis by co-precipitation route, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320 ,270-275, 2008.
- [55]. Robert C. Pullar, Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics, Progress in Materials Science 57 ,1191-1334, 2012.
- [56]. Dong-Hwang Chen, Xin-Rong He, Synthesis of nickel ferrite nanoparticles by sol-gel method, Materials Research Bulletin 36 ,1369-1377, 2001.

[۵۷]. مصطفی فتحی، بهزاد چیت سازان، خلیل الله قیصری، بررسی ساختار و خواص مغناطیسی فریت نانو ساختار $Mg_{0.7}Zn_{0.3}Fe_2O_4$ تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی، ششمین همایش مشترک مهندسیین متالورژی و انجمن علمی ریخته گری ایران.

[58]. <http://edu.nano.ir/>

[59]. Cui, H., Feng, Y., Ren, W. Zeng, T., Lv, H., Pan, Y., Strategies of Large Scale Synthesis of Monodisperse Nanoparticles, Recent Patents on Nanotechnology, Vol. 3, pp.32-41, 2002.

[۶۰]. حمید ابراهیم نیا، اسکندر کشاورز علمداری، محمود کاظم زاده، یدالله گنج خانلو، سنتز نانوذرات اسپینل فریت کبالت به روش میکروامولسیون، مجله تحقیقات مواد نانو کامپوزیتی: ۴:۱، ۲۶۱-۲۶۶، ۱۳۸۸.

[۶۱]. فصلنامه انجمن نانو فناوری ایران، دنیای نانو، شماره بیست و نهم، سال هشتم، زمستان ۱۳۹۱.

سایر منابع :

[27] S. Manouchehri, S.T. Mohammadi Benehi and M.H. Yousefi, Effect of Aluminum Doping on the Structural and Magnetic Properties of Mg-Mn Ferrite Nanoparticles Prepared by Coprecipitation Method, Springer Science Business, 2016.

[28] V. Jagdeesha Angadi, L. Choudhury, K. Sadhana, H-L Liu, R. Sandhyae, S. Matteppanavar, B. Rudraswamy, V. Pattar, R.V. Anavekar and K. Praveena, Structural, electrical and magnetic properties of Sc^{3+} doped Mn-Zn ferrite nanoparticles, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 424 (2017) 1–11.

[29] M. K. Lima-Tenorio, L. A. S. Oliveira, M. R. Guilherme, E. T. Tenório-Neto, M. F. Silva, D. M. Fernandes, A. A. W. Hechenleitner and Edgardo A. G. Pineda, Tuning the magnetic properties of ferrite nanoparticles by Zn and Co doping, Materials Letters (2017).

[30] Ji Bifa, T. Changan, Z. Quanzheng, Ji Dongdong, Y. Jie, XIE Jinsong, SI Jingyu, Magnetic properties of samarium and gadolinium co-doping Mn-Zn ferrites obtained by sol-gel auto-combustion method, journal of Rare Earths, 2016.

[31] P. Thakur, R. Sharma, M. Kumar, S C Katyal, N S Negi, N. Thakur, V. Sharma and P. Sharma, Superparamagnetic La doped Mn-Zn nano ferrites: dependence on dopant content and crystallite size, Mater.Res. Express 3 (2016) 075001.

[32] S. Thota, S. C. Kashyap, Sh. K. Sharma and V.R. Reddy, Cation distribution in Ni-substituted $Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ nanoparticles: A Raman, Mossbauer, X-ray diffraction and electron spectroscopy study, Materials Science and Engineering B (2015).

[33] J. Gao, Z. Yan, J. Liu, M. Zhang and M. Guo, Synthesis, structure and magnetic properties of Zn substituted Ni-Co-Mn-Mg ferrite, Materials Letters 141 (2015) 122–124.

[34] M.M. Eltabey, W.R. Agami and H.T. Mohsen, Improvement of the magnetic properties for Mn-Ni-Zn ferrites by rare earth Nd^{3+} ion Substitution, Journal of Advanced Research (2013).

[35] T. Tangcharoen, A. Ruangphanit and W. Pecharapa, Structural and magnetic properties of nanocrystalline zinc-doped metal ferrites (metal=Ni; Mn; Cu) prepared by sol-gel combustion method, Ceramics International 39 (2013) S239–S243.

[36] I. Sharifi and H. Shokrollahi, Structural, Magnetic and Mossbauer evaluation of Mn substituted Co-Zn ferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 334 (2013) 36–40.

[37] G. Kumar, J. Chand, S. Verma and M. Singh, Mixed Mg-Mn ferrites for high frequency applications processed by citrate precursor technique, J. Phys. 42 (2009) 155001.

[38] L. Nalbandian, A. Delimitis, V.T. Zaspalis, E.A. Deliyanni, D.N. Bakoyannakis and E.N. Peleka, Hydrothermally prepared nanocrystalline Mn-Zn ferrites: Synthesis and characterization, Microporous and Mesoporous Materials 114 (2008) 465–473.

- [39] B. Parvatheeswara Rao, Chong-Oh Kim, C. Kim, I. Dumitru, L. Spinu, and O. F. Caltun, Structural and Magnetic Characterizations of Coprecipitated Ni–Zn and Mn–Zn Ferrite Nanoparticles, *IEEE Transactions on Magnetics* (2006) 2858-2860.
- [40] R. Arulmurugan, B. Jeyadevan, G. Vaidyanathan and S. Sendhilnathan, Effect of zinc substitution on Co–Zn and Mn–Zn ferrite nanoparticles prepared by co-precipitation, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 288 (2005) 470–477
- [41] T. N. Brusentsova, N. A. Brusentsov, V. D. Kuznetsov and V. N. Nikiforov, Synthesis and investigation of magnetic properties of Gd-substituted Mn–Zn ferrite nanoparticles as a potential low-TC agent for magnetic fluid hyperthermia, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 293 (2005) 298–302.
- [42] M. M. Salem, A. T. Morchenko, L. V. Panina, V. G. Kostishyn, V. G. Andreev, S. B. Bibikov and A. N. Nikolaev, Dielectric and Magnetic Properties of Two-Phase Composite System: Mn-Zn or Ni-Zn ferrites in Dielectric Matrices, *Physics Procedia* (2015) 1360–1369.

فصل دوم :

فاز دوم – امکان سنجی و طراحی ساخت هسته فریتی

چکیده

با توجه به اینکه هدف از انجام این مرحله از گزارش (فاز دوم) امکان سنجی و طراحی ساخت هسته فریتی ترانسفورماتور است، با استفاده از مطالعات و بررسی های انجام شده در فاز اول پروژه، (شامل : مطالعات و بررسی هایی در خصوص پیشینه فعالیت های انجام شده برای ساخت هسته ترانسفورماتور مبتنی بر نانوذرات فریتی ، بررسی انواع ترانسفورماتورها و هسته های قابل کاربرد در صنعت برق، بررسی بازه های فرکانسی مورد کاربرد هسته های فریتی، بررسی ساختار فریت ها و اثرات نانوذرات در هسته های فریتی، انواع مواد هسته فریتی و روش های سنتز ذرات قابل کاربرد در هسته فریتی) تلاش بر این شد تا با بررسی و امکان سنجی ساخت هسته فریتی مشخصات فنی نهایی مربوط به هسته فریتی مورد نظر در این گزارش ارائه شود.

بدین منظور بررسی هایی در خصوص مبانی علمی، فنی و کاربردی طرح بر اساس نیاز وزارت نیرو انجام شد که با استفاده از آن اشکال مختلف هسته های فریتی و مواد مورد نظر برای ساخت آن بررسی شد. همچنین در خصوص تهیه نانوپودرهای مربوطه به روش سنتز مورد نظر و تجهیزات و امکانات لازم در این خصوص و قالب پرس مورد نظر جهت ساخت هسته و عملیات لازم برای این امر اشاره گردید. سپس آزمون های لازم برای این امر و تولید ذرات در بازه فرکانسی مورد نظر نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در نهایت، مشخصات فنی هسته فریتی مورد نظر بر اساس بررسی ها و نتایج به دست آمده نیز ارائه شد.

مقدمه

کاربرد و ویژگی های ترانسفورماتورهای مرسوم که با فرکانس شبکه (۵۰ هرتز) کار می کنند، همچون هزینه پایین، قابلیت اطمینان و راندمان بالا در طی سالیان گذشته مورد بررسی و توجه بسیاری از متخصصان و صنعتگران قرار گرفته است. از طرف دیگر، این ترانسفورماتورها معایبی دارند که با پیچیده شدن شبکه های قدرت این معایب بیشتر از قبل احساس می شود. از جمله معایب آن می توان به اندازه بزرگ، وزن بالا، افت ولتاژ، عدم تنظیم کیفیت توان، مشکلات زیست محیطی و نداشتن خروجی برق مستقیم یا ظرفیت ذخیره سازی اشاره کرد. به ویژه وجود هسته های آهنی بزرگ و سیم پیچی مسی سنگین در ترانسفورماتورهای مرسوم سبب شده که این نوع ترانسفورماتور با اختلاف زیاد عنوان سنگین ترین تجهیز موجود در سیستم توزیع برق را به خود اختصاص دهد. نکته قابل توجه این است که ابعاد و وزن هسته بکار رفته در ترانسفورماتورها به صورت قابل ملاحظه ای با افزایش فرکانس کاری، قابل کاهش می باشد. بنابراین یک روش برای کاهش ابعاد و وزن ترانسفورماتور در حالیکه ظرفیت انتقال توان آن ثابت بماند، افزایش فرکانس کاری می باشد. اما با توجه به اینکه فرکانس کاری در سیستم های قدرت ثابت است (۵۰ هرتز در ایران)، بنابراین کاهش وزن و ابعاد ترانسفورماتورهای مرسوم در ساختار موجود امکان پذیر نمی باشد. این مسئله سبب شده است که ترانسفورماتورهای مرسوم که معمولاً اندازه و وزن بالایی دارند با عنوان ترانسفورماتورهای فرکانس پایین شناخته شوند. اگرچه در طول سالیان گذشته اصلاحاتی در جهت بهبود و رفع مشکلات ترانسفورماتورهای معمولی صورت گرفته است اما ظهور و گسترش ریزشبکه های هوشمند قدرت، نیاز به وجود ترانسفورماتورهای هوشمند با اندازه قابل قبول را به وجود آورده است. در این بین ترانسفورماتور الکترونیک قدرت^۱ را می توان به عنوان یک انقلاب در زمینه الکترونیک قدرت به خصوص در ریزشبکه های هوشمند به حساب آورد که جنس هسته آن فریت است. بنابر این با توجه به اینکه هسته های فریتی در این نوع ترانسفورماتورها می توانند قابل کاربرد باشند به منظور بررسی دقیق تر و امکان سنجی ساخت هسته فریتی بررسی هایی به شرح ذیل در این مرحله از پروژه انجام شد که در نهایت مشخصات فنی مربوطه به هسته فریتی مورد نظر ارائه گردید.

۱-۲- شناسایی و بررسی مبانی علمی، فنی و کاربردی طرح بر اساس نیاز وزارت نیرو

۲-۲- امکان سنجی تولید ذرات در بازه فرکانسی تعریف شده

۳-۲- تعیین روش سنتز و نوع ماده بهینه جهت بهره وری توان بالای هسته های فریتی

۴-۲- بررسی و تعیین تجهیزات و امکانات و راهکار چگونگی ساخت هسته ترانسفورماتور متناسب با شرایط کشور

۵-۲- بررسی اثر اشکال مختلف هسته های فریتی در افزایش بهره وری و تعیین شکل مورد نظر

۶-۲- بررسی قالب پرس پودرهای فریتی و جنس های مورد نظر

۷-۲- تهیه مواد و تجهیزات مورد نیاز بر اساس نوع ماده هسته فریت تعیین شده

۸-۲- مشخص نمودن آزمون های لازم برای تهیه پودرهای فریتی

۹-۲- مشخص نمودن آزمون های لازم برای ساخت نمونه هسته فریتی

^۱. PET

۲-۱- شناسایی و بررسی مبانی علمی، فنی و کاربردی طرح بر اساس نیاز وزارت نیرو

فناوری نانو در قرن بیست و یکم موجب دگرگونی در حوزه های مختلف از جمله الکترونیک، مواد، انرژی، محیط زیست و ... شده است. در مقیاس نانو خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی اتم ها و ملکول ها با خواص توده ماده متفاوت است که نانوذرات در چنین مقیاس و مشخصه هایی موجب پیدایش دستاوردهای نوینی شده اند. با استفاده از این فناوری امکان ساخت و تولید نیازهای صنعت برق با خواص بهتر و هزینه کمتر نیز وجود دارد که توجه به کاهش ذخایر نفتی و افزایش نیاز جهانی برای تامین انرژی، به کارگیری فناوری نانو در حوزه برق و انرژی را مورد توجه فراوان قرار داده است، به گونه ای که پیش بینی می شود با بهره گیری از آن، تولید برق به میزان 20 تا 25 درصد تا سال 2020 افزایش یابد [۱]. بهره گیری از خواص ماده در مقیاس نانو، نوید بخش فواید و منافعی است که موجب تحولات اساسی در زندگی می شود. صرفه جویی در مصرف انرژی، صرفه جویی اقتصادی، صرفه جویی در زمان، تامین محصول بیشتر با هزینه کمتر، افزایش کیفیت محصول و در نتیجه افزایش کیفیت و استانداردهای زندگی، کاهش وابستگی های اقتصادی به سایر فناوری های پیشرفته و افزایش درآمدهای ملی از جمله فوایدی است که می توان نام برد. این مزایا شامل دگرگونی در حوزه های مختلف از جمله برق، انرژی، محیط زیست، مواد، حمل نقل، الکترونیک، کامپیوتر، ارتباطات، دفاعی، هوافضا، پزشکی، دارویی و غذایی می باشد. بر این اساس با کنترل اندازه مواد، ارتقاء ویژگی های مواد و عملکرد دستگاه ها امکان ساخت مواد و تجهیزاتی با دقت بالاتر، مستحکم تر، سبک تر و با طول عمر بیشتر وجود خواهد داشت. این مسأله به خصوص در بخش انرژی با توجه به کاهش ذخایر نفتی و افزایش نیاز جهانی برای تامین انرژی و تلاش برای یافتن جایگزینی مناسب با کمترین اثرات آلودگی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

موضوع به کارگیری نانوفناوری در صنعت برق به عنوان مادر صنایع، مورد توجه بسیاری از کشورها واقع شده و سرمایه گذاری های کلانی در این باره صورت گرفته است. چرا که با استفاده از آن بازده مصرف انرژی، تولید و ذخیره سازی آن به میزان چشمگیری بهبود می یابد. فناوری نانو کمک می کند تا انرژی های مختلف با بازدهی بیشتری برق تامین کنند یا روش های دیگری برای تامین انرژی ایجاد شود [۱]. فناوری نانو در انتقال انرژی تا تحویل آن به واحدهای مصرف کننده، باعث کاهش اتلاف انرژی می گردد. فناوری نانو در کاهش میزان مصرف برق و بهینه سازی مصرف سوخت و کاهش آلاینده ها نیز موثر است و روش هایی را پیشنهاد می کند که با تغییری اندک، آسیب های وارد به محیط کاهش می یابد. از جمله موارد کاربرد نانوفناوری در صنعت برق می توان به استفاده از نانوپودرها و بدنه های نانو ساختار در ساخت کلیه تجهیزات مورد استفاده در این صنعت به واسطه ارائه کارایی بهتر و حداقل مصرف انرژی، ساخت فریت های مغناطیسی با حداقل تلفات مورد استفاده در موتورها و ژنراتورهای الکتریکی، سنسورها و کنترلرهای هوشمند با دقت و حساسیت بسیار بالا، سلول های خورشیدی با ارائه بازدهی تبدیل بالا، پیل های سوختی با حداکثر کارایی، پوشش های پره های توربین با مقاومت به خوردگی و سایش بسیار بالا، پوشش های خودتمیز شونده مورد استفاده در مقره های پیرلانی، شیشه های با پوشش نانو ساختار عایق حرارتی، پوشش های نانو ساختار ضد آب، نانولوله های کربنی مورد استفاده در سیستم های ذخیره ساز انرژی با حداکثر توان، عایق های الکتریکی نانو ساختار روان کارهای نانو ساختار ترمیم کننده سطوح، مولدهای ترموالکتریک، نانوبطری ها، نانوسیم ها، نانوکیت های مغناطیسی با هدف صرفه جویی در مصرف سوخت مشعل ها، کاتالیست های نانو ساختار، وریستورهای اکسیدروی، لامپ های کم مصرف با پوشش نانو ساختار، نانوفیلترهای نیروگاهی، سازه های بتنی مقاوم، تصفیه کننده های هوا و ... اشاره کرد [۱].

در بخش تولید به کارگیری فناوری نانو سبب بهبود عملکرد تجهیزات نیروگاهی و افزایش راندمان نیروگاه می شود. از طرفی امروزه به دلیل کاهش منابع اولیه انرژی های فسیلی در دنیا و از طرف دیگر به دلیل ایجاد آلودگی های شدید زیست محیطی در اثر افزایش مصرف این منابع، توجه خاصی به منابع جدید تامین انرژی مانند انرژی های خورشیدی، بادی و ... می شود. اما استفاده از این منابع مستلزم دستیابی به فناوری تبدیل کننده این پتانسیل ها به انرژی های الکتریکی، مکانیکی و ... است.

از سوی دیگر نانو فناوری، به سبب بهبود کیفی ابزارها، مصرف کمتر مواد اولیه، مصرف کمتر انرژی، کاهش تولید مواد زائد و افزایش سرعت تولید در کشورهای پیشرفته به عنوان مهم ترین روش تولید و ساخت این ابزارها، مطرح است. به کمک این فناوری گام های موثری در جهت کاهش آلودگی زیست محیطی حاصل از سوخت های فسیلی، برداشته شده است. از این رو از مهم ترین بسترهای به کارگیری نانوفناوری در ساخت و تولید مبدل های انرژی های نو (مثل سلول های خورشیدی و پیل های سوختی)، کاهش آلاینده های زیست محیطی نیروگاه های گازسوز (با استفاده از کاتالیست های احتراق) و افزایش راندمان این نیروگاه ها (با به کارگیری نانوپوشش ها و نانومگنت ها) است [۱].

۲-۱-۱- اسناد بالادستی و سندهای مرتبط با فناوری نانو و صنعت برق

به منظور شناسایی و بررسی مبانی علمی و فنی این پروژه و همچنین نیازمندی وزارت نیرو در این خصوص مطالعات و بررسی های در اسناد بالادستی و سندهای مرتبط با فناوری نانو و صنعت برق انجام شد که در ذیل به موارد بررسی شده اشاره می گردد. برخی از این اسناد، به طور مستقیم به بحث نانو و انرژی پرداخته اند و برخی دیگر همچون سند چشم انداز به طور غیر مستقیم بر سیاست های بخش انرژی تاثیر گذارند.

۲-۱-۱-۱- سند چشم انداز بیست ساله جمهوری اسلامی ایران در افق ۱۴۰۴

در سند چشم انداز ۱۴۰۴ ایران به طور مستقیم بحث فناوری نانو و انرژی مطرح نشده است. اما در موضوعات مختلف بدان اشاره نموده است و می توان برداشت نمود که در حوزه مرتبط با فناوری نانو و کاربرد آن در صنعت برق و انرژی تاثیرگذار است. در مجموع در سند چشم انداز ۲۰ ساله کشور به اهمیت فناوری های نوین و دستیابی به علوم تاثیرگذار تاکید شده است و حتما می بایست به سمت اتکا به علم و دانش و فناوری و سرمایه های انسانی و اجتماعی حرکت کرد. علاوه بر این بر لزوم تولید بهره ور و اقتصاد دانش بنیان نیز تاکید شده است. به طور کلی در سند چشم انداز ۱۴۰۴، ایران کشوری است:

توسعه یافته، برخوردار از دانش پیشرفته، توانا در تولید علم و فناوری، متکی بر تولید ملی، بهره مند از محیط زیست مطلوب، دارای جایگاه اول اقتصادی، علم و فناوری در سطح منطقه آسیای جنوب غربی (آسیای میانه، قفقاز، خاورمیانه و کشورهای همسایه) و دارای جنبش نرم افزاری و تولید علم [۲].

در یکی از بندهای این سند در خصوص ویژگی های جامعه مطلوب، ذکر گردیده است که ایران، کشوری دست یافته به جایگاه اول اقتصادی، علمی و فناوری در مقیاس منطقه ای است که این امر را می توان در موضوع فناوری نانو به صورت خاص مورد توجه قرار داد [۲]. همچنین در این سند به اهمیت توانایی علمی و نیروی انسانی متخصص اشاره شده که برای رسیدن به خودکفایی و بومی سازی دانش نانو از اهمیت بالایی برخوردار است. بهره مندی از محیط زیست مطلوب نیز از موارد مطرح در سند چشم انداز است که فناوری نانو خود در پی این مهم است (استفاده از انرژی های تجدید پذیر). در سیاست های کلان کشور در افق چشم انداز در امور اقتصادی ذکر شده است که باید ساز و کارهای انگیزشی برای رشد بهره وری عوامل تولیدی (انرژی، سرمایه، نیروی کار، آب و ...) ایجاد شود. در نهایت به

دستیابی به اقتصاد مبتنی بر فناوری و علم اشاره کرده، که با به کارگیری فناوری نانو در تولید برق می توان در این راستا قدم برداشت [۲].

۲-۱-۱-۲- سیاست های کلی اقتصاد مقاومتی

با هدف تأمین رشد پویا و بهبود شاخص های مقاومت اقتصادی و دستیابی به اهداف سند چشم انداز بیست ساله، سیاست های کلی اقتصاد مقاومتی با رویکردی جهادی، انعطاف پذیر، فرصت ساز، مولد، درون زا، پیشرو و برون گرا در راستای پیشسازی اقتصاد دانش بنیان، پیاده سازی و اجرای نقشه جامع علمی کشور و ساماندهی نظام ملی نوآوری به منظور ارتقاء جایگاه جهانی کشور و افزایش سهم تولید و صادرات محصولات و خدمات دانش بنیان و دستیابی به رتبه اول اقتصاد دانش بنیان در منطقه ابلاغ گردید. از جمله مواردی که می توان از سیاست های کلی اقتصاد مقاومتی در راستای توسعه فناوری نانو برشمرد، عبارتند از [۱]:

- مدیریت مصرف با تأکید بر اجرای سیاست های کلی اصلاح الگوی مصرف و ترویج مصرف کالاهای داخلی همراه با برنامه ریزی برای ارتقاء کیفیت و رقابت پذیری در تولید
- استفاده از ظرفیت اجرای هدفمند سازی یارانه ها در جهت افزایش تولید، اشتغال و بهره وری، کاهش انرژی و ارتقاء شاخص های عدالت اجتماعی
- افزایش ارزش افزوده از طریق تکمیل زنجیره ارزش صنعت نفت و گاز، توسعه تولید کالاهای دارای بازدهی بهینه (بر اساس شاخص شدت مصرف انرژی) و بالا بردن صادرات برق، محصولات پتروشیمی و فرآورده های نفتی با تأکید بر برداشت صیانتی از منابع
- مقابله با ضربه پذیری درآمد حاصل از صادرات نفت و گاز از طریق افزایش صادرات برق.

۲-۱-۱-۳- سیاست های کلی نظام در بخش انرژی

سیاست های کلی نظام جمهوری اسلامی ایران در مورد «انرژی» مصوب مورخ ۱۳۷۷/۱۰/۲۳ که در تاریخ ۱۳۷۹/۱۱/۳ توسط مقام معظم رهبری تأیید و ابلاغ گردید که در بخش ب سند، بندهای دوم و چهارم به کاربرد فناوری نانو در صنعت برق اشاره شده است.

۲-۱-۱-۴- سند چشم انداز و برنامه راهبردی بلندمدت وزارت نیرو

بر اساس این سند وزارت نیرو در راستای عرضه با کیفیت و پایدار برق، آب و خدمات فاضلاب گام بر می دارد، به نحوی که ضمن مدیریت عرضه و تقاضا از محیط زیست هم حفاظت کند. وزارت نیرو در افق چشم انداز جمهوری اسلامی ایران، سازمانی است که با برخورداری از مدیریت دانش محور، منابع انسانی کارآمد، ساختاری فراگیر و اثربخش، ظرفیت های غنی نرم افزاری و سخت افزاری خود اتکاء، به گونه ای عمل می کند تا کشور در مدیریت عرضه و تقاضا و دسترسی عادلانه همگان به برق مطمئن و پایا، آب سالم و کافی متناسب با ظرفیت های ملی و خدمات بهداشتی فاضلاب در جهان پیشرو شناخته و نیز به عنوان مرکز راهبردی برق در منطقه تثبیت شود. وزارت نیرو با بهره گیری از آخرین دستاوردهای علمی، پژوهشی و روش های پیشرفته مدیریت و همچنین توسعه فناوری های نوین علاوه بر توسعه و ارتقای بهره وری و کیفیت ارائه خدمات در سطح ملی، بازار صنعت آب و برق کشور را به سطح جهانی، به ویژه کشورهای منطقه گسترش می دهد. وزارت نیرو در بخش برق با استفاده از منابع متنوع و در دسترس انرژی، مدیریت تقاضا، تکیه بر ساختاری منسجم و متخصصین توانمند و خلاق به گونه ای عمل می کند تا کشور در عرضه برق مطمئن و پایا و با کیفیت مناسب (در حد استانداردهای جهانی) سرآمد کشورهای منطقه گردد و با ایجاد بسترهای لازم، دسترسی آزاد

به شبکه و رقابت منصفانه در بازار برق را میسر نموده و جمهوری اسلامی ایران به عنوان مرکز راهبردی شبکه برق در منطقه تثبیت گردد. در ذیل به راهبردی های وزارت نیرو اشاره می شود [۳]:

- نهادینه کردن نظام مشتری مداری و حمایت از حقوق مشترکین با تأکید بر:
- بهره گیری از فناوری های جدید و اصلاح فرآیندهای موجود
- بهبود شاخص های کیفیت و کاهش قیمت تمام شده خدمات صنعت آب و برق
- ارتقاء سطح کارآمدی صنعت برق کشور با تأکید بر:
- افزایش بهره وری تولید برق و ارتقاء بازده نیروگاه ها
- ارتقاء توانمندی در تولید برق از انرژی های نو و تجدیدپذیر
- سازگاری زیست محیطی و ارتقاء ایمنی در فعالیت های صنعت برق
- ارتقاء سطح دانش، پژوهش و فناوری در صنعت آب و برق با تأکید بر شناسایی فناوری های نوین و انتقال و بومی سازی

فناوری های دارای مزیت نسبی

راهبردی های بخش برق و انرژی عبارتند از:

- ارتقاء سطح تحقیق و توسعه و فناوری بخش برق و انرژی
- شناسایی، انتقال و بومی سازی فناوری های نوین و سازگار با محیط زیست
- افزایش بهره وری تولید برق و ارتقاء بازده نیروگاه ها با استفاده از فناوری های نوین و تجهیزات با راندمان بالا
- ارتقاء توانمندی در تولید برق از انرژیهای نو و تجدیدپذیر با تمرکز بر تحقیق و پژوهش و بومی سازی فناوری در فعالیت های مربوط به تولید برق از انرژی خورشیدی و بادی در کشور
- تخصیص درصد معین و فزاینده ای از اعتبارات تحقیقاتی به بومی سازی فناوری های مرتبط با انرژی های نو و تجدیدپذیر

- تعریف و اجرای پروژه های نمونه در زمینه انرژی های نو و تجدیدپذیر و تجاری سازی آنها

- تنظیم قوانین مناسب در بازار برق به منظور توسعه استفاده از انرژی های نو و تجدیدپذیر

- توسعه مبادلات منطقه ای برق مشتمل بر اعطای مجوز صادراتی به تولیدکنندگان برق از منابع انرژی نو و تجدیدپذیر

- تهیه طرح جامع زیست محیطی فعالیت های صنعت برق

- تقویت قدرت بازدارندگی و کاهش آسیب پذیری بخش با رویکرد استمرار ارائه خدمات:

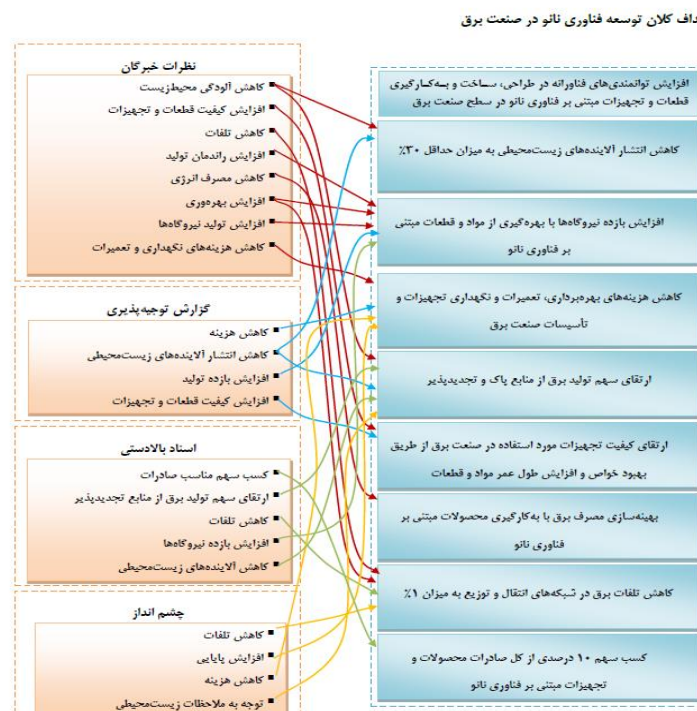
- تنوع بخشی به منابع اولیه انرژی و فناوری های تولید برق

با توجه به سند چشم انداز جمهوری اسلامی تا افق 1404، وزارت نیروی به عنوان مرکز راهبردی برق در منطقه مأموریت توسعه و ارتقای بهره وری و کیفیت ارائه خدمات در سطح ملی، بازار صنعت آب و برق کشور را به سطح جهانی، به ویژه کشورهای منطقه را عهده دار است. با توجه به اینکه یکی از اهداف کلان سند راهبرد ده ساله توسعه فناوری نانو دستیابی به سهم مناسبی از تجارت جهانی با استفاده از فناوری نانو است، بنابراین یکی از اهداف مهم توسعه فناوری نانو در صنعت برق و انرژی کشور گسترش صنعت برق و انرژی کشور در سطح جهانی و به خصوص پیشرو بودن آن در منطقه است که کاربرد آن در حوزه های برق و انرژی از جمله تولید، انتقال و توزیع مورد توجه می باشد. اهدافی که در این راستا تعقیب می شوند شامل افزایش بازدهی تولید، کاهش تلفات، صرفه جویی در مصرف انرژی و هم چنین افزایش سهم انرژی های نو می تواند باشد. در حوزه تولید می توان به امکان ساخت مواد مغناطیسی، قطعات، تجهیزات،

پوشش های پره های توربین گازی، لاینرها، کمپرسور، افزودنی های سوخت، فیلترها، پوشش مخازن، سلول های خورشیدی، پیل های سوختی، نانوسیم ها، مواد ترموالکتریک، کاتالیست ها و سنسورها اشاره کرد. در حوزه انتقال و توزیع می توان به قطعات و تجهیزات مورد استفاده در ترانسفورماتورها، عایق ها، هادی ها، کلیدها و تجهیزات حفاظتی از جمله برق گیرها، باطری ها و کابل ها و در حوزه مصرف به تصفیه کننده ها، لامپ های نانو، شیشه های عایق، انواع روانکار و روان ساز و پوشش اشاره کرد. همچنین استفاده از نانو مواد در ساخت تجهیزات مورد استفاده در صنعت برق و انرژی، کاربردهای زیادی را به خود اختصاص داده است. تقسیم بندی نانومواد در دو دسته نانوذرات و نانو لایه ها صورت می گیرد که انتخاب روش تولید هریک بستگی به نوع ماده و کاربرد آن دارد. علاوه بر این، استفاده از این فناوری در فرآیند تولید محصول در قالب ساخت نانومواد و پودرهای مورد استفاده و یا پوشش دهی، موارد متعددی از کاربرد را به خود اختصاص داده است [۱].

۲-۱-۲- اهداف کلان سند توسعه فناوری نانو در صنعت برق

با جمع بندی نتایج حاصل از بررسی بیانیه چشم انداز، اسناد بالادستی، گزارش توجیه پذیری و نظرات خبرگان، محورهای اهداف کلان سند توسعه فناوری نانو در صنعت برق استخراج شد که در شکل ۱ نشان داده شده است [۱]. همان گونه در شکل ۱ نشان داده شده است، کاهش تلفات و افزایش بهره‌وری در بخش های تولید، انتقال و توزیع نیرو همواره به عنوان یکی از مهم ترین نیازهای صنعت برق در جهت کاهش هزینه تمام شده و افزایش بهره‌وری مطرح بوده است. در این راستا به منظور بهبود عملکرد تجهیزات نیروگاهی جهت افزایش راندمان، طی بررسی های انجام شده مشخص شد که مواد مغناطیسی نانو ساختار (فریت ها) می تواند در هسته ترانسفورماتورها در حوزه تولید، برای دستیابی به اهداف مورد نظر قابل کاربرد باشد که در شکل ۲-۱ در خصوص کاربرد آن در حوزه تولید توضیح داده شده است.



شکل ۲-۱- اهداف کلان توسعه فناوری نانو در صنعت برق [۱].

۲-۱-۳- شناسایی حوزه های فناورانه نانو

تقریباً شانزده سال از عزم کشور برای توسعه و پیشرفت علم و فناوری نانو می گذرد و پیش‌بینی مربوطه نشان از اختصاص دو درصد از بازار جهانی تا افق ۱۴۰۴ می دهند [۱]. بر این اساس اولویت های فناوری در دوره زمانی پیش روی در سند راهبردی و نقشه راه توسعه فناوری نانو در صنعت برق و انرژی مصوب ۱۳۹۴، بر اساس معیارهای کلی زیر می تواند در نظر گرفته شود:

اولویت های کلان علم و فناوری کشور

نیازها و معضلات و مزیت های کشور

فرصت های خوش آتیه در فناوری نانو

با توجه به معیارهای فوق، ۵ حوزه کاربردی به عنوان اولویت های فناوری نانو بر اساس تدوین برنامه سند راهبردی نانو طبق جدول ۱-۲ انتخاب شده‌اند [۴ و ۵].

جدول ۱-۲- موضوعات کلان اولویت دار نانو [۴ و ۵]

موضوعات کلان اولویت‌دار	نمونه‌هایی از زیر شاخه‌ها	نمونه‌هایی از فناوری‌های مشترک
انرژی	- صرفه جویی انرژی - پیل‌های خورشیدی - تبدیلات سوخت‌های فسیلی - بهبود کیفیت پیل‌های شیمیایی	- نانو فیلتر - نانو کاتالیست - نانو کامپوزیت
سلامت	- داروهای جدید - کیت های تشخیصی	- پوشش دهی نانویی (رنگ و...)
محیط زیست و آب	- تصفیه آب	- نانوذرات
مواد	- نمک‌زدایی - تصفیه پساب	- نانوبیو - نانوسنور
سازه‌ها	- مقابله با خوردگی - استحکام ساختمان و زیر بنا	

پس از شناسایی حوزه های فناورانه نانو بررسی هایی در خصوص مهم ترین کاربردهای این فناوری در صنعت برق و انرژی در سه محور تولید، انتقال و مدیریت مصرف انجام شد. همچنین با شناسایی اجزاء مختلف تجهیزات مورد استفاده در حوزه های تولید، انتقال و توزیع و مصرف که نانوفناوری می تواند به گونه ای بر بهبود خواص، ارتقاء عملکرد، افزایش طول عمر، کوچک سازی ادوات مورد نظر مؤثر باشد اهمیت کاربرد این فناوری و موارد استفاده از آن مشخص شده است. در جداول ۲-۲ تا ۲-۴ ضمن معرفی اجزاء مورد استفاده در تجهیزات مورد نظر در دو بخش ساخت اعم از قطعه یا سنتز مواد و هم چنین به کارگیری نانوفناوری به صورت استفاده به عنوان یک تجهیز یا بهره‌مندی از افزودنی های بر پایه نانو یا پوشش دهی بر روی محصولات مورد استفاده در صنعت برق، کاربردهای فعلی یا محتمل در آینده برای نانو فناوری تعریف شده است. رنگ بندی خانه های جداول در سه رنگ زرد، نارنجی و سبز به ترتیب مربوط به مواردی

است که مراحل ابتدایی خود را در بخش تحقیقات در سطح جهانی، مراحل میانی و بعضاً انتهایی تحقیقات و توسعه و تکمیل شده و به مرحله تجاری رسیده را نشان می دهند [۱].

جدول ۲-۲- حوزه های فناوریانه نانو در محور تولید [۱]

تجهیزات	اجزاء	ساخت		به کارگیری نانوفناوری	
		قطعه	مواد	پوشش دهی	مواد و افزودنی ها
توربین	پره	✓	✓	✓	
	نازل	✓	✓		
	شرود سیگمنت	✓	✓		
	یاتاقان	✓	✓		
کمپرسور	فیلتر	✓			
	پره	✓	✓		
	پوشش پره	✓	✓		
محفظه احتراق	آجر نسوز	✓	✓		
	پوشش	✓	✓		
	لایتر	✓	✓		
	Transition Piece	✓	✓		
سیستم سوخت	-	✓	✓		✓
ژنراتور	هسته	✓			
توربین بخار				✓	
بویلر	لوله ها و یاپ ها	✓	✓	✓	
	پیش گرم کن	✓	✓		
	هسته	✓			
سیستم تصفیه	سیال خنک کن				✓

تجهیزات	اجزاء	ساخت		به کارگیری نانوفناوری	
		قطعه	مواد	پوشش دهی	مواد و افزودنی ها
توربین	پره	✓	✓	✓	
	نازل	✓	✓		
	شرود سیگمنت	✓	✓		
	یاتاقان	✓	✓		
کمپرسور	فیلتر	✓			
	پره	✓	✓		
	پوشش پره	✓	✓		
محفظه احتراق	آجر نسوز	✓	✓		
	پوشش	✓	✓		
	لایتر	✓	✓		
	Transition Piece	✓	✓		
سیستم سوخت	-	✓	✓		✓
ژنراتور	هسته	✓			
توربین				✓	
بویلر	لوله	✓	✓	✓	
	هیتر	✓	✓		
	هسته	✓			
سیستم تصفیه	سیال خنک کن				✓

تجهیزات	اجزاء	ساخت		به کارگیری نانوفناوری	
		قطعه	مواد	پوشش دهی	مواد و افزودنی ها
توربین	پره	✓	✓	✓	
	نازل	✓	✓		
	شرود سیگمنت	✓	✓		
	یاتاقان	✓	✓		
کمپرسور	فیلتر	✓			
	پره	✓	✓		
	پوشش پره	✓	✓		
محفظه احتراق	آجر نسوز	✓	✓		
	پوشش	✓	✓		
	لایتر	✓	✓		
	Transition Piece	✓	✓		
سیستم سوخت	-	✓	✓		✓
ژنراتور	هسته	✓			
توربین				✓	
بویلر	لوله	✓	✓	✓	
	هیتر	✓	✓		
	هسته	✓			
سیستم تصفیه	سیال خنک کن				✓

تجهیزات	اجزاء	ساخت				نوع	اجزاء	ساخت				نوع	تجهیزات
		قطعه	مواد	پوشش دهی	مواد و افزودنی ها			قطعه	مواد	پوشش دهی	مواد و افزودنی ها		
سد	بتن	✓	✓	✓		سلول	خورشیدی			✓			
	رنگ		✓	✓		اینورتر							
	کانال		✓	✓		فریم							
کانال انتقال آب به توربین	بتن	✓	✓	✓		رنگ				✓	✓		
	صفحات فلزی	✓	✓	✓		شیشه های رسانا				✓	✓		
	حفاظت		✓	✓		بره توربین	بادی			✓	✓		
توربین	پوشش		✓	✓		الکتروود	پیل سوختی			✓	✓		
سنسورها						الکترولیت				✓	✓		
						کاتالیست				✓	✓		
						مولدهای مکانیکی		✓				✓	

جدول ۲-۳- حوزه های فناوریانه نانو در محور انتقال و توزیع [۱]

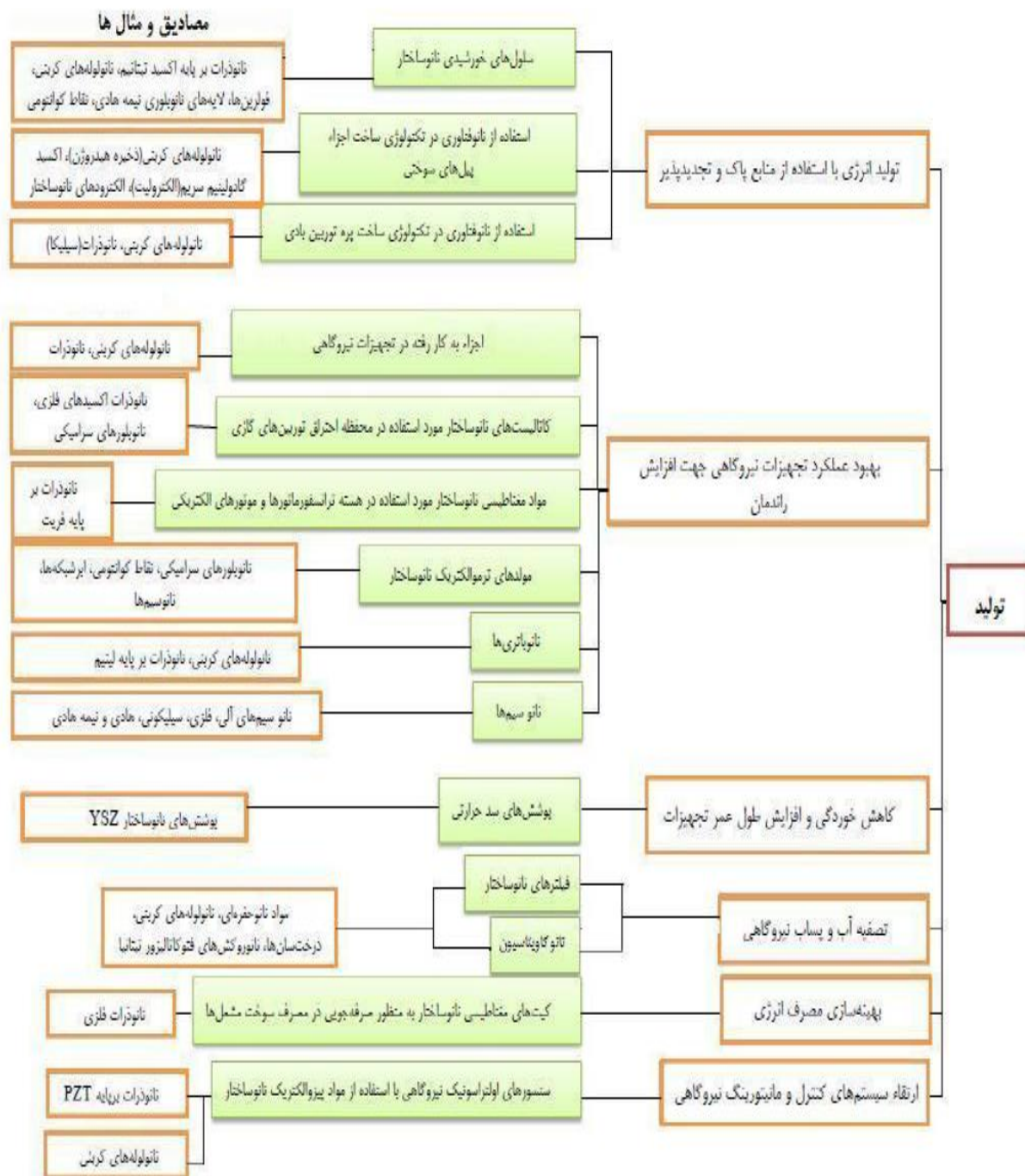
تجهیزات	اجزاء	ساخت				نوع	تجهیزات	اجزاء	ساخت				نوع	تجهیزات
		قطعه	مواد	پوشش دهی	مواد و افزودنی ها				قطعه	مواد	پوشش دهی	مواد و افزودنی ها		
هادی ها	شینه	✓	✓	✓		آلومینیوم	هادی ها			✓				
	صفحات مسی		✓	✓		فولاد				✓				
عایق ها	ایزولاتور		✓			-	مقره ها			✓	✓	✓		
	مقره	✓	✓	✓		-	براقی آلات			✓	✓			
ترانسفورماتور			✓	✓		-	کلمپ ها			✓	✓			
	دزنکتور		✓	✓		-	اتصال دهنده ها			✓	✓	✓		
کلیدها	سکسیونر		✓	✓		-	دکل			✓				
	جریان		✓	✓		-	تیر بتنی			✓	✓			
وسایل اندازه گیری و مانیتورینگ	ولتاژ		✓	✓		کابل (بدون روکش) AS	هادی هوایی			✓	✓			
	رله		✓	✓		روکش دار XLPE				✓	✓	✓		
حفاظتی	برقگیر	✓	✓	✓		خودنگهدار				✓	✓			
	بانک خازن			✓		مسی				✓	✓			
باتری ها			✓	✓		-	مقره ها			✓	✓	✓		

		✓	✓	بلون روکش	هادی هوایی					✓	✓	تجهیزات مخابراتی	
	✓	✓	✓	روکش دار				✓	✓	✓	✓	کابل‌ها	
		✓	✓	خودنگهدار									
	✓	✓	✓	کابل زمینی									
		✓	✓		پراق آلات								
✓	✓	✓	✓	کامپوزیتی	پایه ها								
✓	✓	✓	✓	بتنی									
		✓	✓	فلزی									
	✓	✓	✓		مقره‌ها								
		✓	✓		Earth								

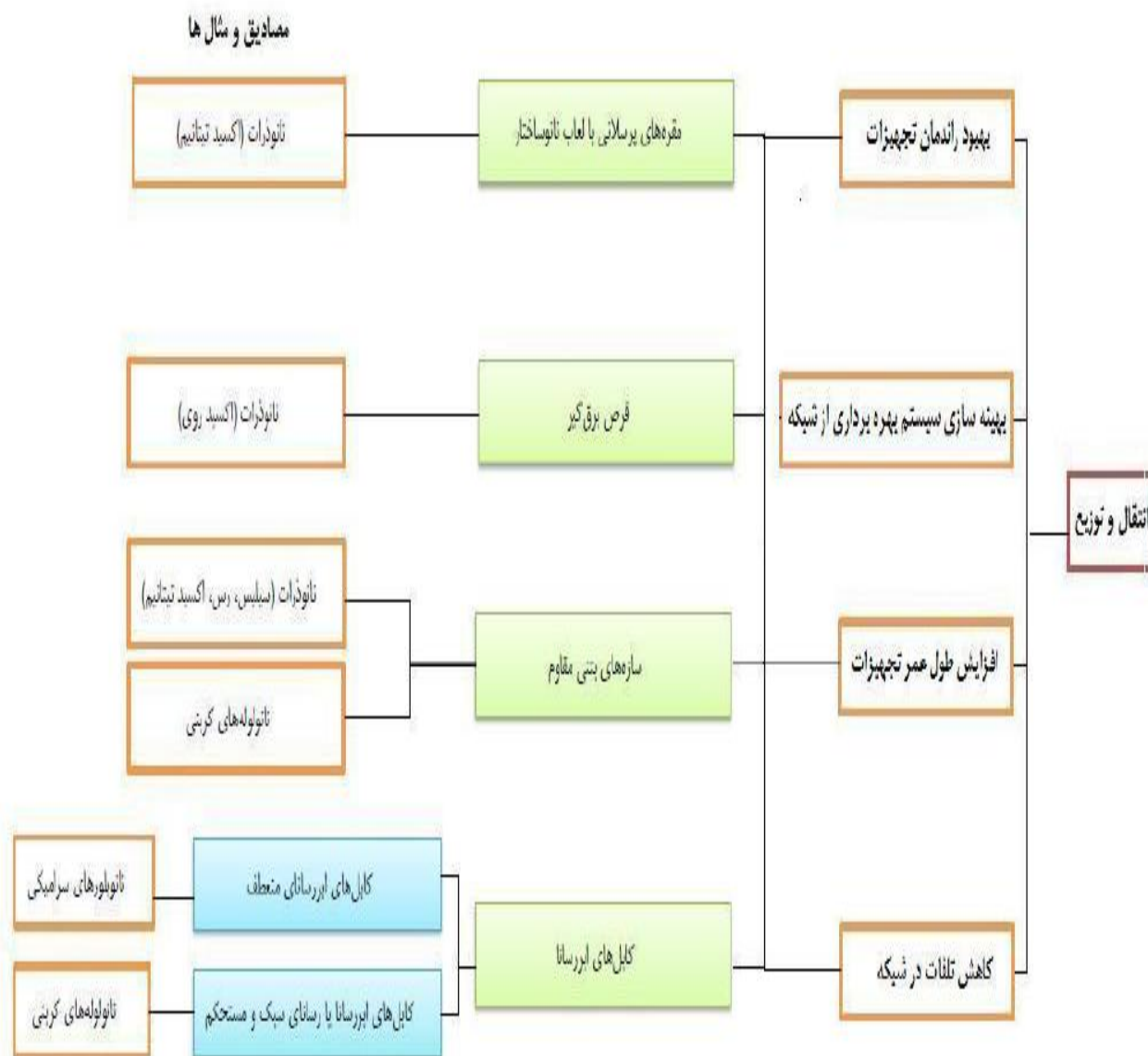
جدول ۲-۴- حوزه های فناوریانه نانو در محور مدیریت مصرف [۱]

تجهیزات		اجزاء		ساخت		به کارگیری نانوفناوری	
				قطعه	مواد	پوشش دهی	افزودنی‌ها
تجهیزات برقی	تجهیزات برقی	عایق		✓		✓	
		لامپ				✓	
		پوشش		✓		✓	✓
		دیودهای نوری		✓	✓		
		تصفیه کننده		✓			
مدیریت مصرف	مدیریت مصرف	کاهش مصرف		✓	✓	✓	✓
		کاهش تلفات		✓	✓	✓	

در شکل ۲-۲ کاربرد هسته های فریتی به عنوان مواد مغناطیسی در حوزه تولید به منظور بهبود عملکرد تجهیزات نیروگاهی جهت افزایش راندمان آورده شده است.



شکل ۲-۲- عنوان کاربرد نانوفناوری در حوزه تولید [۱].



شکل ۲-۳- عناوین کاربردی نانوفناوری در حوزه انتقال و توزیع [۱۶].



شکل ۲-۴- عناوین کاربردی نانوفناوری در حوزه مصرف [۱].

۲-۱-۴- نقش فریت ها در صنعت برق و انرژی

با توجه به اسناد بالادستی و حوزه های فناوریانه نانو که در فوق به آن اشاره شد می توان به این موضوع توجه نمود که یکی از کاربردهای عمده مواد مغناطیسی، استفاده از آنها در هسته ترانسفورماتورها و موتورهای الکتریکی می باشد که می توان برای بهبود عملکرد تجهیزات نیروگاهی جهت افزایش راندمان، از فریت ها به عنوان مواد مغناطیسی نانساختار در ترانسفورماتورها در حوزه تولید استفاده نمود. مواد مغناطیسی دارای مزایا و ویژگی های ذیل می باشند که باعث استفاده از آنها در صنعت برق و انرژی شده است [۱].

- استحکام مکانیکی بالا

- نفوذپذیری و مغناطش بالا

- اتلاف هسته بسیار کم

- عدم تغییر خواص در اثر اعمال عملیات مکانیکی، ارتعاشات و...

- اتلاف انرژی بسیار کم در فرکانس های بالا

- تغییر شکل کمتر مغناطیسی

- خواص فرکانسی بسیار خوب

- کنترل حلقه هیستریزیس در حین آنیل کردن

- کاهش بسیار هموار نفوذپذیری با افزایش فرکانس

- دمای کارکرد بالاتر

- تغییرات نفوذپذیری و مغناطش برحسب دما کم است

- تغییر ابعادی در اثر مغناطش کم است

کاربرد و ویژگی های ترانسفورماتورهای مرسوم که با فرکانس شبکه (۵۰ هرتز) کار می کنند، همچون هزینه پایین، قابلیت اطمینان و راندمان بالا در طی سالیان گذشته مورد بررسی و توجه بسیاری از متخصصان و صنعتگران قرار گرفته است. از طرف دیگر، این ترانسفورماتورها معایبی نیز دارند که با پیچیده شدن شبکه های قدرت این معایب بیشتر از قبل احساس می شود. از جمله معایب آن می توان به اندازه بزرگ، وزن بالا، افت ولتاژ، عدم تنظیم کیفیت توان، مشکلات زیست محیطی و نداشتن خروجی برق مستقیم یا ظرفیت ذخیره سازی اشاره کرد. به ویژه وجود هسته های آهنی بزرگ و سیم پیچی مسی سنگین در ترانسفورماتورهای مرسوم سبب شده که این نوع ترانسفورماتور با اختلاف زیاد عنوان سنگین ترین تجهیز موجود در سیستم توزیع برق را به خود اختصاص دهد.

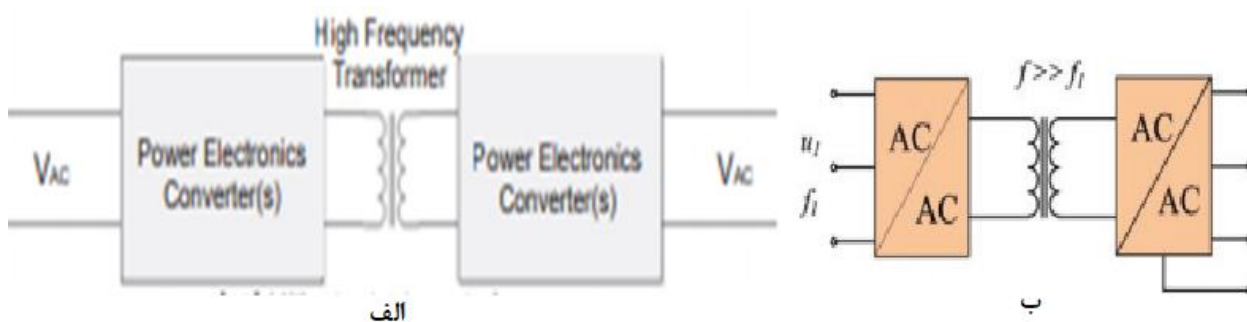
نکته قابل توجه این است که ابعاد و وزن هسته بکار رفته در ترانسفورماتورها به صورت قابل ملاحظه ای با افزایش فرکانس کاری، قابل کاهش است. بنابراین یک روش برای کاهش ابعاد و وزن ترانسفورماتور در حالیکه ظرفیت انتقال توان آن ثابت بماند، افزایش فرکانس کاری است. اما با توجه به اینکه فرکانس کاری در سیستم های قدرت ثابت است (۵۰ هرتز در ایران)، بنابراین کاهش وزن و ابعاد ترانسفورماتورهای مرسوم در ساختار موجود امکانپذیر نیست. این مسئله سبب شده است که ترانسفورماتورهای مرسوم که معمولاً اندازه و وزن بالایی دارند با عنوان ترانسفورماتورهای فرکانس پایین شناخته شوند [۶].

اگرچه در طول سالیان گذشته اصلاحاتی در جهت بهبود و رفع مشکلات ترانسفورماتورهای معمولی صورت گرفته است اما ظهور و گسترش ریزشبکه های هوشمند قدرت، نیاز به وجود ترانسفورماتورهای هوشمند با اندازه قابل قبول

را به وجود آورده است. در این بین ترانسفورماتور الکترونیک قدرت^۱ را می توان به عنوان یک انقلاب در زمینه الکترونیک قدرت به خصوص در ریزشبکه های هوشمند به حساب آورد که جنس هسته آن می تواند فریت باشد. این ترانسفورماتور با نام های دیگری نیز شناخته می شود که این اسامی در جدول ۲-۵ آورده شده است. جدول ۲-۵- نام گذاری های مختلف ترانسفورماتور الکترونیک قدرت [۷]

نام فارسی	نام لاتین	ارائه دهنده
Electronic Transformer (1968)	ترانسفورماتور الکترونیکی	McMurray
Solid-State Transformer (SST, 1980)	ترانسفورماتور حالت جامد	Brooks
Intelligent Universal Transformer (IUT _{TM})	ترانسفورماتور هوشمند یونیورسال	EPRI
Power Electronics Transformer (PET)	ترانسفورماتور الکترونیک قدرت	ABB
Energy Control Center (ECC)	مرکز کنترل انرژی	Borojevic
Energy Router	روتر انرژی	Wang

با توجه به مشکلات ترانسفورماتورهای مرسوم در شبکه برق و پیشرفت و قابلیت دسترسی تجهیزات نیمه هادی ولتاژ بالا سبب شد که استفاده از ترانسفورماتورهای حالت جامد در سیستم توزیع مورد توجه واقع شود. این ترانسفورماتور از تجهیزات الکترونیک قدرت و یک ترانسفورماتور فرکانس بالا تشکیل شده که جنس هسته آن می تواند فریت باشد. در این ترانسفورماتور، سیم پیچ اولیه و ثانویه یک ترانسفورماتور فرکانس بالای با هسته فریتی، به دو مبدل الکترونیک قدرت فعال متصل می گردد. فرکانس ثانویه به صورت مستقل از فرکانس اولیه قابل کنترل است اما دامنه ولتاژ ثانویه وابسته به دامنه ولتاژ اولیه (ورودی) است [۸].



شکل ۲-۵- ترانسفورماتور الکترونیک قدرت (الف) طرحواره و (ب) مدار الکتریکی [۸].

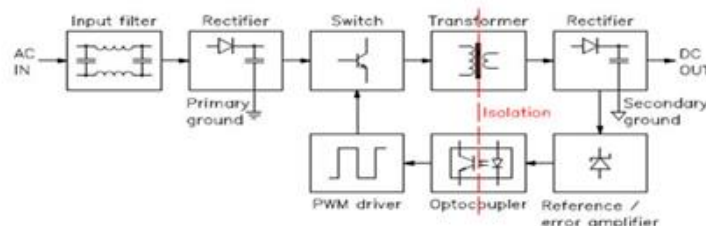
در ذیل به مهم ترین کاربردهای ترانسفورماتور الکترونیک قدرت در شبکه قدرت اشاره می شود [۹]:

- ۱- تغییر سطح ولتاژ AC به سطحی دیگر: از این ترانسفورماتور برای تغییر سطح ولتاژ AC به سطحی دیگر و ایزولاسیون استفاده می شود که جایگزین ترانسفورماتورهای فرکانس پایین کنونی در شبکه توزیع است.

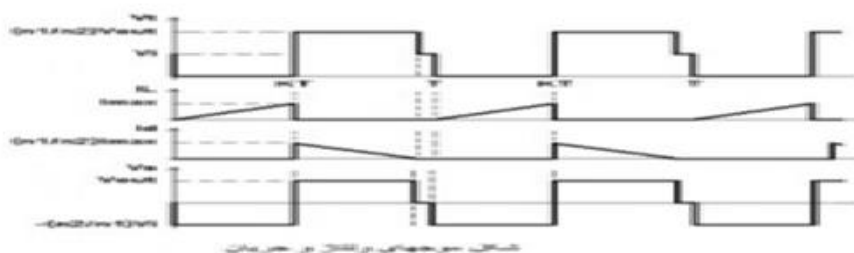
¹. Power Electronic Transformer (PET)

- ۲- اتصال بین منبع و بار یا شبکه توزیع: وظیفه این ترانسفورماتور تامین ولتاژ و فرکانس ثابت در خروجی، در صورت تغییر ورودی است. همچنین ضریب توان واحد ایجاد می نماید که استفاده بهتر از خطوط انتقال را میسر ساخته و نوسانات سیستم در شرایط گذرا را بهبود می دهد.
- ۳- اتصال بین دو شبکه توزیع: یکی از ویژگی‌های این ترانسفورماتور عدم نیاز به یکسان بودن ولتاژ و فرکانس و یاهمزمانی دو شبکه متصل به آن است. با توجه به این امر، از این ترانسفورماتوری توان برای کنترل توان اکتیو انتقالی بین دو شبکه استفاده کرد که نقش آن در بازار برق دیده می شود. به طور مثال، زمانی که انرژی در شبکه ۲ ارزان تر از شبکه ۱ باشد، بهره بردار شبکه ۱ می تواند تولید خود را کاهش دهد و از شبکه ۲ برق را خریداری نماید.
- ۴- اتصال بین شبکه های فشار متوسط و فشار ضعیف: به منظور جلوگیری از اضافه بار شدن خطوط انتقال با ظرفیت محدود، این ترانسفورماتور می تواند مقدار توانی را که بین بخش های مختلف شبکه رد و بدل می شود را محدود نماید.
- ۵- اتصال بین شبکه فشار متوسط و بارها: در شرایطی که عدم تعادل بارهای فشار ضعیف زیاد است که باعث اغتشاشات هارمونیک در ولتاژ و نیز ایجاد عدم تقارن ولتاژ می شود این ترانسفورماتور، می تواند با تولید ولتاژی که تاثیرپذیری کمتری از بارهای نامتعادل دارد به رفع این مشکل کمک کند.
- ۶- اتصال بین تولید پراکنده و شبکه های هوشمند: منابع انرژی پراکنده مانند آرایه های فوتوولتائیک و توربین های باد منابع متنوعی برای انرژی الکتریکی فراهم کرده اند که ولتاژ و یا فرکانس های متغیری دارند. این ترانسفورماتور می تواند شرایط اتصال این منابع به شبکه های قدرت کنونی را فراهم نماید.
- فریت ها نیز در هسته ترانسفورماتور منابع تغذیه سوئیچینگ^۱ قابل کاربرد هستند. به طوری که یکی از اجزای این منابع تغذیه، ترانسفورماتور است که در فرکانس های بالا استفاده شده و جنس هسته آن فریت است. این منبع تغذیه، با استفاده از سوئیچینگ های الکترونیک قدرت، توان الکتریکی را از یک منبع DC یا AC دریافت و با تغییر ولتاژ و جریان به بار DC تحویل می دهد. اگر ورودی این منبع تغذیه، برق شهر AC باشد، ابتدا وارد فیلتر می شود تا از ورود و خروج نویزها به مدار و از برگشت آن به شبکه جلوگیری کند. سپس این ورودی توسط یکسوکننده ها، یک طرفه شده و برای آنکه ولتاژ حاصل به DC نزدیکتر شود با یک خازن فیلتر شده و ولتاژ یکسو شده روی سوئیچ قدرت قرار می گیرد. این سوئیچ توسط یک درایو PWM با سرعتی حدود چند ده کیلوهرتز به بالا قطع و وصل می شود. به منظور افزایش و یا کاهش این ولتاژ از یک ترانسفورماتور فرکانس بالا با هسته فریتی متصل به سوئیچ قدرت استفاده می شود. با روشن شدن سوئیچ، سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور به ولتاژ یکسو شده متصل و باعث القای آن به سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور می شود. با قطع و وصل شدن سوئیچ، ولتاژی مربعی شکل ایجاد می شود. این ولتاژ مربعی توسط دیود یکسو شده و پس از فیلتر شدن توسط سلف و خازن به خروجی انتقال می یابد [۱۰].

¹. Switched-mode power supply (SMPS)



(الف)



(ب)

شکل ۲-۶- (الف) مدار الکتریکی و یک نمونه منبع تغذیه سوئیچینگ و (ب) تغییرات ولتاژ-جریان در یک منبع تغذیه سوئیچینگ [۱۰].

این منابع تغذیه، در موارد ذیل کاربرد دارند [۱۱]:

- اصلی ترین کاربرد منبع تغذیه سوئیچینگ تبدیل برق متناوب به برق مستقیم است. این نوع کاربرد تقریباً در تمام دستگاه های الکتریکی مصرف دارد.
 - کنترل انرژی از طریق مدار سوئیچینگ و استفاده از ترانس های با هسته فریت و قابلیت تحمل فرکانس بالا، تلفات کمتری به همراه دارد.
 - این منابع تغذیه در سیستم های کنترل قدرت، درایو موتورهای DC، به منظور ایزوله کردن انرژی از پنل های فتوولتائیک [۱۲]، تجهیزات مخابراتی، وسایل نقلیه الکتریکی و هیبریدی کاربرد دارند.
- علاوه بر کاربردهایی که در فوق به آن اشاره شد فریت ها در موارد ذیل نیز در صنعت برق و انرژی مورد استفاده قرار می گیرند:
- سلف و هسته های ترانسفورماتورهای به کار رفته در کلیه مبدل های الکترونیک قدرت، UPS، شارژر باتری، INVERTER، و ... که در نیروگاه ها و پست های برق کاربرد زیادی دارند.
 - سیستم های روشنایی مسکونی و صنعتی مبتنی بر لامپ های کم مصرف فلورسنت، لامپ ها و پروژکتورهای LED، درایور طیف وسیعی از لامپ های پر قدرت هالوژن و متال هالاید و ...
 - صنعت خودروهای برقی کاربرد وسیعی در درایور موتورهای محرکه، ایستگاه های شارژ باتری
 - مبدل های بکار رفته در مولدهای تولید پراکنده که بطور فزاینده ای جایگزین نیروگاه های متمرکز با سوخت فسیلی می شوند.
 - مبدل های فتوولتائیک [۱۲]، (سلف مبدل بوست در اینورتر فتوولتائیک، هسته فریت برای ترانسفورماتورهای توان بالا، سلف فیلتر و سلف مد مشترک)

- توربین‌های بادی (سلف‌های مد مشترک یک دور برای حفاظت بلبرینگ موتورهای و ژنراتورها، سلف فیلتر در اینورتر، هسته فریت برای ترانسفورماتور توان بالا)
- درایورها و راه اندازهای موتورهای الکتریکی. بیشترین مصرف داخلی نیروگاه‌ها را بارهای موتوری مثل دمنده‌ها، کمپرسورها و فن خنک کننده، تشکیل می‌دهند.
- در ساختار میکروژنراتورها (ژنراتورهایی که در دور بالا کار می‌کنند، نسبت به ژنراتورهای متداول دارای ابعاد و وزن بسیار کوچکتری هستند) که در صنایع هواپیمایی و نظامی کاربرد دارد.
- منبع تغذیه کامپیوترهای رو میزی، موبایل، تبلت و لپ‌تاپ و ...
- شارژر و آداپتورهای متداول امروزی
- سنسورهای مغناطیسی اندازه‌گیری (ولتاژ، جریان، میدان‌های مغناطیسی و ...) کاربرد زیادی در ابزار دقیق نیروگاه‌ها دارند:

✓ سنسور جریان تکنولوژی اثر هال^۱

✓ اندازه‌گیری دبی سیال‌ها^۲

✓ دور سنج شفت موتور و ژنراتور^۳

۲-۲- امکان سنجی تولید ذرات در بازه فرکانسی تعریف شده

همان‌گونه که در بخش‌های ۴-۱ و ۶-۱ گزارش مرحله اول پروژه اشاره شد، مواد مغناطیسی از نظر رفتار آن‌ها در میدان مغناطیسی به دو گروه مواد مغناطیسی نرم و مواد مغناطیسی سخت تقسیم‌بندی تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۳]. مواد مغناطیسی به راحتی مواد مغناطیسی نرم، مغناطیده نمی‌شوند و به میدان مغناطیسی اعمالی بزرگ‌تری، جهت مغناطیده کردن آن‌ها نیاز است. این مواد، گشتاور مغناطیسی را تا مدت‌ها پس از قطع میدان مغناطیسی در خود حفظ می‌کنند. همچنین دارای اشباع مغناطیسی، گشتاور پسماند و نیروی وادارندگی بالایی هستند. کاربرد این مواد در آهن‌رباهای دائمی و حافظه‌های مغناطیسی است. مواد مغناطیسی نرم با اعمال میدان‌های ضعیف مغناطیسی، خاصیت مغناطیسی از خود نشان می‌دهند. وقتی نیروی اعمالی حذف می‌شود، خاصیت مغناطیسی باقیمانده در آن‌ها تضعیف می‌گردد و بر اساس محدوده فرکانسی به دو دسته مایکروویو و غیر مایکروویو تقسیم می‌شوند. فریت‌های غیر مایکروویو برای فرکانس‌هایی از محدوده شنوایی تا ۵۰۰ MHz و فریت‌های مایکروویو برای فرکانس‌هایی در محدوده ۵۰۰ MHz - ۱۰۰ GHz مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳]. طبق بررسی‌های انجام شده در مرحله اول پروژه، فریت‌های منگنز روی و نیکل روی در هسته‌های ترانسفورماتورها قابل کاربرد هستند که در ذیل به آن اشاره می‌شود.

الف) مطابق با جدول ۲-۶ با توجه به کاربردهای متفاوت فریت‌ها، بازه‌های فرکانسی متفاوتی برای هر کاربرد آن لحاظ شده است. به طور مثال در ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت از فریت‌های منگنز روی برای فرکانس‌هایی تا ۴ MHz و از فریت‌های نیکل روی در محدوده فرکانسی تا ۱۰ - ۴ MHz استفاده می‌شود [۱۴]. به طور کلی فریت‌های نیکل در فرکانس‌هایی بالاتر از فرکانس کاربردی فریت‌های منگنز روی به دلیل هدایت الکتریکی پائین‌تر آنها نسبت به فریت‌های منگنز روی، استفاده می‌شوند [۱۴].

¹ Hall current sensors

² Flue meters

³RPM Meter

ب) همان گونه که در جدول ۲-۷ مشاهده می شود، مشخصات فریت های منگنز روی و نیکل روی برای کاربردهای قدرت آورده شده است. در این جدول، فریت های منگنز روی بسته به میزان تراوایی مغناطیسی در بازه فرکانسی

۲MHz - ۱۰ kHz و فریت های نیکل روی در بازه فرکانسی ۱۵۰ - ۱۰ MHz استفاده می شوند [۱۵].

ج) در جدول ۲-۸ مشخصات فنی فریت ها در کاربردهای قدرت نشان داده شده است. همچنین از محاسبه تلفات هسته می توان بازه فرکانسی قابل کاربرد در این خصوص را مشخص نمود. طبق مشخصات ذکر شده برای تلفات هسته فرکانسی مورد نظر برای این فریت ها ۱MHz - ۲۵kHz است [۱۶].

د) طبق بررسی های انجام شده در بخش های ۱-۱، ۱-۵ و ۱-۷ فاز اول پروژه در خصوص نوع ماده هسته فریتی قابل کاربرد در ترانسفورماتور، فریت های نیکل روی و منگنز روی در ترانسفورماتورها قابل کاربرد بوده اند که جانمایی این فریت ها با با کاتیون های دو ظرفیتی مس، کبالت، منگنز، منیزیم نیز ویژگی های ساختاری و مغناطیسی خوبی را از خود نشان داده است که می تواند در هسته ترانسفورماتورها مورد استفاده قرار گیرد. در جدول ۱-۹ بازه فرکانسی که این مواد در آن قابل کاربرد هستند نشان داده شده است.

جدول ۲-۶- محدوده فرکانسی قابل کاربرد برای فریت های منگنز روی و نیکل روی [۱۴]

Ferrite material survey

MAIN APPLICATION AREA	FREQUENCY RANGE (MHZ)	MATERIAL	μ_i at 25 °C	B_{sat} (mT) at 25 °C (1200 A/m)	T_c (°C)	ρ (Ω m)	FERRITE TYPE	AVAILABLE CORE SHAPES
Telecom filters Proximity sensors		3B46	3800	≈ 545	≥ 255	≈ 10	MnZn	RM, P, PT, PTS, EP, E, Planar ER, RM/I, RM/ILP, PH
	< 0.1	3B7	2300	≈ 440	≥ 170	≈ 1	MnZn	
	0.2 - 2	3D3	750	≈ 380	≥ 200	≈ 2	MnZn	
	< 0.2	3H3	2000	≈ 360	≥ 160	≈ 2	MnZn	
Wideband signal transformers Pulse transformers Delay lines		3E27	6000	≈ 430	≥ 150	≈ 0.5	MnZn	RM, P, PT, PTS, EP, EP/ILP, EPX, E, Planar ER, RM/I, RM/ILP, Toroids
		3E28	4000	≈ 440	≥ 145	≈ 1	MnZn	
		3E5	10000	≈ 380	≥ 125	≈ 0.5	MnZn	
		3E55	10000	≈ 370	≥ 100	≈ 0.1	MnZn	
		3E6	12000	≈ 390	≥ 130	≈ 0.1	MnZn	
		3E7	15000	≈ 390	≥ 130	≈ 0.1	MnZn	
		3E8	18000	≈ 380	≥ 100	≈ 0.1	MnZn	
		3E9	20000	≈ 380	≥ 100	≈ 0.1	MnZn	
Line output transformers (LOT)	< 0.2	3C30	2100	≈ 500	≥ 240	≈ 2	MnZn	UR
	< 0.3	3C34	2100	≈ 500	≥ 240	≈ 5	MnZn	
Power transformers Power inductors General purpose transformers and inductors	< 0.2	3C81	2700	≈ 450	≥ 210	≈ 1	MnZn	E, EI, Planar E, EC, EFD, EP, ETD, ER, Planar ER, U, RM/I, RM/ILP, P, P/I, PT, PTS, PM, PQ, Toroids (gapped), Bobbin cores
	< 0.2	3C90	2300	≈ 470	≥ 220	≈ 5	MnZn	
	< 0.3	3C91	3000	≈ 470	≥ 220	≈ 5	MnZn	
	< 0.2	3C92	1500	≈ 520	≥ 280	≈ 5	MnZn	
	< 0.3	3C93	1800	≈ 500	≥ 240	≈ 5	MnZn	
	< 0.3	3C94	2300	≈ 470	≥ 220	≈ 5	MnZn	
	< 0.3	3C95	3000	≈ 530	≥ 215	≈ 5	MnZn	
	< 0.4	3C96	2000	≈ 500	≥ 240	≈ 5	MnZn	
	0.2 - 0.5	3F3	2000	≈ 440	≥ 200	≈ 2	MnZn	
	0.5 - 1	3F35	1400	≈ 500	≥ 240	≈ 10	MnZn	
	1 - 2	3F4	900	≈ 410	≥ 220	≈ 10	MnZn	
	1 - 2	3F45	900	≈ 420	≥ 300	≈ 10	MnZn	
	2 - 4	3F5	650	≈ 380	≥ 300	≈ 10	MnZn	
	4 - 10	4F1	80	$\approx 320^{(1)}$	≥ 260	$\approx 10^5$	NiZn	
Wideband EMI-suppression Wideband transformers Balun transformers	10 - 100	3B1	900	≈ 380	≥ 150	≈ 0.2	MnZn	BD, BDW, BDS, MLS, CMS, Cable shields, Rods, Toroids, WBS, WBC
	1 - 30	3S1	4000	≈ 400	≥ 125	≈ 1	MnZn	
	30 - 1000	3S3	350	≈ 320	≥ 225	$\approx 10^4$	MnZn	
	10 - 300	3S4	1700	≈ 320	≥ 110	$\approx 10^3$	MnZn	
	1 - 30	3S5	3800	≈ 545	≥ 255	≈ 10	MnZn	
	30 - 1000	4A11	850	≈ 340	≥ 125	$\approx 10^5$	NiZn	
	10 - 300	4A15	1200	≈ 350	≥ 125	$\approx 10^5$	NiZn	
	10 - 300	4A20	2000	≈ 260	≥ 100	$\approx 10^5$	NiZn	
	30 - 1000	4B1	250	$\approx 360^{(1)}$	≥ 250	$\approx 10^5$	NiZn	
	50 - 1000	4C65	125	$\approx 380^{(1)}$	≥ 350	$\approx 10^5$	NiZn	
	30 - 1000	4S2	850	≈ 340	≥ 125	$\approx 10^5$	NiZn	
	30 - 1000	4S3	250	$\approx 360^{(1)}$	≥ 250	$\approx 10^5$	NiZn	

جدول ۲-۷- مشخصات فنی فریت های منگنز روی و نیکل روی [۱۵]

TYPICAL FERRITE MATERIALS								
PARAMETER		MANGANESE-ZINC				NICKEL-ZINC		
Initial permeability range		“1400	750	3500	4500	10	75	200
		to	to	to	to	to	to	to
		3500	3500	4500	15,000	75	200	1000
Curie temperature range (°C)		180	150	130	120	250	200	90
		to	to	to		to	to	to
		280	250	150		500	500	200
Flux density range (gauss)		3500	2400	3000	3000	1000	2500	2800
		to	to	to	to	to	to	to
		5200	4750	5000	5000	2500	3500	3500
at H (oersted)		12.5	12.5	12.5	12.5	100	50	25
Power loss density (mW/cm ³) at 100 kHz - 1000 G		< 100						
Loss factor $\tan \delta/\mu_i \times 10^{-6}$ at f-30 kHz					30			
100 kHz		10	5	20				
300 kHz								10-50
1 MHz			25				20-40	20-70
3 MHz							25-60	50-200
10 MHz						50-200	100	
30 MHz						100-1500		
100 MHz						400-2000		
**Typical frequency range kHz		10	10	10	10			
		to	to	to	to			
		500	2000	200	100			
MHz						10-150	2-30	1.5-5

*Materials for power applications

**This frequency range does not apply for ferrite materials used in EMI suppression applications.

جدول ۲-۸- مشخصات فنی فریت ها در کاربردهای قدرت [۱۶]

Property	Symbol	Condition	Unit	6H10	6H20	6H40	6H41	6H42	7H10	7H20
AC initial permeability	μ_i	0.1 MHz	—	2500	2300	2400	2500	3400	1500	1000
Saturation magnetic flux density	B_s (1000 A/m)	23 °C	mT	510	510	530	530	530	480	480
		100 °C		390	390	430	430	430	380	380
Residual magnetic flux density	B_r	23 °C	mT	110	130	110	110	110	150	130
Coercivity	H_c	23 °C	A/m	13	13	10	10	10	30	25
Relative loss factor	$\tan\delta/\mu_i$	0.1 MHz	$\times 10^{-6}$	<5	<5	<3	<3	<3	<5	<4
Core loss	200 mT	25 kHz	kW/m ³	—	—	90	75	60	—	—
				—	—	75	60	50	—	—
				65	80	60	50	40	—	—
				55	65	50	40	45	—	—
				80	55	40	45	55	—	—
		100 kHz	kW/m ³	—	—	650	550	450	—	—
				—	—	550	450	350	—	—
				450	550	450	350	300	—	—
				400	450	350	300	325	—	—
				500	400	300	325	375	—	—
	50 mT	500 kHz	kW/m ³	—	—	—	—	—	100	50
				—	—	—	—	—	80	40
				—	—	—	—	—	100	50
		1 MHz	kW/m ³	—	—	—	—	—	400	200
				—	—	—	—	—	400	200
				—	—	—	—	—	500	250
Temperature coefficient	$\alpha_{\mu r}$	20 °C~80 °C	$\times 10^{-6}$	8	8	8	8	8	8	8
Curie temperature	T_c	—	°C	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200
Resistivity	ρ	—	$\Omega \cdot m$	3	3	2	2	2	5	5
Apparent density	d	—	$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	4.8	4.8

Note: 1) The values were obtained with toroidal cores (FR25/15/5).

2) The values were obtained at 23 ± 2 °C unless otherwise specified.

3) Initial permeability was measured at 10kHz, 0.8A/m.

جدول ۲-۹- بازه های فرکانسی فریت های نیکل روی و منگنز روی جانشانی شده با کاتیون های دو ظرفیتی

مرجع	ناحیه فرکانسی (Hz)	ضریب تراوایی مغناطیس ی μ	نیروی وادارندگی H_c (Oe)	مغناطش M (emu/g)	کاتیون جانشانی شده	نوع سنتز	نوع ساختار	فرمول شیمیایی	
[۱۷]	$M\backslash$		0.7		Cu	همرسوبی	اسپینلی	$Ni_xCu_yZn_{1-x-y}Fe_2O_4$	۱
[۱۸]	10-10M	$24=0.18$ ۲۰			Mg	خوداحتراقی اتوماتیک	اسپینلی	$(Ni_{0.25}Cu_{0.2}Zn_{0.55})Fe_2O_4$	۲
[۱۹]	1-100M	$61=0.10$		۷۸.۹۴۱۱ ۸	Li	خوداحتراقی اتوماتیک	اسپینلی	$Li_xCu_{0.1}Co_{0.1}Zn_{0.8-2x}F_{xO_4.e_2}$	۳
[۲۰]	1-100M		۲۱.۱۵۲	۴۵.۶۲۲	Cd	احتراق مایکروویو	اسپینلی	$Zn_{1-x}Cd_xFe_2O_4$	۴
[۲۱]	1-100M		۷۱.۲		La-Ni	همرسوبی	اسپینلی	$Ni_{0.4}La_{0.1}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	۵
[۲۱]	1-100M		۱۶۹.۴		Mn-Ni	همرسوبی	اسپینلی	$Ni_{0.4}Mn_{0.1}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	۶
[۲۱]	1-100M		۱۸۵.۳		Co-Ni	همرسوبی	اسپینلی	$Ni_{0.4}Co_{0.1}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	۷
[۲۱]	1-100M		۱۷۹.۴		Cu-Ni	همرسوبی	اسپینلی	$Ni_{0.4}Cu_{0.1}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	۸
[۲۲]	1	۸۰۰	۸۱.۰۹	۶۷.۶۲	$0.5 Ni=$	احتراقی	اسپینلی	$Ni_xZn_{1-x}Fe_2O_4$	۹
[۲۳]	1M	۵۸۰	۸۰		Mg	سرامیکی	اسپینلی	$Mg_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	۱۰
[۲۳]	۱ MHz	۶۹۰	۸۰		Mg-Cu	سرامیکی	اسپینلی	$Mg_{0.2}Cu_{0.2}Zn_{0.62}Fe_{1.98}O_{3.99}$	۱۱
[۲۴]	10k-10M				Mg-Mn-In	سرامیکی	اسپینلی	$Mg_{0.9}Mn_{0.1}In_xFe_{2-x}O_4$	۱۲
[۲۵]	k-10M۱۰				Mg-Mn-Cr	سرامیکی	اسپینلی	$Mg_{0.9}Mn_{0.1}Cr_yFe_{2-y}O_4$	۱۳

با توجه به بررسی های اشاره شده در فوق و این موضوع که هسته های فریتی در ترانسفورماتورهای قدرت قابل کاربرد می باشند، بازه فرکانسی مورد نظر در این خصوص بیش از ۴۰۰ kHz در نظر گرفته شده است که این بازه فرکانسی توسط دستگاه LCR meter که در بخش ۲-۹ به آن اشاره شده است اندازه گیری خواهد شد. لازم به ذکر است دستگاه LCR meter مدل HIOKI3522 جهت اندازه گیری اندوکتانس L در پژوهشگاه نیرو موجود است.

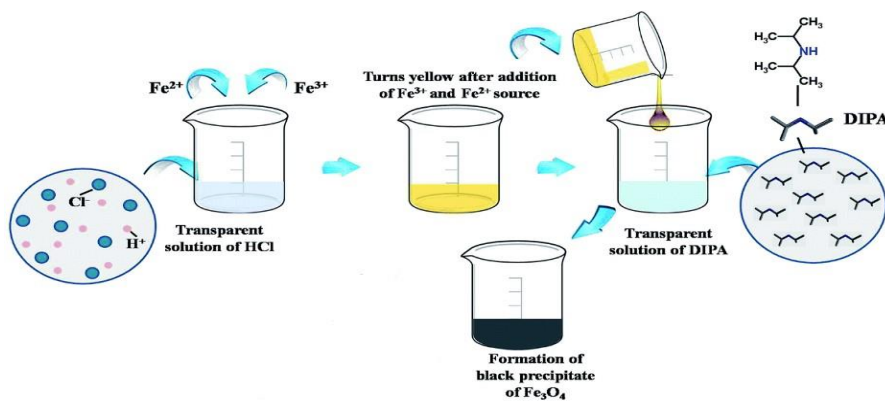
۲-۳- تعیین روش سنتز و نوع ماده بهینه جهت بهره وری توان بالای هسته های فریتی

۲-۳-۱- تعیین روش سنتز

به منظور تعیین روش سنتز مورد نظر برای ساخت نانو ذرات فریتی و پس از آن هسته مورد نظر، با استفاده از مطالعات انجام شده در بخش های ۱-۱ و ۶-۱ و ۸-۱ فاز اول پروژه، از میان روش های مورد نظر برای سنتز نانو ذرات فریتی، روش های ذیل بیشترین کاربرد را داشته است که در ذیل مزایای استفاده از این روش ها نیز ذکر شده است.

۲-۳-۱-۱- روش هم رسوبی

روش هم رسوبی یکی از قدیمی ترین روش های ساخت نانوذرات است. در این روش دو یا چند ماده به طور همزمان رسوب می کنند که این رسوب شامل مخلوطی از فرآورده های حاصل از واکنش بین واکنش گر ها است. در این روش برای تهیه نمونه، معمولاً از نمک ها از جمله مواد کلریدی استفاده می شود. روش هم رسوبی به دلیل قابلیت کنترل مناسب بر پارامترهای موثر رشد نانوذرات همانند زمان، دما، سرعت همزدن، غلظت واکنش گر ها، pH و غیره، روشی مناسب ارزیابی می شود. از مزایای این روش می توان به ساده و ارزان بودن [۲۶-۲۸]، سنتز سریع، کنترل اندازه ذرات، توزیع یکنواخت اندازه نانوذرات و تشکیل فاز در نمونه بدون انجام عملیات حرارتی [۲۹-۳۰] اشاره کرد. همچنین می توان در حجم کم واکنش مقدار زیادی نانوذره ساخت [۳۱-۳۴]. نمونه ای از فرآیند سنتز نانوذرات به این روش در شکل زیر نشان داده شده است.

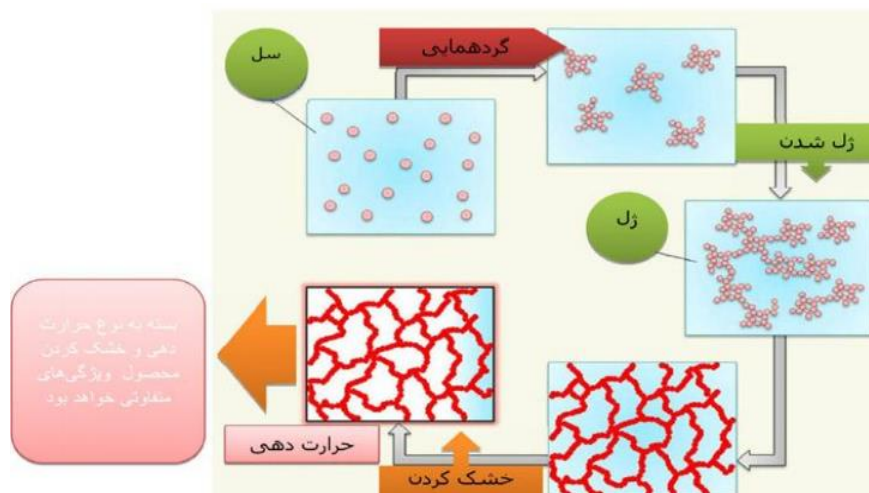


شکل ۲-۷- فرآیند سنتز نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 به روش هم رسوبی [۳۴].

۲-۳-۱-۲- روش سل-ژل

فرآیند سل-ژل یک روش شیمیایی تر، برای سنتز انواع نانو ساختار ها به ویژه نانو ذرات اکسید فلزی است. در این روش پیش ماده مولکولی (معمولاً آلکوکسید فلزی) در آب یا الکل حل شده و با حرارت و همزدن در اثر هیدرولیز/الکلیز به ژل تبدیل می شود. حال باید ژل را خشک کرد که برای محلول الکلی می تواند با سوختن الکل انجام پذیرد.

پس از خشک کردن ژل آن را پودر می کنند و پودر حاصله را جهت کلسینه شدن^۱ حرارت می دهند [۲۷]. روش سل-ژل روش ارزانی است و به دلیل دمای پایین واکنش می توان کنترل مناسبی بر ترکیب شیمیایی محصولات داشت. این روش هم اکنون می تواند نانو ذراتی با کیفیت بالا (ذرات با اندازه یکسان) را در حجمی بالا تولید کند. این روش قادر است همزمان دو یا چند نوع نانو ذره را با هم تولید کند. از دیگر دلایل محبوبیت این روش، سنتز در دمای پایین، ساده بودن ابزار سنتز آن، تهیه محصولاتی با خلوص بالا، راندمان تولید بسیار بالا، تولید قطعات اپتیکی با اشکال پیچیده و... است [۲۷]. طرح واره ای از مراحل سل ژل در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۸- طرح واره ای از مراحل سل-ژل [۲۷].

۲-۳-۱- روش خوداحتراقی

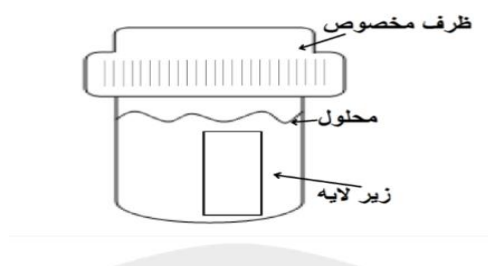
این روش جزء روش های سل-ژل است. در این روش معمولاً ماده حل شونده در حلالی حل شده است که خود ماده سوختنی هستند و این حلال چنانچه در حین سوختن ازدیاد حجم زیادی داشته باشد به صورت احتراق عمل می نماید [۳۵]. پس از احتراق ماده حل شده به صورت جامد در ته ظرف رسوب می نماید. در روش احتراق محلولی تا لحظه آخر هیچگونه ژلی مشاهده نمی شود. روش سنتز احتراقی، به دلیل تولید محصولی همگن با درجه خلوص بالا و پایین بودن نسبی دما و زمان آن، یکی از بهترین روش های تولید نانوذرات است. در این روش برای تهیه نمونه معمولاً از مواد اولیه نیتريتی استفاده می شود.

۲-۳-۱-۴ روش هیدروترمال

این روش ابزاری قدرتمند در تولید نانو مواد محسوب می شود، زیرا از نظر شرایط ملایم و مناسب برای تولید مواد پیشرفته (از تک بلور توده ای تا ذرات خیلی ریز و در نهایت نانو بلور یا نانو ذرات) است. فرایند هیدروترمال در دمایی بالاتر از دمای اتاق ۳۵۰-۱۰۰ درجه سانتیگراد و در فشارهای بالا (۱۵ MPa) موثر است [۳۵]. از مزایای این روش می توان به استفاده از ظرف واکنش بزرگتر، ذخیره انرژی، سادگی، قیمت ارزان، تقریباً بدون آلودگی، کنترل هسته زایی بهتر، سرعت بالای واکنش، دمای واکنش پایین و... اشاره کرد. پودرهای تولید شده به وسیله ی فرایند هیدروترمال آگلومره نبوده، با این حال دانه ریز، با خلوص بالا، مورفولوژی کنترل شده، دارای توزیع اندازه ذرات باریک و شامل تک بلورها می باشد [۳۵]. در روش هیدروترمال محلول آبی از مواد اولیه، معمولاً اکسیدها، هیدروکسیدها، اسیدها، بازها و یا نمک های دیگر فلزات را در داخل اتوکلاو قرار می دهند. مخلوط آبی در دمای واکنش مورد نظر تحت فشار،

¹. Calcination

حرارت داده می‌شود و از واکنش مواد اولیه طی فرایند انحلال و رسوب گیری مجدد، محصول تشکیل می‌شود. پارامترهای موثر بر اندازه ذرات در این روش دما، pH، فشار، زمان و... می‌باشند [۳۵]. نحوه چیدمان وسایل مورد نیاز برای سنتز در روش هیدروترمال در شکل ذیل نشان داده شده است.



شکل ۲-۹- چیدمان وسایل مورد نیاز برای سنتز به روش هیدروترمال [۳۵].

طبق بررسی های بعمل آمده در این پژوهش از روش های سنتز هم رسوبی و خوداحتراقی استفاده خواهد شد.

۲-۳-۲- تعیین نوع ماده بهینه

طبق بررسی های انجام شده در بخش های ۱-۱، ۵-۱ و ۷-۱ فاز اول پروژه در خصوص نوع ماده هسته فریتی قابل کاربرد در ترانسفورماتور، فریت های نیکل روی و منگنز روی در ترانسفورماتورها قابل کاربرد بوده اند که جانشانی این فریت ها با کاتیون های دو ظرفیتی مس، کبالت، منگنز، منیزیم نیز ویژگی های ساختاری و مغناطیسی خوبی را از خود نشان داده است که می تواند در هسته ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت مورد استفاده قرار گیرد. در جدول ۲-۹ نیز این ترکیبات نشان داده شده است. بنابراین با استفاده از نتایج بررسی های انجام شده، مواد ذیل به عنوان مواد بهینه جهت تهیه هسته فریتی ترانسفورماتور با مشخصات مربوطه تعیین شد:

۱- نانوذرات فریت نیکل روی با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ که در آن x مقادیر ۰، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ و y مقادیر ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می کند که این عناصر در جدول ۱۰ نشان داده شده است. این نانوذرات به روش خوداحتراقی با مواد اولیه ذکر شده در جدول ۲-۱۰ سنتز می شوند.

جدول ۲-۱۰- واحدهای فرمولی نانو ذرات فریت نیکل روی با جانشانی های گوناگون عناصر کاتیونی [۳۶]

x	y	ترکیب
-	-	$Ni Fe_2O_4$
-/۳	-	$Ni_{0.7}(Zn)_{0.3}Fe_2O_4$
-/۵	-	$Ni_{0.5}(Zn)_{0.5}Fe_2O_4$
-/۷	-	$Ni_{0.3}(Zn)_{0.7}Fe_2O_4$
۱	-	$Zn Fe_2O_4$
-/۳	-/۴	$Ni_{0.7}(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})_{0.3}Fe_2O_4$
-/۵	-/۴	$Ni_{0.5}(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})_{0.5}Fe_2O_4$
-/۷	-/۴	$Ni_{0.3}(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})_{0.7}Fe_2O_4$
۱	-/۴	$(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2}) Fe_2O_4$
-/۳	-/۸	$Ni_{0.7}(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})_{0.3}Fe_2O_4$
-/۵	-/۸	$Ni_{0.5}(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})_{0.5}Fe_2O_4$
-/۷	-/۸	$Ni_{0.3}(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})_{0.7}Fe_2O_4$
۱	-/۸	$(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4}) Fe_2O_4$
-/۳	۱	$Ni_{0.7}(Mg_{0.5}Cu_{0.5})_{0.3}Fe_2O_4$
-/۵	۱	$Ni_{0.5}(Mg_{0.5}Cu_{0.5})_{0.5}Fe_2O_4$
-/۷	۱	$Ni_{0.3}(Mg_{0.5}Cu_{0.5})_{0.7}Fe_2O_4$
۱	۱	$(Mg_{0.5}Cu_{0.5}) Fe_2O_4$

۲- نانوذرات فریت منگنز روی با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ که در آن مقادیر x برابر با ۰، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و مقادیر y برابر با ۰، ۰/۵ و ۱ را گزینش می کند که این عناصر در جدول ۲-۱۱ نشان داده شده است. این نانوذرات به روش هم رسوبی با مواد اولیه ذکر شده در جدول ۲-۱۱ سنتز می شوند.

