بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده‌ی علوم

شماره‌ی پایان‌نامه: ۹۲۱۷۸۰۹

پایان‌نامه‌ی دکتری فیزیک

گرایش حالت جامد

عنوان:

ساخت و مطالعه‌ی خواص ساختاری و مغناطیسی نانوذرات اکسیدآهن و بررسی کاربرد آن‌ها

استاد راهنما:

دکتر ایرج کاظمی‌نژاد

استاد مشاور:

پروفسور Walther Schwarzacher

نگارنده:

صبا موسیوند

دی‌ماه ۱۳۹۲

تقدیم به:

همه‌ی هستی‌ام، پدر و مادر عزیزم

که وجود نازنین‌شان تاج افتخاری است بر سرم، در برابر عظمت مقام و بزرگواریشان زانوی ادب بر زمین می‌نهم و با دلی سرشار از محبت و خضوع، بر دستان پرمهرشان بوسه می‌زنم

خواهر مهربانم نسیم و برادران دوست‌داشتنی‌ام، مهدی و محمد

که مایه‌ی شادی و دلگرمی من و پشتوانه‌های محکم و مطمئن زندگیم هستند

دوستان خوبم در ترینیتی کالج دانشگاه دوبلین در ایرلند

و دانشگاه شهید چمران اهواز

که روزهایی زیبا و به‌یاد ماندنی را در کنار آنان سپری کردم

تقدیر و سپاس

با سپاس از یگانه پروردگار مهربان که با یاریش موفق به اتمام فصلی دیگر از دوران تحصیلم شده‌ام، مراتب قدرشناسی خود را به همه‌ی آنان که مرا همراهی نموده‌اند تقدیم می‌دارم.

از استاد راهنمای بسیار عزیزم، آقای **دکتر ایرج کاظمی‌نژاد** که با رهنمودهای ارزشمندشان همراه من بوده‌اند و در برخورد با رفتارهای نسنجیده و شتاب‌زده‌ی من بزرگوارانه شکیبایی پیشه کرده و با تذکرات آگاهانه درس‌های اخلاقی و علمی فراوانی به من آموخته‌اند، نهایت امتنان و سپاسگزاری را دارم. حضور ایشان به‌عنوان استاد راهنمای من در دو مقطع کارشناسی ارشد و دکتری باعث مباهات من است و امیدوارم که در آینده نیز افتخار شاگردی ایشان را داشته باشم.

از استاد بسیار گرانقدر و بزرگوارم، **پروفسور John Michael David Coey** در ترینیتی کالج دانشگاه دوبلین در کشور ایرلند جنوبی که با مساعدت و همکاری بسیار صمیمانه، همه‌جانبه و بی‌دریغ خود این فرصت را در اختیار من نهادند که بخش عمده‌ای از تحقیقات و آزمایشات این پایان‌نامه را با همکاری گروه مغناطیس و اسپینترونیک تحت نظارت ایشان، در بخش فیزیک ترینیتی کالج در دانشگاه دوبلین به انجام برسانم نهایت تشکر، سپاس و قدرشناسی را دارم.

از استاد مشاور ارجمندم، **پروفسور Walther Schwarzacher** در دانشگاه بریستول انگلیس که مسیر انجام این تحقیق را بر من هموار نمودند و در فراهم آوردن شرایطی مطلوب برای انجام آزمایشات این پایان‌نامه نقش بسیار چشمگیری داشته‌اند، بسیار سپاسگزارم.

از همه‌ی **دوستانم در ترینیتی کالج دانشگاه دوبلین** به‌ویژه آقایان دکتر Karl Ackland، دکتر Plamen Stamenov و خانم دکتر Lorena Maria Aranzazu Monzon که در انجام برخی از آزمایشات و آنالیزهای این تحقیق با من همکاری داشته‌اند، صمیمانه تشکر می‌کنم.

از همکاری **آزمایشگاه میکروسکوپ‌های پیشرفته، مرکز میکروسکوپی و آنالیز ترینیتی کالج دانشگاه دوبلین** و نیز **آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید چمران اهواز** بسیار سپاسگزارم.

از **شرکت Boliden Tara Mines** در ایرلند، کارگاه مکانیکی بخش فیزیک و آقایان پروفسور Balz Kamber و Kieran Joyce در ترینیتی کالج دانشگاه دوبلین به‌خاطر حمایت و همکاری مؤثر در انجام تحقیقات مربوط به بخش کاربردی این پایان‌نامه صمیمانه تشکر می‌کنم.

مراتب احترام خود را به **اساتید محترم در گروه فیزیک دانشگاه شهید چمران اهواز** ابراز نموده و از حمایت‌های **ستاد توسعه‌ی فناوری نانو** از این پایان‌نامه بسیار سپاسگزارم.

در پایان بوسه بر دستان همراهان همیشگی‌ام، **پدر و مادر عزیزم** می‌نهم که دعای خیر و حمایت آنان ناملایمات را بر من آسان نمود و شرایط انجام مطلوب‌تر این تحقیق را فراهم آورد.

فهرست مطالب صفحه

پیشگفتار ۱

فصل اول: کلیات **۳**

۱-۱. هدف از انجام این تحقیق ۳

۱-۲. پیشینه‌ی تحقیق ۵

۱-۳. روش کار و تحقیق ۷

فصل دوم: مقدمه‌ای بر طیف‌سنجی موسبائر **۹**

۲-۱. مقدمه ۹

۲-۲. اثر موسبائر و اصول فیزیکی حاکم بر آن ۹

۲-۳. طیف‌سنجی موسبائر ۱۲

۲-٤. برهم‌کنش‌های فوق‌ریز ۱۳

۲-٤-۱. انتقال ایزومری ۱٤

۲-٤-۲. شکافتگی چهارقطبی الکتریکی ۱۵

۲-٤-۳. شکافتگی فوق‌ریز مغناطیسی ۱٦

۲-۵. منظم‌سازی مغناطیسی و پدیده‌ی واهلش ۱۷

۲-٦. روش‌های آزمایشگاهی طیف‌سنجی موسبائر ۱۹

۲-۷. جمع‌بندی ۲۰

فصل سوم: ساخت نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن با روش الکترواکسیداسیون .. **۲۱**

۳-۱. مقدمه ۲۱

۳-۲. اکسیدهای آهن ۲۲

۳-۳. فرآیند الکترواکسیداسیون آهن ۲۳

۳-٤. نتیجه‌گیری ۲۷

فصل چهارم: مشخصه‌یابی ساختاری نانوذرات اکسید آهن تولید شده با روش الکترواکسیداسیون **۲۸**

٤-۱. مقدمه ۲۸

٤-۲. اثر عوامل پایدارساز بر ویژگی‌های ساختاری نانوذرات اکسید آهن ۲۹

٤-٢-١. آشنایی با ساختار شیمیایی پایدارسازهای مورد استفاده در این پروژه ٣٠
٤-٢-٢. مطالعه‌ی ساختاری نانوذرات ساخته شده با پایدارسازهای گوناگون (گروه ١)..... ٣٤
٤-٣. نانوذرات هسته/پوسته با هسته‌ی اکسید آهن و پوسته‌ی مواد آلی و پلیمری (گروه ٢) ٥٦
٤-٤. اثر غلظت تترامتیل‌آمونیوم‌کلراید بر ساختار نانوذرات اکسید آهن (گروه ٣)..... ٦٥
٤-٥. اثر شرایط رشد بر ساختار نانوذرات اکسید آهن ساخته شده با تیوره (گروه ٤)..... ٧٠
٤-٦. اثر شرایط رشد بر ساختار نانوذرات اکسید آهن ساخته شده با بوتیرات سدیم (گروه ٥)..... ٧٨
٤-٧. مقایسه‌ی شرایط مختلف آزمایشگاهی بر مشخصات ساختاری نانوذرات اکسید آهن ٨٨
٤-٨. اثر میدان‌های مغناطیسی و چرخش الکترولیت بر ساختار نانوذرات اکسید آهن (گروه ٦) ... ٨٩
٤-٩. نتیجه‌گیری ٩٣

فصل پنجم: مشخصه‌یابی مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن تولید شده با روش الکترواکسیداسیون ٩٥

٥-١. مقدمه ٩٥
٥-٢. بررسی ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات ساخته شده با پایدارسازهای گوناگون (گروه ١) ٩٦
٥-٣. ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات هسته/پوسته با هسته‌ی اکسید آهن (گروه ٢)..... ١٠٧
٥-٤. بررسی نمونه‌های نوعی گروه ١ و ٢ در دمای پایین با طیف‌سنج موسبائر..... ١١٣
٥-٥. اثر غلظت تترامتیل آمونیوم کلراید بر ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات (گروه ٣) ١١٤
٥-٦. ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات ساخته شده در حضور تیوره (گروه ٤)..... ١١٧
٥-٧. ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات ساخته شده در حضور بوتیرات سدیم (گروه ٥)..... ١٢٢
٥-٨. اثر میدان مغناطیسی و چرخش الکترولیت بر ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات (گروه ٦).... ١٢٨
٥-٩. مغناطش اشباع نانوذرات اکسید آهن بر حسب میدان مؤثر کنترل‌کننده‌ی آن‌ها..... ١٣٠
٥-١٠. نتیجه‌گیری ١٣٢

فصل ششم: مطالعه‌ی مشخصات ساختاری نانوذرات اکسید آهن تولید شده با روش سونوالکترواکسیداسیون ١٣٣

٦-١. مقدمه ١٣٣
٦-٢. اندازه‌گیری توان آکوستیکی امواج فراصوت ١٣٤
٦-٣. اثر توان امواج فراصوت بر مشخصات ساختاری نانوذرات اکسید آهن (گروه ٧) ١٣٥