جدول ۲-۱۱- واحدهای فرمولی نانو ذرات فریت منگنز روی با جانشانی‌های گوناگون عناصر کاتیونی [۳۷]

X	Y	فرمول استوکیومتری
۰	۰	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$
	۰/۵	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$
	۱	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$
۰/۱	۰	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni]_{0.1}Fe_2O_4$
	۰/۵	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.1}Fe_2O_4$
	۱	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Co]_{0.1}Fe_2O_4$
۰/۳	۰	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Ni]_{0.3}Fe_2O_4$
	۰/۵	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.3}Fe_2O_4$
	۱	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Co]_{0.3}Fe_2O_4$
۰/۵	۰	$Zn_{0.5}[Ni]_{0.5}Fe_2O_4$
	۰/۵	$Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co]_{0.5}Fe_2O_4$
	۱	$Zn_{0.5}[Co]_{0.5}Fe_2O_4$

۳- نانوذرات فریت منگنز روی با فرمول استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ که در آن x و y هر دو، مقدارهای ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می کند که این عناصر در جدول ۲-۱۲ نشان داده شده است. این نانوذرات به روش هم رسوبی با مواد اولیه ذکر شده در جدول ۲-۱۳ سنتز می شوند.

جدول ۲-۱۲- واحدهای فرمولی نانو ذرات فریت منگنز روی با جانشانی‌های گوناگون عناصر کاتیونی [۳۸]

y \ x	0	0.4	0.8	1
0	$ZnFe_2O_4$	$ZnFe_{1.6}[Ni_{0.4}Cu_{0.6}]_{0.4}O_4$	$ZnFe_{1.2}[Ni_{0.8}Cu_{0.2}]_{0.8}O_4$	$ZnFeNiO_4$
0.4	$Zn_{0.6}Fe_2[Co_{0.4}Cu_{0.6}]_{0.4}O_4$	$Zn_{0.6}Fe_{1.6}[(Mn_{0.4}Ni_{0.6})_{0.4}(Co_{0.4}Cu_{0.6})_{0.6}]_{0.8}O_4$	$Zn_{0.6}Fe_{1.2}[(Mn_{0.4}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.4}Cu_{0.6})_{0.2}]_{1.2}O_4$	$Zn_{0.6}Fe(Mn_{0.4}Ni_{0.6})_{1.4}O_4$
0.8	$Zn_{0.2}Fe_2[Co_{0.8}Cu_{0.2}]_{0.8}O_4$	$Zn_{0.2}Fe_{1.6}[(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{0.4}(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.6}]_{1.2}O_4$	$Zn_{0.2}Fe_{1.2}[(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.2}]_{1.6}O_4$	$Zn_{0.2}Fe(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{1.8}O_4$
1	Fe_2CoO_4	$Fe_{1.6}[(Mn)_{0.4}(Co)_{0.6}]_{1.4}O_4$	$Fe_{1.2}[(Mn)_{0.8}(Co)_{0.2}]_{1.8}O_4$	$FeMn_2O_4$

جدول ۲-۱۳- مواد اولیه نمونه ها [۳۶-۳۸]

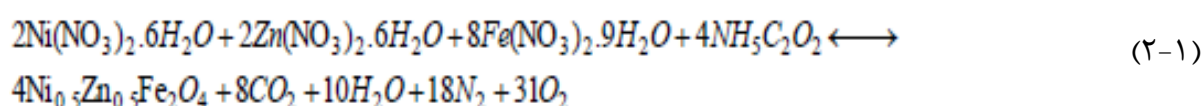
نمونه شماره ۱	نمونه شماره ۲	نمونه شماره ۳
$Fe(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	$ZnCl_2 \cdot 4H_2O$
$Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	$ZnCl_2$	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$
$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	$NiCl_2 \cdot 6H_2O$
$Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	$CoCl_2 \cdot 6H_2O$
$NH_5C_2O_2$	$NaOH$	$CuCl_2 \cdot 2H_2O$
		$NaOH$

۲-۴- بررسی و تعیین تجهیزات و امکانات و راهکار چگونگی ساخت هسته ترانسفورماتور متناسب با شرایط کشور

هسته فریتی با توجه به عملیاتی که در ذیل توضیح داده شده است، پس از تهیه نانوپودرهای فریتی ساخته می شود. برای تهیه نانوپودرهای فریتی اشاره شده در بخش ۲-۳ این گزارش، از وسایل آزمایشگاهی مناسب استفاده شد. پس از تهیه نانوپودرها برای ساخت هسته فریتی از مواد آلی، قالب فلزی، دستگاه پرس، عملیات تفجوشی و سیم پیچی آن استفاده خواهد شد. در ذیل نحوه ساخت هسته در دو مرحله به صورت نانوپودر و پس از آن پرس نانوپودرها در قالب مورد نظر توضیح داده شده است.

۲-۴-۱- نحوه تهیه نانوپودرهای فریتی

الف- برای تهیه نانوذرات فریت نیکل روی به روش خوداختراقی با استفاده از فرمول استوکیومتری ذیل، از فرآیند ذکر شده در روندنمای شکل ۲-۱۰ برای تهیه نانو پودرهای فریتی مورد نظر استفاده شد [۳۶].

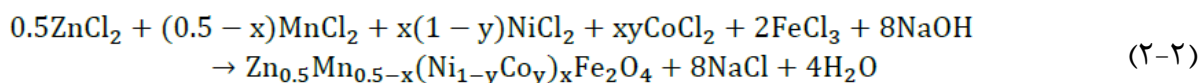


در این روش با استفاده از آب مقطر دوبار یونیزه شده محلول هایی با مولاریته مشخص از گلايسين و هم چنین نیترات های مواد اولیه تهیه گردید. به منظور همگن شدن محلول، محلول به مدت یک ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد با همزن مغناطیسی هم زده شد. سپس محلول به مدت یک ساعت در ۱۵۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شد تا آب محلول به آرامی تبخیر شود. به منظور تبخیر حلال باقی مانده، محلول به مدت دو ساعت دیگر در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد حرارت دهی شد (مرحله احتراق). برای تکمیل فرایند خشک شدن، ژل به دست آمده در دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد به مدت دوساعت در آن حرارت داده شد. در نهایت نانوذرات سیاه رنگ که همان ژل های سوخته است، به دست آمد. نانوذرات حاصل به مدت ۴ ساعت در کوره در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شد. در این عمل ساختار بی شکل به بلورین تبدیل می شود. در نهایت، نانوذرات سنتز شده نهایی در ظروف مناسب ریخته شد تا برای آزمون های مختلف استفاده شود.



شکل ۲-۱۰- روندنمای تهیه نانوذرات فریت نیکل روی [۳۶].

ب- برای تهیه نانوذرات فریت منگنزروی به روش هم‌رسوبی با استفاده از فرمول استوکیومتری ذیل، از فرآیند ذکر شده در روندنمای شکل ۲-۱۱ برای تهیه نانو پودرهای فریتی مورد نظر استفاده شد.



در این روش، ابتدا محلول‌هایی با مولاریته مشخص از سود و مواد اولیه کلریدی با آب مقطر به عنوان حلال تهیه گردید. محلول کلرید آهن بر روی گرمکن- همزن مغناطیسی قرار گرفته و محلول‌های دیگر به آن اضافه شدند و ترکیب حاصل تا رسیدن به دمای $80^\circ C$ ، با سرعت ثابت هم زده شد. محلول سود را به طور جداگانه روی گرمکن- همزن گذاشته و با سرعت ثابت تا دمای $80^\circ C$ هم زده شد. پس از رسیدن دمای دو محلول به $80^\circ C$ ، به یکباره محلول حاوی مواد کلریدی به محلول سود اضافه شد. در این حالت یک رسوب قهوه‌ای تیره در pH برابر ۱۲ تشکیل شد. برای تشکیل همگن شدن ذرات، هم‌زدن محلول رسوب به مدت یک ساعت با سرعت ثابت ادامه داده شد. پس از آن، بشر را از روی گرم‌کن- همزن برداشته تا رسوب تشکیل شده ته نشین شود. برای اینکه یون‌های آزاد کلر و سدیم موجود در رسوب از بین برود، باید رسوب‌های حاصل از واکنش چندین مرتبه با آب مقطر شسته شوند. برای شستشو، پس از ته نشین شدن رسوب‌های تشکیل شده، آب روی رسوب تخلیه می‌گردد و این عمل چندین مرتبه تکرار می‌شود تا pH محلول

به حدود ۷ برسد. برای خشک کردن رسوب‌های حاصله، آن‌ها در آون قرار داده شدند. رسوب‌های خشک به دست آمده با هاون سائیده شدند تا نانوپودر همگن و یکنواختی به دست آید.



شکل ۲-۱۱- روندنمای تهیه نانوذرات فریت منگنز-روی [۳۷].

۲-۴-۲- نحوه تهیه هسته

به منظور ساخت هسته ترانسفورماتور، نانوپودرهای فریتی تهیه شده که روش سنتز و نوع آن در بخش ۲-۳ توضیح داده شد به انضمام مواد آلی اشاره شده در ذیل در قالب فلزی ریخته شده و تحت پرس و عملیات تفجوشی قرار می‌گیرند. در ذیل جزئیات این عملیات توضیح داده شده است:

الف- اضافه نمودن مواد آلی

به منظور ساخت هسته ترانسفورماتور، مقداری مواد آلی از جمله پلی ونیل الکل^۱ به نانوپودرهای فریتی اضافه می‌گردد. این مواد باعث افزایش توانایی شکل دادن به نانوپودرها می‌گردد. همچنین به عنوان مواد چسبنده و نرم کننده شناخته می‌شوند. این مواد نیز در میزان استحکام شکل نانوپودرها قبل از مرحله تفجوشی نیز نقش دارند. این ماده آلی ضمن افزایش عمر مفید قالب، با کم کردن اصطکاک از ترک خوردن نمونه در هنگام خروج از قالب ممانعت به عمل می‌آورد.

ب- قالب فلزی

پس از اضافه نمودن مواد آلی به نانوپودرها این ترکیب در قالب فلزی ریخته می‌شود. قالب فلزی با توجه به نوع کاربرد هسته و شکل مورد نظر، از جنس فولاد طراحی و ساخته می‌شود. چنانچه در نظر باشد هسته‌های مربوطه به صورت انبوه تولید شوند در این صورت قالب‌های مورد نظر از جنس کاربید تنگستن ساخته می‌شوند تا فشار وارد شده به

^۱ PVA

نانوپودرهای داخل قالب یکنواخت تر گردد [۳۹]. چنانچه قالب به صورت Toriod و یا حلقوی مورد نظر باشد در این صورت هسته های حلقوی با قطر داخلی و خارجی ثابت و ضخامت های متغییر می توانند ساخته شوند. در این حالت با فشردن نانوپودرهای فریتی توسط دستگاه پرس اصطکاک بین سطح خارجی پودر و دیواره های داخلی قالب زیاد شده و در نتیجه فشار در تمام طول نانوپودرها یکسان نخواهد بود. به قسمت هایی از نانوپودرها که به جدار قالب نزدیک تر هستند نسبت به سایر نقاط فشار بیشتری وارد می شود. عدم یکنواخت بودن در نقاط مختلف موجب می گردد تا نانوپودرها در مرحله تفجوشی به لحاظ چگالی و گشتاور مغناطیسی یکنواخت نباشند. برای کاهش یکنواختی، می بایست دیواره های قالب مورد نظر کاملاً صیقلی شود و فشار مورد نظر از بالا به پایین به طور همزمان به قالب اعمال گردد.

ج- دستگاه پرس هیدرولیک

به منظور اعمال فشار بر روی قالب مورد نظر از دستگاه پرس هیدرولیک استفاده می شود. کنترل این دستگاه توسط یک فشارسنج و دو اهرم انجام می شود. بسته به جنس قالب و درجه صیقلی بودن دیواره های آن و ارتفاع نمونه، مقدار فشار حدود ۳۰۰-۵۰ مگاپاسکال یا حدود ۳-۰/۵ تن بر سانتی متر مربع تغییر می کند. هر تن بر سانتی متر مربع معادل با ۱۰ کیلوگرم بر میلی متر مربع است. اعمال فشار می تواند آهسته و یا سریع باشد ولی کاهش فشار از روی نانوپودرهای فشرده شده بهتر است به آرامی صورت گیرد.

به منظور استفاده از دستگاه پرس، قالب فلزی مورد نظر توسط الکل جهت رفع تمامی آلودگی ها کاملاً شسته شده و دیواره داخلی آن نیز با گلیسیرین به عنوان روانساز آغشته می گردد. میزان مشخص از نانوپودرها به همراه مواد آلی ترکیب شده با آن در قالب ریخته شده و تحت عملیات پرس قرار می گیرد. در این مرحله و قبل از عملیات تفجوشی نمونه پرس شده بسیار شکننده می باشد. نمایی از دستگاه پرس هیدرولیک در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۲- نمایی از دستگاه پرس هیدرولیک.

د- عملیات تفجوشی

به منظور جداسازی پلی ونیل الکل و گلیسیرین از نانوپودرهای فشرده شده، این نانوپودرها در کوره الکتریکی با قابلیت اعمال شیب دمایی قرار می گیرند. بیشینه دمایی این کوره ها حدود ۱۴۰۰ درجه سانتی گراد است. مقدار و آهنگ تغییرات دما و زمان دقیق در عملیات تفجوشی با توجه به جنس نمونه ها تعیین می گردد. با رشد دانه های کریستالی فضای خالی درون نمونه کمتر شده و چگالی افزایش می یابد. اگر رشد دانه های کریستالی در اثر افزایش دما به سرعت

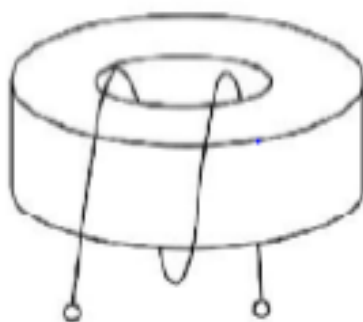
و در زمان کوتاهی رخ دهد حفره ها و ناخالصی ها در داخل دانه های کریستالی قرار می گیرند که منجر به کاهش نفوذپذیری مغناطیسی و افزایش تلفات می شود. چنانچه با افزایش تدریجی دما، رشد دانه های کریستالی به آرامی صورت پذیرد حفره ها و ناخالصی ها به سمت دیواره ها و مرزهای دانه ها حرکت نموده و بین دانه ها قرار می گیرند. با افزایش چگالی نمونه، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و پسماند مغناطیس افزایش یافته و نیروی پسماندزدای مغناطیسی کاهش می یابد [۳۹]. نمونه ای از هسته های حلقوی پس از عملیات تفجوشی در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۳- هسته های حلقوی پس از عملیات تفجوشی

ز- سیم پیچی هسته

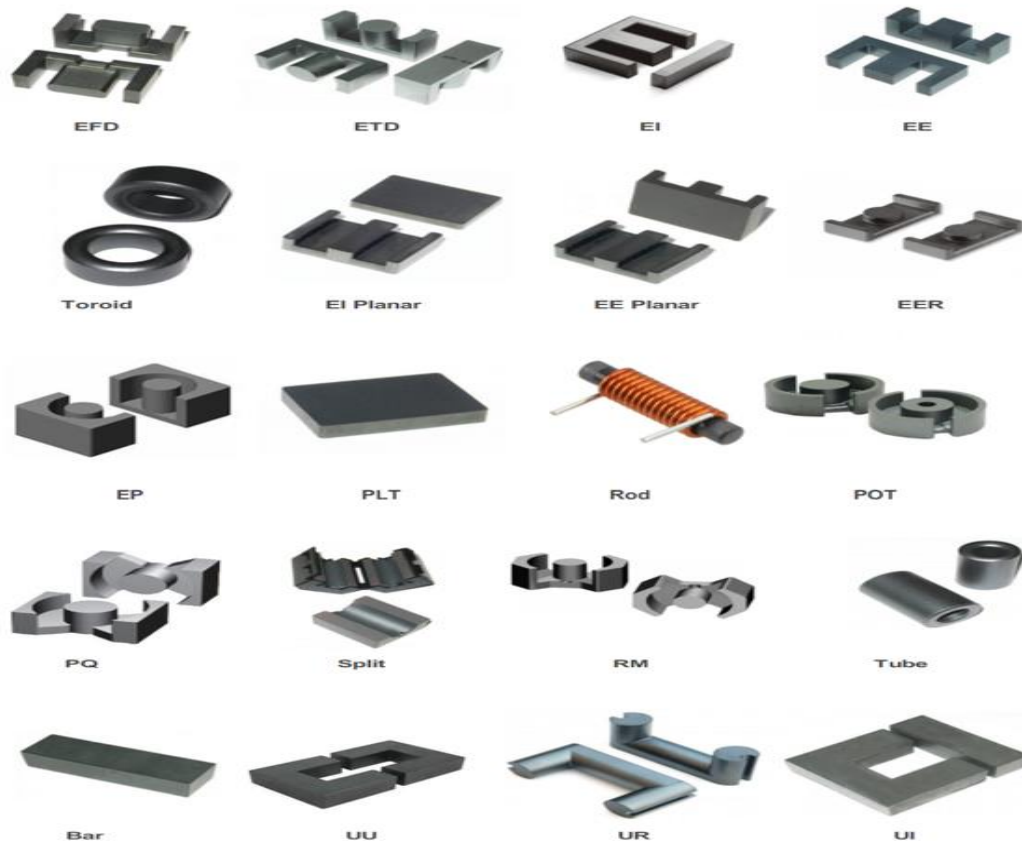
پس از عملیات تفجوشی نمونه ساخته شده بنا به نوع شکل مورد نظر، توسط سیم مسی روکش می شود که به این نمونه ساخته شده هسته گویند. در هسته حلقوی دو طرف حلقه با دورهای مساوی سیم پیچی می گردد که طرحواره ای از آن در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴- طرح-واره ای هسته حلقوی سیم پیچی شده.

۲-۵- بررسی اثر اشکال مختلف هسته های فریتی در افزایش بهره وری و تعیین شکل مورد نظر

در بخش ۱-۳ فاز اول پروژه، اشکال مختلف هسته های فریتی، مورد بحث قرار گرفت که مهم ترین اشکال بر اساس شکل ظاهری آن ها در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است [۴۰ و ۴۱].



شکل ۲-۱۵- انواع هسته های فریتی [۴۰ و ۴۱].

با توجه به اینکه هریک از این اشکال هسته های فریتی بنا به ظرفیت و نوع سیستم مورد استفاده برای کاربردهای متفاوتی استفاده می شوند در ذیل موارد کاربرد و ویژگی های آن مورد بحث قرار گرفته است. همان گونه که در جداول ۱۴ تا ۱۷ مشاهده می شود هسته های فریتی علاوه بر ترانسفورماتورها، در صنعت برق کاربردهای مختلفی دارند که در بخش ۲-۱ به این موارد اشاره شده است. با توجه به اینکه موضوع این پروژه ساخت هسته فریتی ترانسفورماتور است بنابراین، اشکالی از هسته های فریتی که در ترانسفورماتورها به ویژه ترانسفورماتورهای قدرت قابل کاربرد هستند مورد بررسی قرار گرفته است.

الف) طبق جدول ۲-۱۴ در ترانسفورماتورهای قدرت، به طور معمول از هسته های فریتی با اشکال EI, U, E, pot, Pot, E, U, EI, UI EP, RS, DS, PQ, Toroid and Planar استفاده می شود. در ترانسفورماتورهای پهن باند از EI, U, E, Pot, UI, RM, EP and toroid و در ترانسفورماتورهای باریک باند از EI, U, E, Pot, UI, RM, EP and toroid استفاده می شود [۴۲].

جدول ۲-۱۴ - اشکال مختلف فریت ها قابل کاربرد در صنعت برق [۴۲]

FERRITE APPLICATIONS			
APPLICATIONS	DESIRED PROPERTIES	PREFERRED MATERIALS	AVAILABLE SHAPES
Broadband Transformers	Low loss, high μ . Good frequency response.	J, W	Pot cores, Toroids, E, U & I cores, RM cores, EP cores
Common Mode Chokes	Very high μ (permeability).	J, W	Toroids, E Cores
Converter and Inverter Transformers	Low losses, high saturation.	F, L, P, R, T	Toroids, E, U & I cores, Pot cores, RS cores, Planar cores
Differential Mode Inductors	Low losses, high temperature stability, good stability across load conditions.	F, P, R, T	Gapped Pot cores, EP cores, E cores, RM cores, Planar cores, PQ cores
Linear Filters and Sensors	Good loss factor, linearity and temperature linearity at low drive level.	C, E, V	Pot cores, Toroids
Narrow Band Transformers	Moderate Q, high μ , high stability.	F, J	Pot cores, Toroids, RM cores, EP cores
Noise Filters	High μ , good frequency response.	J, W	Toroids
Power Inductors	Low losses at high flux densities and temperatures. High saturation. Good stability across load conditions.	F, L, P, R, T	Pot cores, E cores, PQ cores, RM cores, Planar cores
Power Transformers	High μ and low losses at high flux densities and temperatures. High saturation. Low exiting currents.	F, L, P, R, T	Ungapped Pot cores, E, U & I cores, Toroids, EP cores, RS cores, DS cores, PQ cores, Planar cores
Pulse Transformers	High μ , low loss, high B saturation.	J, W	Toroids
Telecom Inductors	Low losses, high temperature stability, good stability across load conditions.	F, P, R, T	Pot cores, EP cores, E cores, RM cores, Planar cores

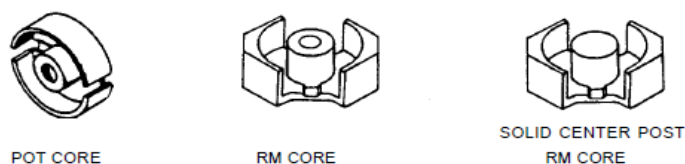
ب) طبق جدول ۲-۱۵ در ترانسفورماتور های قدرت، به طور معمول از هسته های فریتی با اشکال pot, E, U, EI Rods, Toroid and Planer استفاده می شود. در ترانسفورماتورهای پهن باند از EC,ETD,EFD,EP,RS, DS,PQ, WBS, toroid استفاده می شود [۴۳].

جدول ۲-۱۵ - هسته های فریتی قابل کاربرد [۴۳]

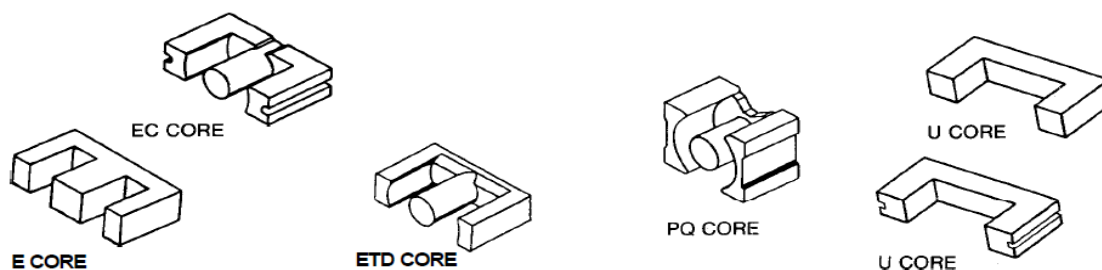
Ferrite material survey

MAIN APPLICATION AREA	FREQUENCY RANGE (MHz)	MATERIAL	μ_i at 25 °C	B_{sat} (mT) at 25 °C (1200 A/m)	T_c (°C)	ρ (Ω m)	FERRITE TYPE	AVAILABLE CORE SHAPES
Telecom filters Proximity sensors	< 0.1 0.2 - 2 < 0.2	3B46	3800	≈ 545	≥ 255	≈ 10	MnZn	RM, P, PT, PTS, EP, E, Planar ER, RM/I, RM/ILP, PH
		3B7	2300	≈ 440	≥ 170	≈ 1	MnZn	
		3D3	750	≈ 380	≥ 200	≈ 2	MnZn	
		3H3	2000	≈ 360	≥ 160	≈ 2	MnZn	
Wideband signal transformers Pulse transformers Delay lines	< 0.2	3E27	6000	≈ 430	≥ 150	≈ 0.5	MnZn	RM, P, PT, PTS, EP, EP/LR, EPX, E, Planar ER, RM/I, RM/ILP, Toroids
		3E28	4000	≈ 440	≥ 145	≈ 1	MnZn	
		3E5	10000	≈ 380	≥ 125	≈ 0.5	MnZn	
		3E55	10000	≈ 370	≥ 100	≈ 0.1	MnZn	
		3E6	12000	≈ 390	≥ 130	≈ 0.1	MnZn	
		3E7	15000	≈ 390	≥ 130	≈ 0.1	MnZn	
		3E8	18000	≈ 380	≥ 100	≈ 0.1	MnZn	
		3E9	20000	≈ 380	≥ 100	≈ 0.1	MnZn	
		3C30	2100	≈ 500	≥ 240	≈ 2	MnZn	
		3C34	2100	≈ 500	≥ 240	≈ 5	MnZn	
Line output transformers (LOT) Power transformers Power inductors General purpose transformers and inductors	< 0.2	3C81	2700	≈ 450	≥ 210	≈ 1	MnZn	UR E, EI, Planar E, EC, EFD, EP, ETD, ER, Planar ER, U, RM/I, RM/ILP, P, P/I, PT, PTS, PM, PQ, Toroids (gapped), Bobbin cores
		3C90	2300	≈ 470	≥ 220	≈ 5	MnZn	
	< 0.3	3C91	3000	≈ 470	≥ 220	≈ 5	MnZn	
		3C92	1500	≈ 520	≥ 280	≈ 5	MnZn	
	< 0.3	3C93	1800	≈ 500	≥ 240	≈ 5	MnZn	
		3C94	2300	≈ 470	≥ 220	≈ 5	MnZn	
	< 0.3	3C95	3000	≈ 530	≥ 215	≈ 5	MnZn	
		3C96	2000	≈ 500	≥ 240	≈ 5	MnZn	
	0.2 - 0.5	3F3	2000	≈ 440	≥ 200	≈ 2	MnZn	
		3F35	1400	≈ 500	≥ 240	≈ 10	MnZn	
	1 - 2	3F4	900	≈ 410	≥ 220	≈ 10	MnZn	
		3F45	900	≈ 420	≥ 300	≈ 10	MnZn	
	2 - 4	3F5	650	≈ 380	≥ 300	≈ 10	MnZn	
		4F1	80	$\approx 320^{(1)}$	≥ 260	$\approx 10^5$	NiZn	
	4 - 10	3B1	900	≈ 380	≥ 150	≈ 0.2	MnZn	
		3S1	4000	≈ 400	≥ 125	≈ 1	MnZn	
	Wideband EMI-suppression Wideband transformers Balun transformers	3S3	350	≈ 320	≥ 225	$\approx 10^6$	MnZn	
		3S4	1700	≈ 320	≥ 110	$\approx 10^3$	MnZn	
		3S5	3800	≈ 545	≥ 255	≈ 10	MnZn	
		4A11	850	≈ 340	≥ 125	$\approx 10^5$	NiZn	
		4A15	1200	≈ 350	≥ 125	$\approx 10^5$	NiZn	
		4A20	2000	≈ 260	≥ 100	$\approx 10^5$	NiZn	
		4B1	250	$\approx 360^{(1)}$	≥ 250	$\approx 10^5$	NiZn	
		4C65	125	$\approx 380^{(1)}$	≥ 350	$\approx 10^5$	NiZn	
		4S2	850	≈ 340	≥ 125	$\approx 10^5$	NiZn	
		4S3	250	$\approx 360^{(1)}$	≥ 250	$\approx 10^5$	NiZn	

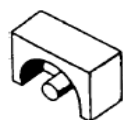
ج) طبق جدول ۱۶-۲ در ترانسفورماتورهای قدرت، به طور معمول از هسته های فریتی با اشکال EC, E, U, ETD, PQ استفاده می شود. در ترانسفورماتورهای پهن باند از RM استفاده می شود [۴۴].
جدول ۱۶-۲ - هسته های فریتی قابل کاربرد [۴۴]



	POT CORES	RM CORES	SOLID CENTER POST RM CORES
APPLICATION	High Q inductors & tuned transformers		Power and wideband transformer
MAGNETIC SHIELDING	Very good	Good	Good
CAN BE SUPPLIED GAPPED WITH TUNER	Yes Yes	Yes Yes	Yes No
CORE STANDARDIZATION	Yes(IEC)	Yes (IEC)	Yes(IEC)
COST OF CORE	High	High	High
COST OF WINDING & ASSEMBLY	High	Average	Average
HEAT DISSIPATION	NA	NA	Poor
UNIFORM CROSS SECTION	No	No	No(but better than regular RM cores)



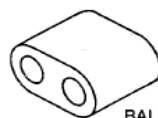
	E CORES					U CORES
	E	EC	ETD	PQ		
APPLICATION	Power transformers and inductors					
MAGNETIC SHIELDING	External magnetic field generated close to the exposed winding					
CAN BE SUPPLIED GAPPED	Yes	Yes	Yes	Yes		No
CORE STANDARDIZATION	De facto	Yes (IEC)	Yes (IEC)	De facto		No
COST OF CORE	Low	Low	Low	Average		Low
COST OF WINDING & ASSEMBLY	Low	Low	Very Low	Average		Low
HEAT DISSIPATION	Very good	Very good	Very good	Very good		Very good
UNIFORM CROSS SECTION	Yes	No	Yes	No		Yes



EP CORE

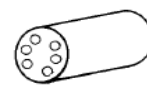


TOROID



BALUN CORE

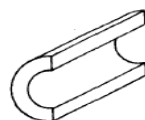
MULTI-APERTURE



SIX HOLE CORE

CORES

	EP CORES	TOROIDS	MULTI-APERTURE CORES
APPLICATION	Power	Wideband and pulse transformers Common mode chokes	
MAGNETIC SHIELDING	Very good	Excellent	Excellent
CAN BE SUPPLIED GAPPED	Yes	Rarely	No
CORE STANDARDIZATION	De facto	De facto	No
COST OF CORE	High	Low	Low
COST OF WINDING & ASSEMBLY	Average	Very High	Very High
HEAT DISSIPATION	Poor	Good	NA
UNIFORM CROSS SECTION	No	Yes	No

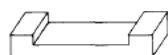


CABLE SUPPRESSION CORE

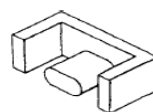
PLANAR



LOW PROFILE CORE



RIBBON CABLE SUPPRESSION CORE

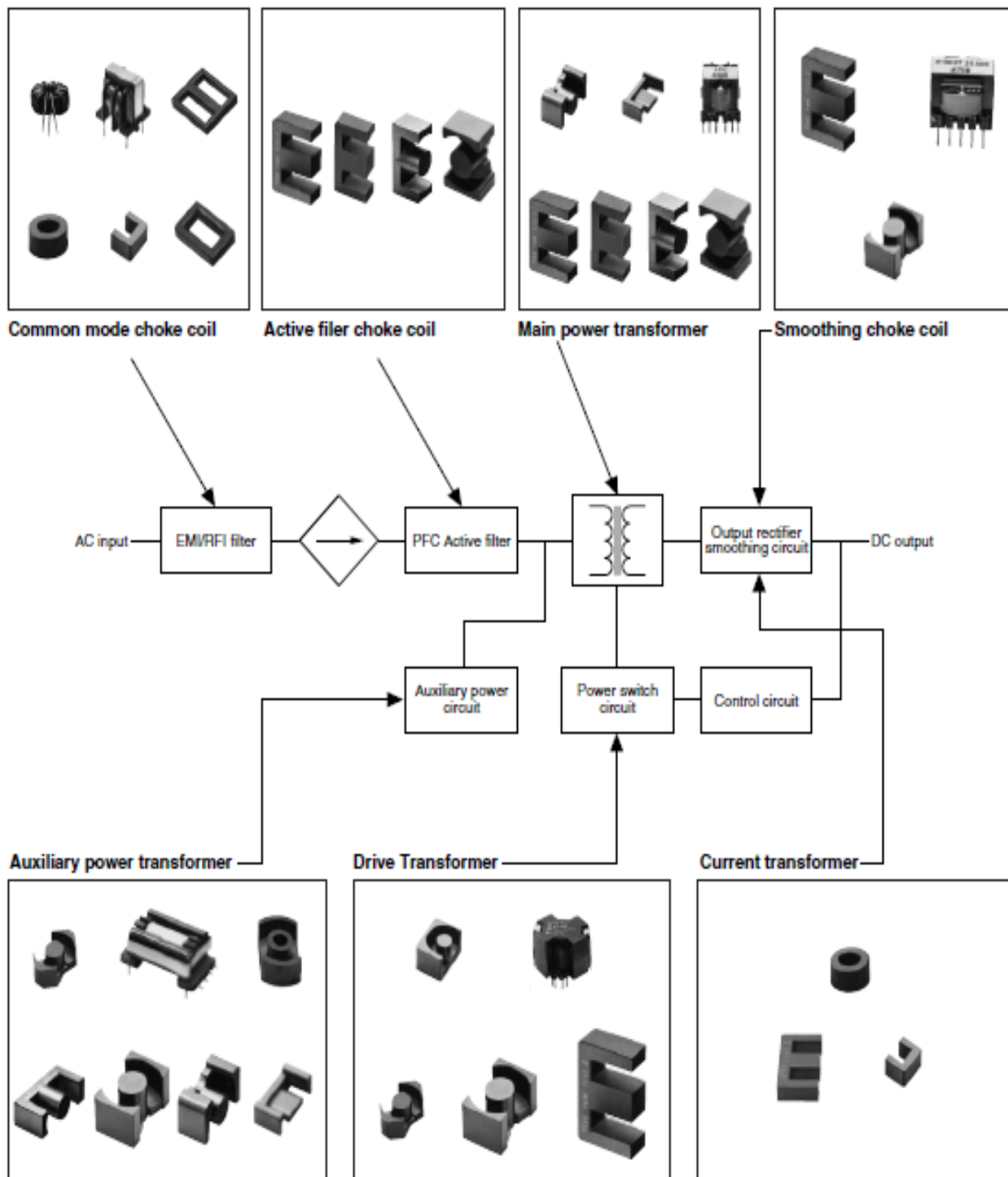
EFD CORE
EPC CORE

EMI CORE SHAPES

LATEST CORE SHAPES

	EMI CORES	LATEST CORE SHAPES
APPLICATION	EMI Suppression	Low profile & surface mount power transformers
MAGNETIC SHIELDING	Good	Good
CAN BE SUPPLIED GAPPED	NA	Yes
CORE STANDARDIZATION	No	No
COST OF CORE	Average	Average
COST OF WINDING & ASSEMBLY	Low	Low
HEAT DISSIPATION	NA	Very good
UNIFORM CROSS SECTION	Yes	—

د) شکل ۲-۱۶ اشکال فریت های قابل استفاده در ترانسفورماتورهای منابع تغذیه سوئیچینگ به شکل E و EC را نشان می دهد [۴۵].

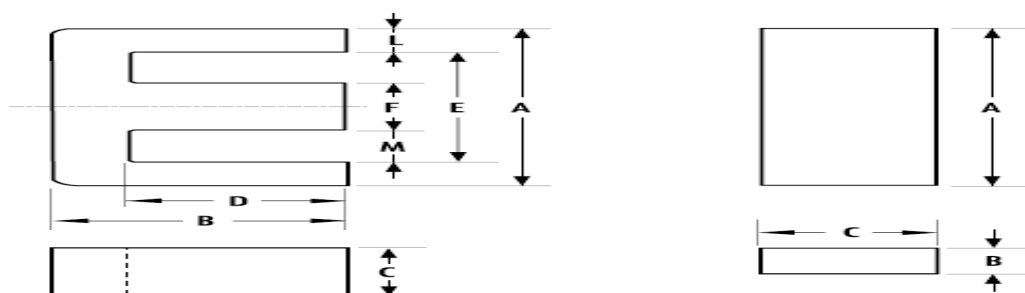


شکل ۲-۱۶- اشکال فریت های قابل استفاده در ترانسفورماتورهای منابع تغذیه سوئیچینگ [۴۵].

با توجه به بررسی های انجام شده در خصوص اشکال هسته های فریتی قابل کاربرد در ترانسفورماتورها و مطالعات انجام شده در بخش ۲-۱ در خصوص نیاز وزارت نیرو و صنعت برق در این خصوص، طبق بند ۳-۳-۵-۲ سند راهبردی طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی ترانسفورماتورها با تلفات پایین، ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت به منظور انتقال ولتاژ و تحویل توان به شبکه قدرت با استفاده از ادوات الکترونیک قدرت معرفی شده اند. با توجه به اینکه چگالی

شار اشباع رابطه معکوسی با فرکانس دارد، لذا با استفاده از لینک های فرکانس بالا در ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت، هسته های آهنی حجیم و سیم پیچ های سنگین مسی در ترانسفورماتورهای قابل کاربرد در شبکه برق ۵۰ هرتز قابل حذف هستند. همچنین این نوع ترانسفورماتورها قادر به بهبود گوناگون کیفیت توان نظیر حذف نامتعادلی ولتاژ، هارمونیک های ولتاژ، اضافه ولتاژها و نوسانات ولتاژ شبکه توزیع هستند. بنابراین با توجه به اینکه هسته های فریتی در ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت قابل کاربرد می باشند مقرر گردید شکل هسته به نوعی انتخاب گردد که در این ترانسفورماتورها قابل کاربرد باشد.

با توجه به بررسی های انجام شده در جداول فوق، از میان اشکال مورد استفاده در این نوع ترانسفورماتورها اشکال EI و Toroid به لحاظ کاربردی تر بودن این نوع اشکال در ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت انتخاب شدند. لازم به ذکر است، طبق پروژه ای در گروه پژوهشی الکترونیک قدرت پژوهشگاه نیرو در خصوص ساخت ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت (سند راهبردی ترانسفورماتور الکترونیک قدرت ۲۰ کیلوولت) ، هسته ترانسفورماتور از جنس فریت و با شکل EI لحاظ شده است. بنابراین هسته های فریتی EI شکل با مشخصات فنی ذکر شده در جدول ۲-۱۷ پس از ساخت می توانند در این ترانسفورماتورها مورد تست قرار گیرند.



شکل ۲-۱۷- هسته فریتی EI شکل [۴۴].

جدول ۲-۱۷- مشخصات فنی هسته های فریتی با شکل EI

Properties	Value	Reference
Ferrite type	Soft Ferrite (Spinel)	[43-45]
Ferrite material	nickel, manganese, cobalt and copper substituted Zn Ferrite	[46-48]
Core shape	EI	[40, 49]
Frequency range ¹	< 400 KHz	[48, 49]
Initial permeability range (μ_i at 25°C)	1400 to 3500	[47-49]
Flux density range (B_{sat} at 25°C)	350 to 500 (mT)	[47-49]
Curie temperature	≥ 180 (°C)	[47-49]
Coercive field (H_c)	11±15% (A/m)	[40,47]
Core dimensions ³	E Core 25/16/6 (mm) ²	[40,49]
	I Core 25/3/6 (mm) ⁴	[40,49]

^۱دستگاه LCR meter مدل HI0KI3522 جهت اندازه گیری اندوکتانس L در پژوهشگاه نیرو موجود است.

^۲0-42515EC Code

^۳حداکثر تعداد هسته های قابل ارائه با این ابعاد ۱۰ عدد می باشد.

^۴0-42515IC Code

Core dimensions (mm)								
Type/Size	A	B	C	D	E	F	L	M
E25/16/6	25.4 ± 0.38	15.9 ± 0.25	6.35 ± 0.25	12.6	18.8	6.35 ± 0.13	3.12 ± 0.13	6.4 ± 0.25
I 25/3/6	25.4 ± 0.38	3.18 ± 0.12	6.35 ± 0.25	-	-	-	-	-

۲-۶- بررسی قالب پرس پودرهای فریتی و جنس های مورد نظر

همان گونه که در بخش ۲-۴ به آن اشاره شد، قالب فلزی به منظور پرس پودرهای فریتی و ساخت هسته های ترانسفورماتور با توجه به نوع کاربرد هسته و شکل مورد نظر، از جنس فولاد طراحی و ساخته می شود. برای تولید انبوه هسته ها، معمولاً این قالب ها را از جنس کاربید تنگستن می سازند تا فشار وارد شده به نانوپودرهای داخل قالب یکنواخت تر گردد [۴۲].

چنانچه قالب به صورت Toriod و یا حلقوی مورد نظر باشد در این صورت هسته های حلقوی با قطر داخلی و خارجی ثابت و ضخامت های متغییر می توانند ساخته شوند. در این حالت با فشردن نانوپودرهای فریتی توسط دستگاه پرس اصطکاک بین سطح خارجی پودر و دیواره های داخلی قالب زیاد شده و در نتیجه فشار در تمام طول نانوپودرها یکسان نخواهد بود. به قسمت هایی از نانوپودرها که به جدار قالب نزدیک تر هستند نسبت به سایر نقاط فشار بیشتری وارد می شود. عدم یکنواخت بودن در نقاط مختلف موجب می گردد تا نانوپودرها در مرحله تفجوشی به لحاظ چگالی و گشتاور مغناطیسی یکنواخت نباشند. برای کاهش یکنواختی، می بایست دیواره های قالب مورد نظر کاملاً صیقلی شود و فشار مورد نظر از بالا به پایین به طور همزمان به قالب اعمال گردد.

با توجه به اینکه طبق بررسی های انجام شده که در بخش ۵-۲ به آن اشاره شد، تصمیم بر آن شد تا شکل هسته مورد نظر به صورت EI لحاظ شود قالب مورد نظر طبق ابعاد و مشخصات ذکر شده در جدول ۲-۱۷ تهیه شود.

۲-۷- تهیه مواد و تجهیزات مورد نیاز بر اساس نوع ماده هسته فریت تعیین شده

همان گونه که در بخش ۲-۴ توضیح داده شده، هسته فریتی با توجه به عملیات ذکر شده، پس از تهیه نانوپودرهای فریتی ساخته می شود. برای تهیه نانوپودرهای فریتی اشاره شده در بخش ۲-۳ این گزارش، از بشر، ترازوی دیجیتالی، اسپاتول، گرم کن-همزن مغناطیسی، مگنت، کاغذ pH سنج، استوانه مدرج، هاون و آون استفاده شد.

طبق ماده بهینه تعیین شده که در بخش ۲-۳ به آن اشاره شد، این مواد به روش ذیل تهیه می گردند.

الف- نانوذرات فریت نیکل روی: با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_3$ که در آن x مقادیر ۰، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ و y مقادیر ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می کند که این عناصر در جدول ۲-۱۸ نشان داده شده است. این نانوذرات به روش خوداحتراقی سنتز می شوند.

برای تهیه نانوذرات فریتی برای هر کدام از مقادیر x و y با استفاده از فرمول استوکیومتری مقدار اولیه مورد نیاز هر ماده محاسبه و با ترازوی دیجیتالی توزین شدند [۳۶].

جدول ۲-۱۸- مشخصات مواد اولیه مورد نیاز برای تهیه فریت نیکل روی به روش خوداحتراقی [۳۶]

ردیف	نام ماده	فرمول شیمیایی	جرم مولی (g/mol)	خلوص (%)
۱	نیتрат آهن آبدار	$\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	۴۰۴	۹۹
۲	نیترات نیکل آبدار	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۲۹۰/۸۱	۹۸
۳	نیترات روی آبدار	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۲۹۷/۴۷	۹۸
۴	نیترات منیزیم آبدار	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۲۵۶/۴۱	۹۹
۵	نیترات مس آبدار	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	۲۴۱/۶۳	۹۹
۶	گلاسیسین	$\text{NH}_5\text{C}_2\text{O}_2$	۷۵/۰۷	۹۹

در این روش با استفاده از آب مقطر دوبار یونیزه شده محلول‌هایی با مولاریته مشخص از گلاسیسین و هم‌چنین نیترات‌های مواد اولیه تهیه گردید. به منظور همگن‌شدن محلول، محلول به مدت یک ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد با همزن مغناطیسی هم زده شد. سپس محلول به مدت یک ساعت در ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا آب محلول به آرامی تبخیر شود. به منظور تبخیر حلال باقی‌مانده، محلول به مدت دو ساعت دیگر در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت‌دهی شد (مرحله احتراق). برای تکمیل فرایند خشک شدن، ژل به دست آمده در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دوساعت در آون حرارت داده شد. در نهایت نانوذرات سیاه‌رنگ که همان ژل‌های سوخته‌است، به دست آمد. نانوذرات حاصل به مدت ۴ ساعت در کوره در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. در اثر این عمل ساختار بی‌شکل به بلورین تبدیل می‌شود.

در نهایت، نانوذرات سنتز شده نهایی در ظروف مناسب ریخته شد تا برای آزمون‌های مختلف استفاده شود. به- نانوذرات فریت منگنز روی: با فرمول استوکیومتری $\text{Mn}_{0.5-x}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{1-y}\text{Co}_y]_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ که در آن مقادیر x برابر با ۰، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و مقادیر y برابر با ۰، ۰/۵ و ۱ را گزینش می‌کند. همچنین نانوذرات فریت منگنز روی با فرمول استوکیومتری $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}[(\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x})_y(\text{Co}_x\text{Cu}_{1-x})_{1-y}]_{x+y}\text{O}_4$ که در آن x و y هر دو، مقدارهای ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می‌کند نیز به روش هم رسوبی سنتز می‌شوند. برای تهیه نانوذرات فریتی برای هر کدام از مقادیر x و y با استفاده از فرمول استوکیومتری مقدار اولیه مورد نیاز هر ماده محاسبه و با ترازوی دیجیتالی توزین شدند. مشخصات مواد اولیه برای سنتز این نانوذرات در جدول ۲-۱۹ نشان داده شده است.

جدول ۲-۱۹- مشخصات مواد اولیه مورد نیاز برای تهیه فریت منگنز روی به روش هم‌رسوبی

نام ماده	فرمول شیمیایی	جرم مولی (g/mol)	کمینه درصد خلوص	شرکت سازنده
کلرید آهن شش آبه	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۲۷۰/۳۳	۹۹	Merck
کلرید روی	ZnCl_2	۱۳۶/۲۸	۹۸	Merck
کلرید منگنز چهار آبه	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	۱۹۷/۹۱	۹۸	Scharlau
کلرید نیکل شش آبه	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۲۳۷/۷۱	۹۸	Scharlau
کلرید کبالت شش آبه	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۲۳۷/۹۳	۹۹	Scharlau
سود	NaOH	۴۰/۰۰	۹۹/۰	Merck

در این روش، ابتدا محلول هایی با مولاریته مشخص از سود و مواد اولیه کلریدی با آب مقطر به عنوان حلال تهیه گردید. محلول کلرید آهن روی گرم کن- همزن مغناطیسی قرار گرفته و محلول های دیگر به آن اضافه شدند و ترکیب حاصل تا رسیدن به دمای 80°C ، با سرعت ثابت هم زده شد. محلول سود را به طور جداگانه روی گرمکن- همزن گذاشته و با سرعت ثابت تا دمای 80°C هم زده شد. پس از رسیدن دمای دو محلول به 80°C ، به یکباره محلول حاوی مواد کلریدی به محلول سود اضافه شد. در این حالت یک رسوب قهوه ای تیره با pH برابر ۱۲ تشکیل شد. برای تشکیل همگن شدن ذرات، همزدن محلول رسوب به مدت یک ساعت با سرعت ثابت ادامه داده شد. پس از آن، بشر را از روی گرم کن- همزن برداشته تا رسوب تشکیل شده ته نشین شود. برای اینکه یون های آزاد کلر و سدیم موجود در رسوب از بین برود، باید رسوب های حاصل از واکنش چندین مرتبه با آب مقطر شسته شوند. برای شستشو، پس از ته نشین شدن رسوب های تشکیل شده، آب روی رسوب تخلیه می گردد و این عمل چندین مرتبه تکرار می شود تا pH محلول به حدود ۷ برسد. برای خشک کردن رسوب های حاصله، آن ها در آون قرار داده شدند. رسوب های خشک به دست آمده با هاون سائیده شدند تا نانوپودر همگن و یکنواختی به دست آید. در نهایت نانوذرات درون ظرف مناسب ریخته شد تا برای آزمون های مختلف استفاده شود.



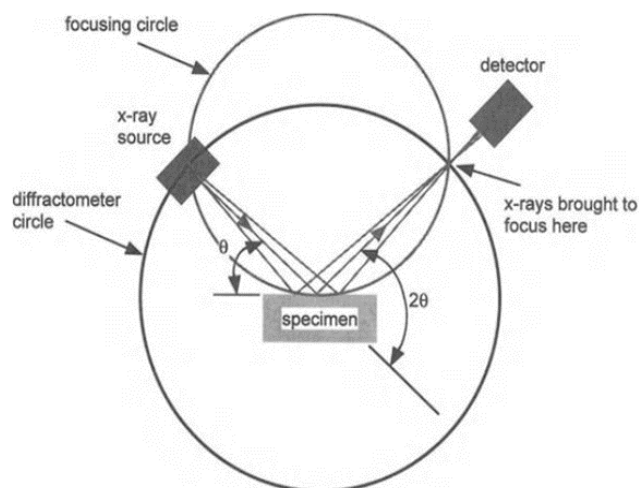
شکل ۲-۱۸- محلول های اولیه و رسوب فریت تشکیل شده.

۲-۸- مشخص نمودن آزمون های لازم برای تهیه پودرهای فریتی

به منظور تجزیه و تحلیل نانوپودرهای فریتی، از آزمون های ذیل برای بررسی ویژگی های ساختاری و مغناطیسی آنها به شرح ذیل استفاده می شود:

۲-۸-۱- پراش اشعه ایکس^۱

برای بررسی ویژگی های ساختاری نانوذرات از این روش استفاده می شود. با تابش پرتو ایکس به یک جامد بلوری، اتم های تشکیل دهنده آن باعث پراش پرتو ایکس می شوند و چون اتم ها در جامدات بلوری به صورت منظم در صفحات بلوری نزدیک به هم مرتب شده اند، صفحات بلوری هم جهت باعث تشکیل قله هایی در الگوی پراش می شود. طرحواره ای از دستگاه پراش سنج اشعه ایکس با هندسه $2\theta - \theta$ در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است [۴۶].



شکل ۲-۱۹- طرحواره ای از دستگاه پراش اشعه ایکس با هندسه $2\theta - \theta$ [۴۶].

^۱. X-Ray Diffraction (XRD)

همان گونه که از شکل ۲-۱۹ مشاهده می شود، در این هندسه، نمونه در مرکز دایره ای که منبع اشعه ایکس و آشکارساز هر دو روی محیط آن قرار می گیرند، قرار دارد. زاویه بین صفحه نمونه و منبع اشعه ایکس برابر θ و زاویه آشکارساز با امتداد پرتو تابش برابر 2θ است. در این روش منبع اشعه ایکس و نمونه ثابت و آشکارساز در محدوده زوایه های مختلف حرکت می کند [۴۶]. با مقایسه الگوی پراش رسم شده با الگوهای استاندارد می توان اطلاعاتی مانند اندیس های میلر، میانگین اندازه ی بلورک ها و ثابت های شبکه را به دست آورد [۴۶].

برای شناسایی و تعیین فازهای بلوری، نمونه ها تحت آزمون پراش اشعه ایکس قرار گرفتند. با استفاده از داده های به دست آمده از دستگاه پراش و نرم افزار X'Pert High Score، الگوی پراش پرتوایکس را تشکیل داده و موقعیت قله های موجود تعیین می شوند. با مقایسه این قله ها با قله های نمونه های مرجع استاندارد در نرم افزار، فاز یا فازهای تشکیل شده تعیین می شود. همچنین از این طریق می توان ثابت شبکه، میانگین اندازه بلورک ها را با روابط ذیل محاسبه نمود.

۲-۱-۸-۲- نحوه محاسبه ثابت شبکه

برای محاسبه ثابت شبکه ^۱ «a» نانوذرات با ساختار اسپینلی (مکعبی) از رابطه ۲-۳ استفاده می شود [۴۶]:

$$a = d(h^2 + k^2 + l^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2-3)$$

در این رابطه، d فاصله بین صفحات بلوری و (h k l) اندیس های میلر صفحات هستند. برای محاسبه فاصله بین صفحات از رابطه براگ (۲-۴) استفاده می شود:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2-4)$$

۲-۱-۸-۲- نحوه محاسبه میانگین اندازه بلورک ها

برای محاسبه میانگین اندازه بلورک ها، از رابطه شرر^۲ استفاده می شود [۴۶]:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2-5)$$

در این رابطه k ثابت تناسب است و مقدار آن ۰/۹ می باشد. λ طول موج پرتوی ایکس فرودی، θ نیم زاویه مربوط به قله ای با پهنای نیم بیشینه β می باشد که برحسب رادیان می باشند.

به کمک نرم افزار X'Pert High Score، می توان پهنای در ارتفاع نیم بیشینه قله ها^۳ که با نماد β نشان می دهند را محاسبه کرد. در رابطه شرر پهن شدگی خط تنها به خاطر اندازه نمونه در نظر گرفته می شود. برای کاهش خطا در محاسبه مقدار پهنای، از رابطه زیر استفاده می شود:

$$\beta^2 = \beta_{exp}^2 - \beta_{std}^2 \quad (2-6)$$

در این رابطه β_{exp} و β_{std} به ترتیب پهنای اندازه گیری شده در نیم بیشینه قله ها برای نمونه تهیه شده و نمونه استاندارد می باشد. در رابطه شرر برای کاهش خطا می توان اطلاعات مربوط به بیش از یک قله را در نظر گرفت و

¹. Lattice constant

². Scherrer's formula

³. Full Width at Half Maximum (FWHM)

میانگین گیری کرد. در مورد ذرات ریز، طبق فرمول شرر با کاهش اندازه ذرات، قله ها پهن تر شده و در نتیجه پهنای پیک (β) افزایش می یابد [۴۶ و ۵۳].

برای شناسایی و تعیین فازهای بلوری از آزمون XRD استفاده می شود. در این آزمون پس از تهیه الگوی پراش از نمونه ها، به کمک نرم افزار X'Pert High Score الگوی نمونه ها با الگوهای نمونه های استاندارد موجود در نرم افزار مقایسه می شود و اطلاعاتی مانند فاز نمونه، اندیس های میلر، میانگین اندازه ی بلورک ها و ثابت های شبکه را می توان به دست آورد [۴۶]. شماتیکی از دستگاه پراش اشعه ایکس در شکل زیر آورده شده است.



شکل ۲-۲۰ دستگاه پراش اشعه ایکس.

۲-۸-۲- میکروسکوپ الکترونی

از آنجا که پس از تهیه نانوذرات، بررسی اندازه ذرات، توزیع اندازه ذرات و شکل و ریخت آن ها از اهمیت چشمگیری برخوردار است، لذا از دستگاه های مختلفی براساس میکروسکوپ الکترونی برای بررسی خواص ساختاری آنها استفاده می شود. در ذیل دو نوع میکروسکوپ الکترونی عبوری و روبشی توضیح داده خواهد شد:

۲-۸-۲-۱- میکروسکوپ الکترونی عبوری^۱

این میکروسکوپ می تواند خصوصیات ریز ساختاری فلزات، سرامیک ها، مواد زمین شناسی، پلیمرها و مواد بیولوژیکی را با بزرگنمایی بسیار زیاد (حدود ۱۰۰۰ الی ۱,۰۰۰,۰۰۰) تعیین کند. همچنین برای شناسایی (ترکیب شیمیایی و ساختار بلوری)، فازهای غیرآلی، رسوبات و آلودگی ها نیز قابل استفاده می باشد. جزئیات ساختاری را می توان در این میکروسکوپ با قدرت تفکیک بیشتر از ۱ نانومتر به دست آورد به شرط اینکه هم در مرحله نمونه سازی و هم در کاربرد دستگاه دقت کافی اعمال شود. همچنین عمق میدان در آن ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۰۶ میلی متر است. شماتیکی از این دستگاه در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده است.

^۱. Transmission Electron Microscopy (TEM)



شکل ۲-۲۱- دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری.

۲-۲-۸-۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۱

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی در مقایسه با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ دارای قدرت تفکیک و عمق میدان بالاتری است. در جدول ۲-۲۰ قدرت تفکیک پذیری، عمق میدان و بزرگنمایی برای میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی ذکر شده آورده شده است [۵۱]. مطابق با جدول میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی گسیل میدانی دارای قدرت تفکیک و عمق میدان بالاتری هستند و از آن برای نانو ساختارها و یا ساختارهایی که نیاز به بررسی با قدرت تفکیک خیلی بالا دارند، بیشتر استفاده می‌شود [۵۴ و ۵۵].

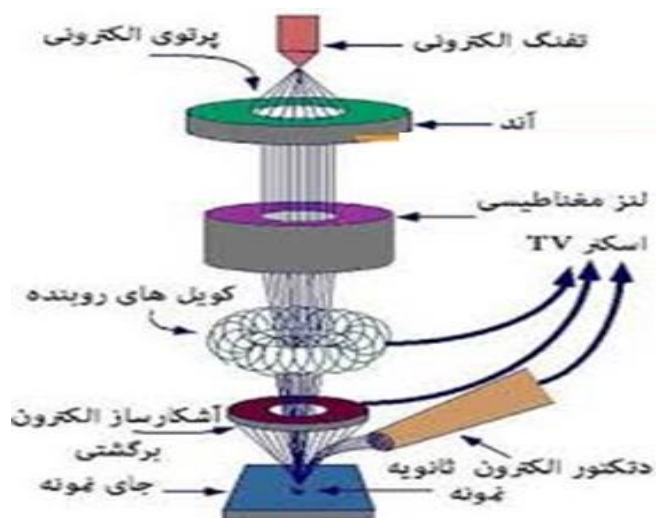
جدول ۲-۲۰- قدرت تفکیک پذیری، عمق میدان و بزرگنمایی برای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی و میکروسکوپ الکترونی روبشی [۴۶ و ۵۴]

نام	قدرت تفکیک پذیری	عمق میدان	بزرگنمایی
FE-SEM	کمتر از ۱-۲۰ نانومتر	بی‌نهایت	۱۰-۳۰۰۰۰۰ برابر
SEM	۳-۱۰۰ نانومتر	۰/۰۰۳ - ۱ میلی متر	۱۰-۵۰۰۰۰۰ برابر

طرحواره‌ای از نحوه عملکرد دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۲-۲۲ بیان شده است [۲۷].

^۱. Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM)

^۲. Scanning Electron Microscopy (SEM)



شکل ۲-۲۲- طرح-واره ای از عملکرد دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی [۲۷].

با توجه به مزایای استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی، که شماتیکی از آن در شکل ۲-۲۳ آورده شده است، در نظر است نانوذرات مورد نظر با این روش مورد آنالیز قرار گیرند. که از این طریق نیز متوسط سایز ذرات اندازه گیری می گردد. اساس عملکرد این میکروسکوپ الکترونی بدین گونه است که نخست به علت اینکه نانوذرات فریتی رسانایی الکتریکی زیادی ندارد، پوشش دهی طلا قبل از رؤیت زیر میکروسکوپ به مدت ۳۰ ثانیه به وسیله دستگاه لایه گذاری انجام می شود. پس از قراردادن نمونه ها در دستگاه، در شرایط خلأ با آشکارساز یا الکترونهای ثانویه، تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی مورد نظر تهیه می شود. ولتاژ مورد استفاده در این دستگاه ها، ۲۵ کیلوولت است. به منظور تعیین اندازه ذره یا دانه با استفاده از تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح گسیل میدانی از نرم افزار دیجی مایزر (Digimizer v4.1.1.0, MedCalc Software, Belgium) استفاده می شود. برای رسم نمودارهای ستونی اندازه ذرات، ابتدا با استفاده از این نرم افزار ۲۰۰ تا ۲۵۰ دانه را اندازه گرفته و سپس نمودارهای ستونی مربوطه رسم خواهد شد.



شکل ۲-۲۳- دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی.

۲-۸-۳- طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۱

برای تجزیه و تحلیل ساختاری یا خصوصیات شیمیایی یک نمونه از بیناب سنجی پراش انرژی پرتو ایکس استفاده می‌شود. از آنجایی که هر عنصر دارای یک ساختار اتمی منحصر به فرد است که مجموعه منحصر به فردی از قله‌ها را در طیف پرتو ایکس آن ممکن می‌سازد [۵۶]. برای برانگیختن انتشار پرتو ایکس مشخصه از یک نمونه، یک دسته پرتو پر انرژی از ذرات باردار مانند الکترون یا پروتون، یا یک دسته پرتو ایکس به نمونه در حال مطالعه متمرکز می‌شود. الکترون‌های حالت پایه در سطوح گسسته انرژی یا لایه‌های الکترون متصل به هسته قرار دارند. پرتو اعمال شده ممکن است یک الکترون در پوسته درونی را تحریک کند و آن را از پوسته خارج سازد و باعث ایجاد یک حفره در مکان پیشین الکترون می‌شود، در این حالت یک الکترون با انرژی بالاتر از یک لایه بیرونی حفره را پر می‌کند و تفاوت انرژی بین لایه پر انرژی و لایه کم انرژی می‌تواند به شکل پرتو ایکس آزاد شود. تعداد و انرژی پرتوهای ایکس گسیل شده از یک نمونه را می‌توان به کمک یک طیف سنج پراش انرژی اندازه‌گیری کرد. از آنجا که انرژی پرتوهای ایکس بیانگر اختلاف انرژی بین دو لایه و همچنین ساختار اتمی عنصری است که از آن گسیل شده‌اند، امکان اندازه‌گیری ترکیب عناصر نمونه را فراهم می‌کند [۵۶]. این آنالیز به وسیله دستگاه طیف سنج پراش انرژی پرتو ایکس که معمولاً روی میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نصب می‌شود، انجام می‌شود.

از این روش معمولاً برای اندازه‌گیری درصد وزنی و اتمی عناصر موجود در نمونه و اطمینان از شکل‌گیری استوکیومتری طبیعی نمونه‌ها و شناسایی عناصر ناخالص در نمونه، استفاده می‌شود. این دستگاه قادر است نقشه‌هایی از توزیع عناصر و همچنین جداول کمی ترکیب نمونه‌ها از مناطق موردنظر را ارائه دهد. در این پژوهش، این آنالیز به وسیله دستگاه طیف سنج پراش انرژی پرتو ایکس مدل RMRC که روی میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نصب شده است، انجام شد.

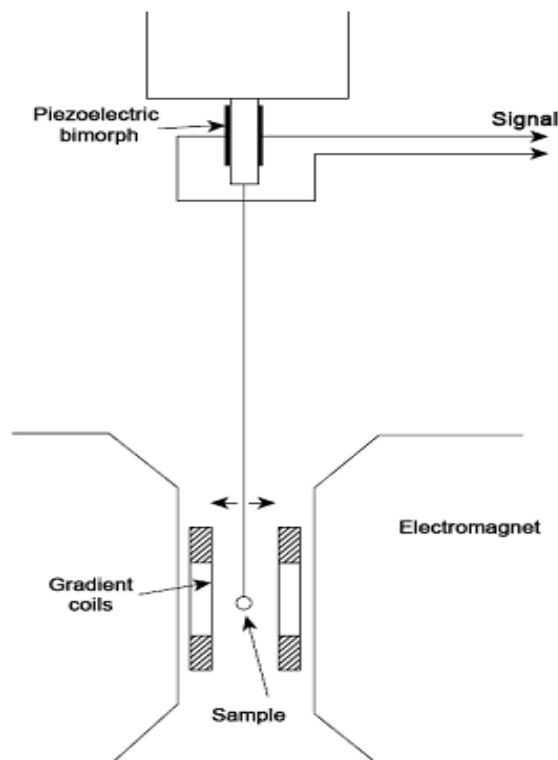
۲-۸-۴- مغناطش سنج نیروی گرادیان متناوب^۲

برای بررسی خواص مغناطیسی نانوذرات از این دستگاه استفاده می‌شود. اساس کار دستگاه مغناطش سنج نیروی گرادیان متناوب، اندازه‌گیری مقدار مغناطش ایجاد شده با اعمال میدان مغناطیسی است. با استفاده از یک منبع تغذیه و دو سیم پیچ به نام کوئل‌های اولیه میدان مغناطیسی اعمالی تولید می‌شود که برای اندازه‌گیری این میدان از پروپ هال^۳ استفاده می‌شود. در این روش نمونه به انتهای یک فیبر شیشه‌ای متصل می‌شود و در یک میدان dc به اضافه ی یک میدان متغیر ac قرار داده می‌شود. نیروی وارد شده به نمونه ناشی از میدان متغیر نمونه را وادار به نوسان می‌کند. نوسان در نمونه به واسطه ی فیبر به یک پیزوالکتریک می‌رسد. پیزوالکتریک نیز حرکت مکانیکی نمونه را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. سیگنال ایجاد شده به مغناطش نمونه وابسته است و به واسطه آن می‌توان مغناطش در نمونه را محاسبه کرد. مجموعه‌ای از این اندازه‌گیری‌ها، نمودار حلقه پسماند M-H را تشکیل می‌دهد. البته تمام این فرآیند به صورت خودکار و از طریق نرم‌افزار انجام می‌گیرد [۳۰]. شکل ۲-۲۴ شماتیکی از عملکرد این دستگاه را نشان می‌دهد.

¹. Energy Dispersive X Ray Spectroscopy (EDS)

². Alternating Field Gradient Magnetometer (AFGM)

³. Hall Probe



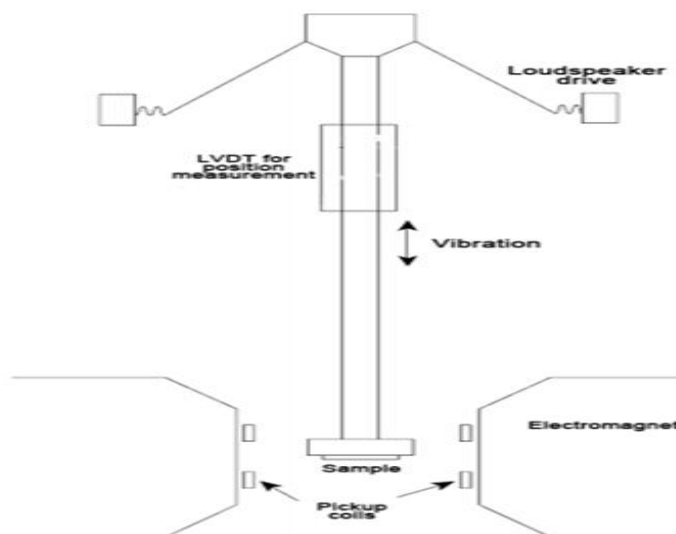
شکل ۲-۲۴- طرح-واره ای از عملکرد دستگاه AGFM [۳۰].

برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌ها از دستگاه مغناطش‌سنج نیروی گرادیان متناوب متعلق به دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان استفاده شد.

۲-۸-۵- مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی^۱

برای بررسی خواص مغناطیسی نانوذرات از این دستگاه استفاده می‌شود. اساس کار این دستگاه قانون القای فارادی است. این قانون بیان می‌کند که تغییر در میدان مغناطیسی، باعث ایجاد میدان الکتریکی می‌شود. با اندازه‌گیری میدان الکتریکی القاء شده، می‌توان اطلاعاتی در مورد تغییرات میدان مغناطیسی بدست آورد. ابتدا نمونه در میدان مغناطیسی ثابت قرار می‌گیرد. اگر نمونه مغناطیسی باشد، میدان مغناطیسی ثابت، نمونه را با هم جهت کردن حوزه‌های مغناطیسی یا اسپین‌های مغناطیسی اتم‌ها در جهت میدان، مغناطیسی می‌کند. میدان مغناطیسی بزرگتر، نمونه را بیشتر مغناطیسی می‌کند. گشتاور مغناطیسی نمونه، میدان مغناطیسی را در اطراف نمونه القاء می‌کند. حال اگر نمونه به بالا و پایین ارتعاش کند، میدان مغناطیسی القایی با زمان تغییر می‌کند و تغییرات آن را می‌توان با جریان القاء شده در یک مجموعه سیم‌پیچ مشاهده کرد. مجموعه‌ای از این اندازه‌گیری‌ها، منحنی هیستریزیس B-H را تشکیل می‌دهد. شکل ۲-۲۵ شماتیکی از عملکرد این دستگاه را نشان می‌دهد. با منحنی هیستریزیس به دست آمده از این آزمون می‌توان کمیت‌های ماکسیمم میدان اعمالی، ماکسیمم القای مغناطیسی (چگالی شار)، نیروی وادارندگی، القای پسماند، نفوذپذیری و... را تعیین کرد [۵۷].

¹. Vibrating Sample Magnetometer (VSM)



شکل ۲-۲۵- طرح-واره ای از عملکرد دستگاه VSM [۵۷].

۲-۸-۶- اندازه گیری دمای کوری

دمای کوری T_c ، جدا کننده فاز بی نظم پارامغناطیس در $T > T_c$ از فاز منظم فری مغناطیس در $T < T_c$ است. در واقع در پایین تر از دمای کوری جهت گیری گشتاورهای دوقطبی های مغناطیسی در حوزه ها منظم است. اما بالای دمای کوری گشتاورها دارای جهت گیری تصادفی و بی نظم هستند. اگر ماده از درجه حرارت بالای دمای کوری به آرامی خنک شود، حوزه های مغناطیسی شکل می گیرد و رفتار مغناطیسی مجدداً ظاهر می شود [۵۷].

برای اندازه گیری دمای کوری، پودر نمونه را در یک مخزن استوانه ای از جنس شیشه یا کوارتز ریخته و سپس مخزن محتوی پودر درون کوره الکتریکی کوچک قرار می گیرد. در حالی که کوره گرم می گردد با استفاده از ترازو تغییرات وزن مغناطیسی نمونه بر حسب دما ثبت می شود. می توان با رسم تغییرات مغناطش بر حسب دما، دمای کوری نمونه پودری را مشخص نمود. هنگامی که دمای نمونه به دمای کوری می رسد نمودار تغییرات مغناطش بر حسب دما ناگهان نزول می کند که در این حالت دمای کوری اندازه گیری می شود. با محاسبه دمای کوری، محدوده دمایی که قطعه بدون تغییر فاز مغناطیسی می تواند کار کند قابل تعیین خواهد بود.

این آزمون نیز توسط دستگاه اندازه گیری دمای کوری مدل ۱۷۰-CT متعلق به دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان انجام شد.

۲-۹- مشخص نمودن آزمون های لازم برای ساخت نمونه هسته فریتی

پس از تهیه نانو پودرهای فریتی و تجزیه و تحلیل نتایج مربوطه مطابق با آزمون های ذکر شده در بخش ۲-۸ این گزارش، طبق عملیات ذکر شده در بخش ۲-۴، هسته فریتی ساخته می شود که از آزمون های ذیل برای بررسی نتایج آن استفاده می شود:

۲-۹-۱- محاسبه تراوایی (نفوذپذیری) به کمک دستگاه LCR متر^۱

LCR متر دستگاهی است که به کمک آن می توان پارامترهای الکتریکی، دی الکتریکی و مغناطیسی ماده (اندوکتانس، کپاسیتانس، رزیستانس، تانژانت تلفات و ...) را اندازه گیری نمود.

¹. Inductance, Capacitance and Resistance Meter (LCR meter)

اندوکتانس L : حالت سلفی است که در ترانسفورماتورها و ماشین‌های القایی پرکاربرد هستند. واحد اندازه گیری آن هانری (H) است و با L نمایش داده می‌شود.

کاپاسیتانس: حالت خازنی است که در خطوط انتقال بلند، مخصوصاً خطوط بلند بدون بار کاربرد دارند و موجب افزایش ولتاژ ناخواسته می‌شوند. واحد اندازه گیری آن فاراد (F) است که با C نمایش داده می‌شود.

رزیستانس: در واقع مقاومت اهمی است که واحد اندازه گیری آن اهم است و با R نشان داده می‌شود.

می‌توان از ارتباط بین اندوکتانس و تراوایی، میزان تراوایی ماده را با استفاده از LCR meter به دست آورد. برای اندازه گیری تراوایی، نخست هسته‌های حلقوی از نمونه‌ها با قالب فلزی تهیه خواهند شد و سپس حلقه‌های به دست آمده در کوره الکتریکی که قابلیت برنامه ریزی دارد با شیب حرارتی مناسب قرار داده شدند. پس از اینکه هسته‌ها از کوره خارج شدند، مقداری سیم به دور هر هسته پیچیده شد و با دستگاه LCR متر اندوکتانس آن‌ها در فرکانس‌های متفاوت اندازه گیری شد. در نهایت به کمک رابطه (۲-۷) برای هر نمونه در هر فرکانس مقدار تراوایی محاسبه شد [۵۷]. تراوایی^۱ به صورت برهم کنش یک ماده با یک میدان مغناطیسی تعریف می‌شود. تراوایی نسبی مختلط (μ_r^*) شامل یک مولفه حقیقی (μ_r') و مولفه موهومی (μ_r'') است. مولفه حقیقی نشان دهنده انرژی ذخیره شده و مولفه موهومی نشان دهنده اتلاف انرژی است.

تراوایی نسبی یک ماده مغناطیسی از خودالقایدگی یک سلف دارای هسته ناشی می‌شود که اغلب تراوایی موثر نام دارد. روش مرسوم برای اندازه گیری تراوایی موثر این است که مقداری سیم به دور هسته پیچیده و اندوکتانس را نسبت به انتهای سیم‌ها اندازه گیری می‌نماییم. این روش اندازه گیری معمولاً با استفاده از یک دستگاه اندازه گیری امپدانس انجام می‌شود. برای اندازه گیری تراوایی موثر از رابطه زیر استفاده می‌شود [۵۷]:

$$\mu_e' = \frac{l(L_{eff} - L_w)}{\mu_0 N^2 A} \quad (2-7)$$

در این رابطه، L_{eff} اندوکتانس سیم پیچ تورویدی، L_w اندوکتانس سیم‌پیچ با هسته هوا، N تعداد دور سیم پیچ، l طول میانگین مسیر مغناطیسی یک هسته تورویدی بر حسب متر، A مساحت سطح مقطع هسته تورویدی بر حسب m^2 و μ_0 تراوایی فضای آزاد ($4\pi \times 10^{-7} H/M$) است. طرحواره ای از دستگاه LCR متر در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۶- طرحواره ای از دستگاه LCR meter.

۲-۹-۲- محاسبه فاکتور کیفیت به کمک دستگاه LCR متر

¹ Permeability

زمان اندازه گیری اندوکتانس با دستگاه LCR متر، می توان عدد فاکتور کیفیت را هم که روی نمایشگر نشان داده می شود ثبت کرد. فاکتور کیفیت عکس تانژانت اتلاف است، بنابراین هرچه مقدار آن بیشتر باشد، مقدار اتلاف کمتر است.

جمع بندی

با توجه به بررسی های انجام شده در این پروژه و این موضوع که هسته های فریتی قابل کاربرد در ترانسفورماتورهای قدرت می باشند، در نظر است سه نوع نمونه ذیل با مواد اولیه ذکر شده در بخش ۲-۳ مورد سنتز قرار گیرند.

الف- نانوذرات فریت نیکل روی با فرمول استوکیومتری $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ که در آن x مقادیر ۰، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ و y مقادیر ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می کند.

ب- نانوذرات فریت منگنز روی با فرمول استوکیومتری $\text{Mn}_{0.5-x}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{1-y}\text{Co}_y]_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ که در آن مقادیر x برابر با ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵، و مقادیر y برابر با ۰، ۰/۵ و ۱ را گزینش می کند.

ج- نانوذرات فریت منگنز روی با فرمول استوکیومتری $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}[(\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x})_y(\text{Co}_x\text{Cu}_{1-x})_{1-y}]_{x+y}\text{O}_4$ که در آن x و y هر دو، مقدارهای ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می کند.

برای سنتز نمونه «الف» از روش خوداحتراقی و برای سنتز نمونه های «ب» و «ج» از روش هم رسوبی استفاده می شود. پس از سنتز نانوذرات، برای تجزیه و تحلیل نتایج و بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی نمونه ها از آزمون های طراحی شده در بخش های ۲-۸ این گزارش استفاده می گردد. به منظور ساخت هسته فریتی، قالب فلزی به شکل EI با مشخصات و ابعاد ذیل از جنس فولاد تهیه می گردد که نمونه ها در داخل آن ریخته و با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک فشرده شده و تحت عملیات تفجوشی تبدیل به هسته فریتی خواهد شد. در نهایت این هسته با سیم مسی سیم پیچی شده و جهت آنالیز و بررسی نتایج از طریق آزمون های طراحی شده در بخش ۹-۲ این گزارش مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. بازه فرکانسی مورد نظر برای این نوع هسته های فریتی بیش از ۴۰۰ Hz در نظر گرفته شده است که دستگاه LCR meter مدل HIOKI3522 جهت اندازه گیری اندوکتانس L در پژوهشگاه نیرو موجود است. میزان تروایی حدود ۳۵۰۰-۱۴۰۰ و میزان چگالی جریان حدود ۵۰۰-۳۵۰ mT در نظر گرفته شد. در نهایت مقرر گردید حداکثر ۱۰ هسته با این ابعاد و مشخصات فنی ذکر شده در جدول ۲-۲۱ ساخته شود.

جدول ۲-۲۱- مشخصات فنی هسته فریتی

Properties	Value	Reference
Ferrite type	Soft Ferrite (Spinel)	[43-45]
Ferrite material	nickel, manganese, cobalt and copper substituted Zn Ferrite	[46-48]
Core shape	EI	[40, 49]
Frequency range ¹	< 400 KHz	[48, 49]
Initial permeability range (μ_i at 25°C)	1400 to 3500	[47-49]
Flux density range (Bsat at 25°C)	350 to 500 (mT)	[47-49]
Curie temperature	≥ 180 (°C)	[47-49]
Coercive field (H_c)	11±15% (A/m)	[40,47]
Core dimensions ³	E Core 25/16/6 (mm) ²	[40,49]
	I Core 25/3/6 (mm) ⁴	[40,49]

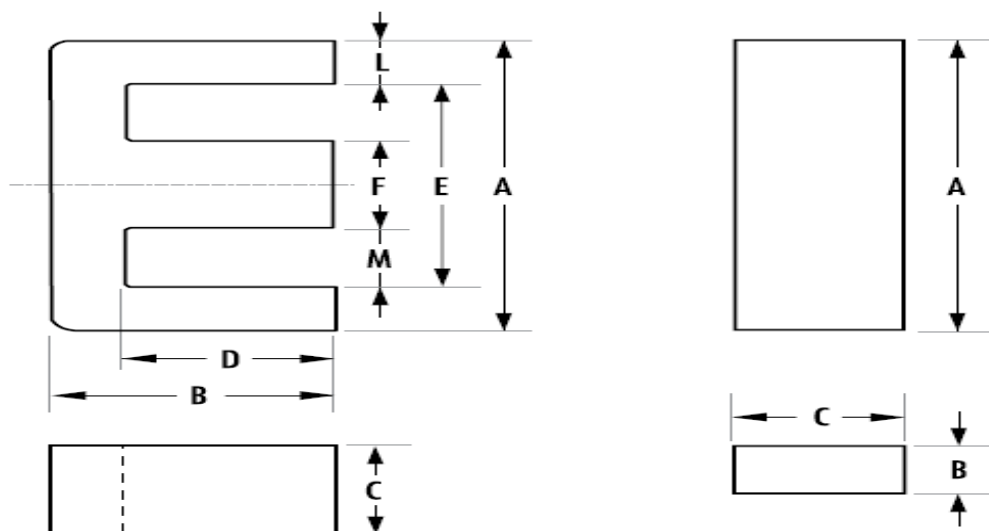
^۱دستگاه LCR meter مدل HIOKI3522 جهت اندازه گیری اندوکتانس L در پژوهشگاه نیرو موجود است.

^۲0-42515EC Code

^۳حداکثر تعداد هسته های قابل ارائه با این ابعاد ۱۰ عدد می باشد.

^۴0-42515IC Code

Core dimensions (mm)								
Type/Size	A	B	C	D	E	F	L	M
E25/16/6	25.4 ± 0.38	15.9 ± 0.25	6.35 ± 0.25	12.6	18.8	6.35 ± 0.13	3.12 ± 0.13	6.4 ± 0.25
I 25/3/6	25.4 ± 0.38	3.18 ± 0.12	6.35 ± 0.25	–	–	–	–	–



- [1] وزارت نیرو، سند راهبردی و نقشه راه توسعه فناوری نانو در صنعت برق و انرژی، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی مواد غیر فلزی، ۱۳۹۴.
- [2] سند چشم‌انداز بیست ساله جمهوری اسلامی ایران در افق ۱۴۰۴ مصوب ۱۳۸۲/۹/۱۱.
- [3] گزارش چشم‌انداز وزارت نیرو در افق ۱۴۴۰، گروه برنامه ریزی راهبردی وزارت نیرو، خرداد ۱۳۸۸.
- [4] سند تکمیلی راهبرد آینده: راهبرد ۱۰ ساله توسعه فناوری نانو در جمهوری اسلامی ایران ۱۳۹۳-۱۳۸۴، ستاد ویژه توسعه فناوری نانو، ۱۳۸۴.
- [5] سند راهبرد ۱۰ ساله توسعه فناوری نانو در جمهوری اسلامی ایران، سند تکمیلی دوم، ۱۳۸۹-۱۳۸۷، ستاد ویژه توسعه فناوری نانو، ریاست جمهوری، خرداد ۱۳۸۷.
- [6] T. Zhao, "Design and control of a cascaded H-bridge converter based solid state transformer (SST)," North Carolina State University, 2010.
- [7] "The solid-state transformer concept: A new era in power distribution", AFRICON 2009, 23-25 Sept. 2009, pp. 1-6.
- [8] H. d. T. Mouton, J. W. van der Merwe "Solid-state transformer topology selection", IEEE International Conference on Industrial Technology, Feb. 10-13, 2009, pp. 1-6.
- [9] D. Wang, C. Mao, J. Lu "Operation and control mode of electronic power transformer", 2009 IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE), Sept. 28-30, 2009, pp. 1-5.
- [10] S. Maniktala, Switching Power Supplies A to Z, journal of Elsevier, British Library Cataloguing-in-Publication Data, ISBN 13: 978-0-7506-7970-1, 2006.
- [11] Y. Shuaichao, Y. Qingxin, L., Z. Changgeng, "Core loss calculation for magnetic materials employed in SMPS under rectangular voltage excitations", 2 Tianjin Key Laboratory of ATEEE, Tianjin Polytechnic University, Tianjin, 300387, China.
- [12] AC برای کاربردهای مازول های فتولتاتیک DC-DC [مجتبی بهارلو، محمدرضا علیزاده پهلوانی، مبدل افزایشی] در سال ۱۳۹۳ با ایمنی پیشرفته، اولین کنفرانس ملی مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد لنگرود.
- [13]. B. D. Cullity, C. D. Graham, Introduction to magnetic material, John Wiley and Sons, New Jersey, 2009.
- [14] Ferroxcube, Soft ferrite and accessories, 2009.
- [15] Magnetic materials producers association, A user's guid, Soft ferrites, MMPA SFG-98, 1998.
- [16] FDK Corporation, Ferrite cors for transformer and choke coil, FE21001-1301-010.
- [17] Wei-Chih Hsu, S.C. Chen, P.C. Kuo, C.T. Lie and W.S. Tsai, Preparation of NiCuZn ferrite nanoparticles from chemical co-precipitation method and the magnetic properties after sintering, Materials Science and Engineering B, 111 (2004) 142-149.
- [18] P.K. Roy and J. Bera, Effect of Mg substitution on electromagnetic properties of (Ni_{0.25}Cu_{0.20}Zn_{0.55}) Fe₂O₄ ferrite prepared by auto combustion method, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 298 (2006) 38-42.
- [19] Roksana Parvin, A.A. Momin and A.K.M. AktherHossain, Improvement of microstructure, initial permeability, magnetization and dielectric properties of nanocrystalline Li_xCu_{0.1}Co_{0.1}Zn_{0.8-2x}Fe_{2+x}O₄, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 401(2016)760-76.
- [20] M. F. Valan, A. Manikandan and S. Arul Antony, Microwave Combustion Synthesis and Characterization Studies of Magnetic Zn_{1-x}Cd_xFe₂O₄ (0 ≤ x ≤ 0.5) Nanoparticles, Journal of Nanoscience and Nanotechnology Vol. 15, 4543-4551, 2015.

- [21] Qiaoling Li, Yongfei Wang and Chuanbo Chang, Study of Cu, Co, Mn and La doped Ni - Zn ferrite nanorods synthesized by the coprecipitation method, *Journal of Alloys and Compounds* 505 (2010) 523–526.
- [22] R.C. Kambale, N.R. Adhate, B.K. Chougule and Y.D. Kolekar, Magnetic and dielectric properties of mixed spinel Ni–Zn ferrites synthesized by citrate–nitrate combustion method, *Journal of Alloys and Compounds* 491 (2010) 372–377.
- [23] A. Vital, A. Angermann, R. Dittmann, T. Graule and J. Toepfer, Highly sinter-active (Mg–Cu)–Zn ferrite nanoparticles prepared by flame spray synthesis, *Acta Materialia* 55 (2007) 1955–1964.
- [24] A. Lakshman, K.H. Rao and R.G. Mendiratta, Magnetic properties of In^{3+} and Cr^{3+} substituted Mg–Mn ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 250 (2002) 92–97.
- [25] A. Lakshman, K.H. Rao and R.G. Mendiratta, Magnetic properties of In^{3+} and Cr^{3+} substituted Mg–Mn ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 250 (2002) 92–97.
- [26] B. D. Cullity, C. D. Graham, *Introduction to magnetic material*, John Wiley and Sons, New Jersey, 2009.
- [27] سایت سیستم جامع آموزش فناوری نانو.
- [28] ربابه بارانی فر و محمد نیایی فر، ساخت و مشخصه یابی نانوذرات فریت آهن- روی- منگنز، ۱۳مین همایش علمی دانشجویی مهندسی مواد و متالورژی ایران، مهرماه ۱۳۹۵، دانشگاه امیرکبیر.
- [29] F. Ghanbari, A. Arab, M. Shishe Bor and M.R. Mardaneh, Magnetic Properties of La/Ni-Substituted Strontium Hexaferrite Nanoparticles Prepared by Coprecipitation at Optimal Conditions, *Journal of Electronic Materials*, 2017.
- [30] Wei-Chih Hsu, S.C. Chen, P.C. Kuo, C.T. Lie and W.S. Tsai, Preparation of NiCuZn ferrite nanoparticles from chemical co-precipitation method and the magnetic properties after sintering, *Materials Science and Engineering B* 111 (2004) 142–149.
- [31] حسین اثنا عشری ایوری و هادی عربی، سنتز نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن به روش هم رسوبی و بررسی تاثیر نسبت غلظت مواد واکنش دهنده بر اندازه و خواص مغناطیسی ذرات، علم و مهندسی سرامیک، جلد ۲، شماره ۱، ۷۷–۸۴، ۱۳۹۲.
- [32] Kandasamy Velmurugan, Vellaiyappan Sangli Karuppanan Venkatachalapathy, Sechassalom Sendhilnathanc, Synthesis of Nickel Zinc Iron Nanoparticles by Coprecipitation Technique, *Materials Research*; 13(3): 299-303, 2010.
- [33] I.H. Gul, W. Ahmed, A. Maqsood, Electrical and magnetic characterization of nanocrystalline Ni–Zn ferrite synthesis by co-precipitation route, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320 ,270–275,2008.
- [34]. Robert C. Pullar, Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics, *Progress in Materials Science* 57 ,1191–1334, 2012.
- [35] محمد باقری، علی عرب، تهیه نانوذرات گارنت ایتريوم آهن با جانشانی های کاتیونی بیسموت و منگنز به روش مکانوشیمیایی و بررسی ویژگی های ساختاری و مغناطیسی آن ها، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد رشته نانوفیزیک، دانشکده فیزیک کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۵.
- [36] مجتبی صدیقی/ علی عرب، اسماعیل کیانی، بررسی جانشانی عناصر Cu -Mg بر ویژگی های ساختاری و مغناطیسی نانو ذرات فریت نیکل- روی سنتز شده به روش احتراقی قابل استفاده در هسته های فریتی ترانسفورماتور، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد رشته نانوفیزیک، دانشکده علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۷.

- [37] فائزه ملکوتی خواه/ علی عرب، اسماعیل کیانی، تهیه نانوذرات فریت منگنز-روی جانشانی شده با Co و Ni به روش همرسوبی قابل کاربرد در هسته‌های فریتی ترانسفورماتور، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد رشته نانوفیزیک، دانشکده علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۷
- [38] ساره شفیعی، علی عرب، نسترن ریاحی، رساله دکتری، بررسی تجربی جانشانی کاتیونهای مس، منگنز، نیکل و کبالت در فریت روی، دانشکده علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۸
- [39] حسین پور، اصول عملیات حرارتی در ساخت هسته‌های فریت، صنایع قطعات الکترونیک ایران، ۱۳۷۳.
- [40] EPCOS data book, Ferrite and accessories, TDK, (2013) 10-608.
- [41] User guide, Soft ferrites, Magnetic materials products association, 3 (1998).
- [42] Magnetics, Ferrite cores, Applications and materials, 2013 catalog.
- [43] Ferroxcube, Soft ferrite and accessories, 2008.
- [44] Magnetic Materials Producers Association, MMPA Soft Ferrite Division, MMPA SFG-98, 1998.
- [45] TDK, Ferrite for Switching Power Supplies, 003-01 / 20040929 / e140.fm.
- [46] B.D. Cullity, C.D. Graham, Introduction to magnetic material, 2nd ed, IEEE Press, A John Wiley and Sons, INC., Publication, 6 (2009) 179.
- [47] A. Goldman, Modern ferrite technology, 2nd ed, Pittsburgh: Springer, 5 (2006) 53-60.
- [48] N. Ponomarenko, Study of Frequency and Microstructure Dependencies of Magnetic Losses of Ferrite Materials and Components, Doctoral Thesis, Faculty of Electronics and Telecommunications Institute of Radioelectronics, 2014.
- [49] W. Shen, Design of High-density Transformers for High-frequency High-power Converters, Dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy In Electrical Engineering, July, 2006.
- [50] Mahindra CIE automotive, Magnetic product division (MPD), Soft ferrite cores, Bhosari industrial estate, India.
- [51] X. She, Al. Q. Huang, R. Burgos, Review of Solid-State Transformer Technologies and Their Application in Power Distribution Systems, IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS, VOL. 1, NO. 3, SEPTEMBER 2013.
- [52] Magnetics, Ferrite cores, Applications and materials, 2013 catalog.
- [53] C. Kittel, Introduction to solid state physics, Wiley New York, 1976.
- [54] پیروز مرعشی، سعید کاویانی، حسین سرپولکی و علیرضا ذوالفقاری، اصول و کاربرد میکروسکوپ‌های الکترونی و روش‌های نوین آنالیز، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ اول ۱۳۸۳.
- [55] نفیسه پرهیزکار، محمود علی اف خضرای و تقی شهبازی، میکروسکوپ الکترونی روبشی عبوری و کاربرد آن در فناوری نانو و علم مواد، ماهنامه فناوری نانو، سال چهاردهم، بهمن ماه ۹۴، شماره ۱۱.
- [56] J. Goldstein, Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, Springer (2003).
- [57] T. Tsutaoka, Frequency dispersion of complex permeability in Mn-Zn and Ni-Zn spinel ferrites and their composite materials, Journal of Applied Physics, (2003) 2789-2796.

سایر منابع استفاده شده در گزارش:

- [58] S. Manouchehri, S.T. Mohammadi Benehi and M.H. Yousefi, Effect of Aluminum Doping on the Structural and Magnetic Properties of Mg-Mn Ferrite Nanoparticles Prepared by Coprecipitation Method, Springer Science Business, 2016.

- [59] V. Jagdeesha Angadi, L. Choudhury, K. Sadhana, H-L Liu, R. Sandhyae, S. Matteppanavar, B. Rudraswamy, V. Pattar, R.V. Anavekar and K. Praveena, Structural, electrical and magnetic properties of Sc^{3+} doped Mn-Zn ferrite nanoparticles, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 424 (2017) 1–11.
- [60] M. K. Lima-Tenorio, L. A. S. Oliveira, M. R. Guilherme, E. T. Tenório-Neto, M. F. Silva, D. M. Fernandes, A. A. W. Hechenleitner and Edgardo A. G. Pineda, Tuning the magnetic properties of ferrite nanoparticles by Zn and Co doping, *Materials Letters* (2017).
- [61] JI Bifa, T. Changan, Z. Quanzheng, JI Dongdong, Y. Jie, XIE Jinsong, SI Jingyu, Magnetic properties of samarium and gadolinium co-doping Mn-Zn ferrites obtained by sol-gel auto-combustion method, *Journal of Rare Earths*, 2016.
- [62] P. Thakur, R. Sharma, M. Kumar, S C Katyal, N S Negi, N. Thakur, V. Sharma and P. Sharma, Superparamagnetic La doped Mn–Zn nano ferrites: dependence on dopant content and crystallite size, *Mater.Res. Express* 3 (2016) 075001.
- [63] S. Thota, S. C. Kashyap, Sh. K. Sharma and V.R. Reddy, Cation distribution in Ni-substituted $\text{Mn}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles: A Raman, Mossbauer, X-ray diffraction and electron spectroscopy study, *Materials Science and Engineering B* (2015).
- [64] J. Gao, Z. Yan, J. Liu, M. Zhang and M. Guo, Synthesis, structure and magnetic properties of Zn substituted Ni–Co–Mn–Mg ferrite, *Materials Letters* 141 (2015) 122–124.
- [65] M.M. Eltabey, W.R. Agami and H.T. Mohsen, Improvement of the magnetic properties for Mn–Ni–Zn ferrites by rare earth Nd^{3+} ion Substitution, *Journal of Advanced Research* (2013).
- [66] T. Tangcharoen, A. Ruangphanit and W. Pecharapa, Structural and magnetic properties of nanocrystalline zinc-doped metal ferrites (metal=Ni; Mn; Cu) prepared by sol–gel combustion method, *Ceramics International* 39 (2013) S239–S243.
- [67] I. Sharifi and H. Shokrollahi, Structural, Magnetic and Mossbauer evaluation of Mn substituted Co–Zn ferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 334 (2013) 36–40.
- [68] G. Kumar, J. Chand, S. Verma and M. Singh, Mixed Mg–Mn ferrites for high frequency applications processed by citrate precursor technique, *J. Phys.* 42 (2009) 155001.
- [69] L. Nalbandian, A. Delimitis, V.T. Zaspalis, E.A. Deliyanni, D.N. Bakoyannakis and E.N. Peleka, Hydrothermally prepared nanocrystalline Mn–Zn ferrites: Synthesis and characterization, *Microporous and Mesoporous Materials* 114 (2008) 465–473.
- [70] B. Parvatheeswara Rao, Chong-Oh Kim, C. Kim, I. Dumitru, L. Spinu, and O. F. Caltun, Structural and Magnetic Characterizations of Coprecipitated Ni–Zn and Mn–Zn Ferrite Nanoparticles, *IEEE Transactions on Magnetics* (2006) 2858–2860.
- [71] R. Arulmurugan, B. Jeyadevan, G. Vaidyanathan and S. Sendhilnathan, Effect of zinc substitution on Co–Zn and Mn–Zn ferrite nanoparticles prepared by co-precipitation, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 288 (2005) 470–477.
- [72] T. N. Brusentsova, N. A. Brusentsov, V. D. Kuznetsov and V. N. Nikiforov, Synthesis and investigation of magnetic properties of Gd-substituted Mn–Zn ferrite nanoparticles as a potential low-TC agent for magnetic fluid hyperthermia, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 293 (2005) 298–302.
- [73] M. M. Salem, A. T. Morchenko, L. V. Panina, V. G. Kostishyn, V. G. Andreev, S. B. Bibikov and A. N. Nikolaev, Dielectric and Magnetic Properties of Two-Phase Composite System: Mn-Zn or Ni-Zn ferrites in Dielectric Matrices, *Physics Procedia* (2015) 1360–1369.