٦-٤. اثر توان امواج فراصوت بر ساختار نانوذرات ساخته شده با مواد آلی مختلف..... ۱۵۳
٦-٥. اثر سیکل‌های گوناگون امواج فراصوت بر مشخصات نانوذرات تولید شده (گروه ۸)..... ۱۵۵
٦-٦. اثر تترامتیل آمونیوم کلراید بر ساختار نانوذرات ساخته شده به‌روش سونوالکترواکسیداسیون (گروه ۹)..... ۱٦۳
٦-۷. اثر شرایط رشد بر ساختار نانوذرات ساخته شده به‌روش سونوالکترواکسیداسیون با تیوره (گروه ۱۰)..... ۱٦۷
٦-۸. نتیجه‌گیری..... ۱۷٤
فصل هفتم: مشخصه‌یابی مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن تولید شده با روش سونوالکترواکسیداسیون..... ۱۷٦
۷-۱. مقدمه..... ۱۷٦
۷-۲. اثر توان امواج فراصوت بر ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن (گروه ۷)..... ۱۷۷
۷-۳. مقایسه‌ی اثر توان امواج فراصوت بر مشخصات مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن..... ۱۸۵
۷-٤. بررسی اثر رقیق‌سازی مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن با نانوذرات آلومینا (γ-Al_2O_3)..... ۱۹۱
۷-۵. ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات تهیه شده با سیکل‌های مختلف امواج فراصوت (گروه ۸). ۱۹۳
۷-٦. ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات ساخته شده با تترامتیل آمونیوم کلراید (گروه ۹)..... ۱۹۹
۷-۷. بررسی ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات ساخته شده در حضور تیوره (گروه ۱۰)..... ۲۰۲
۷-۸. نتیجه‌گیری..... ۲۰۷
فصل هشتم: بررسی گذار فاز نانوذرات مگنتایت ۲۰۸
۸-۱. مقدمه..... ۲۰۸
۸-۲. ساخت مگمایت و هیمتایت از نانوذرات مگنتایت..... ۲۰۹
۸-۳. اثر دمای پخت بر مشخصات ساختاری و مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن..... ۲۱۰
۸-٤. اثر زمان پخت بر مشخصات ساختاری و مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن..... ۲۱۳
۸-۵. نتیجه‌گیری..... ۲۱٦
فصل نهم: حذف آنتیموان و سرب از آب آلوده با روش الکترواکسیداسیون ۲۱۷
۹-۱. مقدمه..... ۲۱۷
۹-۲. روش آزمایشگاهی..... ۲۱۸

۹-۳. حذف آنتیموان و سرب از آب آلوده با روش الکترواکسیداسیون پالسی..... ۲۲۰
۹-۳-۱. اثر تعداد پالس‌ها بر فرآیند حذف آنتیموان از نمونه آب آلوده‌ی آزمایشگاهی..... ۲۲۰
۹-۳-۲. اثر ولتاژ و زمان بر فرآیند حذف آنتیموان از آب آلوده‌ی آزمایشگاهی..... ۲۲۱
۹-۳-۳. بررسی حذف آنتیموان از نمونه پساب صنعتی یک معدن روی در کشور ایرلند..... ۲۲۲
۹-٤. حذف سرب از آب آلوده‌ی آزمایشگاهی به‌روش الکترواکسیداسیون پالسی ۲۲۳
۹-۵. حذف هم‌زمان آنتیموان و سرب از آب آلوده‌ی آزمایشگاهی به‌روش الکترواکسیداسیون پالسی..... ۲۲٤
۹-٦. ایزوترم‌های جذب..... ۲۲۵
۹-۷. نتیجه‌گیری..... ۲۲۸
نتیجه‌گیری کلی..... ۲۲۹
پیشنهادات..... ۲۳۳
پیوست‌ها ۲۳٤
منابع و مراجع..... ۲٤۷

شکل ۲-۱: الف) رویداد پس‌زنی یک هسته‌ی آزاد حین گسیل پرتو گاما **ب)** توزیع انرژی پرتو گاما در حالت گسیل (سمت چپ) و جذب (سمت راست) در یک اتم آزاد، $P(E_\gamma)$ تکانه‌ی پرتو گاما است ۱۱

شکل ۲-۲: تصویر شماتیک طیف موسبائر هنگامی که اتم‌های گسیل و جذب در دو محیط یکسان قرار دارند ۱۲

شکل ۲-۳: تأثیرپذیری طیف موسبائر و ترازهای انرژی هسته‌ای به‌هنگام بروز انتقال ایزومری ۱۵

شکل ۲-٤: تأثیرپذیری طیف موسبائر و ترازهای انرژی هسته‌ای تحت گذار $\frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$، برای یک توزیع بار نامتقارن ۱۵

شکل ۲-۵: اثر شکافتگی مغناطیسی بر ترازهای انرژی هسته‌ای در غیاب شکافتگی چهارقطبی ۱۷

شکل ۲-٦: فرآیند واپاشی ^{57}Co و گسیل پرتو گاما ۲۰

شکل ٤-۱: ساختار مولکولی تترامتیل آمونیوم کلراید ۳۰

شکل ٤-۲: ساختار مولکولی تترابوتیل آمونیوم برمید ۳۰

شکل ٤-۳: ساختار مولکولی تری‌بوتیل متیل آمونیوم کلراید ۳۱

شکل ٤-٤: ساختار مولکولی ستیل تری‌متیل آمونیوم برمید ۳۱

شکل ٤-۵: ساختار مولکولی سدیم دودسیل سولفات ۳۲

شکل ٤-٦: ساختار مولکولی پروپیل آمین ۳۲

شکل ٤-۷: ساختار مولکولی اتیلن دی‌آمین ۳۲

شکل ٤-۸: ساختار مولکولی تیوره ۳۲

شکل ٤-۹: ساختار مولکولی ۳- فنیل ۱- پروپیل آمین ۳۳

شکل ٤-۱۰: ساختار مولکولی هگزامتیلن تترا آمین ۳۳

شکل ٤-۱۱: ساختار مولکولی بتا- سایکلودکسترین ۳۳

شکل ٤-۱۲: ساختار مولکولی پلی‌اتیلن گلیکول ۳٤

شکل ٤-۱۳: طیف‌های عبوری FT-IR نمونه‌های مختلف رشد داده شده در حضور سمت راست) پایدارسازهای گوناگون و سمت چپ) بتاسایکلودکسترین ۳٦