فصل سوم :

فاز سوم – تهیه ذرات و شناسایی

مقدمه

اندازه بزرگ، وزن بالا، افت ولتاژ، عدم تنظیم کیفیت توان، مشکلات زیست محیطی و نداشتن خروجی برق مستقیم یا ظرفیت ذخیره سازی ترانسفورماتورهای مرسوم که با فرکانس شبکه (۵۰ هرتز) کار می کنند، همچنین وجود هسته های آهنی بزرگ و سیم پیچی مسی سنگین در آنها موجب شد تا به منظور کاهش تلفات در شبکه، فرکانس کاری افزایش و ابعاد و وزن ترانسفورماتور کاهش یابد.

با توجه به اینکه فرکانس کاری در سیستم های قدرت ثابت است (۵۰ هرتز در ایران)، ترانسفورماتورهای مرسوم که معمولاً اندازه و وزن بالایی دارند با عنوان ترانسفورماتورهای فرکانس پایین شناخته شوند. اگرچه در طول سالیان گذشته اصلاحاتی در جهت بهبود و رفع مشکلات ترانسفورماتورهای معمولی صورت گرفته است اما ظهور و گسترش ریزشبکه های هوشمند قدرت، نیاز به وجود ترانسفورماتورهای هوشمند با اندازه قابل قبول را به وجود آورده است. در این بین ترانسفورماتور الکترونیک قدرت ۱ را می توان به عنوان یک انقلاب در زمینه الکترونیک قدرت به خصوص در ریزشبکه های هوشمند به حساب آورد که جنس هسته آن فریت است. بنابراین با توجه به اینکه هسته های فریتی در این نوع ترانسفورماتورها می توانند قابل کاربرد باشند طبق بررسی های انجام شده در فاز اول و دوم پروژه همچنین مشخصات فنی هسته مورد نظر که در فاز دوم ارائه شد، در این مرحله از پروژه موارد ذیل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۱-۳- سنتز ذرات یا نانوذرات هسته فریتی با روش تعیین شده براساس فرمول استوکیومتری

۳-۲- سنتز ذرات یا نانوذرات جانشانی شده هسته فریتی با روش تعیین شده بر اساس فرمول استوکیومتری

۳-۳- انجام آزمون پراش پرتو ایکس (XRD)

۳-۴- انجام آزمون اسکوپ الکترونی عبوری (TEM)

۳-۵- انجام آزمون میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM)

۳-۱- سنتز نانوذرات هسته فریتی با روش تعیین شده براساس فرمول استوکیومتری

همان گونه که در گزارشات فاز اول و دوم پروژه اشاره شد، مواد مغناطیسی به دو دسته سخت (هگزگونال) و نرم (اسپینل) تقسیم بندی می شوند [۱]. مواد مغناطیسی سخت خاصیت مغناطیسی خود را پس از حذف میدان مغناطیسی خارجی حفظ می کنند و در فرکانس های بالا ($100\text{ MHz} <$) مورد استفاده قرار می گیرند. مواد مغناطیسی نرم با اعمال میدان های ضعیف مغناطیسی، خاصیت مغناطیسی از خود نشان می دهند. وقتی نیروی اعمالی حذف می شود، خاصیت مغناطیسی باقیمانده در آن ها تضعیف می گردد و بر اساس محدوده فرکانسی به دو دسته مایکروویو و غیر مایکروویو تقسیم می شوند.

فریت های غیر مایکروویو برای فرکانس هایی از محدوده شنوایی تا 500 MHz و فریت های مایکروویو برای فرکانس هایی در محدوده $500\text{ MHz} - 100\text{ GHz}$ مورد استفاده قرار می گیرند [۱]. بنابراین فریت های منگنز روی و نیکل روی با توجه به نوع کاربرد و بازه های فرکانسی مورد نظر در هسته ترانسفورماتور مورد استفاده قرار می گیرند. به طور مثال، طبق جدول ۳-۱ در ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت از فریت های منگنز روی برای فرکانس هایی تا 4 MHz و از فریت های نیکل روی در محدوده فرکانسی تا $10\text{ MHz} - 4\text{ MHz}$ استفاده می شود [۲]. به طور کلی فریت های نیکل روی در فرکانس هایی بالاتر از فرکانس کاربردی فریت های منگنز روی به دلیل هدایت الکتریکی پائین تر آنها نسبت به فریت های منگنز روی، استفاده می شوند [۲]. این موارد با جزئیات در فاز دوم گزارش بررسی شده است.

جدول ۳-۱- فریت های منگنز روی و نیکل روی قابل کاربرد در صنعت برق [۲]

Ferrite material survey

MAIN APPLICATION AREA	FREQUENCY RANGE (MHz)	MATERIAL	μ_i at 25 °C	B_{sat} (mT) at 25 °C (1200 A/m)	T_C (°C)	P (Ωm)	FERRITE TYPE	AVAILABLE CORE SHAPES
Telecom filters Proximity sensors	< 0.1	3B46	3800	≈ 545	≥ 255	≈ 10	MnZn	RM, P, PT, PTS, EP, E, Planar ER, RM/I, RM/ILP, PH
	0.2 – 2	3B7	2300	≈ 440	≥ 170	≈ 1	MnZn	
	< 0.2	3D3	750	≈ 380	≥ 200	≈ 2	MnZn	
	< 0.2	3H3	2000	≈ 360	≥ 160	≈ 2	MnZn	
Wideband signal transformers Pulse transformers Delay lines		3E27	6000	≈ 430	≥ 150	≈ 0.5	MnZn	RM, P, PT, PTS, EP, EP/ILP, EPX, E, Planar ER, RM/I, RM/ILP, Toroids
		3E28	4000	≈ 440	≥ 145	≈ 1	MnZn	
		3E5	10000	≈ 380	≥ 125	≈ 0.5	MnZn	
		3E55	10000	≈ 370	≥ 100	≈ 0.1	MnZn	
		3E6	12000	≈ 390	≥ 130	≈ 0.1	MnZn	Toroids
		3E7	15000	≈ 390	≥ 130	≈ 0.1	MnZn	
		3E8	18000	≈ 380	≥ 100	≈ 0.1	MnZn	
		3E9	20000	≈ 380	≥ 100	≈ 0.1	MnZn	
Line output transformers (LOT)	< 0.2	3C30	2100	≈ 500	≥ 240	≈ 2	MnZn	UR
	< 0.3	3C34	2100	≈ 500	≥ 240	≈ 5	MnZn	
Power transformers Power inductors General purpose transformers and inductors	< 0.2	3C81	2700	≈ 450	≥ 210	≈ 1	MnZn	E, EI, Planar E, EC, EFD, EP, ETD, ER, Planar ER, U, RM/I, RM/ILP, P, P/I, PT, PTS, PM, PQ, Toroids (gapped), Bobbin cores
	< 0.2	3C90	2300	≈ 470	≥ 220	≈ 5	MnZn	
	< 0.3	3C91	3000	≈ 470	≥ 220	≈ 5	MnZn	
	< 0.2	3C92	1500	≈ 520	≥ 280	≈ 5	MnZn	
	< 0.3	3C93	1800	≈ 500	≥ 240	≈ 5	MnZn	
	< 0.3	3C94	2300	≈ 470	≥ 220	≈ 5	MnZn	
	< 0.3	3C95	3000	≈ 530	≥ 215	≈ 5	MnZn	
	< 0.4	3C96	2000	≈ 500	≥ 240	≈ 5	MnZn	
	0.2 – 0.5	3F3	2000	≈ 440	≥ 200	≈ 2	MnZn	
	0.5 – 1	3F35	1400	≈ 500	≥ 240	≈ 10	MnZn	
	1 – 2	3F4	900	≈ 410	≥ 220	≈ 10	MnZn	
	1 – 2	3F45	900	≈ 420	≥ 300	≈ 10	MnZn	
	2 – 4	3F5	650	≈ 380	≥ 300	≈ 10	MnZn	
	4 – 10	4F1	80	$\approx 320^{(1)}$	≥ 260	$\approx 10^5$	NiZn	
Wideband EMI-suppression Wideband transformers Balun transformers	10 – 100	3B1	900	≈ 380	≥ 150	≈ 0.2	MnZn	BD, BDW, BDS, MLS, CMS, Cable shields, Rods, Toroids, WBS, WBC
	1 – 30	3S1	4000	≈ 400	≥ 125	≈ 1	MnZn	
	30 – 1000	3S3	350	≈ 320	≥ 225	$\approx 10^4$	MnZn	
	10 – 300	3S4	1700	≈ 320	≥ 110	$\approx 10^3$	MnZn	
	1 – 30	3S5	3800	≈ 545	≥ 255	≈ 10	MnZn	
	30 – 1000	4A11	850	≈ 340	≥ 125	$\approx 10^5$	NiZn	
	10 – 300	4A15	1200	≈ 350	≥ 125	$\approx 10^5$	NiZn	
	10 – 300	4A20	2000	≈ 260	≥ 100	$\approx 10^5$	NiZn	
	30 – 1000	4B1	250	$\approx 360^{(1)}$	≥ 250	$\approx 10^5$	NiZn	
	50 – 1000	4C65	125	$\approx 380^{(1)}$	≥ 350	$\approx 10^5$	NiZn	
	30 – 1000	4S2	850	≈ 340	≥ 125	$\approx 10^5$	NiZn	
	30 – 1000	4S3	250	$\approx 360^{(1)}$	≥ 250	$\approx 10^5$	NiZn	

به منظور سنتز نانو ذرات نیکل روی و منگنز روی طبق روش های سنتز بررسی شده در فاز دوم پروژه، دو روش هم رسوبی و خوداحتراقی به عنوان مناسب ترین روش برای سنتز نانوذرات تعیین شد.

در روش هم رسوبی دو یا چند ماده به طور همزمان رسوب می کنند که این رسوب شامل مخلوطی از فرآورده های حاصل از واکنش بین واکنش گر ها است. در این روش برای تهیه نمونه ها، معمولاً از مواد اولیه کلریدی استفاده می شود. روش هم رسوبی به دلیل قابلیت کنترل مناسب بر پارامترهای موثر رشد نانوذرات همانند زمان، دما، سرعت همزدن، غلظت واکنش گر ها، pH و ...، روشی مناسب ارزیابی می شود. از مزایای این روش می توان به ساده و ارزان بودن [۳-۵]، وقت گیر نبودن آن، کنترل اندازه ذرات، توزیع یکنواخت اندازه نانوذرات و عدم نیاز به مرحله کلسینه کردن [۶ و ۷] اشاره کرد. همچنین می توان در حجم کم واکنش مقدار زیادی نانوذره ساخت [۸-۱۱].

فرآیند سل-ژل یک روش شیمیایی تر، برای سنتز انواع نانو ساختار ها به ویژه نانو ذرات اکسید فلزی است. در این روش پیش ماده مولکولی (معمولاً آلکوکسید فلزی) در آب یا الکل حل شده و با حرارت و همزدن در اثر هیدرولیز/الکلیز به ژل تبدیل می شود. حال باید ژل را خشک کرد که برای محلول الکلی می تواند با سوختن الکل انجام پذیرد. پس از خشک کردن ژل آن را پودر می کنند و پودر حاصله را جهت کلسینه شدن احرا رت می دهند [۴]. روش سل-ژل روش ارزانی است و به دلیل دمای پایین واکنش می توان کنترل مناسبی بر ترکیب شیمیایی محصولات داشت. این روش هم اکنون می تواند نانو ذراتی با کیفیت بالا (ذرات با اندازه یکسان) را در حجمی بالا تولید کند. این روش قادر است همزمان دو یا چند نوع نانو ذره را با هم تولید کند. از دیگر دلایل محبوبیت این روش، سنتز در دمای پائین، ابزار انجام آن ساده است، تهیه محصولاتی با خلوص بالا، راندمان تولید بسیار بالا، تولید قطعات اپتیکی با اشکال پیچیده و ... می باشد [۴]. روش سنتز احتراقی جزء روش های سل-ژل است. روش سنتز احتراقی، به دلیل تولید محصولی همگن با درجه خلوص بالا و پایین بودن نسبی دما و زمان آن، یکی از بهترین روش های تولید نانوذرات است. در این روش برای تهیه نمونه معمولاً از مواد اولیه نیتریتی استفاده می شود. با توجه به مشخصات فنی نوع ماده هسته فریتی قابل کاربرد در ترانسفورماتور، فریت های نیکل روی و منگنز روی به روش هم رسوبی و خوداحتراقی مورد سنتز قرار می گیرند. مواد مورد سنتز و نحوه سنتز آن در بخش ۳-۲ توضیح داده شده است.

۳-۲- سنتز ذرات جانمایی شده هسته فریتی با روش تعیین شده بر اساس فرمول

استوکیومتری

طبق بررسی های انجام شده در فاز دوم پروژه، جانمایی فریت های نیکل روی و منگنز روی با کاتیون های دو ظرفیتی مس، کبالت، منگنز، منیزیم ویژگی های ساختاری و مغناطیسی خوبی از خود نشان می دهد که می توان از آن در هسته ترانسفورماتور استفاده نمود. بنابراین با استفاده از نتایج فاز دوم پروژه، حدود ۴۸ ماده فریتی از نوع نیکل روی و منگنز روی جانمایی شده با کاتیون های فوق الذکر به شرح ذیل، با فرمول های استوکیومتری مربوطه به دو روش هم رسوبی و خوداحتراقی سنتز شدند. این پودر های فریتی در جدول ۳-۲ آورده شده است.

¹. Calcination

جدول ۳-۲- نمونه های فریتی سنتز شده به روش هم رسوبی و خوداحتراقی

ردیف	فرمول استوکیومتری	x	y	فریت سنتز شده	روش سنتز	کد نمونه
۱	$Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$	۰		$NiFe_2O_4$	خوداحتراقی	S1
۲		۰/۳	۰	$Ni_{0.7}(Zn)_{0.3}Fe_2O_4$		S2
۳			۰/۴	$Ni_{0.7}(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})_{0.3}Fe_2O_4$		S3
۴			۰/۸	$Ni_{0.7}(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})_{0.3}Fe_2O_4$		S4
۵			۱	$Ni_{0.7}(Mg_{0.5}Cu_{0.5})_{0.3}Fe_2O_4$		S5
۶		۰/۵	۰	$Ni_{0.5}(Zn)_{0.5}Fe_2O_4$		S6
۷			۰/۴	$Ni_{0.5}(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})_{0.5}Fe_2O_4$		S7
۸			۰/۸	$Ni_{0.5}(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})_{0.5}Fe_2O_4$		S8
۹			۱	$Ni_{0.5}(Mg_{0.5}Cu_{0.5})_{0.5}Fe_2O_4$		S9
۱۰		۰/۷	۰	$Ni_{0.3}(Zn)_{0.7}Fe_2O_4$		S10
۱۱			۰/۴	$Ni_{0.3}(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})_{0.7}Fe_2O_4$		S11
۱۲			۰/۸	$Ni_{0.3}(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})_{0.7}Fe_2O_4$		S12
۱۳			۱	$Ni_{0.3}(Mg_{0.5}Cu_{0.5})_{0.7}Fe_2O_4$		S13
۱۴		۱	۰	$(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})Fe_2O_4$		S14
۱۵			۰/۴	$(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})Fe_2O_4$		S15
۱۶			۰/۸	$ZnFe_2O_4$		S16
۱۷			۱	$(Mg_{0.5}Cu_{0.5})Fe_2O_4$		S17
۱۸	$Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$	۰	-	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	هم رسوبی	A1
۱۹		۱	۰	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni]_{0.1}Fe_2O_4$		A2
۲۰			۰/۵	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.1}Fe_2O_4$		A3
۲۱			۱	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Co]_{0.1}Fe_2O_4$		A4
۲۲		۰/۳	۰	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Ni]_{0.3}Fe_2O_4$		A5
۲۳			۰/۵	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.3}Fe_2O_4$		A6
۲۴			۱	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Co]_{0.3}Fe_2O_4$		A7
۲۵		۰/۵	۰	$Zn_{0.5}[Ni]_{0.5}Fe_2O_4$		A8
۲۶			۰/۵	$Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.5}Fe_2O_4$		A9
۲۷			۱	$Zn_{0.5}[Co]_{0.5}Fe_2O_4$		A10
۲۸	$Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_x)]_y$	۰	۰	$ZnFe_2O_4$	هم رسوبی	E1
۲۹		۰/۴	۰/۴	$ZnFe_{1.6}[Ni_{0.4}Cu_{0.6}]_{0.4}O_4$		E2

E3		$\text{ZnFe}_{1.2}[\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}]_{0.8}\text{O}_4$	۰/۸			۳۰
E4		ZnFeNiO_4	۱			۳۱
E5		$\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_2[\text{Co}_{0.4}\text{Cu}_{0.6}]_{0.4}\text{O}_4$	۰	۰/۴		۳۲
E6		$\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_{1.6}[(\text{Mn}_{0.4}\text{Ni}_{0.6})_{0.4}(\text{Co}_{0.4}\text{Cu}_{0.6})_{0.6}]\text{O}_4$	۰/۴			۳۳
E7		$\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_{1.2}[(\text{Mn}_{0.4}\text{Ni}_{0.2})_{0.8}(\text{Co}_{0.4}\text{Cu}_{0.6})_{0.2}]\text{O}_4$	۰/۸			۳۴
E8		$\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}(\text{Mn}_{0.4}\text{Ni}_{0.6})_{1.4}\text{O}_4$	۱			۳۵
E9		$\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2[\text{Co}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}]_{0.8}\text{O}_4$	۰	۰/۸		۳۶
E10		$\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{1.6}[(\text{Mn}_{0.8}\text{Ni}_{0.2})_{0.4}(\text{Co}_{0.8}\text{Cu}_{0.2})_{0.6}]\text{O}_4$	۰/۴			۳۷
E11		$\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{1.2}[(\text{Mn}_{0.8}\text{Ni}_{0.2})_{0.8}(\text{Co}_{0.8}\text{Cu}_{0.2})_{0.2}]\text{O}_4$	۰/۸			۳۸
E12		$\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}(\text{Mn}_{0.8}\text{Ni}_{0.2})_{1.8}\text{O}_4$	۱			۳۹
E13		CoFe_2O_4	۰	۱		۴۰
E14		$\text{Fe}_{1.6}[(\text{Mn})_{0.4}(\text{Co})_{0.6}]_{1.4}\text{O}_4$	۰/۴			۴۱
E15		$\text{Fe}_{1.2}[(\text{Mn})_{0.8}(\text{Co})_{0.2}]_{1.8}\text{O}_4$	۰/۸			۴۲
E16		Mn_2FeO_4	۱			۴۳
	هم رسوبی	$\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ حرارت داده شده در دمای °C۹۰۰			$\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۴۴
		$\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ حرارت داده شده در دمای °C۱۰۰۰				۴۵
		$\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ حرارت داده شده در دمای °C۱۱۰۰				۴۶
		$\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ حرارت داده شده در دمای °C۱۲۰۰				۴۷
		$\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ حرارت داده شده در دمای °C۱۲۵۰				۴۸

در ذیل به مواد اولیه و نحوه تهیه هریک از پودرهای فریتی اشاره می شود.

۳-۲-۱- سنتز پودرهای فریتی

۳-۲-۱-۱- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس سنتز شده به روش خود

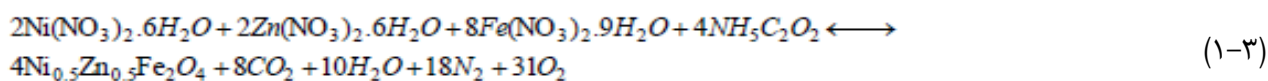
احتراقی با فرمول استوکیومتری $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$

x مقادیر ۰، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ و y مقادیر ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می کند. این فریت ها در جدول ۳-۳ نشان داده شده است.

جدول ۳-۳- واحدهای فرمولی نانو ذرات فریت نیکل روی با جانشانی های گوناگون عناصر کاتیونی

x	y	ترکیب و کد
۰	۰	$S_1 = \text{Ni Fe}_2\text{O}_4$
۰/۳	۰	$S_2 = \text{Ni}_{0.7}(\text{Zn})_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$
	۰/۴	$S_3 = \text{Ni}_{0.7}(\text{Zn}_{0.6}\text{Mg}_{0.2}\text{Cu}_{0.2})_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$
	۰/۸	$S_4 = \text{Ni}_{0.7}(\text{Zn}_{0.2}\text{Mg}_{0.4}\text{Cu}_{0.4})_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$
	۱	$S_5 = \text{Ni}_{0.7}(\text{Mg}_{0.5}\text{Cu}_{0.5})_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$
۰/۵	۰	$S_6 = \text{Ni}_{0.5}(\text{Zn})_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$
	۰/۴	$S_7 = \text{Ni}_{0.5}(\text{Zn}_{0.6}\text{Mg}_{0.2}\text{Cu}_{0.2})_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$
	۰/۸	$S_8 = \text{Ni}_{0.5}(\text{Zn}_{0.2}\text{Mg}_{0.4}\text{Cu}_{0.4})_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$
	۱	$S_9 = \text{Ni}_{0.5}(\text{Mg}_{0.5}\text{Cu}_{0.5})_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$
۰/۷	۰	$S_{10} = \text{Ni}_{0.3}(\text{Zn})_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$
	۰/۴	$S_{11} = \text{Ni}_{0.3}(\text{Zn}_{0.6}\text{Mg}_{0.2}\text{Cu}_{0.2})_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$
	۰/۸	$S_{12} = \text{Ni}_{0.3}(\text{Zn}_{0.2}\text{Mg}_{0.4}\text{Cu}_{0.4})_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$
	۱	$S_{13} = \text{Ni}_{0.3}(\text{Mg}_{0.5}\text{Cu}_{0.5})_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$
۱	۰	$S_{14} = (\text{Zn}_{0.2}\text{Mg}_{0.4}\text{Cu}_{0.4}) \text{Fe}_2\text{O}_4$
	۰/۴	$S_{15} = (\text{Zn}_{0.6}\text{Mg}_{0.2}\text{Cu}_{0.2}) \text{Fe}_2\text{O}_4$
	۰/۸	$S_{16} = \text{Zn Fe}_2\text{O}_4$
	۱	$S_{17} = (\text{Mg}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}) \text{Fe}_2\text{O}_4$

با استفاده از فرمول استوکیومتری و روش سنتز خوداحتراقی که در ذیل به آن اشاره شده است فریت های مربوطه تهیه شدند. برای تهیه پودرهای فریتی هریک از مواد اولیه مورد نیاز طبق مقادیر x و y در فرمول استوکیومتری ذیل محاسبه و با ترازوی دیجیتالی توزین شدند. فرمول استوکیومتری این فریتها طبق رابطه ۳-۱ است.



مواد اولیه مورد نیاز جهت تهیه این فریتها به روش خوداحتراقی در جدول ۳-۴ آورده شده است.

جدول ۳-۴- مشخصات مواد اولیه مورد نیاز برای تهیه فریت نیکل روی به روش خوداحتراقی

ردیف	نام ماده	فرمول شیمیایی	جرم مولی (g/mol)	خلوص (%)
۱	نیتрат آهن آبدار	$\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	۴۰۴	۹۹
۲	نیترات نیکل آبدار	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۲۹۰/۸۱	۹۸
۳	نیترات روی آبدار	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۲۹۷/۴۷	۹۸
۴	نیترات منیزیم آبدار	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۲۵۶/۴۱	۹۹
۵	نیترات مس آبدار	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	۲۴۱/۶۳	۹۹
۶	گلاسیسین	$\text{NH}_5\text{C}_2\text{O}_2$	۷۵/۰۷	۹۹

برای تهیه پودرهای فریتی به روش خوداحتراقی، با استفاده از آب مقطر دوبار یونیزه شده محلول‌هایی با مولاریته مشخص از گلاسیسین و همچنین نیترات‌های مواد اولیه تهیه گردید. به منظور همگن شدن محلول، محلول به مدت یک ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد با همزن مغناطیسی هم زده شد. سپس محلول به مدت یک ساعت در ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا آب محلول به آرامی تبخیر شود. به منظور تبخیر حلال باقی‌مانده، محلول به مدت دو ساعت دیگر در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت‌دهی شد (مرحله احتراق). برای تکمیل فرایند خشک شدن، ژل به دست‌آمده در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دوساعت در آون حرارت داده شد. در نهایت نانوذرات سیاه‌رنگ که همان ژل‌های سوخته‌است، به دست آمد. نانوذرات حاصل به مدت ۴ ساعت در کوره در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. در اثر این عمل ساختار بی‌شکل به بلورین تبدیل می‌شود. در نهایت، نانوذرات سنتز شده نهایی در ظروف مناسب ریخته شد تا برای آزمون‌های مختلف استفاده شود. مراحل سنتز این پودرهای فریتی در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱- روندنمای تهیه نانوذرات فریت نیکل روی به روش خوداحتراقی

۳-۲-۱-۲- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت سنتز شده با روش هم رسوبی با

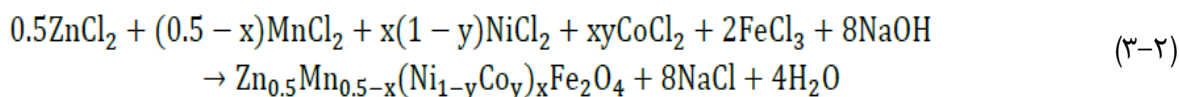
فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$

X مقادیر ۰، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و Y مقادیر ۰، ۰/۵ و ۱ را گزینش می کند. این فریت‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۳-۵- نمونه‌های فریت منگنز روی تهیه شده در غلظت‌های گوناگون X و Y

کد	فرمول استوکیومتری	Y	X
A ₁	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	-	۰
A ₂	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni]_{0.1}Fe_2O_4$	۰	۰/۱
A ₃	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.1}Fe_2O_4$	۰/۵	۰/۱
A ₄	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Co]_{0.1}Fe_2O_4$	۱	۰/۱
A ₅	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Ni]_{0.3}Fe_2O_4$	۰	۰/۳
A ₆	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.3}Fe_2O_4$	۰/۵	۰/۳
A ₇	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Co]_{0.3}Fe_2O_4$	۱	۰/۳
A ₈	$Zn_{0.5}[Ni]_{0.5}Fe_2O_4$	۰	۰/۵
A ₉	$Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.5}Fe_2O_4$	۰/۵	۰/۵
A ₁₀	$Zn_{0.5}[Co]_{0.5}Fe_2O_4$	۱	۰/۵

با استفاده از فرمول استوکیومتری و روش سنتز هم رسوبی که در ذیل به آن اشاره شده است فریت های مربوطه تهیه می شوند. برای تهیه فریتها برای هر کدام از مقادیر x و y با استفاده از فرمول استوکیومتری ۲-۳ مقدار اولیه مورد نیاز هر ماده محاسبه و با ترازوی دیجیتالی توزین شدند.



مواد اولیه مورد نظر در جدول ۳-۶ آورده شده است.

جدول ۳-۶- مشخصات مواد اولیه مورد نیاز برای تهیه فریت منگنز روی به روش هم رسوبی

نام ماده	فرمول شیمیایی	جرم مولی (g/mol)	کمینه درصد خلوص	شرکت سازنده
کلرید آهن شش آبه	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۲۷۰/۳۳	۹۹	Merck
کلرید روی	ZnCl_2	۱۳۶/۲۸	۹۸	Merck
کلرید منگنز چهار آبه	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	۱۹۷/۹۱	۹۸	Scharlau
کلرید نیکل شش آبه	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۲۳۷/۷۱	۹۸	Scharlau
کلرید کبالت شش آبه	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۲۳۷/۹۳	۹۹	Scharlau
سود	NaOH	۴۰/۰۰	۹۹/۰	Merck

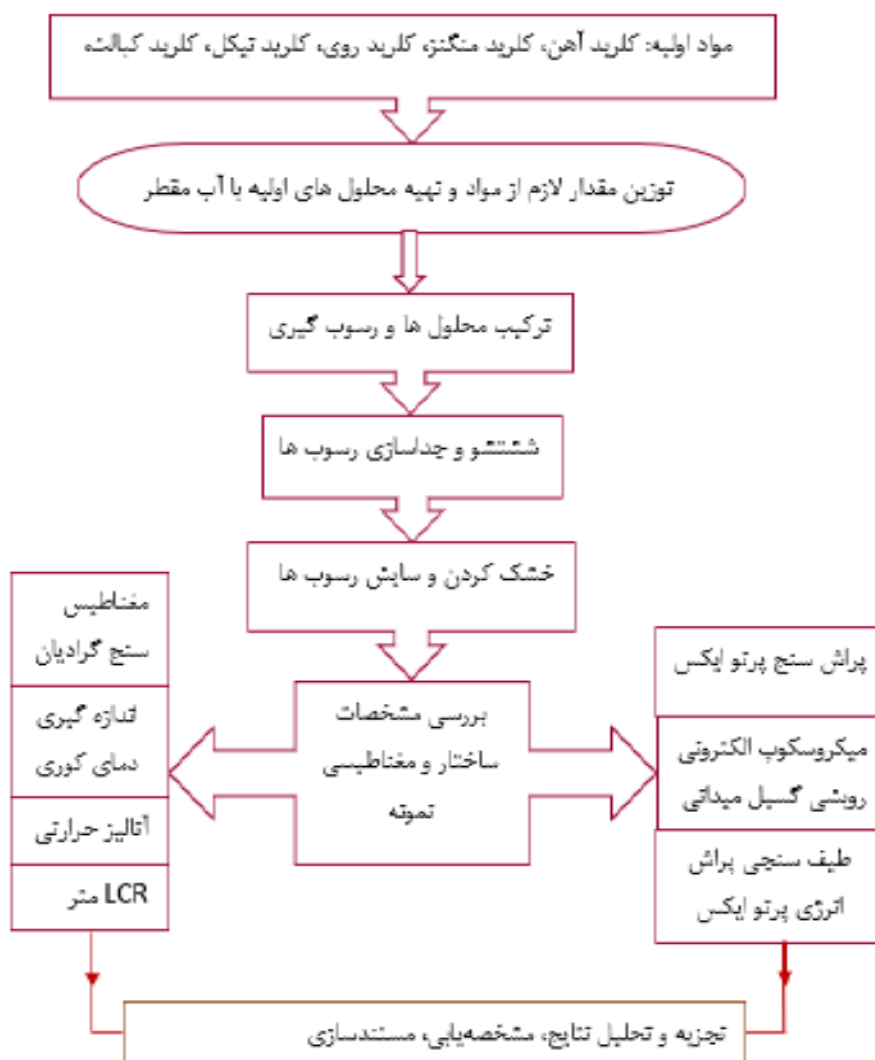
در روش هم رسوبی برای تهیه فریتها، ابتدا محلول هایی با مولاریته مشخص از سود و مواد اولیه کلریدی با آب مقطر به عنوان حلال تهیه گردید. محلول کلرید آهن روی گرمکن- همزن مغناطیسی قرار گرفته و محلول های دیگر به آن اضافه شدند و ترکیب حاصل تا رسیدن به دمای 80°C ، با سرعت ثابت هم زده شد. محلول سود را به طور جداگانه روی گرمکن- همزن گذاشته و با سرعت ثابت تا دمای 80°C هم زده شد. پس از رسیدن دمای دو محلول به 80°C ، به یکباره محلول حاوی مواد کلریدی به محلول سود اضافه شد. در این حالت یک رسوب قهوه ای تیره (در شکل ۲ نشان داده شده است) با pH برابر ۱۲ تشکیل شد. برای تشکیل همگن شدن ذرات، همزدن محلول رسوب به مدت یک ساعت با سرعت ثابت ادامه داده شد. پس از آن، بشر را از روی گرمکن- همزن برداشته تا رسوب تشکیل شده ته نشین شود. برای اینکه یون های آزاد کلر و سدیم موجود در رسوب از بین برود، باید رسوب های حاصل از واکنش چندین مرتبه با آب مقطر شسته شوند. برای شستشو، پس از ته نشین شدن رسوب های تشکیل شده، آب روی رسوب تخلیه می گردد و این عمل چندین مرتبه تکرار می شود تا pH محلول به حدود ۷ برسد. برای خشک کردن رسوب های

حاصله، آن ها در آون قرار داده شدند. رسوب‌های خشک به دست آمده با هاونگ سائیده شدند تا نانوپودر همگن و یکنواختی به دست آید. در نهایت نانوذرات درون ظرف مناسب ریخته شد تا برای آزمون های مختلف استفاده شود.



شکل ۳-۲- محلول های اولیه و رسوب فریت تشکیل شده

مراحل سنتز این پودرهای فریتی در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳- روندنمای تهیه نانوذرات فریت منگنز روی

۳-۱-۲-۳- فریت روی جانشانی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم

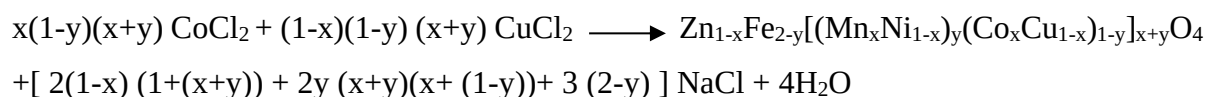
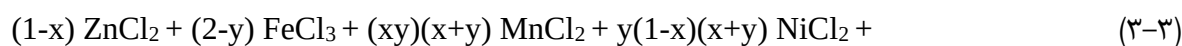
رسوبی با فرمول استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$

x و y هر دو، مقدارهای ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می کنند. که این عناصر در جدول ۳-۷ نشان داده شده است.

جدول ۳-۷- واحدهای فرمولی نانو ذرات فریت روی با جانشانی-های گوناگون عناصر کاتیونی

x	y	کد نمونه	پودرهای فریتی
0	0	E ₁	$ZnFe_2O_4$
	0.4	E ₂	$ZnFe_{1.6}[Ni_{0.4}Cu_{0.6}]_{0.4}O_4$
	0.8	E ₃	$ZnFe_{1.2}[Ni_{0.8}Cu_{0.2}]_{0.8}O_4$
	1	E ₄	$ZnFeNiO_4$
0.4	0	E ₅	$Zn_{0.6}Fe_2[Co_{0.4}Cu_{0.6}]_{0.4}O_4$
	0.4	E ₆	$Zn_{0.6}Fe_{1.6}[(Mn_{0.4}Ni_{0.6})_{0.4}(Co_{0.4}Cu_{0.6})_{0.6}]_{0.8}O_4$
	0.8	E ₇	$Zn_{0.6}Fe_{1.2}[(Mn_{0.4}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.4}Cu_{0.6})_{0.2}]_{1.2}O_4$
	1	E ₈	$Zn_{0.6}Fe(Mn_{0.4}Ni_{0.6})_{1.4}O_4$
0.8	0	E ₉	$Zn_{0.2}Fe_2[Co_{0.8}Cu_{0.2}]_{0.8}O_4$
	0.4	E ₁₀	$Zn_{0.2}Fe_{1.6}[(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{0.4}(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.6}]_{1.2}O_4$
	0.8	E ₁₁	$Zn_{0.2}Fe_{1.2}[(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.2}]_{1.6}O_4$
	1	E ₁₂	$Zn_{0.2}Fe(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{1.8}O_4$
1	0	E ₁₃	$CoFe_2O_4$
	0.4	E ₁₄	$Fe_{1.6}[(Mn)_{0.4}(Co)_{0.6}]_{1.4}O_4$
	0.8	E ₁₅	$Fe_{1.2}[(Mn)_{0.8}(Co)_{0.2}]_{1.8}O_4$
	1	E ₁₆	Mn_2FeO_4

با استفاده از فرمول استوکیومتری و روش سنتز هم رسوبی که در ذیل به آن اشاره شده است فریت های مربوطه تهیه می شوند. برای تهیه فریتها برای هر کدام از مقادیر x و y با استفاده از فرمول استوکیومتری ۳-۳ مقدار اولیه مورد نیاز هر ماده محاسبه و با ترازوی دیجیتالی توزین شدند.



مواد اولیه مورد نظر در جدول ۳-۸ آورده شده است.

جدول ۳-۸- مشخصات مواد اولیه مورد نیاز برای تهیه فریت روی به روش هم رسوبی با جانشانی های گوناگون عناصر کاتیونی

نام ماده	فرمول شیمیایی	جرم مولی (g/mol)	کمینه درصد خلوص	شرکت سازنده
کلرید آهن شش آبه	FeCl ₃ .6H ₂ O	۲۷۰/۳۳	۹۹	Merck
کلرید روی	ZnCl ₂	۱۳۶/۲۸	۹۸	Merck
کلرید منگنز چهار آبه	MnCl ₂ .4H ₂ O	۱۹۷/۹۱	۹۸	Merck
کلرید نیکل شش آبه	NiCl ₂ .6H ₂ O	۲۳۷/۷۱	۹۸	Merck
کلرید کبالت	CoCl ₂ . 6H ₂ O	۲۳۷/۹۳	۹۹	Merck
کلرید مس	CuCl ₂ . 2H ₂ O	۱۷۰/۴۸	۹۹	Merck
سود	NaOH	۴۰	۹۹	Merck

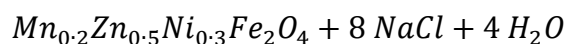
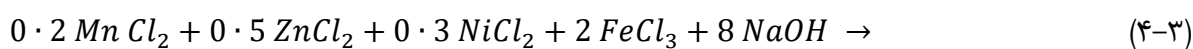
این نوع پودرهای فریتی به روش هم رسوبی و مطابق با نحوه سنتز اشاره شده در شکل ۳-۲ تهیه شده است.

۳-۲-۱-۴- فریت منگنز نیکل روی با فرمول مولکولی $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ سنتز شده به روش هم رسوبی و حرارت داده شده در دماهای $900^{\circ}C$ ، $1000^{\circ}C$ ، $1100^{\circ}C$ و $1250^{\circ}C$ مواد اولیه مورد نیاز برای تهیه این نانوپودر فریتی در جدول ۳-۹ آورده شده است.

جدول ۳-۹- خصوصیات مواد اولیه مورد استفاده برای تهیه فریت منگنز نیکل روی

نام ماده	فرمول شیمیایی	(g/mol) جرم مولی	کمینه درصد خلوص	شرکت سازنده
کلرید آهن شش آبه	FeCl ₃ .6H ₂ O	۲۷۰/۳۳	۹۹	Merck
کلرید روی	ZnCl ₂	۱۳۶/۲۸	۹۸	Merck
کلرید منگنز چهار آبه	MnCl ₂ .4H ₂ O	۱۹۷/۹۱	۹۸	Merck
کلرید نیکل شش آبه	NiCl ₂ .6H ₂ O	۲۳۷/۷۱	۹۸	Merck
سود	NaOH	۴۰	۹۹	Merck

با استفاده از فرمول استوکیومتری ذیل و روش سنتز هم رسوبی فریت مربوطه تهیه شد. با استفاده از فرمول استوکیومتری ۳-۴ مقدار اولیه مورد نیاز هر ماده محاسبه و با ترازوی دیجیتالی توزین شد.



برای دستیابی به مقدار گرم‌های مورد نیاز، محلول‌هایی با مولاریته مشخص از سود و مواد اولیه کلریدی با حلال آب مقطر تهیه گردید. سپس محلول کلرید آهن را روی گرمکن- همزن مغناطیسی قرار داده و محلول‌های دیگر (به غیر از سود) به آن اضافه شدند و ترکیب حاصل تا رسیدن به دمای 80°C ، با سرعت ثابت هم‌زده شد. محلول سود را به‌طور جداگانه روی گرمکن- همزن گذاشته و با سرعت ثابت تا دمای 80°C هم‌زده شد. پس از رسیدن دمای دو محلول به حدود 80°C ، به یکباره محلول حاوی مواد کلریدی به محلول سود اضافه شد. در این حالت یک رسوب قهوه‌ای تیره با pH برابر ۱۲ تشکیل شد. در نهایت گرمکن خاموش ولی برای تشکیل ذرات همگن، هم‌زدن محلول رسوب به مدت یک ساعت با سرعت ثابت ادامه داده شد. پس از آن، بشر را از روی گرمکن - همزن برداشته تا رسوب تشکیل شده ته‌نشین شود. برای اینکه یون‌های آزاد کلر و سدیم موجود در رسوب از بین برود، باید رسوب‌های حاصل از واکنش چندین مرتبه با آب مقطر شسته شوند. برای شستشو، پس از ته‌نشین شدن رسوب‌های تشکیل شده، آب روی رسوب تخلیه می‌گردد و این عمل چندین مرتبه تکرار می‌شود تا pH محلول به حدود ۷ برسد.

برای خشک کردن رسوب‌های حاصله، نمونه سنتز شده در آون قرار داده شدند. رسوب‌های خشک به دست آمده با هاون سائیده شدند تا نانو پودر همگن و یکنواختی به دست آید. سرانجام نانوذرات با استفاده از قالب فلزی از جنس فولاد به شکل حلقه درآمدند و سپس حلقه‌ها و پودرهای سنتز شده در کوره الکتریکی که قابلیت برنامه‌ریزی داشتند، قرار داده شدند.

در جدول ۳-۱۰ نمونه‌های تهیه شده با برنامه گرمایشی به صورت هم‌دما در دمای 1100°C به صورت زیر نشان داده شده است.

جدول ۳-۱۰- برنامه حرارتی بر حسب زمان برای تفجوشی هم‌دما

زمان (min)	دما ($^{\circ}\text{C}$)	سرعت ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
۰	۲۵	۰
۶۸	۷۰۰	۱۰
۷۰	۱۰۵۰	۵
۱۷	۱۱۰۰	۳

به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۱۰۰ باقی می‌ماند و سپس کوره را خاموش کرده و می‌گذاریم سرد شود.

۳-۲-۲- مقایسه مواد اولیه تهیه پودرهای فریتی

طبق توضیحاتی که در خصوص مراحل سنتز نانوذرات فریتی در جدول ۳-۲ ارائه شد مواد اولیه مورد نیاز برای سنتز هریک از نمونه فریت های الف تا د، در جدول ۳-۱۱ با توجه به روش سنتز مورد نظر آورده شده است. همانگونه که مشاهده می شود در روش سنتز خوداحتراقی از نیترات عناصر کاتیونی و در روش هم رسوبی از کلرید این عناصر استفاده می شود.

جدول ۳-۱۱- مقایسه مواد اولیه نمونه های الف تا د

نمونه الف سنتز شده به روش خوداحتراقی	نمونه ب سنتز شده به روش هم رسوبی	نمونه ج سنتز شده به روش هم رسوبی	نمونه د سنتز شده به روش هم رسوبی
Fe (NO ₃) ₂ .9H ₂ O Ni (NO ₃) ₂ .6H ₂ O Zn (NO ₃) ₂ .6H ₂ O Mg (NO ₃) ₂ .6H ₂ O Cu (NO ₃) ₂ .3H ₂ O NH ₅ C ₂ O ₂	FeCl ₃ .6H ₂ O ZnCl ₂ MnCl ₂ .4H ₂ O NiCl ₂ . 6H ₂ O CoCl ₂ . 6H ₂ O CuCl ₂ . 2H ₂ O NaOH	ZnCl ₂ . 4H ₂ O MnCl ₂ . 4H ₂ O FeCl ₃ . 6H ₂ O NiCl ₂ . 6H ₂ O CoCl ₂ . 6H ₂ O CuCl ₂ . 2H ₂ O NaOH	FeCl ₃ .6H ₂ O ZnCl ₂ MnCl ₂ .4H ₂ O NiCl ₂ . 6H ₂ O CoCl ₂ .6H ₂ O NaOH

۳-۲-۳- ساخت هسته فریتی

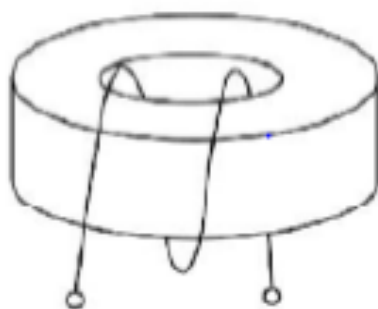
به منظور ساخت هسته فریتی ترانسفورماتور با استفاده از مواد فوق الذکر به صورت حلقوی، مقداری مواد آلی از جمله پلی ونیل الکل^۱ به نانوپودرهای فریتی فوق الذکر اضافه می گردد. این مواد باعث افزایش توانایی شکل دادن به نانوپودرها می گردد. همچنین به عنوان مواد چسبنده و نرم کننده شناخته می شوند. همچنین در میزان استحکام شکل نانوپودرها قبل از مرحله تفجوشی نیز نقش دارند و ضمن افزایش عمر مفید قالب، با کم کردن اصطکاک از ترک خوردن نمونه در هنگام خروج از قالب ممانعت به عمل می آورد. پس از اضافه نمودن مواد آلی به نانوپودرها این ترکیب در قالب فلزی به شکل Toroid یا حلقوی ریخته می شود. قالب فلزی با توجه به نوع کاربرد هسته و شکل مورد نظر، از جنس فولاد طراحی و ساخته می شود.

چنانچه در نظر باشد هسته های مربوطه به صورت انبوه تولید شوند در این صورت قالب های مورد نظر از جنس کاربید تنگستن ساخته می شوند تا فشار وارد شده به نانوپودرهای داخل قالب یکنواخت تر گردد [۱۲]. بنابراین با فشردن نانوپودرهای فریتی توسط دستگاه پرس اصطکاک بین سطح خارجی پودر و دیواره های داخلی قالب زیاد شده و در نتیجه فشار در تمام طول نانوپودرها یکسان نخواهد بود. به قسمت هایی از نانوپودرها که به جدار قالب نزدیک تر هستند نسبت به سایر نقاط فشار بیشتری وارد می شود. عدم یکنواخت بودن در نقاط مختلف موجب می گردد تا نانوپودرها در مرحله تفجوشی به لحاظ چگالی و گشتاور مغناطیسی یکنواخت نباشند.

برای کاهش یکنواختی، می بایست دیواره های قالب مورد نظر کاملاً صیقلی شود و فشار مورد نظر از بالا به پایین به طور همزمان به قالب اعمال گردد. در این مرحله و قبل از عملیات تفجوشی نمونه پرس شده بسیار شکننده می باشد. به منظور جداسازی پلی ونیل الکل و گلیسیرین از نانوپودرهای فشرده شده، این نانوپودرها در کوره الکتریکی با قابلیت اعمال شیب دمایی قرار می گیرند. بیشینه دمایی این کوره ها حدود ۱۴۰۰ درجه سانتی گراد است. مقدار و آهنگ تغییرات دما و زمان دقیق در عملیات تفجوشی با توجه به جنس نمونه ها تعیین می گردد. با رشد دانه های کریستالی فضای خالی درون نمونه کمتر شده و چگالی افزایش می یابد. اگر رشد دانه های کریستالی در اثر افزایش دما به سرعت و در زمان کوتاهی رخ دهد حفره ها و ناخالصی ها در داخل دانه های کریستالی قرار می گیرند که منجر به کاهش نفوذپذیری مغناطیسی و افزایش تلفات می شود.

^۱. PVA

چنانچه با افزایش تدریجی دما، رشد دانه های کریستالی به آرامی صورت پذیرد حفره ها و یا ناخالصی ها به سمت دیواره ها و مرزهای دانه ها حرکت نموده و بین دانه ها قرار می گیرند. با افزایش چگالی نمونه، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و پسماند مغناطیس افزایش یافته و نیروی پسماندزداي مغناطیسی کاهش می یابد [۱۲]. پس از عملیات تفجوشی هسته ساخته شده بنا به نوع شکل مورد نظر، توسط سیم مسی روکش می شود. در هسته حلقوی دو طرف حلقه با دورهای مساوی سیم پیچی می گردد که طرح واره ای از آن در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴- طرحواره هسته حلقوی سیم پیچی شده

۳-۳- انجام آزمون پراش پرتو ایکس^۱ (XRD)

به منظور بررسی ویژگی های ساختاری پودرهای فریتی از پراش پرتو ایکس استفاده شده است. به گونه ای که با تابش پرتو ایکس به یک پودر فریتی، اتم های تشکیل دهنده آن باعث پراش پرتو ایکس می شوند و چون اتم ها معمولاً در جامدات بلوری به صورت منظم در صفحات بلوری نزدیک به هم مرتب شده اند، صفحات بلوری هم جهت باعث تشکیل قله هایی در الگوی پراش می شوند. با مقایسه الگوی پراش رسم شده با الگوهای استاندارد می توان اطلاعاتی مانند اندیس های میلر، میانگین اندازه ی بلورک ها و ثابت های شبکه را به دست آورد [۱۳].

برای شناسایی و تعیین فازهای بلوری، نمونه های فوق الذکر تحت آزمون پراش اشعه ایکس قرار گرفتند. با استفاده از داده های به دست آمده از دستگاه پراش و نرم افزار X'Pert High Score، الگوی پراش پرتو ایکس تشکیل و موقعیت قله های موجود تعیین شدند. در نهایت با مقایسه این قله ها با قله های نمونه های مرجع استاندارد در نرم افزار، فاز یا فازهای تشکیل شده تعیین شدند. همچنین ثابت شبکه، میانگین اندازه بلورک ها طبق روابط ذیل محاسبه شد.

برای محاسبه ثابت شبکه^۲ «a» نانوذرات با ساختار اسپینلی (مکعبی) از رابطه ۳-۵ استفاده شده است [۱۳]:

$$a = d(h^2 + k^2 + l^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3-5)$$

در این رابطه، d فاصله بین صفحات بلوری و (h k l) اندیس های میلر صفحات هستند. برای محاسبه فاصله بین صفحات از رابطه براگ ۳-۶ استفاده می شود:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3-6)$$

برای محاسبه میانگین اندازه بلورک ها، از رابطه شرر^۳ استفاده می شود [۱۳]:

¹. X-Ray Diffraction (XRD)

². Lattice constant

³. Scherrer's formula

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3-7)$$

در این رابطه k ثابت تناسب است و مقدار آن $0/9$ می باشد. λ طول موج پرتوی ایکس فرودی، θ نیم زاویه مربوط به قله ای با پهنای نیم بیشینه β می باشد که برحسب رادیان می باشند. به کمک نرم افزار X'Pert High Score، می توان پهنای در ارتفاع نیم بیشینه قله ها β که با نماد β نشان می دهند را محاسبه کرد. در رابطه شرر پهن شدگی خط تنها به خاطر اندازه نمونه در نظر گرفته می شود.

برای کاهش خطا در محاسبه مقدار پهنای، از رابطه ۳-۸ استفاده می شود:

$$\beta^2 = \beta_{exp}^2 - \beta_{std}^2 \quad (3-8)$$

در این رابطه β_{exp} و β_{std} به ترتیب پهنای اندازه گیری شده در نیم بیشینه قله ها برای نمونه تهیه شده و نمونه استاندارد می باشد. در رابطه شرر برای کاهش خطا می توان اطلاعات مربوط به بیش از یک قله را در نظر گرفت و میانگین گیری کرد. در مورد ذرات ریز، طبق فرمول شرر با کاهش اندازه ذرات، قله ها پهن تر شده و در نتیجه پهنای پیک (β) افزایش می یابد [۱۳ و ۱۴].

به منظور تحلیل نتایج حاصل از تغییرات پارامتر شبکه و اندازه بلورکها، شعاع کاتیونی و گشتاور مغناطیسی برخی از عناصر فلز واسطه در ساختار مکعبی نیز در جدول ۳-۱۲ آورده شده است.

جدول ۳-۱۲- شعاع کاتیونی، و گشتاور مغناطیسی برخی از عناصر فلز واسطه در ساختار مکعبی [۱۵]

عنصر	پیکر بندی الکترون خارجی ترین لایه	شعاع یونی ($\text{\AA}$)	گشتاور مغناطیسی
Fe^{3+}	$3d^5$	$0/67$	۵
Fe^{2+}	$3d^6$	$0/83$	۴
Ni^{2+}	$3d^8$	$0/78$	۲
Cu^{2+}	$3d^{10}$	$0/70$	۱
Zn^{2+}	$3d^{10}$	$0/82$	۰
Mg^{2+}	$2d^2$	$0/78$	۰

آزمون XRD نمونه های مدنظر با دستگاه موجود در دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد که نتایج آن در فصل بعدی بیان خواهد شد.

۳-۴- انجام آزمون انجام آزمون میکروسکوپ الکترونی عبوری^۲ (TEM)

از آنجا که پس از تهیه نانوذرات، بررسی اندازه ذرات، توزیع اندازه ذرات و شکل و ریخت آن ها از اهمیت چشمگیری برخوردار است، لذا از دستگاه های مختلفی براساس میکروسکوپ الکترونی برای بررسی خواص ساختاری آنها استفاده می شود. میکروسکوپ الکترونی عبوری خصوصیات ریز ساختاری فلزات، سرامیک ها، مواد زمین شناسی، پلیمرها و مواد

¹. Full Width at Half Maximum (FWHM)

² Transmission Electron Microscopy (TEM)

بیولوژیکی را با بزرگنمایی بسیار زیاد (حدود ۱۰۰۰ الی ۱,۰۰۰,۰۰۰) تعیین می‌کند. همچنین برای شناسایی (ترکیب شیمیایی و ساختار بلوری)، فازهای غیرآلی، رسوبات و آلودگی‌ها استفاده می‌شود. جزئیات ساختاری را می‌توان در این میکروسکوپ با قدرت تفکیک بیشتر از ۱ نانومتر به دست آورد به شرط اینکه هم در مرحله نمونه‌سازی و هم در کاربرد دستگاه دقت کافی اعمال شود. همچنین عمق میدان در آن ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۰۶ میلی متر می‌باشد. با توجه به اینکه برخی از منابع مالی مورد نیاز پروژه علی رغم تایید گزارشات فاز اول و دوم توسط پژوهشگاه نیرو تامین نشده است آنالیزهای مربوط به این بخش انجام نشده است. در صورت تامین منابع مالی و رفع مشکلات مربوطه این آنالیز انجام خواهد شد.

۳-۵- انجام آزمون میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی^۱ (FE-SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی در مقایسه با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ دارای قدرت تفکیک و عمق میدان بالاتری است و از آن برای آنالیز نانو ساختارها و یا ساختارهایی که نیاز به بررسی با قدرت تفکیک خیلی بالا دارند، بیشتر استفاده می‌شود [۱۸ و ۱۹]. با استفاده از این آزمون، متوسط سایز ذرات اندازه گیری می‌شود. به منظور تعیین اندازه ذره یا دانه با استفاده از تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح گسیل میدانی از نرم افزار دیجی مایزر (Digimizer v4.1.1.0, MedCalc Software, Belgium) استفاده می‌شود. همچنین برای تجزیه و تحلیل ساختاری یا خصوصیات شیمیایی یک نمونه از بیناب سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۳ استفاده می‌شود. از آنجایی که هر عنصر دارای یک ساختار اتمی منحصر به فرد است که مجموعه منحصر به فردی از قله‌ها را در طیف پرتو ایکس آن ممکن می‌سازد [۲۰]. برای برانگیختن انتشار پرتو ایکس مشخصه از یک نمونه، یک دسته پرتو پر انرژی از ذرات باردار مانند الکترون یا پروتون، یا یک دسته پرتو ایکس به نمونه در حال مطالعه متمرکز می‌شود. الکترون‌های حالت پایه در سطوح گسسته انرژی یا لایه‌های الکترون متصل به هسته قرار دارند. پرتو اعمال شده ممکن است یک الکترون در پوسته درونی را تحریک کند و آن را از پوسته خارج سازد و باعث ایجاد یک حفره در مکان پیشین الکترون می‌شود، در این حالت یک الکترون با انرژی بالاتر از یک لایه بیرونی حفره را پر می‌کند و تفاوت انرژی بین لایه پر انرژی و لایه کم انرژی می‌تواند به شکل پرتو ایکس آزاد شود. تعداد و انرژی پرتوهای ایکس گسیل شده از یک نمونه را می‌توان به کمک یک طیف سنج پراش انرژی اندازه گیری کرد. از آنجا که انرژی پرتوهای ایکس بیانگر اختلاف انرژی بین دو لایه و همچنین ساختار اتمی عنصری است که از آن گسیل شده‌اند، امکان اندازه گیری ترکیب عناصر نمونه را فراهم می‌کند [۲۰]. این آنالیز به وسیله دستگاه طیف سنج پراش انرژی پرتو ایکس که معمولاً روی میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نصب می‌شود، انجام می‌شود. از این روش معمولاً برای اندازه گیری درصد وزنی و اتمی عناصر موجود در نمونه و اطمینان از شکل گیری استوکیومتری طبیعی نمونه‌ها و شناسایی عناصر ناخالص در نمونه، استفاده می‌شود. این دستگاه قادر است نقشه‌هایی از توزیع عناصر و همچنین جداول کمی ترکیب نمونه‌ها از مناطق مورد نظر را ارائه دهد. مورفولوژی و خصوصیات ریزساختاری نمونه‌ها در این پروژه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی ساخت شرکت TESCAN مدل MIRA3 متعلق به مرکز پژوهش متالورژی رازی در تهران مورد بررسی قرار گرفت که در فصل چهارم نتایج این آزمون بیان خواهد شد.

جمع بندی

¹. Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM)

². Scanning Electron Microscopy (SEM)

³. Energy Dispersive X Ray Spectroscopy (EDS)

با توجه به سنتز نمونه های فریتی ذیل به روش هم رسوبی و خوداحتراقی، خواص ساختاری آنها بررسی و میانگین اندازه بلورکها، پارامتر شبکه، میانگین اندازه ذرات محاسبه شدند. همچنین مورفولوژی و شکل ذرات و توزیع اندازه ذرات نیز مورد بررسی قرار گرفت.

الف- نانوذرات فریت نیکل روی با فرمول استوکیومتری $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ که در آن x مقادیر ۰، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ و y مقادیر ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می کند.

ب- نانوذرات فریت منگنز روی با فرمول استوکیومتری $\text{Mn}_{0.5-x}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{1-y}\text{Co}_y]_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ که در آن مقادیر x برابر با ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵، و مقادیر y برابر با ۰، ۰/۵ و ۱ را گزینش می کند.

ج- نانوذرات فریت منگنز روی با فرمول استوکیومتری $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}[(\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x})_y(\text{Co}_x\text{Cu}_{1-x})_{1-y}]_{x+y}\text{O}_4$ که در آن x و y هر دو، مقدارهای ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می کند.

د- فریت منگزنیکل روی با فرمول مولکولی $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

جدول ۳-۱۳- مشخصات فنی هسته فریتی

Properties	Value	Reference
Ferrite type	Soft Ferrite (Spinel)	[43-45]
Ferrite material	nickel, manganese, cobalt and copper substituted Zn Ferrite	[46-48]
Core shape	EI	[40, 49]
Frenquencyrange ¹	< 400 KHz	[48, 49]
Initial permeability range (μ_i at 25°C)	1400 to 3500	[47-49]
Flux density range (B_{sat} at 25°C)	350 to 500 (mT)	[47-49]
Curie temperature	≥ 180 (°C)	[47-49]
Coercive field (H_c)	11±15% (A/m)	[40,47]
Core dimensions ³	E Core 25/16/6 (mm) ²	[40,49]
	I Core 25/3/6 (mm) ⁴	[40,49]

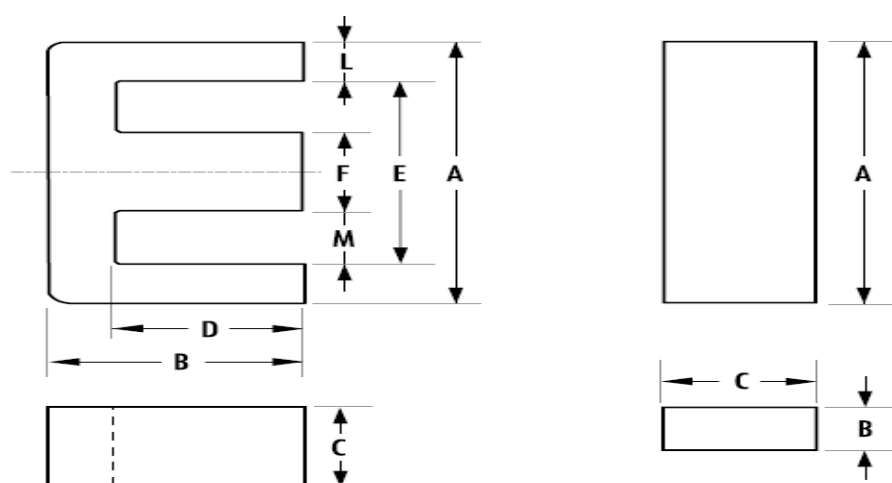
Core dimensions (mm)								
Type/Size	A	B	C	D	E	F	L	M
E25/16/6	25.4 ± 0.38	15.9 ± 0.25	6.35 ± 0.25	12.6	18.8	6.35 ± 0.13	3.12 ± 0.13	6.4 ± 0.25
I 25/3/6	25.4 ± 0.38	3.18 ± 0.12	6.35 ± 0.25	-	-	-	-	-

^۱دستگاه LCR meter مدل HIOKI3522 جهت اندازه گیری اندوکتانس L در پژوهشگاه نیرو موجود است.

^۲0-42515EC Code

^۳حداکثر تعداد هسته های قابل ارائه با این ابعاد ۱۰ عدد می باشد.

^۴0-42515IC Code



منابع

- [1]. B. D. Cullity, C. D. Graham, Introduction to magnetic material, John Wiley and Sons, New Jersey, 2009.
- [2] Ferroxcube, Soft ferrite and accessories, 2009.
- [3] B. D. Cullity, C. D. Graham, Introduction to magnetic material, John Wiley and Sons, New Jersey, 2009.
- [4] A. Furuya, Y. Uehara, K. Shimizu, J. Fujisaki, T. Ataka, T. Tanaka and H. Oshima, Magnetic Field Analysis for Dimensional Resonance in Mn-Zn Ferrite Toroidal Core and Comparison with Permeability Measurement, IEEE Transactions on Magnetics, 2017.
- [۵] ربابه بارانی فر و محمد نیایی فر، ساخت و مشخصه یابی نانوذرات فریت آهن- روی- منگنز، ۱۳مین همایش علمی دانشجویی مهندسی مواد و متالورژی ایران، مهرماه ۱۳۹۵، دانشگاه امیرکبیر.
- [6] F. Ghanbari, A. Arab, M. Shishe Bor and M.R. Mardaneh, Magnetic Properties of La/Ni-Substituted Strontium Hexaferrite Nanoparticles Prepared by Coprecipitation at Optimal Conditions, Journal of Electronic Materials, 2017.
- [7] Wei-Chih Hsu, S.C. Chen, P.C. Kuo, C.T. Lie and W.S. Tsai, Preparation of NiCuZn ferrite nanoparticles from chemical co-precipitation method and the magnetic properties after sintering, Materials Science and Engineering B 111 (2004) 142–149.
- [۸] حسین اثنا عشری ایوری و هادی عربی، سنتز نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن به روش هم رسوبی و بررسی تاثیر نسبت غلظت مواد واکنش دهنده بر اندازه و خواص مغناطیسی ذرات، علم و مهندسی سرامیک، جلد ۲، شماره ۱، ۷۷-۸۴، ۱۳۹۲.
- [9] Kandasamy Velmurugan, Vellaiyappan Sangli Karuppanan Venkatachalapathy, Sechassalom Sendhilnathanc, Synthesis of Nickel Zinc Iron Nanoparticles by Coprecipitation Technique, Materials Research; 13(3): 299-303, 2010.
- [10] I.H. Gul, W. Ahmed, A. Maqsood, Electrical and magnetic characterization of nanocrystalline Ni-Zn ferrite synthesis by co-precipitation route, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320 ,270–275,2008.
- [11]. Robert C. Pullar, Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics, Progress in Materials Science 57 ,1191–1334, 2012.
- [۱۲] حسین پور، اصول عملیات حرارتی در ساخت هسته های فریت، صنایع قطعات الکترونیک ایران، ۱۳۷۳.
- [13] Jin, S. et al., " A Common Regularity of Stoichiometry-Induced Morphology Evolution of Transition Metal Carbides, Nitrides, and Diborides during Self-Propagating High-Temperature Synthesis", Cryst. Growth ,vol. 12, pp. 2814–2824, (2012).
- [۱۴] علی عراقی، ماشین های الکتریکی، شرکت چاپ و نشر کتاب های درسی ایران، تهران، ۱۳۹۴.
- [15] T. Tangcharoen, A. Ruangphanit and W. Pecharapa, Structural and magnetic properties of nanocrystalline zinc-doped metal ferrites (metal=Ni; Mn; Cu) prepared by sol-gel combustion method, Ceramics International 39 (2013) S239–S243.
- [۱۶] حمید ابراهیم نیا، اسکندر کشاورز علمداری، محمود کاظم زاد و یدالله گنج خانلو، سنتز نانوذرات اسپینل فریت کبالت به روش میکروامولسیون، مجله تحقیقات مواد نانو کامپوزیتی، (۱۳۸۸) ۲۶۱-۲۶۶.
- [17] M. N. Rahaman, **Sintering of ceramics**, CRC Press, 2007.
- [۱۸] پیروز مرعشی، سعید کاویانی، حسین سرپولکی و علیرضا ذوالفقاری، اصول و کاربرد میکروسکوپ های الکترونی و روش های نوین آنالیز، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ اول ۱۳۸۳.

- [۱۹] نفیسه پرهیزکار، محمودعلی اف خضرای و تقی شهرابی فراهانی، میکروسکوپ الکترونی روبشی عبوری و کاربرد آن در فناوری نانو و علم مواد، ماهنامه فناوری نانو، سال چهاردهم، بهمن ماه ۹۴، شماره ۱۱.
- [20] R.S. Alam, MahmoodMoradi, MohammadRostami, HosseinNikmanesh, Razieh Moayedi and YangBai, Structural, magnetic and microwave absorption properties of doped Ba-hexaferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation method, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 381 (2015)1–9.
- [21] T. Pathak, N. Vasoya, V. Lakhani, and K. Modi, "Structural and magnetic phase evolution study on needle-shaped nanoparticles of magnesium ferrite," Ceramics International, vol. 36, pp. 275-281, 2010.
- [22] R. S Alam, M. Moradi, M. Rostami, H. Nikmanesh, R. Moayedi and Y. Bai, Structural, magnetic and microwave absorption properties of doped Ba-hexaferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation method, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 381 (2015) 1-9.
- [23] S. Manouchehri, S.T. Mohammadi Benehi and M.H. Yousefi, Effect of Aluminum Doping on the Structural and Magnetic Properties of Mg-Mn Ferrite Nanoparticles Prepared by Coprecipitation Method, Springer Science Business, 2016.
- [۲۴] حمزه قربانی و مهین اشراقی، بررسی اثر آلیاژ کروم بر روی ویژگیهای ساختاری و مغناطیسی نانوذرات فریت $MnFe_{2-x}Cr_xO_4$ ، مجله پژوهش سیستم‌های بس‌ذره‌ای، دوره ششم، شماره دوازدهم، زمستان ۱۳۹۵.
- [25] C. Kittel, Introduction to solid state physics, Wiley New York, 1976.
- [۲۵] محمد پرستگاری و مائده فولادگر، طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDS)، فصلنامه علمی سال اول، شماره ۲ (۱۳۹۶) ۱۹–۱۳.
- [27] J. Azadmngiri, preparation of Mn-Zn ferrite nanoparticles from chemical sol-gel combustion method and the magnetic properties after sintering, Journal of Non-Crystalline Solids, (2007) 4170-4173.
- [28] M. Rostami, M. Moradi, H. Nikmanesh, R. S. Alam, Structural, magnetic and microwave absorption properties of doped Ba-hexaferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation method, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, (2015) 1-9.
- [29] A. Humaira and M. Asghari, **Frequency dependent dielectric measurements of Cd_{2+} doped Mn-Zn nano ferrites prepared by sol gel and coprecipitation methods**, Journal of Physics: Conference Series, (2013) 012-014.
- [۳۰] زینب ترابی و علی عرب، تهیه نانوذرات فریت بارییم شش‌گوشی جانشانی شده با کاتیون‌های Mn-Co-Gd و بررسی ویژگی‌های ساختاری، مغناطیسی و جذب مایکروویو آن، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد رشته نانوفیزیک، دانشکده فیزیک کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۵.
- [۳۱] ابراهیم پایمزد، قادر احمدپور، علی قاسمی، تاثیر دمای تفجوشی و افزودنی مس بر خواص ساختاری و مغناطیسی فریت نیکل - روی، مواد پیشرفته در مهندسی، ۱۳۹۲.

فصل چهارم :

فاز چهارم – تجزیه و تحلیل داده‌ها

مقدمه

ترانسفورماتورهای مرسوم که در سیستم‌های قدرت استفاده می‌شوند با عنوان ترانسفورماتورهای فرکانس پایین شناخته می‌شوند، زیرا فرکانس کاری در سیستم‌های قدرت ثابت است (۵۰ هرتز در ایران) است. از جمله عواملی که سبب شد برای کاهش تلفات در شبکه، فرکانس کاری افزایش و ابعاد و وزن ترانسفورماتور کاهش یابد، عبارتند از اندازه بزرگ، وزن بالا، افت ولتاژ، عدم تنظیم کیفیت توان، مشکلات زیست محیطی و نداشتن خروجی برق مستقیم یا ظرفیت ذخیره‌سازی ترانسفورماتورهای مرسوم که با فرکانس شبکه (۵۰ هرتز) کار می‌کنند، هسته‌های آهنی بزرگ و سیم‌پیچی مسی سنگین در آن‌ها.

اگرچه در طول سالیان گذشته اصلاحاتی در جهت بهبود و رفع مشکلات ترانسفورماتورهای معمولی صورت گرفته است اما ظهور و گسترش ریزشبه‌های هوشمند قدرت، نیاز به وجود ترانسفورماتورهای هوشمند با اندازه قابل قبول را به وجود آورده است. در این بین ترانسفورماتور الکترونیک قدرت^۱ را می‌توان به عنوان یک انقلاب در زمینه الکترونیک قدرت به خصوص در ریزشبه‌های هوشمند به حساب آورد که جنس هسته آن فریت است. طبق بررسی‌های انجام شده در فاز اول، دوم و سوم پروژه و همچنین مشخصات فنی هسته مورد نظر که در فاز دوم ارائه شد، در این مرحله از پروژه موارد ذیل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۴-۱- تجزیه و تحلیل XRD نمونه‌های تهیه شده

۴-۲- تعیین اندازه بلورک نمونه‌های تهیه شده

۴-۳- تجزیه و تحلیل تصویرهای TEM و FE-SEM

۴-۴- تجزیه و تحلیل اثر اندازه و شکل ذرات بر بازدهی ذرات هسته‌های ترانسفورماتور

۴-۵- تجزیه و تحلیل ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی و اتلاف‌های مربوط به آن‌ها

۴-۶- تجزیه و تحلیل اثر اندازه برروی ویژگی‌های مغناطیسی

۴-۷- تجزیه و تحلیل اثر جانشانی برروی ویژگی‌های مغناطیسی

۴-۸- تجزیه و تحلیل اثر عملیات حرارتی برروی ویژگی‌های مغناطیسی

۴-۹- دستیابی به مشخصه‌های فریت با کاربردهای هسته‌های ترانسفورماتورها

۴-۱۰- تجزیه و تحلیل فاکتور کیفیت

۴-۱۱- تجزیه و تحلیل بسامد و ولتاژهای هسته فریتی

۴-۱۲- بهینه سازی سنتز نانوذرات فریتی

¹ PET

۴-۱- تجزیه و تحلیل XRD

طبق بررسی‌های انجام شده در فاز دوم و سوم پروژه و همچنین هدف این پژوهش که بررسی تاثیر جانشانی تمام کاتیون‌های مناسب در نمونه‌ها و همچنین هر دو فریت نیکل روی و منگنز روی است، بنابراین حدود ۴۳ ماده فریتی از نوع نیکل روی و منگنز روی جانشانی شده با کاتیون‌های مس، کبالت، منگنز، منیزیم به شرح ذیل، با فرمول‌های استوکیومتری مربوطه به دو روش هم رسوبی و خوداحتراقی سنتز شدند. این پودرهای فریتی بر اساس فرمول‌های استوکیومتری زیر تهیه شده است.

الف- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس سنتز شده به روش خود احتراقی با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ مقادیر ۰، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ و y مقادیر ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می کند.

ب- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ مقادیر ۰، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و y مقادیر ۰، ۰/۵ و ۱ را گزینش می کند.

ج- فریت روی جانشانی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ و x و y هر دو، مقدارهای ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می کند.

این ۴۳ پودر تهیه شده به همراه فرمول استوکیومتری آن‌ها در جدول ۳-۲ بیان شده است. علاوه بر این به منظور بررسی تاثیر دما بر نمونه‌های تهیه شده، از بین نمونه‌ها، نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ به روش هم رسوبی تهیه شد و پس از تهیه تحت عملیات تفجوشی در دماهای مختلف قرار گرفت. در نهایت ویژگی‌های آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

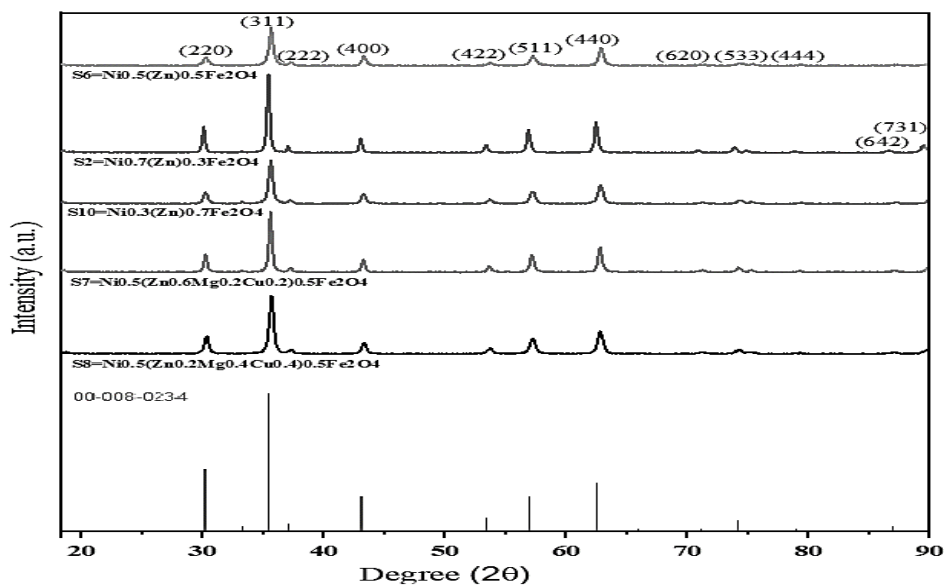
۴-۱-۱- تجزیه و تحلیل XRD نمونه‌های تهیه شده

در ذیل به نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده در خصوص پراش پرتو ایکس هر یک از پودرهای فریتی بر اساس فرمول استوکیومتری مربوطه اشاره می شود:

الف- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی

با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O$

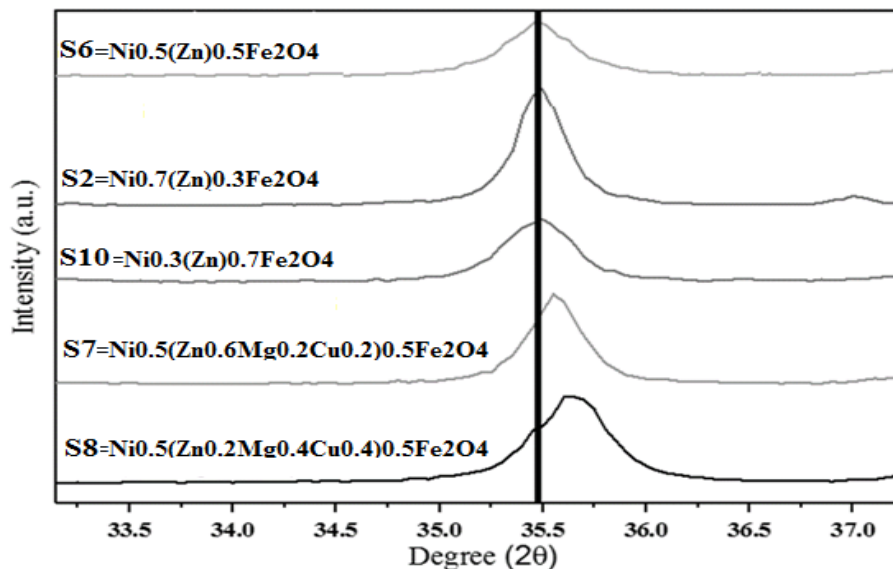
۱۷ نمونه اول جدول ۳-۲، نمونه‌های S_2, S_6, S_7, S_8 و S_{10} برای بررسی الگوهای XRD در نظر گرفته شدند. برای اطمینان از تشکیل فاز و شناسایی ساختار، از نمونه‌های تهیه شده پراش اشعه ایکس گرفته شد. الگوهای پراش با استفاده از نرم افزار X'Pert High Score تعیین و بررسی شد. در شکل ۴-۱ الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های فریتی نشان داده شده است.



شکل ۴-۱- الگوهای پراش پرتو ایکس نانوذرات فریت های نیکل روی $S_2, S_6, S_7, S_8, S_{10}$

به منظور اطمینان از تشکیل فاز نمونه‌ها، الگوهای پراش با نمونه‌های مرجع مقایسه شد. بررسی‌ها نشان داد این الگوها با الگوی نمونه مرجع با شماره استاندارد ۰۰-۰۰۸-۰۲۳۴ مطابقت دارد. همان‌گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود قله‌های پراش نمونه‌ها با نمونه استاندارد مطابقت خوبی دارد، هرچند که در مکان قله‌ها جابجایی زاویه‌ای بسیار اندکی دیده می‌شود. تطابق قله‌های نمونه‌ها با قله‌های استاندارد نشان می‌دهد که نمونه‌های تهیه شده تک‌فاز بوده و ساختار اسپینلی تشکیل شده است.

تاثیر عناصر جانشانی شده بر جابجایی قله‌های اصلی نانوذرات فریت نیکل روی نیز در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- الگوهای پراش پرتو ایکس نانوذرات فریت نیکل روی $S_2, S_6, S_7, S_8, S_{10}$

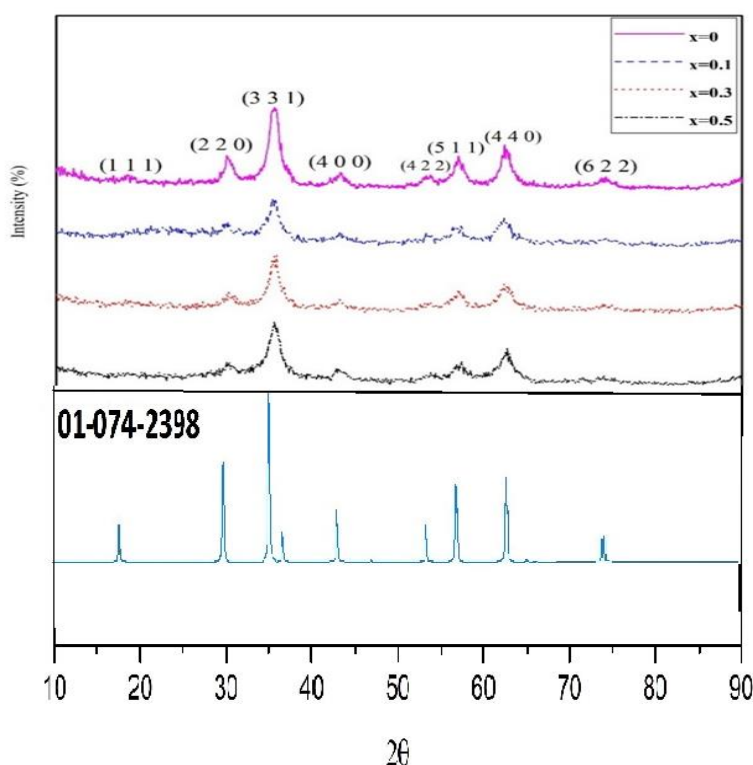
با افزودن مس و منیزیم، مکان قله اصلی در زاویه $35/5^\circ$ به سمت راست جابجا می‌شود که این جابجایی به تغییرات پارامتر شبکه مرتبط است. کاهش پارامتر شبکه، نیز مرتبط با شعاع‌های اتمی مختلف عناصر نیکل، روی، مس

و منیزیوم است. مس و منیزیوم دارای شعاع اتمی کمتری نسبت به نیکل و روی هستند که باعث انقباض شبکه و کاهش پارامتر شبکه اسپینلی فریت نیکل روی می شود.

ب- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول

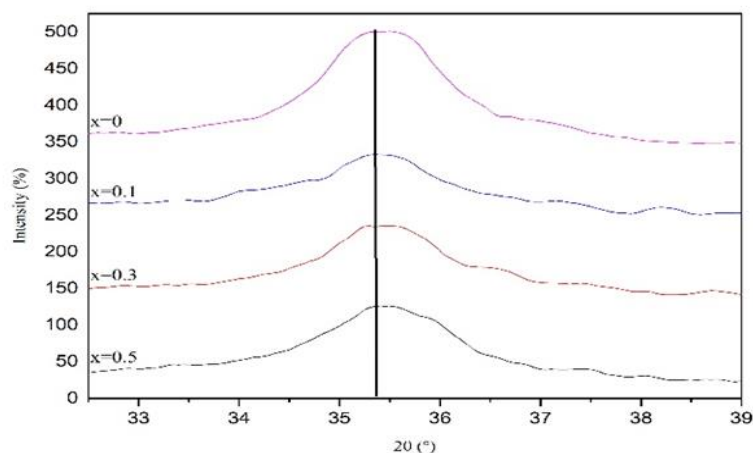
استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$

در این بخش نمونه‌های شماره ۱۸ تا ۲۷ در جدول ۳-۲، نمونه‌های با مقادیر x برابر با ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ و y برابر با ۰، ۰/۵ و ۱ تحت آزمون XRD قرار گرفتند. برای بررسی و شناسایی ساختار این فریت‌ها، از نمونه‌های A_1 ، A_3 ، A_7 و A_9 پراش پرتو ایکس گرفته شد. الگوهای پراش به دست آمده از نمونه‌ها و نمونه استاندارد در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. برای اطمینان از تک فاز شدن نمونه‌ها، الگوهای پراش حاصل با استفاده از نرم افزار X'Pert High Score بررسی و تحلیل شد.



شکل ۳-۴- الگوی پراش پرتو ایکس برای نمونه‌های A_1 ، A_3 ، A_7 و A_9 و نمونه استاندارد با کد ۰۱-۰۷۴-۲۳۹۸

با مقایسه این الگوها با الگوهای نمونه‌های استاندارد نرم‌افزار، مشخص شد که قله‌های نمونه‌ها با قله‌های نمونه استاندارد با کد ۰۱-۰۷۴-۲۳۹۸ همخوانی دارد. با مقایسه قله‌های نمونه‌های سنتز شده و نمونه استاندارد، می‌توان گفت که فاز اسپینل فریت منگنز روی در تمامی نمونه‌ها بدون وجود هرگونه فاز ناخالصی تشکیل شده است. قله‌های مربوط به ساختار اسپینلی با اندیس‌های میلر با قله‌های اصلی نمونه استاندارد مطابقت دارد. همچنین پهن شدگی قله‌ها برای نمونه‌های تهیه شده دلالت بر ریزتر شدن اندازه بلورک‌های نمونه‌ها دارد. طبق رابطه شرر، اندازه بلورک (D) با پهنای قله در نیم بیشینه (β) رابطه عکس دارد؛ بنابراین با کاهش اندازه ذره پهنای افزایش می‌یابد. در شکل ۴-۴ موقعیت قله اصلی نمونه‌های تهیه شده نشان داده شده است.



شکل ۴-۴- موقعیت قله اصلی نمونه ها و تاثیر جانشانی نیکل و کبالت بر این موقعیت.

همان گونه که از شکل بالا مشاهده می شود، قله اصلی بسیار ناچیز به سمت راست، یعنی زاویه های بزرگتر جابه جا شده اند. طبق روابط موجود و بیان شده در گزارش فاز سوم با کاهش ثابت شبکه، فاصله بین صفحات هم کاهش می یابد و در نتیجه مقدار زاویه افزایش می یابد. بنابراین با کاهش ثابت شبکه قله های اصلی بسیار ناچیز به سمت راست، یعنی زاویه های بزرگتر جابه جا می شوند. در جدول ۴-۱ مکان قله اصلی نمونه های تهیه شده و نمونه استاندارد آورده شده است.

جدول ۴-۱- مکان قله اصلی در نمونه های تهیه شده و نمونه استاندارد

کد نمونه	مکان پیک در نمونه های تهیه شده (°)	مکان پیک در نمونه استاندارد (°)
A ₁	۳۵/۴۵	۳۵/۱۸
A ₃	۳۵/۴۹	
A ₇	۳۵/۳۶	
A ₉	۳۵/۴۳	

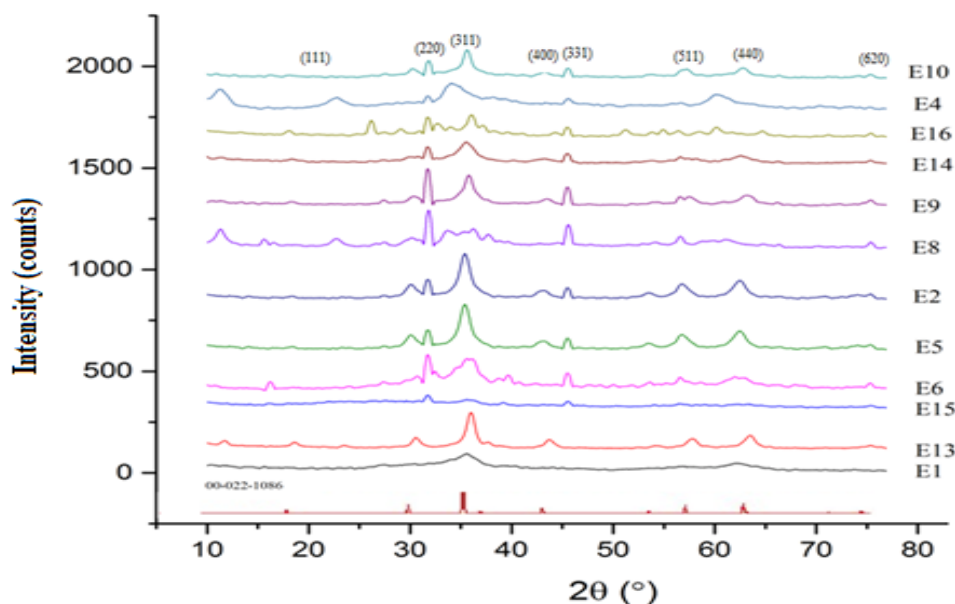
همان گونه که در جدول ۴-۱ مشاهده می شود، جانشانی تنها یکی از کاتیون های نیکل یا کبالت باعث جابه جایی کمتر قله نسبت به زمانی که دو کاتیون به صورت همزمان جانشانی شده اند، می شود.

ج- فریت روی جانشانی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با

فرمول استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$

از نمونه های ۲۸ تا ۴۳ جدول ۳-۲، نمونه هایی که در آن ها هردو متغیر X و Y مقدارهای ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می کنند، بررسی شدند.

برای بررسی و شناسایی ساختار این فریت ها، از نمونه های مورد نظر از جمله E₁, E₂, E₄, E₅, E₆, E₈, E₉, E₁₀, E₁₃, E₁₄, E₁₅, E₁₆ پراش پرتو ایکس گرفته شد. برای اطمینان از تک فاز شدن نمونه ها، الگوهای پراش حاصل با استفاده از نرم افزار X'Pert High Score مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. با مقایسه این الگوها با الگوهای نمونه های استاندارد نرم افزار، مشخص شد که قله های نمونه ها با قله های نمونه استاندارد با کد ۰۱-۰۲۲-۱۰۸۶ همخوانی دارد. این الگوهای پراش در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵- الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های E1, E2, E4, E5, E6, E8, E9, E10, E13, E14, E15, E16.

همان‌گونه که از شکل ۴-۵ دیده می‌شود قله‌های پراش با قله‌های پراش نمونه استاندارد مطابقت دارد که نشان می‌دهد ساختار اسپینل نمونه‌های فریتی بدون وجود هرگونه فاز دیگر تشکیل شده است. قله‌های مربوط به ساختار اسپینلی با اندیس‌های میلر، با قله‌های اصلی نمونه استاندارد مطابقت دارد. پهن شدگی قله‌ها برای نمونه‌های تهیه شده دلالت بر ریزتر شدن اندازه بلورک‌های نمونه‌ها دارد. طبق رابطه شرر، اندازه بلورک (D) با پهنای قله در نیم بیشینه (β) رابطه عکس دارد؛ بنابراین با کاهش اندازه ذره پهنای افزایش می‌یابد.

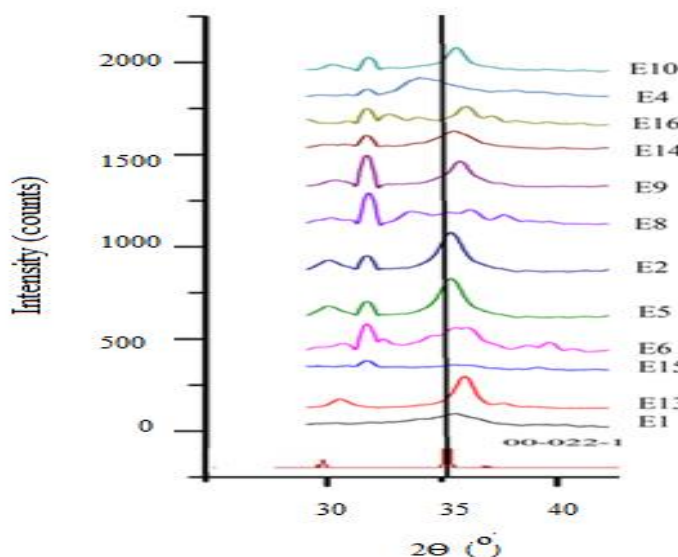
جابجایی کاتیون‌ها در جایگاه‌های ساختار اسپینلی در اثر انرژی گرمایی می‌تواند دلیلی بر تغییر شدت قله‌ها باشد. انرژی فعال‌سازی ناشی از گرمای داده شده به نمونه باید دارای مقدار مشخص باشد. بنابراین اگر دما بیشتر از انرژی مورد نیاز یک کاتیون برای قرار گرفتن در جایگاه مناسب باشد، در شبکه بلوری بی‌نظمی رخ می‌دهد و باعث افزایش پراکندگی و کاهش شدت قله‌ها خواهد شد [۱].

در جدول ۴-۲ مکان قله اصلی نمونه‌های سنتز شده و نمونه استاندارد آورده شده است.

جدول ۴-۲- مکان قله اصلی در نمونه‌های تهیه شده و نمونه استاندارد

نام نمونه	فریت	مکان پیک در الگوی پراش پرتوی ایکس (°)	مکان پیک در نمونه استاندارد (°)
E ₁	ZnFe ₂ O ₄	۳۶	۳۵/۵
E ₂	ZnFe _{1.6} [Ni _{0.4} Cu _{0.6}] _{0.4} O ₄	۳۶/۶	
E ₄	ZnFeNiO ₄	۳۳/۵	
E ₅	Zn _{0.6} Fe ₂ [Co _{0.4} Cu _{0.6}] _{0.4} O ₄	۳۶/۴	
E ₆	Zn _{0.6} Fe _{1.6} [(Mn _{0.4} Ni _{0.6}) _{0.4} (Co _{0.4} Cu _{0.6}) _{0.6}] _{0.8} O ₄	۳۶/۳	
E ₈	Zn _{0.6} Fe (Mn _{0.4} Ni _{0.6}) _{1.4} O ₄	۳۷/۳	
E ₉	Zn _{0.2} Fe ₂ [Co _{0.8} Cu _{0.2}] _{0.8} O ₄	۳۶/۹	
E ₁₀	Zn _{0.2} Fe _{1.6} [(Mn _{0.8} Ni _{0.2}) _{0.4} (Co _{0.8} Cu _{0.2}) _{0.6}] _{1.2} O ₄	۳۷/۲	
E ₁₃	Co Fe ₂ O ₄	۳۷/۲	
E ₁₄	Fe _{1.6} [(Mn) _{0.4} (Co) _{0.6}] _{1.4} O ₄	۳۶/۴	
E ₁₅	Fe _{1.2} [(Mn) _{0.8} (Co) _{0.2}] _{1.8} O ₄	۳۶/۵	
E ₁₆	Mn ₂ FeO ₄	۳۷/۵	

همان گونه که در جدول ۴-۲ مشاهده می‌شود، جانشانی کاتیون نیکل، مس، منگنز و کبالت باعث جابه‌جایی قله‌ها شده است. جابجایی قله‌های پراش پرتو ایکس نمونه‌های سنتز شده در مقایسه با قله‌های نمونه استاندارد در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶- موقعیت قله اصلی نمونه ها و تاثیر جانشانی منگنز، نیکل، کبالت و مس بر این موقعیت.

همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، قله اصلی به سمت راست، یعنی زاویه های بزرگتر جابه جا شده اند. طبق رابطه موجود با کاهش ثابت شبکه، فاصله بین صفحات هم کاهش می یابد و در نتیجه مقدار زاویه افزایش می یابد. بنابراین با کاهش ثابت شبکه قله های اصلی بسیار ناچیز به سمت راست، یعنی زاویه های بزرگتر جابه جا می شوند.

۴-۱-۱-۱-۱-۴ مقایسه الگوهای پراش پرتو ایکس پودرهای فریتی تهیه شده به روش هم رسوبی و خوداحتراقی

به منظور اطمینان از تشکیل فاز نمونه ها، الگوهای پراش هریک از نمونه ها با الگوهای نمونه های استاندارد، مقایسه شدند. در جدول ۳-۴ فرمول هر نمونه و شماره الگوی استاندارد آورده شده است.

جدول ۳-۴- نمونه های استاندارد الگوی پراش پرتو ایکس نمونه های فریتی و روش سنتز آنها

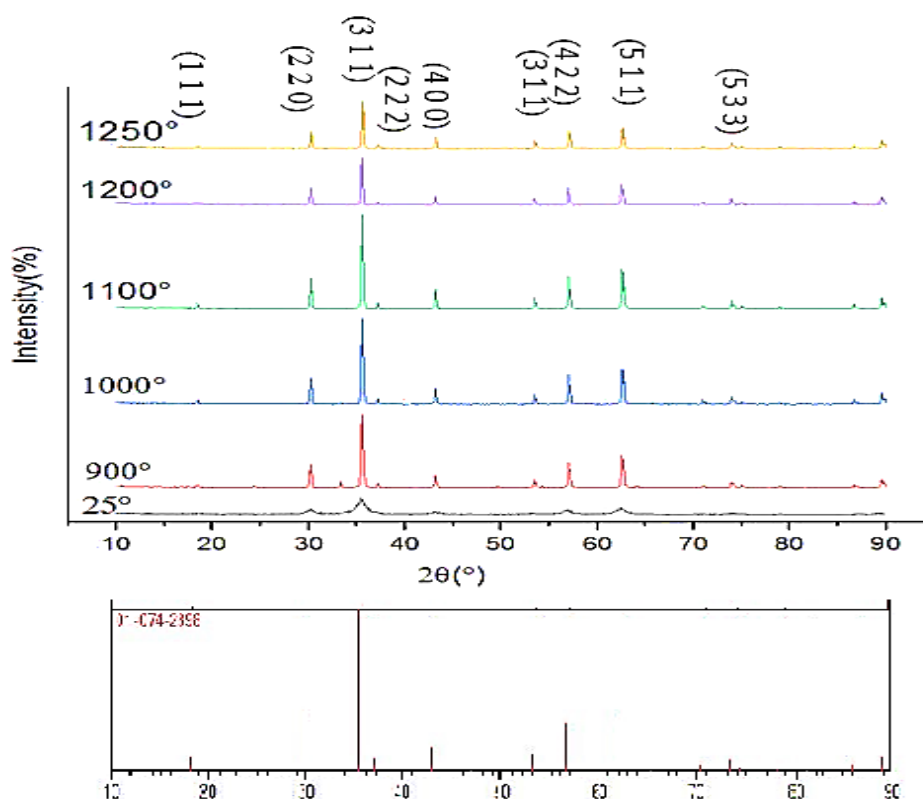
فرمول استوکیومتری نمونه های فریتی	روش سنتز	شماره الگوی استاندارد
$\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$	خوداحتراقی	۰۲۳۴-۰۰۸-۰۰
$\text{Mn}_{0.5-x}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{1-y}\text{Co}_y]_x\text{Fe}_2\text{O}_4$	هم رسوبی	۲۳۹۸-۰۷۴-۰۱
$\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}[(\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x})_y(\text{Co}_x\text{Cu}_{1-x})_{1-y}]_{x+y}\text{O}_4$	هم رسوبی	۱۰۸۶-۰۲۲-۰۱

الگوهای پراش پرتو ایکس و قله های مربوطه با اندیس های میلر هریک از نمونه های فریتی با الگوی نمونه های استاندارد مرتبط که در جدول ۳-۴ آورده شده است مطابقت داشتند. این موضوع تشکیل ساختار اسپینلی نمونه های فریتی بدون وجود هرگونه فاز دیگر تایید می نماید. بنابراین تمام نمونه ها ساختاری اسپینلی دارند. علاوه بر این پهن شدگی قله ها برای نمونه های تهیه شده دلالت بر ریزتر شدن اندازه بلورک های نمونه ها دارد.

۴-۱-۲- تجزیه و تحلیل XRD مربوطه به نمونه تحت عملیات حرارتی قرار گرفته

به منظور بررسی تاثیر دما بر نمونه های تهیه شده، از بین نمونه ها، نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ به روش هم رسوبی انتخاب شدند و پس از تهیه تحت عملیات تفجوشی در دماهای مختلف قرار گرفتند. در نهایت ویژگی های آن مورد ارزیابی قرار گرفت. در ذیل به نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس این نمونه ها اشاره می شود.

به منظور ارزیابی تشکیل فاز و مشخصات ساختاری نمونه‌های تهیه شده، پراش پرتو ایکس در محدوده زاویه‌ای 2θ از 10° تا 90° درجه با اندازه گام 0.05° و مدت زمان 1 ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. تصویرهای الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه سنتز شده و نمونه پخت داده شده در دماهای 900°C ، 1000°C ، 1100°C ، 1200°C و 1250°C با شیب دما - زمان مشخص با اندیس‌های صفحات در شکل ۹ نشان داده شده است. برای اطمینان از تک فاز شدن نمونه‌ها، الگوهای پراش حاصل با استفاده از نرم‌افزار X'Pert High Score مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. به منظور بررسی بیشتر مقایسه قله‌های پراش نمونه‌های تهیه شده با قله‌های پراش نمونه استاندارد با کد $01-074-2398$ در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۷- قله‌های پراش پرتو ایکس فریت $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تهیه شده در دماهای مختلف و نمونه استاندارد با کد ۰۱-۰۷۴-۲۳۹۸.

همان‌گونه که دیده می‌شود قله‌های پراش با قله‌های پراش نمونه استاندارد مطابقت دارد که نشان می‌دهد ساختار اسپینل فریت منگنز-نیکل-روی در همه دماها، بدون وجود هرگونه فاز دیگر تشکیل شده است. پهنای قله‌های نمونه تهیه شده در دمای 25°C در مقایسه با نمونه‌های دیگر بیشتر است. پهن‌شدگی پهنای قله‌ها بر اساس رابطه شرر بیان می‌شود. با افزایش دمای پخت اندازه ذرات رشد یافته و بزرگتر می‌شوند. با بزرگ شدن اندازه بلورک پهنای قله‌ها کمتر می‌شوند.

همچنین مقایسه شدت قله‌ها نشان می‌دهد که شدت قله‌ها برای نمونه‌های پخت داده شده از دمای 1100°C به بعد کاهش یافته است. علت این پدیده می‌تواند جابجایی کاتیون‌ها در جایگاه‌های ساختار اسپینلی در اثر انرژی گرمایی باشد. انرژی فعال‌سازی ناشی از گرمای داده شده به نمونه باید دارای مقدار مشخص باشد، بنابراین اگر دمای پخت داده

شده اتم بیشتر از انرژی مورد نیاز یک کاتیون برای قرار گرفتن در جایگاه مناسب باشد، در شبکه بلوری بی‌نظمی رخ می‌دهد و باعث افزایش پراکندگی و کاهش شدت قله‌ها خواهد شد [۱].

در جدول ۴-۴ مکان قله اصلی نمونه‌های پخت داده شده و نمونه استاندارد آورده شده است.

جدول ۴-۴- مکان قله اصلی در نمونه تهیه شده و نمونه استاندارد

مکان قله در نمونه استاندارد (°)	مکان قله در نمونه‌های تهیه شده (°)
۳۵/۲۱	۳۵/۵۴

همان‌گونه در جدول ۴-۴ نشان داده شده است، جابجایی موقعیت قله‌ها در نمونه‌های تهیه شده مشاهده می‌شود. جانشانی یون نیکل موجب افزایش ثابت شبکه گردیده، بنابراین بر اساس روابط براگ و شرر، با افزایش ثابت شبکه، فاصله بین صفحات افزایش یافته و موجب جابجایی قله‌ها شده است. ثابت شبکه در نمونه سنتز شده قبل از پخت ۸/۴۵۳ آنگستروم می‌باشد.

۴-۲- تعیین اندازه بلورک

با توجه به الگوهای پراش پرتو ایکس به‌دست آمده برای هریک از پودرهای فریتی، میانگین اندازه بلورک‌ها و پارامتر شبکه مربوط به برخی از آن‌ها در ذیل بیان شده است.

۴-۲-۱- اندازه بلورک نمونه‌های تهیه شده

الف- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی

با فرمول استوکیومتری $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$

در این پژوهش برای نمونه‌های نوعی با استفاده از نرم افزار MAUD و روش ریتولد به کمک داده‌های به‌دست آمده از آزمون XRD، میانگین اندازه بلورک‌ها و اندازه پارامتر شبکه محاسبه و نتایج آن در جدول ۴-۵ ارائه شده است.

جدول ۴-۵- اندازه بلورک‌ها و پارامتر شبکه نمونه‌های نوعی فریت نیکل روی جانشانی شده با مس و منیزیم

کد نمونه	اندازه بلورک (nm)	پارامتر شبکه (آنگستروم)
S _۲	۱۲	۸/۳۹۲
S _۶	۸	۸/۳۹۱
S _۷	۱۰	۸/۳۶۱
S _۸	۶	۸/۳۵۲
S _{۱۰}	۷	۸/۳۹۰

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش مقادیر مس و منیزیم در فریت نیکل روی، اندازه بلورک ذرات از ۱۲ به ۶ نانومتر کاهش یافته است. پهن‌شدگی پیک‌ها در الگوهای پراش پرتو ایکس نیز نشان دهنده کاهش اندازه بلورک‌ها است. همچنین پارامتر شبکه از ۸/۳۹۱ به ۸/۳۵۲ آنگستروم کاهش یافته است که این تغییرات به تفاوت شعاع‌های اتمی عناصر نیکل و روی با کاتیون‌های مس و منیزیم نسبت داده می‌شود. مس و منیزیم دارای شعاع اتمی کم‌تری نسبت به نیکل و روی است که همین موضوع باعث شده شبکه انقباض یافته و در نتیجه پارامتر شبکه اسپینلی فریت نیکل روی کاهش یابد. بنابراین، تغییرات ثابت‌های شبکه می‌تواند نشان دهنده‌ی آن باشد که جانشانی با موفقیت انجام شده است.

ب- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول

استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$

در این مطالعه میانگین اندازه بلورکها (D_{Sh}) به کمک رابطه شرر و ثابت شبکه (aXRD) با استفاده از داده‌های پراش و رابطه‌های موجود برای نمونه‌های تهیه شده محاسبه شده است و به همراه ثابت شبکه نمونه استاندارد (A_{Std}) در جدول ۴-۶ آورده شده است.

جدول ۴-۶- مقدار میانگین اندازه بلورک ها و ثابت های شبکه از الگوهای پراش پرتو ایکس و نمونه استاندارد

نام نمونه	D_{Sh} (nm)	aXRD (Å)	aStd (Å)
A_1	۸	۸/۴۰۱	۸/۴۵۳
A_3	۶	۸/۳۴۱	
A_7	۷	۸/۴۱۷	
A_9	۶	۸/۴۳۹	

همان گونه که در جدول ۴-۶ مشاهده می شود، ثابت های شبکه در نمونه های تهیه شده در مقایسه با ثابت شبکه نمونه استاندارد کاهش یافته است. علت این کاهش اختلاف در شعاع کاتیون های نیکل (0.78 Å) و کبالت (0.82 Å) جانشانی شده به جای کاتیون منگنز در فریت منگنز-روی و شعاع کاتیون منگنز (0.91 Å) است [۲]. شعاع کاتیون منگنز از کاتیون های نیکل و کبالت بیشتر است، بنابراین با کاهش غلظت کاتیون منگنز و جانشانی کاتیون های کبالت و نیکل، شبکه بلوری منقبض شده و در نتیجه ثابت شبکه کاهش می یابد. همچنین میانگین اندازه بلورک ها کمتر از ۸ نانومتر می باشد. همچنین طیف به دست آمده از پراش اشعه ایکس نیز دارای پیک های پهن است که خود می تواند تائیدی بر اندازه نانومتری بلورک ها باشد.

ج- فریت روی جانشانی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با

فرمول استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$

میانگین اندازه بلورکها (D_{Sh}) به کمک رابطه شرر و ثابت شبکه (aXRD) با استفاده از داده‌های پراش برای نمونه‌های تهیه شده در این پژوهش محاسبه شده است و به همراه ثابت شبکه نمونه استاندارد (A_{Std}) در جدول ۴-۷ آورده شده است.

جدول ۴-۷- میانگین اندازه بلورکها و ثابت شبکه نمونه های فریتی

نام نمونه	فریت	D _{Sh} (nm)	a _{XRD} (Å)	a _{Std} (Å)
E ₁	ZnFe ₂ O ₄	۸	۸/۳۹	۸/۳۹
E ₂	ZnFe _{1.6} [Ni _{0.4} Cu _{0.6}] _{0.4} O ₄	۶	۸/۴۰	
E ₄	ZnFeNiO ₄	۵	۸/۴۱	
E ₅	Zn _{0.6} Fe ₂ [Co _{0.4} Cu _{0.6}] _{0.4} O ₄	۱۰	۸/۳۹	
E ₆	Zn _{0.6} Fe _{1.6} [(Mn _{0.4} Ni _{0.6})(Co _{0.4} Cu _{0.6}) _{0.6}] _{0.8} O ₄	۷	۸/۴۱	
E ₈	Zn _{0.6} Fe(Mn _{0.4} Ni _{0.6}) _{1.4} O ₄	۶	۸/۴۲	
E ₉	Zn _{0.2} Fe ₂ [Co _{0.8} Cu _{0.2}] _{0.8} O ₄	۱۱	۸/۴۴	
E ₁₀	Zn _{0.2} Fe _{1.6} [(Mn _{0.8} Ni _{0.2})(Co _{0.8} Cu _{0.2}) _{0.6}] _{1.2} O ₄	۸	۸/۴۶	
E ₁₃	CoFe ₂ O ₄	۱۳	۸/۴۱	
E ₁₄	Fe _{1.6} [(Mn) _{0.4} (Co) _{0.6}] _{1.4} O ₄	۹	۸/۴۳	
E ₁₅	Fe _{1.2} [(Mn) _{0.8} (Co) _{0.2}] _{1.8} O ₄	۱۲	۸/۴۵	
E ₁₆	Mn ₂ FeO ₄	۶	۸/۴۷	

همان گونه که از این جدول مشاهده می شود، ثابت های شبکه در نمونه های تهیه شده در مقایسه با ثابت شبکه نمونه استاندارد افزایش یافته است. علت این افزایش، اختلاف در شعاع یونی منگنز (۰/۹۱ Å)، نیکل (۰/۷۸ Å)، مس (۰/۷۰ Å) و کبالت (۰/۸۲ Å) جانشانی شده به جای آهن و روی به ترتیب با شعاع یونی (۰/۶۷ Å) و (۰/۸۲ Å) در در فریت روی است [۱]. با مقایسه شعاع کاتیونی یون ها مشخص است که شعاع یونی منگنز، نیکل، مس و کبالت از شعاع یونی آهن بیشتر است. بنابراین با کاهش غلظت روی و آهن و جانشانی کاتیون های کبالت، مس، منگنز و نیکل، شبکه بلوری منبسط شده و در نتیجه ثابت شبکه افزایش می یابد.

میانگین اندازه بلورکها که طبق رابطه شرر محاسبه شده است، حدود ۵-۱۳ نانومتر است. پهنای قله ها در طیف پراش پرتو ایکس نیز اندازه اندازه نانومتری بلورکها را تایید می نماید.

۴-۲-۱- مقایسه میانگین اندازه بلورکها و پارامتر شبکه پودرهای فریتی تهیه شده

با توجه به نتایج حاصل از بررسی الگوهای پراش پرتو ایکس برای هریک از پودرهای فریتی، میانگین اندازه بلورکها و پارامتر شبکه این فریت ها طبق موارد لحاظ شده در جدول ۴-۸ با یکدیگر مقایسه شدند.

جدول ۴-۸- مقایسه میانگین اندازه نانوبلورک و پارامتر شبکه پودرهای فریتی تهیه شده به روش هم رسوبی و خوداحتراقی

پارامتر شبکه (Å°)	میانگین اندازه بلورکها (nm)	کد نمونه	پودرهای فریت سنتز شده
۸/۳۹	۱۲	S ₂	Ni _{0.7} (Zn) _{0.3} Fe ₂ O ₄
۸/۳۹	۸	S ₆	Ni _{0.5} (Zn) _{0.5} Fe ₂ O ₄
۸/۳۶	۱۰	S ₇	Ni _{0.5} (Zn) _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) _{0.5} Fe ₂ O ₄
۸/۳۵	۶	S ₈	Ni _{0.5} (Zn) _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) _{0.5} Fe ₂ O ₄
۸/۳۹	۷	S ₁₀	Ni _{0.3} (Zn) _{0.7} Fe ₂ O ₄
۸/۴۰	۸	A ₁	Mn _{0.5} Zn _{0.5} Fe ₂ O ₄

۸/۳۴	۶	A ₃	Mn _{0.4} Zn _{0.5} [Ni _{0.5} Co _{0.5}] _{0.1} Fe ₂ O ₄
۸/۴۱	۷	A ₇	Mn _{0.2} Zn _{0.5} [Co] _{0.3} Fe ₂ O ₄
۸/۴۳	۶	A ₉	Zn _{0.5} [Ni _{0.5} Co _{0.5}] _{0.5} Fe ₂ O ₄
۸/۳۹	۸	E ₁	ZnFe ₂ O ₄
۸/۴۰	۶	E ₂	ZnFe _{1.6} [Ni _{0.4} Cu _{0.6}] _{0.4} O ₄
۸/۴۱	۵	E ₄	ZnFeNiO ₄
۸/۳۹	۱۰	E ₅	Zn _{0.6} Fe ₂ [Co _{0.4} Cu _{0.6}] _{0.4} O ₄
۸/۴۱	۷	E ₆	Zn _{0.6} Fe _{1.6} [(Mn _{0.4} Ni _{0.6}) _{0.4} (Co _{0.4} Cu _{0.6}) _{0.6}] _{0.8} O ₄
۸/۴۲	۶	E ₈	Zn _{0.6} Fe (Mn _{0.4} Ni _{0.6}) _{1.4} O ₄
۸/۴۴	۱۱	E ₉	Zn _{0.2} Fe ₂ [Co _{0.8} Cu _{0.2}] _{0.8} O ₄
۸/۴۶	۸	E ₁₀	Zn _{0.2} Fe _{1.6} [(Mn _{0.8} Ni _{0.2}) _{0.4} (Co _{0.8} Cu _{0.2}) _{0.6}] _{1.2} O ₄
۸/۴۱	۱۳	E ₁₃	Co Fe ₂ O ₄
۸/۴۳	۹	E ₁₄	Fe _{1.6} [(Mn) _{0.4} (Co) _{0.6}] _{1.4} O ₄
۸/۴۵	۱۲	E ₁₅	Fe _{1.2} [(Mn) _{0.8} (Co) _{0.2}] _{1.8} O ₄
۸/۴۷	۶	E ₁₆	Mn ₂ FeO ₄

مقایسه میانگین اندازه بلورکهای نمونه‌های مختلف در جدول بالا نشان می‌دهد میانگین اندازه بلورکهای نمونه‌های E₁₃، E₁₅ و S₂ نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است. پهنای قله‌های پراش این نمونه‌ها در طیف‌های مربوطه نیز این موضوع را تایید می‌نماید. همچنین پارامتر شبکه نمونه‌های A₁، A₇ و A₉ نسبت به سایر نمونه‌ها، بزرگتر است. تغییر میانگین اندازه بلورک‌ها و پارامتر شبکه به شعاع یونی کاتیون‌های جانشانی شده، روش سنتز نمونه‌ها، توزیع کاتیون‌ها در جایگاه‌های A و B بستگی دارد.

۳-۴- تجزیه و تحلیل تصویرهای TEM و FE-SEM

پس از تهیه نانوذرات و اطمینان از تشکیل فاز اسپینلی در آن‌ها، برای بررسی اندازه ذرات، توزیع اندازه ذرات و شکل و ریخت آن‌ها از آزمون میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FE-SEM) استفاده شد که نتایج آن‌ها در ذیل بیان می‌شود.

۳-۴-۱- تجزیه و تحلیل تصویرهای FE-SEM نمونه‌های تهیه شده

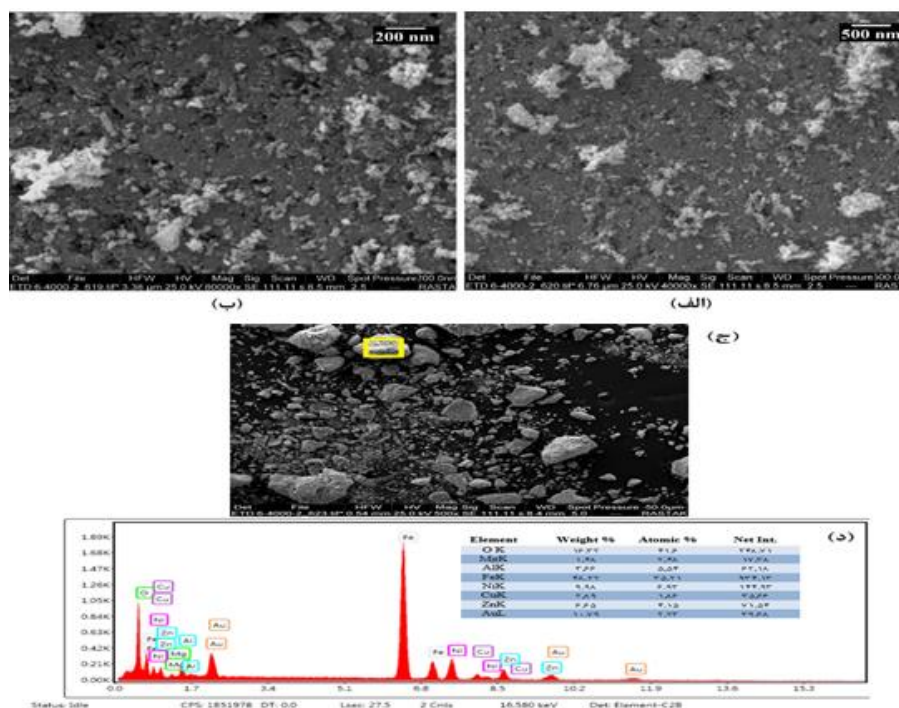
الف- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی

با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$

از ۱۷ نمونه اول جدول ۳-۲، نمونه‌هایی که در آن‌ها x مقادیر ۰، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ و y مقادیر ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ را گزینش می‌کند، در نظر گرفته شدند.

برای بررسی چگونگی توزیع اندازه ذرات و ریخت نانو ذرات تولید شده از روش احتراقی، از نمونه‌ها تصاویر FESEM با بزرگنمایی‌های ۴۰ و ۸۰ هزار برابر با ولتاژ ۲۵ کیلو ولت گرفته شد. هم‌چنین برای تحلیل و بررسی ویژگی‌های شیمیایی ترکیب‌های تولید شده، از نمونه‌ها، آزمون طیف‌سنجی تفکیک توزیع انرژی^۱ گرفته شد.

¹Energy Dispersive Spectroscopy

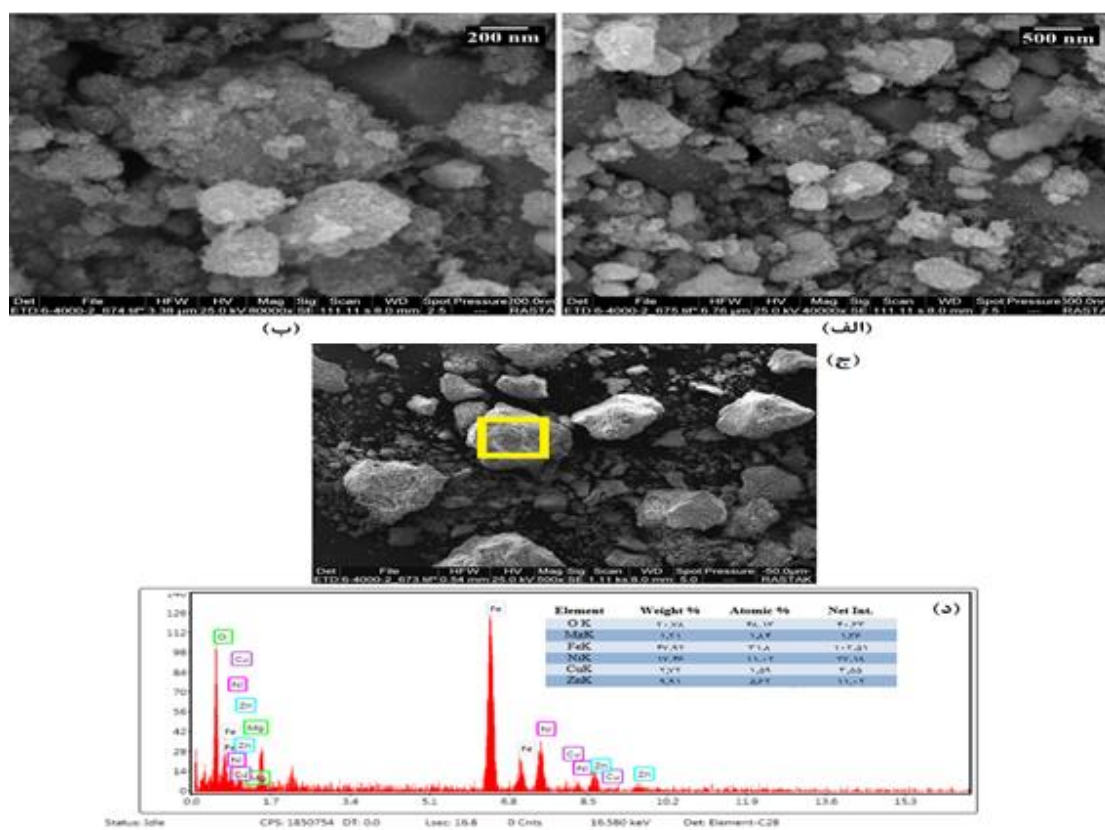


شکل ۴-۸- تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی نمونه S7 با فرمول

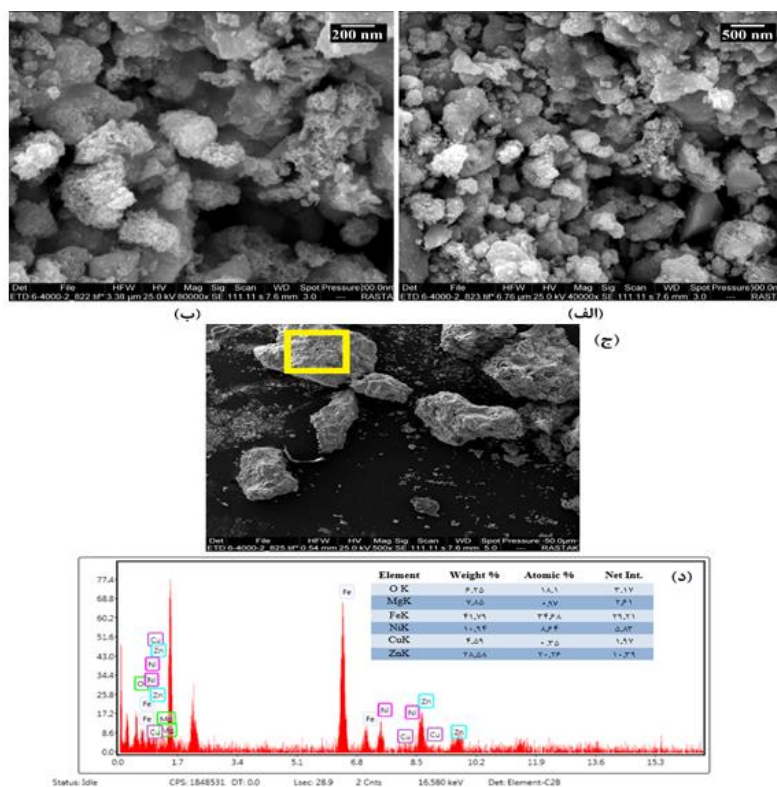
$(\text{Ni}_{0.5}(\text{Zn}_{0.6}\text{Mg}_{0.2}\text{Cu}_{0.2})_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4)$ (الف) بزرگنمایی ۴۰ هزار در مقیاس ۵۰۰ نانومتر، (ب) بزرگنمایی ۸۰ هزار برابر در مقیاس ۲۰۰

نانومتر، (ج) موقعیت مکان آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی، (د) نمودار آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی.

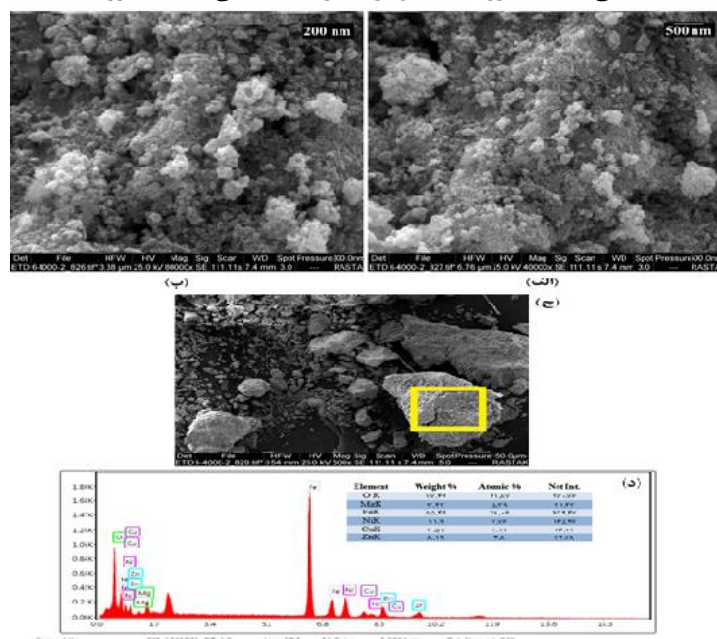
همان گونه که از شکل ۴-۸ مشاهده می شود ریخت تمامی ذرات متمایل به کروی شکل است و همچنین توزیع اندازه ذرات تقریباً یکنواخت بوده و در محدوده ۲۰ تا ۳۰ نانومتر است، اما برخی ذرات تا حدود زیادی آگلومره شده دیده می شوند. وجود آگلومره در نانو ذرات معمول می باشد که به علت نسبت بالای سطح به حجم ذرات نانو و در نتیجه تمایل به هم چسبیدن برای کاهش انرژی سطحی می باشد. در ذرات ریز با کاهش ابعاد ذرات نسبت تعداد اتم های واقع در سطح به اتم های حجم افزایش می یابد و این موضوع افزایش انرژی آزاد سطحی را در پی دارد و از آن جا که از نظر ترمودینامیکی هر شرایطی که انرژی آزاد را کاهش داد شرایط پایدارتری است و پدیده ها به صورت خود بخودی به آن سمت تمایل دارند لذا ذرات برای کاهش سطح آزاد تمایل به چسبیدن به هم دارند. در نانوذرات مغناطیسی آگلومره بودن ذرات می تواند از برهم کنش های مغناطیسی بین آن ها نیز باشد [۳].



شکل ۴-۹- تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی نمونه $\text{Ni}_{0.7}(\text{Zn})_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (الف) بزرگ‌نمایی ۴۰ هزار در مقیاس ۵۰۰ نانومتر، (ب) بزرگ‌نمایی ۸۰ هزار برابر در مقیاس ۲۰۰ نانومتر، (ج) موقعیت مکان آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی، (د) نمودار آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی.



شکل ۴-۱۰- تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی نمونه S_{10} با فرمول $(Ni_{0.3}(Zn)_{0.7}Fe_2O_4)$ (الف) بزرگ‌نمایی ۴۰ هزار در مقیاس ۵۰۰ نانومتر، (ب) بزرگ‌نمایی ۸۰ هزار برابر در مقیاس ۲۰۰ نانومتر، (ج) موقعیت مکان آنالیز طیف-سنجی تفکیک انرژی، (د) نمودار آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی.



شکل ۴-۱۱- تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی نمونه S_8 با فرمول $(Ni_{0.5}(Zn_{0.2}Mg_{0.4})Fe_2O_4)$ (الف) بزرگ‌نمایی ۴۰ هزار در مقیاس ۵۰۰ نانومتر، (ب) بزرگ‌نمایی ۸۰ هزار برابر در مقیاس ۲۰۰ نانومتر، (ج) موقعیت مکان آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی، (د) نمودار آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی.

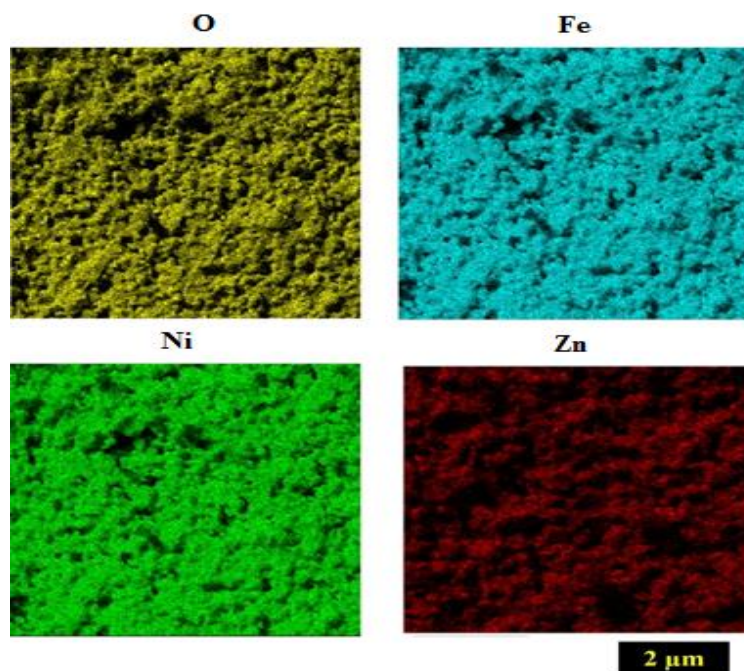
آگلومره‌های میکرونی و زیر میکرونی (کمتر از یک میکرومتر) در قسمت (ج) شکل‌های ۴-۹ تا ۴-۱۱ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که از نمودارها مشاهده می‌شود، وجود قله‌های عناصر مدنظر در آنالیز طیف‌سنجی تفکیک انرژی می‌تواند تشکیل ترکیب مورد نظر را تایید کند. تمامی نمونه‌ها از ذرات بسیار کوچک با اندازه ۲۰-۳۰ نانومتر تشکیل شده‌اند. استوکیومتری عناصر موجود در نانو ذرات فریت نیکل - روی سنتز شده با استفاده از طیف‌سنجی تفکیک انرژی تعیین شده و الگوهای به‌دست آمده با توجه به عناصر جانشانی شده در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است. طیف‌سنجی تفکیک انرژی نانو ذرات فریت نیکل - روی تهیه شده برای عناصر آهن، اکسیژن، نیکل، روی، مس، منیزیوم در نمونه‌ها نشان می‌دهد که در توافق خوبی با نتایج الگوی پراش اشعه ایکس مورد بحث قرار گرفته می‌باشد. یادآوری می‌شود که در این آزمایش، قله طلا مربوط به پوشش طلا می‌باشد جهت تصویربرداری استفاده شده است. با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی اندازه ذرات و با کمک الگوهای پراش اشعه ایکس اندازه بلورک‌ها محاسبه و در جدول ۴-۹ آورده شده است.

جدول ۴-۹- میانگین اندازه ذرات نمونه‌های سنتز شده به روش خوداحتراقی

اندازه بلورک (nm)	میانگین اندازه ذرات (nm)	کد نمونه
۱۲	۱۸	S ₂
۱۰	۲۰	S ₇
۶	۱۵	S ₈
۷	۲۲	S ₁₀

مطابق جدول بالا مشاهده می‌شود که میانگین اندازه ذرات و اندازه بلورک در اکثر نمونه‌ها تفاوت چشم‌گیری با هم‌دیگر نداشته و کمتر از ۱۰ نانومتر با یکدیگر اختلاف دارند و می‌توان گفت این ذرات در بر گیرنده یک بلورک است. از آن‌جا که تقریباً اکثر فریت‌ها در اندازه‌های کمتر از ۵۰ نانومتر تک حوزه می‌باشند [۴]، می‌توان نتیجه گرفت که نانو ذرات سنتز شده در این‌جا تک حوزه بوده و دارای شکل تقریباً کروی می‌باشند. تصویر FE-SEM به‌دست آمده نیز نشان می‌دهد که ذرات تقریباً مجزا و متمایل به کروی شکل هستند.

به‌منظور مشخص شدن توزیع عناصر نیکل، روی، آهن و اکسیژن در نمونه سنتز شده نقشه توزیع عناصر با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از نانوذرات فریت نیکل-روی تهیه شد که تصویر آن در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲ نقشه عنصری نانوذرات فریت نیکل-روی با کد نمونه S₂.

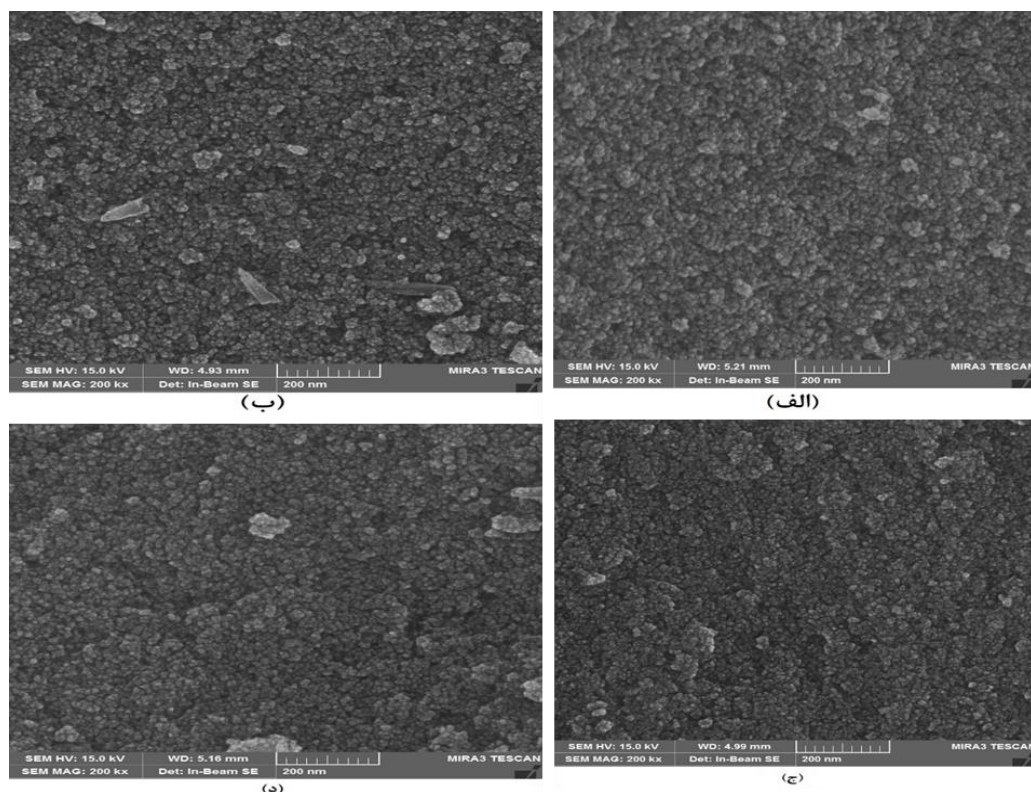
همان‌طور که از شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود نقشه عنصری تمامی عناصر با رنگ‌های مختلف مشخص شده است. مشاهده می‌شود نانوذرات فریت نیکل-روی دارای توزیع بسیار یکنواختی از عناصر آهن، اکسیژن، نیکل و روی بوده است.

ب- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول

استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$

از نمونه‌های شماره ۱۸ تا ۲۷ در جدول ۳-۲، نمونه‌های با مقادیر x برابر با ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ و y برابر با ۰، ۰/۵ و ۱ در نظر گرفته شدند.

برای بررسی اندازه، نحوه توزیع اندازه و شکل ذرات تهیه شده، از نمونه‌های A_1 ، A_3 ، A_7 و A_9 تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی در بزرگنمایی ۲۰۰ هزار تهیه شدند که در شکل ۴-۱۳ آورده شده است.



شکل ۴-۱۳- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی در بزرگنمایی ۲۰۰ هزار از نانوذرات نمونه‌های (الف) A₁، (ب) A₃، (ج) A₇ و (د) A₉.

همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود، ذرات نمونه‌ها تقریباً کروی شکل و توزیع اندازه ذرات تقریباً یکنواخت است. در تصویر نمونه‌ها ذرات کلوخه‌ای نیز دیده می‌شوند. در نانوذرات به علت نسبت بالای سطح به حجم، تمایل به هم چسبیدن برای کاهش سطح انرژی و رسیدن به حالت پایدار وجود دارد؛ از اینرو وجود کلوخه در تصویرها معمولی است. از آنجایی که ذرات تهیه شده در این پژوهش مغناطیسی هستند، یکی دیگر از علت‌های کلوخه‌ای بودن ذرات می‌تواند برهمکنش‌های مغناطیسی بین آن‌ها باشد [۳ و ۴]. مطابق با شکل، وجود ذرات کلوخه‌ای در نمونه‌ها بسیار کم است، به دلیل اینکه در تهیه نمونه‌ها از عملیات حرارتی استفاده نشده است. یکنواختی در توزیع اندازه ذرات به میزان جاذبه مغناطیسی بین ذرات وابسته است و هرچه مقدار آن بیشتر باشد، ساختار یکنواختی کمتری دارد [۵].

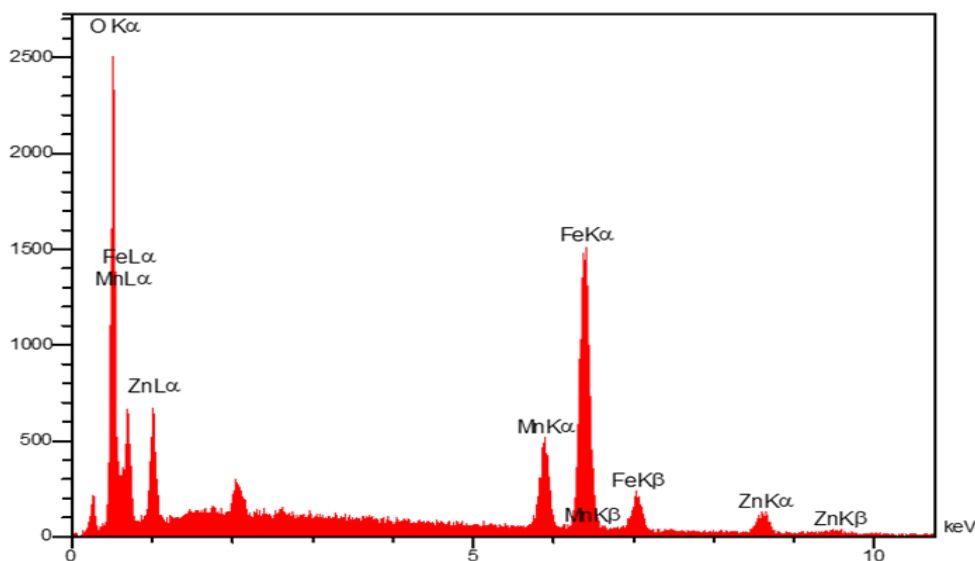
با استفاده نرم‌افزار دیجی مایزر و تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی می‌توان اندازه ذرات را محاسبه کرد. به کمک این نرم‌افزار نخست مقیاس مناسب را انتخاب کرده و اندازه ۷۰۰ تا ۸۵۰ ذره محاسبه و میانگین‌گیری شد. میانگین اندازه ذرات در جدول ۴-۱۰ به همراه میانگین اندازه بلورک‌ها که از طیف پراش اشعه ایکس به‌دست آمده است، آورده شده است.

جدول ۴-۱۰- میانگین اندازه بلورک ها به دست آمده از طیف پراش اشعه ایکس و اندازه ذرات به دست آمده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی برای نمونه‌های منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم‌رسوبی

کد نمونه	اندازه ذرات (nm)	میانگین اندازه بلورک ها (nm)
A ₁	۱۲	۸
A ₃	۱۳	۶
A ₇	۱۲	۷
A ₉	۱۲	۶

همان گونه که از جدول ۴-۱۰ مشاهده می‌شود، میانگین اندازه ذرات در محدوده ۱۲ تا ۱۳ نانومتر تخمین زده می‌شود. از آنجایی که به کمک تصاویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی و الگوهای XRD به ترتیب اندازه ذرات و اندازه بلورک‌ها محاسبه می‌شود و طبق داده‌های جدول ۱۱ اختلاف اندازه ذرات و بلورک‌ها کمتر از ۱۰ نانومتر است، می‌توان گفت هر ذره دربردارنده یک بلورک است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که نانوذرات تهیه شده تک حوزه هستند؛ به دلیل این که نانوذرات مغناطیسی در اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر تک حوزه‌اند [۶].

برای بررسی و تحلیل ویژگی‌های شیمیایی، از نمونه‌های A₁، A₃، A₇ و A₉ آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتوایکس گرفته شد. همچنین درصد مقدارهای کمی عناصر در هر نمونه در جدول‌های مربوطه آورده شده است.

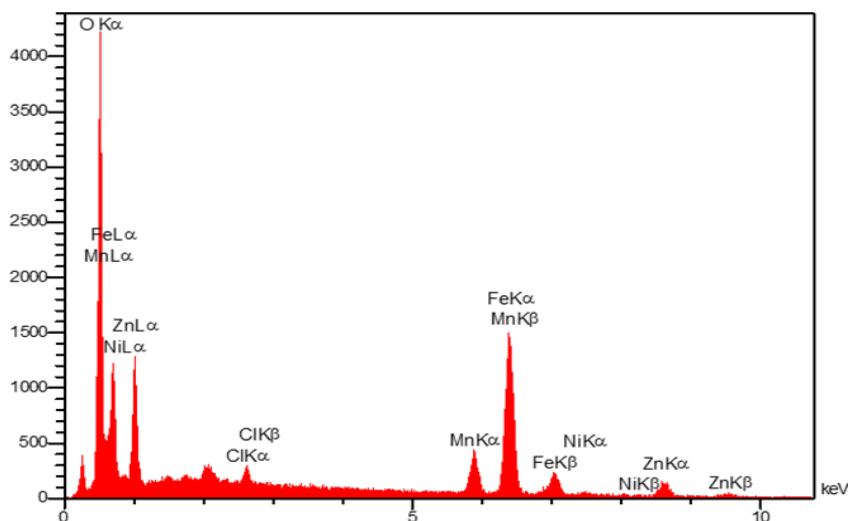


شکل ۴-۱۴- تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتوایکس از نمونه A₁: Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄.

جدول ۴-۱۱- درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه A₁: Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄.

عنصر	درصد وزنی (W%)	درصد اتمی (A%)
C	9.65	21.34
O	30.60	50.82
Mn	9.89	4.78
Fe	40.30	19.17
Zn	9.56	3.88

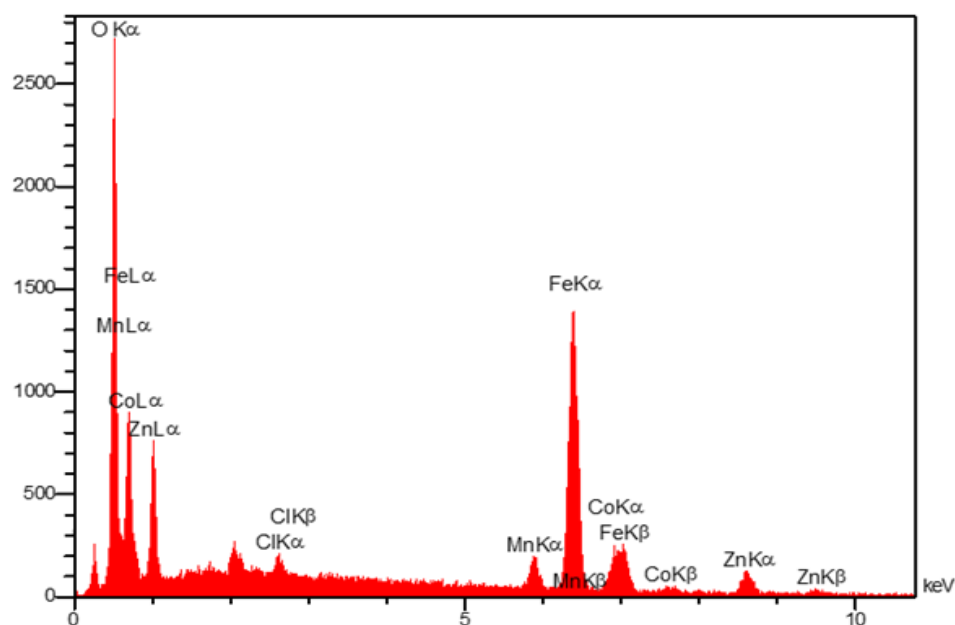
مطابق با شکل ۴-۱۴ قله های عناصر O, Fe, Zn, Mn در ترکیب نمونه فریتی A₁ دیده می شوند. این موضوع بیانگر این است که ترکیب موردنظر تشکیل شده است و روش تهیه نمونه درست است. وجود طول موج های مختلف K_α, K_β و L_α در شکل مربوط به این است که اشعه ایکس منتشر شده به وسیله اتم، اختلاف انرژی کدام دو تراز است. اگر الکترون از تراز L به تراز K برود، طول موج منتشر شده را با K_α نشان می دهند. به همین ترتیب اگر الکترون از تراز M به تراز K برود آن را با K_β و اگر از تراز M به تراز L برود آن را با L_α نشان می دهند [۷]. هرچه ارتفاع پیک بیشتر باشد، یعنی غلظت عنصر مربوط به آن در نمونه بیشتر است [۷]. وجود درصد پیک عنصر کربن (C) در شکل، به دلیل استفاده از چسب کربنی در زمان انجام این آنالیز، برای جلوگیری از جابجایی ذرات است. همچنین مواد استفاده شده دارای خلوص ۱۰۰٪ نیستند. از آنجایی که آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتوایکس یک روش آنالیز نیمه کمی است، بنابراین مقادیر محاسبه شده در این روش خطای بالایی دارد. با در نظر گرفتن میزان خطای این روش، نسبت های محاسبه شده از طریق فرمول استوکیومتری نمونه تهیه شده و مقدارهای به دست آمده از آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتوایکس همخوانی دارد [۶].



شکل ۴-۱۵- تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتوایکس از نمونه $\text{Mn}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}]_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$: A₂.

جدول ۴-۱۲- درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $\text{Mn}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}]_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$: A₂.

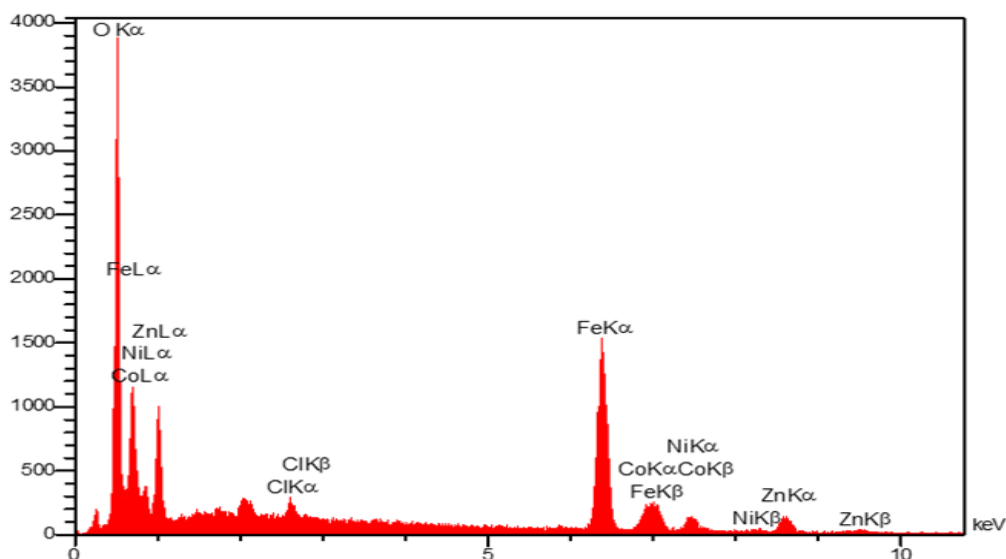
عنصر	درصد وزنی (W%)	درصد اتمی (A%)
C	12.05	22.39
O	43.20	60.24
Mn	5.41	2.20
Fe	28.99	11.58
Ni	1.57	0.60
Zn	8.78	3.00



شکل ۴-۱۶- تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتوایکس از نانوذرات نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}[\text{Co}]_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

جدول ۴-۱۳- درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}[\text{Co}]_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

عنصر	درصد وزنی (W%)	درصد اتمی (A%)
C	12.22	23.10
O	41.00	58.18
Cl	0.82	0.53
Mn	6.15	2.54
Fe	30.47	12.39
Ni	0.65	0.25
Zn	8.69	3.02



شکل ۴-۱۷

تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتوایکس از نمونه $\text{A}_9: \text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{0.5}\text{Co}]_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

جدول ۴-۱۴- درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نانوپودر تهیه شده نمونه $\text{A}_9: \text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{0.5}\text{Co}]_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

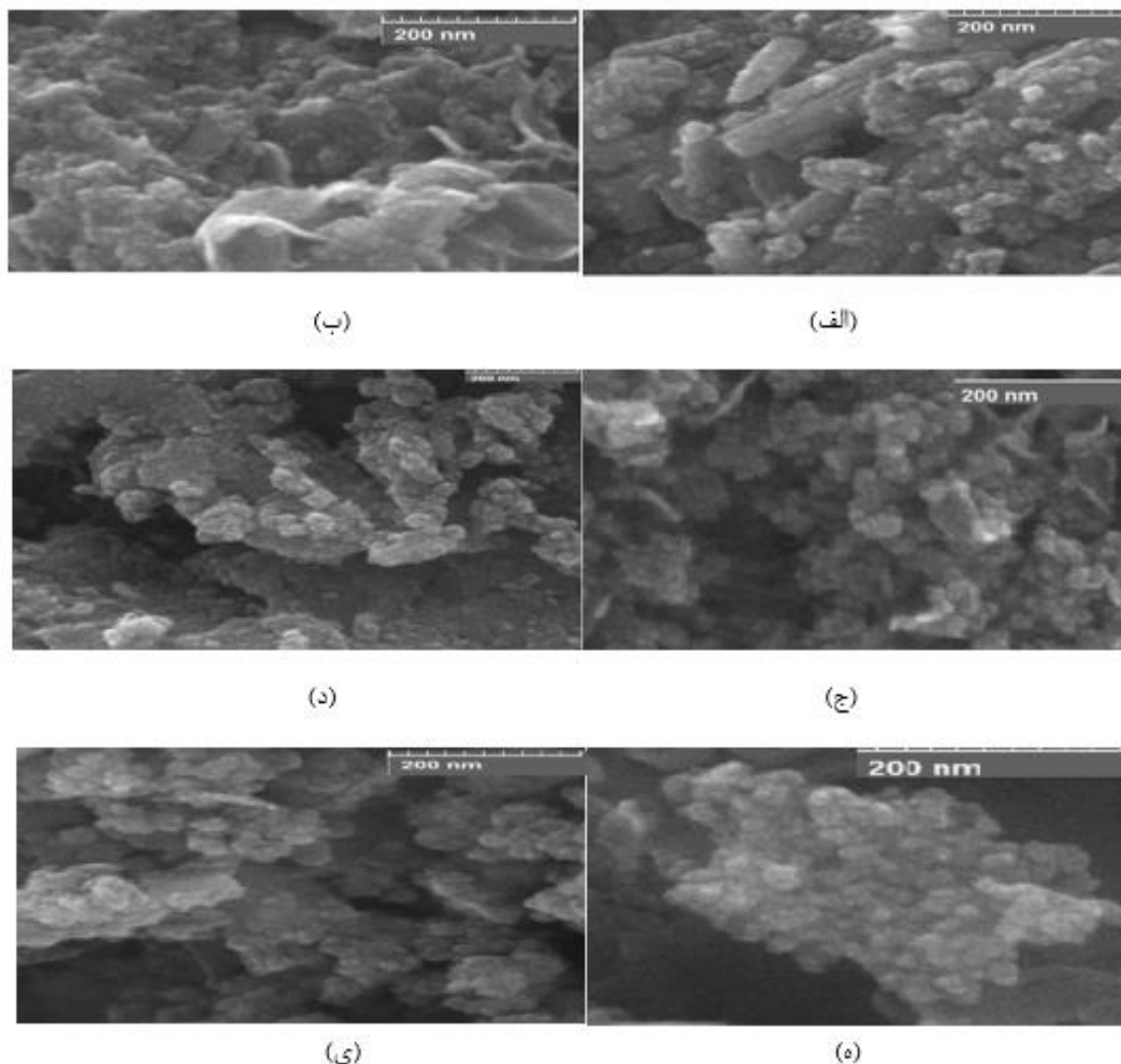
عنصر	درصد اتمی (A%)	درصد وزنی (W%)
C	21.35	10.25
O	54.59	34.92
Cl	0.46	0.66
Mn	1.35	2.97
Fe	16.76	37.43
Co	2.22	5.23
Zn	3.27	8.55

مطابق با شکل‌های ۴-۱۴ تا ۳-۱۷ قله‌های عناصر موردنظر در ترکیب‌ها دیده می‌شود. لازم به ذکر است وجود درصد بسیار ناچیز Cl در برخی جدول‌ها را می‌توان با شست‌وشوی بیشتر نمونه‌ها از بین برد.

ج- فریت روی جانشانی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با

فرمول استوکیومتری $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}[(\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x})_y(\text{Co}_x\text{Cu}_{1-x})_{1-y}]_{x+y}\text{O}_4$

برای بررسی اندازه، نحوه توزیع اندازه و شکل ذرات، از نمونه‌های $\text{E}_1, \text{E}_4, \text{E}_6, \text{E}_{11}, \text{E}_{13}, \text{E}_{16}$ تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی در بزرگنمایی ۲۰۰ هزار تهیه شد که در شکل ۴-۱۸ آورده شده است.



شکل ۴-۱۸- تصاویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی بزرگنمایی ۲۰۰ هزار از نانوذرات

نمونه‌های الف) E₁ ب) E₄ ج) E₆ د) E₁₁ ه) E₁₃ ی) E₁₆.

همان‌گونه که از شکل ۴-۱۸ مشاهده می‌شود، توزیع اندازه ذرات تقریباً یکنواخت و شکل ذرات کروی است. در تصاویر نیز ذرات کلوخه‌ای دیده می‌شوند. در نانوذرات به علت نسبت بالای سطح به حجم، تمایل به هم چسبیدن برای کاهش سطح انرژی و رسیدن به حالت پایدار وجود دارد؛ از اینرو وجود کلوخه در تصویرها طبیعی است. از آنجایی که ذرات تهیه شده در این پژوهش مغناطیسی هستند، یکی دیگر از دلایل کلوخه‌ای بودن ذرات، می‌تواند برهمکنش‌های مغناطیسی بین آن‌ها باشد [۸ و ۹]. یکنواختی در توزیع اندازه ذرات به میزان جاذبه مغناطیسی بین ذرات وابسته است و هرچه مقدار آن بیشتر باشد، ساختار یکنواختی کمتری دارد [۷].

با استفاده نرم‌افزار دیجی مایزر و تصاویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی می‌توان اندازه ذرات را محاسبه کرد. به کمک این نرم‌افزار مقیاس مناسب را انتخاب کرده و اندازه ۷۰۰ تا ۸۵۰ ذره محاسبه و میانگین‌گیری می‌شود.

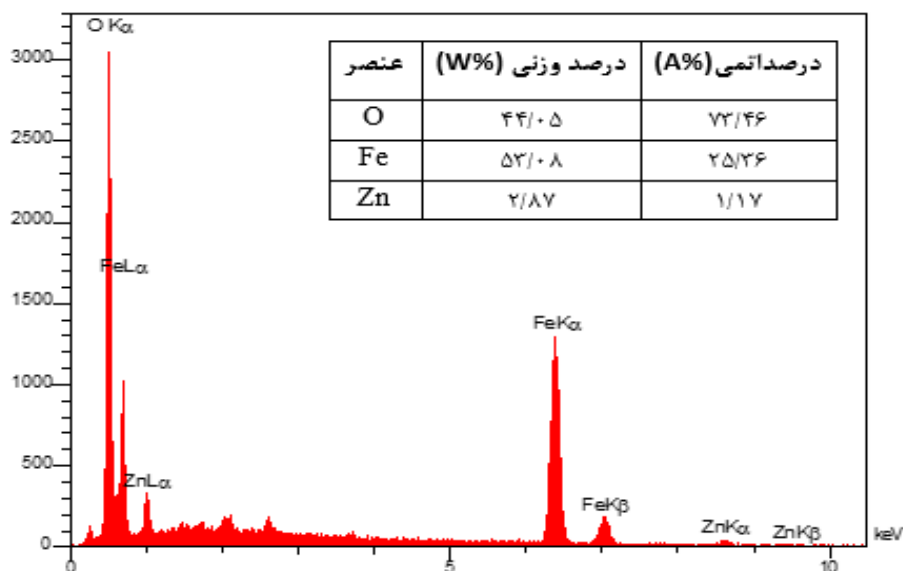
میانگین اندازه ذرات در جدول ۴-۱۵ به همراه میانگین اندازه بلورک ها که از طیف پراش اشعه ایکس به دست آمده است، آورده شده است

جدول ۴-۱۵- میانگین اندازه بلورک ها به دست آمده از طیف پراش اشعه ایکس و اندازه ذرات به دست آمده از تصاویر میکروسکوپ

نام نمونه	فریت	میانگین اندازه بلورک ها (nm)	میانگین اندازه ذرات (nm)
E ₁	ZnFe ₂ O ₄	۸	۱۸
E ₄	ZnFeNiO ₄	۵	۱۲
E ₆	Zn _{0.6} Fe _{1.6} [(Mn _{0.4} Ni _{0.6})(Co _{0.4} Cu _{0.6})] _{0.8} O ₄	۷	۱۵
E ₁₁	Zn _{0.2} Fe _{1.2} [(Mn _{0.8} Ni _{0.2})(Co _{0.8} Cu _{0.2})] _{1.6} O ₄	۱۲	۲۳
E ₁₃	CoFe ₂ O ₄	۱۳	۲۵
E ₁₆	Mn ₂ FeO ₄	۶	۱۴

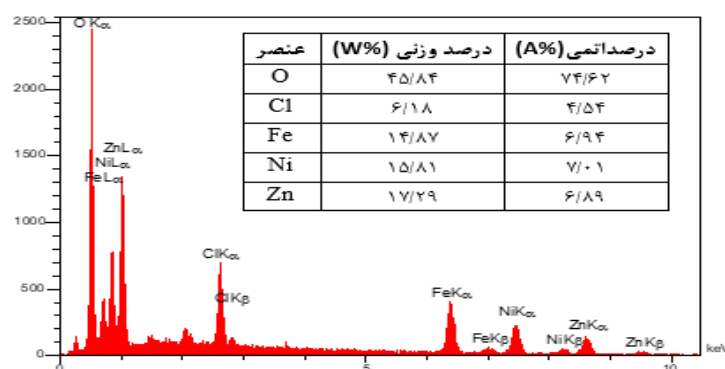
همان گونه که از جدول ۴-۱۵ مشاهده می شود، میانگین اندازه ذرات در محدوده ۱۲ تا ۲۵ نانومتر تخمین زده می شود. دلیل بزرگتر بودن ذرات نسبت به بلورکها این است که هر ذره از چندین بلورک تشکیل شده است.

برای بررسی و تحلیل ویژگی های شیمیایی و شناسایی عناصر تشکیل دهنده نمونه های E₁, E₄, E₆, E₁₁, E₁₃, E₁₆ آزمون EDX گرفته شد. همچنین درصد مقدارهای کمی عناصر در هر نمونه در جدول های ذکر شده به همراه شکل های مربوطه آورده است. در شکل ۴-۱۹ تصویر آزمون طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه E₁ نشان داده شده است.

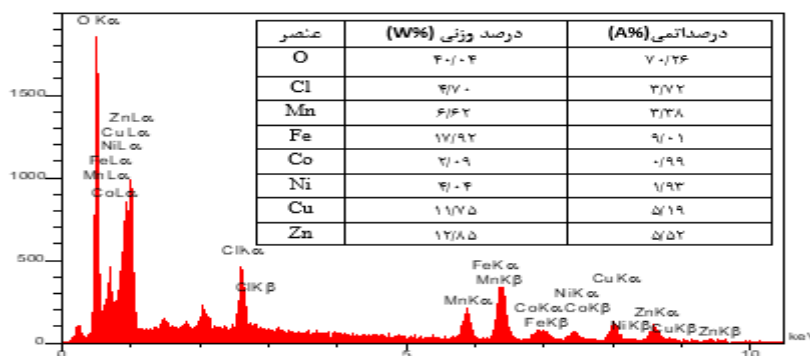


شکل ۴-۱۹- تصویر آزمون طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه E₁=ZnFe₂O₄

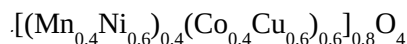
همان گونه که در شکل ۴-۱۹ دیده می شود، تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه فریتی E₁ به دلیل وجود قله های مربوط به عناصر O, Fe, Zn, می تواند تشکیل ترکیب مورد نظر را تایید کند. همچنین درصد مقادیر کمی این عناصر در این نمونه را بیان نموده است. وجود طول موج های مختلف K_α, K_β و L_α در شکل نشان دهنده آن است که پرتو ایکس منتشر شده به وسیله اتم، از اختلاف انرژی کدما دو تراز ایجاد شده است. به طوری که اگر الکترون از تراز L به تراز K برود، طول موج منتشر شده را با K_α نشان می دهند. اگر الکترون از تراز M به تراز K برود آن را بسا K_β و اگر از تراز M به تراز L برود آن را با L_α نشان می دهند [۷]. هرچه ارتفاع پیک بیشتر باشد، به این معناست که غلظت عنصر مربوط به آن در نمونه بیشتر است [۷]. شکل ۴-۲۰ تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه E₄ را نشان می دهد.



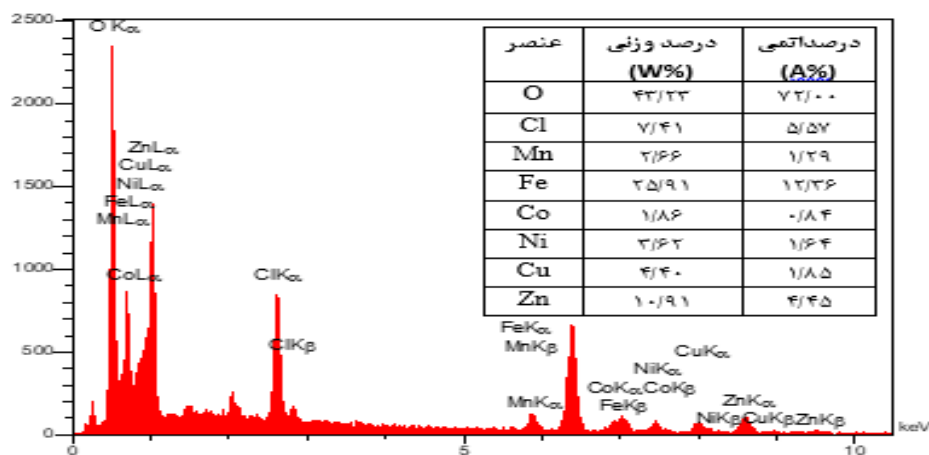
شکل ۴-۲۰ تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه E₄= ZnFeNiO₄ همان گونه که در شکل دیده می شود، تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه فریتی E₄ به دلیل وجود قله های مربوط به عناصر O, Fe, Zn, Ni, می تواند تشکیل ترکیب مورد نظر را تایید کند. همچنین وجود مقدار کم عنصر Cl در تصویر طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس این نمونه، به دلیل کافی نبودن تعداد دفعات شست و شو می باشد. این آنالیز درصد مقادیر کمی این عناصر در این نمونه را بیان نموده است. شکل ۴-۲۱ تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه E₆ را نشان می دهد.



شکل ۴-۲۱ تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه E₆= Zn_{0.6}Fe_{1.6}



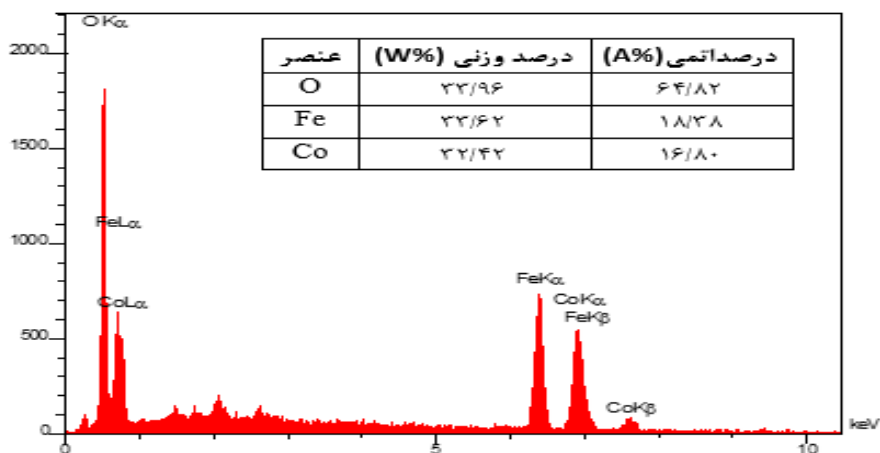
همان گونه که در شکل دیده می شود، تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه فریتی E6 به دلیل وجود قله های مربوط به عناصر O, Fe, Cu, Co, Mn, Zn, Ni, Cl می تواند تشکیل ترکیب مورد نظر را تایید کند. همچنین وجود مقدار کم عنصر Cl در تصویر طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس این نمونه، به دلیل کافی نبودن تعداد دفعات شست و شو می باشد. این آنالیز درصد مقادیر کمی این عناصر در این نمونه را بیان نموده است. شکل ۲۲-۴ تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه E11 نشان می دهد.



شکل ۲۲-۴ تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $Zn_{0.2}Fe_{1.2}$

$$E_{11} = [(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.2}]_{1.6}O$$

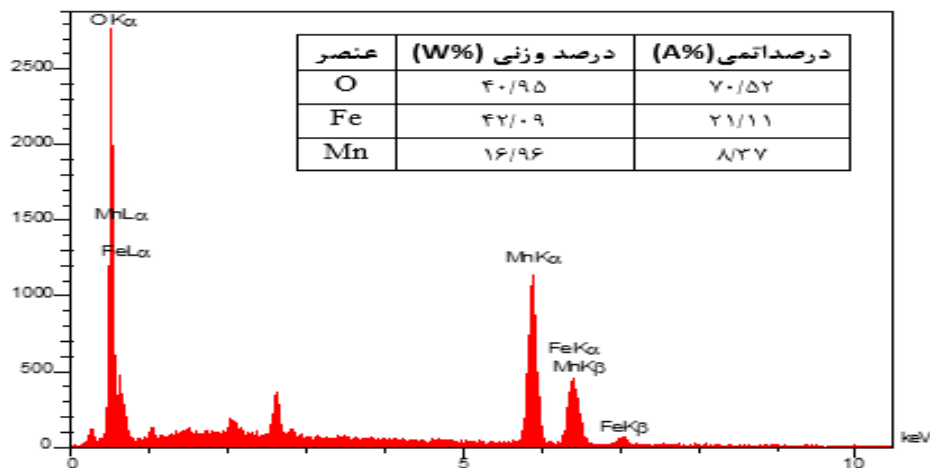
همان گونه که در شکل دیده می شود، تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه فریتی E11 به دلیل وجود قله های مربوط به عناصر O, Fe, Cu, Co, Mn, Zn, Ni, Cl وجود این عناصر در این نمونه و روش تهیه این نمونه را تایید کرده است. همچنین درصد مقادیر کمی این عناصر در این نمونه را بیان نموده است. شکل ۲۳-۴ تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه E13 نشان می دهد.



شکل ۲۳-۴ تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $E_{13} = CoFe_2O_4$

همان گونه که در شکل دیده می شود، تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه فریتی E₁₃ به دلیل وجود قله های مربوط به عناصر O، Fe، Co، می تواند تشکیل ترکیب مورد نظر را تایید کند. این آنالیز درصد مقادیر کمی این عناصر در این نمونه را نیز بیان نموده است.

شکل ۴-۲۴ تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه E₁₆ نشان



شکل ۴-۲۴- تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه E₁₆= Mn₂FeO₄.
FeO₄

همان گونه که در شکل ۴-۲۴ دیده می شود، تصویر آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه فریتی E₁₆ به دلیل وجود قله های مربوط به عناصر Mn، Fe و O، می تواند تشکیل ترکیب مورد نظر را تایید کند. همچنین درصد مقادیر کمی این عناصر در این نمونه را بیان نموده است.

وجود درصد پیک عنصر کربن (C) در برخی شکل ها، به دلیل استفاده از چسب کربنی در زمان انجام این آنالیز، برای جلوگیری از جابجایی ذرات است. همچنین مواد استفاده شده دارای خلوص ۱۰۰٪ نیستند.

از آنجایی که آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس یک روش آنالیز نیمه کمی است، بنابراین مقادیر محاسبه شده در این روش خطای بالایی دارد. با در نظر گرفتن میزان خطای این روش، نسبت های محاسبه شده از طریق فرمول استوکیومتری نمونه تهیه شده و مقدارهای به دست آمده از آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس همخوانی دارد [۷].

۴-۳-۱-۱- مقایسه نتایج حاصل از بررسی آزمون های میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل

میدانی و طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه های فریتی تهیه شده

بررسی تصاویر FESEM نمونه های فریتی تهیه شده به روش هم رسوبی و خود احتراقی نشان داد که در کلیه نمونه ها، توزیع اندازه ذرات تقریباً یکنواخت و شکل ذرات کروی است. همچنین میانگین اندازه ذرات و میانگین اندازه بلورک ها در جدول ۴-۱۶ آورده شده است.

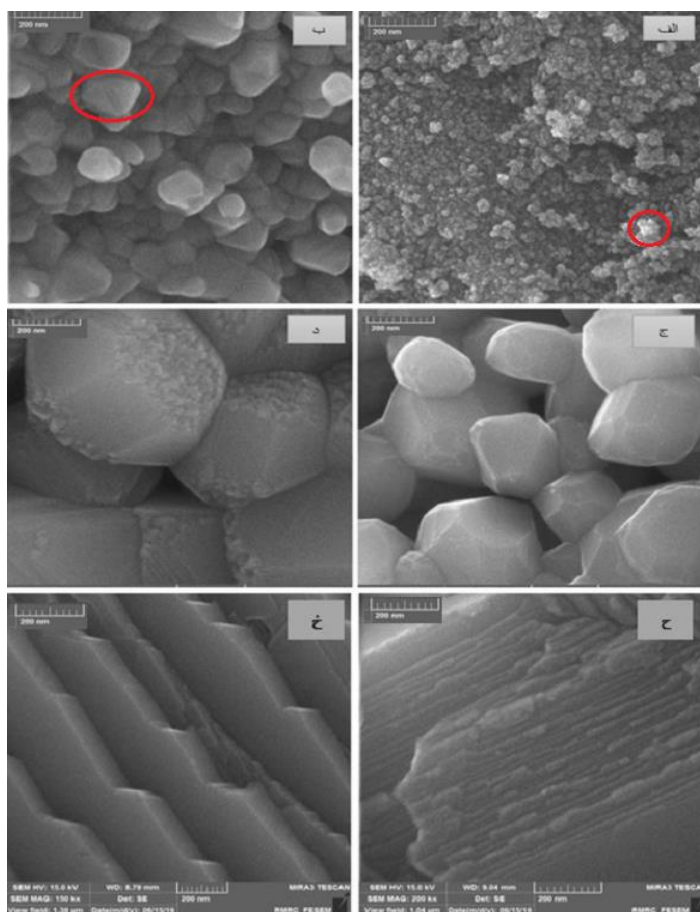
جدول ۴-۱۶- میانگین اندازه بلورک-ها و میانگین اندازه ذرات نمونه های فریتی

پودرهای فریت سنتز شده	نمونه کد	میانگین اندازه بلورک-ها (nm)	میانگین اندازه ذرات (nm)
$Ni_{0.7}(Zn)_{0.3}Fe_2O_4$	S_2	۱۲	۱۸
$Ni_{0.5}(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})_{0.5}Fe_2O_4$	S_7	۱۰	۲۰
$Ni_{0.5}(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})_{0.5}Fe_2O_4$	S_8	۶	۱۵
$Ni_{0.3}(Zn)_{0.7}Fe_2O_4$	S_{10}	۷	۲۲
$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	A_1	۸	۱۲
$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.1}Fe_2O_4$	A_3	۶	۱۳
$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Co]_{0.3}Fe_2O_4$	A_7	۷	۱۲
$Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.5}Fe_2O_4$	A_9	۶	۱۲
$ZnFe_2O_4$	E_1	۸	۲۰
$ZnFeNiO_4$	E_4	۵	۱۶
$Zn_{0.6}Fe_{1.6}[(Mn_{0.4}Ni_{0.6})(Co_{0.4}Cu_{0.6})]_{0.8}O_4$	E_6	۷	۱۹
$Zn_{0.2}Fe_{1.2}[(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.2}]_{1.6}O_4$	E_{11}	۹	۲۳
$CoFe_2O_4$	E_{13}	۱۳	۲۵
Mn_2FeO_4	E_{16}	۶	۱۷

همان گونه که در جدول ۴-۱۶ نشان داده شده است، نمونه های S_{10} ، E_{11} و E_{13} بیشترین میانگین اندازه ذرات را نسبت به سایر نمونه ها دارند. با توجه به این که هر ذره از چندین بلورک تشکیل شده است بنابراین میانگین اندازه ذرات بیش از میانگین اندازه بلورک-ها است. همچنین تصاویر آزمون طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه های فریتی و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در آن، میزان ترکیبات و عناصر بکاررفته برای تهیه نمونه ها را به روش همرسوبی و خوداحتراقی نیز تایید نمود.

۴-۳-۲- تجزیه و تحلیل تصویرهای FE-SEM نمونه تحت عملیات حرارتی قرار گرفته

تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی با بزرگنمایی ۲۰۰ هزار برای نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ پخت داده شده در دماهای گوناگون در شکل ۴-۲۵ نشان داده شده است.

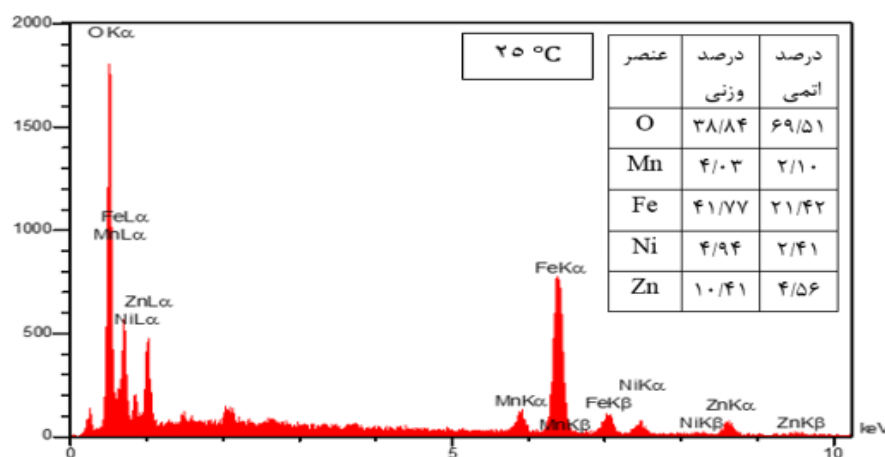


شکل ۴-۲۵- تصاویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی هسته‌های فریتی تهیه شده در دماهای (الف) 25°C ، (ب) 900°C ، (ج) 1000°C ، (د) 1100°C ، (ه) 1200°C و (خ) 1250°C

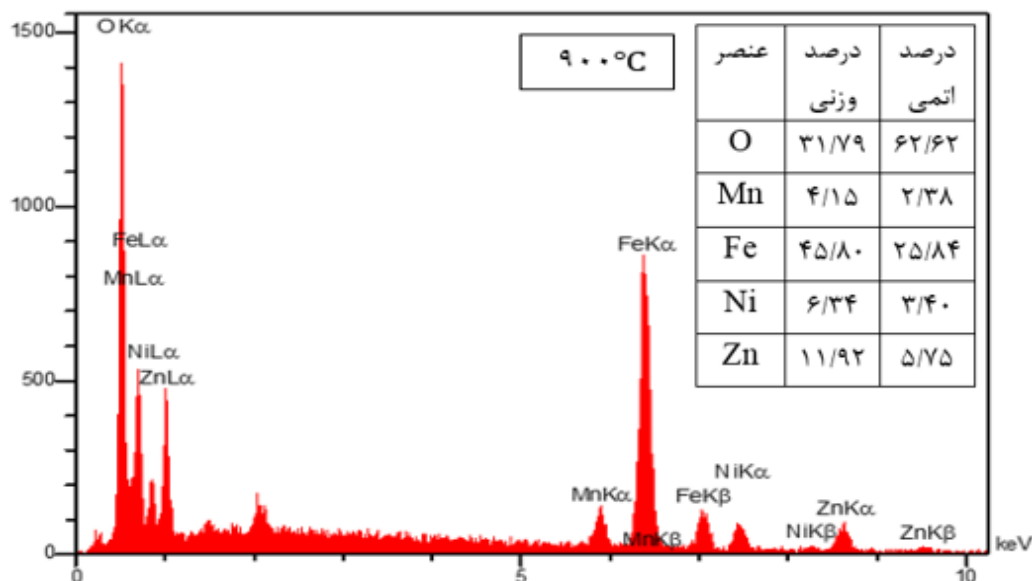
همان‌گونه که از این شکل دیده می‌شود، اندازه ذرات نمونه‌های تهیه شده از دمای 25°C تا دمای 1100°C به تدریج افزایش یافته است. این افزایش به دلیل رشد ذرات در اثر عملیات حرارتی است که نشان می‌دهد دما یکی از فاکتورهای تعیین کننده سرعت رشد ذرات است که تاثیر بسیار زیادی بر ریخت، اندازه ذرات و ویژگی‌های الکترومغناطیسی مواد دارد [۱۰]. همچنین از شکل ۴-۲۵- الف مشاهده می‌شود که ذرات نمونه‌ها تقریباً کروی و توزیع اندازه ذرات تقریباً یکنواخت است. همان‌طور که در شکل ۴-۲۵- الف نشان داده شده است، برخی ذرات با اندازه تقریباً ۱۰ نانومتر به صورت کلوخه‌ای است که علت آن نسبت بالای سطح به حجم، تمایل به هم چسبیدن برای کاهش سطح انرژی و رسیدن به حالت پایدار برهمکنش‌های مغناطیسی بین آن‌ها است [۱۱ و ۱۲]. اندازه ذرات تهیه شده در دمای 900°C [شکل ۴-۲۵-ب] همان‌گونه که نشان داده شده است در حدود ۷۲ نانومتر است که با افزایش دما تا 1000°C [شکل ۴-۲۵-ج] به ۱۱۲ نانومتر افزایش یافته است. این افزایش اندازه ذرات حاکی از آن است که افزایش دما انرژی گرمایی کافی را به منظور به حرکت درآوردن نانوبلورها و جوش خوردگی آن‌ها فراهم کرده است. ابعاد ذرات تهیه شده در دمای 1100°C [شکل ۴-۲۵-د]، به ۵۲۳ نانومتر افزایش یافته است. سازوکار رشد در نمونه‌ها در جهت‌های صفحات بلوری صورت می‌گیرد که برخی جهت‌های بلوری برای رشد مناسب‌تر هستند و در برخی جهت‌های دیگر رشد خاص و چشمگیری اتفاق نمی‌افتد. معمولاً در جهت‌های بلوری با اندیس‌های میلر بزرگتر، رشد بیشتری صورت می‌گیرد که منجر به ریخت‌های متفاوت در نمونه‌های پودر فریت می‌شود [۱۳]. به‌طور کلی گرمادهی فریت در کمتر از دمای نقطه

ذوب آن، سبب می‌شود که ذرات به یکدیگر جوش خورده و فضای خالی بین ذرات کاهش یابد و در نتیجه اندازه ذرات درشت شود [۱۴]. از طرفی ذرات هنگام گرم شدن می‌توانند که انرژی آزاد سطحی را با کاهش مساحت سطح کل خود کم کنند. بنابراین ذرات پودر فریت به یکدیگر می‌چسبند و رشد می‌کنند [۱۴].

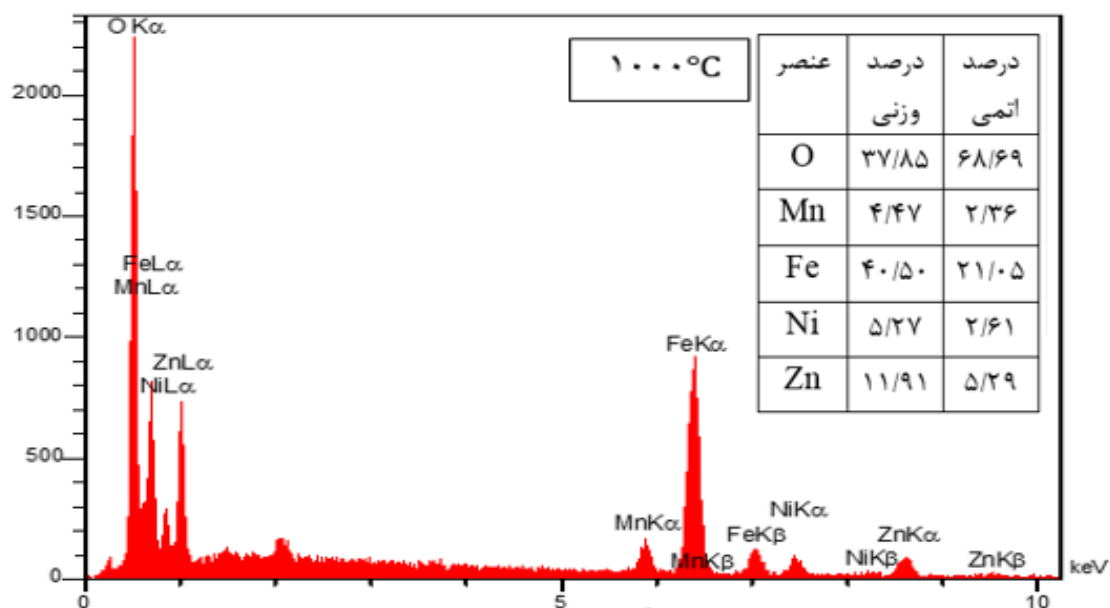
شکل‌های ۴-۲۵ ح و ۴-۲۵ خ شامل صفحات رشد یافته و بهم جوش خورده با ضخامتی حدود ۳۸ و ۷۵ نانومتر به ترتیب در دماهای 1200°C و 1250°C می‌باشد. در این دماها جوش خوردن صفحات به یکدیگر نیز ناشی از کاهش انرژی آزاد سیستم با کاهش انرژی مرزدانه‌ها است و می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دمای پخت باعث جوش خوردن صفحات روی هم قرار گرفته و تشکیل صفحاتی با ضخامت بیشتر می‌شود. برای بررسی و تحلیل ویژگی‌های شیمیایی و شناسایی عناصر تشکیل دهنده نمونه به شکل نیمه کمی، از نمونه‌های پخت داده شده آزمون EDX گرفته شده است. درصد مقدارهای کمی عناصر در هر نمونه در جدول‌های مربوطه آورده ذکر شده است.



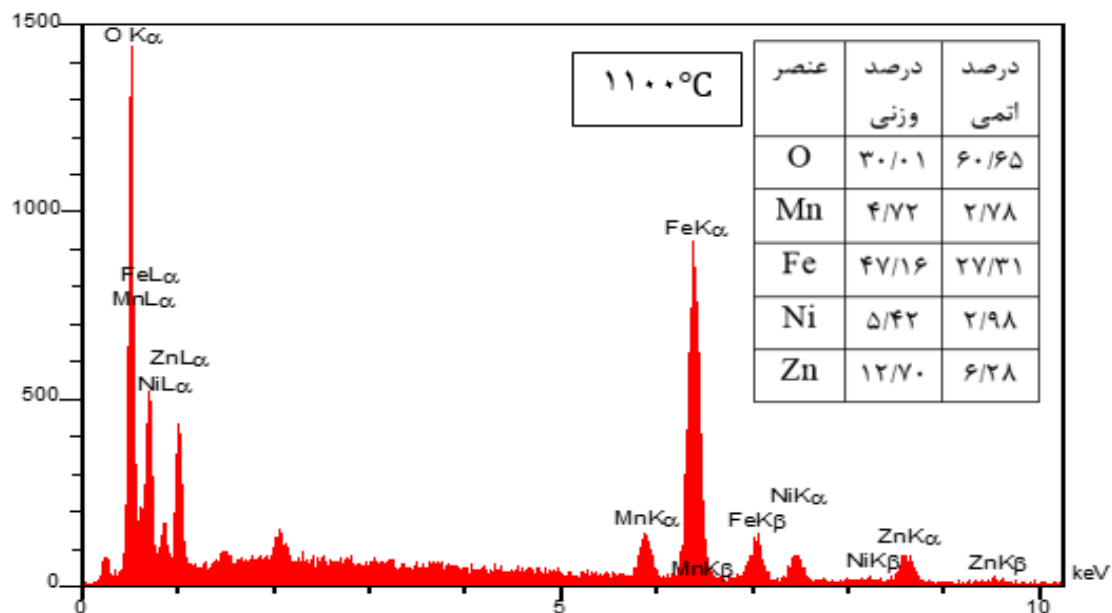
شکل ۴-۲۶- تصویر آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تهیه شده در دمای 250°C .



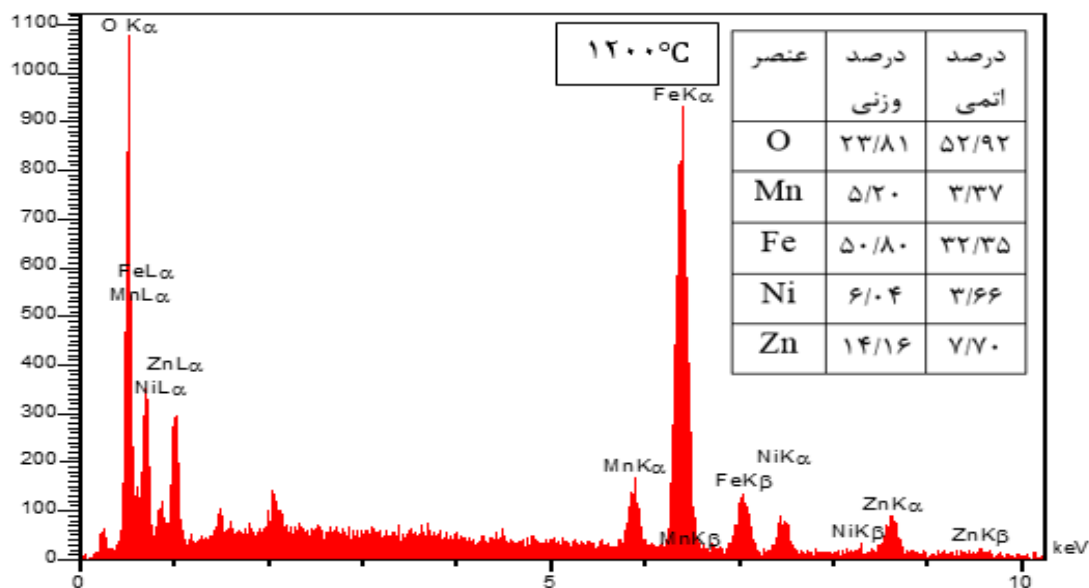
شکل ۴-۲۷- تصویر آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ پخت داده شده در دمای 900°C .



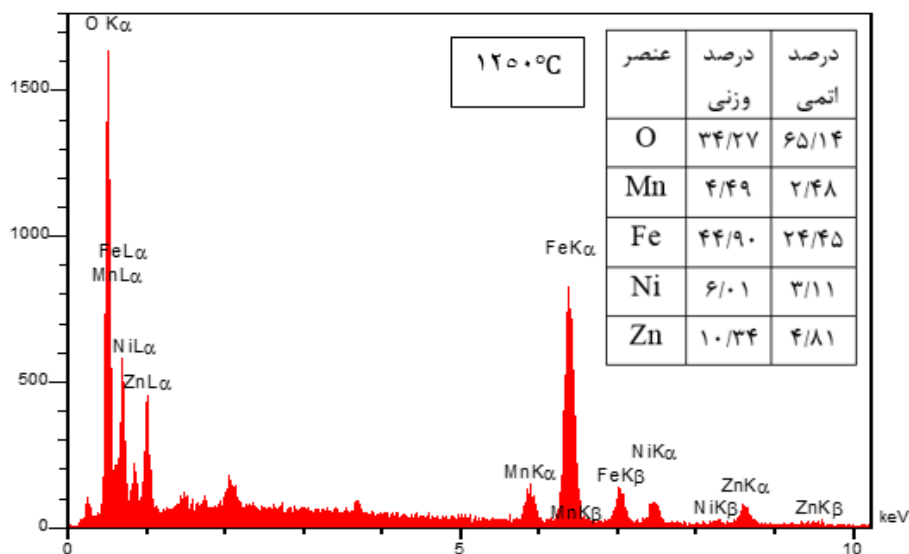
شکل ۴-۲۸- تصویر آزمون طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ پخت داده شده در دمای 1000°C .



شکل ۴-۲۹- تصویر آزمون طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ پخت داده شده در دمای 1100°C .



شکل ۴-۳۰- تصویر آزمون طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ پخت داده شده در دمای 1200°C .