شکل ٤-١٤: الگوهای XRD نمونه‌های ساخته شده در حضور پایدارسازهای گوناگون به‌همراه دو نمونه‌ی بدون پایدارساز (سمت راست)، الگوی برازش شده‌ی نمونه‌ی ساخته شده در غیاب پایدارساز (سمت چپ)..... ٤٠
شکل ٤-١٥: تصاویر SEM نانوذرات رشد یافته در حضور پایدارسازهای گوناگون و دو نمونه‌ی بدون پایدارساز به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی ذرات بر حسب اندازه‌ی آن‌ها..... ٤٧
شکل ٤-١٦: نتایج حاصل از آنالیز EDX یک نمونه‌ی نوعی تولید شده در حضور TBAC..... ٥٠
شکل ٤-١٧: آنالیز عنصری EDX یک نمونه‌ی نوعی تولید شده در حضور TBAC، در امتداد یک خط..... ٥٠
شکل ٤-١٨: تصاویر HRTEM نمونه‌های ساخته شده با پایدارسازهای Tu، TBAB، PA، PEG، HMTA، β-CD، و نمونه‌ی ساخته شده در غیاب پایدارساز، با بزرگنمایی‌های گوناگون..... ٥٤
شکل ٤-١٩: تصاویری از مد پراش الکترون متعلق به نمونه‌های ساخته شده با پایدارسازهای Tu، TBAB، PA، PEG، HMTA، β-CD و نمونه‌ی ساخته شده در غیاب پایدارساز..... ٥٥
شکل ٤-٢٠: تبدیل پیرول به پلی‌پیرول تحت فرآیند الکتروپلیمریزاسیون..... ٥٦
شکل ٤-٢١: تبدیل آنیلین به پلی‌آنیلین تحت فرآیند پلیمریزاسیون اکسیداسیون شیمیایی..... ٥٧
شکل ٤-٢٢: نمایی شماتیک از چگونگی اتصال مولکول‌های پلی‌اکریلیک اسید و دی‌اتیلن تری آمین بر سطح نانوذرات اکسید آهن..... ٥٧
شکل ٤-٢٣: طیف‌های عبوری FT-IR نمونه‌های مختلف پوشش داده شده با مواد آلی و پلیمری گوناگون..... ٥٩
شکل ٤-٢٤: الگوهای XRD نمونه‌های پوشش داده شده با مواد آلی و پلیمری گوناگون (سمت راست)، الگوی برازش شده‌ی نانوذرات اکسید آهن/پلی‌پیرول (سمت چپ)..... ٦٠
شکل ٤-٢٥: تصاویر SEM نانوذرات اکسید آهن/پلی‌پیرول، اکسید آهن/پلی‌آنیلین و اکسید آهن-/بوتیرات به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی آن‌ها..... ٦٢
شکل ٤-٢٦: تصاویر HRTEM نانوذرات اکسید آهن/پلی‌پیرول، اکسید آهن/پلی‌آنیلین، اکسید آهن/بوتیرات، و اکسید آهن/پلی‌اکریلیک اسید/دی‌اتیلن تری آمین..... ٦٤
شکل ٤-٢٧: تصاویری از مد پراش الکترون متعلق به نانوذرات اکسید آهن/پلی‌پیرول، اکسید آهن/پلی‌آنیلین و اکسید آهن/پلی‌اکریلیک اسید/دی‌اتیلن تری آمین..... ٦٥

شکل ٤-٢٨: الگوهای XRD نمونه‌های ساخته شده با غلظت‌های گوناگون TMAC (سمت راست)، الگوی برازش شده‌ی نمونه‌ی تهیه شده با غلظت ۰٫۰۵ مولار TMAC..... ٦٦
شکل ٤-٢٩: تصاویر SEM نانوذرات اکسید آهن ساخته شده با غلظت‌های گوناگون TMAC به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی آن‌ها..... ٦٩
شکل ٤-٣٠: نمودار اندازه‌ی میانگین نانوذرات اکسید آهن بر حسب غلظت‌های گوناگون پایدارساز TMAC..... ٧٠
شکل ٤-٣١: الگوهای XRD نمونه‌های گروه ٤ ساخته شده در شرایط مختلف آزمایشگاهی در حضور Tu و الگوی برازش شده‌ی نانوذرات تهیه شده با غلظت ۰٫۰۷ مولار Tu با اعمال ولتاژ ۵ ولت در دمای $٦٠^{o}C$..... ٧٢
شکل ٤-٣٢: تصاویر SEM و نمودارهای توزیع فراوانی نانوذرات اکسید آهن ساخته شده در غلظت‌های گوناگون Tu..... ٧٥
شکل ٤-٣٣: تصاویر SEM و نمودارهای فراوانی ذرات اکسید آهن ساخته شده با Tu تحت ولتاژهای گوناگون..... ٧٦
شکل ٤-٣٤: تصاویر SEM و نمودارهای توزیع فراوانی ذرات اکسید آهن ساخته شده با Tu در دماهای گوناگون..... ٧٧
شکل ٤-٣٥: نمودار اندازه‌ی میانگین نانوذرات اکسید آهن رشد یافته در حضور پایدارساز Tu بر حسب الف) غلظت Tu، ب) پتانسیل رشد و ج) دمای رشد..... ٧٨
شکل ٤-٣٦: الگوهای XRD نمونه‌های ساخته شده در حضور Bu تحت شرایط مختلف آزمایشگاهی و الگوی برازش شده‌ی نانوذرات تهیه شده با غلظت ۰٫۱٤ مولار Bu با اعمال ولتاژ ۵ ولت و در دمای $٦٠^{o}C$..... ٨٠
شکل ٤-٣٧: تصاویر SEM و نمودارهای فراوانی نانوذرات اکسید آهن ساخته شده در غلظت‌های گوناگون Bu..... ٨٢
شکل ٤-٣٨: تصاویر SEM نانوذرات اکسید آهن ساخته شده تحت اعمال ولتاژهای گوناگون در حضور Bu..... ٨٣
شکل ٤-٣٩: تصاویر SEM و نمودارهای فراوانی ذرات اکسیدآهن تهیه شده در دماهای گوناگون در حضور Bu..... ٨٥

شکل ٤-٤٠: انحراف معیار و اندازه‌ی میانگین نانوذرات ساخته شده در حضور Bu بر حسب الف) غلظت Bu، پتانسیل رشد و ج) دمای رشد..... ٨٧
شکل ٤-٤١: دو آهنربای دائمی مورد استفاده در این تحقیق با شدت ٠/١٥ تسلا (راست) و ٠/٥ تسلا (چپ)..... ٨٩
شکل ٤-٤٢: الگوهای XRD نمونه‌های ساخته شده در شرایط عادی محیط، با اعمال میدان‌های مغناطیسی و با همزن مغناطیسی (سمت راست)، الگوی برازش شده‌ی نمونه‌ی تهیه شده در شرایط عادی محیط (سمت چپ)..... ٩٠
شکل ٤-٤٣: تصاویر SEM و نمودارهای توزیع فراوانی نمونه‌های عضو گروه ٦..... ٩٣
شکل ٥-١: طیف‌های موسبائر نمونه‌های گروه ١ و نمونه‌ی SES بررسی شده در دمای اتاق..... ١٠٠
شکل ٥-٢: منحنی‌های پسماند نمونه‌های عضو گروه ١ و نمونه‌ی SES اندازه‌گیری شده با VSM در دمای اتاق..... ١٠٤
شکل ٥-٣: منحنی‌های مغناطش چند نمونه از گروه ١ اندازه‌گیری شده در دمای اتاق و ٤ کلوین با SQUID..... ١٠٥
شکل ٥-٤: منحنی‌های مغناطش بر حسب دما، تحت اعمال میدان ٠/١ تسلا مربوط به نمونه‌های ساخته شده با EDA، β-CD، Tu و نیز دو نمونه‌ی بدون پایدارساز اندازه‌گیری شده با SQUID ١٠٦
شکل ٥-٥: طیف‌های موسبائر سه نمونه متعلق به گروه ٢ بررسی شده در دمای اتاق..... ١٠٧
شکل ٥-٦: منحنی‌های پسماند نمونه‌های عضو گروه ٢ اندازه‌گیری شده با VSM در دمای اتاق. ١٠٩
شکل ٥-٧ : منحنی‌های مغناطش نمونه‌های گروه ٢ در دمای ٤ کلوین اندازه‌گیری شده با استفاده از SQUID..... ١١٠
شکل ٥-٨: منحنی‌های ZFC و FC نمونه‌ی سوپرپارامغناطیس پوشش داده شده با پلی‌اکریلیک اسید و دی‌اتیلن تری آمین اندازه‌گیری شده تحت اعمال میدان مغناطیسی خارجی ٠/١ تسلا با استفاده از SQUID..... ١١٢
شکل ٥-٩: منحنی‌های مغناطش بر حسب دما، با اعمال میدان مغناطیسی ٠/١ تسلا مربوط به نمونه‌های پوشش داده شده با PPy، PANI و ٠/١ و ١ تسلا متعلق به نمونه‌ی پوشش داده شده با Bu اندازه‌گیری شده با SQUID..... ١١٢

شکل ۵-۱۰: طیف‌های موسبائر برخی از نمونه‌های گروه ۱ و ۲ بررسی شده در دمای حدود ۱۸ کلوین..... ۱۱٤
شکل ۵-۱۱: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر، مربوط به نمونه‌های گروه ۳ در دمای اتاق..... ۱۱۵
شکل ۵-۱۲: منحنی‌های پسماند و نمودار مغناطش ویژه‌ی نمونه‌های گروه ۳ بر حسب غلظت TMAC، بررسی شده با VSM در دمای اتاق..... ۱۱٦
شکل ۵-۱۳: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ٤- الف در دمای اتاق..... ۱۱۷
شکل ۵-۱٤: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ٤- ب در دمای اتاق..... ۱۱۸
شکل ۵-۱۵: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ٤- پ در دمای اتاق..... ۱۱۸
شکل ۵-۱٦: منحنی‌های پسماند و نمودار مغناطش ویژه‌ی نمونه‌های گروه ٤ بررسی شده با VSM در دمای اتاق..... ۱۲۱
شکل ۵-۱۷: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ۵- الف در دمای اتاق..... ۱۲۲
شکل ۵-۱۸: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ۵- ب در دمای اتاق..... ۱۲۳
شکل ۵-۱۹: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ۵- پ در دمای اتاق..... ۱۲۳
شکل ۵-۲۰: منحنی‌های پسماند و نمودار مغناطش ویژه‌ی نمونه‌های گروه ۵ بررسی شده با VSM در دمای اتاق..... ۱۲٦
شکل ۵-۲۱: ZFC و FC نمونه‌ی سوپرپارامغناطیس ساخته شده در دمای $5^{o}C$ و اندازه‌گیری شده تحت اعمال میدان مغناطیسی خارجی ۰٫۱ تسلا با استفاده از SQUID..... ۱۲۸
شکل ۵-۲۲: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ٦ در دمای اتاق..... ۱۲۹