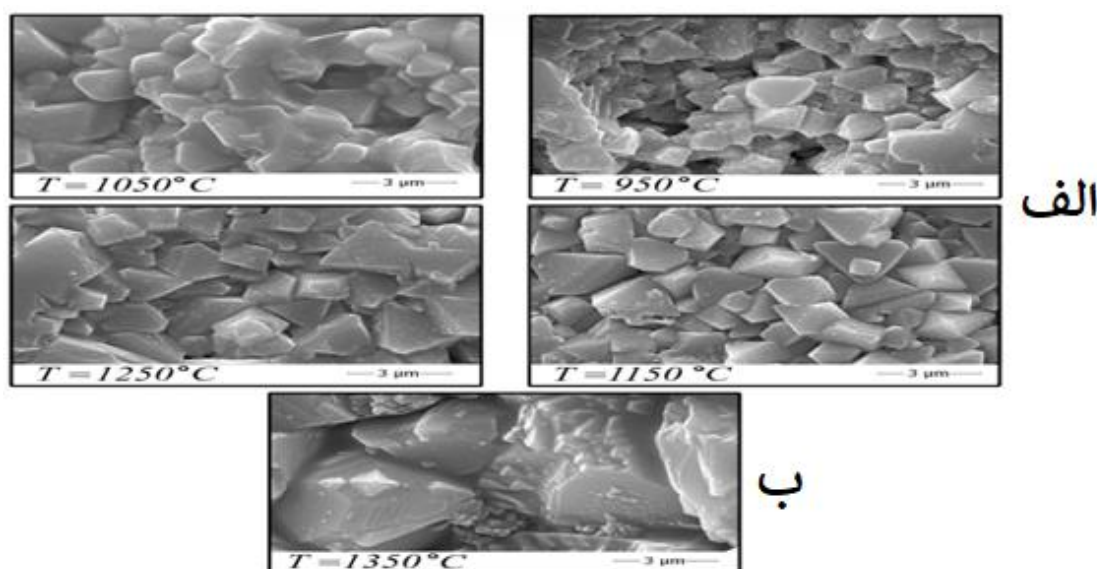


شکل ۴-۳۱- تصویر آزمون طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ پخت داده شده در دمای 1250°C .

مطابق با شکل‌های ۴-۲۶ الی ۴-۳۱، قله‌های عناصر O ، Fe ، Zn ، Mn و تمامی نمونه‌های فریتی پخت داده شده مشاهده می‌شوند که توافق خوبی با نتایج الگوی پراش اشعه ایکس دارد. وجود این قله‌ها می‌تواند تشکیل ترکیب مدنظر را تایید کند. وجود طول موج‌های مختلف K_α ، K_β و L_α در شکل مربوط به این است که اشعه ایکس منتشر شده به وسیله اتم، اختلاف انرژی کدام دو تراز است. اگر الکترون از تراز L به تراز K برود، طول موج منتشر شده را با K_α نشان می‌دهند. به همین ترتیب اگر الکترون از تراز M به تراز K برود آن را با K_β و اگر از تراز M به تراز L برود آن را با L_α نشان می‌دهند. هرچه ارتفاع پیک بیشتر باشد، یعنی غلظت عنصر مربوط به آن در نمونه بیشتر است. با در نظر گرفتن

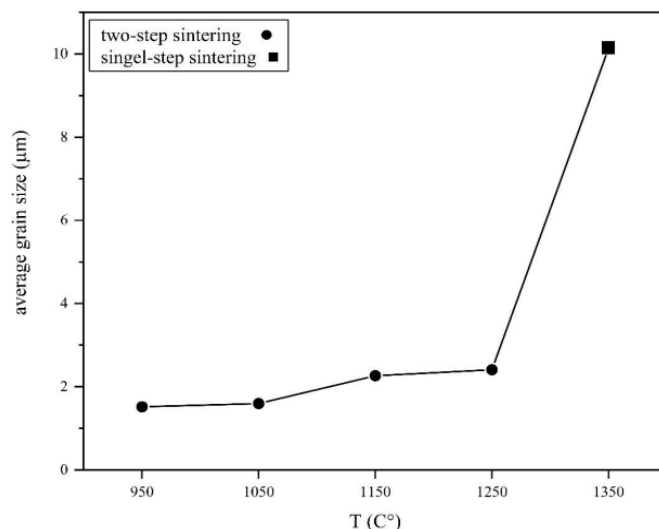
میزان خطای این روش، نسبت‌های محاسبه شده از طریق فرمول استوکیومتری نمونه تهیه شده و مقدارهای به دست آمده از آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتوایکس هم‌خوانی دارد.

علاوه بر این، به منظور بررسی تاثیر عملیات حرارتی تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای، نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ در دماهای ۹۵۰، ۱۰۵۰، ۱۱۵۰ و 1250°C تحت عملیات حرارتی دومرحله‌ای و در دمای 1350°C تحت عملیات حرارتی تک‌مرحله‌ای قرار داده شد. در عملیات حرارتی دومرحله‌ای نمونه طی دو مرحله و در عملیات حرارتی تک‌مرحله‌ای نمونه یک مرحله تحت دما قرار می‌گیرد. برنامه دمایی استفاده شده برای عملیات حرارتی دومرحله‌ای عبارت است از افزایش دمای کوره تا 1350°C با آهنگ $3^\circ\text{C}/\text{min}$ ، کاهش دمای کوره به دماهای ۹۵۰ (نمونه اول)، ۱۰۵۰ (نمونه دوم)، ۱۱۵۰ (نمونه سوم) و 1250°C (نمونه چهارم) با آهنگ $10^\circ\text{C}/\text{min}$ ، نگه داشتن هر نمونه در دمای مربوط به خود به مدت ۱۰ ساعت و سرد سازی کوره تا دمای اتاق. همچنین برنامه دمایی مورد استفاده در عملیات حرارتی تک‌مرحله‌ای برای نمونه پنجم شامل افزایش دمای کوره تا 1350°C با آهنگ $3^\circ\text{C}/\text{min}$ ، نگه داشتن نمونه در این دما به مدت ۱۰ ساعت و سرد سازی کوره تا دمای اتاق می‌باشد. تصاویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی آن، با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر در شکل ۴-۳۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۲- تصاویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نمونه‌های تفجوشی شده (الف) تحت عملیات دومرحله‌ای در دمای مختلف و (ب) عملیات تک‌مرحله‌ای در دمای 1350°C درجه سانتی‌گراد با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر.

همانگونه که در شکل ۴-۳۲ مشاهده می‌شود ریخت دانه‌ها نزدیک چند وجهی است و اندازه دانه‌ها در دماهای ۹۵۰، ۱۰۵۰، ۱۱۵۰ و 1250°C که برنامه دمایی آنها براساس روش تف جوشی دومرحله‌ای تنظیم شده است با تغییرات بسیار کمی، یک روند افزایشی را طی کرده اند اما اندازه دانه ها در دمای 1350°C که برنامه دمایی آن براساس تف جوشی تک مرحله‌ای تنظیم شده است، دارای رشد ناگهانی دانه ها نسبت به نمونه‌های دومرحله‌ای می‌باشد. این روند در کنترل رشد دانه ها، در تف جوشی دومرحله‌ای نسبت به تف جوشی تک‌مرحله‌ای قابل انتظار است. علاوه بر این، میانگین اندازه دانه ها با استفاده از نرم افزار Digimizer با میانگین‌گیری روی اندازه ۲۰ تا ۳۰ ذره از تصاویرهای FE-SEM به دست آمده است که در شکل ۴-۳۳ نمودار میانگین اندازه دانه‌های نمونه‌ها برحسب دماهای تف جوشی آورده شده است.



شکل ۴-۳۳- نمودار میانگین اندازه دانه نمونه های تفجوشی شده تحت عملیات تک مرحله ای و دومرحله ای برحسب دما. همان گونه که در این شکل دیده می شود تفاوت در روند رشد دانه ها در اثر تفجوشی های تک مرحله ای و دومرحله ای کاملاً مشخص است.

میانگین اندازه ذرات نمونه هایی که تحت عملیات حرارتی قرار گرفته شده اند به کمک تصاویر FE-SEM محاسبه و نتایج آن در جدول ۴-۱۷ میانگین اندازه ذرات آورده شده است.

جدول ۴-۱۷- میانگین اندازه ذرات نمونه های فریتی

میانگین اندازه ذرات (nm)	پودرهای فریت سنتز شده
-	$Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ حرارت داده شده در دمای $250^{\circ}C$
-	$Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ حرارت داده شده در دمای $900^{\circ}C$
۱۱۲	$Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ حرارت داده شده در دمای $1000^{\circ}C$
-	$Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ حرارت داده شده در دمای $1100^{\circ}C$
۳۸	$Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ حرارت داده شده در دمای $1200^{\circ}C$
۷۵	$Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ حرارت داده شده در دمای $1250^{\circ}C$
$m\mu 1/518$	به صورت دومرحله ای $950^{\circ}C$ حرارت داده شده در دمای $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$
$m\mu 1/596$	به صورت دومرحله ای $1050^{\circ}C$ حرارت داده شده در دمای $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$
$m\mu 2/264$	به صورت دومرحله ای $1150^{\circ}C$ حرارت داده شده در دمای $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$
$m\mu 2/408$	به صورت دومرحله ای $1250^{\circ}C$ حرارت داده شده در دمای $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$
$m\mu 10/142$	به صورت تک مرحله ای $1350^{\circ}C$ حرارت داده شده در دمای $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$

همان گونه که از جدول ۴-۱۸ مشاهده می شود، نمونه تفجوشی شده به صورت تک مرحله ای دارای بالاترین اندازه ذره است. این اتفاق در کنترل رشد دانه ها، قابل انتظار است. با افزایش دما به دلیل افزایش سرعت رشد ذرات، اندازه

ذرات نمونه افزایش می‌باید و همچنین در افزایش دما به صورت تک‌مرحله‌ای، به دلیل عدم کنترل رشد ذره به صورت ناگهانی اندازه ذرات افزایش می‌یابد. علاوه بر این تصاویر آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه های فریتی و درصد مقادیر کمی عناصر موجود در آن، می‌تواند تاییدی بر تشکیل ترکیبات موردنظر باشد.

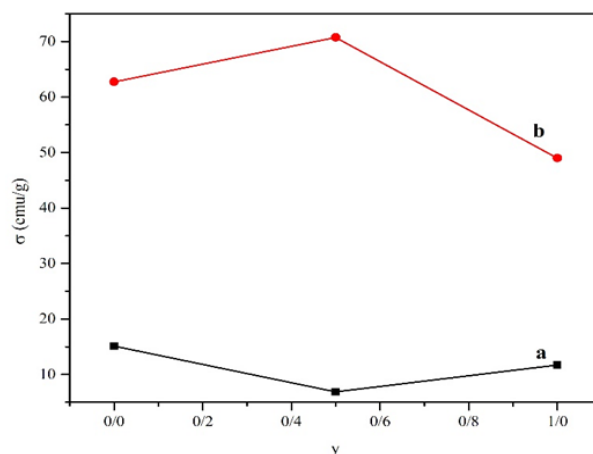
۴-۴- تجزیه و تحلیل اثر اندازه و شکل ذرات بر بازدهی ذرات هسته‌های ترانسفورماتور

اندازه ذرات بر اساس مدل هسته- پوسته رابطه مستقیمی با مغناطش آن دارد. طبق این مدل، هر ذره از یک هسته با نظم فری مغناطیس و یک لایه سطحی با مغناطش صفر تشکیل شده است. با کوچکتر شدن اندازه ذرات نسبت سطح به حجم افزایش می‌یابد، بنابراین ضخامت لایه مرده بیشتر شده و به طبع آن مغناطش کاهش می‌یابد [۱۶]. رابطه بین اندازه ذرات و مغناطش اشباع را می‌توان از معادله ۲-۹ محاسبه نمود [۱۷].

$$\sigma_{sat} = \sigma_{sat(0)} \left(1 - \frac{6t}{d}\right) \quad (۱)$$

در این رابطه t ضخامت لایه مرده، d اندازه ذره، σ_{sat} مغناطش اشباع و $\sigma_{sat(0)}$ مغناطش اشباع در دمای صفرکلوین است [۱۷]. براساس این رابطه می‌توان گفت هر چه اندازه ذره کوچکتر می‌شود اثر لایه مرده نسبت به اثر مغناطش هسته که دارای نظم مغناطیسی است بزرگ‌تر شده، که در نتیجه مغناطش کاهش می‌یابد [۱۸].

به منظور بررسی اثر اندازه ذرات، فقط پودر نمونه‌های A_8 ، A_9 و A_{10} (ردیف ۲۵، ۲۶ و ۲۷ جدول ۳-۲) به صورت اختیاری در دمای 900°C حرارت داده شدند و مجدداً تحت آزمون AGFM قرار داده شدند. در شکل ۴-۳۴ تغییرات مغناطش در حداکثر میدان اعمال شده برای نمونه‌های برحسب غلظت کاتیون‌های نیکل و کبالت در دو حالت تفجوشی نشده و تفجوشی شده در دمای 900°C آورده شده است.



شکل ۴-۳۴- تغییرات مغناطش در حداکثر میدان اعمال شده برای نمونه‌های A_8 ، A_9 و A_{10} برحسب غلظت کاتیون‌های نیکل و کبالت در (a) حالت تفجوشی نشده و (b) تفجوشی شده در دمای 900°C .

همان‌گونه که از شکل بالا مشاهده می‌شود، رفتار مغناطش نمونه‌ها تغییر یافته است. علت این تغییر را می‌توان با مدل هسته پوسته^۱ توجیه کرد. مطابق با این مدل، حضور یک هسته با نظم فری مغناطیس و یک لایه سطحی با مغناطش

^۱ . Core-Shell Model

صفر در نانوذرات و پیرنگ تر شدن اثرات سطحی در آن‌ها سبب می‌شود که با افزایش دمای تفجوشی، اندازه ذرات افزایش یافته و ضخامت لایه مرده کاهش یابد و به تبع آن مغناطش افزایش یابد [۱۶].

برای سه نمونه تفجوشی شده در دمای 900°C ، با استفاده از مغناطش در حداکثر میدان اعمال شده که برای حالت نانو و بالک به دست آمده است و رابطه ۱، مقدار تقریبی ضخامت لایه مرده محاسبه شد که در جدول زیر بیان شده است.

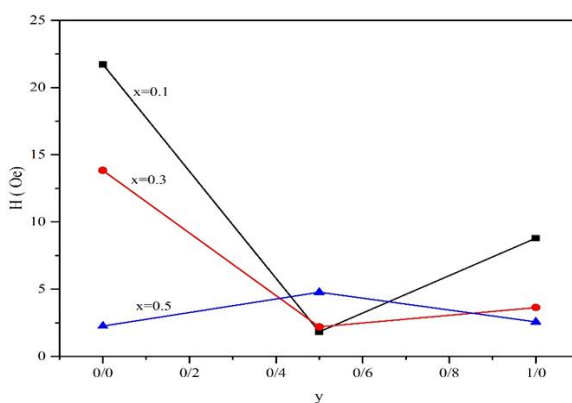
جدول ۴-۱۸- ضخامت لایه مرده نمونه های A_8 ، A_9 و A_{10}

کد نمونه	فرمول استوکیومتری	ضخامت لایه مرده (nm)
A_8	$\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}]_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۱/۷۷
A_9	$\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{0.5}\text{Co}]_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۲/۰۳۹
A_{10}	$\text{Zn}_{0.5}[\text{Co}]_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۱/۵۴۲

همان‌گونه که از جدول ۴-۱۸ مشاهده می‌شود، ضخامت لایه مرده نمونه A_9 از سایر نمونه ها بیشتر است، به همین دلیل در حالت نانو کمترین مغناطش را دارد. زمانی که پودر نمونه ها در دمای 900°C تفجوشی می‌شود، اندازه این نمونه بیشتری افزایش را دارد، بنابراین مغناطش این نمونه دچار تغییرات بیشتری شده است و در حالت بالک مغناطش آن بیشترین مقدار است. علاوه بر این تراوایی با مغناطش اشباع مطابق معادله زیر رابطه مستقیم دارد.

$$\mu = \frac{4\gamma M_s}{3f_{res}} + 1 \quad (2)$$

در این رابطه، γ ثابت ژیرومغناطیس^۱، M_s مغناطش اشباع و f_{res} فرکانس رزونانس است. با افزایش مغناطش اشباع تراوایی هم تغییر می‌کند، بنابراین اندازه ذرات بر تراوایی هم تاثیرگذار است. همچنین یکی دیگر از پارامترهای قابل بررسی نیروی وادارندگی است. در شکل ۳۵ تغییرات نیروی وادارندگی برحسب غلظت کاتیون های نیکل و کبالت نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۵- تغییرات نیروی وادارندگی برحسب غلظت کاتیون های نیکل و کبالت جانشانی شده با فرمول استوکیومتری $\text{Mn}_{0.5-x}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{1-y}\text{Co}_y]_x\text{Fe}_2\text{O}_4$

همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار y تا ۰/۵، در نمونه‌های دارای x برابر با ۰/۱ و ۰/۳ نیروی وادارندگی کاهش می‌یابد و پس از آن افزایش یافته است. در نمونه‌های دارای x برابر با ۰/۵ این روند برعکس است، یعنی تا مقدار y برابر با ۰/۵ نیروی وادارندگی افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. نیروی وادارندگی به عوامل مختلف

¹. Gyromagnetic ratio

مانند اندازه ذره، ناهمسانگردی شکل، ناهمسانگردی مغناطیبلوری و اندازه حوزه‌ها بستگی دارد [۱۳]. علاوه بر این طبق نتایج به دست آمده، رابطه نیروی وادارندگی با اندازه ذرات برای ناحیه‌های چندحوزه‌ای به صورت زیر است [۲۱]:

$$H_c = e + \frac{f}{d} \quad (۳) \quad \begin{matrix} \text{در} \\ \text{این} \end{matrix}$$

رابطه، e و f مقدارهای ثابت هستند. از آنجایی که فرایند مغناطیسی شدن نمونه هم از طریق حرکت دیواره‌ها و هم از طریق چرخش حوزه‌های مغناطیسی رخ می‌دهد، در ساختارهای چندحوزه سهم جابه‌جایی دیواره‌های حوزه‌ها نسبت به چرخش حوزه‌ها نیاز به انرژی کمتری دارد. در این ساختارها با کاهش اندازه ذرات تا یک قطر بحرانی، نیروی وادارندگی افزایش می‌یابد تا به یک مقدار بیشینه می‌رسد. پس از آن سهم جابه‌جایی دیواره‌ها از لحاظ انرژی دیگر به صرفه نبوده و ذرات تک حوزه می‌شوند [۲۱ و ۲۳]. در این محدوده، نیروی وادارندگی با اندازه ذره به صورت زیر است [۲۱]:

$$H_c = g + \frac{h}{d^{3/2}} \quad (۴) \quad \begin{matrix} \text{کم} \\ \text{شده} \end{matrix}$$

و به

صفر می‌رسد. نیروی وادارندگی و پسماند نزدیک صفر از مشخصات سیستم‌های سوپرپرامغناطیس است [۲۲].

۴-۵- تجزیه و تحلیل ویژگی‌های مغناطیسی و اتلاف‌های مربوط به آن

ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌های تهیه شده از آزمون‌های AGFM، دمای کوری و LCR متر و اتلاف نمونه‌ها از دستگاه هیستوگراف متناسب با امکانات و شرایط موجود به دست آمده است که در ادامه به نتایج حاصل از این آزمون‌ها اشاره می‌شود:

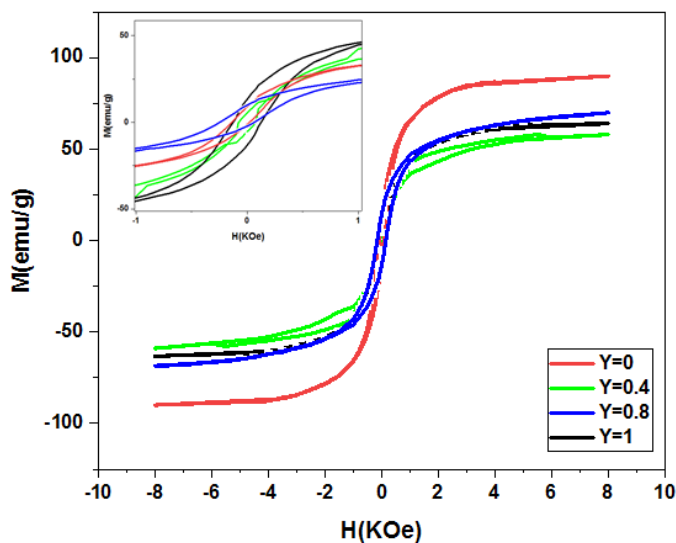
۴-۵-۱- تجزیه و تحلیل ویژگی‌های مغناطیسی مربوط به آزمون‌های AGFM و دمای کوری

۴-۵-۱-۱- ویژگی‌های مغناطیسی مربوط به آزمون‌های AGFM و دمای کوری نمونه‌های تهیه شده

الف- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی

با فرمول استوکیومتری $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$

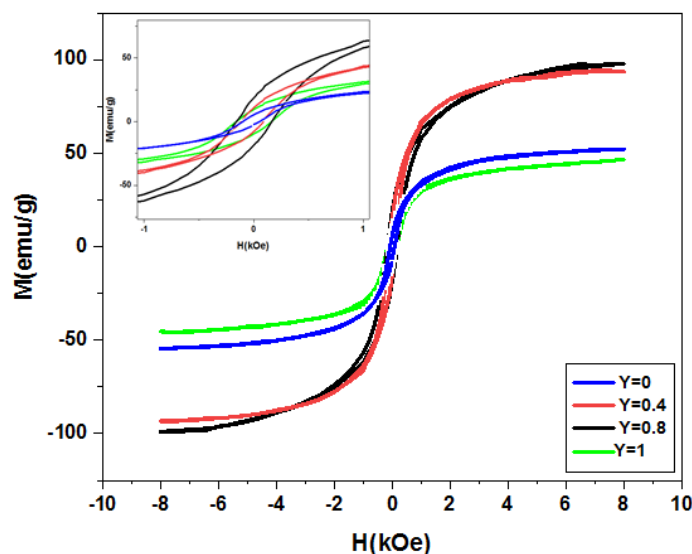
حلقه‌های پسماند نانوذرات فریت نیکل - روی جانشانی شده در دمای اتاق با کاتیون‌های مس و منیزیم در غلظت‌های گوناگون (نمونه‌های ۱ تا ۱۷ جدول ۳-۲)، کلسینه شده در دمای 600°C در مدت ۲ ساعت در حداکثر میدان 9 KOe در شکل ۴-۳۶ نشان داده شده است.



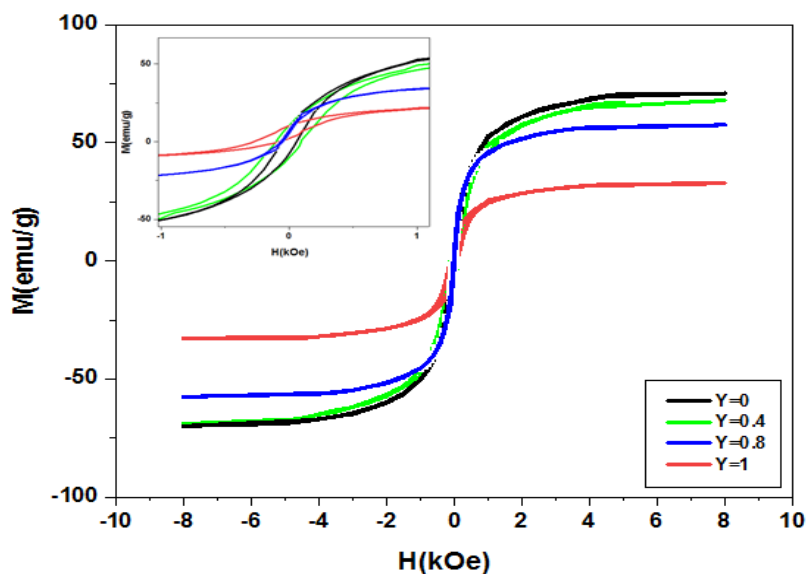
شکل ۴-۳۶- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل- روی $(\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4)$ برای $x=0.3$ در حداکثر میدان ۹ kOe.

همان گونه که از شکل ۴-۳۶ دیده می شود، حلقه ها دارای مغناطش بزرگ و نیروی وادارندگی کم می باشد که از ویژگی- های حلقه های پسماند فازهای مغناطیسی نرم است. لذا می توان گفت که نمونه های تهیه شده به روش احتراقی با ساختار مغناطیسی اسپینلی سازگاری خوبی دارد. انتهای حلقه ها در حداکثر میدان های به کار رفته نشان می دهد که به طور کامل افقی نشده و به اشباع کامل نرسیده اند. برای بیان بهتر نیروی وادارندگی نمونه ها، حلقه های پسماند برای محدوده میدان ۱ تا ۱- و قسمت میانی این نمودار در مقیاس مناسب تری به عنوان شکل داخلی آورده شده است.

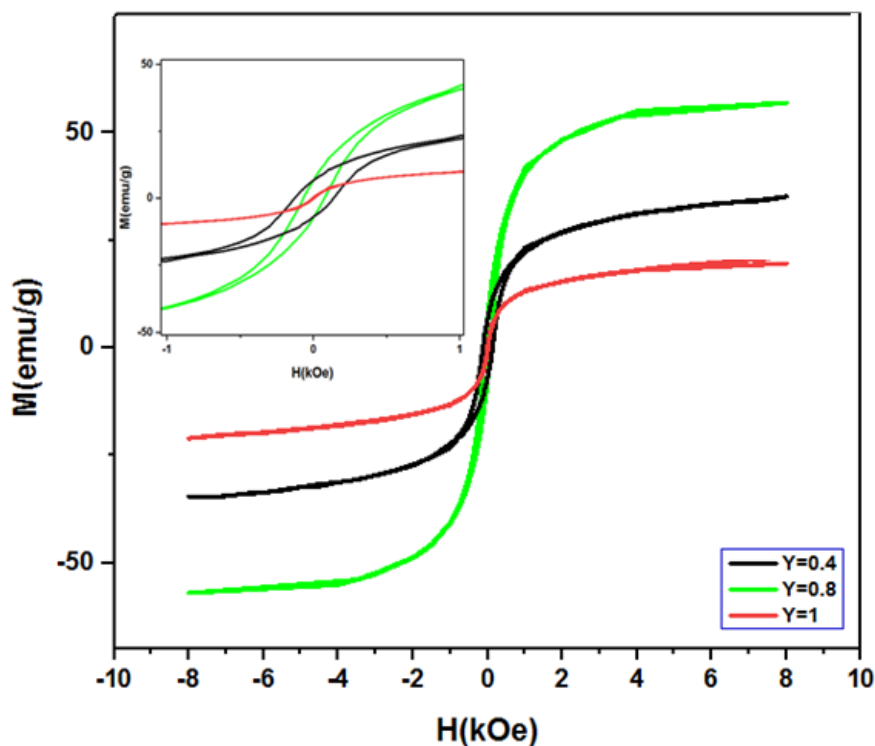
شکل های ۴-۳۷ تا ۴-۳۹ حلقه پسماند نانوذرات فریت نیکل- روی در دمای اتاق در حداکثر میدان ۹ kOe اندازه گیری شده را با غلظت های $(y=0.4, 0.8, 1)$ و $(x=0.5, 0.7, 1)$ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۷- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل- روی $(\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4)$ برای $x=0.5$ در حداکثر میدان ۹ kOe.



شکل ۴-۳۸- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل- روی ($\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$) برای $x=0.7$ در حداکثر میدان ۹kOe.



شکل ۴-۳۹- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل- روی ($\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$) برای $x=1$ در حداکثر میدان ۹kOe.

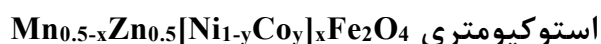
همان گونه از شکل های ۴-۳۷ تا ۴-۳۹ مشاهده می شود مغناطش هیچ یک از این نمونه ها، در این میدان به اشباع نرسیده است (همانند شکل ۴-۳۶). نیروی وادارندگی با توجه به شکل های داخلی رسم شده در مقیاس مناسب تر از نمونه ها افزایش می یابد. مقدارهای مغناطش اشباع، مغناطش باقی مانده، نیروی وادارندگی در جدول ۴-۱۹ آورده شده است.

جدول ۴-۱۹- ویژگی های مغناطیسی نانوذرات نیکل-روی سنتز شده به روش احتراقی

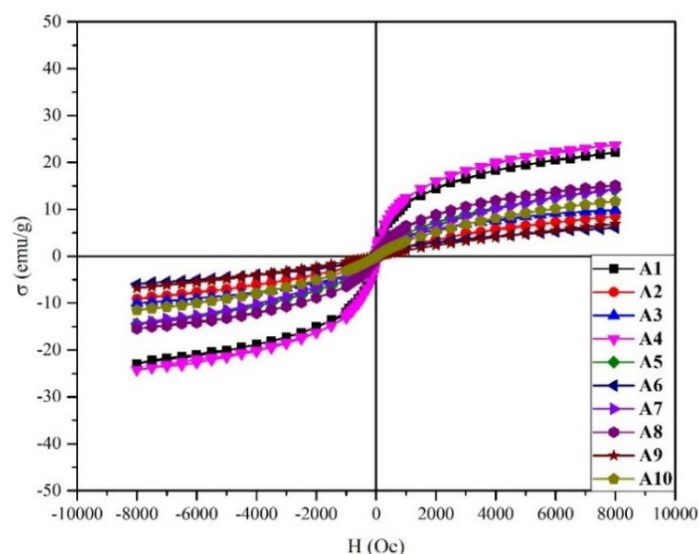
نمونه	$M \text{ (emu/g)}$ (9KOe)	$Mr \text{ (emu/g)}$	$H_c \text{ (Oe)}$
$S1 = \text{Ni Fe}_2\text{O}_4$	۳۱/۱۵	۵/۳۰	۱۳۳/۵۰
$S2 = \text{Ni}_{0.7}(\text{Zn})_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۸۸/۶۲	۱۱/۵۰	۸۳/۱۰
$S3 = \text{Ni}_{0.7}(\text{Zn}_{0.6}\text{Mg}_{0.2}\text{Cu}_{0.2})_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۵۷/۵۵	۶/۶۵	۹۶/۷۴
$S4 = \text{Ni}_{0.7}(\text{Zn}_{0.2}\text{Mg}_{0.4}\text{Cu}_{0.4})_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۶۹/۰۱	۱۳/۸۵	۱۶۷/۴۲
$S5 = \text{Ni}_{0.7}(\text{Mg}_{0.5}\text{Cu}_{0.5})_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۶۲/۳۲	۱۳/۲۶	۱۲۶/۳۹
$S6 = \text{Ni}_{0.5}(\text{Zn})_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۷۵/۵۲	۶/۱۷	۷۹/۱۵
$S7 = \text{Ni}_{0.5}(\text{Zn}_{0.6}\text{Mg}_{0.2}\text{Cu}_{0.2})_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۹۳/۷۱	۱۴/۸۵	۹۵/۹۵
$S8 = \text{Ni}_{0.5}(\text{Zn}_{0.2}\text{Mg}_{0.4}\text{Cu}_{0.4})_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۹۸/۳۷	۱۸/۷۵	۱۶۱/۸۱
$S9 = \text{Ni}_{0.5}(\text{Mg}_{0.5}\text{Cu}_{0.5})_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۴۶/۲۵	۹/۷۱	۱۶۰/۶۵
$S10 = \text{Ni}_{0.3}(\text{Zn})_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۷۰/۶۵	۲/۰۹	۸/۳۸
$S11 = \text{Ni}_{0.3}(\text{Zn}_{0.6}\text{Mg}_{0.2}\text{Cu}_{0.2})_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۶۹/۷۸	۷/۷۴	۶۰/۵۱
$S12 = \text{Ni}_{0.3}(\text{Zn}_{0.2}\text{Mg}_{0.4}\text{Cu}_{0.4})_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۶۷/۲۵	۱۰/۲۵	۹۶/۹۵
$S13 = \text{Ni}_{0.3}(\text{Mg}_{0.5}\text{Cu}_{0.5})_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$	۴۰/۳۲	۸/۲۵	۹۵/۹۵
$S14 = (\text{Zn}_{0.2}\text{Mg}_{0.4}\text{Cu}_{0.4})\text{Fe}_2\text{O}_4$	۵۵/۱۲	۶/۹۷	۷۱/۲۵
$S15 = (\text{Zn}_{0.6}\text{Mg}_{0.2}\text{Cu}_{0.2})\text{Fe}_2\text{O}_4$	۳۷/۸۵	۰/۹۸	۸/۲۵
$S16 = \text{Zn Fe}_2\text{O}_4$	۱/۷۸	-	-
$S17 = (\text{Mg}_{0.5}\text{Cu}_{0.5})\text{Fe}_2\text{O}_4$	۳۴/۷۵	۶/۸۱	۸۳/۶۲

همان‌طور که از جدول ۴-۱۹ مشاهده می‌شود، بیش‌ترین مغناطش در بین نمونه‌ها مربوط به نمونه‌ی فریت نیکل - روی با مقدار جانشانی ($x=0/5$ و $y=0/8$) کاتیون‌های مس و منیزیم است. همچنین بیش‌ترین نیروی وادارندگی مربوط به مقدار جانشانی ($x=0/3$ و $y=0/8$) کاتیون‌های مس و منیزیم است. در ضمن نیروی وادارندگی تمام نمونه‌های جانشانی شده با کاتیون‌های مس و منیزیم از نمونه‌ی فریت نیکل - روی بیش‌تر است.

ب- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول



منحنی های پسماند دمای اتاق نمونه‌های ۱۸ تا ۲۷ جدول ۳-۲ در حداکثر میدان (۸ KOe) در شکل ۴-۴۰ آورده شده است.



شکل ۴-۴۰ منحنی پسماند نانوذرات فریت $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار x و y متفاوت.

همان گونه که از شکل مشاهده می شود، نمونه های تهیه شده دارای نیروی وادارندگی بسیار کم هستند. مغناطش تمام نمونه ها در حداکثر مقدار میدان (۸ KOe) به اشباع نرسیده است و منحنی ها هنوز کاملاً افقی نشده اند. داشتن مقدار نیروی وادارندگی بسیار کم و باریک بودن منحنی های پسماند بیانگر ویژگی مغناطیسی نرم فریت منگنز-روی می باشد [۱۱]. به کمک منحنی های پسماند می توان ویژگی های مغناطیسی نمونه ها از قبیل مغناطش در حداکثر میدان (KOe)

(۸) و نیروی وادارندگی را به دست آورد. در جدول ۴-۲۰ ویژگی های مغناطیسی نمونه ها بیان شده است.

جدول ۴-۲۰ ویژگی های مغناطیسی نانوذرات فریت $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار x و y گوناگون

کد نمونه	x	Y	فرمول استوکیومتری	σ (emu/g)	H_c (Oe)
A_1	۰	–	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	۲۲/۰۹	۷
A_2	۰/۱	۰	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni]_{0.1}Fe_2O_4$	۹/۸۸	۲۲
A_3		۰/۵	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.1}Fe_2O_4$	۹/۱۱	۲
A_4		۱	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Co]_{0.1}Fe_2O_4$	۲۳/۶۹	۹
A_5	۰/۳	۰	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Ni]_{0.3}Fe_2O_4$	۱۴/۲۱	۱۴
A_6		۰/۵	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.3}Fe_2O_4$	۶/۰۷	۲
A_7		۱	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Co]_{0.3}Fe_2O_4$	۱۴/۳۳	۴
A_8	۰/۵	۰	$Zn_{0.5}[Ni]_{0.5}Fe_2O_4$	۱۵/۱۳	۲
A_9		۰/۵	$Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.5}Fe_2O_4$	۶/۸۷	۵
A_{10}		۱	$Zn_{0.5}[Co]_{0.5}Fe_2O_4$	۱۱/۷۲	۲

همان گونه که از جدول مشاهده می شود، نمونه ها دارای مقدار مغناطش پایین در حداکثر میدان می باشند. یکی از دلایل این موضوع، می تواند به کوچک شدن اندازه ذرات مربوط شود. طبق رابطه ۱ با کاهش اندازه ذره، مغناطش کاهش می یابد [۱۱ و ۲۴]. همچنین با توجه به تصویرهای FE-SEM، چون اندازه ذرات کمتر از ۱۳ نانومتر محاسبه شد، پایین بودن مقدار مغناطش دور از انتظار نیست.

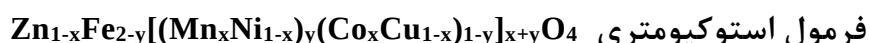
برای بررسی دمای کوری در نمونه ها، نمونه های A_1 ، A_2 ، A_3 ، A_7 و A_9 از جدول ۳-۲ تحت آزمون دمای کوری قرار داده شدند. نتیجه به دست آمده در جدول ۴-۲۱ بیان شده است.

جدول ۴-۲۱- مقادیر دمای کوری نمونه های A_1 ، A_2 ، A_3 ، A_7 و A_9

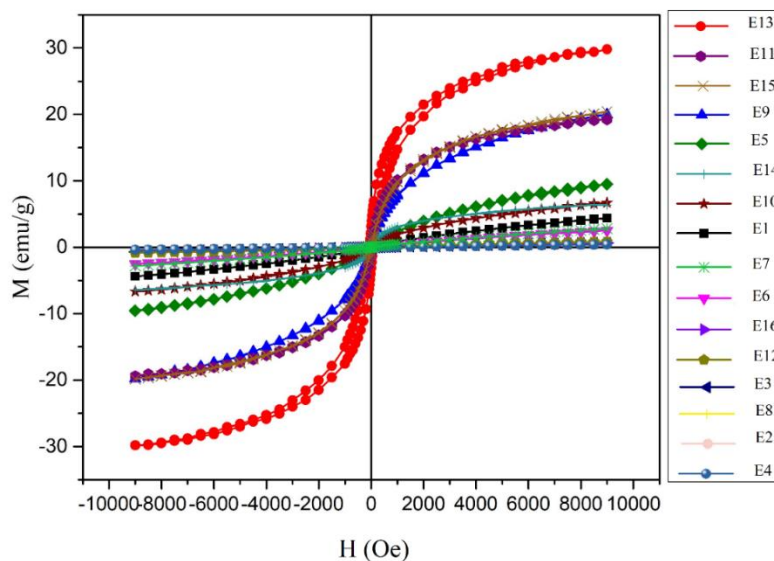
کد نمونه	فرمول استوکیومتری	دمای کوری ($^{\circ}C$)
A_1	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	۱۷۵
A_2	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni]_{0.1}Fe_2O_4$	۱۲۱
A_3	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.1}Fe_2O_4$	۱۲۰
A_7	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Co]_{0.3}Fe_2O_4$	۸۷
A_9	$Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co]_{0.5}Fe_2O_4$	۸۲

همان گونه که از جدول ۴-۲۱ مشاهده می شود، دمای کوری نمونه A_1 نسبت به نمونه A_2 و همچنین نمونه A_3 نسبت به نمونه A_7 کاهش چشمگیری داشته است. این کاهش می تواند به دلیل کاهش قدرت برهمکنش بین جایگاه A و B باشد. از آنجا که گشتاور مغناطیسی کاتیون منگنز از کاتیون های نیکل و کبالت بیشتر است، با کاهش درصد کاتیون منگنز گشتاور کاهش یافته و به تبع آن قدرت برهمکنش بین جایگاه های A و B کاهش می یابد، بنابراین دمای کوری کاهش یافته است [۲۵ و ۲۶]. در دمای کوری نظم اسپینی و برهمکنش های تبدیلی در اثر اختلال حرکت گرمایی تصادفی از بین می رود و فریت از حالت فری مغناطیس به حالت پارامغناطیس تبدیل می شود. مغناطش با دما رابطه عکس دارد [۲۰]، از اینرو برای محاسبه دمای کوری می توان تغییرات مغناطش را برحسب دما ثبت کرد و دمای کوری دمایی خواهد بود که در آن مغناطش صفر شده است [۱۹].

ج- فریت روی جانشانی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با



در شکل ۴-۴۱ منحنی های پسماند دمای اتاق نمونه های فریتی E_1 الی E_{16} در حداکثر میدان مغناطیسی ۹kOe نشان داده شده است.



شکل ۴-۴- منحنی پسماند نانوذرات فریت $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ با مقدار x و y متفاوت.

همان گونه که از شکل ۴-۴ مشاهده می شود مغناطش تمام نمونه ها در حداکثر مقدار میدان (۹ KOe) به اشباع نرسیده است و منحنی ها کاملاً افقی نشده اند. نمونه های فریتی دارای نیروی وادارندگی حدود ۸۰-۸۰۰ Oe هستند. مقدار نیروی وادارندگی کم و باریک بودن منحنی های پسماند بیانگر ویژگی مغناطیسی نرم نمونه های فریتی است [۱۱]. به کمک منحنی های پسماند می توان ویژگی های مغناطیسی نمونه ها از قبیل مغناطش در حداکثر میدان (KOe) (۹) و نیروی وادارندگی را به دست آورد. در جدول ۴-۲ ویژگی های مغناطیسی نمونه ها بیان شده است.

جدول ۴-۲۲- ویژگی های مغناطیسی نانوذرات فریت $Zn_{1-x}Fe_2-y[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ با مقدار x و y گوناگون

نام نمونه	نانوذرات فریتی	M (emu/g)	H_c (oe)	Mr (emu/g)
E1	$ZnFe_2O_4$	۴/۴۰	۲۰	۰/۱۲
E2	$ZnFe_{1.6}[Ni_{0.4}Cu_{0.6}]_{0.4}O_4$	۰/۶۲	۴۰	۰/۱۰
E3	$ZnFe_{1.2}[Ni_{0.8}Cu_{0.2}]_{0.8}O_4$	۰/۶۶	۳۰	۰/۱۱
E4	$ZnFeNiO_4$	۰/۳۹	۷۰	۰/۰۹
E5	$Zn_{0.6}Fe_2[Co_{0.4}Cu_{0.6}]_{0.4}O_4$	۹/۴۷	۲۰	۱/۱۷
E6	$Zn_{0.6}Fe_{1.6}[(Mn_{0.4}Ni_{0.6})_{0.4}(Co_{0.4}Cu_{0.6})_{0.6}]_{0.8}O_4$	۲/۴۱	۳۰	۰/۰۴
E7	$Zn_{0.6}Fe_{1.2}[(Mn_{0.4}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.4}Cu_{0.6})_{0.2}]_{1.2}O_4$	۲/۸۰	۲۰	۰/۰۵
E8	$Zn_{0.6}Fe(Mn_{0.4}Ni_{0.6})_{1.4}O_4$	۰/۶۶	۶۰	۰/۰۲
E9	$Zn_{0.2}Fe_2[Co_{0.8}Cu_{0.2}]_{0.8}O_4$	۱۹/۲۲	۹	۲/۵۵
E10	$Zn_{0.2}Fe_{1.6}[(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{0.4}(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.6}]_{1.2}O_4$	۶/۶۹	۴۰	۱/۵۱
E11	$Zn_{0.2}Fe_{1.2}[(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.2}]_{1.6}O_4$	۲۰/۴۲	۱۰	۳/۴۸
E12	$Zn_{0.2}Fe(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{1.8}O_4$	۰/۶۸	۳۰	۰/۰۳
E13	$CoFe_2O_4$	۲۹/۷۹	۸	۶/۹۵
E14	$Fe_{1.6}[(Mn)_{0.4}(Co)_{0.6}]_{1.4}O_4$	۶/۳۸	۵۰	۰/۰۵
E15	$Fe_{1.2}[(Mn)_{0.8}(Co)_{0.2}]_{1.8}O_4$	۲۰/۴۲	۲۰	۳/۳۹
E16	Mn_2FeO_4	۰/۸۲	۸۰	۰/۰۶

همان گونه که از جدول بالا مشاهده می شود، نمونه ها دارای مقدار مغناطش پایین در حداکثر میدان می باشند. علت این موضوع می تواند به کوچک شدن اندازه ذرات مربوط شود. طبق معادله ۱ با کاهش اندازه ذره، مغناطش کاهش می یابد [۲۴]. از آنجا که اندازه ذرات کمتر از ۲۵ نانومتر است، پایین بودن مقدار مغناطش دور از انتظار نیست.

۴-۵-۱-۱-۱- مقایسه نتایج حاصل از بررسی آزمون های AGFM و دمای کوری نمونه های فریتی تهیه شده

با استفاده از منحنی های پسماند ویژگی های مغناطیسی نمونه ها از قبیل مغناطش در حداکثر میدان (۹ KOe) و نیروی وادارندگی اندازه گیری و نتایج مربوط به آن در جدول آورده شده است.

جدول ۴-۲۳- ویژگی های مغناطیسی نانوذرات فریتی تهیه شده بدون عملیات حرارتی

کد نمونه	فرمول استوکیومتری	M (emu/g)	H_c (Oe)
S ₁	$NiFe_2O_4$	۳۱/۱۵	۱۳۳
S ₂	$Ni_{0.7}(Zn)_{0.3}Fe_2O_4$	۸۸/۶۲	۸۳
S ₃	$Ni_{0.7}(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})_{0.3}Fe_2O_4$	۵۷/۵۵	۹۶
S ₄	$Ni_{0.7}(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})_{0.3}Fe_2O_4$	۶۹/۰۱	۱۶۷

S_5	$Ni_{0.7}(Mg_{0.5} Cu_{0.5})_{0.3} Fe_2O_4$	۶۲/۳۲	۱۲۶
S_6	$Ni_{0.5}(Zn)_{0.5} Fe_2O_4$	۷۵/۵۲	۷۹
S_7	$Ni_{0.5}(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})_{0.5} Fe_2O_4$	۹۳/۷۱	۹۵
S_8	$Ni_{0.5}(Zn_{0.2}Mg_{0.4} Cu_{0.4})_{0.5} Fe_2O_4$	۹۸/۳۷	۱۶۱
S_9	$Ni_{0.5}(Mg_{0.5}Cu_{0.5})_{0.5}Fe_2O_4$	۴۶/۲۵	۱۶۰
S_{10}	$Ni_{0.3}(Zn)_{0.7} Fe_2O_4$	۷۰/۶۵	۸
S_{11}	$Ni_{0.3}(Zn_{0.6}Mg_{0.2} Cu_{0.2})_{0.7} Fe_2O_4$	۶۹/۷۸	۶۰
S_{12}	$Ni_{0.3}(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})_{0.7} Fe_2O_4$	۶۷/۲۵	۹۶
S_{13}	$Ni_{0.3}(Mg_{0.5}Cu_{0.5})_{0.7} Fe_2O_4$	۴۰/۳۲	۹۵
S_{14}	$(Zn_{0.2}Mg_{0.4} Cu_{0.4}) Fe_2O_4$	۵۵/۱۲	۷۱
S_{15}	$(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2}) Fe_2O_4$	۳۷/۸۵	۸
S_{16}	$Zn Fe_2O_4$	۱/۷۸	۱۲۰
S_{17}	$(Mg_{0.5} Cu_{0.5}) Fe_2O_4$	۳۴/۷۵	۸۳
A_1	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	۲۲/۰۹	۷
A_2	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni]_{0.1}Fe_2O_4$	۹/۸۸	۲۲
A_3	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.1}Fe_2O_4$	۹/۱۱	۲
A_4	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Co]_{0.1}Fe_2O_4$	۲۳/۶۹	۹
A_5	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Ni]_{0.3}Fe_2O_4$	۱۴/۲۱	۱۴
A_6	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.3}Fe_2O_4$	۶/۰۷	۲
A_7	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Co]_{0.3}Fe_2O_4$	۱۴/۳۳	۴
A_8	$Zn_{0.5}[Ni]_{0.5}Fe_2O_4$	۱۵/۱۳	۲
A_9	$Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.5}Fe_2O_4$	۶/۸۷	۵
A_{10}	$Zn_{0.5}[Co]_{0.5}Fe_2O_4$	۱۱/۷۲	۲
$E1$	$ZnFe_2O_4$	۴/۴۰	۲۰
$E2$	$ZnFe_{1.6}[Ni_{0.4}Cu_{0.6}]_{0.4}O_4$	۰/۶۲	۴۰
$E3$	$ZnFe_{1.2}[Ni_{0.8}Cu_{0.2}]_{0.8}O_4$	۰/۶۶	۳۰
$E4$	$ZnFeNiO_4$	۰/۳۹	۷۰
$E5$	$Zn_{0.6}Fe_2[Co_{0.4}Cu_{0.6}]_{0.4}O_4$	۹/۴۷	۲۰
$E6$	$Zn_{0.6}Fe_{1.6}[(Mn_{0.4}Ni_{0.6})_{0.4}(Co_{0.4}Cu_{0.6})_{0.6}]_{0.8}O_4$	۲/۴۱	۳۰
$E7$	$Zn_{0.6}Fe_{1.2}[(Mn_{0.4}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.4}Cu_{0.6})_{0.2}]_{1.2}O_4$	۲/۸۰	۲۰
$E8$	$Zn_{0.6}Fe(Mn_{0.4}Ni_{0.6})_{1.4}O_4$	۰/۶۶	۶۰
$E9$	$Zn_{0.2}Fe_2[Co_{0.8}Cu_{0.2}]_{0.8}O_4$	۱۹/۲۲	۹
$E10$	$Zn_{0.2}Fe_{1.6}[(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{0.4}(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.6}]_{1.2}O_4$	۶/۶۹	۴۰
$E11$	$Zn_{0.2}Fe_{1.2}[(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.2}]_{1.6}O_4$	۲۰/۴۲	۱۰
$E12$	$Zn_{0.2}Fe(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{1.8}O_4$	۰/۶۸	۳۰

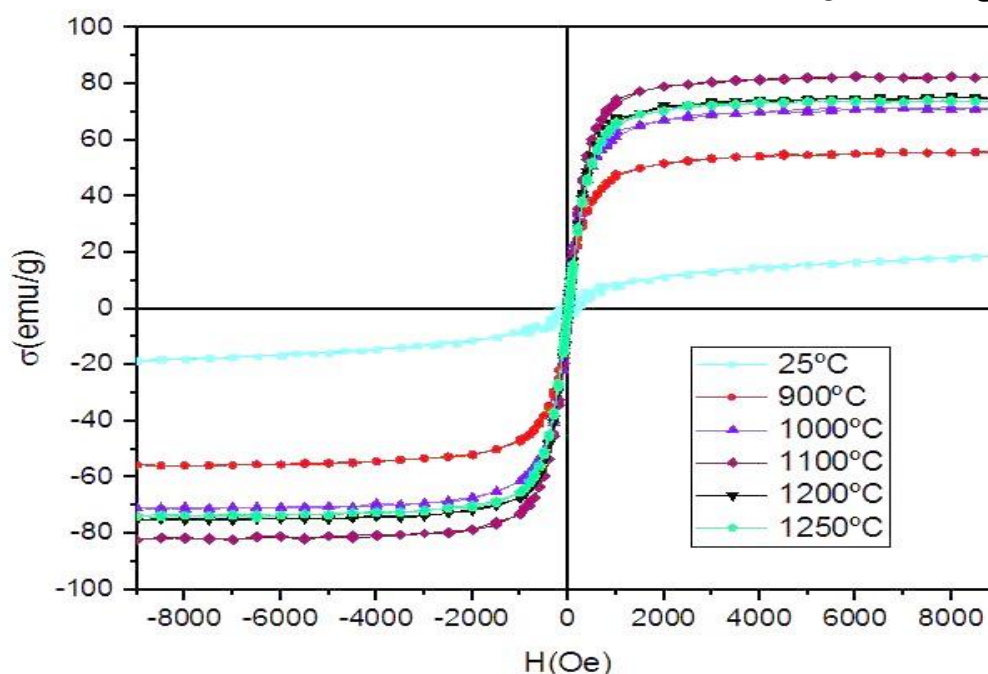
<i>E13</i>	$CoFe_2O_4$	۲۹/۷۹	۸
<i>E14</i>	$Fe_{1.6}[Mn]_{0.4}(Co)_{0.6}]_{1.4}O_4$	۶/۳۸	۵۰
<i>E15</i>	$Fe_{1.2}[Mn]_{0.8}(Co)_{0.2}]_{1.8}O_4$	۲۰/۴۲	۲۰
<i>E16</i>	Mn_2FeO_4	۰/۸۲	۸۰

بررسی مغناطش در حداکثر میدان (۹Koe) نمونه‌ها نشان داد، مغناطش نانوذرات $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ سنتز شده به روش خوداحتراقی بیش از سایر نمونه‌ها است. به گونه‌ای که نمونه‌های S2، S7 و S8 بیشترین مغناطش را دارند. کلسیناسیون این نانوذرات در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند یکی از دلایل افزایش مغناطش این نانوذرات باشد. زیرا افزایش دما موجب رشد نانوذرات شده و طبق مدل هسته-پوسته با افزایش سایز نانوذرات، مغناطش افزایش می‌یابد [۲۴ و ۲۷].

مقایسه میدان وادارندگی نمونه‌ها نشان داد نانوذرات $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ میدان وادارندگی کمتری نسبت به نمونه‌های دیگر دارند. از میان این نانوذرات، میدان وادارندگی نانوذرات A3، A7، A8 و A10 کمترین مقدار را دارا است. در واقع این نمونه‌ها به دلیل میدان وادارندگی کم می‌توانند تفات کمتری ایجاد نمایند.

۴-۵-۱-۲- ویژگی‌های مغناطیسی مربوط به آزمون‌های AGFM و دمای کوری تحت عملیات حرارتی قرار گرفته

در شکل ۴-۴۲ منحنی‌های پسماند نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ به ازای دماهای مختلف در حداکثر میدان مغناطیسی ۹ Koe نشان داده شده است.



شکل ۴-۴۲- منحنی پسماند نانو ذرات فریت $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ پخت داده شده در دماهای مختلف.

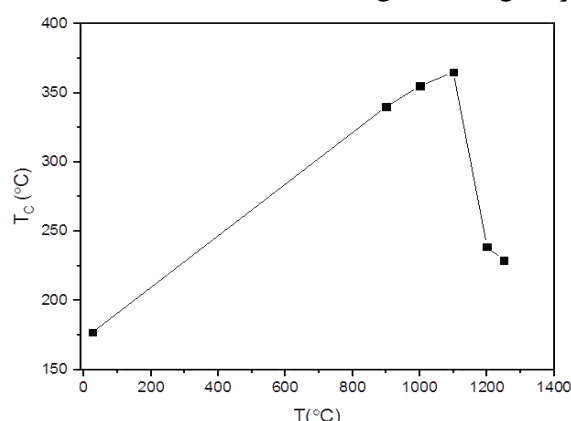
همان‌گونه که از شکل ۴-۴۲ مشاهده می‌شود با افزایش دمای بازپخت تا ۱۱۰۰ °C، مغناطش افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. از آنجا که در بخش‌های پیش گفته شد با افزایش دمای پخت، اندازه دانه‌ها رشد یافته که منجر به

تغییر مغناطش می‌شود. این تغییرات بر اساس مدل پوسته - هسته و تحلیل‌های دیگر قابل درک است. باتوجه به اینکه این گونه فریت‌ها با قابلیت کاربرد هسته‌های در معرض میدان‌های مغناطیسی متناوب AC با بسامد بالا قرار می‌گیرند، منحنی مغناطش آن‌ها چندین بار در ثانیه تکرار و سبب اتلاف انرژی و بالا رفتن دمای آهنربا می‌شود. لذا باریک بودن حلقه‌های پسماند این نمونه‌ها، نشان دهنده اتلاف و وادارندگی پایین است که می‌توان از آن به‌عنوان یک مزیت به‌منظور استفاده در کاربردهای الکترومغناطیسی ترانسفورماتورها نام برد [۱۲]. پارامترهای گوناگون شامل مغناطش اشباع و مغناطش در میدان بیشینه، مغناطش باقیمانده و نیروی وادارندگی مغناطیسی از منحنی پسماند برای نمونه‌های پخت داده شده در دماهای گوناگون در جدول ۴-۲۴ آورده شده است.

جدول ۴-۲۴- ویژگی‌های مغناطیسی نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ سنتز شده در دماهای مختلف

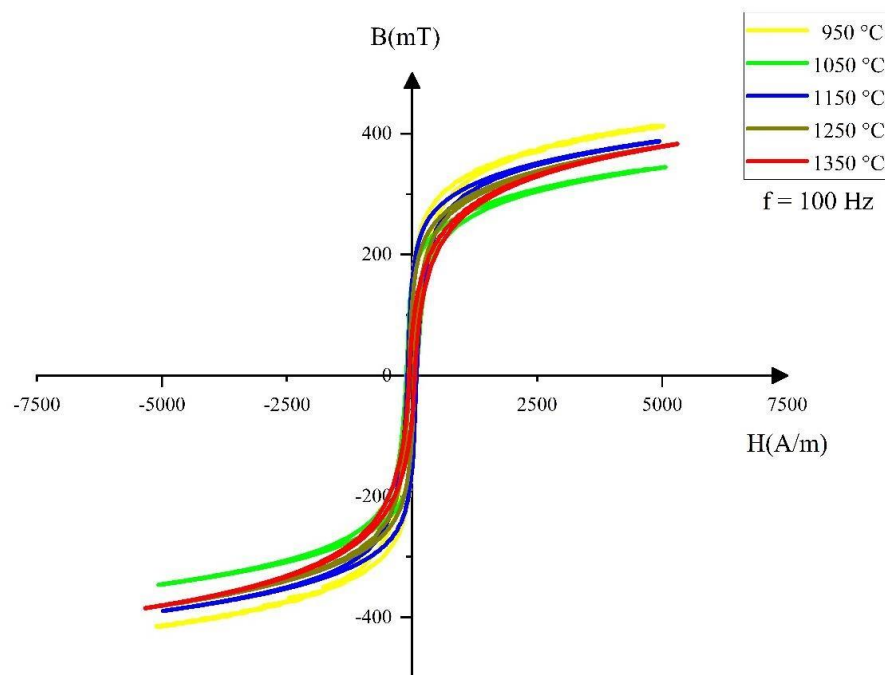
دما ($^{\circ}C$)	مغناطش در میدان بیشینه (emu/gr)	H_C (Oe)
۲۵	۱۸	۳
۹۰۰	۵۴	۲۰
۱۰۰۰	۷۰	۱۱
۱۱۰۰	۸۰	۵
۱۲۰۰	۷۴	۴
۱۲۵۰	۷۳	۳

همان گونه که از جدول ۴-۲۴ مشاهده می‌شود ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌های پخت داده شده با تغییر دما به خوبی قابل مشاهده است. یکی از ویژگی‌های مهم کاربرد هسته‌ها در ترانسفورماتورها، دمای کوری است که آسیب‌های ناشی از آن را مشخص می‌نماید. از آنجا که افزایش دمای کاری هسته‌ها ممکن است موجب برهم زدن نظم اسپینی و از بین بردن خاصیت فری مغناطیسی نمونه‌ها گردد، بررسی دمای کوری نمونه دارای اهمیت است. لذا تغییرات دمای کوری بر حسب دماهای پخت گوناگون نمونه‌ها در شکل ۴-۴۳ نشان داده شده است.

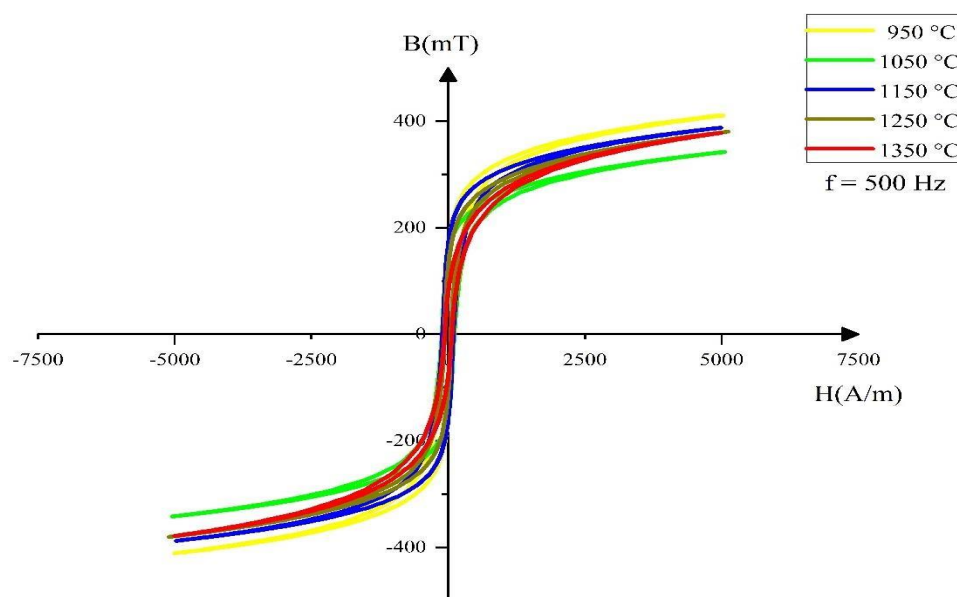


شکل ۴-۴۳- تغییرات دمای کوری نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ بر حسب دما.

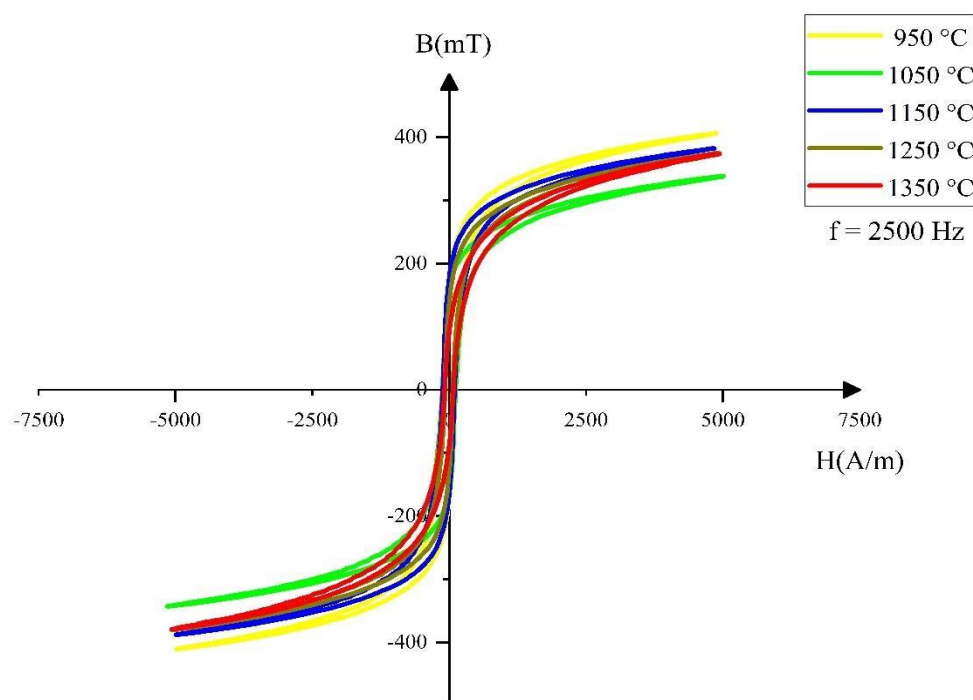
همان گونه که از شکل ۴-۴۳ مشاهده می شود دمای کوری برای نمونه های پخت داده شده تا 1100°C افزایش و پس از آن کاهش می یابد. همچنین نمودار حلقه های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ که به صورت تک مرحله ای و دو مرحله ای تحت عملیات حرارتی قرار داده شده است در فرکانس های گوناگون در شکل های ۴-۴۴ تا ۴-۴۷ نشان داده شده است.



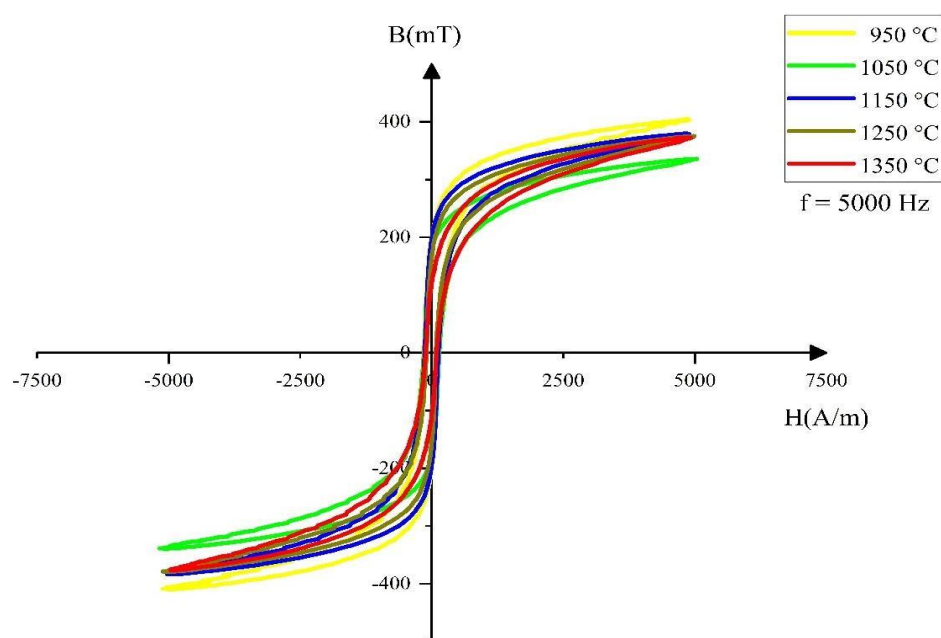
شکل ۴-۴۴- نمودار حلقه های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه های تفجوشی شده در فرکانس 100 Hz.



شکل ۴-۴۵- نمودار حلقه های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه های تفجوشی شده در فرکانس 500 Hz.



شکل ۴-۴۶- نمودار حلقه‌های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه‌های تفجوشی شده در فرکانس 2500 Hz.



شکل ۴-۴۷- نمودار حلقه‌های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه‌های تفجوشی شده در فرکانس 5000 Hz.

همانگونه که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود مکان، ترتیب قرارگیری و جابجایی منحنی چگالی شار مغناطیسی (B) بر حسب شدت میدان مغناطیسی برای همه نمونه‌ها در تمامی فرکانس‌ها تقریباً رفتار مشابه دارد. در جدول‌های زیر مقدار مغناطش اشباع و نیروی وادارندگی بر حسب فرکانس در دماهای مختلف آورده شده است.

جدول ۴-۲۵- مغناطش نمونه‌های $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ تفجوشی شده برحسب emu/gr در دماها و فرکانس‌های مختلف

فرکانس (kHz) دما (°C)	۱۰۰ Hz	۵۰۰ Hz	۲۵۰۰ Hz	۵۰۰۰ Hz
۹۵۰	۷۱/۵۱۱	۷۱/۱۲۳	۷۰/۳۵	۷۰/۰۳۳
۱۰۵۰	۵۸/۸۱۹	۵۸/۴۰۹	۵۷/۷۹	۵۷/۲۸۳
۱۱۵۰	۶۴/۶۶۳	۶۴/۶۲۲	۶۳/۷۹۵	۶۳/۳۰۸
۱۲۵۰	۶۳/۷۸۶	۶۳/۸۶۳	۶۳/۰۴۱	۶۳/۰۷
۱۳۵۰	۶۸/۳۱۱	۶۷/۴۳۹	۶۶/۷۴۴	۶۶/۵۰۵

جدول ۴-۲۶- نیروی وادارندگی (Hc) نمونه‌های $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ تفجوشی شده در دماها و فرکانس‌های مختلف

فرکانس (kHz) دما (°C)	۱۰۰ Hz	۵۰۰ Hz	۲۵۰۰ Hz	۵۰۰۰ Hz
۹۵۰	۷۱/۷	۸۰/۹	۹۰/۸	۱۱۱
۱۰۵۰	۱۱۲/۸	۱۱۱/۵	۱۲۴/۲	۱۴۶/۸
۱۱۵۰	۸۸/۴	۱۰۲/۳	۱۱۷/۱	۱۳۲
۱۲۵۰	۵۹	۶۷/۱	۷۸/۵	۹۹/۷
۱۳۵۰	۵۵/۷	۶۵/۱	۸۳/۹	۱۱۶/۲

۴-۵-۲- تجزیه و تحلیل ویژگی‌های مغناطیسی مربوط آزمون LCR متر

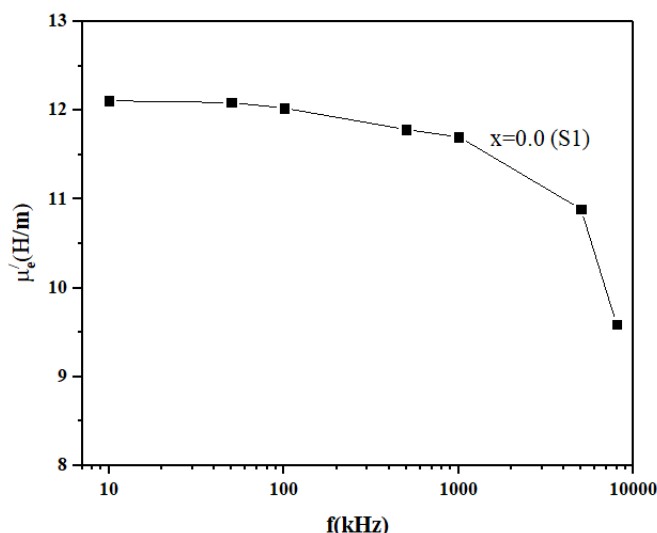
۴-۵-۲-۱- ویژگی‌های مغناطیسی مربوط به آزمون LCR متر نمونه‌های تهیه شده بدون عملیات حرارتی

برای بررسی تراوایی نمونه‌های تهیه شده با استفاده از LCR متر، نمونه‌های ۱ تا ۲۷ جدول ۳-۲ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند که نتایج آن در ذیل بیان می‌شود.

الف- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی

با فرمول استوکیومتری $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}$

تراوایی مغناطیسی نانوذرات فریت نیکل- روی جانشانی شده با کاتیون‌های مس و منیزیم در غلظت‌های گوناگون، کلسینه شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد در مدت ۲ ساعت، به‌صورت تابعی از فرکانس در زیر نشان داده شده است. محدوده فرکانسی در نظر گرفته شده از ۱۰ تا ۸۰۰۰ کیلوهرتز برای تمام هسته‌های حلقوی در نظر گرفته شده است. در شکل ۴-۴۸ این کمیت برای نمونه S۱ بیان شده است.



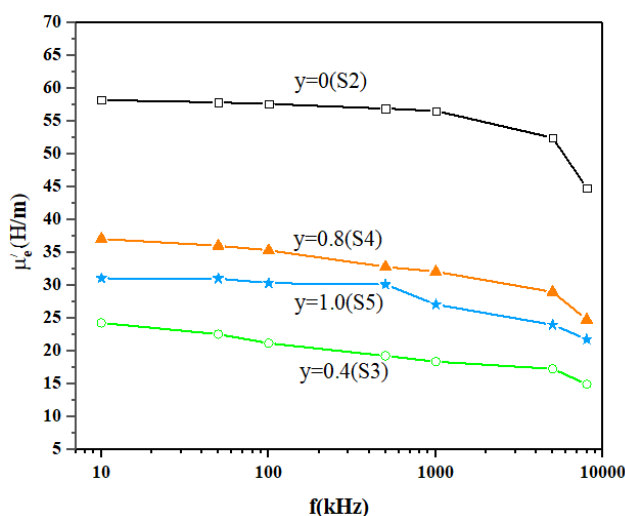
شکل ۴-۴۸- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس‌های مختلف برای نمونه S۱: NiFe₂O (غلظت x=۰).

همان‌گونه که از شکل ۴-۴۸ مشاهده می‌شود، تراوایی مغناطیسی با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. این کاهش بر اساس رابطه زیر که نشان‌دهنده کاهش تراوایی با فرکانس است و در ذیل نیز آورده شده است، سازگار است [۲۸].

$$\mu'_e = \frac{l(L_{eff} - L_W)}{\mu_0 N^2 A} \quad (5)$$

در این رابطه، L_{eff} اندوکتانس سیم پیچ ترویدی، L_W اندوکتانس سیم‌پیچ با هسته هوا، N تعداد دور سیم پیچ، l طول میانگین مسیر مغناطیسی یک هسته ترویدی بر حسب متر، A مساحت سطح مقطع هسته ترویدی بر حسب m^2 و μ_0 نفوذپذیری فضای آزاد ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/M}$) می‌باشد.

در شکل ۴-۴۹، تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس برای نمونه‌های $x=0/3$ و مقادیرهای y برابر با ۱ و ۰/۸ و ۰/۴ و ۰ آورده شده است.



شکل ۴-۴۹- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس‌های مختلف برای نمونه‌های $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}$ جانشانی‌شده با غلظت $x = 0.3$.

همان‌گونه از این شکل مشاهده می‌شود برای نمونه‌ها، تراوایی مغناطیسی با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. همچنین مقدار تراوایی برای نمونه‌های جانشانی گوناگون متفاوت است. تراوایی مغناطیسی نمونه S_2 در مقایسه با بقیه نمونه بیشتر است. این رفتار مغناطیسی با جابجایی‌های گوناگون را بر اساس ترکیب شیمیایی با جانشانی مغناطش نمونه‌ها توضیح داده می‌شود.

با توجه به جدول ۴-۱۹ مغناطش اشباع برای نمونه‌های جانشانی شده به شرح ذیل می‌باشد:

$$M_{S2} (88/62) > M_{S4} (69/01) > M_{S5} (62/22) > M_{S3} (57/55)$$

از آنجا که مغناطیدگی در مواد مغناطیسی به‌ویژه فریت‌های اسپینلی است، با دو روش چرخش اسپین‌های حوزه‌ها و دیگری حرکت دیواره حوزه‌ها صورت می‌گیرد. بر این اساس تراوایی مغناطیسی از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۱ و ۲۹]:

$$\mu = \mu_{wall} + \mu_s + 1 \quad (6)$$

که در آن μ_{wall} پذیرفتاری ناشی از حرکت دیواره حوزه‌ها و μ_s پذیرفتاری ذاتی چرخش اسپین‌ها است که هر کدام با مجذور مغناطش رابطه مستقیم دارند [۲۰]:

$$\mu_s = \frac{2 \pi M_s^2}{K_a} \quad (7)$$

$$\mu_{wall} = \frac{3 \pi D M_s^2}{4 \gamma} \quad (8)$$

که در این رابطه M_s مغناطش اشباع، K_a ناهمسانگردی کل، D میانگین اندازه ذره و γ انرژی دیواره حوزه‌ها است. با توجه به فرمول‌های اشاره شده نمونه‌هایی که مغناطش کمتری دارند، تراوایی مغناطیسی کمتری خواهند داشت که این موضوع با تراوایی نمونه‌های اشاره شده هم‌خوانی دارد. برای بررسی بیشتر تراوایی نمونه‌ها، چگالی آن‌ها به روش ارشمیدس محاسبه و در جدول ۴-۲۷ بیان شده است.

جدول ۴-۲۷- چگالی نمونه‌های فریت $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ تهیه شده به روش خود احتراقی

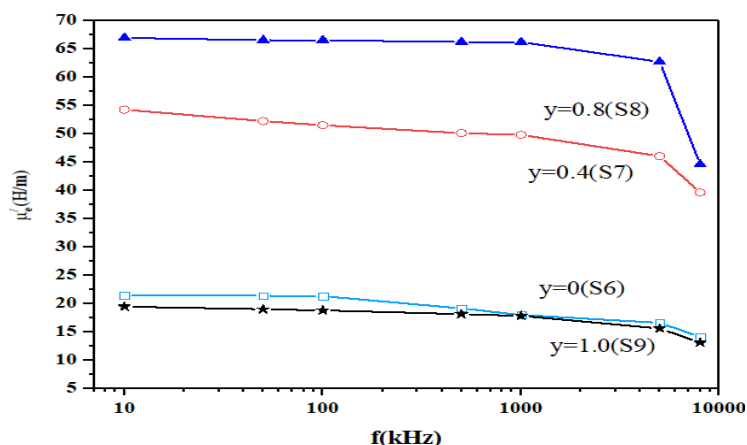
نمونه	چگالی (g/cm^3)	نمونه	چگالی (g/cm^3)
$S1 = \text{Ni Fe}_2\text{O}_4$	۳/۶۹	$S10 = \text{Ni}_{0.3}(\text{Zn})_{0.7} \text{Fe}_2\text{O}_4$	۴/۵۱
$S2 = \text{Ni}_{0.7}(\text{Zn})_{0.3} \text{Fe}_2\text{O}_4$	۴/۶۶	$S11 = \text{Ni}_{0.3}(\text{Zn}_{0.6}\text{Mg}_{0.2}\text{Cu}_{0.2})_{0.7} \text{Fe}_2\text{O}_4$	۴/۴۲
$S3 = \text{Ni}_{0.7}(\text{Zn}_{0.6}\text{Mg}_{0.2}\text{Cu}_{0.2})_{0.3} \text{Fe}_2\text{O}_4$	۳/۹۵	$S12 = \text{Ni}_{0.3}(\text{Zn}_{0.2}\text{Mg}_{0.4}\text{Cu}_{0.4})_{0.7} \text{Fe}_2\text{O}_4$	۴/۲۷
$S4 = \text{Ni}_{0.7}(\text{Zn}_{0.2}\text{Mg}_{0.4}\text{Cu}_{0.4})_{0.3} \text{Fe}_2\text{O}_4$	۴/۲۹	$S13 = \text{Ni}_{0.3}(\text{Mg}_{0.5}\text{Cu}_{0.5})_{0.7} \text{Fe}_2\text{O}_4$	۳/۹۹
$S5 = \text{Ni}_{0.7}(\text{Mg}_{0.5}\text{Cu}_{0.5})_{0.3} \text{Fe}_2\text{O}_4$	۴/۲۵	$S14 = (\text{Zn}_{0.2}\text{Mg}_{0.4}\text{Cu}_{0.4}) \text{Fe}_2\text{O}_4$	۳/۹۸
$S6 = \text{Ni}_{0.5}(\text{Zn})_{0.5} \text{Fe}_2\text{O}_4$	۳/۹۷	$S15 = (\text{Zn}_{0.6}\text{Mg}_{0.2}\text{Cu}_{0.2}) \text{Fe}_2\text{O}_4$	۳/۲۱
$S7 = \text{Ni}_{0.5}(\text{Zn}_{0.6}\text{Mg}_{0.2}\text{Cu}_{0.2})_{0.5} \text{Fe}_2\text{O}_4$	۴/۸۱	$S16 = \text{Zn Fe}_2\text{O}_4$	۳/۵۹
$S8 = \text{Ni}_{0.5}(\text{Zn}_{0.2}\text{Mg}_{0.4}\text{Cu}_{0.4})_{0.5} \text{Fe}_2\text{O}_4$	۴/۹۳	$S17 = (\text{Mg}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}) \text{Fe}_2\text{O}_4$	۴/۵۹
$S9 = \text{Ni}_{0.5}(\text{Mg}_{0.5}\text{Cu}_{0.5})_{0.5} \text{Fe}_2\text{O}_4$		۳/۹۵	

با توجه جدول ۴-۲۷ چگالی برای نمونه‌های جانشانی شده به شرح ذیل می‌باشد:

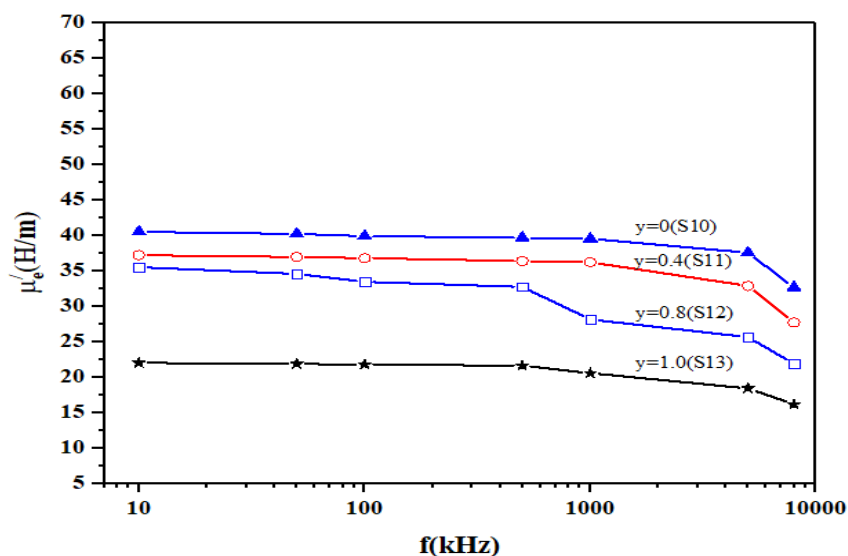
$$\rho_{S_2} > \rho_{S_4} > \rho_{S_5} > \rho_{S_3}$$

همان‌گونه که از این جدول دیده می‌شود با کاهش چگالی نمونه‌ها، میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد و در نتیجه تراوایی مغناطیسی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

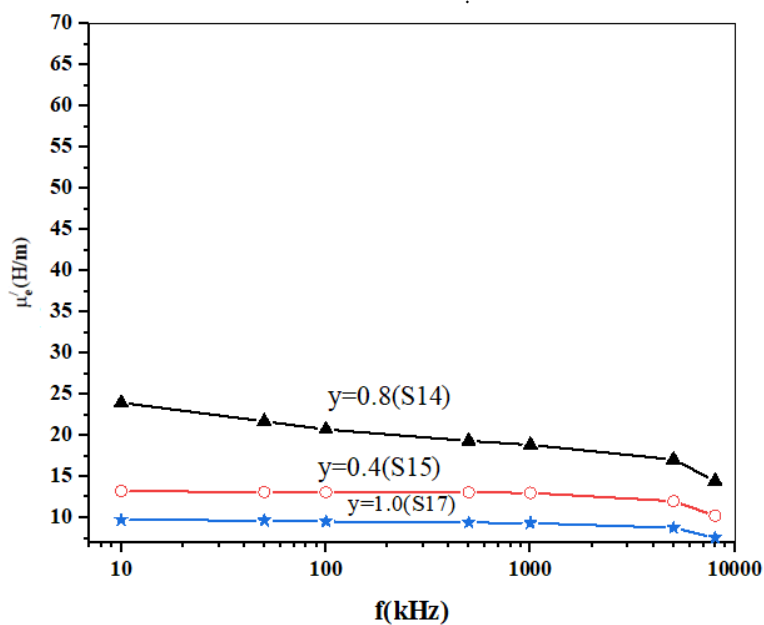
در شکل‌های ۴-۵۰ تا ۴-۵۲ تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس برای نمونه‌های ۱ و ۰/۷ و ۰/۵ و مقدارهای y برابر با ۱ و ۰/۸ و ۰/۴ و آورده شده است.



شکل ۴-۵۰- نمودار نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس‌های مختلف برای نمونه‌های $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ جانشانی شده با غلظت $x=0/5$.



شکل ۴-۵- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس‌های مختلف برای نمونه‌های $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}$ جانشانی شده با غلظت $x=0.7$



شکل ۴-۵- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس‌های مختلف برای نمونه‌های $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}$ جانشانی شده با غلظت $x=1$

همان‌گونه از این شکل‌های بالا مشاهده می‌شود برای نمونه‌ها، تراوایی مغناطیسی با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. همچنین مقدار تراوایی برای نمونه‌های جانشانی گوناگون متفاوت است. همچنین در جدول ۴-۲۸ مقادیر تراوایی نمونه‌های تهیه شده بیان شده است.

جدول ۴-۲۸- مقادیر مختلف تراوایی مغناطیسی در فرکانس های مختلف

نمونه	مقادیر تراوایی مغناطیسی در فرکانس مختلف						
	۱۰ KHz	۵۰ KHz	۱۰۰ KHz	۵۰۰ KHz	۱۰۰۰ KHz	۵۰۰۰ KHz	۸۰۰۰ KHz
S1= Ni Fe ₂ O ₄	۱۲/۱۰	۱۲/۰۹	۱۲/۰۳	۱۱/۷۸	۱۱/۷۰	۱۰/۸۹	۹/۵۹
S2= Ni _{0.7} (Zn) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۴۱/۸۵	۴۱/۶۱	۴۱/۴۴	۴۰/۹۶	۴۰/۷۲	۳۷/۸۴	۳۲/۶۰
S3=Ni _{0.7} (Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۲۴/۳۰	۲۳/۵۹	۲۱/۲۱	۱۹/۲۹	۱۸/۳۹	۱۷/۳۱	۱۴/۹۶
S4=Ni _{0.7} (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۳۷/۱۰	۳۶/۰۶	۳۵/۳۵	۳۲/۸۳	۳۲/۱۰	۲۹/۰۱	۲۴/۷۸
S5= Ni _{0.7} (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۳۱/۱۰	۳۱/۰۶	۳۰/۳۵	۳۰/۸۳	۲۷/۱۰	۲۴/۰۱	۲۱/۷۹
S6= Ni _{0.5} (Zn) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۲۱/۵۰	۲۱/۴۲	۲۱/۳۴	۱۹/۱۷	۱۸/۰۲	۱۶/۶۴	۱۴/۱۱
S7=Ni _{0.5} (Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۵۴/۲۹	۵۲/۲۶	۵۱/۵۳	۵۰/۱۴	۴۹/۸۲	۴۶/۰۸	۳۹/۶۶
S8=Ni _{0.5} (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۶۶/۹۷	۶۶/۵۶	۶۶/۵۴	۶۶/۲۳	۶۶/۲۱	۶۲/۷۴	۴۴/۶۱
S9=Ni _{0.5} (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۱۹/۵۰	۱۹/۰۲	۱۸/۸۴	۱۸/۱۷	۱۷/۸۵	۱۵/۶۴	۱۳/۱۱
S10= Ni _{0.3} (Zn) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۳۸/۲۸	۳۷/۹۵	۳۷/۶۲	۳۷/۳۸	۳۷/۲۲	۳۵/۱۰	۲۹/۸۲
S11=Ni _{0.3} (Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۳۷/۲۶	۳۶/۹۹	۳۶/۸۳	۴۲۸۳۶	۳۶/۲۶	۳۲/۹۰	۲۷/۷۶
S12=Ni _{0.3} (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۳۵/۵۴	۳۴/۶۱	۳۳/۴۸	۳۲/۷۷	۲۸/۲۰	۲۵/۶۸	۲۱/۹۴
S13=Ni _{0.3} (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۱۸/۳۷	۱۸/۲۰	۱۸/۱۲	۱۷/۹	۱۶/۸۰	۱۴/۵۰	۱۲/۰۶
S14=(Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) Fe ₂ O ₄	۲۳/۹۴	۲۱/۷۰	۲۰/۷۲	۱۹/۳۴	۱۸/۸۵	۱۷/۰۶	۱۴/۴۷

S15=(Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) Fe ₂ O ₄	۱۳/۲۵	۱۳/۱۲	۱۳/۱۰	۱۳/۰۸	۱۳/۰۱	۱۲/۰۲	۱۲/۲۴
S16= Zn Fe ₂ O ₄	-	-	-	-	-	-	-
S17= (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) Fe ₂ O ₄	۹/۷۵	۹/۶۷	۹/۵۴	۹/۴۲	۹/۳۴	۸/۷۰	۸/۵۵

همان گونه که از جدول مشاهده می شود فریت نیکل - روی به ازای $x=0.5$ و $y=0.8$ بیشترین مقدار تراوایی مغناطیسی را از بقیه ترکیبات نشان می دهد. همچنین در فرکانس های بالاتر مقدار تراوایی مغناطیسی کاهش کمتری را دارد که این نشان دهنده پایداری فریت در فرکانس کاری بالا می باشد.

ب- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول

استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$

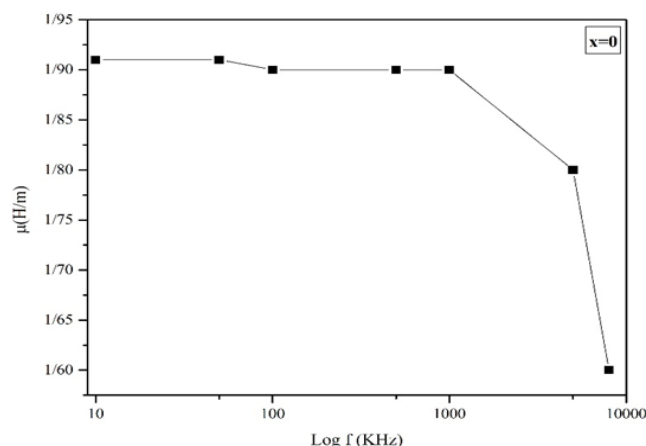
یکی از مهم ترین پارامترها در هسته های ترانسفورماتور، تراوایی مغناطیسی یا همان نفوذپذیری می باشد. برای بررسی تراوایی نمونه ها، به کمک دستگاه LCR متر مقدار اندوکتانس در فرکانس های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوهرتز و ۱، ۵ و ۸ مگاهرتز اندازه گیری شده و طبق رابطه ۶ مقدار تراوایی در هر فرکانس برای هر نمونه محاسبه شده است. مقدار تراوایی در فرکانس های مختلف و چگالی هر نمونه در جدول ۴-۲۹ آورده شده است.

جدول ۴-۲۹- مقدار تراوایی در فرکانس های مختلف و چگالی نانوذرات فریت $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با جانشانی های

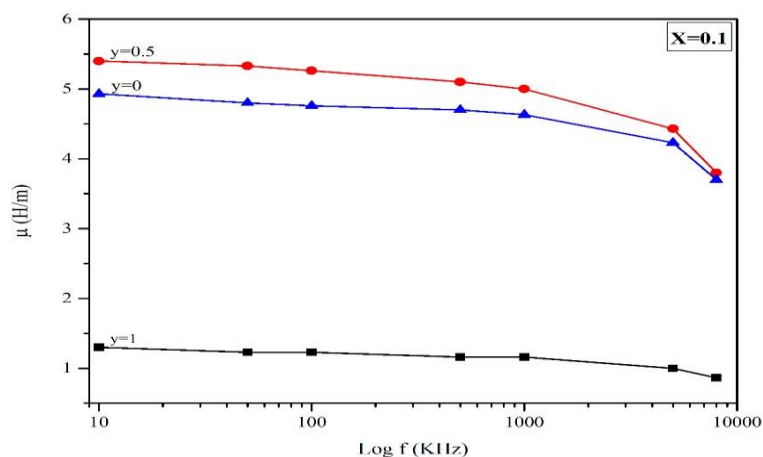
گوناگون کاتیون های نیکل و کبالت

کد نمونه	تراوایی							$\rho \left(\frac{gr}{cm^3} \right)$
	KHz ۱۰	KHz ۵۰	KHz ۱۰۰	KHz ۵۰۰	MHz ۱	MHz ۵	MHz ۸	
A ₁	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۸۰	۰/۶۶	۳/۶۱
A ₂	۱/۳۰	۱/۲۳	۱/۲۳	۱/۱۶	۱/۱۶	۱/۰۰	۰/۸۶	۴/۵۹
A ₃	۵/۴	۵/۳۳	۵/۲۶	۵/۱۰	۵/۰۰	۴/۴۳	۳/۸۰	۴/۶۸
A ₄	۴/۹۳	۴/۸۰	۴/۷۶	۴/۷۰	۴/۶۳	۴/۲۳	۳/۷۰	۴/۵۶
A ₅	۱۰/۲۰	۱۰/۱۳	۱۰/۰۶	۹/۹۶	۹/۹	۹/۱۶	۸/۰۳	۴/۵۳
A ₆	۵/۸۳	۵/۷۶	۵/۷۰	۵/۶۰	۵/۶۳	۵/۲۰	۴/۵۶	۴/۴۰
A ₇	۵/۴۶	۵/۴۰	۵/۳۶	۵/۳۰	۵/۲۶	۴/۸۶	۴/۱۶	۴/۲۸
A ₈	۶/۴۰	۶/۳۶	۶/۳۳	۶/۲۶	۶/۲۰	۵/۷۳	۵/۰۰	۴/۵۷
A ₉	۶/۹۳	۶/۹۰	۶/۸۶	۶/۸۳	۶/۸۰	۶/۳۰	۵/۵۳	۴/۶۲
A ₁₀	۵/۶۳	۵/۹۰	۵/۵۶	۵/۵۶	۵/۵۳	۵/۱۰	۳/۵۶	۴/۵۸

در شکل ۴-۵۳ تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس را برای نمونه $x=0$ نشان داده شده است.

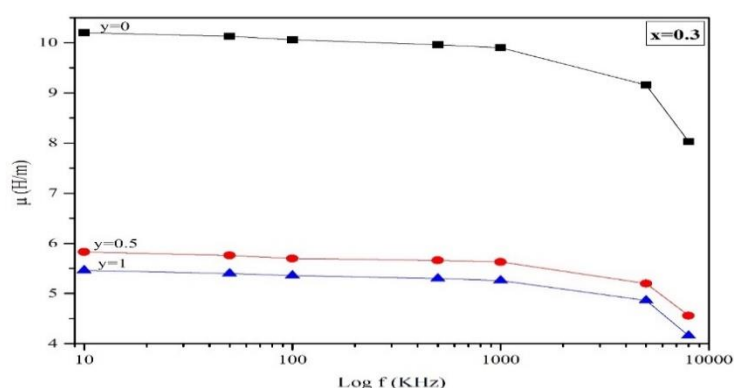


شکل ۴-۵۳- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0$ همان گونه که مشاهده می شود با افزایش فرکانس، تراوایی کاهش یافته است. طبق رابطه اسنوک، فرکانس و تراوایی رابطه عکس دارند؛ لذا کاهش تراوایی با افزایش فرکانس رفتاری مجاز خواهد بود [۲ و ۲۶]. در فرکانس شدید، تراوایی بیشترین مقدار را دارد و بعد از آن چون اسپین ها از میدان اعمالی عقب می افتند به نوعی تراوایی کاهش می یابد [۱۳]. در شکل ۴-۵۴ تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای جانشانی های مختلف در نمونه های $x=0.1$ نشان داده شده است.