شکل ۵-۲۳: منحنی‌های پسماند نمونه‌های گروه ٦ بررسی شده با VSM در دمای اتاق. ۱۳۰
شکل ۵-۲٤: نمودار نقطه‌ای M_s بر حسب H_0 مربوط به نانوذرات اکسید آهن عضو گروه‌های مختلف..... ۱۳۱
شکل ٦-۱: نمودار تغییرات توان و چگالی توان آکوستیکی بر حسب درصد دامنه‌ی امواج فراصوت..... ۱۳۵
شکل ٦-۲: الگوهای XRD نمونه‌های گروه ۷ ساخته شده با اعمال امواج فراصوت با دامنه‌های مختلف و الگوی برازش شده‌ی نمونه‌ی ساخته شده با دامنه‌ی ۱۰۰٪ امواج فراصوت بدون ماده‌ی آلی..... ۱۳۷
شکل ٦-۳: تصاویر SEM به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی نمونه‌های گروه ۷- الف. ۱٤۰
شکل ٦-٤: تصاویر SEM به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی نمونه‌های گروه ۷- ب..... ۱٤۲
شکل ٦-۵: تصاویر SEM به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی نمونه‌های گروه ۷- پ..... ۱٤٤
شکل ٦-٦: تصاویر SEM به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی نمونه‌های گروه ۷- ت..... ۱٤٦
شکل ٦-۷: تصاویر SEM به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی نمونه‌های گروه ۷- ث..... ۱٤۸
شکل ٦-۸: نمودارهای اندازه‌ی میانگین ذرات گروه ۷ بر حسب دامنه‌ی امواج فراصوت..... ۱٤۹
شکل ٦-۹: تصاویر HRTEM سه نمونه از نانوذرات گروه ۷- ب، با بزرگنمایی‌های مختلف..... ۱۵۱
شکل ٦-۱۰: تصاویر HRTEM سه نمونه از نانوذرات گروه ۷- پ، با بزرگنمایی‌های مختلف. . ۱۵۱
شکل ٦-۱۱: تصاویر HRTEM دو نمونه از نانوذرات گروه ۷- ت با بزرگنمایی‌های مختلف. ... ۱۵۲
شکل ٦-۱۲: تصاویر HRTEM دو نمونه از نانوذرات گروه ۷- ث با بزرگنمایی‌های مختلف. ... ۱۵۳
شکل ٦-۱۳: الگوهای XRD نمونه‌های گروه ۸ تهیه شده با اعمال امواج فراصوت با سیکل‌های مختلف و الگوی برازش شده‌ی نمونه‌ی ساخته شده در حضور TMAC با سیکل ۰/٦ امواج فراصوت..... ۱۵۷
شکل ٦-۱٤: نمودارهای توزیع فراوانی ذرات و تصاویر SEM نمونه‌های عضو گروه ۸- الف. .. ۱۵۹
شکل ٦-۱۵: نمودارهای توزیع فراوانی ذرات و تصاویر SEM نمونه‌های عضو گروه ۸- ب. ۱٦۰
شکل ٦-۱٦: نمودارهای توزیع فراوانی ذرات و تصاویر SEM نمونه‌های عضو گروه ۸- پ. ۱٦۱
شکل ٦-۱۷: نمودارهای توزیع فراوانی ذرات و تصاویر SEM نمونه‌های عضو گروه ۸- ت. ۱٦۲
شکل ٦-۱۸: نمودار اندازه‌ی میانگین و توزیع ذرات گروه ۸ بر حسب سیکل امواج فراصوت.... ۱٦۳

شکل ٦-١٩: الگوهای XRD نمونه‌های ساخته شده با غلظت‌های گوناگون TMAC و اعمال امواج فراصوت (سمت راست)، الگوی برازش شده‌ی نمونه‌ی تهیه شده با غلظت ۰٫۰۵ مولار TMAC (سمت چپ)..... ١٦٤
شکل ٦-٢٠: تصاویر SEM نانوذرات گروه ۹ به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی آن‌ها..... ١٦٥
شکل ٦-٢١: چپ) اندازه‌ی میانگین ذرات رشد یافته در حضور امواج فراصوت بر حسب غلظت TMAC راست) اندازه‌ی میانگین ذرات ساخته شده در غیاب و در حضور امواج فراصوت بر حسب غلظت TMAC..... ١٦٦
شکل ٦-٢٢: الگوهای XRD نمونه‌های گروه ۱۰ و الگوی برازش شده‌ی نانوذرات تهیه شده با غلظت ۰٫۰۷ مولار Tu در دمای $٦٠^{o}C$ با اعمال ۵ ولت با استفاده از نرم‌افزار فول‌پروف (سمت چپ)..... ١٦٨
شکل ٦-٢٣: تصاویر SEM نانوذرات گروه ۱۰- الف به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی آن‌ها... ١٧٠
شکل ٦-٢٤: تصاویر SEM نانوذرات گروه ۱۰- ب به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی آن‌ها. ١٧١
شکل ٦-٢٥: تصاویر SEM نانوذرات گروه ۱۰- پ به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی آن‌ها. ١٧٢
شکل ٦-٢٦: ستون چپ) اندازه‌ی میانگین ذرات رشد یافته در حضور امواج فراصوت بر حسب الف) غلظت Tu، پتانسیل رشد و ج) دمای رشد ستون راست) اندازه‌ی میانگین ذرات ساخته شده در غیاب و در حضور امواج فراصوت بر حسب پارامترهای رشد..... ١٧٣
شکل ٧-١: طیف‌های موسبائر نمونه‌های گروه ۷-الف بررسی شده در دمای اتاق..... ١٧٧
شکل ٧-٢: طیف‌های موسبائر نمونه‌های گروه ۷- ب بررسی شده در دمای اتاق..... ١٧٨
شکل ٧-٣: طیف‌های موسبائر نمونه‌های گروه ۷- پ بررسی شده در دمای اتاق..... ١٧٨
شکل ٧-٤: طیف‌های موسبائر نمونه‌های گروه ۷- ت بررسی شده در دمای اتاق..... ١٧٩
شکل ٧-٥: طیف‌های موسبائر نمونه‌های گروه ۷- ث بررسی شده در دمای اتاق..... ١٧٩
شکل ٧-٦: منحنی‌های پسماند و نمودار مغناطش ویژه بر حسب دامنه‌ی امواج فراصوت نمونه-های گروه ۷ اندازه‌گیری شده با VSM در دمای اتاق..... ١٨٤
شکل ٧-٧: تغییرات مغناطش ویژه‌ی نمونه‌ها بر حسب اندازه‌ی میانگین ذرات گروه ۷ (خطوط نقطه‌چین برازش نمودارها با تابع معرفی شده در رابطه‌ی ۷-۳ را نشان می‌دهند)..... ١٨٦

شکل ۷-۸: توالی حالات مغناطیسی مورد انتظار برای ذرات فرومغناطیس با ناهمسانگردی تک محوری قوی (الف) و ناهمسانگردی ضعیف مانند ذرات مگنتایت تقریباً کروی (ب)..... ۱۹۰
شکل ۷-۹: منحنی‌های مغناطش بر حسب میدان یک نمونه از نانوذرات اکسید آهن رقیق شده با نسبت‌های وزنی مختلف آلومینا..... ۱۹۱
شکل ۷-۱۰: منحنی‌های مغناطش بر حسب میدان یک نمونه از نانوذرات اکسید آهن رقیق شده با نسبت ۱:۱۰۰ آلومینا: اکسید آهن..... ۱۹۲
شکل ۷-۱۱: نمودار M_s بر حسب H_0 نانوذرات مورد مطالعه در این تحقیق با در نظر داشتن مقدار میانگین این دو پارامتر برای نمونه‌های رقیق شده با آلومینا..... ۱۹۳
شکل ۷-۱۲: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ۸- الف در دمای اتاق..... ۱۹٤
شکل ۷-۱۳: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ۸- ب در دمای اتاق..... ۱۹٤
شکل ۷-۱٤: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ۸- پ در دمای اتاق..... ۱۹۵
شکل ۷-۱۵: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ۸- ت در دمای اتاق..... ۱۹۵
شکل ۷-۱٦: منحنی‌های پسماند و نمودار مغناطش ویژه‌ی نمونه‌های گروه ۸ بر حسب سیکل امواج فراصوت، بررسی شده با VSM در دمای اتاق..... ۱۹۸
شکل ۷-۱۷: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ۹ در دمای اتاق..... ۲۰۰
شکل ۷-۱۸: منحنی‌های پسماند و نمودار مغناطش ویژه بر حسب غلظت TMAC مربوط به نمونه‌های گروه ۹ بررسی شده با VSM در دمای اتاق..... ۲۰۱
شکل ۷-۱۹: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ۱۰- الف در دمای اتاق..... ۲۰۳
شکل ۷-۲۰: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ۱۰- ب در دمای اتاق..... ۲۰٤

شکل ۷-۲۱: طیف‌های تجربی و برازش شده‌ی موسبائر مربوط به نمونه‌های گروه ۱۰- پ در دمای اتاق..... ۲۰٤
شکل ۷-۲۲: منحنی‌های پسماند و نمودار مغناطش نمونه‌های گروه ۱۰ بررسی شده با VSM در دمای اتاق بر حسب الف) غلظت Tu، پتانسیل رشد و ج) دمای رشد..... ۲۰٦
شکل ۸-۱: الگوهای XRD نمونه‌های حاصل پس از پخت به مدت ٤ ساعت در دماهای گوناگون..... ۲۱۰
شکل ۸-۲: طیف‌های موسبائر نمونه‌های نوعی مگمایت و هیمتایت پخت شده در دماهای گوناگون و اندازه‌گیری شده در دمای اتاق..... ۲۱۲
شکل ۸-۳: منحنی‌های مغناطش بر حسب میدان نمونه‌های پخت شده در دماهای گوناگون..... ۲۱۳
شکل ۸-٤: الگوهای XRD نمونه‌های حاصل پس از پخت در دمای $۲۰۰^{o}C$ در زمان‌های گوناگون..... ۲۱٤
شکل ۸-۵: طیف‌های موسبائر نمونه‌های حاصل پس از پخت در دمای $۲۰۰^{o}C$ در زمان‌های گوناگون و اندازه‌گیری شده در دمای اتاق..... ۲۱٤
شکل ۸-٦: الگوهای XRD نمونه‌های حاصل پس از پخت در دمای $٦۵۰^{o}C$ در زمان‌های گوناگون..... ۲۱۵
شکل ۸-۷: طیف‌های موسبائر نمونه‌های حاصل پس از پخت در دمای $٦۵۰^{o}C$ در زمان‌های گوناگون و اندازه‌گیری شده در دمای اتاق..... ۲۱۵
شکل ۹-۱: غلظت آنتیموان موجود در نمونه‌ی آب آلوده‌ی آزمایشگاهی پس از جذب توسط نانوذرات مگنتایت ساخته شده بدون ماده‌ی آلی و در حضور Bu و Tu (غلظت ارائه شده به عدد یک بهنجار شده است و به‌منظور وضوح بیشتر داده‌ها، محور عمودی در مقیاس کمتر از یک نشان داده شده است)..... ۲۱۹
شکل ۹-۲: غلظت آنتیموان موجود در نمونه‌ی آب آلوده‌ی آزمایشگاهی بر حسب تعداد پالس‌ها پس از فرآیند الکترواکسیداسیون، اندازه‌گیری شده توسط ICP-MS (غلظت ارائه شده به عدد یک بهنجار شده است و نقطه‌ی نشان داده شده با دایره به غلظت فلز پیش از فرآیند جداسازی اشاره دارد)..... ۲۲۱