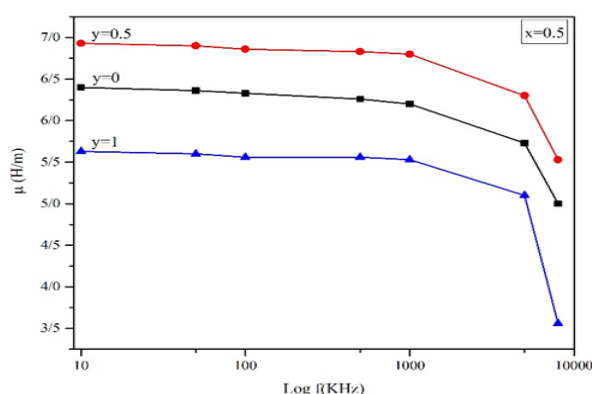
شکل ۴-۵۴- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0.1$ مطابق با شکل نمونه حاوی نیکل و کبالت به صورت همزمان دارای بیشترین تراوایی می باشد. تراوایی با مغناطش اشباع رابطه مستقیم دارد [۱۶]، بنابراین با افزایش مغناطش تراوایی نیز افزایش می یابد. رینگ های به قطر تقریبی ۴ میلی متر و ضخامت تقریبی ۳ میلی متر، در دمای ۹۰۰ درجه تفجوشی شده اند. شیب حرارتی مورد استفاده عبارت است از: مرحله اول رسیدن به دمای ۹۰۰°C به مدت ۶ ساعت، مرحله دوم پایداری و ماندن در آن دما به مدت ۲ ساعت و مرحله سوم سرد شدن و رسیدن به دمای اتاق به صورت آزاد به مدت ۱۴ ساعت. با توجه به اینکه رینگ ها در دمای ۹۰۰ درجه تفجوشی شده اند، باید برای بررسی رابطه بین مغناطش اشباع و تراوایی نمونه ها، نانوذرات تهیه شده را هم در دمای ۹۰۰

درجه تفجوشی کرد و سپس منحنی پسماند آن‌ها را بررسی کرد. این نمونه همانند سه نمونه ای که در دمای ۹۰۰ درجه سینتر شدند، پس از سینتر شدن دارای بیشترین مقدار مغناطش اشباع خواهد بود. عامل دیگر تاثیرگذار روی تراوایی چگالی حلقه ها می باشد. نمونه با بیشترین مقدار چگالی دارای بیشترین مقدار تراوایی خواهد بود. چگالی‌های بیان شده در جدول ۴-۲۹ تاییدی بر این موضوع است. در شکل ۴-۵۵ تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای جانشانی های مختلف در نمونه های $x=0.3$ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵۵- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0.3$ مطابق با شکل، نمونه $y=0$ دارای بیشترین مقدار تراوایی می باشند. علت این امر را می توان به مقدار مغناطش نمونه ها نسبت داد. مغناطش نمونه ها در $y=0$ دارای بیشترین مقدار است؛ بنابراین طبق رابطه‌های ۳ تا ۵، دارای بیشترین تراوایی خواهد بود [۱۳].

در شکل ۴-۵۶ تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای جانشانی های مختلف در نمونه های $x=0.5$ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵۶- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0.5$ مطابق با شکل، نمونه $y=0.5$ دارای بیشترین مقدار تراوایی می باشد در حالی که بیشترین مغناطش اشباع را دارد. علت این امر همانند علت بیان شده برای نمونه های قبلی می باشد. برای بررسی بیشتر، رینگ نمونه A5 را مجدد در دمای ۱۳۵۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد. پس از اندازه گیری اندوکتانس آن با LCR متر در فرکانس ۵۰ KHz، مقدار تراوایی H/m ۹۱/۳۳ به دست آمد. این مقدار در مقایسه با مقدار تراوایی که برای نمونه A5 در دمای ۹۰۰ درجه

به دست آمده است، افزایش یافته است. این افزایش می تواند به دلیل رشد بیشتر ذرات در دمای بالاتر و به تبع آن افزایش مغناطش نمونه باشد.

۴-۵-۲-۱- مقایسه نتایج حاصل از بررسی آزمون LCR متر نمونه های فریتی تهیه شده

بدون عملیات حرارتی

یکی از مهم ترین پارامترها در هسته های ترانسفورماتور، تراوایی مغناطیسی یا همان نفوذپذیری مغناطیسی است. برای بررسی تراوایی مغناطیسی نمونه های $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ و $\text{Mn}_{0.5-x}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{1-y}\text{Co}_y]_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ به کمک دستگاه LCR متر مقدار اندوکتانس در فرکانس های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوهرتز و ۱، ۵ و ۸ مگاهرتز اندازه گیری و طبق رابطه ۶ مقدار تراوایی در هر فرکانس برای هر نمونه محاسبه شد. مقدار تراوایی مغناطیسی نمونه ها در فرکانس های مختلف در جدول ۴-۳۰ آورده شده است.

جدول ۴-۳۰- مقدار تراوایی مغناطیسی در فرکانس های مختلف نانوذرات با جانشانی های گوناگون تهیه شده به روش هم رسوبی و خود احتراقی

کد نمونه	تراوایی مغناطیسی						
	KHz ۱۰	KHz ۵۰	KHz ۱۰۰	KHz ۵۰۰	MHz ۱	MHz ۵	MHz ۸
A ₁	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۸۰	۰/۶۶
A ₂	۱/۳۰	۱/۲۳	۱/۲۳	۱/۱۶	۱/۱۶	۱/۰۰	۰/۸۶
A ₃	۵/۴	۵/۳۳	۵/۲۶	۵/۱۰	۵/۰۰	۴/۴۳	۳/۸۰
A ₄	۴/۹۳	۴/۸۰	۴/۷۶	۴/۷۰	۴/۶۳	۴/۲۳	۳/۷۰
A ₅	۱۰/۲۰	۱۰/۱۳	۱۰/۰۶	۹/۹۶	۹/۹	۹/۱۶	۸/۰۳
A ₆	۵/۸۳	۵/۷۶	۵/۷۰	۵/۶۰	۵/۶۳	۵/۲۰	۴/۵۶
A ₇	۵/۴۶	۵/۴۰	۵/۳۶	۵/۳۰	۵/۲۶	۴/۸۶	۴/۱۶
A ₈	۶/۴۰	۶/۳۶	۶/۳۳	۶/۲۶	۶/۲۰	۵/۷۳	۵/۰۰
A ₉	۶/۹۳	۶/۹۰	۶/۸۶	۶/۸۳	۶/۸۰	۶/۳۰	۵/۵۳
A ₁₀	۵/۶۳	۵/۹۰	۵/۵۶	۵/۵۶	۵/۵۳	۵/۱۰	۳/۵۶
S ₁	۱۲/۱۰	۱۲/۰۹	۱۲/۰۳	۱۱/۷۸	۱۱/۷۰	۱۰/۸۹	۹/۵۹
S ₂	۴۱/۸۵	۴۱/۶۱	۴۱/۴۴	۴۰/۹۶	۴۰/۷۲	۳۷/۸۴	۳۲/۶۰
S ₃	۲۴/۳۰	۲۳/۵۹	۲۱/۲۱	۱۹/۲۹	۱۸/۳۹	۱۷/۳۱	۱۴/۹۶
S ₄	۳۷/۱۰	۳۶/۰۶	۳۵/۳۵	۳۲/۸۳	۳۲/۱۰	۲۹/۰۱	۲۴/۷۸
S ₅	۳۱/۱۰	۳۱/۰۶	۳۰/۳۵	۳۰/۸۳	۲۷/۱۰	۲۴/۰۱	۲۱/۷۹
S ₆	۲۱/۵۰	۲۱/۴۲	۲۱/۳۴	۱۹/۱۷	۱۸/۰۲	۱۶/۶۴	۱۴/۱۱
S ₇	۵۴/۲۹	۵۲/۲۶	۵۱/۵۳	۵۰/۱۴	۴۹/۸۲	۴۶/۰۸	۳۹/۶۶
S ₈	۶۶/۹۷	۶۶/۵۶	۶۶/۵۴	۶۶/۲۳	۶۶/۲۱	۶۲/۷۴	۴۴/۶۱

S_9	۱۹/۵۰	۱۹/۰۲	۱۸/۸۴	۱۸/۱۷	۱۷/۸۵	۱۵/۶۴	۱۳/۱۱
S_{10}	۳۸/۲۸	۳۷/۹۵	۳۷/۶۲	۳۷/۳۸	۳۷/۲۲	۳۵/۱۰	۲۹/۸۲
S_{11}	۳۷/۲۶	۳۶/۹۹	۳۶/۸۳	۴۲۸۳۶	۳۶/۲۶	۳۲/۹۰	۲۷/۷۶
S_{12}	۳۵/۵۴	۳۴/۶۱	۳۳/۴۸	۳۲/۷۷	۲۸/۲۰	۲۵/۶۸	۲۱/۹۴
S_{13}	۱۸/۳۷	۱۸/۲۰	۱۸/۱۲	۱۷/۹	۱۶/۸۰	۱۴/۵۰	۱۲/۰۶
S_{14}	۲۳/۹۴	۲۱/۷۰	۲۰/۷۲	۱۹/۳۴	۱۸/۸۵	۱۷/۰۶	۱۴/۴۷
S_{15}	۱۳/۲۵	۱۳/۱۲	۱۳/۱۰	۱۳/۰۸	۱۳/۰۱	۱۲/۰۲	۱۲/۲۴
S_{17}	۹/۷۵	۹/۶۷	۹/۵۴	۹/۴۲	۹/۳۴	۸/۷۰	۸/۵۵

همانگونه که در جدول ۴-۳۰ دیده می شود تراوایی مغناطیسی نانوذرات $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ در دمای اتاق بیشتر از نانوذرات $\text{Mn}_{0.5-x}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{1-y}\text{Co}_y]_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ است.

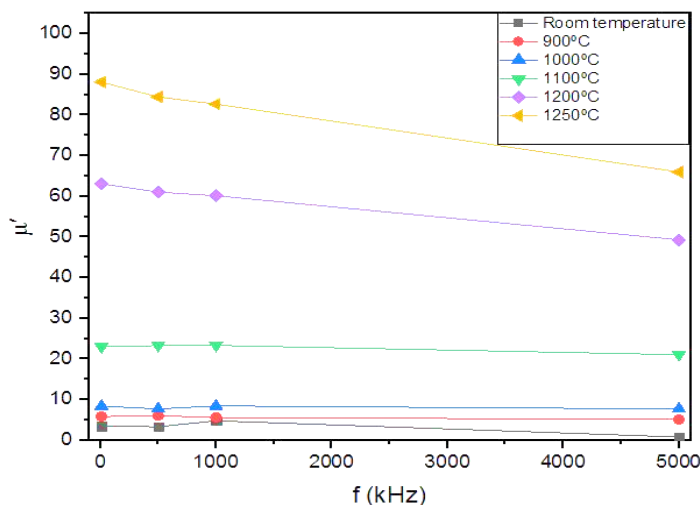
۴-۲-۵-۲- ویژگی های مغناطیسی مربوط به آزمون LCR متر نمونه تحت عملیات حرارتی قرار داده شده

تراوایی مغناطیسی یکی از مهم ترین عوامل برای توصیف ویژگی های مواد مغناطیسی است که در هسته های ترانسفورماتور به ویژه ترانسفورماتورهای فرکانس بالا کاربرد دارد. برای اندازه گیری تراوایی مغناطیسی هسته های تفجوشی شده در دماهای مختلف در محدوده فرکانسی ۱۰ کیلوهرتز تا ۵ مگاهرتز، ابتدا القاییدگی برای هسته های حلقوی با استفاده از دستگاه LCR متر اندازه گیری و سپس تراوایی مغناطیسی نمونه ها محاسبه شده است. داده های به دست آمده در جدول ۴-۳۱ آورده شده است.

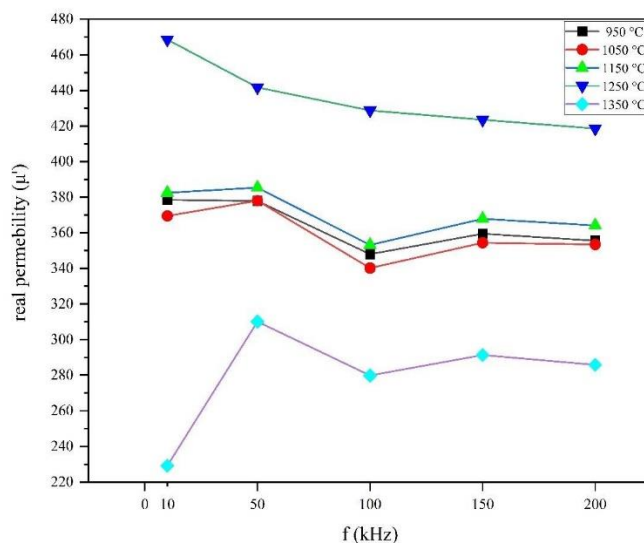
جدول ۴-۳۱- تراوایی مغناطیسی نمونه های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده در دماهای مختلف در بازه های فرکانسی مشخص شده.

فرکانس (kHz) \ دما (°C)	۱۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰۰
۲۵	۳/۳۷	۳/۳۱	۴/۷۷	۰/۷۷
۹۰۰	۵/۱	۲/۰۵	۵/۶	۵/۰۹
۱۰۰۰	۸/۳۵	۷/۶۹	۸/۴۰	۷/۶۷
۱۱۰۰	۲۲/۹۹	۲۳/۲۶	۲۳/۳۱	۲۱/۰۳
۱۲۰۰	۶۳/۰۸	۶۱/۰۲	۶۰/۱۳	۴۹/۳۰
۱۲۵۰	۸۸/۱۴	۸۴/۴۴	۸۲/۶۷	۶۵/۹۵

بر اساس داده های موجود در جدول بالا نمودار تغییرات تراوایی در فرکانس های مختلف در شکل ۴-۵۷ رسم شده است.



شکل ۴-۵۷- تراوایی مغناطیسی برای نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تهیه شده در دماهای مختلف برحسب فرکانس. همان‌گونه که در شکل ۴-۵۷ مشاهده می‌شود با افزایش دما تا 1250°C تراوایی افزایش می‌یابد اما از آنجا که عیوب ساختاری، سرعت فرآیندهایی مانند رشد را کنترل می‌کنند، تغییرات تراوایی در دماهای مختلف پخت متفاوت می‌شود. خواص مغناطیسی و از جمله تراوایی مغناطیسی به شدت تابع چگالی، اندازه دانه و یکنواختی توزیع اندازه دانه می‌باشد. به‌طوری‌که با درشت شدن اندازه ذرات و چگالی بیشتر، تراوایی افزایش می‌یابد. گرمادهی فریت در کمتر از دمای نقطه ذوب آن، سبب می‌شود که ذرات به یکدیگر جوش خورده و فضای خالی بین ذرات کاهش یابد و در نتیجه اندازه ذرات درشت شود [۳۰]. درشت شدن اندازه ذرات موجب بهبود تراوایی مغناطیسی می‌گردد. علاوه بر این تراوایی مغناطیسی حقیقی نمونه‌ای که به صورت تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای تحت عملیات حرارتی قرار گرفته است در دماهای متفاوت با استفاده از رابطه ۶ در فرکانس‌های مختلف محاسبه شد که نتایج آن در شکل ۴-۵۸ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵۸- نمودار تراوایی مغناطیسی حقیقی μ' نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده در دماهای گوناگون برحسب فرکانس های مختلف.

همان گونه که در شکل ۴-۵۸ مشاهده می شود تغییرات تراوایی مغناطیسی حقیقی برحسب فرکانس در دماهای تفجوشی متفاوت، گوناگون است. نمونه تفجوشی شده در دمای 1350°C در تمامی فرکانس ها دارای کمترین مقدار تراوایی است که علت آن را می توان با استفاده از رابطه تراوایی مغناطیسی با چگالی توجیه نمود. از آنجا که روند تفجوشی در دمای 1350°C به صورت تک مرحله ای بوده، دانه ها رشد ناگهانی داشته که باعث می شود موانع برای حرکت دیواره های حوزه های مغناطیسی افزایش یافته و در نتیجه تراوایی مغناطیسی کاهش می یابد. در تفجوشی دومرحله ای به دلیل کنترل رشد دانه ها، موانع حرکت دیواره ها کاهش می یابد، از اینرو میزان تراوایی مغناطیسی در نمونه های تفجوشی شده دومرحله ای به مقدار قابل توجهی نسبت به نمونه تفجوشی تک مرحله ای بیشتر است. با در نظر گرفتن ساز و کار تراوایی مغناطیسی در ساختارهای چند حوزه ای، می توان چگونگی تاثیر پارامترهایی از جمله اندازه دانه، مغناطش و ناهمسانگردی بر تراوایی مغناطیسی را بررسی کرد. تراوایی برای ساختارهای چند حوزه حاصل دو سازوکار مغناطیسی، یعنی چرخش اسپینی و حرکت دیواره حوزه ها است که با رابطه ۶ نشان داده می شود [۲۱ و ۲۹]. دمای 950°C با اختلاف بسیار کمی نسبت به دمای 1050°C ، دارای تراوایی بیشتری است. با توجه به نزدیک بودن چگالی و متوسط اندازه دانه نمونه ها در این دو دما، می توان این اختلاف جزئی در تراوایی را به اختلاف مغناطش آن ها نسبت داد. دمای 1150°C با داشتن چگالی بالاتر، نسبت به دو دمای پیشین خود، دارای تراوایی بیشتری است. دمای 1250°C دارای بیشترین تراوایی در تمامی فرکانس ها است که داشتن همزمان چند پارامتر بهبود دهنده تراوایی یعنی چگالی زیاد، اندازه دانه بزرگتر و ناهمسانگردی کمتر در اثر تفجوشی در دمای بالاتر را می توان دلیل آن دانست. در جدول ۴-۳۲ تراوایی مغناطیسی حقیقی نمونه های تفجوشی شده برحسب دماهای متفاوت در فرکانس های مختلف آورده شده است.

جدول ۴-۳۲- قسمت حقیقی تراوایی مغناطیسی نمونه های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده به صورت تک مرحله ای و دو مرحله ای در فرکانس های مختلف

نوع عملیات تفجوشی	دما ($^{\circ}\text{C}$)	10kHz	50kHz	100kHz	150kHz	200kHz
دومرحله ای	۹۵۰	۳۷۸/۵۸	۳۷۷/۹	۳۴۸/۰۲	۳۵۹/۵۱	۳۵۵/۵۹
دومرحله ای	۱۰۵۰	۳۶۹/۵۲	۳۷۸/۰۴	۳۴۰/۱۸	۳۵۴/۳۸	۳۵۳/۴۳
دومرحله ای	۱۱۵۰	۳۸۲/۵	۳۸۵/۳۷	۳۵۳/۱۶	۳۶۷/۹	۳۶۴/۱۱
دومرحله ای	۱۲۵۰	۴۶۸/۵	۴۴۱/۷	۴۲۸/۷	۴۲۳/۵	۴۱۸/۶
تک مرحله ای	۱۳۵۰	۲۲۹/۲۱	۳۱۰/۱۶	۲۷۹/۸۸	۲۹۱/۳۷	۲۸۵/۸۳

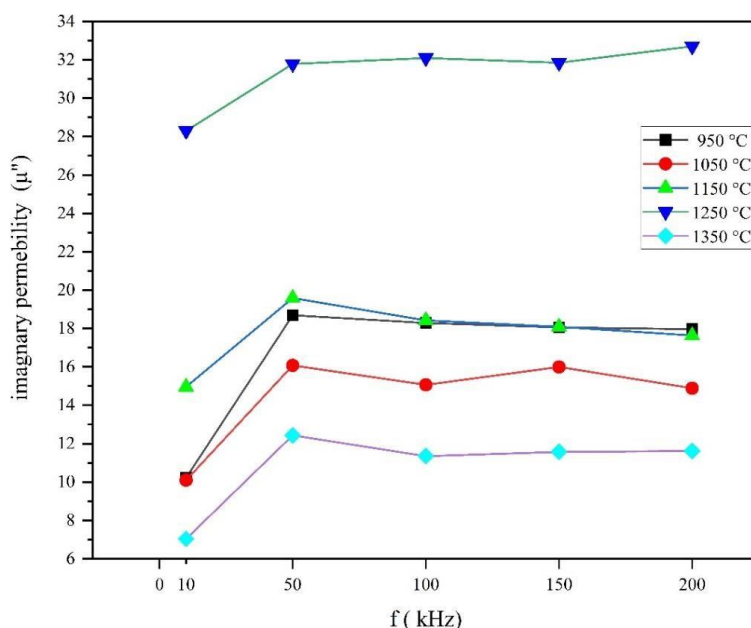
۴-۵-۳- تجزیه و تحلیل اتلاف در نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تحت عملیات حرارتی قرار گرفته

به منظور تعیین اتلاف صرفا از نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تهیه شده به روش هم رسوبی اتلاف محاسبه شد. این نمونه در دماهای 950°C ، 1050°C ، 1150°C و 1250°C به صورت تک مرحله ای و دومرحله ای تحت عملیات حرارتی قرار داده شد و در نهایت اتلاف آن ها اندازه گیری و بررسی شد که در ذیل به نتایج آن اشاره می شود.

بخش موهومی تراوایی مغناطیسی نشان دهنده اتلاف انرژی مغناطیسی در ماده است که این بخش از تراوایی مغناطیسی با استفاده از زیر و در فرکانس‌های متفاوت محاسبه شد [۲۸] که نتایج در شکل ۵۹ ارائه شده است.

$$\mu'_e = \frac{l(R_{eff} - R_w)}{\mu_0 N^2 \omega A} \quad (9)$$

در این رابطه R_{eff} مقاومت الکتریکی سیم پیچ تورویدی، R_w مقاومت الکتریکی سیم پیچ با هسته هوا و ω فرکانس، N تعداد دور سیم پیچ، l طول میانگین مسیر مغناطیسی یک هسته تورویدی بر حسب متر، A مساحت سطح مقطع هسته تورویدی بر حسب m^2 و μ_0 نفوذپذیری فضای آزاد ($4\pi \times 10^{-7} H/M$) می‌باشد.



شکل ۴-۵۹- نمودار تراوایی مغناطیسی موهومی نمونه های تفجوشی شده برحسب فرکانس های مختلف.

همان‌گونه که از شکل ۴-۵۹ دیده می‌شود، تراوایی مغناطیسی موهومی برحسب فرکانس، در تمامی دماها با افزایش فرکانس با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. دمای $1250^\circ C$ در تمامی فرکانس‌ها دارای بیشترین مقدار μ'' و دمای $1350^\circ C$ در تمامی فرکانس‌ها دارای کمترین مقدار μ'' می‌باشد که با استفاده از رابطه تراوایی مغناطیسی با سایر پارامترها از جمله اندازه دانه و مغناطش می‌توان آن را توجیه نمود. رابطه زیر ارتباط μ'' با سایر کمیت‌ها را نشان می‌دهد:

$$\mu'' = \frac{\chi_w \omega \beta \omega_d^2}{(\omega_d^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \beta^2} \quad (10)$$

که χ_w پذیرفتاری مغناطیسی استاتیک حرکت دیواره‌ها، ω_d فرکانس تشدید دیواره، β ثابت میرایی حرکت دیواره و ω فرکانس است [۱۷]. با توجه به این رابطه، تراوایی مغناطیسی موهومی تنها به پذیرفتاری مغناطیسی ناشی از حرکت دیواره‌ها وابسته است. با توجه به رابطه ۵ بخش موهومی تراوایی مغناطیسی همانند بخش حقیقی آن، با اندازه دانه و مغناطش اشباع رابطه مستقیم دارد. در دمای $1250^\circ C$ همراه شدن دو فاکتور مؤثر در افزایش μ'' یعنی بزرگی اندازه دانه‌ها و زیاد بودن مغناطش موجب افزایش μ'' نسبت به دیگر دماها شده است. از آنجا که روند تفجوشی در دمای $1350^\circ C$ به صورت تک مرحله‌ای بوده، دانه‌ها رشد ناگهانی داشته که باعث می‌شود موانع برای حرکت دیواره‌های حوزه‌های مغناطیسی افزایش یافته و در نتیجه اتلاف و μ'' افزایش می‌یابد. بین سه دمای $950^\circ C$ ، $1050^\circ C$ و $1150^\circ C$ درجه

سانتی گراد پایین ترین مغناطش متعلق به دمای 1050°C است که موجب کاهش μ'' در این دما شده است. در دمای 950°C اثر غالب در تعیین μ'' ، اندازه دانه است و به همین علت μ'' در این دما نسبت به دمای 1150°C که دارای متوسط اندازه دانه بیشتری است، کمتر است. در جدول ۴-۳۳ تراوایی مغناطیسی موهومی نمونه های تفجوشی شده برحسب دماهای متفاوت در فرکانس های مختلف آورده شده است.

جدول ۴-۳۳- قسمت موهومی تراوایی مغناطیسی نمونه های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده به صورت تک مرحله ای و دو مرحله ای در فرکانس های مختلف

نوع عملیات تفجوشی	دما ($^{\circ}\text{C}$)	10kHz	50kHz	100kHz	150kHz	200kHz
دو مرحله ای	۹۵۰	۱۰/۲۲	۱۸/۶۹	۱۸/۲۹	۱۸/۰۶	۱۷/۹۶
دو مرحله ای	۱۰۵۰	۱۰/۱۰	۱۶/۰۸	۱۵/۰۶	۱۷/۱۶	۱۴/۸۹
دو مرحله ای	۱۱۵۰	۱۴/۹۶	۱۹/۵۹	۱۸/۴۲	۱۸/۰۹	۱۷/۶۴
دو مرحله ای	۱۲۵۰	۲۸/۳	۳۱/۷۹	۳۲/۱۰	۳۱/۸۵	۳۲/۷۱
تک مرحله ای	۱۳۵۰	۷/۰۴	۱۲/۴۳	۱۱/۳۵	۱۱/۵۷	۱۱/۶۲

۴-۵-۳-۱- اتلاف کل (P_t)

اتلاف کل نمونه های تفجوشی برای تمامی فرکانس ها از رابطه زیر به دست می آید:

$$P_t = P_h + P_{ec} + P_r = W_h f + k f^2 + P_r \quad (11)$$

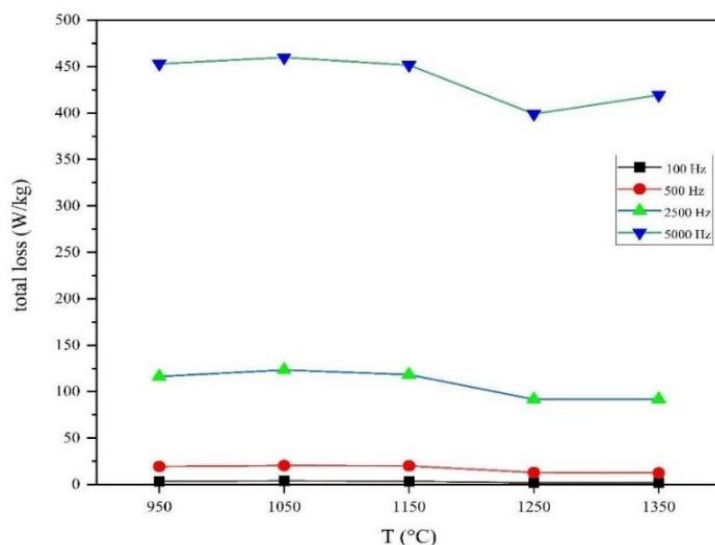
که در آن، P_t توان اتلاف کل، P_h توان اتلاف پسماند و P_{ec} توان اتلاف جریان گردابی و P_r توان اتلاف باقیمانده است که یکی آن ها W/kg می باشد. به دلیل اینکه اتلاف باقیمانده در بازه فرکانسی مورد استفاده در این پژوهش ناچیز است، از این بخش اتلاف صرف نظر شده و بنابراین رابطه ۱۱ به صورت زیر خواهد بود:

$$P_t = P_h + P_{ec} = W_h f + k f^2 \quad (12)$$

و اتلاف انرژی کل در هر چرخه برابر خواهد بود با:

$$\frac{P_t}{f} = W_h + k f \quad (13)$$

که در آن W_h اتلاف پسماند در یک چرخه برحسب J/kg ، f فرکانس و k یک ثابت است [۳۱]. با توجه به رابطه ۱۳ اتلاف پسماند در یک چرخه، مستقل از فرکانس و اتلاف جریان گردابی با افزایش فرکانس افزایش می یابد. در شکل ۴-۶۰ اتلاف کل به دست آمده از هیستوگراف برای نمونه های تفجوشی شده در دماهای متفاوت برای فرکانس های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۴-۶- توان اتلاف کل (P_t) نمونه‌های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای برحسب فرکانس‌های مختلف.

با توجه به شکل ۴-۶، توان اتلاف کل با افزایش فرکانس، افزایش یافته است که طبق رابطه ۱۳ کاملاً توجیه‌پذیر است. روند تغییرات P_t برحسب دما یک روند کاهشی بسیار ناچیز را نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن تأثیرات عملیات حرارتی بر ریزساختار ماده قابل توجیه است. در اثر تفجوشی دانه‌ها رشد کرده و تنش‌ها، ناخالصی‌ها که در اتلاف موثر هستند، کاهش می‌یابند. در جدول ۴-۳۴ مقادارهای توان اتلاف کل (P_t) در دماهای تفجوشی متفاوت و فرکانس‌های مختلف آورده شده است.

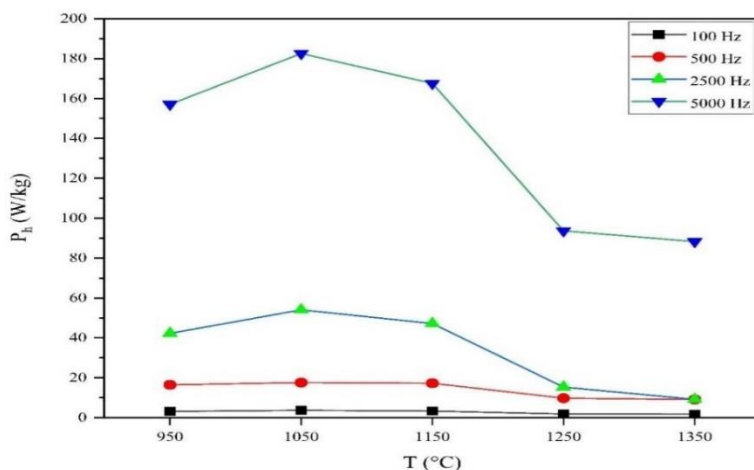
جدول ۴-۳۴- توان اتلاف کل بر حسب W/kg نمونه‌های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای در فرکانس‌های مختلف

نوع عملیات تفجوشی	دما (°C)	100 Hz	500 Hz	2500Hz	5000Hz
دو مرحله‌ای	۹۵۰	۳/۲۶	۱۹/۴۲	۱۱۶/۲۷	۴۵۳/۰۴
دو مرحله‌ای	۱۰۵۰	۳/۷۶	۲۰/۳۹	۱۲۳/۳۵	۴۵۹/۸۲
دو مرحله‌ای	۱۱۵۰	۳/۴۶	۲۰/۱۱	۱۱۸/۲۱	۴۵۱/۶۰
دو مرحله‌ای	۱۲۵۰	۱/۹۹	۱۲/۸۵	۹۱/۶۶	۳۹۸/۹۲
تک مرحله‌ای	۱۳۵۰	۱/۸۹	۱۲/۴۴	۹۱/۹۱	۴۱۹/۳۵

۴-۵-۳-۲- اتلاف پسماند (P_h)

با توجه به تحلیل‌های بخش قبل، توان اتلاف کل به دو بخش توان اتلاف پسماند و توان اتلاف جریان گردابی است که این جدایش بر این فرض استوار است که اتلاف پسماند DC یا ایستا از یک منشأ متفاوت از اتلاف جریان گردابی

AC نشأت می‌گیرد [۲۱]. در شکل ۴-۶۱ توان اتلاف پسماند برحسب دماهای تفجوشی متفاوت و در فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۴-۶۱- توان اتلاف پسماند نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده به صورت تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای برحسب فرکانس‌های مختلف

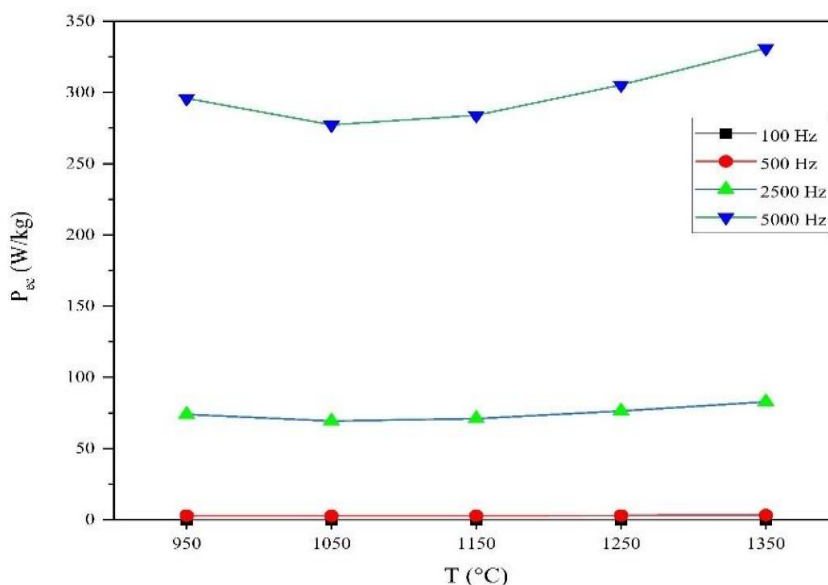
شکل ۴-۶۱ و رابطه ۱۲ وجود یک رابطه خطی بین توان اتلاف پسماند و فرکانس را نشان می‌دهد که طبق آن با افزایش فرکانس توان اتلاف پسماند نیز افزایش می‌یابد. به غیر از توان اتلاف پسماند در دمای 950°C می‌توان یک روند مشابه و به صورت کاهشی را در تغییرات P_h با افزایش دمای تفجوشی برای فرکانس‌های متفاوت مشاهده کرد. با توجه به منشأ اتلاف پسماند که حرکت برگشت‌ناپذیر دیواره‌های مغناطیسی است، می‌توان این روند کاهشی P_h برحسب دما را با بررسی تاثیرات تفجوشی تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای بر ریزساختار ماده توجیه نمود [۳۲]. اتلاف در دمای 950°C دارای کمترین مقدار است که ناشی از اثر غالب اندازه دانه بر سهولت حرکت دیواره‌ها است. در جدول ۴-۳۵ توان اتلاف پسماند برحسب دماهای تفجوشی متفاوت در فرکانس‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۴-۳۵- توان اتلاف پسماند برحسب W/kg نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده به صورت تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای در فرکانس‌های مختلف

نوع عملیات تفجوشی	دما ($^\circ\text{C}$)	100 Hz	500 Hz	2500Hz	5000Hz
دو مرحله‌ای	۹۵۰	۳/۱۴۲	۱۶/۴۷	۴۲/۲۹۵	۱۵۷/۱۲
دو مرحله‌ای	۱۰۵۰	۳/۶۵۱	۱۷/۶۲	۵۴/۰۲۳	۱۸۲/۵۶
دو مرحله‌ای	۱۱۵۰	۳/۳۵۱	۱۷/۲۷۸	۴۷/۲	۱۶۷/۵۸
دو مرحله‌ای	۱۲۵۰	۱/۸۷۲	۹/۸۰۲	۱۵/۳۴۷	۹۳/۶۳۴
تک مرحله‌ای	۱۳۵۰	۱/۷۶۵	۹/۱۳۵	۹/۱۵۴	۸۸/۳۰۴

۴-۵-۳- اتلاف جریان گردابی

همان گونه که در که قبلا اشاره شده است، اتلاف جریان گردابی P_{ec} شامل دو بخش اتلاف جریان گردابی ماکروسکوپی و اتلاف جریان گردابی میکروسکوپی است. در اتلاف جریان گردابی ماکروسکوپی با افزایش فرکانس، شعاع جریان-های گردابی کاهش می یابد، بنابراین در فرکانس های پایین که شعاع جریان های گردابی بیشتر است امکان دارد که هریک از این جریان ها چندین دانه را دربرگیرد. حال با افزایش اندازه دانه ها در طی مراحل تفجوشی تعداد مرزدانه ها کاهش یافته و از آنجا که مقاومت مرزدانه نسبت به مقاومت درون دانه ها بیشتر است، با کاهش تعداد مرزدانه ها امکان مهار جریان های گردابی ماکروسکوپی توسط مرزدانه ها کاهش می یابد [۳۲]. از طرف دیگر، با افزایش فرکانس، شعاع جریان های گردابی کاهش می یابد و این جریان ها به درون دانه ها محدود می شوند که برای مهار این جریان ها باید ماده دارای مقاومت الکتریکی بالا باشد. در نتیجه با کوچک نگه داشتن اندازه دانه ها در طی مراحل تفجوشی و انتخاب یک ماده با مقاومت الکتریکی بالا مانند فریت ها به خوبی می توان جریان های گردابی ماکروسکوپی را کاهش داد. اتلاف جریان های گردابی میکروسکوپی ناشی از جریان های گردابی به وجود آمده در حوالی دیواره های مغناطیسی هستند [۲۱ و ۳۲]. حرکت دیواره های مغناطیسی با چرخش گشتاورهای مغناطیسی تشکیل دهنده دیواره میسر می شود که تغییر جهت این گشتاورها باعث تغییراتی در B و H و در نهایت ایجاد جریان های گردابی در اطراف دیواره ها می شود. در نتیجه عواملی که مانعی در حرکت دیواره ها ایجاد می کنند از جمله مرزدانه ها، حفره ها و... در کاهش اتلاف جریان گردابی میکروسکوپی مؤثر می باشند. در شکل ۴-۶۲ توان اتلاف جریان گردابی P_{ec} برحسب دماهای تفجوشی متفاوت در فرکانس های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۴-۶۲- تغییرات توان اتلاف جریان گردابی نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تک مرحله ای و دو مرحله ای برحسب فرکانس های مختلف

همان گونه که در این شکل دیده می شود، P_{ec} با افزایش فرکانس، افزایش می یابد که این رفتار با رابطه ۱۲ که تناسب توان اتلاف جریان گردابی با مربع فرکانس را نشان می دهد، سازگار است. همچنین افزایش P_{ec} در اثر افزایش دمای تفجوشی را می توان با استفاده از رابطه اتلاف جریان گردابی و اندازه دانه توجیه نمود. در اثر افزایش متوسط اندازه دانه ها با افزایش دمای تفجوشی، اتلاف جریان گردابی میکروسکوپی افزایش می یابد. اتلاف جریان گردابی

ماکروسکوپیک به دلیل استفاده از فریت‌ها در ساخت هسته‌های مغناطیسی در این پژوهش، سهم ناچیزی از اتلاف جریان گردابی را شامل می‌شوند. در جدول ۴-۳۶ توان اتلاف جریان گردابی برای نمونه‌های تفجوشی شده در دماهای متفاوت و فرکانس مختلف آورده شده است.

جدول ۴-۳۶- توان اتلاف جریان گردابی برحسب W/kg نمونه‌های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تک‌مرحله‌ای و دو

مرحله‌ای در فرکانس‌های مختلف

نوع عملیات تفجوشی	دما (°C)	100 Hz	500 Hz	2500Hz	5000Hz
دو مرحله‌ای	۹۵۰	۰/۱۱۸	۲/۹۵۹	۷۳/۹۷۹	۲۹۵/۹۱
دو مرحله‌ای	۱۰۵۰	۰/۱۱۰	۲/۷۷۳	۶۹/۳۲۶	۲۷۷/۲۶۹
دو مرحله‌ای	۱۱۵۰	۰/۱۱۳	۲/۸۴	۷۱/۰۰۸	۲۸۴/۰۳
دو مرحله‌ای	۱۲۵۰	۰/۱۲۲	۳/۰۵۲	۷۶/۳۱۴	۳۰۵/۲۹۰
تک مرحله‌ای	۱۳۵۰	۰/۱۳۲	۳/۳۱۰	۸۲/۷۶۴	۳۳۱/۰۶

با بررسی و مقایسه داده‌های جدول‌های بالا، مشاهده می‌شود که مجموع اتلاف ناشی از حلقه‌های پسماند و جریان گردابی، به ترتیب حاصل از جدول‌های ۳۶ و ۳۷، با داده‌های جدول ۳۵ که بیانگر اتلاف کل است، سازگاری خوبی دارد.

۴-۶- تجزیه و تحلیل اثر اندازه بر روی ویژگی‌های مغناطیسی

اندازه ذرات بر اساس مدل هسته-پوسته رابطه مستقیمی با مغناطش آن دارد. طبق این مدل، هر ذره از یک هسته با نظم فری مغناطیس و یک لایه سطحی با مغناطش صفر تشکیل شده است. بنابراین با کوچکتر شدن سایز ذرات نسبت سطح به حجم افزایش یافته و اثرات سطحی در آن افزایش می‌یابد. بنابراین ضخامت لایه مرده بیشتر شده و به طبع آن مغناطش کاهش می‌یابد [۱۶]. رابطه بین اندازه ذرات و مغناطش اشباع را می‌توان از معادله ۱ محاسبه نمود [۱۷]. براساس این رابطه می‌توان گفت هرچه اندازه ذره کوچکتر می‌شود اثر لایه مرده نسبت به اثر مغناطش هسته که دارای نظم مغناطیسی است بزرگ‌تر شده، که در نتیجه مغناطش کاهش می‌یابد [۱۸]. به منظور بررسی اثر اندازه ذرات، فقط پودر نمونه‌های A_8 ، A_9 و A_{10} (ردیف ۲۵، ۲۶ و ۲۷ جدول ۳-۲) به صورت اختیاری در دمای $900^{\circ}C$ حرارت داده شدند و مجدد آزمون AGFM بر روی آن‌ها انجام شد. همان‌گونه که در شکل ۴-۳۴ مشاهده شد رفتار مغناطش نمونه‌ها تغییر یافته است. علت این تغییر را می‌توان با مدل هسته پوسته^۱ توجیه کرد. مطابق با این مدل، حضور یک هسته با نظم فری مغناطیس و یک لایه سطحی با مغناطش صفر در نانوذرات و پررنگ تر شدن اثرات سطحی در آن‌ها سبب می‌شود که با افزایش دمای تفجوشی، اندازه ذرات افزایش یافته و ضخامت لایه مرده کاهش یابد و به تبع آن مغناطش افزایش یابد [۱۶].

برای سه نمونه تفجوشی شده در دمای $900^{\circ}C$ ، با استفاده از مغناطش در حداکثر میدان اعمال شده که برای نمونه‌های با اندازه نانومتری و حالت بالک به دست آمده است مقدار تقریبی ضخامت لایه مرده محاسبه شد. ضخامت لایه مرده نمونه A_9 (مطابق اطلاعات جدول ۴-۱۸) از سایر نمونه‌ها بیشتر است، به همین دلیل در حالت نانو کمترین مغناطش را دارد. زمانی که پودر نمونه‌ها در دمای $900^{\circ}C$ تفجوشی می‌شود، اندازه این نمونه بیشتری افزایش را دارد، بنابراین

^۱. Core-Shell Model

مغناطش این نمونه دچار تغییرات بیشتری شده است و در حالت بالک مغناطش آن بیشترین مقدار است. علاوه بر این تراوایی با مغناطش اشباع رابطه مستقیم دارد. با افزایش مغناطش اشباع تراوایی هم تغییر می‌کند، بنابراین اندازه ذرات بر تراوایی هم تاثیرگذار است. همچنین تغییرات نیروی وادارندگی برحسب غلظت کاتیون های نیکل و کبالت، با افزایش مقدار y تا $0/5$ ، در نمونه‌های دارای x برابر با $0/1$ و $0/3$ نیروی وادارندگی کاهش می‌یابد و پس از آن افزایش یافته است. در نمونه‌های دارای x برابر با $0/5$ این روند برعکس است، یعنی تا مقدار y برابر با $0/5$ نیروی وادارندگی افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. نیروی وادارندگی به اندازه ذرات و عیوب بلوری بسیار وابسته است. در مناطق تک حوزه و چند حوزه، تأثیر اندازه دانه با نیروی وادارندگی از رابطه‌های ۳ و ۴ به ترتیب پیروی می‌کند. در مناطق چند حوزه با افزایش اندازه ذرات، نیروی وادارندگی کاهش می‌یابد [۳۴].

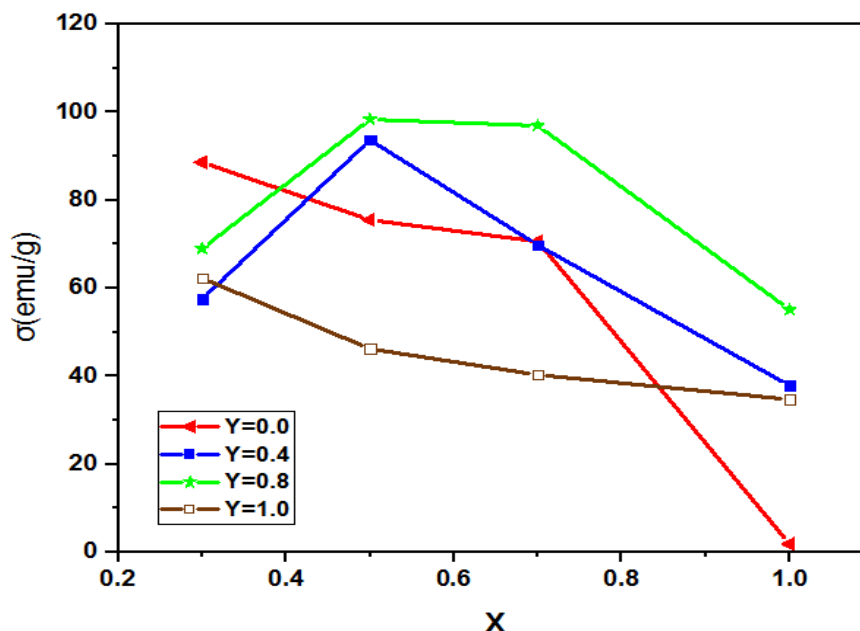
۷-۴- تجزیه و تحلیل اثر جانشانی بر روی ویژگی‌های مغناطیسی

به منظور بررسی اثر جانشانی بر روی ویژگی‌های مغناطیسی، برای نمونه‌های جدول ۱ تغییرات مغناطش و نیروی وادارندگی برحسب غلظت کاتیون‌های جانشانی شده بررسی و تحلیل شد. در ذیل به نتایج حاصل از این بررسی‌ها اشاره می‌شود.

الف- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی

با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$

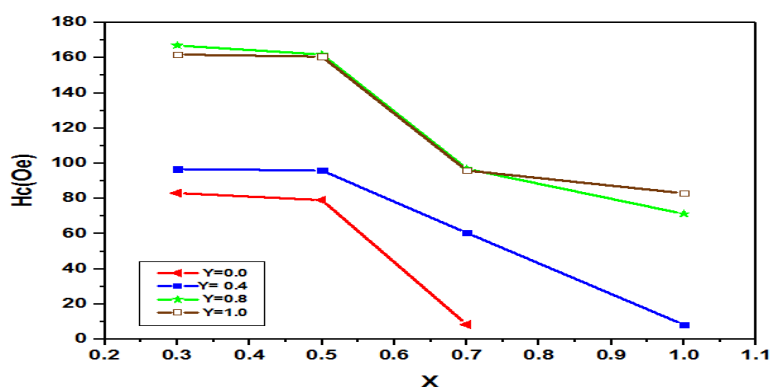
شکل ۴-۶۳ تغییرات مغناطش اشباع نمونه‌ها با غلظت‌های گوناگون برحسب میزان جانشانی کاتیون‌های مس و منیزیم را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶۳- تغییرات مغناطش نمونه‌ها برحسب میزان جانشانی کاتیون‌ها با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$. همان‌گونه از شکل بالا مشاهده می‌شود برای نمونه فریت نیکل - روی مغناطش اشباع با افزایش میزان جانشانی کاتیون‌های مس و منیزیم برای $(y=0/4$ و $y=0/8$ تا $x=0/5$ افزایش می‌یابد و با افزایش بیش‌تر مقدار جانشانی کاتیون‌ها کاهش می‌یابد. تغییرات مشاهده شده را می‌توان بر اساس برهم‌کنش ابرتبادلی بین کاتیون‌های موجود در جایگاه‌های چهاروجهی و هشت وجهی توضیح داد. کاتیون‌های Zn^{2+} جایگاه‌های چهاروجهی را اشغال می‌کنند و

کاتیون‌های Ni^{2+} تمایل شدیدی به اشغال جایگاه‌های هشت وجهی دارند [۳۳ و ۳۴]. کاتیون‌های Fe^{3+} و Cu^{2+} نیز می‌توانند در هر دو جایگاه قرار بگیرند. اگر کاتیون Mg^{2+} فقط جایگاه A را اشغال کند، مغناطش اشباع بهبود می‌یابد. علاوه بر این اگر کاتیون‌های Mg^{2+} فقط جایگاه A را اشغال کنند، باید مقدار مساوی کاتیون‌های Fe^{3+} را به جایگاه هشت وجهی انتقال داده شوند. این فرایند باعث افزایش مغناطش زیر شبکه B می‌شود و مغناطش زیر شبکه A را کاهش می‌دهد. اگر کاتیون‌های Mg^{2+} فقط جایگاه‌های B را اشغال کنند، کاهش در مغناطش زیر شبکه B رخ می‌دهد، در نتیجه موجب کاهش مغناطش اشباع می‌شود. مغناطش نهایی از تفاوت بین مغناطش‌های M_A و M_B ناشی می‌شود. زیر شبکه B عموماً دارای مغناطش بالاتری نسبت به زیر شبکه A هستند. کاتیون‌های Cu^{2+} گشتاور مغناطیسی (۱/۳ مگنتون بوهر) کمتری نسبت به کاتیون‌های Ni^{2+} (۲/۳ مگنتون بوهر) دارند. بنابراین جانشین شدن کاتیون‌های نیکل به وسیله کاتیون‌های مس سبب کاهش مغناطش اشباع می‌شود [۳۳ و ۳۴]. اما اندازه‌گیری تجربی نشان می‌دهد که با افزودن مس مغناطش زیاد می‌شود. تعدادی از کاتیون‌های مس و منیزیم که جایگاه A را اشغال کرده‌اند سبب جابجایی کاتیون‌های آهن از جایگاه A به جایگاه B می‌شوند. چون جایگاه B مغناطش بالاتری نسبت به جایگاه A دارد و گشتاور مغناطیسی کاتیون آهن ۵ مگنتون بوهر بوده و بالاتر از گشتاور مغناطیسی مس و منیزیم است [۳۱ و ۳۵] و در نتیجه مغناطش اشباع افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین مغناطش اشباع با افزایش میزان جانشانی کاتیون‌های مس و منیزیم برای ($y=1/0$ و $y=0/0$) کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار x کاتیون‌های Zn^{2+} وارد جایگاه‌های چهاروجهی A شده و مقدار کاتیون‌های نیکل کاهش می‌یابد و کاتیون‌های Fe^{3+} بین جایگاه‌های اکتاهدرال B و تتراهدرال A توزیع می‌شوند. زمانی که گشتاور مغناطیسی کاتیون‌های Fe^{3+} در جایگاه‌های A و B تقریباً مساوی و مخالف هم باشند یکدیگر را خنثی می‌کنند و گشتاور مغناطیسی کل منحصراً توسط کاتیون‌های مس، منیزیم، نیکل و روی مشخص می‌شود. توزیع کاتیون‌های Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} و Fe^{3+} و مقدارهای گشتاور مغناطیسی آن‌ها به ترتیب ۰، ۱، ۲ و ۵ مگنتون بوهر است. از آنجایی که گشتاور مغناطیسی کاتیون Fe^{3+} خیلی بیش‌تر از گشتاور مغناطیسی کاتیون‌های مورد بحث است، بنابراین مغناطش اشباع نمونه‌های مورد بحث با قرار گرفتن کاتیون‌های Fe^{3+} اشغال شده در جایگاه‌های A و B مشخص می‌شوند [۳۱ و ۳۳].

شکل ۴-۶ تغییرات نیروی وادارندگی نمونه‌ها برحسب میزان جانشانی کاتیون‌های مس و منیزیم در فریت نیکل - روی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶- تغییرات نیروی وادارندگی نمونه‌ها برحسب میزان جانشانی کاتیون‌ها با فرمول استوکیومتری $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$

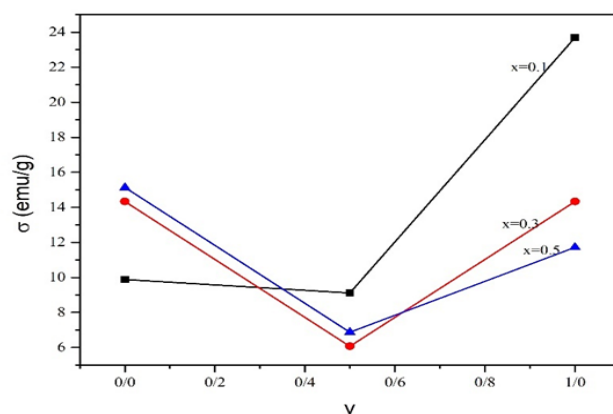
نیروی وادارندگی از فاکتورهایی مانند، ناهمسانگردی مغناطوسبلوری، میکرو کرنش، ریخت ذرات مغناطیسی، توزیع اندازه ذرات، ناهمسانگردی شکل و اندازه حوزه‌های مغناطیسی تأثیر می‌پذیرد [۳۴]. نیروی وادارندگی به اندازه ذرات و عیوب بلوری بسیار وابسته است. در مناطق تک حوزه و چند حوزه، تأثیر اندازه دانه با نیروی وادارندگی از رابطه‌های ۳ و ۴ به ترتیب پیروی می‌کند. در مناطق چند حوزه با افزایش اندازه ذرات، نیروی وادارندگی کاهش می‌یابد [۳۴]. قرار گرفتن مواد مغناطیسی در معرض میدان‌های مغناطیسی خارجی موجب حرکت دیواره‌های حوزه می‌شود. در این صورت با افزایش میدان ساختار چند حوزه به سوی ساختار تک حوزه تغییر می‌کند. علاوه بر عوامل خارجی (اندازه عیوب، کرنش شبکه و ناخالصی شیمیایی) ناهمسانگردی مغناطوسبلوری از جفت‌شدگی اسپین‌های الکترون و اندازه حرکت زاویه مداری الکترون (جفت‌شدگی L-S) ناشی می‌شود. عامل مهم دیگری که روی نیروی وادارندگی تأثیر قابل توجهی دارد، اندازه ذرات می‌باشد. وقتی اندازه ذرات بزرگتر از حد بحرانی باشد، ذرات در حالت چند حوزه قرار دارند. در این حالت حرکت دیواره‌ی حوزه بر چرخش بردار مغناطش غلبه دارد. بنابراین نیروی وادارندگی کاهش پیدا می‌کند. در حالتی که اندازه ذرات برابر یا کمتر از اندازه بحرانی باشد، ذرات تک حوزه می‌شوند و بیش‌ترین مقدار نیروی وادارندگی به دست می‌آید [۲۱].

نیروی وادارندگی همه‌ی نمونه‌های جانشانی شده افزایش یافته است. این‌گونه تغییرات به افزایش ناهمسانگردی مغناطوسبلورین نمونه‌ها نسبت داده شده است. برای نمونه‌هایی جانشانی شده به خاطر اضافه شدن کاتیون‌های مس و منیزیم، به منظور توازن بار الکتریکی کل نمونه‌ها، برخی کاتیون‌های Fe^{3+} به Fe^{2+} تبدیل شده و در نتیجه غلظت کاتیون‌های Fe^{2+} افزایش می‌یابد. کاتیون‌های Fe^{2+} به دلیل عدم تقارن گشتاورهای مغناطیسی در آن‌ها ناهمسانگرد هستند. افزایش این کاتیون‌ها باعث افزایش ناهمسانگردی و در نتیجه افزایش نیروی وادارندگی می‌شود [۳۶ و ۳۷].

ب- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول

استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$

در شکل ۴-۶۵ تغییرات مغناطش نمونه‌ها در حداکثر میدان اعمال شده برحسب غلظت کاتیون‌های نیکل و کبالت آورده شده است.



شکل ۴-۶۵- تغییرات مغناطش نمونه‌ها در حداکثر میدان اعمال شده برحسب غلظت کاتیون‌های نیکل و کبالت جانشانی شده با فرمول

استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$

همان گونه که از شکل مشاهده می شود با افزایش مقدار Y ، مغناطش ابتدا تا مقدار $Y=0.5$ کاهش یافته و سپس افزایش می یابد. تغییرات مشاهده شده را می توان به نحوه توزیع کاتیون ها در جایگاه های A و B نسبت داد. کاتیون های کبالت و نیکل تمایل شدیدی به اشغال جایگاه های B دارند، در حالی که کاتیون های روی تمایل دارد جایگاه A را اشغال کنند. کاتیون های آهن و منگنز می توانند در هر دو جایگاه قرار بگیرند [۲ و ۲۱]. گشتاور مغناطیسی کاتیون های منگنز دو ظرفیتی و آهن سه ظرفیتی برابر با $5 \mu_B$ و کاتیون های نیکل و کبالت برابر با $2 \mu_B$ است [۲۱]. در فریت های اسپینلی گشتاور مغناطیسی کل از تفاضل مقدار گشتاور جایگاه های A و B به دست می آید، از آنجایی که گشتاور مغناطیسی کاتیون های نیکل و کبالت از کاتیون منگنز کمتر است، مغناطش کاهش می یابد. با جانشانی کاتیون های کبالت و نیکل به طور همزمان، کاتیون های آهن بیشتری از جایگاه B به جایگاه A می روند، در نتیجه مغناطش کاهش می یابد [۳۸].

به دلیل این که نانوذرات در حداکثر میدان به مغناطش اشباع نرسیده بودند و نیروی وادارندگی کمی داشتند، برای تخمین مغناطش اشباع آن ها از تابع لانژوین و نرم افزار Origin استفاده شد [۳۹]. رابطه لانژوین به صورت زیر است:

$$M = M_0 \left(\coth \left(\frac{H\mu}{KT} \right) - \left(\frac{KT}{H\mu} \right) \right) \quad (14)$$

در این رابطه، μ گشتاور مغناطیسی، H میدان اعمالی، K ثابت بولتزمن و T دمایی است که نمونه در آن تهیه شده است.

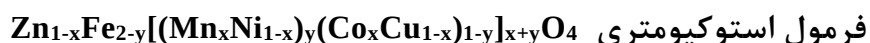
این رابطه برای نمونه هایی با نیروی وادارندگی نزدیک به صفر (سوپرپارامغناطیس ها) استفاده می شود، بنابراین برای محاسبه مغناطش اشباع نمونه های A_3 ، A_6 ، A_8 و A_{10} از این تابع استفاده شد. برای منطبق کردن نمونه ها، از بسط سه جمله ای به دلیل انطباق بهتر بر نمودارها، استفاده شد و مغناطش اشباع محاسبه شده برای نمونه ها در جدول ۴-۳۷ بیان شده است.

جدول ۴-۳۷- مغناطش اشباع نمونه های تهیه شده به کمک رابطه لانژوین

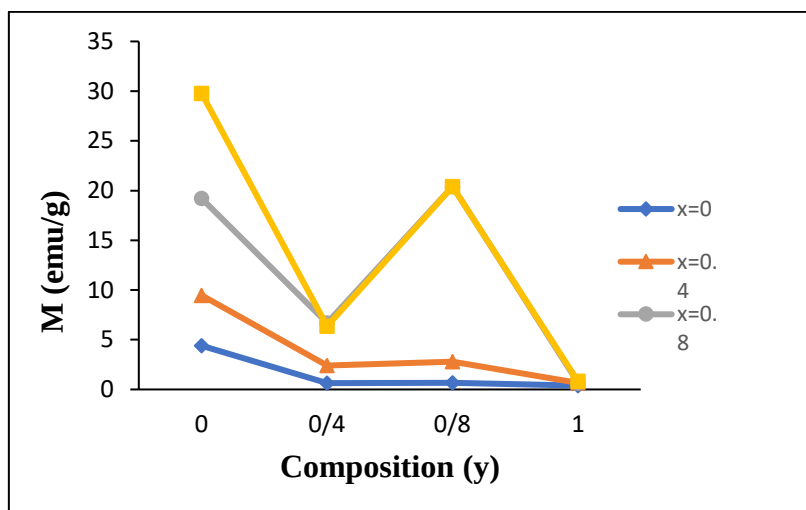
کد نمونه	فرمول استوکیومتری	M_s (emu/g)
A_3	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.1}Fe_2O_4$	۱۴/۴۴
A_6	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.3}Fe_2O_4$	۹/۹۷
A_8	$Zn_{0.5}[Ni]_{0.5}Fe_2O_4$	۲۱/۲۵
A_{10}	$Zn_{0.5}[Co]_{0.5}Fe_2O_4$	۲۰/۶۵

مقایسه جدول های ۴-۲۰ و ۴-۳۷ نشان می دهد که روند تغییرات مغناطش اشباع نمونه ها، همانند رفتار مغناطش در حداکثر میدان اعمال شده (۸ KOe) است و مغناطش اشباع نمونه ها از مقدار مغناطش به دست آمده برای نمونه ها در حداکثر میدان اعمالی، بیشتر است [۴۰ و ۴۱].

ج- فریت روی جانشانی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با

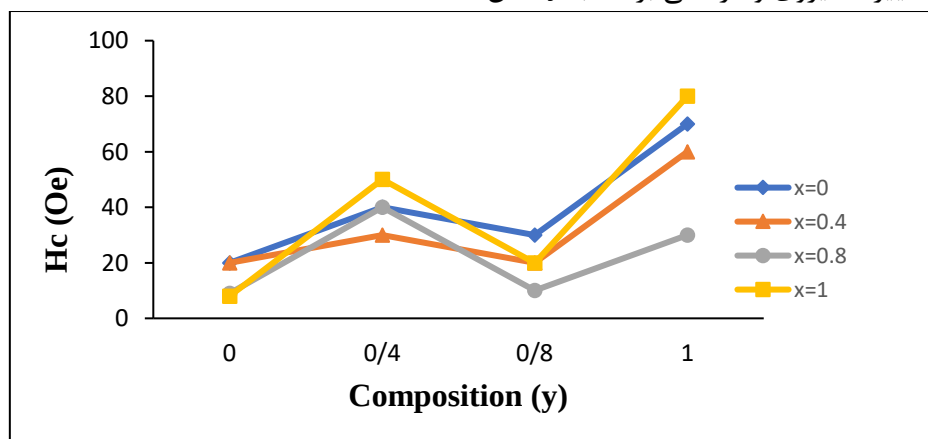


در شکل ۴-۶۶ تغییرات مغناطش نمونه ها در حداکثر میدان اعمال شده بر حسب Y آورده شده است.



شکل ۴-۶۶- تغییرات مغناطش نمونه‌های $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ در حداکثر میدان اعمال شده برحسب y . همان‌گونه که از شکل ۴-۶۶ مشاهده می‌شود با افزایش مقدار y ، مغناطش در $y=0/4$ کاهش می‌یابد و پس از افزایش در $y=0/8$ ، $y=1$ کاهش می‌یابد. تغییرات مشاهده شده را می‌توان به نحوه توزیع کاتیون‌ها در جایگاه‌های A و B نسبت داد. کاتیون‌های کبالت، نیکل و مس تمایل شدیدی به اشغال جایگاه‌های B دارند، در حالی که کاتیون‌های روی تمایل دارند جایگاه A را اشغال کنند کاتیون‌های آهن و منگنز می‌توانند در هر دوجایگاه قرار گیرند [۲۱ و ۲۲]. گشتاور مغناطیسی کاتیون‌های منگنز دو ظرفیتی و آهن سه ظرفیتی برابر با ۵ مگنتون بوهر، نیکل و کبالت برابر با ۲ مگنتون بوهر، مس برابر با ۱ مگنتون بوهر و روی برابر با صفر است [۲۱]. گشتاور مغناطیسی کل از تفاضل مقدار گشتاور جایگاه‌های A و B به دست می‌آید. از آنجایی که گشتاور مغناطیسی کاتیون‌های نیکل، مس و کبالت از کاتیون منگنز و آهن کمتر است، بنابراین با افزایش جانشانی این کاتیون‌ها در فریت روی، کاتیون‌های آهن بیشتری از جایگاه B به جایگاه A می‌روند که منجر به کاهش مغناطش می‌گردد [۲۱]. همچنین، با استفاده از مدل هسته- پوسته می‌توان کاهش مغناطش را توجیه کرد. در این مدل، حضور یک هسته با نظم فری مغناطیس و یک لایه سطحی با مغناطش صفر در نانوذرات و اثرات سطحی آن سبب می‌شود که با کاهش اندازه ذرات، ضخامت لایه مرده افزایش می‌یابد که منجر به کاهش مغناطش می‌گردد [۲۴]. بنابراین نمونه‌های E_{15} ، E_{13} و E_{11} بیشترین مقدار مغناطش و نمونه‌های E_8 ، E_3 ، E_4 و E_2 کمترین مغناطش را دارا هستند.

در شکل ۴-۶۷ تغییرات نیروی وادارندگی برحسب y نشان داده شده است.



شکل ۴-۶۷- تغییرات نیروی وادارندگی نمونه‌های $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ برحسب y .

همان گونه که از شکل بالا مشاهده می شود، با افزایش مقدار y ، نیروی وادارندگی در $y=0/4$ افزایش می یابد و پس از کاهش در $y=0/8$ ، در $y=1$ افزایش می یابد. نیروی وادارندگی به اندازه ذرات و عیوب بلوری بسیار وابسته است. در مناطق تک حوزه و چند حوزه، تأثیر اندازه دانه با نیروی وادارندگی از رابطه های ۳ و ۴ به ترتیب پیروی می کند. در مناطق چند حوزه با افزایش اندازه ذرات، نیروی وادارندگی کاهش می یابد [۳۴]. همان گونه که از شکل ۴-۶۷ مشخص است، نمونه های E_4 و E_{16} بیشترین نیروی وادارندگی و نمونه های E_9 و E_{13} کمترین آن را دارا هستند [۱۹ و ۲۰].

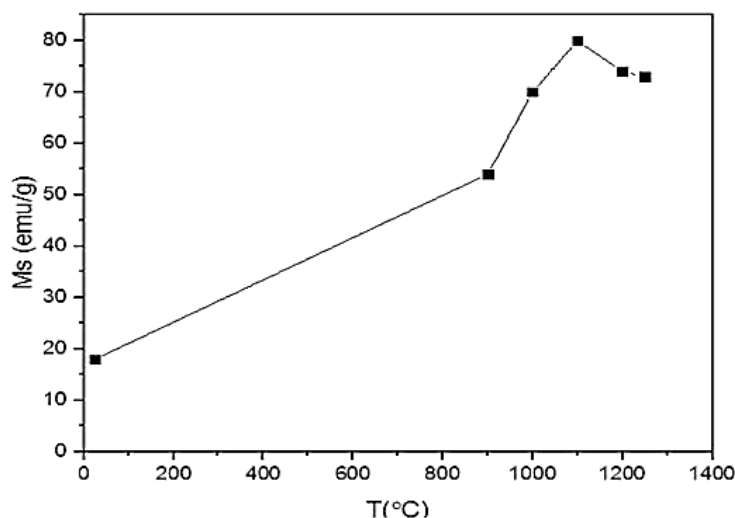
۴-۷-۱- مقایسه ویژگی های مغناطیسی فریت های جانشرانی شده

با رسم نمودارهای مغناطش و نیروی وادارندگی برحسب غلظت کاتیون های جانشرانی شده برای نمونه ها مشاهده شد که در تمام نمونه ها با تغییر غلظت کاتیون ها مقدار ویژگی های مغناطیسی متفاوت است. این تفاوت را می توان بر اساس برهم کنش ابرتبادلی بین کاتیون های موجود در جایگاه های چهاروجهی و هشت وجهی توضیح داد.

۴-۸- تجزیه و تحلیل اثر عملیات حرارتی بر روی ویژگی های مغناطیسی

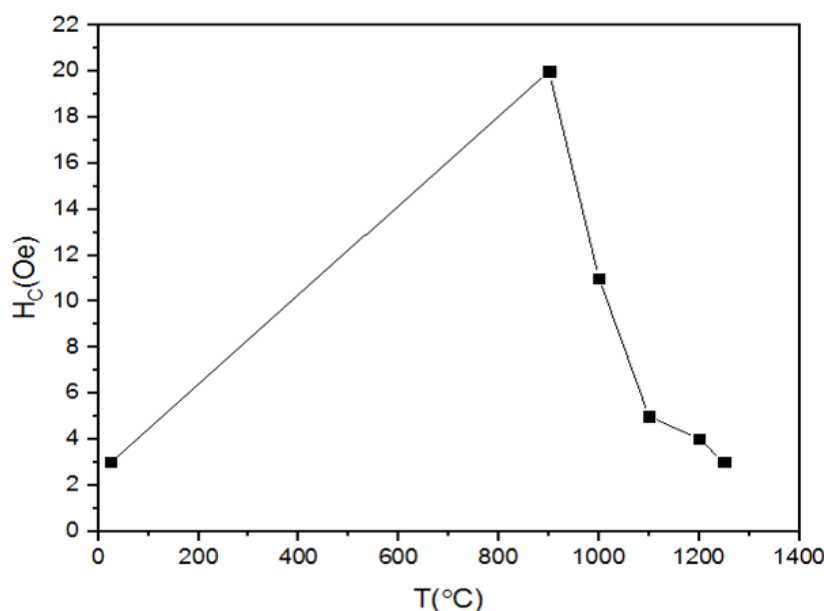
جهت بررسی اثر عملیات حرارتی بر ویژگی ها، نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ به دلیل بالا بودن مقدار تروایی آن انتخاب و پس از تهیه آن در دماهای مختلف تفجوشی شد و ویژگی های آن مورد بررسی قرار گرفت که در ذیل به آن ها اشاره می شود.

تغییرات مغناطش اشباع نمونه های فریتی $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ بر حسب دماهای مختلف پخت داده شده در شکل ۴-۶۸ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶۸- تغییرات مغناطش اشباع نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ بر حسب دما.

همان گونه که از شکل ۴-۶۸ مشاهده می شود مغناطش اشباع نمونه ها تا دمای $1100^{\circ}C$ افزایش و پس از آن کاهش می یابد. علت این رفتار مغناطش تا دمای $1100^{\circ}C$ با افزایش اندازه ذرات و به تبع آن کاهش نسبت سطح به حجم توجیه پذیر است. همان گونه که گزارش شده است با افزایش اندازه ذرات نانومتری، ضخامت لایه مرده کاهش و مغناطش افزایش می یابد. در واقع اثر لایه مرده نسبت به اثر مغناطش هسته که دارای نظم اسپینی مغناطیسی است، کمتر و در نتیجه مغناطش افزایش می یابد [۳۴]. به علت اهمیت کاهش نیروی وادارندگی در هسته های ترانسفورماتور به منظور کاهش اتلاف، تأثیر دما بر روی نیروی وادارندگی هسته های فریتی پخت داده شده در شکل ۴-۶۹ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶۹- تغییرات نیروی وادارندگی نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ بر حسب دما.

همان گونه که از شکل ۴-۶۹ مشاهده می شود نیروی وادارندگی نمونه ها تا دمای 900°C افزایش و پس از آن کاهش می یابد. تغییرات نیروی وادارندگی ناشی از تغییرات دما با استفاده از معادلات ۱۴ و ۱۵ و بررسی تک حوزه و چندحوزه بودن ذرات توجیه پذیر است [۴۲].

$$H_C \sim 3 \sqrt{\frac{K_B T_C K_1}{a M_S}} \frac{1}{D} \quad (15)$$

در این رابطه D اندازه دانه، M_S اشباع مغناطیسی، K_1 ثابت ناهمسانگردی بلورین، T_C دمای کوری و a پارامتر شبکه ای است. مطابق با این رابطه با افزایش ناهمسانگردی و کاهش اندازه دانه و یا به عبارت دیگر افزایش چگالی مرز دانه ها، مقدار میدان پسماندزدای مغناطیسی افزایش می یابد. اگر اندازه ذرات از یک مقدار بحرانی ریزتر شوند، ساختار دیواره ها از بین می رود. این حالت سوپر پارامغناطیس نامیده می شود. در حالت نانوساختار و نزدیک به سوپر پارامغناطیس نیروی وادارندگی از رابطه زیر به دست می آید [۲۵].

$$H_C = \frac{P_C K_1^4 D^6}{\mu_0 M_S A^3} \quad (16)$$

که در آن A ثابت سختی تعادلی ۱ و P_C ثابت نظم یکپارچگی ۲ می باشد [۲۵].

نیروی وادارندگی نمونه تا دمای 900°C افزایش می یابد که این افزایش براساس رابطه $(H_C \propto D^6)$ [۲۵] توجیه پذیر است. از دمای 900°C به بالا، نیروی وادارندگی روند کاهشی را نشان می دهد که در این ناحیه، اندازه ذرات به دلیل افزایش دما همچنان افزایش یافته است. این رفتار براساس رابطه $(H_C \propto \frac{1}{D})$ [۲۵] قابل توجیه است. از طرفی احتمال می رود که از دمای 250°C تا 900°C ذرات تک حوزه و از دمای 900°C تا 1250°C ذرات چندحوزه می شوند. در ذرات تک حوزه حرکت دیواره حوزه بر اثر اعمال میدان خارجی وجود ندارد و مغناطش تنها از چرخش گشتاورهای

1-Exchange stiffness constant

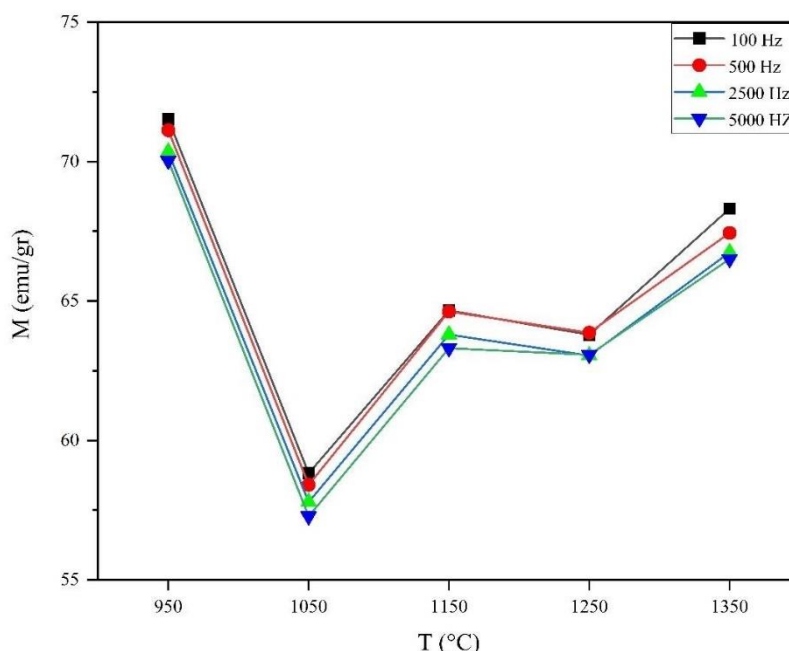
2-Unity order constant

مغناطیسی به سمت میدان اعمالی تغییر می‌کند. اما در ذرات چندحوزه، با اعمال میدان خارجی، ابتدا حوزه‌هایی که جهت گشتاور آن‌ها در جهت میدان اعمالی است با جابجایی دیواره حوزه‌ها رشد می‌کنند، بنابراین نیروی وادارندگی در ذرات تک‌حوزه نسبت به ذرات چندحوزه بیشتر است. همچنین مغناطش دمای اتاق نمونه که به صورت تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای تحت عملیات حرارتی قرار داده شده است، در دماهای مختلف برای فرکانس‌های متفاوت و با استفاده از حلقه‌های پسماند به دست آمده است. از آنجا که مغناطش بر واحد جرم و برحسب یکای emu/gr متداول است، با استفاده از رابطه‌های زیر مقدار مغناطش برحسب emu/gr محاسبه و نتایج آن در شکل ۴-۷۰ نشان داده شده است [۲۱].

$$M \left(\frac{\text{emu}}{\text{gr}} \right) = \frac{M(A/m)}{\rho(Kg/m^3)} \quad (۱۷)$$

$$B = \mu_0(H + M) \quad (۱۸)$$

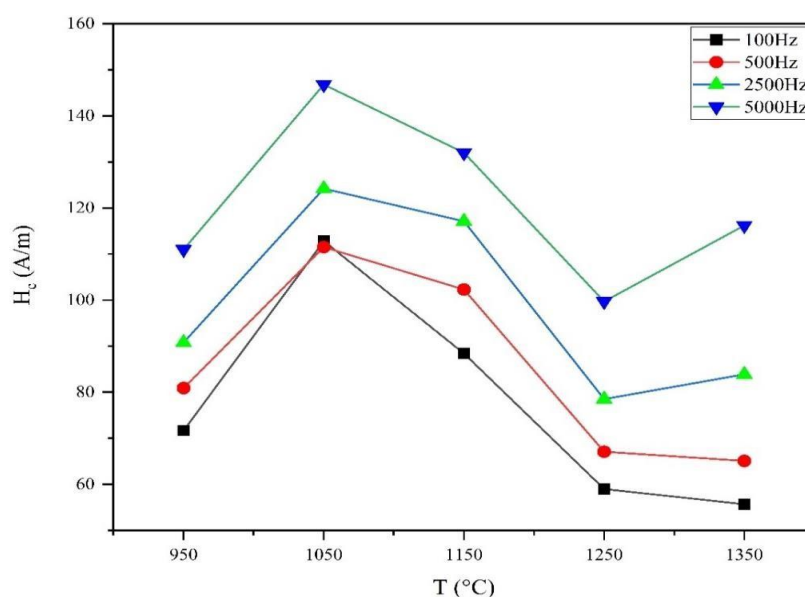
در معادله بالا H میدان مغناطیسی اعمالی، M مغناطش و μ تراوایی خلاء است



شکل ۴-۷۰- نمودار مغناطش نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده در دماهای متفاوت و فرکانس‌های مختلف. همان‌گونه که از شکل ۴-۷۰ دیده می‌شود، مغناطش‌ها برحسب دمای تفجوشی، در تمامی فرکانس‌ها، رفتار مشابه دارند. مغناطش نمونه‌ها با افزایش دمای تفجوشی ابتدا کاهش و پس از آن تا دمای 1150°C افزایش و سپس با شیب ملایمی تا دمای 1250°C کاهش یافته است و بعد از آن دوباره روند افزایشی را طی می‌کند. این رفتار در تغییرات مغناطش را می‌توان ناشی از تغییر توزیع جایگاهی کاتیون‌ها، تغییرات اندازه دانه‌ها و وجود حفره‌ها در اثر تغییرات دمای تفجوشی دانست. نمونه تفجوشی شده در دمای 950°C دارای بیشترین مغناطش و نمونه تفجوشی شده در دمای 1050°C دارای کمترین مغناطش است. در واقع با افزایش دما از 950°C به 1050°C مقدار مغناطش کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد که می‌توان آن را ناشی از تغییر توزیع جایگاهی کاتیون‌ها در اثر افزایش دما دانست که با افزایش دما کاتیون‌های Zn^{2+} از جایگاه A به جایگاه B انتقال یافته و باعث کاهش مغناطش نمونه شده است [۲۱]. در واقع در این مرحله تغییر توزیع جایگاهی کاتیون‌ها نسبت به عوامل دیگر مؤثر بر رفتار مغناطش غلبه نموده است. با توجه به افزایش چگالی در دمای 1150°C نسبت به دماهای کمتر، چگالی در این دما افزایش یافته است. همچنین

مغناطش در دماهای ۱۱۵۰ و ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد نزدیک به هم است که می‌توان آن را ناشی از مشابه بودن چگالی در این دو دما دانست. با توجه میانگین اندازه دانه‌ها نمونه‌های تفجوشی در این دو دما و همچنین چگالی این دو نمونه در مقایسه با دیگر نمونه‌ها نزدیک هم است. لذا مغناطش این دو نمونه تفاوت زیادی را ندارند. مغناطش در دمای ۱۳۵۰ نسبت به مغناطش در دماهای تفجوشی مجاور دارای مقدار بیشتری است، که این افزایش مغناطش در دمای ۱۳۵۰ °C را می‌توان متأثر از دو پارامتر اندازه دانه و تخلخل دانست. بر اساس اصول علمی، شدت مغناطش به میزان سهولت حرکت دیواره‌ها وابسته است که در یک ساختار متخلخل حرکت دیواره‌ها متأثر از دو پارامتر اندازه دانه و تخلخل می‌باشد [۲۱]. در بین این دو پارامتر مؤثر در مغناطش، اثر اندازه دانه نسبت به اثر تخلخل غالب است و به همین دلیل در دمای ۱۳۵۰ °C، با وجود دانه‌های بزرگتر و چگالی کمتر که نشان از تخلخل بیشتر نمونه دارد، مغناطش در این دما نسبت به دو دمای پیشین خود بیشتر می‌باشد. در جدول ۲۶ مغناطش نمونه‌ها با دماهای تفجوشی متفاوت در فرکانس‌های مختلف آورده شده است.

نیروی وادارندگی دمای اتاق نمونه‌های فریتی $4\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده در دماهای مختلف، برای فرکانس‌های متفاوت در شکل ۴-۷۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۷۱- نمودار نیروی وادارندگی نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده در دماهای متفاوت برای فرکانس‌های مختلف.

همانگونه که در شکل ۴-۷۱ نشان داده شده است روند تغییرات نیروی وادارندگی برحسب دما برای تمامی نمونه‌ها تقریباً مشابه است. این تغییرات براساس رابطه نیروی وادارندگی با اندازه ذره، مغناطش و ناهمسانگردی بلوری و همچنین حضور حفره و مرزدانه در ساختار ماده، توجیه‌پذیر است. نیروی وادارندگی با قابلیت حرکت دیواره‌های مغناطیسی رابطه مستقیم دارد. از طرف دیگر عیوبی مانند مرزدانه، ناخالصی و نابجایی به عنوان مناطقی برای قفل کردن دیواره‌های مغناطیسی محسوب می‌شود [۱۸]. به‌طور کلی مرزدانه، ناخالصی و نابجایی با قفل کردن دیواره‌های مغناطیسی به عنوان عوامل تاثیرگذار در افزایش H_c شناخته می‌شوند که تمامی این عوامل را می‌توان با یک عملیات حرارتی مناسب به میزان قابل توجهی کاهش داد. در جدول ۲۶-۴ نیروی وادارندگی نمونه‌های تفجوشی شده برحسب آمپر بر متر در دماهای متفاوت برای فرکانس‌های مختلف آورده شده است.

۴-۹- دستیابی به مشخصه‌های فریت با کاربردهای هسته‌های ترانسفورماتورها

با توجه به بررسی‌های انجام شده در خصوص ویژگی‌های هسته‌های فریتی قابل کاربرد در ترانسفورماتورها و مطالعات انجام شده در گزارش فاز دوم این پروژه، خلاصه‌ای از ویژگی‌های هسته EI مدنظر در جدول ۴-۳۸ بیان شده است.

جدول ۴-۳۸- مشخصات فنی هسته‌های فریتی با شکل EI

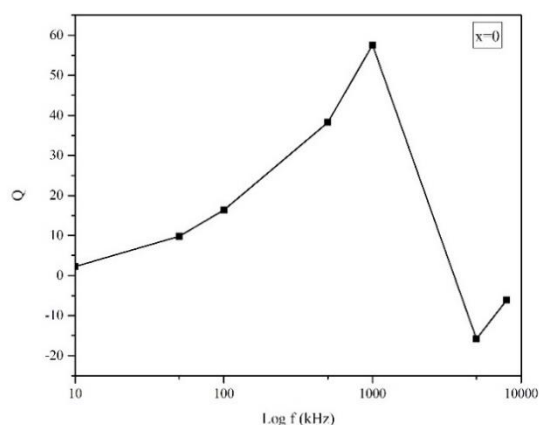
Properties	Value
Ferrite type	Soft Ferrite (Spinel)
Ferrite material	nickel, manganese, cobalt and copper substituted Zn Ferrite
Core shape	EI
Frequency range	< 400 KHz
Initial permeability range (μ_i at 25°C)	1400 to 3500
Flux density range (B_{sat} at 25°C)	350 to 500 (mT)
Curie temperature	≥ 180 (°C)
Coercive field (H_c)	11±15% (A/m)
Core dimensions	E Core 25/16/6 (mm)
	I Core 25/3/6 (mm)

در بین نمونه‌های بررسی شده، نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ در دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی گراد دارای مقدار مغناطش اشباع، چگالی و تراوایی در محدوده ذکر شده در جدول ۳۸ و کمترین مقدار اتلاف است. بنابراین این نمونه مناسب‌ترین نمونه برای هسته‌های ترانسفورماتور انتخاب شد.

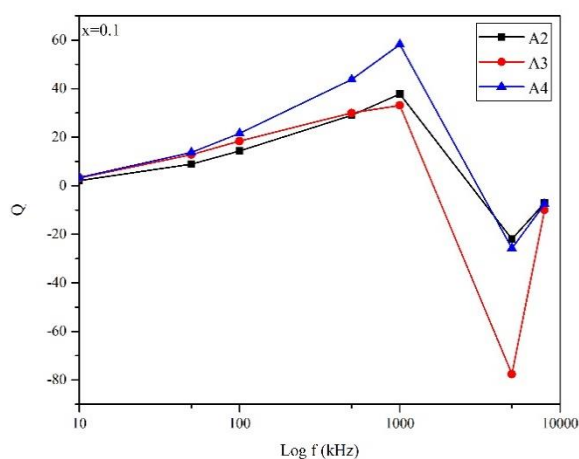
۴-۱۰- تجزیه و تحلیل فاکتور کیفیت

برای بررسی فاکتور کیفیت، نمونه‌های ۱۸ تا ۲۷ جدول ۳-۲ که دارای فرمول عمومی $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ هستند و با روش هم‌رسوبی تهیه شده‌اند مورد بررسی قرار گرفتند.

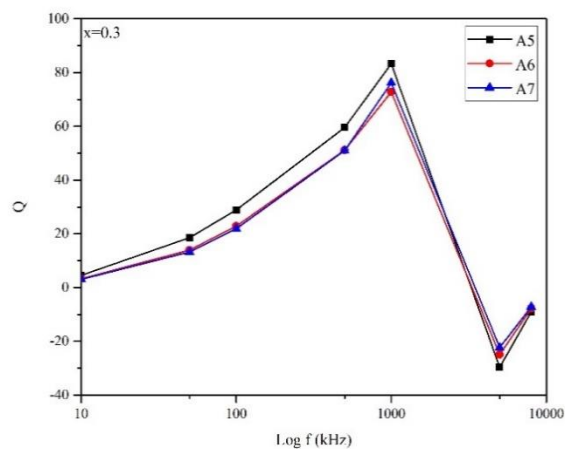
از آنجایی که فاکتور کیفیت عکس تانژات اتلاف می‌باشد، بنابراین یکی از پارامترهای مهم در هسته‌های فریتی ترانسفورماتور فاکتور کیفیت آن‌ها است. برای بررسی فاکتور کیفیت نمونه‌ها، مقدار این فاکتور با استفاده از دستگاه LCR متر در فرکانس‌های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوهرتز و ۱، ۵ و ۸ مگاهرتز اندازه‌گیری شد و در شکل‌های ۴-۷۲ تا ۴-۷۵ آورده شده است.



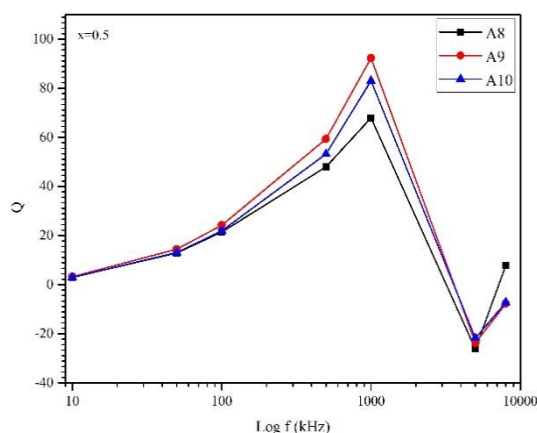
شکل ۴-۷۲- تغییرات فاکتور کیفیت برحسب فرکانس نمونه‌های $\text{Mn}_{0.5-x}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{1-y}\text{Co}_y]_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ برای غلظت $x=0$.



شکل ۴-۷۳- تغییرات فاکتور کیفیت برحسب فرکانس نمونه‌های $\text{Mn}_{0.5-x}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{1-y}\text{Co}_y]_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ برای غلظت $x=0.1$.



شکل ۴-۷۴- تغییرات فاکتور کیفیت برحسب فرکانس نمونه‌های $\text{Mn}_{0.5-x}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{1-y}\text{Co}_y]_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ برای غلظت $x=0.3$.



شکل ۴-۷۵- تغییرات فاکتور کیفیت برحسب فرکانس نمونه‌های $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[(Ni_{1-y}Co_y)_xFe_2O_4]$ برای غلظت $x=0.5$ همان‌گونه که از شکل‌های بالا مشاهده می‌شود، در بازه فرکانسی ۱۰ kHz تا ۱ MHz فاکتور کیفیت در همه نمونه‌ها در حال افزایش است، بنابراین در این بازه نمونه‌ها کمترین مقدار اتلاف را دارد [۴۳]. همچنین با مقایسه شکل‌های بالا مشاهده می‌شود که نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ دارای بالاترین مقدار فاکتور کیفیت در دمای اتاق است.

۴-۱۱- تجزیه و تحلیل بسامد و ولتاژهای هسته فریتی

طبق بررسی‌های انجام شده بازه فرکانسی هسته‌های فریتی همان بازه‌ای است که در آن تراوایی تقریباً ثابت و مقدار فاکتور کیفیت روند افزایشی دارد، بنابراین طبق بندهای قبلی این گزارش، بازه فرکانسی هسته‌های ساخته شده ۱۰ kHz تا ۱ MHz می‌باشد.

علاوه بر این حداکثر توان قابل انتقال توسط ترانسفورماتور (با فرض آنکه نسبت اولیه به ثانویه یک باشد) مطابق رابط زیر که نشان می‌دهد چگونه جنبه‌های مختلف طراحی بر ظرفیت انتقال توان موثر است، محاسبه می‌شود [۴۴].

$$P_{trans} = \underbrace{C}_{\text{Converter topology}} \cdot \underbrace{\frac{PF}{\sqrt{P_v}}}_{\text{Material}} \cdot \underbrace{\frac{\Delta T}{R_{th}}}_{\text{Thermal design}} \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{f_{cu}}{\rho_{cu}}}}_{\text{Winding}} \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{A_N \cdot A_e}{I_N \cdot I_e}}}_{\text{Geometry}} \quad (19)$$

که در آن C ضریبی وابسته به ساختار و نوع مبدل قدرت است [۴۵] که در جدول زیر مقدار آن با توجه به نوع مبدل مشخص شده است.

جدول ۴-۳۹- ضریب مربوط به نوع مبدل [۴۵]

نوع مبدل قدرت	C
Push pull	1
Forward	0.71
Flyback	0.62

در رابطه ۱۹ جمله وابسته به نوع ماده $\frac{PF}{\sqrt{P_V}}$ ، نسبت ضریب عملکرد PF^1 به جذر تلفات ویژه هسته P_V^2 ، است که از برگه اطلاعات هسته^۳ بدست می آید [۴۶].

$$PF = f \cdot B_{\max} \quad (20)$$

که در آن f فرکانس سوئیچینگ و $B_{\max}$ حداکثر چگالی شار مغناطیسی است.

جمله وابسته به طراحی حرارتی است که در آن ΔT وابسته به جنس هسته و مطابق جدول زیر به دست می آید [۴۴].

جدول ۴-۴۰- تغییرات دمایی متناظر با جنس هسته [۴۴]

Material	ΔT K
N27	30
N41	30
N49	20
N51	10
N72	40
N87	50
N88	90
N92	50
N95	50
N96	30
N97	50
PC200	20

با توجه به بررسی های انجام شده، میانه مقادیر جدول بالا ($\Delta T = 40K$) اختیار شده است. از طرفی مقاومت حرارتی R_{th} به شکل رابطه ۲۱ تعریف می شود.

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{Vcore} + P_{Vcopper}} \quad (21)$$

که در آن $P_{Vcopper}$ و P_{Vcore} به ترتیب تلفات هسته و تلفات مسی حاصل از سیم پیچ ها است. مقدار مقاومت حرارتی R_{th} برای هسته های با شکل های مشابه تقریباً برابر است و با اندازه گیری در شرایط انتقال حرارت طبیعی^۴ (بدون فن) بدست می آید.

علاوه بر جمله آخر در رابطه ۲۱ که وابسته به ابعاد هسته است، مقاومت حرارتی نیز وابسته به ابعاد هسته است و می توان آن با رابطه زیر تقریب زد [۴۴]:

$$R_{th} = \frac{1}{\sqrt{V_e}} \quad (22)$$

که در آن V_e حجم موثر هسته^۵ است و مقدار آن در برگه اطلاعات هسته ذکر می شود.

¹. Performance Factor

². Specific core loss level

³. Data sheet

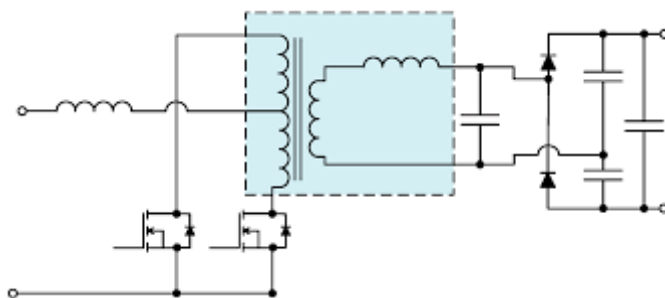
⁴. Free convection in air

⁵. Core effective volume

جمله $\sqrt{\frac{f_{cu}}{\rho_{cu}}}$ در رابطه ۱۹ وابسته به نحوه سیم پیچی هسته است که در آن f_{cu} ^۱ نسبت سطح مقطع مس به کل سطح موجود برای سیم پیچی و ρ_{cu} مقاومت ویژه مس در حالت DC می باشد. به طور تجربی $f_{cu} = 0.4$ در نظر گرفته می شود. البته مقاومت سیم در فرکانس های بالا به خاطر اثر پوستی و خاصیت مجاورت با میدان های مغناطیسی، بزرگتر خواهد بود و لازم است ضریب اصلاح $\frac{R_{AC}}{R_{DC}}$ اعمال گردد، برای کاهش این ضریب در عمل از سیم های چند رشته ای تابیده به نام litz استفاده می شود.

جمله $\sqrt{\frac{A_N \cdot A_e}{l_N \cdot l_e}}$ وابسته به ابعاد هسته می باشد که در آن A_N سطح مقطع سیم پیچ، A_e سطح مقطع موثر مغناطیسی هسته، l_N متوسط طول یک دور سیم پیچ و l_e طول موثر مسیر مغناطیسی است.

مشخصات ابعادی هسته ترانسفورماتور ساخته شده در این پژوهش مشابه هسته با کد PC40EI25-Z از محصولات شرکت TDK می باشد. که در آن PC40 مبین نوع ماده بکار گرفته شده، EI شکل ترانسفورماتور، 25 مبین ابعاد هسته و Z به معنی آن است که هسته دارای فاصله هوایی نمی باشد [۴۷]. هر چه فرکانس سوئیچینگ در مبدل های الکترونیک قدرت بزرگ اختیار شود ابعاد و متعاقبا وزن سلف، خازن و ترانسفورماتورهای بکار رفته در مبدل کاهش می یابد. به عبارتی با افزایش فرکانس سوئیچینگ نسبت توان انتقالی در واحد حجم^۲ افزایش می یابد. اما در عمل محدودیتی برای افزایش فرکانس سوئیچینگ وجود دارد، اولین و مهمترین آن مربوط به مولفه تلفات سوئیچینگ، در سوئیچ های نیمه هادی متداول، مانند MOSFET ها و IGBT ها، است. محدود بودن حداکثر دمای پیوند نیمه هادی ها و مشکلات مربوط به انتقال حرارت باعث می شود در موارد مشابه فرکانس سوئیچینگ در بازه 25kHz تا 100kHz اختیار شود. در اینجا برای محاسبه توان ترانسفورماتور، فرکانس سوئیچینگ برابر 50kHz اختیار می شود. مطابق رابطه ۱۹ و جدول ۴۰ حداکثر توان قابل انتقال توسط ترانسفورماتور در مبدل Push Pull اتفاق می افتد ($C = 1$). طرح کلی مبدل Push Pull در شکل ۴-۷۶ معرفی شده است.



شکل ۴-۷۶- ساختار کلی مبدل Push Pull.

بروز حالت های گذرا در هنگام راه اندازی و تغییرات ناگهانی بار می تواند نقطه کار در مشخصه B-H را به سوی نواحی اشباع مغناطیسی منحرف نماید. در شرایط اشباع کاهش ناگهانی اندوکتانس مغناطیسی باعث می شود سوئیچ های نیمه هادی به دلیل جریان های لحظه ای بزرگ آسیب ببینند. بنابراین حداکثر چگالی شار مغناطیسی به گونه ای اختیار می شود که مبدل در حالت های گذرا به طور عمیق وارد ناحیه اشباع نگردد. به طور تجربی $B_{max} = 0.2T$ اختیار می شود. مطابق رابطه ۲۰ داریم:

$$T/Sec.PF = f \cdot B_{max} = 50kHz \times 0.2 = 10000 \quad (23)$$

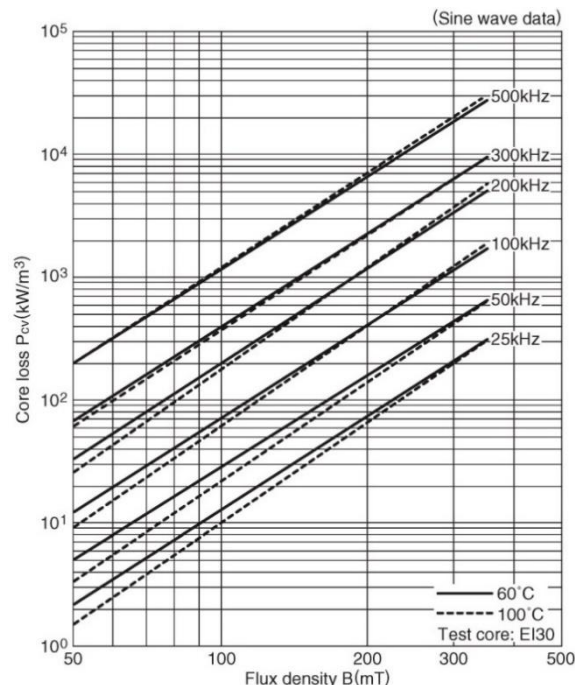
¹. Copper filling factor

². Power density

شکل ۴-۷۷ تلفات ویژه هسته فریت PC40 در فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد.

Core Loss (Typical)

Material: PC40



شکل ۴-۷۷- تلفات ویژه هسته فریت PC40 [۴۷].

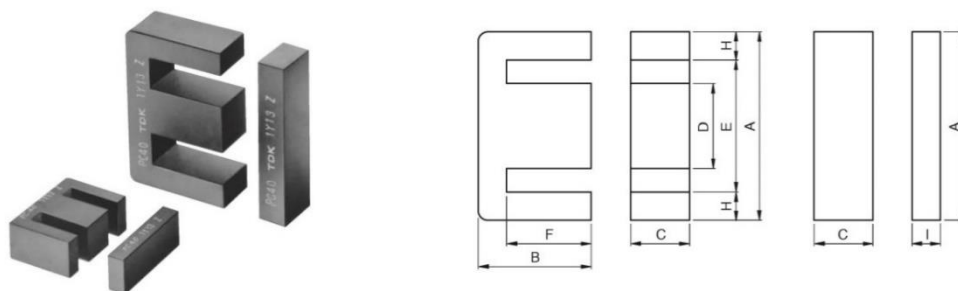
مطابق شکل ۴-۷۷ تلفات ویژه هسته در فرکانس 50kHz برابر $P_V = 170 \text{ kW/m}^3$ است. همچنین اگر حجم موثر هسته برابر $V_e = 1930 \text{ mm}^3$ در نظر گرفته شود [۴۷]، مطابق رابطه ۲۲ R_{th} برابر است با:

$$R_{th} = \frac{1}{\sqrt{V_e}} = \frac{1}{\sqrt{1930 \times 10^{-9}}} = 719.8 \quad (24)$$

از آنجایی که مقاومت ویژه مس برابر $\rho_{cu} = 1.68 \times 10^{-8} \Omega m$ است [۴۸]، باتوجه به شکل زیر سطح مقطع سیم‌پیچ برابر است با:

$$A_N = F \times \left(\frac{E-D}{2} \right) = 12.35 \times \left(\frac{19-6.5}{2} \right) = 77.19 \text{ mm}^2 \quad (25)$$

EI CORES

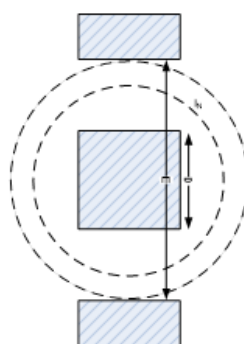


Part No.	JIS	Dimensions in		C	D	E	F	H	I
		A	B						
PC40EI12.5-Z	JIS FEI 12.5	12.4±0.3 .488±.012	7.4±0.1 .291±.004	4.85±0.15 .191±.006	2.4±0.1 .094±.004	8.8 .346	5.1±0.1 .201±.004	1.6 .063	1.5±0.1 .059±.004
PC40EI16-Z	JIS FEI 16	16.0±0.3 .630±.012	12.2±0.2 .480±.008	4.8±0.2 .189±.008	4.0±0.2 .157±.008	11.6 .457	10.2±0.2 .402±.008	2.05 .081	2.0±0.2 .079±.008
PC40EI19-Z		20.0±0.3 .787±.012	13.55±0.25 .533±.010	5.0±0.2 .197±.008	4.55±0.15 .179±.006	14.3 .563	11.15±0.15 .439±.006	2.75 .108	2.3±0.1 .091±.004
PC40EI22-Z		22.0±0.3 .866±.012	14.55±0.25 .573±.010	5.75±0.25 .226±.010	5.75±0.25 .226±.010	13.0 .512	10.55±0.25 .415±.010	4.5 .177	4.5±0.2 .177±.008
PC40EI22/19/6-Z	JIS FEI 22	22.0±0.4 .866±.016	14.7±0.2 .579±.008	5.75±0.25 .226±.010	5.75±0.25 .226±.010	15.75 .620	10.7±0.2 .421±.008	3.0 .118	4.0±0.2 .157±.008
PC40EI25-Z		25.3±0.5 .996±.020	15.55±0.25 .612±.010	6.75±0.25 .266±.010	6.5±0.3 .256±.012	19.0 .748	12.35±0.25 .486±.010	3.0 .118	2.7±0.2 .106±.008
PC40EI28-Z	JIS FEI 28	28.0 ^{+0.7} _{-0.5} 1.102 ^{+0.028} _{-.020}	16.75±0.25 .659±.010	10.6±0.2 .417±.008 (E core) 10.7±0.3 .421±.012 (I core)	7.2±0.3 .283±.012	18.4 .724	12.25±0.25 .482±.010	4.5 .177	3.5±0.3 .138±.012

شکل ۴-۷۸- مشخصات ابعاد هسته PC40EI25-Z [۴۷].

از طرفی با توجه به شکل ۴-۷۹، متوسط طول یک دور سیم پیچ برابر است با:

$$l_N = 2\pi r = 2\pi \times \frac{1}{2} \left(\frac{E+D}{2} \right) = \frac{\pi}{2} (19 + 6.5) = 40mm^2 \quad (۲۶)$$

شکل ۴-۷۹- l_N متوسط طول یک دور سیم پیچ.

با توجه به مقادیر به دست آمده، حداکثر توان قابل انتقال بر اساس رابطه ۱۹ برابر خواهد بود با $W/8$. از آنجایی که توان انتقالی برابر است با حاصل ضرب ولتاژ در جریان، می توان مقدار ولتاژ و جریان را تغییر داد به نحوی که مقدار توان ثابت بماند.

۴-۱۲- بهینه سازی سنتز نانوذرات فریت

از بین روش های سنتز بیان شده در بند ۳ گزارش فاز دوم، برای تهیه و مطالعه ویژگی های نمونه های فریتی از دو روش هم رسوبی و خود احتراقی استفاده شد. از جمله مزایای روش هم رسوبی می توان به قابلیت کنترل مناسب بر پارامترهای موثر رشد نانوذرات همانند زمان، دما، سرعت همزدن، غلظت واکنشگرها، pH، ساده و ارزان بودن، وقتگیر نبودن آن و توزیع یکنواخت اندازه نانوذرات اشاره کرد. همچنین می توان به این روش در حجم کم واکنش مقدار زیادی نانوذره ساخت.

همچنین روش احتراقی، به دلیل تولید محصولی همگن با درجه خلوص بالا و پایین بودن نسبی دما و زمان آن، یکی از بهترین روش های تولید نانوذرات است. در نهایت به دلیل مزایای روش هم رسوبی، هسته های مورد نظر (EI شکل) به این روش ساخته شدند.

جمع بندی

در ذیل به طور خلاصه به نتایج حاصل از بررسی های انجام شده در این فاز اشاره می شود:

۱- طبق بررسی های انجام شده در این فاز الگوهای پراش پرتو ایکس پودرهای فریتی تهیه شده به روش هم رسوبی و خود احتراقی با یکدیگر مقایسه شد. با تطبیق الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه ها با الگوهای نمونه های استاندارد، تشکیل ساختار اسپینلی نمونه های فریتی بدون وجود هرگونه فاز دیگر تایید شد.

۲- در نمونه تهیه شده به روش هم رسوبی در دماهای مختلف، مشاهده شد که دما بر پهنای قله ها تاثیر می گذارد، به نحوی که نمونه تهیه شده در دمای 25°C در مقایسه با نمونه های دیگر بیشترین پهنای را دارد.

۳- مقایسه میانگین اندازه بلورک های نمونه های مختلف نشان می دهد میانگین اندازه بلورک های نمونه های E_{15} ، E_{13} و S_2 نسبت به سایر نمونه ها بیشتر است. پهنای قله های پراش این نمونه ها در طیف های مربوطه نیز این موضوع را تایید می نماید.

۴- در نمونه تهیه شده به روش هم رسوبی در دماهای مختلف، مشاهده شد که با افزایش دمای پخت اندازه ذرات رشد یافته و بزرگتر می شوند، بنابراین اندازه بلورک های نمونه بزرگ می شود و در نتیجه پهنای قله ها کمتر می شوند. علاوه بر این مقایسه شدت قله ها نشان داد که شدت قله ها برای نمونه های پخت داده شده از دمای 1100°C به بعد کاهش یافته است که می تواند به دلیل جابجایی کاتیون ها در جایگاه های ساختار اسپینلی در اثر انرژی گرمایی باشد.

۵- پارامتر شبکه نمونه های A_9 ، E_{10} و E_{16} نسبت به سایر نمونه ها، بزرگتر است. به دلیل اختلاف شعاع یونی کاتیون های جانشانی شده در نمونه ها همچون منگنز، کبالت، نیکل و مس، پارامتر شبکه تغییر می کند.

۶- بررسی تصاویر FESEM نمونه های فریتی تهیه شده به روش هم رسوبی و خود احتراقی نشان داد که در کلیه نمونه ها، توزیع اندازه ذرات تقریباً یکنواخت و شکل ذرات کروی است.

۷- در تصاویر FESEM ذرات کلوخه ای دیده می شوند. در نانوذرات به علت نسبت بالای سطح به حجم، تمایل به هم چسبیدن برای کاهش سطح انرژی و رسیدن به حالت پایدار وجود دارد. همچنین از آنجایی که ذرات تهیه شده در این پژوهش مغناطیسی هستند، یکی دیگر از دلایل کلوخه ای بودن ذرات، می تواند برهمکنش های مغناطیسی بین آن ها باشد. یکنواختی در توزیع اندازه ذرات به میزان جاذبه مغناطیسی بین ذرات وابسته است و هرچه مقدار آن بیشتر باشد، ساختار یکنواختی کمتری دارد.

۸- با مقایسه اندازه ذرات نمونه های فریتی مشخص شد از میان نانوذرات فریتی نمونه های S_{10} ، E_{11} و E_{13} بیشترین اندازه را نسبت به سایر نانوذرات داشته است. در حالیکه نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ که در دماهای 1000°C و 1100°C

درجه سانتی گراد حرارت داشته شده است، اندازه ذرات آن بیش از ۱۰۰ نانومتر می باشد. همچنین به این دلیل که هر ذره از چندین بلورک تشکیل شده است بنابراین میانگین اندازه ذرات بیش از میانگین اندازه بلورکها است. همچنین نمونه تفجوشی شده به صورت تک مرحله‌ای دارای بالاترین اندازه ذره است. این اتفاق در کنترل رشد دانه ها، قابل انتظار است. با افزایش دما به دلیل افزایش سرعت رشد ذرات، اندازه ذرات نمونه افزایش می‌یابد و همچنین در افزایش دما به صورت تک‌مرحله‌ای، به دلیل عدم کنترل رشد ذره به صورت ناگهانی اندازه ذرات افزایش می‌یابد.

۹- بررسی مغناطش در حداکثر میدان (۹Koe) نمونه‌ها نشان داد که نمونه‌های S2، S7 و S8 بیشترین مغناطش را دارند. کلسیناسیون این نانوذرات در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند یکی از دلایل افزایش مغناطش این نانوذرات باشد.

۱۰- مقایسه میدان وادارندگی نمونه‌ها نشان داد که نانوذرات A3، A7، A8 و A10 کمترین مقدار نیروی وادارندگی را دارند. در واقع این نمونه‌ها به دلیل میدان وادارندگی کم می‌توانند تغات کمتری ایجاد نمایند.

۱۱- با بررسی مغناطش نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده در دماهای مختلف، مشخص شد که نمونه در دمای ۱۱۰۰ بالاترین مقدار مغناطش اشباع را دارد. همچنین بین نمونه‌های تفجوشی شده به صورت یک مرحله‌ای و دومرحله‌ای در فرکانس ۱۰۰ Hz بیشترین مقدار مغناطش در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق افتاده است.

۱۲- بررسی نمودارهای تراوایی در دمای اتاق نمونه های تهیه شده نشان داد که نانوذرات $Ni_{1-x}(Zn_x)Mg_{y/2}Cu_{y/2}Fe_2O_4$ بیشترین تراوایی را دارند.

۱۳- بررسی اتلاف نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ ، نشان داد که در فرکانس ۱۰۰ Hz و دمای ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد کمترین مقدار اتلاف را دارد.

۱۴- همچنین نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ در دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد دارای مقدار مغناطش اشباع، چگالی و تراوایی در محدوده ذکر شده در جدول مشخصات فنی است.

۱۵- طبق بررسی‌های انجام شده، نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ بهینه ترین نمونه برای هسته‌های ترانسفورماتور انتخاب شد.

منابع

- [1] H. Gleiter, Nanocrystalline materials, scienceDirect, vol. 33, no. 4,(1989)223-315.
- [۲] حمید ابراهیم نیا، اسکندر کشاورز علمداری، محمود کاظم زاد و یدالله گنج خانلو، سنتز نانوذرات اسپینل فریت کبالت به روش میکرومولسیون، مجله تحقیقات مواد نانو کامپوزیتی، (۱۳۸۸) ۲۶۱-۲۶۶.
- [3] R.S. Alam, MahmoodMoradi, MohammadRostami, HosseinNikmanesh, Razieh Moayedi and YangBai, Structural, magnetic and microwave absorption properties of doped Ba-hexaferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation method, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 381 (2015)1-9.
- [4] T. Pathak, N. Vasoya, V. Lakhani, and K. Modi, "Structural and magnetic phase evolution study on needle-shaped nanoparticles of magnesium ferrite," Ceramics International, vol. 36, pp. 275-281, 2010.
- [5] S. Manouchehri, S.T. Mohammadi Benehi and M.H. Yousefi, Effect of Aluminum Doping on the Structural and Magnetic Properties of Mg-Mn Ferrite Nanoparticles Prepared by Coprecipitation Method, Springer Science Business, 2016.
- [۶] محمد پرستگاری و مائده فولادگر، طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDS)، فصلنامه علمی سال اول، شماره ۲ (۱۳۹۶) ۱۹-۱۳.
- [۷] حمزه قربانی و مهین اشراقی، بررسی اثر آلایش کروم بر روی ویژگیهای ساختاری و مغناطیسی نانوذرات فریت $MnFe_{2-x}Cr_xO_4$ ، مجله پژوهش سیستمهای بس ذره‌ای، دوره ششم، شماره دوازدهم، زمستان ۱۳۹۵.
- [8] T. N. Brusentsova, N. A. Brusentsov, V. D. Kuznetsov and V. N. Nikiforov, Synthesis and investigation of magnetic properties of Gd-substituted Mn-Zn ferrite nanoparticles as a potential low-TC agent for magnetic fluid hyperthermia, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 293 (2005) 298-302.
- [9] S. Balci, I. Sefa, and N. Altin, An Investigation of Ferrite and Nanocrystalline Core Materials for Medium-Frequency Power Transformer, Journal of Electronic Materials, 2016.
- [10] J. P. Chen, C. M. Sorensen, K. J. Klabunde, G. C. Hadjipanayis, E. Devlin, A. Kostikas, Size-dependent magnetic properties of $MnFe_2O_4$ fine particles synthesized by coprecipitation, Physical Review B, (1996)9288-9296.
- [11] R. Street, P. McCormick, J. Amighian, M. Murio, Magnetic properties of ultrafine $MnFe_2O_4$ powders prepared by Mechanochemical processing ,Phys, (2001)54.
- [12] G. N. Saunders, J. P. Schille and A. P. Miodownik, Calculation of the temperature dependence of magnetic permeability for structural steels, in Sente Software, The Surrey Research Park, U.K.
- [13] J. L. Snok, Gyromagnetic Resonance in Ferrites, Nature, vol. 160, (1947).
- [14] O. Kitakami, G.W. Qin, $Ni_{80}Fe_{20}O_4$ permalloy nanoparticles: Wet chemical preparation, size control and their dynamic permeability characteristics when composited with Fe micron particles ,Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 321, no. 24,(2009). 4057-4062.
- [۱۵] مهین اشراقی، حمزه قربانی، بررسی اثر آلایش کروم بر روی ویژگیهای ساختاری و مغناطیسی نانوذرات فریت $MnFe_{2-x}Cr_xO_4$ ، مجله پژوهش سیستمهای بس ذره‌ای، دوره ششم، شماره ۱۲، ۱۳۹۵.
- [16] J. M. Hasting and L. M. Corliss, Neutron Diffraction Studies of Zinc Ferrite and Nickel Ferrite, Reviews of Modern Physics, 25 (1953) 114-119.
- [17] M. Wu and A. Hoffmann, Recent Advances in Magnetic Insulators - From Spintronics to Microwave Applications, Volume 64, 2013.

- [۱۸] هومان شکرالهی، خواص مغناطیسی مواد، شیراز تخت جمشید، دانشگاه صنعتی شیراز، ۱۳۹۴.
- [19] C. Kittel, Introduction to solid state physics, Wiley New York, 1976.
- [20] E. J. Verwey, P. W. Haayman and F. C. Romejin, physical properties and Cation Arrangement of Oxide with Spinel Structures, Journal of Chemical physics, 15 (1953) 321-342.
- [21] B. D. Cullity, introduction to magnetic materials, 1972.
- [22] A. Globus, Some physical considerations about the domain wall size theory of magnetization mechanisms, J. Phys. Collog., 38C1, 1977.
- [23] B. S Chauhan, R. Kumar, K. M. Jadhav and M. Singh, Magnetic study of substituted Mg-Mn ferrites synthesized by citrate precursor method, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 183 (2004) 71-81.
- [24] M. A. Ahmed, The effect of urea-to-nitrates ratio on the morphology and magnetic properties of $Mn_{0.8}Mg_{0.2}Fe_2O_4$, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 322 (2010) 763-766.
- [25] T. Tsutaoka, Frequency dispersion of complex permeability in Mn-Zn and Ni-Zn spinel ferrites and their composite materials, Journal of Applied Physics, (2003) 2789-2796.
- [26] B. Thangjam, Structural, electrical and magnetic properties of Mg doped Ni-Cu-Zn Nano ferrites synthesized by Citrate Precursor method, International Journal of Applied Engineering, 23 (2017).
- [27] M. Murio, R. Street, P. G. McCormik and J. Amighian, Magnetic properties of ultrafine $MnFe_2O_4$ powders prepared by Mechanochemical processing, Journal of Physics, 54 (2001).
- [28] Application Note 1297, "Solutions for measuring permittivity and permeability," Agilent literature number 5965-9430E.
- [29] Biju Thangjam, Structural, electrical and magnetic properties of Mg doped Ni-Cu-Zn nanoferrites synthesized by Citrate Precursor method, International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562, Volume 12, Number 23 (2017) pp. 13201-13206.
- [۳۰] ابراهیم پایمزد، قادر احمدپور، علی قاسمی، تاثیر دمای تفجوشی و افزودنی مس بر خواص ساختاری و مغناطیسی فریت نیکل - روی، مواد پیشرفته در مهندسی، ۱۳۹۲.
- [31] M. Satalkar, S. N. Kane, M. Kumaresavanji and J. P. Araujob, On the role of cationic distribution in determining magnetic properties of $Zn_{0.7}xNi_xMg_{0.2}Cu_{0.1}Fe_2O_4$ nano ferrite, Magnetic Materials Laboratory, School of Physics, D. A. University, Khandwa road Campus, Indore – 452001, India.
- [32] Goldman, Modern Ferrite Technology, New York: Van Nostrand Reihold, 1990.
- [33] M Satalkar and S N Kane, On the study of Structural properties and Cation distribution of $Zn_{0.75}-xNi_xMg_{0.15}Cu_{0.1}Fe_2O_4$ nano ferrite: Effect of Ni addition, Journal of Physics: Conference Series 755 (2016) 012050.
- [34] S. N. Kane and M. Satalkar, Correlation between magnetic properties and cationic distribution of $Zn_{0.852}xNi_xMg_{0.05}Cu_{0.1}Fe_2O_4$ nano spinel ferrite: effect of Ni doping, Magnetic Materials Laboratory, School of Physics, D. A. University, Khandwa Road Campus, Indore 452001, India, 24 June 2016.
- [35] Ali Ghasemi, Ebrahim Ghasemi and Ebrahim Paimozd, Influence of copper cations on the magnetic properties of NiCuZn ferrite nanoparticles, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 323 (2011) 1541–1545.
- [36] Xiansong Liua, Wei Zhong, Sen Yang, Zhi Yu, Benxi Gu and Youwei Dua, Influences of La^{3+} substitution on the structure and magnetic properties of M-type strontium ferrites, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 238 (2002) 207–214.

- [37] Na Chen, Kai Yang and Mingyuan Gu, Microwave absorption properties of La-substituted M-type strontium ferrites, *Journal of Alloys and Compounds* 490 (2010) 609–612.
- [38] A.G Horeshi, M.Shahzad, H. Waqas, Effect of Firing Temperature on the Electromagnetic Properties of Electronic Transformer Cores Developed by Using Nanosized Mn–Zn Ferrite Powders, *Springer*, vol. 28, no. 2, p. 159–163, 2015.
- [39] M. Mozaffari, S. Manouchehri, M.H. Yousefi and J. Amighian, The effect of solution temperature on crystallite size and magnetic properties of Zn substituted Co ferrite nanoparticles, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322 (2010) 383–388.
- [40] I.H. Gul, W. Ahmed and A. Maqsood, Electrical and magnetic characterization of nanocrystalline Ni–Zn ferrite synthesis by co-precipitation route, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320 (2008) 270–275.
- [41] A.S. Albuquerque, J.D. Ardisson and W.A. A. Macedo, Nanosized powders of NiZn ferrite: Synthesis, structure, and magnetism, *Journal of Applied Physics* 87, 4352 (2000).
- [۴۲] هومان شکرالهی، خواص مغناطیسی مواد، شیراز تخت جمشید، دانشگاه صنعتی شیراز، ۱۳۹۴.
- [43] J. Amighian, et al; “Preparation of Nano-Sized Manganese Ferrite (MnFe [2]O[4]) via Coprecipitation Method,” *J.Phys.Stat. Sol. C*, 3.
- [44] TDK, “Ferrites and accessories” Application notes, May 2017.
- [45] G. Roespel, “Effect of the magnetic material on the shape and dimensions of transformers and chokes in switched mode power supplies”, *J. of Magn. and Magn. Materials* 9 (1978) 145–49.
- [46] TDK, “Ferrites and accessories” General - Definitions, May 2017.
- [47] TDK, “Ferrite for Switching Power Supplies” Sep. 2004.
- [48]https://fa.wikipedia.org/wiki/%D9%85%D9%82%D8%A7%D9%88%D9%85%D8%AA_%D9%88_%D8%B1%D8%B3%D8%A7%D9%86%D8%A7%DB%8C%DB%8C_%D9%88%DB%8C%DA%98%D9%87_%D8%A7%D9%84%DA%A9%D8%AA%D8%B1%DB%8C%DA%A9%DB%8C

فصل پنجم :

فاز پنجم – ساخت و مشخصه‌یابی

مقدمه

ترانسفورماتورهای مرسوم که در سیستم‌های قدرت استفاده می‌شوند با عنوان ترانسفورماتورهای فرکانس پایین شناخته می‌شوند، زیرا فرکانس کاری در سیستم‌های قدرت ثابت است (۵۰ هرتز در ایران) است. از جمله عواملی که سبب شد برای کاهش تلفات در شبکه، فرکانس کاری افزایش و ابعاد و وزن ترانسفورماتور کاهش یابد، عبارتند از اندازه بزرگ، وزن بالا، افت ولتاژ، عدم تنظیم کیفیت توان، مشکلات زیست محیطی و نداشتن خروجی برق مستقیم یا ظرفیت ذخیره‌سازی ترانسفورماتورهای مرسوم که با فرکانس شبکه (۵۰ هرتز) کار می‌کنند، هسته‌های آهنی بزرگ و سیم‌پیچی مسی سنگین در آن‌ها.

اگرچه در طول سالیان گذشته اصلاحاتی در جهت بهبود و رفع مشکلات ترانسفورماتورهای معمولی صورت گرفته است اما ظهور و گسترش ریزشبه‌های هوشمند قدرت، نیاز به وجود ترانسفورماتورهای هوشمند با اندازه قابل قبول را به وجود آورده است. در این بین ترانسفورماتور الکترونیک قدرت^۱ را می‌توان به عنوان یک انقلاب در زمینه الکترونیک قدرت به خصوص در ریزشبه‌های هوشمند به حساب آورد که جنس هسته آن فریت است. طبق بررسی‌های انجام شده در فاز اول، دوم و سوم پروژه و همچنین مشخصات فنی هسته مورد نظر که در فاز دوم ارائه شد، در این مرحله از پروژه موارد ذیل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۵-۱- ساخت قالب بر اساس شکل هسته مشخص شده

۵-۲- ساخت نمونه هسته فریتی

۵-۳- نحوه سیم‌پیچی هسته

۵-۴- انجام آزمون با مغناطیس‌سنج گرادیان نیروی متناوب (AGFM) و یا (VSM)

۵-۵- سنجش دمای کوری

۵-۶- اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌ها بر حسب دما

۵-۷- تعیین قسمت‌های حقیقی و موهومی تراوایی مغناطیسی (μ)

۵-۸- تعیین اتلاف مغناطیسی

۵-۹- تعیین بازه فرکانسی در هسته‌های فریتی موردنظر

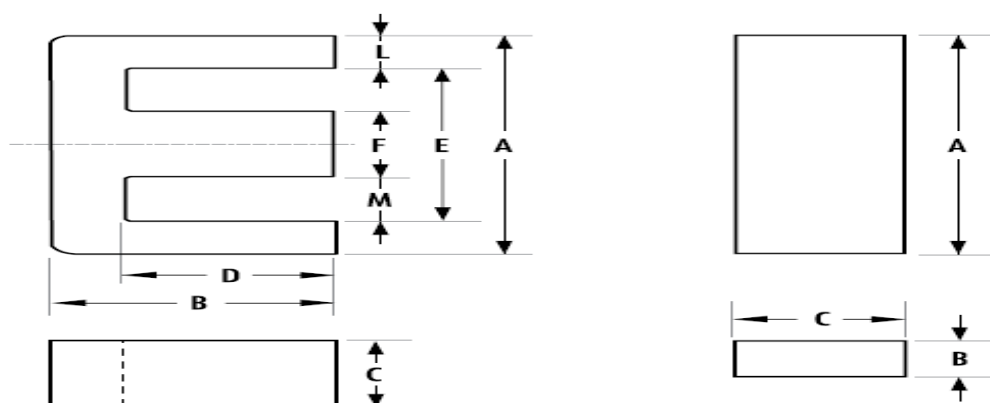
۵-۱۰- سنجش فاکتورهای بسامد و ولتاژ هسته فریتی

۵-۱۱- بهینه‌سازی ساخت هسته فریتی

۵-۱- ساخت قالب بر اساس شکل هسته مشخص شده

همانطور که در بند ۵ فاز دوم پروژه به طور کامل بیان شد، از بین شکل‌های مختلف هسته انتخابی برای این پروژه، اشکال EI و Toroid به لحاظ کاربردی تر بودن این نوع اشکال در ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت انتخاب شدند. لازم به ذکر است، طبق پروژه ای در گروه پژوهشی الکترونیک قدرت پژوهشگاه نیرو در خصوص ساخت ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت، هسته ترانسفورماتور از جنس فریت و با شکل EI لحاظ شده است. بنابراین قالب هسته‌های فریتی EI شکل با مشخصات فنی ذکر شده در شکل ۵-۱ و جدول ۵-۱ ساخته شد.

^۱ PET



شکل ۵-۱- هسته فریتی EI شکل.

جدول ۵-۱- مشخصات فنی هسته های فریتی با شکل EI

Core dimensions (mm)								
Type/Size	A	B	C	D	E	F	L	M
E25/16/6	25.4 ± 0.38	15.9 ± 0.25	6.35 ± 0.25	12.6	18.8	6.35 ± 0.13	3.12 ± 0.13	6.4 ± 0.25
I 25/3/6	25.4 ± 0.38	3.18 ± 0.12	6.35 ± 0.25	-	-	-	-	-

مطابق با مشخصات فنی ذکر شده در جدول بالا، قالب مورد نظر آماده شد. شکل این قالب در زیر نشان داده شده است.



شکل ۵-۲- قالب هسته EI ساخته شده.

در ابتدا برای بررسی ویژگی های نمونه ها، به کمک قالب فلزی توروئیدی^۱ از جنس فولاد که در شکل ۵-۳ نشان داده شده است هسته های حلقوی آزمایشگاهی آماده شد. این قالب از چهار قسمت بدنه قالب، سمبه، زیرسمبه و میله تشکیل شده است.

^۱. Toroid



شکل ۵-۳- قالب فلزی استفاده شده در این پروژه.

۵-۲- ساخت نمونه هسته فریتی

جهت تهیه نمونه آزمایشگاهی هسته فریتی، نانوپودرها با استفاده از قالب مشخص شده در بند ۱، در ابتدا قالب فلزی توسط الکل جهت رفع تمامی آلودگی ها کاملاً شسته شده و دیواره داخلی آن نیز با گلیسیرین به عنوان روانساز آغشته می گردد. میزان مشخص از هر نانوپودر (حدود ۱ گرم) به همراه مواد آلی ترکیب شده با آن در قالب ریخته و به منظور اعمال فشار قالب زیر دستگاه پرس هیدرولیک قرار داده شد. کنترل این دستگاه توسط یک فشارسنج و دو اهرم انجام می شود. فشار را تا مقدار نهایی آن به آرامی بالا برده و پس از مدت زمان ۲ دقیقه فشار وارده به طور آهسته کم شد و در نهایت قالب از دستگاه خارج گردید. نمایی از این دستگاه در شکل ۵-۴ آورده شده است.



شکل ۵-۴- دستگاه پرس هیدرولیک.

به منظور جداسازی پلی ونیل الکل و گلیسیرین از نانوپودرهای فشرده شده، حلقه های ساخته شده را در کوره الکتریکی با قابلیت اعمال شیب دمایی قرار داده شدند. شیب حرارتی مورد استفاده عبارت است از: مرحله اول رسیدن به دمای 900°C به مدت ۶ ساعت، مرحله دوم پایداری و ماندن در آن دما به مدت ۲ ساعت و مرحله سوم سرد شدن و رسیدن به دمای اتاق به صورت آزاد به مدت ۱۴ ساعت. پس از اینکه هسته ها از کوره خارج شدند، در محلول آب، اسیدسولفوریک

و اسیدنیتریک با نسبت مولی ۲، ۱ و ۱ به عنوان محلول خورنده، به مدت ۲ دقیقه در دمای ۶۰ درجه قرار گرفتند. شکل ۵-۵ تصویری از هسته‌های حلقوی و EI شکل تهیه شده نشان داده شده است.



شکل ۵-۵- هسته های ساخته شده از پودرهای تهیه شده (الف) هسته های حلقوی و (ب) هسته E شکل.

۵-۳- نحوه سیم پیچی هسته

پس از تهیه حلقه ها، هر حلقه با مقدار مناسب از سیم مسی روکش دار به طور متوسط حدودا ۵ تا ۶ دور سیم پیچی شدند. در شکل زیر نمونه ای از حلقه های سیم پیچی شده نشان داده شده است.



شکل ۵-۶- هسته سیم پیچی شده.

۵-۴- انجام آزمون با مغناطیس سنج گرادیان نیروی متناوب (AGFM) و یا (VSM) و سنجش دمای کوری

طبق بررسی های انجام شده در فاز دوم، سوم و چهارم پروژه و همچنین هدف این پژوهش که بررسی تاثیر جانشانی تمام کاتیون های مناسب در نمونه ها و همچنین هر دو فریت نیکل روی و منگنز روی است، بنابراین حدود ۴۳ ماده فریتی از نوع نیکل روی و منگنز روی جانشانی شده با کاتیون های مس، کبالت، منگنز، منیزیم به شرح ذیل، با

فرمول‌های استوکیومتری مربوطه به دو روش هم رسوبی و خوداحتراقی سنتز شدند. این پودرهای فریتی بر اساس فرمول‌های استوکیومتری زیر تهیه شده است.

الف- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس سنتز شده به روش خود احتراقی با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ مقادیر x ، $0/3$ ، $0/5$ ، $0/7$ و 1 و y مقادیر 0 ، $0/4$ ، $0/8$ و 1 را گزینش می کند.

ب- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ مقادیر x ، $0/1$ ، $0/3$ و $0/5$ و y مقادیر 0 ، $0/5$ و 1 را گزینش می کند.

ج- فریت روی جانشانی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ مقادیر x و y هر دو، مقادیر 0 ، $0/4$ ، $0/8$ و 1 را گزینش می کند.

تمام پودرهای تهیه شده به همراه فرمول استوکیومتری آن‌ها در جدول ۳-۲ آورده شده است.

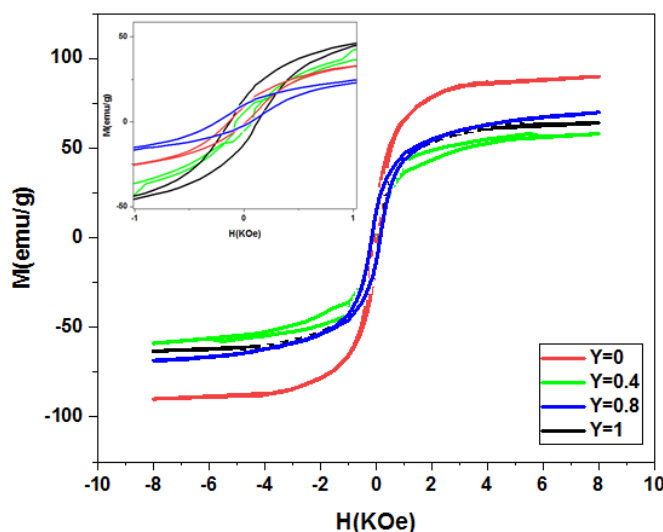
به منظور بررسی تاثیر دما بر نمونه‌های تهیه شده، از بین نمونه‌ها، نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ به روش هم‌رسوبی تهیه شد و پس از تهیه تحت عملیات تفجوشی در دماهای مختلف قرار گرفت. در نهایت ویژگی‌های آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

۴-۵- ویژگی‌های مغناطیسی مربوط به آزمون‌های AGFM و دمای کوری نمونه‌های تهیه شده

الف- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی

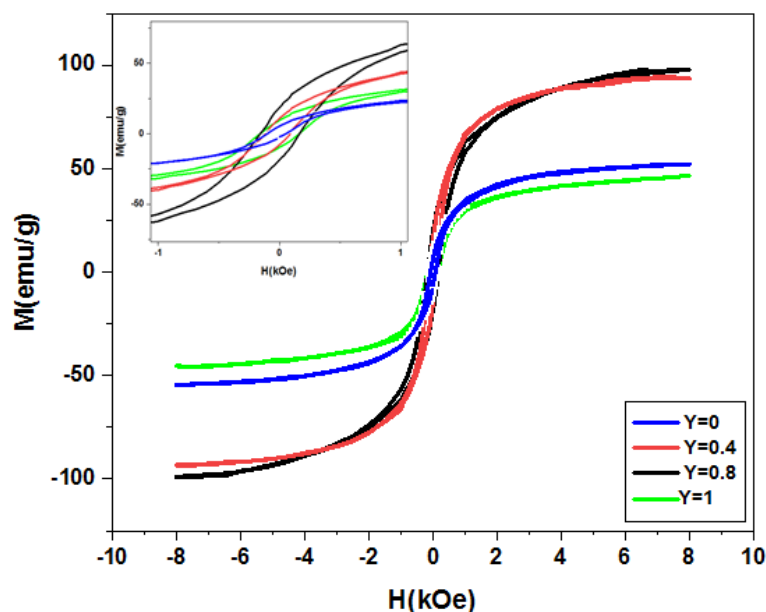
با فرمول استوکیومتری $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O$

حلقه‌های پسماند نانوذرات فریت نیکل - روی جانشانی شده در دمای اتاق با کاتیون‌های مس و منیزیم در غلظت‌های گوناگون (نمونه‌های ۱ تا ۱۷ جدول ۳-۲)، کلسینه شده در دمای $600^\circ C$ در مدت ۲ ساعت در حداکثر میدان $9 K Oe$ در شکل ۵-۷ نشان داده شده است.

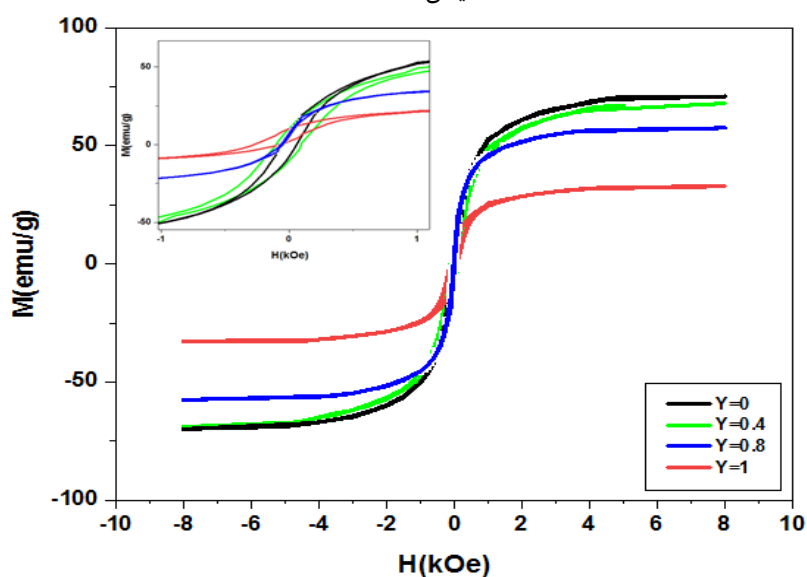


شکل ۵-۷- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل - روی $(Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4)$ برای $x = 0/3$ در حداکثر میدان $9 K Oe$.

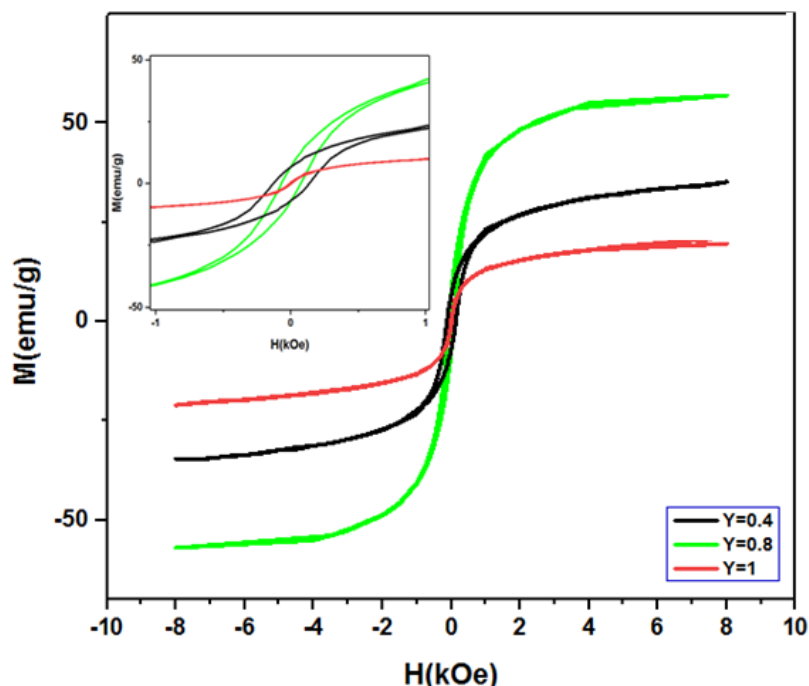
همان گونه که از شکل ۵-۷ دیده می شود، حلقه ها دارای مغناطش بزرگ و نیروی وادارندگی کم می باشد که از ویژگی های حلقه های پسماند فازهای مغناطیسی نرم است. لذا می توان گفت که نمونه های تهیه شده به روش احتراقی با ساختار مغناطیسی اسپینلی سازگاری خوبی دارد. انتهای حلقه ها در حداکثر میدان های به کار رفته نشان می دهد که به طور کامل افقی نشده و به اشباع کامل نرسیده اند. برای بیان بهتر نیروی وادارندگی نمونه ها، حلقه های پسماند برای محدوده میدان ۱ تا ۱- KOe و قسمت میانی این نمودار در مقیاس مناسب تری به عنوان شکل داخلی آورده شده است. در شکل های ۵-۸ تا ۵-۱۰ حلقه پسماند نانوذرات فریت نیکل-روی در دمای اتاق در حداکثر میدان ۹ KOe اندازه گیری شده را با غلظت های (۱ و ۰/۷ و ۰/۵ و ۰/۴ و ۰/۸ و ۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۳ و ۰/۶ و ۰/۹) نشان داده شده است.



شکل ۵-۸- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل-روی $(\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4)$ برای $x = 0.5$ در حداکثر میدان ۹ KOe.



شکل ۵-۹- حلقه های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل-روی $(\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4)$ برای $x = 0.7$ در حداکثر میدان ۹ KOe.



شکل ۵-۱۰- حلقه‌های پسماند دمای اتاق نانوذرات فریت نیکل- روی ($(\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4)$) برای $x=1$ در حداکثر میدان ۹kOe.

همان‌گونه از شکل‌های ۵-۸ تا ۵-۱۰ مشاهده می‌شود مغناطش هیچ‌یک از این نمونه‌ها، در این میدان به اشباع نرسیده است (همانند شکل ۵-۷). نیروی وادارندگی با توجه به شکل‌های داخلی رسم شده در مقیاس مناسب‌تر از نمونه‌ها افزایش می‌یابد. مقدارهای وادارندگی کم معمولاً به دلیل رشد ذرات نمونه‌ها و در نتیجه افزایش تعداد حوزه‌های مغناطیسی در هر ذره است. این پدیده نشان‌دهنده تأثیرگذاری روش ساخت و شرایط محیطی آزمایش بر ویژگی‌های مغناطیسی است. مقدارهای مغناطش اشباع، مغناطش باقی‌مانده و نیروی وادارندگی برای تمامی نمونه‌ها در جدول ۵-۲ آورده شده است.

جدول ۵-۲- ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات نیکل-روی سنتز شده به روش احتراقی

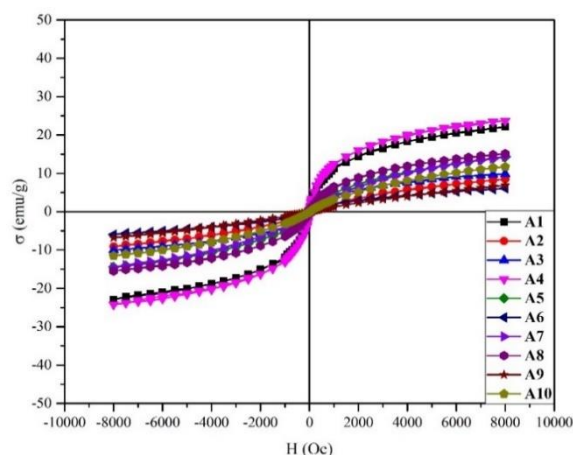
نمونه	M (emu/g) (9kOe)	Mr (emu/g)	Hc(Oe)	چگالی (g/cm ³)
S1= Ni Fe ₂ O ₄	۳۱/۱۵	۵/۳۰	۱۳۳/۵۰	۳/۶۹
S2= Ni _{0.7} (Zn) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۸۸/۶۲	۱۱/۵۰	۸۳/۱۰	۴/۶۶
S3= Ni _{0.7} (Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۵۷/۵۵	۶/۶۵	۹۶/۷۴	۳/۹۵
S4= Ni _{0.7} (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۶۹/۰۱	۱۳/۸۵	۱۶۷/۴۲	۴/۲۹
S5= Ni _{0.7} (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۶۲/۳۲	۱۳/۲۶	۱۲۶/۳۹	۴/۲۵
S6= Ni _{0.5} (Zn) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۷۵/۵۲	۶/۱۷	۷۹/۱۵	۳/۹۷
S7= Ni _{0.5} (Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۹۳/۷۱	۱۴/۸۵	۹۵/۹۵	۴/۸۱

S8=Ni _{0.5} (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۹۸/۳۷	۱۸/۷۵	۱۶۱/۸۱	۴/۹۳
S9=Ni _{0.5} (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۴۶/۲۵	۹/۷۱	۱۶۰/۶۵	۳/۹۵
S10= Ni _{0.3} (Zn) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۷۰/۶۵	۲/۰۹	۸/۳۸	۴/۵۱
S11=Ni _{0.3} (Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۶۹/۷۸	۷/۷۴	۶۰/۵۱	۴/۴۲
S12=Ni _{0.3} (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۶۷/۲۵	۱۰/۲۵	۹۶/۹۵	۴/۲۷
S13=Ni _{0.3} (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۴۰/۳۲	۸/۲۵	۹۵/۹۵	۳/۹۹
S14= (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) Fe ₂ O ₄	۵۵/۱۲	۶/۹۷	۷۱/۲۵	۳/۹۸
S15=(Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) Fe ₂ O ₄	۳۷/۸۵	۰/۹۸	۸/۲۵	۳/۲۱
S16= Zn Fe ₂ O ₄	۱/۷۸	-	-	۳/۵۹
S17= (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) Fe ₂ O ₄	۳۴/۷۵	۶/۸۱	۸۳/۶۲	۴/۵۹

همان طور که از جدول بالا مشاهده می شود، بیشترین مغناطش در بین نمونه ها مربوط به نمونه ی فریت نیکل - روی با مقدار جانشانی ($y=0/8$ و $x=0/5$) کاتیون های مس و منیزیم است. همچنین بیشترین نیروی وادارندگی مربوط به مقدار جانشانی ($y=0/8$ و $x=0/3$) کاتیون های مس و منیزیم است. در ضمن نیروی وادارندگی تمام نمونه های جانشانی شده با کاتیون های مس و منیزیم از نمونه ی فریت نیکل - روی بیش تر است.

ب- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$

منحنی های پسماند دمای اتاق نمونه های ۱۸ تا ۲۷ جدول ۳-۲ در حداکثر میدان (۸ KOe) در شکل ۵-۱۱ آورده شده است.



شکل ۵-۱۱- منحنی پسماند نانوذرات فریت $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار x و y متفاوت.

همان گونه که از شکل مشاهده می شود، نمونه های تهیه شده دارای نیروی وادارندگی بسیار کم هستند. مغناطش تمام نمونه ها در حداکثر مقدار میدان (۸ KOe) به اشباع نرسیده است و منحنی ها هنوز کاملاً افقی نشده اند. داشتن مقدار

نیروی وادارندگی بسیار کم و باریک بودن منحنی های پسماند بیانگر ویژگی مغناطیسی نرم فریت منگنز-روی می باشد [۱]. به کمک منحنی های پسماند می توان ویژگی های مغناطیسی نمونه ها از قبیل مغناطش در حداکثر میدان (KOe) (۸) و نیروی وادارندگی را به دست آورد. در جدول ۵-۳ ویژگی های مغناطیسی نمونه ها بیان شده است.

جدول ۵-۳- ویژگی های مغناطیسی نانوذرات فریت $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار x و y گوناگون

کد نمونه	x	Y	فرمول استوکیومتری	σ (emu/g)	H_c (Oe)
A ₁	۰	-	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	۲۲/۰۹	۷
A ₂	۰/۱	۰	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni]_{0.1}Fe_2O_4$	۹/۸۸	۲۲
A ₃		۰/۵	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.1}Fe_2O_4$	۹/۱۱	۲
A ₄		۱	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Co]_{0.1}Fe_2O_4$	۲۳/۶۹	۹
A ₅	۰/۳	۰	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Ni]_{0.3}Fe_2O_4$	۱۴/۲۱	۱۴
A ₆		۰/۵	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.3}Fe_2O_4$	۶/۰۷	۲
A ₇		۱	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Co]_{0.3}Fe_2O_4$	۱۴/۳۳	۴
A ₈	۰/۵	۰	$Zn_{0.5}[Ni]_{0.5}Fe_2O_4$	۱۵/۱۳	۲
A ₉		۰/۵	$Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.5}Fe_2O_4$	۶/۸۷	۵
A ₁₀		۱	$Zn_{0.5}[Co]_{0.5}Fe_2O_4$	۱۱/۷۲	۲

همان گونه که از جدول مشاهده می شود، نمونه ها دارای مقدار مغناطش پایین در حداکثر میدان می باشند. یکی از دلایل این موضوع، می تواند به کوچک شدن اندازه ذرات مربوط شود. طبق رابطه ۱ با کاهش اندازه ذره، مغناطش کاهش می یابد [۱ و ۲]. همچنین با توجه به تصویرهای FE-SEM، چون اندازه ذرات کمتر از ۱۳ نانومتر محاسبه شد، پایین بودن مقدار مغناطش دور از انتظار نیست.

برای بررسی دمای کوری در نمونه ها، نمونه های A₁، A₂، A₃، A₇ و A₉ از جدول ۳-۲ تحت آزمون دمای کوری قرار داده شدند. نتیجه به دست آمده در جدول ۵-۴ بیان شده است.

جدول ۵-۴- مقادیر دمای کوری نمونه های A₁، A₂، A₃، A₇ و A₉

کد نمونه	فرمول استوکیومتری	دمای کوری (°C)
A ₁	$Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	۱۷۵
A ₂	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni]_{0.1}Fe_2O_4$	۱۲۱
A ₃	$Mn_{0.4}Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co_{0.5}]_{0.1}Fe_2O_4$	۱۲۰
A ₇	$Mn_{0.2}Zn_{0.5}[Co]_{0.3}Fe_2O_4$	۸۷
A ₉	$Zn_{0.5}[Ni_{0.5}Co]_{0.5}Fe_2O_4$	۸۲

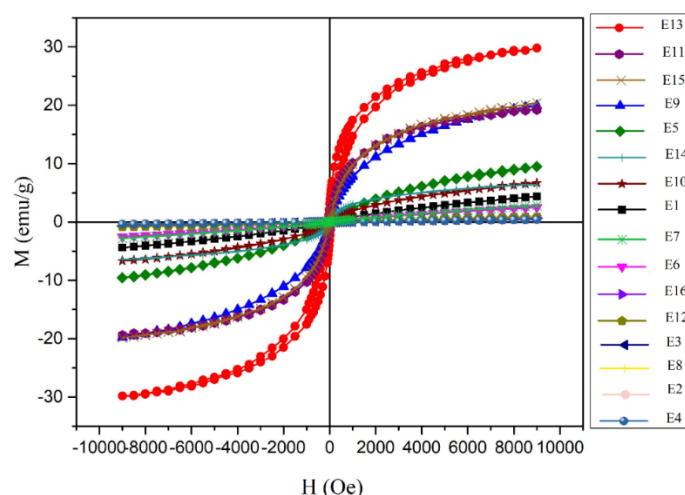
همان گونه که از جدول بالا مشاهده می شود، دمای کوری نمونه A₁ نسبت به نمونه A₂ و همچنین نمونه A₃ نسبت به نمونه A₇ کاهش چشمگیری داشته است. این کاهش می تواند به دلیل کاهش قدرت برهمکنش بین جایگاه A و B باشد. از آنجا که گشتاور مغناطیسی کاتیون منگنز از کاتیون های نیکل و کبالت بیشتر است، با کاهش درصد کاتیون منگنز گشتاور کاهش یافته و به تبع آن قدرت برهمکنش بین جایگاه های A و B کاهش می یابد، بنابراین دمای کوری کاهش یافته است [۳ و ۴]. در دمای کوری نظم اسپینی و برهمکنش های تبادلی در اثر اختلال حرکت گرمایی تصادفی از بین می رود و فریت از حالت فری مغناطیس به حالت پارامغناطیس تبدیل می شود. مغناطش با دما رابطه عکس

دارد [۵]، از اینرو برای محاسبه دمای کوری می توان تغییرات مغناطش را برحسب دما ثبت کرد و دمای کوری دمایی خواهد بود که در آن مغناطش صفر شده است [۶].

ج- فریت روی جانشانی شده با منگنز، نیکل، کبالت و مس سنتز شده به روش هم رسوبی با

فرمول استوکیومتری $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$

در شکل ۵-۱۲ منحنی های پسماند دمای اتاق نمونه های فریتی E1 الی E16 در حداکثر میدان مغناطیسی ۹kOe نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲- منحنی پسماند نانوذرات فریت $Zn_{1-x}Fe_{2-y}[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ با مقدار X و y متفاوت.

همان گونه که از شکل ۵-۱۲ مشاهده می شود مغناطش تمام نمونه ها در حداکثر مقدار میدان (۹ KOe) به اشباع نرسیده است و منحنی ها کاملاً افقی نشده اند. نمونه های فریتی دارای نیروی وادارندگی حدود ۸۰-۸۰۰ Oe هستند. مقدار نیروی وادارندگی کم و باریک بودن منحنی های پسماند بیانگر ویژگی مغناطیسی نرم نمونه های فریتی است [۱]. به کمک منحنی های پسماند می توان ویژگی های مغناطیسی نمونه ها از قبیل مغناطش در حداکثر میدان (KOe) و نیروی وادارندگی را به دست آورد. در جدول ۵-۵ ویژگی های مغناطیسی نمونه ها بیان شده است.

جدول ۵-۵- ویژگی های مغناطیسی نانوذرات فریت $Zn_{1-x}Fe_2-y[(Mn_xNi_{1-x})_y(Co_xCu_{1-x})_{1-y}]_{x+y}O_4$ با مقدار x و y گوناگون

نام نمونه	نانوذرات فریتی	M (emu/g)	H_c (oe)	Mr (emu/g)
E1	$ZnFe_2O_4$	۴/۴۰	۲۰	۰/۱۲
E2	$Zn_{1.6}Fe_{0.4}[(Ni_{0.4}Cu_{0.6})_{0.4}]O_4$	۰/۶۲	۴۰	۰/۱۰
E3	$Zn_{1.2}Fe_{0.8}[(Ni_{0.8}Cu_{0.2})_{0.8}]O_4$	۰/۶۶	۳۰	۰/۱۱
E4	$ZnFeNiO_4$	۰/۳۹	۷۰	۰/۰۹
E5	$Zn_{0.6}Fe_2[(Co_{0.4}Cu_{0.6})_{0.4}]O_4$	۹/۴۷	۲۰	۱/۱۷
E6	$Zn_{0.6}Fe_{1.6}[(Mn_{0.4}Ni_{0.6})_{0.4}(Co_{0.4}Cu_{0.6})_{0.6}]O_4$	۲/۴۱	۳۰	۰/۰۴
E7	$Zn_{0.6}Fe_{1.2}[(Mn_{0.4}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.4}Cu_{0.6})_{0.2}]O_4$	۲/۸۰	۲۰	۰/۰۵
E8	$Zn_{0.6}Fe_{1.4}[(Mn_{0.4}Ni_{0.6})_{1.4}]O_4$	۰/۶۶	۶۰	۰/۰۲
E9	$Zn_{0.2}Fe_2[(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.8}]O_4$	۱۹/۲۲	۹	۲/۵۵
E10	$Zn_{0.2}Fe_{1.6}[(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.6}]O_4$	۶/۶۹	۴۰	۱/۵۱
E11	$Zn_{0.2}Fe_{1.2}[(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{0.8}(Co_{0.8}Cu_{0.2})_{0.2}]O_4$	۲۰/۴۲	۱۰	۳/۴۸
E12	$Zn_{0.2}Fe_{1.8}[(Mn_{0.8}Ni_{0.2})_{1.8}]O_4$	۰/۶۸	۳۰	۰/۰۳
E13	$CoFe_2O_4$	۲۹/۷۹	۸	۶/۹۵
E14	$Fe_{1.6}[(Mn_{0.4}Co_{0.6})_{1.4}]O_4$	۶/۳۸	۵۰	۰/۰۵
E15	$Fe_{1.2}[(Mn_{0.8}Co_{0.2})_{1.8}]O_4$	۲۰/۴۲	۲۰	۳/۳۹
E16	Mn_2FeO_4	۰/۸۲	۸۰	۰/۰۶

همان گونه که از جدول بالا مشاهده می شود، نمونه ها دارای مقدار مغناطش پایین در حداکثر میدان می باشند. علت این موضوع می تواند به کوچک شدن اندازه ذرات مربوط شود. طبق معادله ۱ با کاهش اندازه ذره، مغناطش کاهش می یابد [۲]. از آنجا که اندازه ذرات کمتر از ۲۵ نانومتر است، پایین بودن مقدار مغناطش دور از انتظار نیست.

۵-۴-۱- مقایسه نتایج حاصل از بررسی آزمون های AGFM و دمای کوری نمونه های فریتی تهیه شده

با استفاده از منحنی های پسماند ویژگی های مغناطیسی نمونه ها از قبیل مغناطش در حداکثر میدان (۹ KOe) و نیروی وادارندگی اندازه گیری و نتایج مربوط به آن در جدول ۵-۶ آورده شده است.

جدول ۵-۶- ویژگی های مغناطیسی نانوذرات فریتی تهیه شده بدون عملیات حرارتی

کد نمونه	فرمول استوکیومتری	M (emu/g)	H_c (Oe)
S ₁	Ni Fe ₂ O ₄	۳۱/۱۵	۱۳۳
S ₂	Ni _{0.7} (Zn) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۸۸/۶۲	۸۳
S ₃	Ni _{0.7} (Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۵۷/۵۵	۹۶
S ₄	Ni _{0.7} (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۶۹/۰۱	۱۶۷
S ₅	Ni _{0.7} (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۶۲/۳۲	۱۲۶

S ₆	Ni _{0.5} (Zn) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۷۵/۵۲	۷۹
S ₇	Ni _{0.5} (Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۹۳/۷۱	۹۵
S ₈	Ni _{0.5} (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۹۸/۳۷	۱۶۱
S ₉	Ni _{0.5} (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۴۶/۲۵	۱۶۰
S ₁₀	Ni _{0.3} (Zn) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۷۰/۶۵	۸
S ₁₁	Ni _{0.3} (Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۶۹/۷۸	۶۰
S ₁₂	Ni _{0.3} (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۶۷/۲۵	۹۶
S ₁₃	Ni _{0.3} (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۴۰/۳۲	۹۵
S ₁₄	(Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) Fe ₂ O ₄	۵۵/۱۲	۷۱
S ₁₅	(Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) Fe ₂ O ₄	۳۷/۸۵	۸
S ₁₆	Zn Fe ₂ O ₄	۱/۷۸	۱۲۰
S ₁₇	(Mg _{0.5} Cu _{0.5}) Fe ₂ O ₄	۳۴/۷۵	۸۳
A ₁	Mn _{0.5} Zn _{0.5} Fe ₂ O ₄	۲۲/۰۹	۷
A ₂	Mn _{0.4} Zn _{0.5} [Ni] _{0.1} Fe ₂ O ₄	۹/۸۸	۲۲
A ₃	Mn _{0.4} Zn _{0.5} [Ni _{0.5} Co _{0.5}] _{0.1} Fe ₂ O ₄	۹/۱۱	۲
A ₄	Mn _{0.4} Zn _{0.5} [Co] _{0.1} Fe ₂ O ₄	۲۳/۶۹	۹
A ₅	Mn _{0.2} Zn _{0.5} [Ni] _{0.3} Fe ₂ O ₄	۱۴/۲۱	۱۴
A ₆	Mn _{0.2} Zn _{0.5} [Ni _{0.5} Co _{0.5}] _{0.3} Fe ₂ O ₄	۶/۰۷	۲
A ₇	Mn _{0.2} Zn _{0.5} [Co] _{0.3} Fe ₂ O ₄	۱۴/۳۳	۴
A ₈	Zn _{0.5} [Ni] _{0.5} Fe ₂ O ₄	۱۵/۱۳	۲
A ₉	Zn _{0.5} [Ni _{0.5} Co _{0.5}] _{0.5} Fe ₂ O ₄	۶/۸۷	۵
A ₁₀	Zn _{0.5} [Co] _{0.5} Fe ₂ O ₄	۱۱/۷۲	۲
E1	ZnFe ₂ O ₄	۴/۴۰	۲۰
E2	ZnFe _{1.6} [Ni _{0.4} Cu _{0.6}] _{0.4} O ₄	۰/۶۲	۴۰
E3	ZnFe _{1.2} [Ni _{0.8} Cu _{0.2}] _{0.8} O ₄	۰/۶۶	۳۰
E4	ZnFeNiO ₄	۰/۳۹	۷۰
E5	Zn _{0.6} Fe ₂ [Co _{0.4} Cu _{0.6}] _{0.4} O ₄	۹/۴۷	۲۰
E6	Zn _{0.6} Fe _{1.6} [(Mn _{0.4} Ni _{0.6})(Co _{0.4} Cu _{0.6})] _{0.4} O ₄	۲/۴۱	۳۰
E7	Zn _{0.6} Fe _{1.2} [(Mn _{0.4} Ni _{0.8})(Co _{0.4} Cu _{0.6})] _{0.8} O ₄	۲/۸۰	۲۰
E8	Zn _{0.6} Fe(Mn _{0.4} Ni _{0.6}) _{1.4} O ₄	۰/۶۶	۶۰
E9	Zn _{0.2} Fe ₂ [Co _{0.8} Cu _{0.2}] _{0.8} O ₄	۱۹/۲۲	۹
E10	Zn _{0.2} Fe _{1.6} [(Mn _{0.8} Ni _{0.2})(Co _{0.8} Cu _{0.2})] _{0.6} O ₄	۶/۶۹	۴۰
E11	Zn _{0.2} Fe _{1.2} [(Mn _{0.8} Ni _{0.2})(Co _{0.8} Cu _{0.2})] _{1.6} O ₄	۲۰/۴۲	۱۰
E12	Zn _{0.2} Fe(Mn _{0.8} Ni _{0.2}) _{1.8} O ₄	۰/۶۸	۳۰
E13	Co Fe ₂ O ₄	۲۹/۷۹	۸

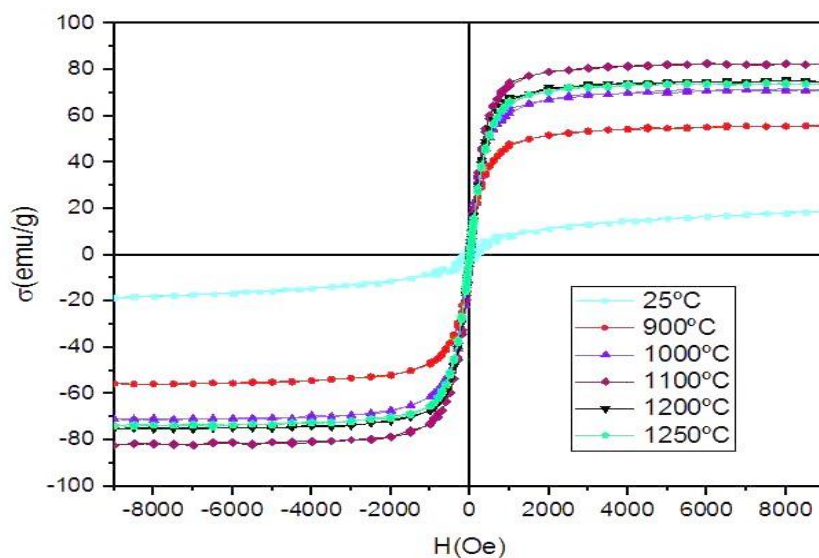
E14	$\text{Fe}_{1.6}[(\text{Mn})_{0.4}(\text{Co})_{0.6}]_{1.4}\text{O}_4$	۶/۳۸	۵۰
E15	$\text{Fe}_{1.2}[(\text{Mn})_{0.8}(\text{Co})_{0.2}]_{1.8}\text{O}_4$	۲۰/۴۲	۲۰
E16	Mn_2FeO_4	۰/۸۲	۸۰

بررسی مغناطش در حداکثر میدان (۹ KOe) نمونه‌ها نشان داد، مغناطش نانوذرات $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ سنتز شده به روش خوداحتراقی بیش از سایر نمونه‌ها است. به گونه‌ای که نمونه‌های S_2 ، S_7 و S_8 بیشترین مغناطش را دارند. کلسیناسیون این نانوذرات در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند یکی از دلایل افزایش مغناطش این نانوذرات باشد، زیرا افزایش دما موجب رشد نانوذرات شده و طبق مدل هسته-پوسته با افزایش سایز نانوذرات، مغناطش افزایش می‌یابد [۲ و ۷].

مقایسه میدان وادارندگی نمونه‌ها نشان داد نانوذرات $\text{Mn}_{0.5-x}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{1-y}\text{Co}_y]_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ میدان وادارندگی کمتری نسبت به نمونه‌های دیگر دارند. از میان این نانوذرات، میدان وادارندگی نانوذرات A_3 ، A_7 ، A_8 و A_{10} کمترین مقدار را دارا است. در واقع این نمونه‌ها به دلیل میدان وادارندگی کم می‌توانند تفات کمتری ایجاد نمایند.

۵-۴-۲- ویژگی‌های مغناطیسی مربوط به آزمون‌های AGFM و دمای کوری تحت عملیات حرارتی قرار گرفته

در شکل ۵-۱۳ منحنی‌های پسماند نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ به ازای دماهای مختلف در حداکثر میدان مغناطیسی ۹ KOe نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۳- منحنی پسماند نانو ذرات فریت $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ پخت داده شده در دماهای مختلف.

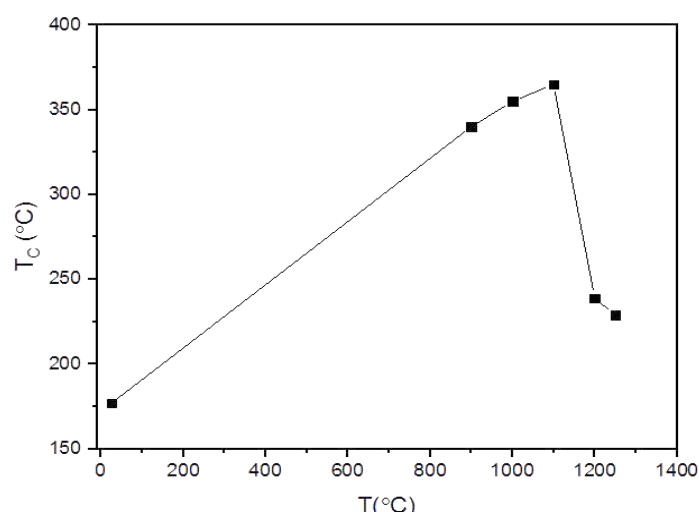
همان‌گونه که از شکل ۵-۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش دمای بازپخت تا ۱۱۰۰ °C، مغناطش افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. از آنجا که در بخش‌های پیش گفته شد با افزایش دمای پخت، اندازه دانه‌ها رشد یافته که منجر به تغییر مغناطش می‌شود. این تغییرات بر اساس مدل پوسته-هسته و تحلیل‌های دیگر قابل درک است. با توجه به اینکه این گونه فریت‌ها با قابلیت کاربرد هسته‌های در معرض میدان‌های مغناطیسی متناوب AC با بسامد بالا قرار می‌گیرند، منحنی مغناطش آن‌ها چندین بار در ثانیه تکرار و سبب اتلاف انرژی و بالا رفتن دمای آهنربا می‌شود. لذا باریک بودن حلقه‌های پسماند این نمونه‌ها، نشان دهنده اتلاف و وادارندگی پایین است که می‌توان از آن به عنوان یک مزیت به منظور استفاده در کاربردهای الکترومغناطیسی ترانسفورماتورها نام برد [۸]. پارامترهای گوناگون شامل مغناطش اشباع و

مغناطش در میدان بیشینه، مغناطش باقیمانده و نیروی وادارندگی مغناطیسی از منحنی پسماند برای نمونه‌های پخت داده شده در دماهای گوناگون در جدول ۷-۵ آورده شده است.

جدول ۷-۵ ویژگی‌های مغناطیسی نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ سنتز شده در دماهای مختلف

دما ($^{\circ}C$)	مغناطش در میدان بیشینه (emu/gr)	H_C (Oe)
۲۵	۱۸	۳
۹۰۰	۵۴	۲۰
۱۰۰۰	۷۰	۱۱
۱۱۰۰	۸۰	۵
۱۲۰۰	۷۴	۴
۱۲۵۰	۷۳	۳

همان‌گونه که از جدول ۷-۵ مشاهده می‌شود ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌های پخت داده شده با تغییر دما به خوبی قابل مشاهده است. یکی از ویژگی‌های مهم کاربرد هسته‌ها در ترانسفورماتورها، دمای کوری است که آسیب‌های ناشی از آن را مشخص می‌نماید. از آنجا که افزایش دمای کاری هسته‌ها ممکن است موجب برهم زدن نظم اسپینی و از بین بردن خاصیت فری مغناطیسی نمونه‌ها گردد، بررسی دمای کوری نمونه دارای اهمیت است. لذا تغییرات دمای کوری بر حسب دماهای پخت گوناگون نمونه‌ها در شکل ۷-۱۴ نشان داده شده است.

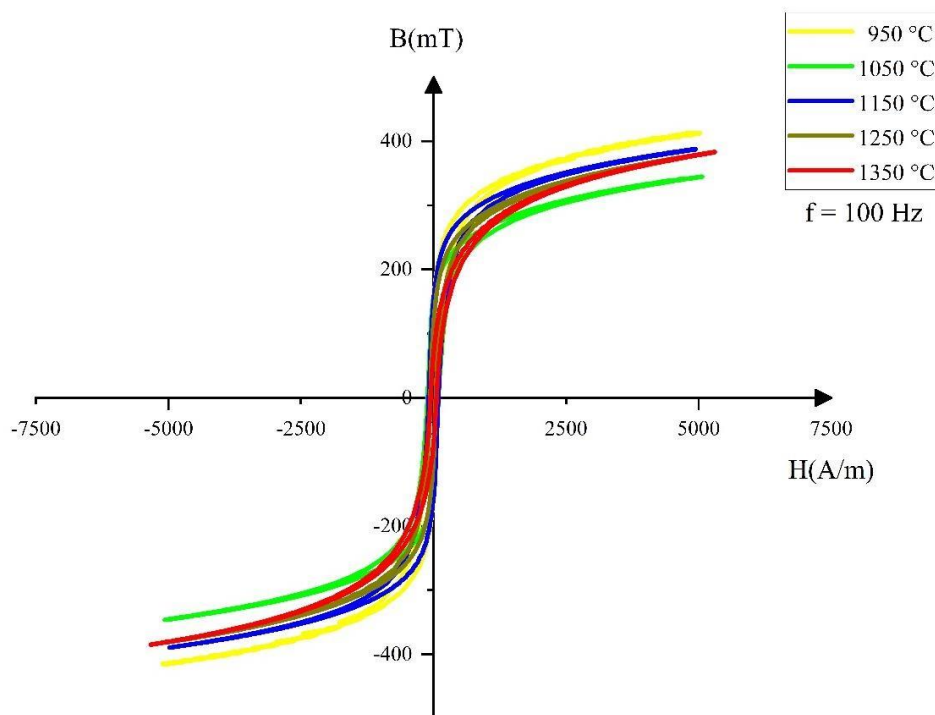


شکل ۷-۱۴- تغییرات دمای کوری نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ بر حسب دما.

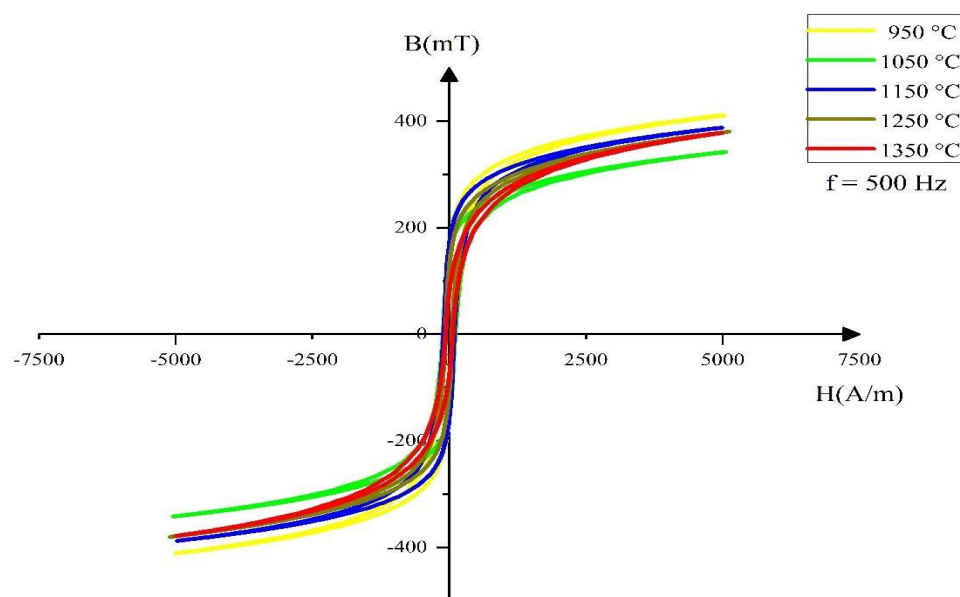
همان‌گونه که از شکل ۷-۱۴ مشاهده می‌شود دمای کوری برای نمونه‌های پخت داده شده تا $1100^{\circ}C$ افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. افزایش دمای کوری برای نمونه‌های پخت داده شده تا دمای $1100^{\circ}C$ ناشی از افزایش هم‌پوشانی توابع موج و افزایش زاویه بین اتم‌های مغناطیسی می‌باشد. در دمای $1100^{\circ}C$ ذرات دارای بیشترین مقدار مغناطش

ناشی از بیشینه میدان مولکولی هستند، از این رو دمای کوری در این نمونه دارای بیشینه مقدار خود می‌باشد. با افزایش دما از 110°C به بالا به دلیل افزایش اندازه ذرات، هم‌پوشانی توابع موج و میدان مولکولی کم شده و دمای کوری نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

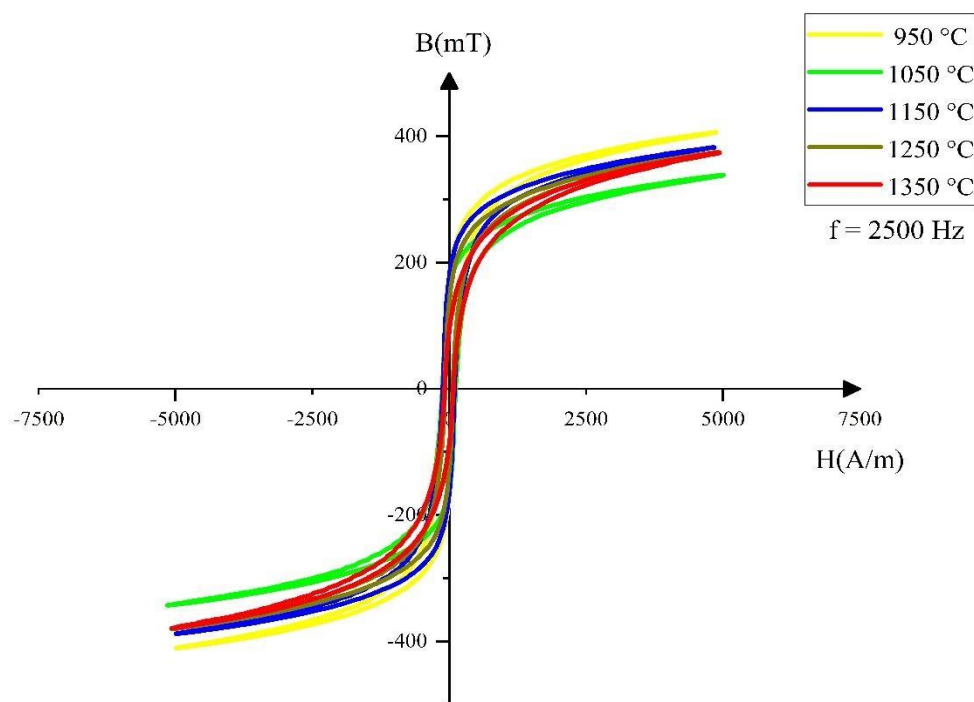
علاوه بر این، به منظور بررسی تاثیر عملیات حرارتی تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای، نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ در دماهای 950°C ، 1050°C ، 1150°C و 1250°C تحت عملیات حرارتی تک‌مرحله‌ای قرار داده شد. در عملیات حرارتی دو مرحله‌ای نمونه طی دو مرحله و در عملیات حرارتی تک‌مرحله‌ای نمونه یک مرحله تحت دما قرار می‌گیرد. برنامه دمایی استفاده شده برای عملیات حرارتی دو مرحله‌ای عبارت است از افزایش دمای کوره تا 1350°C با آهنگ $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، کاهش دمای کوره به دماهای 950°C (نمونه اول)، 1050°C (نمونه دوم)، 1150°C (نمونه سوم) و 1250°C (نمونه چهارم) با آهنگ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، نگه داشتن هر نمونه در دمای مربوط به خود به مدت ۱۰ ساعت و سرد سازی کوره تا دمای اتاق. همچنین برنامه دمایی مورد استفاده در عملیات حرارتی تک‌مرحله‌ای برای نمونه پنجم شامل افزایش دمای کوره تا 1350°C با آهنگ $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، نگه داشتن نمونه در این دما به مدت ۱۰ ساعت و سرد سازی کوره تا دمای اتاق می‌باشد. نمودار حلقه‌های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای این نمونه‌ها در فرکانس‌های گوناگون در شکل‌های ۵-۱۵ تا ۵-۱۸ نشان داده شده است.



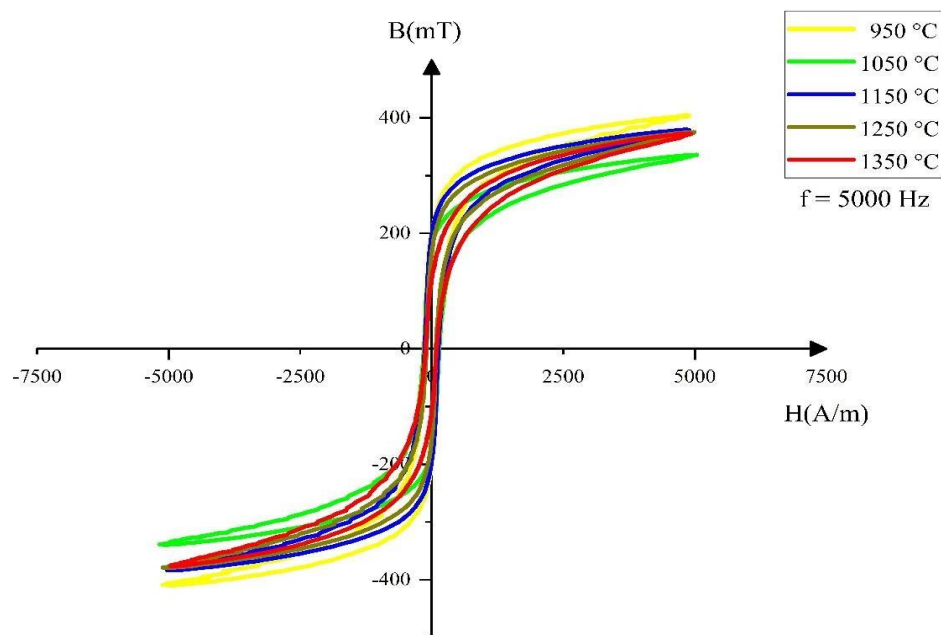
شکل ۵-۱۵- نمودار حلقه‌های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه‌های تفجوشی شده در فرکانس 100 Hz.



شکل ۵-۱۶- نمودار حلقه‌های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه‌های تفجوشی شده در فرکانس 500 Hz.



شکل ۵-۱۷- نمودار حلقه‌های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه‌های تفجوشی شده در فرکانس 2500 Hz.



شکل ۵-۱۸- نمودار حلقه‌های پسماند دمای اتاق هیستوگراف برای نمونه‌های تفجوشی شده در فرکانس 5000 Hz. همانگونه که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود مکان، ترتیب قرارگیری و جابجایی منحنی چگالی شار مغناطیسی (B) برحسب شدت میدان مغناطیسی برای همه نمونه‌ها در تمامی فرکانس‌ها تقریباً رفتار مشابه دارد. در جدول‌های زیر مقدار مغناطش اشباع و نیروی وادارندگی برحسب فرکانس در دماهای مختلف آورده شده است.

جدول ۵-۸- مغناطش نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده برحسب emu/gr در دماها و فرکانس‌های مختلف

فرکانس (kHz) \ دما (°C)	۱۰۰ Hz	۵۰۰ Hz	۲۵۰۰ Hz	۵۰۰۰ Hz
۹۵۰	۷۱/۵۱۱	۷۱/۱۲۳	۷۰/۳۵	۷۰/۰۳۳
۱۰۵۰	۵۸/۸۱۹	۵۸/۴۰۹	۵۷/۷۹	۵۷/۲۸۳
۱۱۵۰	۶۴/۶۶۳	۶۴/۶۲۲	۶۳/۷۹۵	۶۳/۳۰۸
۱۲۵۰	۶۳/۷۸۶	۶۳/۸۶۳	۶۳/۰۴۱	۶۳/۰۷
۱۳۵۰	۶۸/۳۱۱	۶۷/۴۳۹	۶۶/۷۴۴	۶۶/۵۰۵

جدول ۵-۹- نیروی وادارندگی H_c نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.3}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده در دماها و فرکانس‌های مختلف

فرکانس (kHz) دما (°C)	100Hz	500Hz	2500Hz	5000Hz
950	71/7	80/9	90/8	111
1050	112/8	111/5	124/2	146/8
1150	88/4	102/3	117/1	132
1250	59	67/1	78/5	99/7
1350	55/7	65/1	83/9	116/2

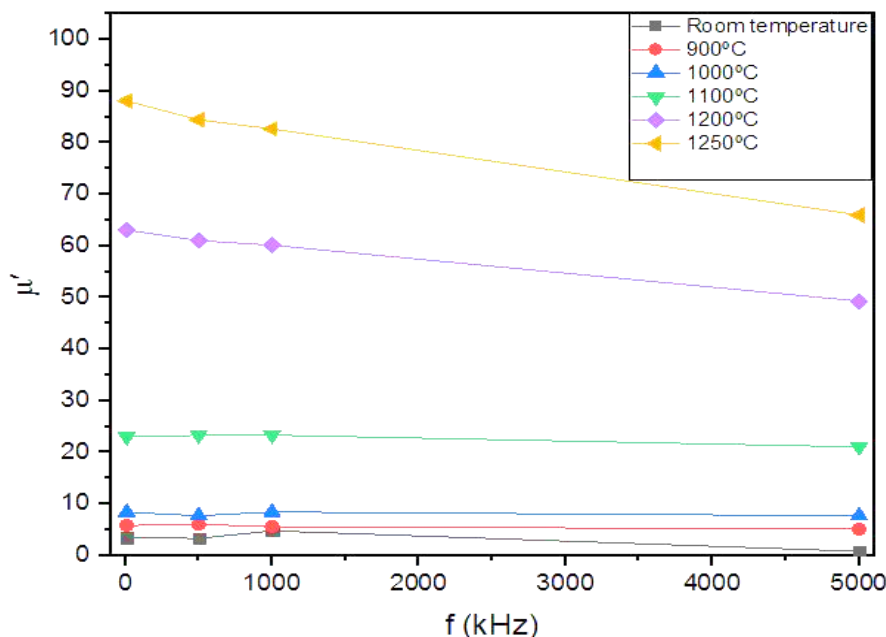
۵-۵- اندازه گیری پذیرفتاری مغناطیسی نمونه ها بر حسب دما

تراوایی مغناطیسی یکی از مهم ترین عوامل برای توصیف ویژگی های مواد مغناطیسی است که در هسته های ترانسفورماتور به ویژه ترانسفورماتورهای فرکانس بالا کاربرد دارد. برای اندازه گیری تراوایی مغناطیسی هسته های تفجوشی شده در دماهای مختلف در محدوده فرکانسی ۱۰ کیلوهرتز تا ۵ مگاهرتز، ابتدا القاییدگی برای هسته های حلقوی با استفاده از دستگاه LCR متر اندازه گیری و سپس تراوایی مغناطیسی نمونه ها محاسبه شده است. داده های به دست آمده در جدول ۵-۱۰ آورده شده است.

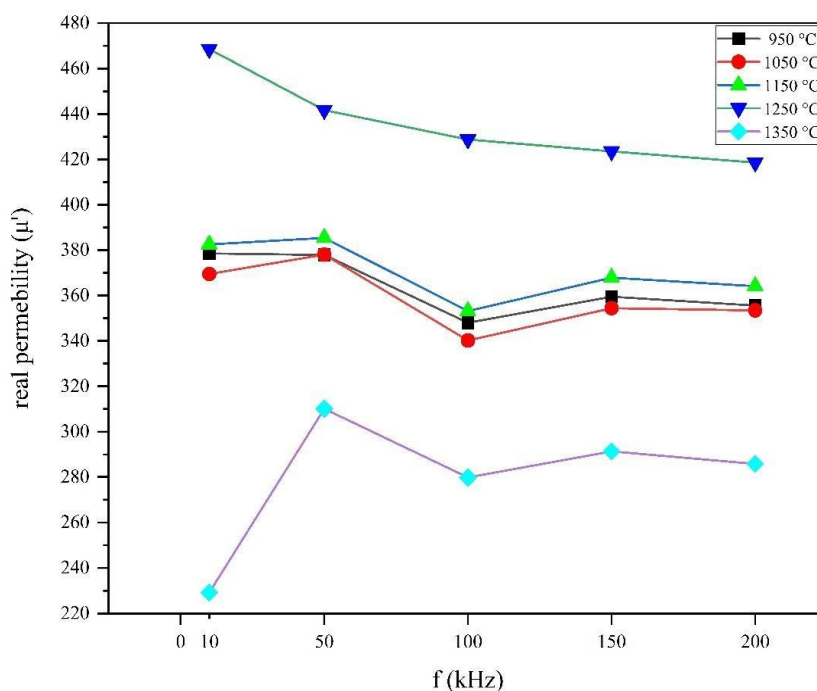
جدول ۵-۱۰- تراوایی مغناطیسی نمونه های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده در بازه های فرکانسی مشخص شده.

فرکانس (kHz) دما (°C)	10	500	1000	5000
25	3/37	3/31	4/77	0/77
900	5/1	2/05	5/6	5/09
1000	8/35	7/69	1/40	7/67
1100	22/99	23/26	23/31	21/03
1200	63/08	61/02	60/13	49/30
1250	88/14	14/44	12/67	65/95

بر اساس داده های موجود در جدول بالا نمودار تغییرات تراوایی در فرکانس های مختلف در شکل ۵-۱۹ رسم شده است.



شکل ۵-۱۹- تراوایی مغناطیسی برای نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تهیه شده در دماهای مختلف برحسب فرکانس. همان‌گونه که در شکل ۵-۱۹ مشاهده می‌شود با افزایش دما تا 1250°C تراوایی افزایش می‌یابد اما از آنجا که عیوب ساختاری، سرعت فرآیندهایی مانند رشد را کنترل می‌کنند، تغییرات تراوایی در دماهای مختلف پخت متفاوت می‌شود. خواص مغناطیسی و از جمله تراوایی مغناطیسی به شدت تابع چگالی، اندازه دانه و یکنواختی توزیع اندازه دانه می‌باشد. به‌طوری‌که با درشت شدن اندازه ذرات و چگالی بیشتر، تراوایی افزایش می‌یابد. گرمادهی فریت در کمتر از دمای نقطه ذوب آن، سبب می‌شود که ذرات به یکدیگر جوش خورده و فضای خالی بین ذرات کاهش یابد و در نتیجه اندازه ذرات درشت شود [۹]. درشت شدن اندازه ذرات موجب بهبود تراوایی مغناطیسی می‌گردد. علاوه بر این تراوایی مغناطیسی حقیقی نمونه که به صورت تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای تحت عملیات حرارتی قرار گرفته است در دماهای متفاوت و در فرکانس‌های مختلف محاسبه شد که نتایج آن در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۰- نمودار تراوایی مغناطیسی حقیقی μ' نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده به صورت تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای برحسب فرکانس‌های مختلف.

همان‌گونه که در شکل ۵-۲۰ مشاهده می‌شود تغییرات تراوایی مغناطیسی حقیقی برحسب فرکانس در دماهای تفجوشی متفاوت، گوناگون است. نمونه تفجوشی شده در دمای 1350°C در تمامی فرکانس‌ها دارای کمترین مقدار تراوایی است که علت آن را می‌توان با استفاده از رابطه تراوایی مغناطیسی با چگالی توجیه نمود. از آنجا که روند تفجوشی در دمای 1350°C به صورت تک مرحله‌ای بوده، دانه‌ها رشد ناگهانی داشته که باعث می‌شود موانع برای حرکت دیواره‌های حوزه‌های مغناطیسی افزایش یافته و در نتیجه تراوایی مغناطیسی کاهش می‌یابد. در تفجوشی دومرحله‌ای به دلیل کنترل رشد دانه‌ها، موانع حرکت دیواره‌ها کاهش می‌یابد، از اینرو میزان تراوایی مغناطیسی در نمونه‌های تفجوشی شده دومرحله‌ای به مقدار قابل توجهی نسبت به نمونه تفجوشی تک‌مرحله‌ای بیشتر است. با در نظر گرفتن ساز و کار تراوایی مغناطیسی در ساختارهای چند حوزه‌ای، می‌توان چگونگی تاثیر پارامترهایی از جمله اندازه دانه، مغناطش و ناهمسانگردی بر تراوایی مغناطیسی را بررسی کرد. تراوایی برای ساختارهای چند حوزه حاصل دو سازوکار مغناطیسی، یعنی چرخش اسپینی و حرکت دیواره حوزه‌ها است که با رابطه زیر نشان داده می‌شود [۱۰ و ۱۱].

$$\mu = \mu_{wall} + \mu_s + 1 \quad (1)$$

که در آن μ_{wall} پذیرفتاری ناشی از حرکت دیواره حوزه‌ها و μ_s پذیرفتاری ذاتی چرخش اسپین‌ها است که هرکدام با مجذور مغناطش رابطه مستقیم دارند [۵]:

$$\mu_s = \frac{2 \pi M_s^2}{K_a} \quad (2)$$

$$\mu_{wall} = \frac{3 \pi D M_s^2}{4 \gamma} \quad (3)$$

که در این رابطه ها M_s مغناطش اشباع، K_a ناهمسانگردی کل، D میانگین اندازه ذره و γ انرژی دیواره حوزه‌ها است. با توجه به روابط بالا می‌توان گفت که قسمت حقیقی تراوایی به میزان زیادی وابسته به اندازه دانه، مغناطش اشباع ماده و... است. دمای 950°C با اختلاف بسیار کمی نسبت به دمای 1050°C ، دارای تراوایی بیشتری است. با توجه به نزدیک بودن چگالی و متوسط اندازه دانه نمونه‌ها در این دو دما، می‌توان این اختلاف جزئی در تراوایی را به اختلاف مغناطش آنها نسبت داد. دمای 1150°C با داشتن چگالی بالاتر، نسبت به دو دمای پیشین خود، دارای تراوایی بیشتری است. دمای 1250°C دارای بیشترین تراوایی در تمامی فرکانس‌ها است که داشتن همزمان چند پارامتر بهبود دهنده تراوایی یعنی چگالی زیاد، اندازه دانه بزرگتر و ناهمسانگردی کمتر در اثر تفجوشی در دمای بالاتر را می‌توان دلیل آن دانست. در جدول ۵-۱۱ تراوایی مغناطیسی حقیقی نمونه‌های تفجوشی شده برحسب دماهای متفاوت در فرکانس‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۵-۱۱- قسمت حقیقی تراوایی مغناطیسی نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده به صورت تک‌مرحله‌ای و دو

مرحله‌ای در فرکانس‌های مختلف

نوع عملیات تفجوشی	دما ($^\circ\text{C}$)	10kHz	50kHz	100kHz	150kHz	200kHz
دومرحله‌ای	950	378/58	377/9	348/0.2	359/51	355/59
دومرحله‌ای	1050	369/52	378/0.4	340/18	354/38	353/43
دومرحله‌ای	1150	382/5	385/37	353/16	367/9	364/11
دومرحله‌ای	1250	468/5	441/7	428/7	423/5	418/6
تک‌مرحله‌ای	1350	229/21	310/16	279/88	291/37	285/83

۵-۶- تعیین قسمت‌های حقیقی و موهومی تراوایی مغناطیسی (μ)

۵-۶-۱- قسمت حقیقی تراوایی مغناطیسی

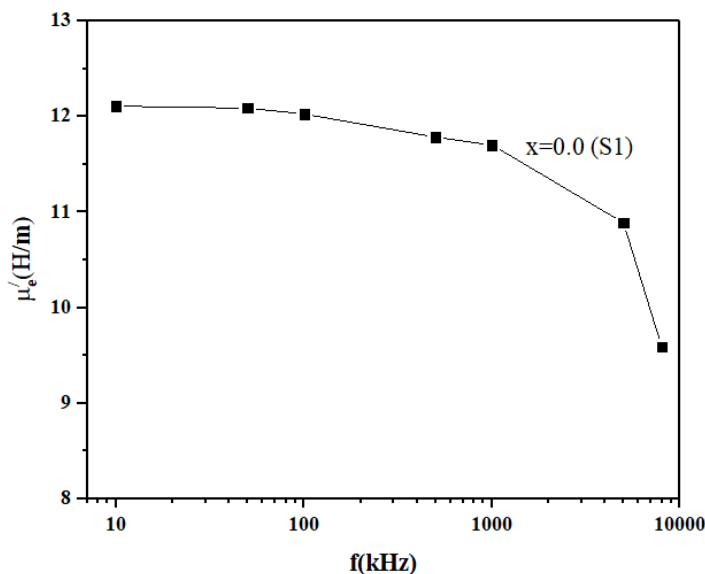
۵-۶-۱-۱- قسمت حقیقی تراوایی مغناطیسی نمونه‌های تهیه شده بدون عملیات حرارتی

برای بررسی تراوایی نمونه‌های تهیه شده با استفاده از LCR متر، نمونه‌های ۱ تا ۲۷ جدول ۳-۲ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند که نتایج آن در ذیل بیان می‌شود.

الف- فریت نیکل روی جانشانی شده با روی، منیزیم و مس، سنتز شده به روش خود احتراقی

با فرمول استوکیومتری $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}$

تراوایی مغناطیسی نانوذرات فریت نیکل- روی جانشانی شده با کاتیون‌های مس و منیزیم در غلظت‌های گوناگون، کلسینه شده در دمای 900°C درجه سانتی‌گراد در مدت ۲ ساعت، به‌صورت تابعی از فرکانس در زیر نشان داده شده است. محدوده فرکانسی در نظر گرفته شده از ۱۰ تا 8000 کیلوهرتز برای تمام هسته‌های حلقوی در نظر گرفته شده است. در شکل ۲۱ این کمیت برای نمونه S۱ بیان شده است.



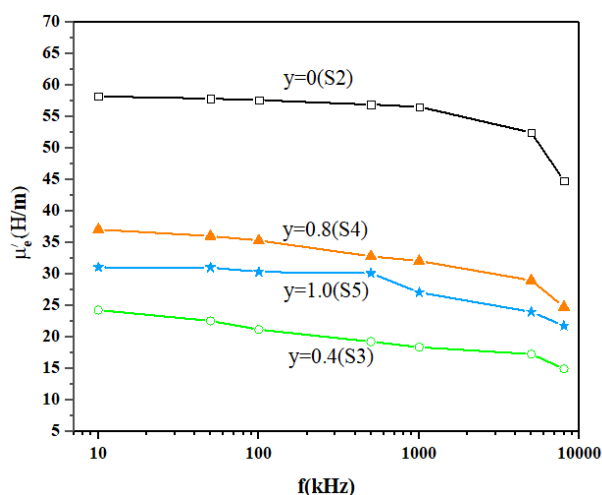
شکل ۲۱-۵- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس‌های مختلف برای نمونه S1: NiFe_2O_4 (غلظت $x = 0$).

همان‌گونه که از شکل ۲۱-۵ مشاهده می‌شود، تراوایی مغناطیسی با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. این کاهش بر اساس رابطه زیر که نشان‌دهنده کاهش تراوایی با فرکانس است و در ذیل نیز آورده شده است، سازگار است [۱۱].

$$\mu'_e = \frac{l(L_{eff} - L_W)}{\mu_0 N^2 A} \quad (4)$$

در این رابطه، L_{eff} اندوکتانس سیم پیچ تورویدی، L_W اندوکتانس سیم‌پیچ با هسته هوا، N تعداد دور سیم پیچ، l طول میانگین مسیر مغناطیسی یک هسته تورویدی بر حسب متر، A مساحت سطح مقطع هسته تورویدی بر حسب m^2 و μ_0 نفوذپذیری فضای آزاد ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/M}$) می‌باشد.

در شکل ۲۲-۵، تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس برای نمونه‌های $x=0/3$ و مقادیرهای y برابر با ۱ و ۰/۸ و ۰/۴ و ۰ آورده شده است.



شکل ۲۲-۵- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس‌های مختلف برای نمونه‌های $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ جانشرانی - شده با غلظت $x=0/3$

همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود برای نمونه‌ها، تراوایی مغناطیسی با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. همچنین مقدار تراوایی برای نمونه‌های جانشرانی گوناگون متفاوت است. تراوایی مغناطیسی نمونه S2 در مقایسه با بقیه نمونه

بیشتر است. این رفتار مغناطیسی با جابجایی‌های گوناگون را بر اساس ترکیب شیمیایی با جانشانی مغناطش نمونه‌ها توضیح داده می‌شود.

با توجه به جدول ۵-۲ مغناطش اشباع برای نمونه‌های جانشانی شده به شرح ذیل می‌باشد:

$$M_{S2} (88/62) > M_{S4} (69/01) > M_{S5} (62/22) > M_{S3} (57/55)$$

از آنجا که مغناطیدگی در مواد مغناطیسی به‌ویژه فریت‌های اسپینلی است، با دو روش چرخش اسپین‌های حوزه‌ها و دیگری حرکت دیواره حوزه‌ها صورت می‌گیرد. بر این اساس تراوایی مغناطیسی از رابطه ابدست خواهد آمد [۱۰ و ۱۱]. با توجه به رابطه‌های ۱ تا ۳ نمونه‌هایی که مغناطش کمتری دارند، تراوایی مغناطیسی کمتری خواهند داشت که این موضوع با تراوایی نمونه‌های اشاره شده هم‌خوانی دارد. برای بررسی بیشتر تراوایی نمونه‌ها، چگالی آن‌ها به روش ارشمیدس محاسبه و در جدول ۵-۱۲ بیان شده است.

جدول ۵-۱۲- چگالی نمونه‌های فریت $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ تهیه شده به روش خود احتراقی

نمونه	چگالی (g/cm ³)	نمونه	چگالی (g/cm ³)
S1= Ni Fe ₂ O ₄	۳/۶۹	S10= Ni _{0.3} (Zn) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۴/۵۱
S2= Ni _{0.7} (Zn) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۴/۶۶	S11= Ni _{0.3} (Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۴/۴۲
S3= Ni _{0.7} (Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۳/۹۵	S12= Ni _{0.3} (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۴/۲۷
S4= Ni _{0.7} (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۴/۲۹	S13= Ni _{0.3} (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) _{0.7} Fe ₂ O ₄	۳/۹۹
S5= Ni _{0.7} (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) _{0.3} Fe ₂ O ₄	۴/۲۵	S14= (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) Fe ₂ O ₄	۳/۹۸
S6= Ni _{0.5} (Zn) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۳/۹۷	S15= (Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) Fe ₂ O ₄	۳/۲۱
S7= Ni _{0.5} (Zn _{0.6} Mg _{0.2} Cu _{0.2}) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۴/۸۱	S16= Zn Fe ₂ O ₄	۳/۵۹
S8= Ni _{0.5} (Zn _{0.2} Mg _{0.4} Cu _{0.4}) _{0.5} Fe ₂ O ₄	۴/۹۳	S17= (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) Fe ₂ O ₄	۴/۵۹
S9= Ni _{0.5} (Mg _{0.5} Cu _{0.5}) _{0.5} Fe ₂ O ₄			۳/۹۵

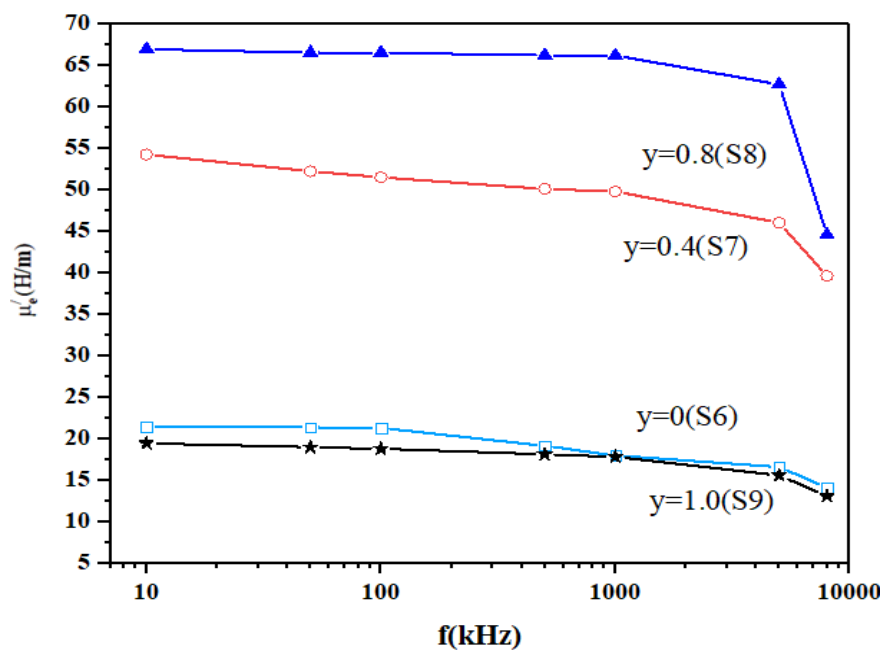
تا توجه به جدول ۵-۱۲ چگالی برای نمونه‌های جانشانی شده به شرح ذیل می‌باشد:

$$\rho_{S2} > \rho_{S4} > \rho_{S5} > \rho_{S3}$$

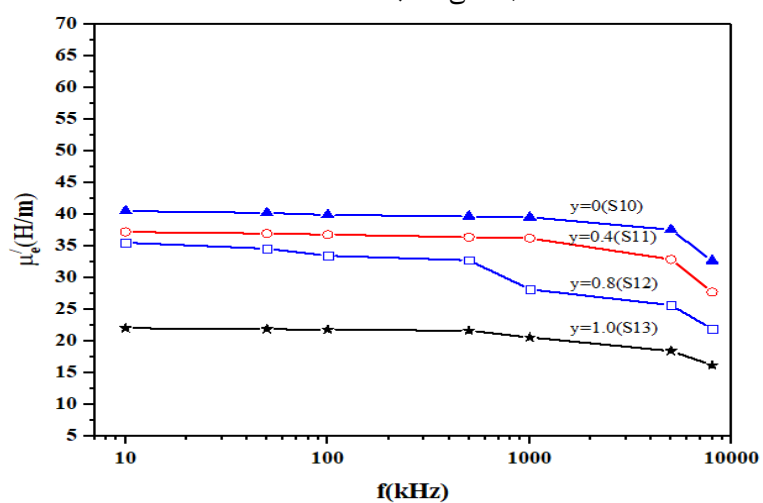
همان‌گونه که از این جدول دیده می‌شود با کاهش چگالی، تخلخل نیز کمتر شده و کمترین تخلخل مربوط به نمونه S3 می‌باشد. افزایش چگالی نمونه‌ها باعث کاهش میدان مغناطیسی ناشی از تخلخل می‌شود که در نتیجه موجب پخش شار پیوسته می‌شود و تراوایی مغناطیسی افزایش می‌یابد که این موضوع با تراوایی نمونه‌های اشاره شده هم‌خوانی دارد.

با توجه به مطالب گفته شده در مورد تخلخل و چگالی نمونه‌ها این موضوع نیز تأییدی بر رابطه مغناطش اشباع نمونه‌های اشاره شده در بحث هم می‌باشد.

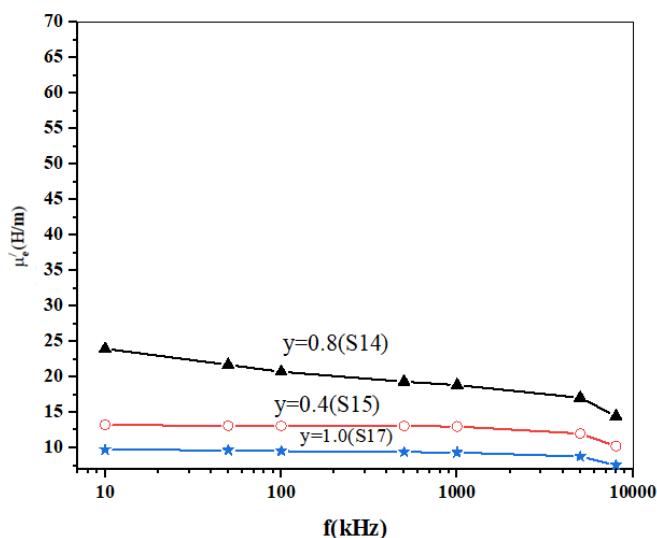
در شکل‌های ۵-۲۳ تا ۵-۲۵ تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس برای نمونه‌های ۱ و ۰/۷ و ۰/۵ و مقادیرهای y برابر با ۱ و ۰/۸ و ۰/۴ و ۰ آورده شده است.



شکل ۵-۲۳- نمودار نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس‌های مختلف برای نمونه‌های $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ جانشانی شده با غلظت $x=0.5$



شکل ۵-۲۴- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس‌های مختلف برای نمونه‌های $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ جانشانی شده با غلظت $x=0.7$



شکل ۵- ۲۵- نمودار تراوایی مغناطیسی بر حسب فرکانس‌های مختلف برای نمونه‌های $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ جانشانی - شده با غلظت $x=1$

همان‌گونه از این شکل‌های بالا مشاهده می‌شود برای نمونه‌ها، تراوایی مغناطیسی با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. همچنین مقدار تراوایی برای نمونه‌های جانشانی گوناگون متفاوت است. برای پرهیز از تکرار از ذکر مجدد مطالب گفته شده خودداری می‌کنیم. همچنین در جدول ۵-۱۳ مقادیر تراوایی نمونه‌های تهیه شده بیان شده است.

جدول ۵-۱۳- مقادیر مختلف تراوایی مغناطیسی در فرکانس‌های مختلف

نمونه	مقادیر تراوایی مغناطیسی در فرکانس مختلف						
	۱۰ KHz	۵۰ KHz	۱۰۰ KHz	۵۰۰ KHz	۱۰۰۰ KHz	۵۰۰۰ KHz	۸۰۰۰ KHz
$S1 = Ni Fe_2O_4$	۱۲/۱۰	۱۲/۰۹	۱۲/۰۳	۱۱/۷۸	۱۱/۷۰	۱۰/۸۹	۹/۵۹
$S2 = Ni_{0.7}(Zn)_{0.3}Fe_2O_4$	۴۱/۸۵	۴۱/۶۱	۴۱/۴۴	۴۰/۹۶	۴۰/۷۲	۳۷/۸۴	۳۲/۶۰
$S3 = Ni_{0.7}(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})_{0.3}Fe_2O_4$	۲۴/۳۰	۲۳/۵۹	۲۱/۲۱	۱۹/۲۹	۱۸/۳۹	۱۷/۳۱	۱۴/۹۶
$S4 = Ni_{0.7}(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})_{0.3}Fe_2O_4$	۳۷/۱۰	۳۶/۰۶	۳۵/۳۵	۳۲/۸۳	۳۲/۱۰	۲۹/۰۱	۲۴/۷۸
$S5 = Ni_{0.7}(Mg_{0.5}Cu_{0.5})_{0.3}Fe_2O_4$	۳۱/۱۰	۳۱/۰۶	۳۰/۳۵	۳۰/۸۳	۲۷/۱۰	۲۴/۰۱	۲۱/۷۹
$S6 = Ni_{0.5}(Zn)_{0.5}Fe_2O_4$	۲۱/۵۰	۲۱/۴۲	۲۱/۳۴	۱۹/۱۷	۱۸/۰۲	۱۶/۶۴	۱۴/۱۱
$S7 = Ni_{0.5}(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})_{0.5}Fe_2O_4$	۵۴/۲۹	۵۲/۲۶	۵۱/۵۳	۵۰/۱۴	۴۹/۸۲	۴۶/۰۸	۳۹/۶۶
$S8 = Ni_{0.5}(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})_{0.5}Fe_2O_4$	۶۶/۹۷	۶۶/۵۶	۶۶/۵۴	۶۶/۲۳	۶۶/۲۱	۶۲/۷۴	۴۴/۶۱
$S9 = Ni_{0.5}(Mg_{0.5}Cu_{0.5})_{0.5}Fe_2O_4$	۱۹/۵۰	۱۹/۰۲	۱۸/۸۴	۱۸/۱۷	۱۷/۸۵	۱۵/۶۴	۱۳/۱۱
$S10 = Ni_{0.3}(Zn)_{0.7}Fe_2O_4$	۳۸/۲۸	۳۷/۹۵	۳۷/۶۲	۳۷/۳۸	۳۷/۲۲	۳۵/۱۰	۲۹/۸۲
$S11 = Ni_{0.3}(Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})_{0.7}Fe_2O_4$	۳۷/۲۶	۳۶/۹۹	۳۶/۸۳	۴۲۸۳۶	۳۶/۲۶	۳۲/۹۰	۲۷/۷۶
$S12 = Ni_{0.3}(Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})_{0.7}Fe_2O_4$	۳۵/۵۴	۳۴/۶۱	۳۳/۴۸	۳۲/۷۷	۲۸/۲۰	۲۵/۶۸	۲۱/۹۴
$S13 = Ni_{0.3}(Mg_{0.5}Cu_{0.5})_{0.7}Fe_2O_4$	۱۸/۳۷	۱۸/۲۰	۱۸/۱۲	۱۷/۹	۱۶/۸۰	۱۴/۵۰	۱۲/۰۶
$S14 = (Zn_{0.2}Mg_{0.4}Cu_{0.4})Fe_2O_4$	۲۳/۹۴	۲۱/۷۰	۲۰/۷۲	۱۹/۳۴	۱۸/۸۵	۱۷/۰۶	۱۴/۴۷
$S15 = (Zn_{0.6}Mg_{0.2}Cu_{0.2})Fe_2O_4$	۱۳/۲۵	۱۳/۱۲	۱۳/۱۰	۱۳/۰۸	۱۳/۰۱	۱۲/۰۲	۱۲/۲۴
$S16 = Zn Fe_2O_4$	-	-	-	-	-	-	-
$S17 = (Mg_{0.5}Cu_{0.5})Fe_2O_4$	۹/۷۵	۹/۶۷	۹/۵۴	۹/۴۲	۹/۳۴	۸/۷۰	۸/۵۵

همان گونه که از جدول مشاهده می شود فریت نیکل - روی به ازای $x=0.5$ و $y=0.8$ بیشترین مقدار تراوایی مغناطیسی را از بقیه ترکیبات نشان می دهد. همچنین در فرکانس های بالاتر مقدار تراوایی مغناطیسی کاهش کمتری را دارد که این نشان دهنده پایداری فریت در فرکانس کاری بالا می باشد.

ب- فریت منگنز روی جانشانی شده با نیکل و کبالت، سنتز شده با روش هم رسوبی با فرمول

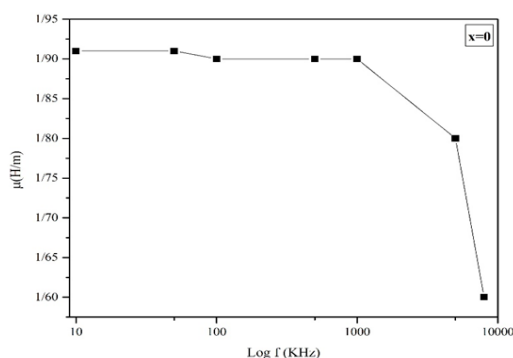
استوکیومتری $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$

یکی از مهم ترین پارامترها در هسته های ترانسفورماتور، تراوایی مغناطیسی یا همان نفوذپذیری می باشد. برای بررسی تراوایی نمونه ها، به کمک دستگاه LCR متر مقدار اندوکتانس در فرکانس های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوهرتز و ۱، ۵ و ۸ مگاهرتز اندازه گیری شده و طبق رابطه ۶ مقدار تراوایی در هر فرکانس برای هر نمونه محاسبه شده است. مقدار تراوایی در فرکانس های مختلف و چگالی هرنمونه در جدول ۵-۱۴ آورده شده است.

جدول ۵-۱۴ مقدار تراوایی در فرکانس های مختلف و چگالی نانوذرات فریت $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با جانشانی های گوناگون کاتیون های نیکل و کبالت

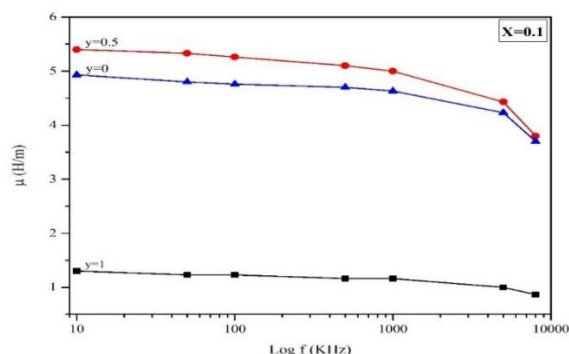
کد نمونه	تراوایی							$\rho (\frac{gr}{cm^3})$
	KHz ۱۰	KHz ۵۰	KHz ۱۰۰	KHz ۵۰۰	MHz ۱	MHz ۵	MHz ۸	
A ₁	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۸۰	۰/۶۶	۳/۶۱
A ₂	۱/۳۰	۱/۲۳	۱/۲۳	۱/۱۶	۱/۱۶	۱/۰۰	۰/۸۶	۴/۵۹
A ₃	۵/۴	۵/۳۳	۵/۲۶	۵/۱۰	۵/۰۰	۴/۴۳	۳/۸۰	۴/۶۸
A ₄	۴/۹۳	۴/۸۰	۴/۷۶	۴/۷۰	۴/۶۳	۴/۲۳	۳/۷۰	۴/۵۶
A ₅	۱۰/۲۰	۱۰/۱۳	۱۰/۰۶	۹/۹۶	۹/۹	۹/۱۶	۸/۰۳	۴/۵۳
A ₆	۵/۸۳	۵/۷۶	۵/۷۰	۵/۶۰	۵/۶۳	۵/۲۰	۴/۵۶	۴/۴۰
A ₇	۵/۴۶	۵/۴۰	۵/۳۶	۵/۳۰	۵/۲۶	۴/۸۶	۴/۱۶	۴/۲۸
A ₈	۶/۴۰	۶/۳۶	۶/۳۳	۶/۲۶	۶/۲۰	۵/۷۳	۵/۰۰	۴/۵۷
A ₉	۶/۹۳	۶/۹۰	۶/۸۶	۶/۸۳	۶/۸۰	۶/۳۰	۵/۵۳	۴/۶۲
A ₁₀	۵/۶۳	۵/۹۰	۵/۵۶	۵/۵۶	۵/۵۳	۵/۱۰	۳/۵۶	۴/۵۸

در شکل ۵-۲۶ تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس را برای نمونه $x=0$ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۶ تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0$.

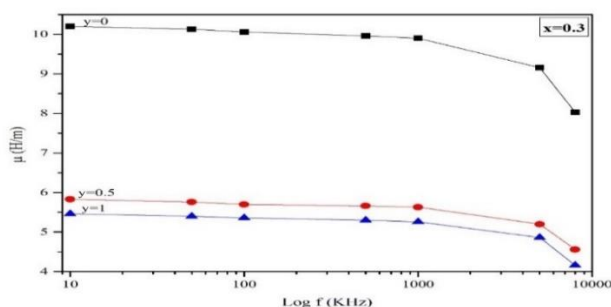
همان گونه که مشاهده می شود با افزایش فرکانس، تراوایی کاهش یافته است. طبق رابطه اسنوک، فرکانس و تراوایی رابطه عکس دارند؛ لذا کاهش تراوایی با افزایش فرکانس رفتاری مجاز خواهد بود [۴ و ۱۲]. در فرکانس شدید، تراوایی بیشترین مقدار را دارد و بعد از آن چون اسپین ها از میدان اعمالی عقب می افتند به نوعی تراوایی کاهش می یابد [۱۳]. در شکل ۵-۲۷ تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای جانشانی های مختلف در نمونه های $x=0.1$ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۷- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0.1$.

مطابق با شکل نمونه حاوی نیکل و کبالت به صورت همزمان دارای بیشترین تراوایی می باشد. تراوایی با مغناطش اشباع رابطه مستقیم دارد [۱۴]، بنابراین با افزایش مغناطش تراوایی نیز افزایش می یابد. رینگ های به قطر تقریبی ۴ میلی متر و ضخامت تقریبی ۳ میلی متر، در دمای ۹۰۰ درجه تفجوشی شده اند. شیب حرارتی مورد استفاده عبارت است از: مرحله اول رسیدن به دمای ۹۰۰°C به مدت ۶ ساعت، مرحله دوم پایداری و ماندن در آن دما به مدت ۲ ساعت و مرحله سوم سرد شدن و رسیدن به دمای اتاق به صورت آزاد به مدت ۱۴ ساعت. از آنجایی که رینگ ها در دمای ۹۰۰ درجه تفجوشی شده اند، باید برای بررسی رابطه بین مغناطش اشباع و تراوایی نمونه ها، نانوذرات تهیه شده را هم در دمای ۹۰۰ درجه تفجوشی کرد و سپس منحنی پسماند آن ها را بررسی کرد. این نمونه همانند سه نمونه ای که در دمای ۹۰۰ درجه سینتر شدند، پس از سینتر شدن دارای بیشترین مقدار مغناطش اشباع خواهد بود.

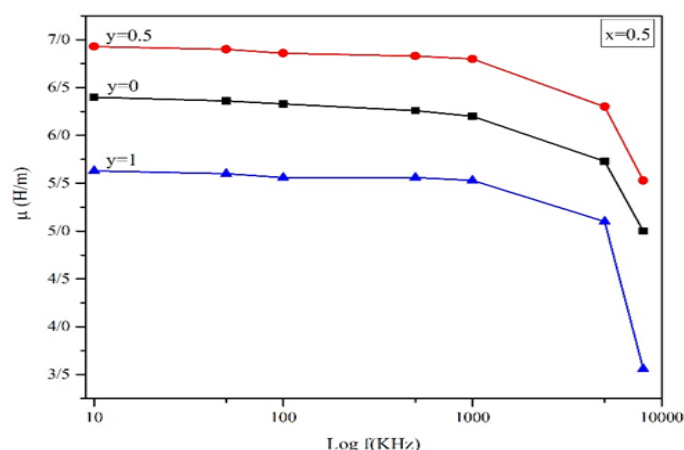
عامل دیگر تاثیرگذار روی تراوایی چگالی حلقه ها می باشد. نمونه با بیشترین مقدار چگالی دارای بیشترین مقدار تراوایی خواهد بود. چگالی های بیان شده در جدول ۵-۱۴ تاییدی بر این موضوع است. در شکل ۵-۲۸ تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای جانشانی های مختلف در نمونه های $x=0.3$ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۸- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0.3$.

مطابق با شکل، نمونه $y=0$ دارای بیشترین مقدار تراوایی می باشد. علت این امر را می توان به مقدار مغناطش نمونه ها نسبت داد. مغناطش نمونه ها در $y=0$ دارای بیشترین مقدار است؛ بنابراین این نمونه دارای بیشترین تراوایی خواهد بود [۱۳].

در شکل ۲۹ تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای جانشانی های مختلف در نمونه های $x=0.5$ نشان داده شده است.



شکل ۲۹-۵- تغییرات تراوایی بر حسب فرکانس برای نمونه $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ با مقدار $x=0.5$.

مطابق با شکل، نمونه $y=0.5$ دارای بیشترین مقدار تراوایی می باشد در حالی که بیشترین مغناطش اشباع را دارد. علت این امر همانند علت بیان شده برای نمونه های قبلی می باشد.

برای بررسی بیشتر، رینگ نمونه A_5 را مجدد در دمای $1350^\circ C$ درجه سانتی گراد قرار داده شد. پس از اندازه گیری اندوکتانس آن با LCR متر در فرکانس 50 KHz ، مقدار تراوایی $91/33\text{ H/m}$ به دست آمد. این مقدار در مقایسه با مقدار تراوایی که برای نمونه A_5 در دمای $900^\circ C$ درجه به دست آمده است، افزایش یافته است. این افزایش می تواند به دلیل رشد بیشتر ذرات در دمای بالاتر و به تبع آن افزایش مغناطش نمونه باشد.

۵-۶-۱-۱-۱- مقایسه نتایج حاصل از بررسی آزمون LCR متر نمونه های فریتی تهیه شده

بدون عملیات حرارتی

یکی از مهم ترین پارامترها در هسته های ترانسفورماتور، تراوایی مغناطیسی یا همان نفوذپذیری مغناطیسی است. برای بررسی تراوایی مغناطیسی نمونه های $Mn_{0.5-x}Zn_{0.5}[Ni_{1-y}Co_y]_xFe_2O_4$ و $Ni_{1-x}(Zn_{1-y}Mg_{y/2}Cu_{y/2})_xFe_2O_4$ به کمک دستگاه LCR متر مقدار اندوکتانس در فرکانس های 10 ، 50 ، 100 و 500 کیلوهرتز و 1 ، 5 و 8 مگاهرتز اندازه گیری و طبق رابطه ۶ مقدار تراوایی در هر فرکانس برای هر نمونه محاسبه شد. مقدار تراوایی مغناطیسی نمونه ها در فرکانس های مختلف در جدول ۵-۱۵ آورده شده است.

جدول ۵-۱۵- مقدار تراوایی مغناطیسی در فرکانس های مختلف نانوذرات با جانشانی های گوناگون

کد نمونه	تراوایی مغناطیسی						
	KHz ۱۰	KHz ۵۰	KHz ۱۰۰	KHz ۵۰۰	MHz ۱	MHz ۵	MHz ۸
A ₁	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۸۰	۰/۶۶
A ₂	۱/۳۰	۱/۲۳	۱/۲۳	۱/۱۶	۱/۱۶	۱/۰۰	۰/۸۶
A ₃	۵/۴	۵/۳۳	۵/۲۶	۵/۱۰	۵/۰۰	۴/۴۳	۳/۸۰
A ₄	۴/۹۳	۴/۸۰	۴/۷۶	۴/۷۰	۴/۶۳	۴/۲۳	۳/۷۰
A ₅	۱۰/۲۰	۱۰/۱۳	۱۰/۰۶	۹/۹۶	۹/۹	۹/۱۶	۸/۰۳
A ₆	۵/۸۳	۵/۷۶	۵/۷۰	۵/۶۰	۵/۶۳	۵/۲۰	۴/۵۶
A ₇	۵/۴۶	۵/۴۰	۵/۳۶	۵/۳۰	۵/۲۶	۴/۸۶	۴/۱۶
A ₈	۶/۴۰	۶/۳۶	۶/۳۳	۶/۲۶	۶/۲۰	۵/۷۳	۵/۰۰
A ₉	۶/۹۳	۶/۹۰	۶/۸۶	۶/۸۳	۶/۸۰	۶/۳۰	۵/۵۳
A ₁₀	۵/۶۳	۵/۹۰	۵/۵۶	۵/۵۶	۵/۵۳	۵/۱۰	۳/۵۶
S ₁	۱۲/۱۰	۱۲/۰۹	۱۲/۰۳	۱۱/۷۸	۱۱/۷۰	۱۰/۸۹	۹/۵۹
S ₂	۴۱/۸۵	۴۱/۶۱	۴۱/۴۴	۴۰/۹۶	۴۰/۷۲	۳۷/۸۴	۳۲/۶۰
S ₃	۲۴/۳۰	۲۳/۵۹	۲۱/۲۱	۱۹/۲۹	۱۸/۳۹	۱۷/۳۱	۱۴/۹۶
S ₄	۳۷/۱۰	۳۶/۰۶	۳۵/۳۵	۳۲/۸۳	۳۲/۱۰	۲۹/۰۱	۲۴/۷۸
S ₅	۳۱/۱۰	۳۱/۰۶	۳۰/۳۵	۳۰/۸۳	۲۷/۱۰	۲۴/۰۱	۲۱/۷۹
S ₆	۲۱/۵۰	۲۱/۴۲	۲۱/۳۴	۱۹/۱۷	۱۸/۰۲	۱۶/۶۴	۱۴/۱۱
S ₇	۵۴/۲۹	۵۲/۲۶	۵۱/۵۳	۵۰/۱۴	۴۹/۸۲	۴۶/۰۸	۳۹/۶۶
S ₈	۶۶/۹۷	۶۶/۵۶	۶۶/۵۴	۶۶/۲۳	۶۶/۲۱	۶۲/۷۴	۴۴/۶۱
S ₉	۱۹/۵۰	۱۹/۰۲	۱۸/۸۴	۱۸/۱۷	۱۷/۸۵	۱۵/۶۴	۱۳/۱۱
S ₁₀	۳۸/۲۸	۳۷/۹۵	۳۷/۶۲	۳۷/۳۸	۳۷/۲۲	۳۵/۱۰	۲۹/۸۲
S ₁₁	۳۷/۲۶	۳۶/۹۹	۳۶/۸۳	۴۲۸۳۶	۳۶/۲۶	۳۲/۹۰	۲۷/۷۶
S ₁₂	۳۵/۵۴	۳۴/۶۱	۳۳/۴۸	۳۲/۷۷	۲۸/۲۰	۲۵/۶۸	۲۱/۹۴
S ₁₃	۱۸/۳۷	۱۸/۲۰	۱۸/۱۲	۱۷/۹	۱۶/۸۰	۱۴/۵۰	۱۲/۰۶
S ₁₄	۲۳/۹۴	۲۱/۷۰	۲۰/۷۲	۱۹/۳۴	۱۸/۸۵	۱۷/۰۶	۱۴/۴۷
S ₁₅	۱۳/۲۵	۱۳/۱۲	۱۳/۱۰	۱۳/۰۸	۱۳/۰۱	۱۲/۰۲	۱۲/۲۴
S ₁₇	۹/۷۵	۹/۶۷	۹/۵۴	۹/۴۲	۹/۳۴	۸/۷۰	۸/۵۵

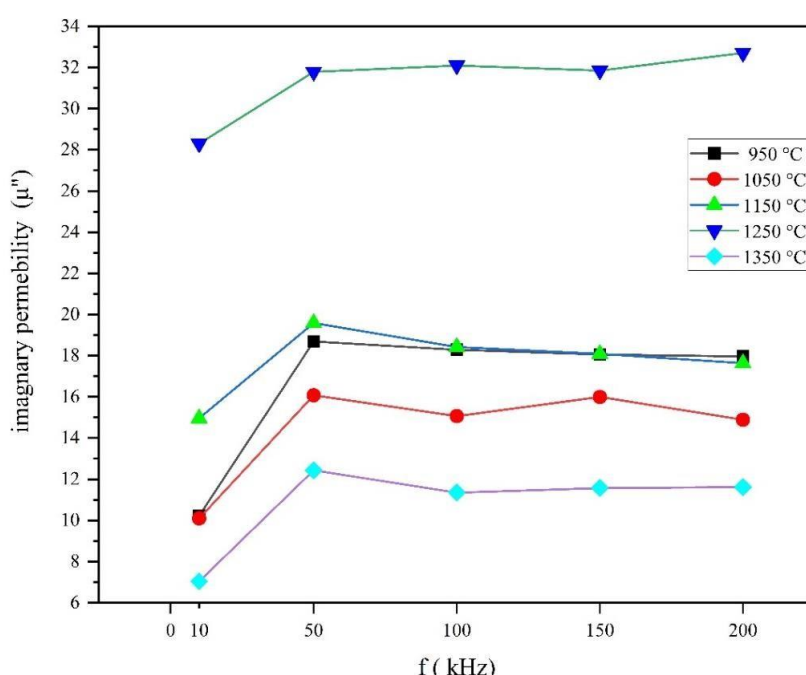
همانگونه که در جدول ۵-۱۵ دیده می شود تراوایی مغناطیسی نانوذرات $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ در دمای اتاق بیشتر از نانوذرات $\text{Mn}_{0.5-x}\text{Zn}_{0.5}[\text{Ni}_{1-y}\text{Co}_y]_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ است.

۵-۶-۱-۲- قسمت حقیقی تراوایی مغناطیسی نمونه تحت عملیات حرارتی قرار گرفته

بخش موهومی تراوایی مغناطیسی نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ با استفاده از رابطه زیر و در فرکانس‌های متفاوت محاسبه شد [۱۵] که نتایج در شکل ۵-۳۰ ارائه شده است.

$$\mu'_e = \frac{l(R_{eff} - R_w)}{\mu_0 N^2 \omega A} \quad (5)$$

در این رابطه R_{eff} مقاومت الکتریکی سیم پیچ تورویدی، R_w مقاومت الکتریکی سیم پیچ با هسته هوا، ω فرکانس، N تعداد دور سیم پیچ، l طول میانگین مسیر مغناطیسی یک هسته تورویدی بر حسب متر، A مساحت سطح مقطع هسته تورویدی بر حسب m^2 و μ_0 نفوذپذیری فضای آزاد ($4\pi \times 10^{-7} H/M$) می‌باشد.



شکل ۵-۳۰- نمودار تراوایی مغناطیسی موهومی نمونه‌های $Mn_{0.2}Zn_{0.3}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ تفجوشی شده بر حسب فرکانس‌های مختلف. همان‌گونه که از شکل ۵-۳۰ دیده می‌شود، تراوایی مغناطیسی موهومی بر حسب فرکانس، در تمامی دماها با افزایش فرکانس با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. دمای $1250^\circ C$ در تمامی فرکانس‌ها دارای بیشترین مقدار μ'' و دمای $1350^\circ C$ در تمامی فرکانس‌ها دارای کمترین مقدار μ'' می‌باشد که با استفاده از رابطه تراوایی مغناطیسی با سایر پارامترها از جمله اندازه دانه و مغناطش می‌توان آن را توجیه نمود. رابطه زیر ارتباط μ'' با سایر کمیت‌ها را نشان می‌دهد:

$$\mu'' = \frac{\chi_w \omega \beta \omega_d^2}{(\omega_d^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \beta^2} \quad (6)$$

که χ_w پذیرفتاری مغناطیسی استاتیک حرکت دیواره‌ها، ωd فرکانس تشدید دیواره، β ثابت میرایی حرکت دیواره و ω فرکانس است [۱۶]. با توجه به این رابطه، تراوایی مغناطیسی موهومی تنها به پذیرفتاری مغناطیسی ناشی از حرکت دیواره‌ها وابسته است. با توجه به این رابطه بخش موهومی تراوایی مغناطیسی همانند بخش حقیقی آن، با اندازه دانه و مغناطش اشباع رابطه مستقیم دارد. در دمای $1250^\circ C$ همراه شدن دو فاکتور مؤثر در افزایش μ'' یعنی بزرگی اندازه دانه‌ها و زیاد بودن مغناطش موجب افزایش μ'' نسبت به دیگر دماها شده است. از آنجا که روند تفجوشی در دمای $1350^\circ C$ به صورت تک مرحله‌ای بوده، دانه‌ها رشد ناگهانی داشته که باعث می‌شود موانع برای حرکت دیواره‌های

حوزه‌های مغناطیسی افزایش یافته و در نتیجه اتلاف و μ'' افزایش می‌یابد. بین سه دمای ۹۵۰، ۱۰۵۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد پایین‌ترین مغناطش متعلق به دمای ۱۰۵۰ °C است که موجب کاهش μ'' در این دما شده است. در دمای ۹۵۰ °C اثر غالب در تعیین μ'' ، اندازه دانه است و به همین علت μ'' در این دما نسبت به دمای ۱۱۵۰ °C که دارای متوسط اندازه دانه بیشتری است، کمتر است. در جدول ۵-۱۶ تراوایی مغناطیسی موهومی نمونه‌های تفجوشی شده برحسب دماهای متفاوت در فرکانس‌های مختلف آورده شده است.

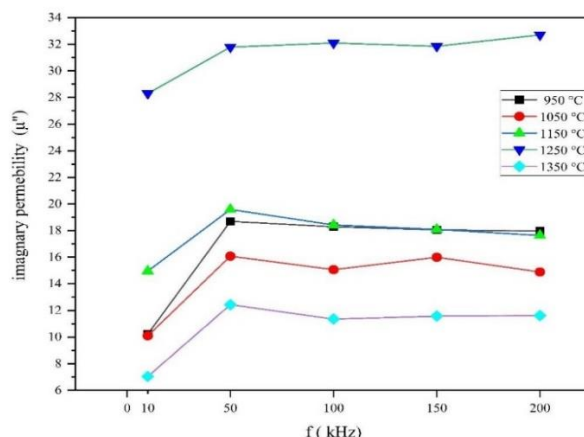
جدول ۵-۱۶- قسمت موهومی تراوایی مغناطیسی نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده به صورت تک‌مرحله‌ای و دو

مرحله‌ای در فرکانس‌های مختلف

نوع عملیات تفجوشی	دما (°C)	10kHz	50kHz	100kHz	150kHz	200kHz
دو مرحله‌ای	۹۵۰	۱۰/۲۲	۱۸/۶۹	۱۸/۲۹	۱۸/۰۶	۱۷/۹۶
دو مرحله‌ای	۱۰۵۰	۱۰/۱۰	۱۶/۰۸	۱۵/۰۶	۱۷/۱۶	۱۴/۸۹
دو مرحله‌ای	۱۱۵۰	۱۴/۹۶	۱۹/۵۹	۱۸/۴۲	۱۸/۰۹	۱۷/۶۴
دو مرحله‌ای	۱۲۵۰	۲۸/۳	۳۱/۷۹	۳۲/۱۰	۳۱/۸۵	۳۲/۷۱
تک مرحله‌ای	۱۳۵۰	۷/۰۴	۱۲/۴۳	۱۱/۳۵	۱۱/۵۷	۱۱/۶۲

۵-۶-۲- قسمت موهومی تراوایی مغناطیسی

از بین نمونه‌ها، فقط قسمت موهومی نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تهیه شده به روش هم‌رسوبی محاسبه شد. این نمونه در دماهای ۹۵۰ °C، ۱۰۵۰ °C، ۱۱۵۰ °C، ۱۲۵۰ °C و ۱۳۵۰ °C به صورت تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای تحت عملیات حرارتی قرار داده شد و در نهایت اتلاف آن‌ها اندازه‌گیری و بررسی شد که در ذیل به نتایج آن اشاره می‌شود. بخش موهومی تراوایی مغناطیسی نشان‌دهنده اتلاف انرژی مغناطیسی در ماده است که این بخش از تراوایی مغناطیسی با استفاده از رابطه ۵ و در فرکانس‌های متفاوت محاسبه شد [۱۶] و نتایج در شکل ۵-۳۱ ارائه شده است.



شکل ۵-۳۱- نمودار تراوایی مغناطیسی موهومی نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده برحسب فرکانس‌های مختلف. همان‌گونه که از شکل ۵-۳۱ دیده می‌شود، تراوایی مغناطیسی موهومی برحسب فرکانس، در تمامی دماها با افزایش فرکانس با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. دمای ۱۲۵۰ °C در تمامی فرکانس‌ها دارای بیشترین مقدار μ'' و دمای ۹۵۰ °C

۱۳۵۰ در تمامی فرکانس‌ها دارای کمترین مقدار " μ " می‌باشد که با استفاده از رابطه تراوایی مغناطیسی با سایر پارامترها از جمله اندازه دانه و مغناطش می‌توان آن را توجیه نمود. رابطه ۶ ارتباط " μ " با سایر کمیت‌ها را نشان می‌دهد [۱۷]. با توجه به این رابطه، تراوایی مغناطیسی موهومی تنها به پذیرفتاری مغناطیسی ناشی از حرکت دیواره‌ها وابسته است. با توجه به رابطه ۵ بخش موهومی تراوایی مغناطیسی همانند بخش حقیقی آن، با اندازه دانه و مغناطش اشباع رابطه مستقیم دارد. در دمای 1250°C همراه شدن دو فاکتور مؤثر در افزایش " μ " یعنی بزرگی اندازه دانه‌ها و زیاد بودن مغناطش موجب افزایش " μ " نسبت به دیگر دماها شده است. از آنجا که روند تفجوشی در دمای 1350°C به صورت تک مرحله‌ای بوده، دانه‌ها رشد ناگهانی داشته که باعث می‌شود موانع برای حرکت دیواره‌های حوزه‌های مغناطیسی افزایش یافته و در نتیجه اتلاف و " μ " افزایش می‌یابد. بین سه دمای 950°C ، 1050°C و 1150°C درجه سانتی‌گراد پایین‌ترین مغناطش متعلق به دمای 1050°C است که موجب کاهش " μ " در این دما شده است. در دمای 950°C اثر غالب در تعیین " μ "، اندازه دانه است و به همین علت " μ " در این دما نسبت به دمای 1150°C که دارای متوسط اندازه دانه بیشتری است، کمتر است. در جدول ۵-۱۷ تراوایی مغناطیسی موهومی نمونه‌های تفجوشی شده برحسب دماهای متفاوت در فرکانس‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۵-۱۷- قسمت موهومی تراوایی مغناطیسی نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده به صورت تک مرحله‌ای و دو

مرحله‌ای در فرکانس‌های مختلف

نوع عملیات تفجوشی	دما ($^{\circ}\text{C}$)	10kHz	50kHz	100kHz	150kHz	200kHz
دومرحله‌ای	۹۵۰	۱۰/۲۲	۱۸/۶۹	۱۸/۲۹	۱۸/۰۶	۱۷/۹۶
دومرحله‌ای	۱۰۵۰	۱۰/۱۰	۱۶/۰۸	۱۵/۰۶	۱۷/۱۶	۱۴/۸۹
دومرحله‌ای	۱۱۵۰	۱۴/۹۶	۱۹/۵۹	۱۸/۴۲	۱۸/۰۹	۱۷/۶۴
دومرحله‌ای	۱۲۵۰	۲۸/۳	۳۱/۷۹	۳۲/۱۰	۳۱/۸۵	۳۲/۷۱
تک مرحله‌ای	۱۳۵۰	۷/۰۴	۱۲/۴۳	۱۱/۳۵	۱۱/۵۷	۱۱/۶۲

۵-۶-۲-۱- اتلاف کل (P_t)

اتلاف کل نمونه‌های تفجوشی برای تمامی فرکانس‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_t = P_h + P_{ec} + P_r = W_h f + k f^2 + P_r \quad (7)$$

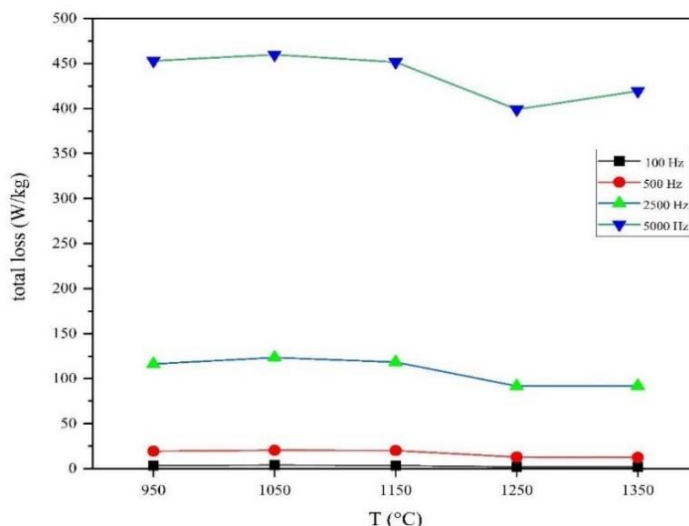
که در آن، P_t توان اتلاف کل، P_h توان اتلاف پسماند و P_{ec} توان اتلاف جریان گردابی و P_r توان اتلاف باقیمانده است است که یکای آن‌ها W/kg می‌باشد. به دلیل اینکه اتلاف باقیمانده در بازه فرکانسی مورد استفاده در این پژوهش ناچیز است، از این بخش اتلاف صرف‌نظر شده و بنابراین رابطه ۷ به صورت زیر خواهد بود:

$$P_t = P_h + P_{ec} = W_h f + k f^2 \quad (8)$$

و اتلاف انرژی کل در هر چرخه برابر خواهد بود با:

$$\frac{P_t}{f} = W_h + k f \quad (9)$$

که در آن W_h اتلاف پسماند در یک چرخه برحسب $J/k^8, f$ فرکانس و k یک ثابت است [۱۸]. با توجه به رابطه ۹ اتلاف پسماند در یک چرخه، مستقل از فرکانس و اتلاف جریان گردابی با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. در شکل ۵-۳۲ اتلاف کل به دست آمده از هیستوگراف برای نمونه‌های تفجوشی شده در دماهای متفاوت برای فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۲- توان اتلاف کل (P_t) نمونه‌های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای در فرکانس‌های مختلف.

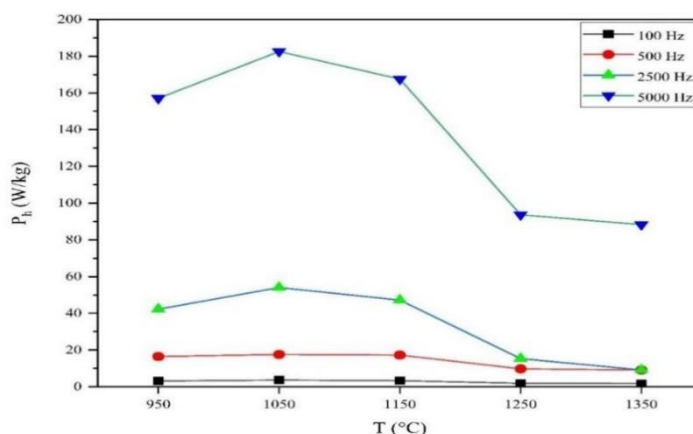
با توجه به شکل ۵-۳۲، توان اتلاف کل با افزایش فرکانس، افزایش یافته است که طبق رابطه ۹ کاملاً توجیه‌پذیر است. روند تغییرات P_t برحسب دما یک روند کاهشی بسیار ناچیز را نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن تأثیرات عملیات حرارتی بر ریزساختار ماده قابل توجیه است. در اثر تفجوشی دانه‌ها رشد کرده و تنش‌ها، ناخالصی‌ها و حفره‌ها کاهش پیدا می‌کنند که همه این عوامل در کاهش اتلاف مؤثر هستند. در جدول ۵-۱۸ مقادارهای توان اتلاف کل (P_t) در دماهای تفجوشی متفاوت و فرکانس‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۵-۱۸- توان اتلاف کل بر حسب W/kg نمونه‌های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای در فرکانس‌های مختلف

نوع عملیات تفجوشی	دما (°C)	100 Hz	500 Hz	2500Hz	5000Hz
دو مرحله‌ای	۹۵۰	۳/۲۶	۱۹/۴۲	۱۱۶/۲۷	۴۵۳/۰۴
دو مرحله‌ای	۱۰۵۰	۳/۷۶	۲۰/۳۹	۱۲۳/۳۵	۴۵۹/۸۲
دو مرحله‌ای	۱۱۵۰	۳/۴۶	۲۰/۱۱	۱۱۸/۲۱	۴۵۱/۶۰
دو مرحله‌ای	۱۲۵۰	۱/۹۹	۱۲/۸۵	۹۱/۶۶	۳۹۸/۹۲
تک مرحله‌ای	۱۳۵۰	۱/۸۹	۱۲/۴۴	۹۱/۹۱	۴۱۹/۳۵

۵-۶-۲-۲- اتلاف پسماند (P_h)

با توجه به تحلیل‌های بخش قبل، توان اتلاف کل به دو بخش توان اتلاف پسماند و توان اتلاف جریان گردابی است که این جدایش بر این فرض استوار است که اتلاف پسماند DC یا ایستا از یک منشأ متفاوت از اتلاف جریان گردابی AC نشأت می‌گیرد [۱۰]. در شکل ۵-۳۳ توان اتلاف پسماند برحسب دماهای تفجوشی متفاوت و در فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۳- توان اتلاف پسماند برحسب دماهای تفجوشی متفاوت در فرکانس‌های مختلف نمونه‌های $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ تفجوشی شده به صورت تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای.

شکل ۵-۳۳ و رابطه ۸ وجود یک رابطه خطی بین توان اتلاف پسماند و فرکانس را نشان می‌دهد که طبق آن با افزایش فرکانس توان اتلاف پسماند نیز افزایش می‌یابد. به غیر از توان اتلاف پسماند در دمای 950°C ، می‌توان یک روند مشابه و به صورت کاهشی را در تغییرات P_h با افزایش دمای تفجوشی برای فرکانس‌های متفاوت مشاهده کرد. با توجه به منشأ اتلاف پسماند که حرکت برگشت‌ناپذیر دیواره‌های مغناطیسی است، می‌توان این روند کاهشی P_h برحسب دما را با بررسی تأثیرات تفجوشی تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای بر ریزساختار ماده توجیه نمود. در روند تفجوشی دو سازوکار شامل مهاجرت مرزدانه‌ای و نفوذ مرزدانه‌ای به منظور چگالسازی نمونه اتفاق می‌افتد. در تفجوشی دو مرحله‌ای با رسیدن نمونه به چگالی بحرانی و کاهش ناگهانی دما، مهاجرت مرزدانه‌ای متوقف می‌شود و در نتیجه رشد دانه‌ها متوقف خواهد شد. اما سازوکار نفوذ مرزدانه‌ای همچنان فعال خواهد بود و با جاری ساختن جرم از مرزدانه به داخل دانه‌ها، حفره‌های محبوس در دانه‌ها را حذف کرده و موجب کاهش تخلخل در دانه‌ها می‌شود. در تفجوشی تک‌مرحله‌ای هر دو سازوکار تا مرحله پایانی تفجوشی فعال باقی خواهند ماند، که نتیجه آن رشد دانه‌ها و محبوس شدن حفره‌ها در دانه‌ها و افزایش تخلخل در دانه‌ها است. در صورتی که در تفجوشی دو مرحله‌ای با توقف رشد دانه‌ها و باقی ماندن دانه‌ها در ابعاد کوچک، احتمال حذف حفره‌های محبوس در دانه‌ها نسبت به زمانی که دانه‌ها دارای ابعاد بزرگتری هستند بیشتر خواهد بود. پس با توجه به اثر کاهش تخلخل در دانه‌ها بر کاهش اتلاف پسماند می‌توان کاهش اتلاف در سه دمای 1050°C ، 1150°C و 1250°C درجه سانتی‌گراد را مجاز دانست. اتلاف در دمای 1350°C دارای کمترین مقدار است که ناشی از اثر غالب اندازه دانه بر سهولت حرکت دیواره‌ها است. در جدول ۵-۱۹ توان اتلاف پسماند برحسب دماهای تفجوشی متفاوت در فرکانس‌های مختلف آورده شده است.

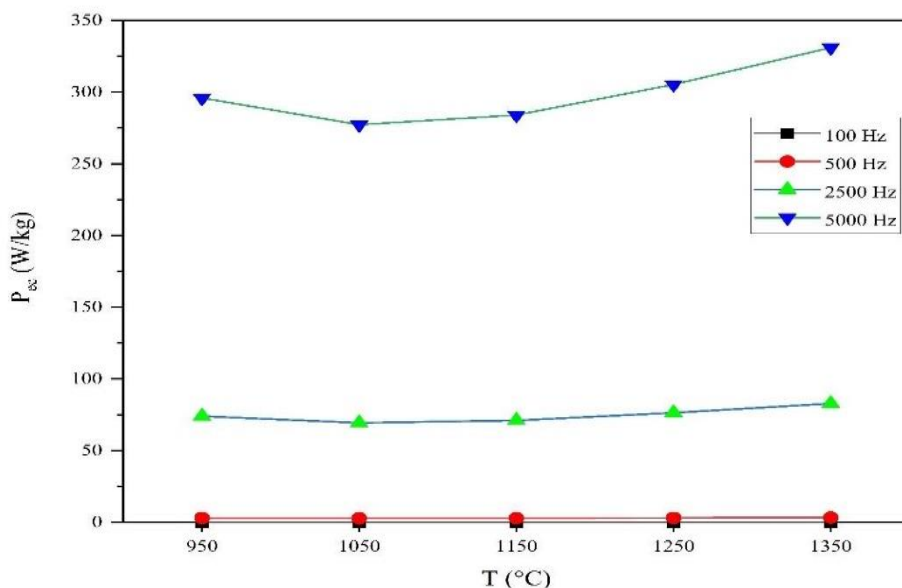
جدول ۵-۱۹- توان اتلاف پسماند برحسب W/kg نمونه‌های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تک مرحله‌ای و دو

مرحله‌ای در فرکانس‌های مختلف

نوع عملیات تفجوشی	دما (°C)	100 Hz	500 Hz	2500Hz	5000Hz
دو مرحله‌ای	۹۵۰	۳/۱۴۲	۱۶/۴۷	۴۲/۲۹۵	۱۵۷/۱۲
دو مرحله‌ای	۱۰۵۰	۳/۶۵۱	۱۷/۶۲	۵۴/۰۲۳	۱۸۲/۵۶
دو مرحله‌ای	۱۱۵۰	۳/۳۵۱	۱۷/۲۷۸	۴۷/۲	۱۶۷/۵۸
دو مرحله‌ای	۱۲۵۰	۱/۸۷۲	۹/۸۰۲	۱۵/۳۴۷	۹۳/۶۳۴
تک مرحله‌ای	۱۳۵۰	۱/۷۶۵	۹/۱۳۵	۹/۱۵۴	۸۸/۳۰۴

۵-۶-۲-۳- اتلاف جریان گردابی

همان گونه که در که قبلا اشاره شده است، اتلاف جریان گردابی P_{ec} شامل دو بخش اتلاف جریان گردابی ماکروسکوپی و اتلاف جریان گردابی میکروسکوپی است. در اتلاف جریان گردابی ماکروسکوپی با افزایش فرکانس، شعاع جریان-های گردابی کاهش می‌یابد، بنابراین در فرکانس‌های پایین که شعاع جریان‌های گردابی بیشتر است امکان دارد که هریک از این جریان‌ها چندین دانه را دربرگیرد. حال با افزایش اندازه دانه‌ها در طی مراحل تفجوشی تعداد مرزدانه‌ها کاهش یافته و از آنجا که مقاومت مرزدانه نسبت به مقاومت درون دانه‌ها بیشتر است، با کاهش تعداد مرزدانه‌ها امکان مهار جریان‌های گردابی ماکروسکوپی توسط مرزدانه‌ها کاهش می‌یابد [۱۹]. از طرف دیگر، با افزایش فرکانس، شعاع جریان‌های گردابی کاهش می‌یابد و این جریان‌ها به درون دانه‌ها محدود می‌شوند که برای مهار این جریان‌ها باید ماده دارای مقاومت الکتریکی بالا باشد. در نتیجه با کوچک نگه داشتن اندازه دانه‌ها در طی مراحل تفجوشی و انتخاب یک ماده با مقاومت الکتریکی بالا مانند فریت‌ها به خوبی می‌توان جریان‌های گردابی ماکروسکوپی را کاهش داد. اتلاف جریان‌های گردابی میکروسکوپی ناشی از جریان‌های گردابی به وجود آمده در حوالی دیواره‌های مغناطیسی هستند [۱۰ و ۱۹]. حرکت دیواره‌های مغناطیسی با چرخش گشتاورهای مغناطیسی تشکیل دهنده دیواره میسر می‌شود که تغییر جهت این گشتاورها باعث تغییراتی در B و H و در نهایت ایجاد جریان‌های گردابی در اطراف دیواره‌ها می‌شود. در نتیجه عواملی که مانعی در حرکت دیواره‌ها ایجاد می‌کنند از جمله مرزدانه‌ها، حفره‌ها و... در کاهش اتلاف جریان گردابی میکروسکوپی مؤثر می‌باشند. در شکل ۵-۳۴ توان اتلاف جریان گردابی P_{ec} برحسب دماهای تفجوشی متفاوت در فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۴- تغییرات توان اتلاف جریان گردابی نمونه‌های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای برحسب فرکانس‌های مختلف.

همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، P_{ec} با افزایش فرکانس، افزایش می‌یابد که این رفتار با رابطه ۸ که تناسب توان اتلاف جریان گردابی با مربع فرکانس را نشان می‌دهد، سازگار است. همچنین افزایش P_{ec} در اثر افزایش دمای تفجوشی را می‌توان با استفاده از رابطه اتلاف جریان گردابی و اندازه دانه توجیه نمود. در اثر افزایش متوسط اندازه دانه‌ها با افزایش دمای تفجوشی، اتلاف جریان گردابی میکروسکوپیکی افزایش می‌یابد. اتلاف جریان گردابی ماکروسکوپیکی به دلیل استفاده از فریت‌ها در ساخت هسته‌های مغناطیسی در این پژوهش، سهم ناچیزی از اتلاف جریان گردابی را شامل می‌شوند. در جدول ۵-۲۰ توان اتلاف جریان گردابی برای نمونه‌های تفجوشی شده در دماهای متفاوت و فرکانس مختلف آورده شده است.

جدول ۵-۲۰- توان اتلاف جریان گردابی بر حسب W/kg در نمونه‌های $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تفجوشی شده به صورت تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای در فرکانس‌های مختلف

نوع عملیات تفجوشی	دما (°C)	100 Hz	500 Hz	2500Hz	5000Hz
دو مرحله‌ای	۹۵۰	۰/۱۱۸	۲/۹۵۹	۷۳/۹۷۹	۲۹۵/۹۱
دو مرحله‌ای	۱۰۵۰	۰/۱۱۰	۲/۷۷۳	۶۹/۳۲۶	۲۷۷/۲۶۹
دو مرحله‌ای	۱۱۵۰	۰/۱۱۳	۲/۸۴	۷۱/۰۰۸	۲۸۴/۰۳
دو مرحله‌ای	۱۲۵۰	۰/۱۲۲	۳/۰۵۲	۷۶/۳۱۴	۳۰۵/۲۹۰
تک مرحله‌ای	۱۳۵۰	۰/۱۳۲	۳/۳۱۰	۸۲/۷۶۴	۳۳۱/۰۶

با بررسی و مقایسه داده‌های جدول‌های بالا، مشاهده می‌شود که مجموع اتلاف ناشی از حلقه‌های پسماند و جریان گردابی، به ترتیب حاصل از جدول‌های ۵-۱۹ و ۵-۲۰، با داده‌های جدول ۵-۱۸ که بیانگر اتلاف کل است، سازگاری خوبی دارد.

۵-۷- تعیین اتلاف مغناطیسی

از بین نمونه‌ها، فقط قسمت موهومی نمونه $Mn_{0.2}Zn_{0.5}Ni_{0.3}Fe_2O_4$ تهیه شده به روش هم‌رسوبی محاسبه شد. این نمونه در دماهای $950^{\circ}C$ ، $1050^{\circ}C$ ، $1150^{\circ}C$ و $1250^{\circ}C$ به صورت تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای تحت عملیات حرارتی قرار داده شد و در نهایت اتلاف آن‌ها اندازه‌گیری و بررسی شد که در ذیل به نتایج آن اشاره می‌شود. بخش موهومی تراوایی مغناطیسی نشان دهنده اتلاف انرژی مغناطیسی در ماده است که این بخش از تراوایی مغناطیسی با استفاده از رابطه ۵ و در فرکانس‌های متفاوت محاسبه شد [۱۶] و نتایج در شکل ۵-۳۱ ارائه شده است. همان‌گونه که از شکل ۵-۳۱ دیده می‌شود، تراوایی مغناطیسی موهومی برحسب فرکانس، در تمامی دماها با افزایش فرکانس با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. دمای $1250^{\circ}C$ در تمامی فرکانس‌ها دارای بیشترین مقدار μ'' و دمای $1350^{\circ}C$ در تمامی فرکانس‌ها دارای کمترین مقدار μ'' می‌باشد که با استفاده از رابطه تراوایی مغناطیسی با سایر پارامترها از جمله اندازه دانه و مغناطش می‌توان آن را توجیه نمود. رابطه ۶ ارتباط μ'' با سایر کمیت‌ها را نشان می‌دهد [۱۷]. با توجه به این رابطه، تراوایی مغناطیسی موهومی تنها به پذیرفتاری مغناطیسی ناشی از حرکت دیواره‌ها وابسته است. با توجه به رابطه ۵ بخش موهومی تراوایی مغناطیسی همانند بخش حقیقی آن، با اندازه دانه و مغناطش اشباع رابطه مستقیم دارد. در دمای $1250^{\circ}C$ همراه شدن دو فاکتور مؤثر در افزایش μ'' یعنی بزرگی اندازه دانه‌ها و زیاد بودن مغناطش موجب افزایش μ'' نسبت به دیگر دماها شده است. از آنجا که روند تفجوشی در دمای $1350^{\circ}C$ به صورت تک مرحله‌ای بوده، دانه‌ها رشد ناگهانی داشته که باعث می‌شود موانع برای حرکت دیواره‌های حوزه‌های مغناطیسی افزایش یافته و در نتیجه اتلاف و μ'' افزایش می‌یابد. بین سه دمای $950^{\circ}C$ ، $1050^{\circ}C$ و $1150^{\circ}C$ درجه سانتی‌گراد پایین‌ترین مغناطش متعلق به دمای $1050^{\circ}C$ است که موجب کاهش μ'' در این دما شده است. در دمای $950^{\circ}C$ اثر غالب در تعیین μ'' ، اندازه دانه است و به همین علت μ'' در این دما نسبت به دمای $1150^{\circ}C$ که دارای متوسط اندازه دانه بیشتری است، کمتر است.

۵-۷-۱- اتلاف کل (P_t)

اتلاف کل نمونه‌های تفجوشی برای تمامی فرکانس‌ها با استفاده از رابطه ۷ به دست می‌آید. به دلیل اینکه اتلاف باقیمانده در بازه فرکانسی مورد استفاده در این پژوهش ناچیز است، از این بخش اتلاف صرف‌نظر شده است. با توجه به رابطه ۹ اتلاف پسماند در یک چرخه، مستقل از فرکانس و اتلاف جریان گردابی با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۵-۳۲، توان اتلاف کل با افزایش فرکانس، افزایش یافته است که طبق رابطه ۹ کاملاً توجیه‌پذیر است. روند تغییرات P_t برحسب دما یک روند کاهشی بسیار ناچیز را نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن تأثیرات عملیات حرارتی بر ریزساختار ماده قابل توجیه است. در اثر تفجوشی دانه‌ها رشد کرده و تنش‌ها، ناخالصی‌ها و حفره‌ها کاهش پیدا می‌کنند که همه این عوامل در کاهش اتلاف مؤثر هستند.

۵-۷-۲- اتلاف پسماند (P_h)

با توجه به تحلیل‌های بخش قبل، توان اتلاف کل به دو بخش توان اتلاف پسماند و توان اتلاف جریان گردابی است که این جدایش بر این فرض استوار است که اتلاف پسماند DC یا ایستا از یک منشأ متفاوت از اتلاف جریان گردابی AC نشأت می‌گیرد [۱۰]. شکل ۳۳ و رابطه ۸ وجود یک رابطه خطی بین توان اتلاف پسماند و فرکانس را نشان می‌دهد که

طبق آن با افزایش فرکانس توان اتلاف پسماند نیز افزایش می‌یابد. به غیر از توان اتلاف پسماند در دمای 950°C ، می‌توان یک روند مشابه و به صورت کاهشی را در تغییرات Ph با افزایش دمای تفجوشی برای فرکانس‌های متفاوت مشاهده کرد. با توجه به منشأ اتلاف پسماند که حرکت برگشت‌ناپذیر دیواره‌های مغناطیسی است، می‌توان این روند کاهشی Ph بر حسب دما را با بررسی تاثیرات تفجوشی تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای بر ریزساختار ماده توجیه نمود. در روند تفجوشی دو سازوکار شامل مهاجرت مرزدانه‌ای و نفوذ مرزدانه‌ای به منظور چگالسازی نمونه اتفاق می‌افتد. در تفجوشی دومرحله‌ای با رسیدن نمونه به چگالی بحرانی و کاهش ناگهانی دما، مهاجرت مرزدانه‌ای متوقف می‌شود و در نتیجه رشد دانه‌ها متوقف خواهد شد. اما سازوکار نفوذ مرزدانه‌ای همچنان فعال خواهد بود و با جاری ساختن جرم از مرزدانه به داخل دانه‌ها، حفره‌های محبوس در دانه‌ها را حذف کرده و موجب کاهش تخلخل در دانه‌ها می‌شود. در تفجوشی تک‌مرحله‌ای هر دو سازوکار تا مرحله پایانی تفجوشی فعال باقی خواهند ماند، که نتیجه آن رشد دانه‌ها و محبوس شدن حفره‌ها در دانه‌ها و افزایش تخلخل در دانه‌ها است، در صورتی که در تفجوشی دومرحله‌ای با توقف رشد دانه‌ها و باقی ماندن دانه‌ها در ابعاد کوچک، احتمال حذف حفره‌های محبوس در دانه‌ها نسبت به زمانی که دانه‌ها دارای ابعاد بزرگتری هستند بیشتر خواهد بود. پس با توجه به اثر کاهش تخلخل در دانه‌ها بر کاهش اتلاف پسماند می‌توان کاهش اتلاف در سه دمای 1050°C ، 1150°C و 1250°C درجه سانتی‌گراد را مجاز دانست. اتلاف در دمای 1350°C دارای کمترین مقدار است که ناشی از اثر غالب اندازه دانه بر سهولت حرکت دیواره‌ها است.

۵-۷-۳- اتلاف جریان گردابی

همان‌گونه که در که قبلاً اشاره شده است، اتلاف جریان گردابی P_{ec} شامل دو بخش اتلاف جریان گردابی ماکروسکوپی و اتلاف جریان گردابی میکروسکوپی است. در اتلاف جریان گردابی ماکروسکوپی با افزایش فرکانس، شعاع جریان‌های گردابی کاهش می‌یابد، بنابراین در فرکانس‌های پایین که شعاع جریان‌های گردابی بیشتر است امکان دارد که هریک از این جریان‌ها چندین دانه را دربرگیرد. حال با افزایش اندازه دانه‌ها در طی مراحل تفجوشی تعداد مرزدانه‌ها کاهش یافته و از آنجا که مقاومت مرزدانه نسبت به مقاومت درون دانه‌ها بیشتر است، با کاهش تعداد مرزدانه‌ها امکان مهار جریان‌های گردابی ماکروسکوپی توسط مرزدانه‌ها کاهش می‌یابد [۱۹]. از طرف دیگر، با افزایش فرکانس، شعاع جریان‌های گردابی کاهش می‌یابد و این جریان‌ها به درون دانه‌ها محدود می‌شوند که برای مهار این جریان‌ها باید ماده دارای مقاومت الکتریکی بالا باشد. در نتیجه با کوچک نگه داشتن اندازه دانه‌ها در طی مراحل تفجوشی و انتخاب یک ماده با مقاومت الکتریکی بالا مانند فریت‌ها به خوبی می‌توان جریان‌های گردابی ماکروسکوپی را کاهش داد. اتلاف جریان‌های گردابی میکروسکوپی ناشی از جریان‌های گردابی به وجود آمده در حوالی دیواره‌های مغناطیسی هستند [۱۰ و ۱۹]. حرکت دیواره‌های مغناطیسی با چرخش گشتاورهای مغناطیسی تشکیل دهنده دیواره میسر می‌شود که تغییر جهت این گشتاورها باعث تغییراتی در B و H و در نهایت ایجاد جریان‌های گردابی در اطراف دیواره‌ها می‌شود. در نتیجه عواملی که مانعی در حرکت دیواره‌ها ایجاد می‌کنند از جمله مرزدانه‌ها، حفره‌ها و... در کاهش اتلاف جریان گردابی میکروسکوپی مؤثر می‌باشند. با توجه به شکل ۵-۳۴ P_{ec} با افزایش فرکانس، افزایش می‌یابد که این رفتار با رابطه ۸ که تناسب توان اتلاف جریان گردابی با مربع فرکانس را نشان می‌دهد، سازگار است. همچنین افزایش P_{ec} در اثر افزایش دمای تفجوشی را می‌توان با استفاده از رابطه اتلاف جریان گردابی و اندازه دانه توجیه نمود. در اثر افزایش متوسط اندازه دانه‌ها با افزایش دمای تفجوشی، اتلاف جریان گردابی میکروسکوپی افزایش می‌یابد. اتلاف جریان گردابی ماکروسکوپی به دلیل استفاده از فریت‌ها در ساخت هسته‌های مغناطیسی در این پژوهش، سهم ناچیزی از اتلاف جریان گردابی را شامل می‌شوند. همچنین با بررسی و مقایسه داده‌های جدول‌های ۵-۱۸ تا ۵-۲۰، مشاهده می‌شود

که مجموع اتلاف ناشی از حلقه‌های پسماند و جریان گردابی، به ترتیب حاصل از جدول‌های ۵-۱۹ و ۵-۲۰، با داده‌های جدول ۵-۱۸ که بیانگر اتلاف کل است، سازگاری خوبی دارد.

۵-۸- تعیین بازه فرکانسی در هسته‌های فریتی موردنظر

طبق بررسی‌های انجام شده بازه فرکانسی هسته‌های فریتی همان بازه‌ای است که در آن تراوایی تقریباً ثابت و مقدار فاکتور کیفیت روند افزایشی دارد [۲۰]، بنابراین طبق بند ۱۰ گزارش فاز ۴ و بندهای قبلی این گزارش، بازه فرکانسی هسته‌های ساخته شده ۱۰ kHz تا ۱ MHz می‌باشد.

۵-۹- سنجش فاکتورهای بسامد و ولتاژ هسته فریتی

طبق بررسی‌های انجام شده بازه فرکانسی هسته‌های فریتی همان بازه‌ای است که در آن تراوایی تقریباً ثابت و مقدار فاکتور کیفیت روند افزایشی دارد، بنابراین طبق بندهای قبلی این گزارش، بازه فرکانسی هسته‌های ساخته شده ۱۰ kHz تا ۱ MHz می‌باشد.

علاوه بر این حداکثر توان قابل انتقال توسط ترانسفورماتور (با فرض آنکه نسبت اولیه به ثانویه یک باشد) مطابق رابط زیر که نشان می‌دهد چگونه جنبه‌های مختلف طراحی بر ظرفیت انتقال توان موثر است، محاسبه می‌شود [۲۱].

$$P_{trans} = \underbrace{C}_{\text{Converter topology}} \cdot \underbrace{\frac{PF}{\sqrt{P_V}}}_{\text{Material}} \cdot \underbrace{\frac{\Delta T}{R_{th}}}_{\text{Thermal design}} \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{f_{cu}}{\rho_{cu}}}}_{\text{Winding}} \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{A_N \cdot A_e}{l_N \cdot l_e}}}_{\text{Geometry}} \quad (10)$$

که در آن C ضریبی وابسته به ساختار و نوع مبدل قدرت است [۲۲] که در جدول زیر مقدار آن با توجه به نوع مبدل مشخص شده است.

جدول ۵-۲۱- ضریب مربوط به نوع مبدل [۲۳]

C	نوع مبدل قدرت
1	Push pull
0.71	Forward
0.62	Flyback

در رابطه ۱۰ جمله وابسته به نوع ماده $\frac{PF}{\sqrt{P_V}}$ ، نسبت ضریب عملکرد PF^1 به جذر تلفات ویژه هسته P_V^2 ، است که از برگه اطلاعات هسته^۳ بدست می‌آید [۲۰].

$$PF = f \cdot B_{max} \quad (11)$$

که در آن f فرکانس سوئیچینگ و B_{max} حداکثر چگالی شار مغناطیسی است.

جمله وابسته به طراحی حرارتی است که در آن ΔT وابسته به جنس هسته و مطابق جدول زیر به دست می‌آید [۲۱].

جدول ۵-۲۲- تغییرات دمایی متناظر با جنس هسته [۲۱]

¹. Performance Factor

². Specific core loss level

³. Data sheet

Material	ΔT K
N27	30
N41	30
N49	20
N51	10
N72	40
N87	50
N88	90
N92	50
N95	50
N96	30
N97	50
PC200	20

با توجه به بررسی‌های انجام شده، میانه مقادیر جدول بالا ($\Delta T = 40K$) اختیار شده است. از طرفی مقاومت حرارتی R_{th} به شکل رابطه ۱۲ تعریف می‌شود.

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{Vcore} + P_{Vcopper}} \quad (12)$$

که در آن P_{Vcore} و $P_{Vcopper}$ به ترتیب تلفات هسته و تلفات مسی حاصل از سیم پیچ‌ها است. مقدار مقاومت حرارتی R_{th} برای هسته‌های با شکل‌های مشابه تقریباً برابر است و با اندازه‌گیری در شرایط انتقال حرارت طبیعی^۱ (بدون فن) بدست می‌آید.

علاوه بر جمله آخر در رابطه ۱۲ که وابسته به ابعاد هسته است، مقاومت حرارتی نیز وابسته به ابعاد هسته است و می‌توان آن با رابطه زیر تقریب زد [۲۱]:

$$R_{th} = \frac{1}{\sqrt{V_e}} \quad (13)$$

که در آن V_e حجم موثر هسته^۲ است و مقدار آن در برگه اطلاعات هسته ذکر می‌شود.

جمله $\sqrt{\frac{f_{cu}}{\rho_{cu}}}$ در رابطه ۱۰ وابسته به نحوه سیم پیچی هسته است که در آن f_{cu} نسبت سطح مقطع مس به کل سطح موجود برای سیم پیچی و ρ_{cu} مقاومت ویژه مس در حالت DC می‌باشد.

به طور تجربی $f_{cu} = 0.4$ در نظر گرفته می‌شود. البته مقاومت سیم در فرکانس‌های بالا به خاطر اثر پوستی و خاصیت مجاورت با میدان‌های مغناطیسی، بزرگتر خواهد بود و لازم است ضریب اصلاح $\frac{R_{AC}}{R_{DC}}$ اعمال گردد، برای کاهش این ضریب در عمل از سیم‌های چند رشته‌ای تابیده به نام litz استفاده می‌شود.

جمله $\sqrt{\frac{A_N \cdot A_e}{l_N \cdot l_e}}$ وابسته به ابعاد هسته می‌باشد که در آن A_N سطح مقطع سیم پیچ، A_e سطح مقطع موثر مغناطیسی هسته، l_N متوسط طول یک دور سیم پیچ و l_e طول موثر مسیر مغناطیسی است.

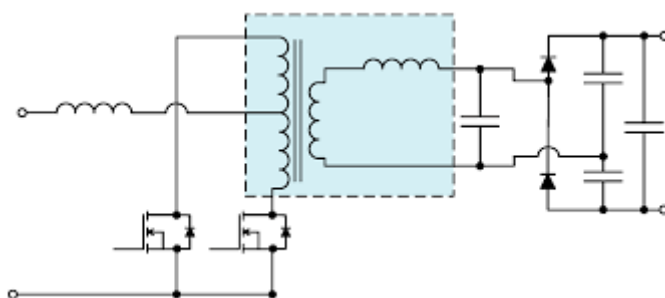
مشخصات ابعادی هسته ترانسفورماتور ساخته شده در این پژوهش مشابه هسته با کد PC40EI25-Z از محصولات شرکت TDK می‌باشد. که در آن PC40 مبین نوع ماده بکار گرفته شده، EI شکل ترانسفورماتور، 25 مبین ابعاد هسته

¹. Free convection in air

². Core effective volume

³. Copper filling factor

و Z به معنی آن است که هسته دارای فاصله هوایی نمی‌باشد [۲۳]. هر چه فرکانس سوئیچینگ در مبدل‌های الکترونیک قدرت بزرگ اختیار شود ابعاد و متعاقبا وزن سلف، خازن و ترانسفورماتورهای بکار رفته در مبدل کاهش می‌یابد. به عبارتی با افزایش فرکانس سوئیچینگ نسبت توان انتقالی در واحد حجم^۱ افزایش می‌یابد. اما در عمل محدودیتی برای افزایش فرکانس سوئیچینگ وجود دارد، اولین و مهمترین آن مربوط به مولفه تلفات سوئیچینگ، در سوئیچ‌های نیمه هادی متداول، مانند MOSFET ها و IGBT ها، است. محدود بودن حداکثر دمای پیوند نیمه هادی‌ها و مشکلات مربوط به انتقال حرارت باعث می‌شود در موارد مشابه فرکانس سوئیچینگ در بازه 25kHz تا 100kHz اختیار شود. در اینجا برای محاسبه توان ترانسفورماتور، فرکانس سوئیچینگ برابر 50kHz اختیار می‌شود. مطابق رابطه ۱۰ و جدول ۲۲ حداکثر توان قابل انتقال توسط ترانسفورماتور در مبدل Push Pull اتفاق می‌افتد ($C = 1$). طرح کلی مبدل Push Pull در شکل ۳۵-۵ معرفی شده است.



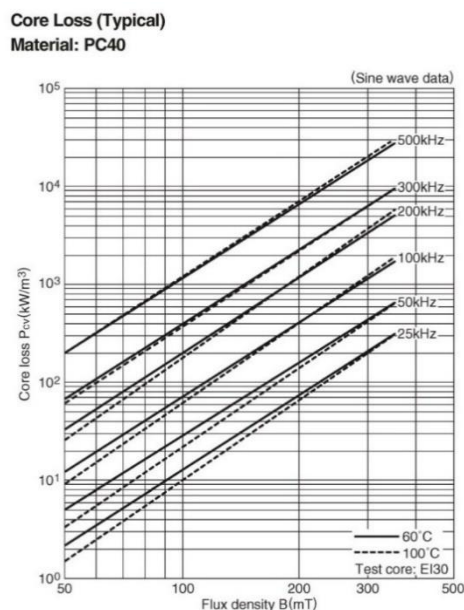
شکل ۳۵-۵- ساختار کلی مبدل Push Pull.

بروز حالت‌های گذرا در هنگام راه‌اندازی و تغییرات ناگهانی بار می‌تواند نقطه کار در مشخصه B-H را به سوی نواحی اشباع مغناطیسی منحرف نماید. در شرایط اشباع کاهش ناگهانی اندوکتانس مغناطیسی باعث می‌شود سوئیچ‌های نیمه هادی به دلیل جریان‌های لحظه‌ای بزرگ آسیب ببینند. بنابراین حداکثر چگالی شار مغناطیسی به گونه‌ای اختیار می‌شود که مبدل در حالت‌های گذرا به طور عمیق وارد ناحیه اشباع نگردد. به طور تجربی $B_{max} = 0.2T$ اختیار می‌شود. مطابق رابطه ۱۱ داریم:

$$T/Sec.PF = f \cdot B_{max} = 50kHz \times 0.2 = 10000 \quad (۱۴)$$

شکل ۳۶-۵ تلفات ویژه هسته فریت PC40 در فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد.

^۱. Power density



شکل ۵-۳۶- تلفات ویژه هسته فریت PC40 [۲۳].

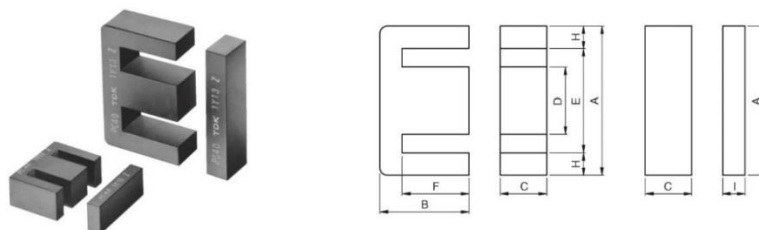
مطابق شکل ۵-۳۶ تلفات ویژه هسته در فرکانس 50kHz برابر $P_V = 170 \text{ kW/m}^3$ است. همچنین اگر حجم موثر هسته برابر $V_e = 1930 \text{ mm}^3$ در نظر گرفته شود [۲۳]، مطابق رابطه ۱۳ R_{th} برابر است با:

$$R_{th} = \frac{1}{\sqrt{V_e}} = \frac{1}{\sqrt{1930 \times 10^{-9}}} = 719.8 \quad (15)$$

از آنجایی که مقاومت ویژه مس برابر $\rho_{cu} = 1.68 \times 10^{-8} \Omega m$ است [۲۴]، باتوجه به شکل زیر سطح مقطع سیم پیچ برابر است با:

$$A_N = F \times \left(\frac{E-D}{2} \right) = 12.35 \times \left(\frac{19-6.5}{2} \right) = 77.19 \text{ mm}^2 \quad (16)$$

EI CORES

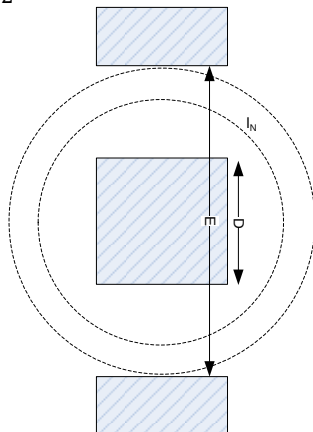


Part No.	JIS	Dimensions in mm							
		A	B	C	D	E min.	F	H	I
PC40EI12.5-Z	JIS FEI 12.5	12.4±0.3 .488±.012	7.4±0.1 .291±.004	4.85±0.15 .191±.006	2.4±0.1 .094±.004	8.8 .346	5.1±0.1 .201±.004	1.6 .063	1.5±0.1 .059±.004
PC40EI16-Z	JIS FEI 16	16.0±0.3 .630±.012	12.2±0.2 .480±.008	4.8±0.2 .189±.008	4.0±0.2 .157±.008	11.6 .457	10.2±0.2 .402±.008	2.05 .081	2.0±0.2 .079±.008
PC40EI19-Z		20.0±0.3 .787±.012	13.55±0.25 .533±.010	5.0±0.2 .197±.008	4.55±0.15 .179±.006	14.3 .563	11.15±0.15 .439±.006	2.75 .108	2.3±0.1 .091±.004
PC40EI22-Z		22.0±0.3 .866±.012	14.55±0.25 .573±.010	5.75±0.25 .226±.010	5.75±0.25 .226±.010	13.0 .512	10.55±0.25 .415±.010	4.5 .177	4.5±0.2 .177±.008
PC40EI22/19/6-Z	JIS FEI 22	22.0±0.4 .866±.016	14.7±0.2 .579±.008	5.75±0.25 .226±.010	5.75±0.25 .226±.010	15.75 .620	10.7±0.2 .421±.008	3.0 .118	4.0±0.2 .157±.008
PC40EI25-Z		25.3±0.5 .996±.020	15.55±0.25 .612±.010	6.75±0.25 .266±.010	6.5±0.3 .256±.012	19.0 .748	12.35±0.25 .486±.010	3.0 .118	2.7±0.2 .106±.008
PC40EI28-Z	JIS FEI 28	28.0 ±0.7 +0.08 -0.08 1.102 ±.020	16.75±0.25 .659±.010	10.6±0.2 +0.08 -0.08 4.17±.008 10.7±0.3 +0.08 -0.08 4.21±.012	7.2±0.3 .283±.012	18.4 .724	12.25±0.25 .482±.010	4.5 .177	3.5±0.3 .138±.012

شکل ۵-۳۷- مشخصات ابعاد هسته PC40EI25-Z [۲۳].

از طرفی با توجه به شکل ۴۲، متوسط طول یک دور سیم پیچ برابر است با:

$$l_N = 2\pi r = 2\pi \times \frac{1}{2} \left(\frac{E+D}{2} \right) = \frac{\pi}{2} (19 + 6.5) = 40 \text{ mm}^2 \quad (17)$$



شکل ۵-۳۸- l_N متوسط طول یک دور سیم پیچ.

با توجه به مقادیر به دست آمده، حداکثر توان قابل انتقال بر اساس رابطه ۱۰ برابر خواهد بود با $W/5.8$. از آنجایی که توان انتقالی برابر است با حاصل ضرب ولتاژ در جریان، می توان مقدار ولتاژ و جریان را تغییر داد به نحوی که مقدار توان ثابت بماند.

۵-۱۰- بهینه سازی ساخت هسته فریتی

با توجه به بررسی های انجام شده در خصوص ویژگی های هسته های فریتی قابل کاربرد در ترانسفورماتورها و مطالعات انجام شده در گزارش فاز دوم و چهارم این پروژه، در بین نمونه های تهیه شده، نمونه های S2، S7 و S8 بیشترین مغناطش را در حداکثر میدان دارند. کلسیناسیون این نانوذرات در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد می تواند یکی از دلایل افزایش مغناطش این نانوذرات باشد. نانوذرات A3، A7، A8 و A10 کمترین مقدار نیروی وادارندگی را دارند. در واقع این نمونه ها به دلیل میدان وادارندگی کم می توانند اتلافات کمتری ایجاد نمایند. همچنین بررسی نمودارهای تراوایی در دمای اتاق نمونه های تهیه شده نشان داد که نانوذرات $\text{Ni}_{1-x}(\text{Zn}_{1-y}\text{Mg}_{y/2}\text{Cu}_{y/2})_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ بیشترین تراوایی را دارند. در نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ که تحت عملیات حرارتی در دماهای مختلف قرار داده شده، در دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی گراد دارای مقدار مغناطش اشباع، چگالی و تراوایی در محدوده ذکر شده در جدول مشخصات فنی و کمترین مقدار اتلاف است. بنابراین می توان گفت نمونه $\text{Mn}_{0.2}\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ بهینه ترین نمونه برای هسته های ترانسفورماتور خواهد بود.

منابع

- [1] R. Street, P. McCormick, J. Amighian, M. Murio, Magnetic properties of ultrafine MnFe₂O₄ powders prepared by Mechanochemical processing .Phys, (2001)54.
- [2] M. A. Ahmed, The effect of urea-to-nitrates ratio on the morphology and magnetic properties of Mn_{0.8}Mg_{0.2}Fe₂O₄, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 322 (2010) 763-766.
- [3] T. Tsutaoka, Frequency dispersion of complex permeability in Mn–Zn and Ni–Zn spinel ferrites and their composite materials, Journal of Applied Physics, (2003) 2789-2796.
- [4] B. Thangjam, Structural, electrical and magnetic properties of Mg doped Ni-Cu-Zn Nano ferrites synthesized by Citrate Precursor method, International Journal of Applied Engineering, 23 (2017).
- [5] E. J. Verwey, P. W. Haayman and F. C. Romejin, physical properties and Cation Arrangement of Oxide with Spinel Structures, Journal of Chemical physics, 15 (1953) 321-342.
- [6] C. Kittel, Introduction to solid state physics, Wiley New York, 1976.
- [7] M. Murio, R. Street, P. G. McCormik and J. Amighian, Magnetic properties of ultrafine MnFe₂O₄ powders prepared by Mechanochemical processing, Journal of Physics, 54 (2001).
- [8] G. N. Saunders, J. P. Schille and A. P. Miodownik, Calculation of the temperature dependence of magnetic permeability for structural steels, in Sente Software, The Surrey Research Park, U.K.
- [9] S. Balci, I. Sefa, and N. Altin, An Investigation of Ferrite and Nanocrystalline Core Materials for Medium-Frequency Power Transformer, Journal of Electronic Materials, 2016.
- [10- [17] B. D. Cullity, introduction to magnetic materials, 1972.
- [11] Biju Thangjam, Structural, electrical and magnetic properties of Mg doped Ni-Cu-Zn nanoferrites synthesized by Citrate Precursor method, International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562, Volume 12, Number 23 (2017) pp. 13201-13206.
- [۱۲] حمید ابراهیم نیا، اسکندر کشاورز علمداری، محمود کاظم زاد و یدالله گنج خانلو، سنتز نانوذرات اسپینل فریت کبالت به روش میکروامولسیون، مجله تحقیقات مواد نانو کامپوزیتی، (۱۳۸۸) ۲۶۱-۲۶۶.
- [13] J. L. Snok, Gyromagnetic Resonance in Ferrites, Nature, vol. 160, (1947).
- [14] J. M. Hasting and L. M. Corliss, Neutron Diffraction Studies of Zinc Ferrite and Nickel Ferrite, Reviews of Modern Physics, 25 (1953) 114-119.
- [۱۵] مهین اشراقی، حمزه قربانی، بررسی اثر آلایش کروم بر روی ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات فریت MnFe₂-xCrxO₄، مجله پژوهش سیستم‌های بس‌ذره‌ای، دوره ششم، شماره ۱۲، ۱۳۹۵.
- [16] Application Note 1297, “Solutions for measuring permittivity and permeability,” Agilent literature number 5965-9430E.
- [17] M. Wu and A. Hoffmann, Recent Advances in Magnetic Insulators - From Spintronics to Microwave Applications, Volume 64, 2013.
- [18] M. Satalkar, S. N. Kane, M. Kumaresavanji and J. P. Araujob, On the role of cationic distribution in determining magnetic properties of Zn_{0.7} xNi_xMg_{0.2}Cu_{0.1}Fe₂O₄ nano ferrite, Magnetic Materials Laboratory, School of Physics, D. A. University, Khandwa road Campus, Indore – 452001, India.
- [19] Goldman, Modern Ferrite Technology, New York: Van Nostrand Reihold, 1990.
- [20] TDK, “Ferrites and accessories” General - Definitions, May 2017.
- [21] TDK, “Ferrites and accessories” Application notes, May 2017.

[22] G. Roespel, "Effect of the magnetic material on the shape and dimensions of transformers and chokes in switched mode power supplies", J. of Magn. and Magn. Materials 9 (1978) 145-49.

[23] DK, "Ferrite for Switching Power Supplies" Sep. 2004.

[24]https://fa.wikipedia.org/wiki/%D9%85%D9%82%D8%A7%D9%88%D9%85%D8%AA_%D9%88_%D8%B1%D8%B3%D8%A7%D9%86%D8%A7%DB%8C%DB%8C_%D9%88%DB%8C%DA%98%D9%87_%D8%A7%D9%84%DA%A9%D8%AA%D8%B1%DB%8C%DA%A9%DB%8C