شکل ۹-۳: غلظت آنتیموان موجود در نمونه‌ی آب آلوده‌ی آزمایشگاهی بر حسب زمان پس از فرآیند الکترواکسیداسیون، اندازه‌گیری شده توسط ICP-MS (غلظت ارائه شده به عدد یک بهنجار شده است و نقطه‌ی نشان داده شده با دایره به غلظت فلز پیش از فرآیند جداسازی اشاره دارد).. ۲۲۲
شکل ۹-٤: غلظت آنتیموان موجود در پساب صنعتی یک معدن روی، در کشور ایرلند بر حسب زمان پس از فرآیند الکترواکسیداسیون، اندازه‌گیری شده توسط ICP-MS (غلظت ارائه شده به عدد یک بهنجار شده است و نقطه‌ی نشان داده شده با دایره به غلظت فلز پیش از فرآیند جداسازی اشاره دارد)..... ۲۲۳
شکل ۹-۵: غلظت سرب موجود در آب آلوده‌ی آزمایشگاهی بر حسب زمان پس از فرآیند الکترواکسیداسیون، اندازه‌گیری شده توسط ICP-MS (غلظت ارائه شده به عدد یک بهنجار شده است و نقطه‌ی نشان داده شده با دایره به غلظت فلز پیش از فرآیند جداسازی اشاره دارد)..... ۲۲٤
شکل ۹-٦: غلظت آنتیموان و سرب موجود در آب آلوده‌ی آزمایشگاهی بر حسب زمان پس از فرآیند الکترواکسیداسیون، اندازه‌گیری شده توسط ICP-MS (غلظت ارائه شده به عدد یک بهنجار شده است و نقطه‌ی نشان داده شده با دایره به غلظت فلز پیش از فرآیند جداسازی اشاره دارد).. ۲۲۵
شکل ۹-۷: برازش داده‌های تجربی حاصل از حذف آنتیموان با ایزوترم‌های لانگمویر و فرندلیچ. ۲۲٦
شکل ۹-۸: نتیجه‌ی آنالیز EDX یک نمونه‌ی نوعی از رسوب حاصل از فرآیند الکتراکسیداسیون پس از حذف هم‌زمان آنتیموان و سرب..... ۲۲۷

جدول ۳-۱: گروه‌های مختلف نانوذرات با پایه‌ی Fe_3O_4، ساخته شده به‌روش الکترواکسیداسیون در این تحقیق..... ۲۶
جدول ۳-۲: گروه‌های مختلف نانوذرات Fe_3O_4 ساخته شده به‌روش سونوالکترواکسیداسیون در این تحقیق..... ۲۷
جدول ٤-۱: اندازه‌ی میانگین و انحراف معیار ذرات تولید شده در حضور مواد آلی و دو نمونه‌ی بدون پایدارساز..... ٤۳
جدول ٤-۲: درصد عناصر یک نمونه‌ی نوعی تولید شده در حضور TBAC..... ٤۹
جدول ٤-۳: مشخصات مربوط به صفحات بلوری مگنتایت (مرجع: کارت استاندارد شماره‌ی ۰٦۲۹-۱۹)..... ۵۱
جدول ۵-۱: برخی اطلاعات حاصل از بررسی نمونه‌های گروه ۱ و SES با طیف‌سنجی موسبائردر دمای اتاق..... ۱۰۱
جدول ۵-۲: برخی اطلاعات حاصل از بررسی نمونه‌های گروه ۲ با طیف‌سنج موسبائر در دمای اتاق..... ۱۰۸
جدول ۵-۳: برخی اطلاعات حاصل از بررسی نمونه‌های گروه ۳ با استفاده از طیف‌سنج موسبائر۱۱٦
جدول ۵-٤: برخی از اطلاعات حاصل از بررسی نمونه‌های گروه ٤ با استفاده از طیف‌سنج موسبائر..... ۱۱۹
جدول ۵-۵: برخی از اطلاعات حاصل از بررسی نمونه‌های گروه ۵ با استفاده از طیف‌سنج موسبائر..... ۱۲۵
جدول ۷-۱: برخی از اطلاعات حاصل از برازش طیف‌های موسبائر نمونه‌های گروه ۷ در دمای اتاق..... ۱۸۱
جدول ۷-۲: برخی از اطلاعات حاصل از بررسی نمونه‌های گروه ۸ با استفاده از طیف‌سنج موسبائر..... ۱۹٦
جدول ۷-۳: برخی از اطلاعات حاصل از بررسی نمونه‌های گروه ۹ با استفاده از طیف‌سنج موسبائر..... ۲۰۱
جدول ۷-٤: برخی از اطلاعات حاصل از بررسی نمونه‌های گروه ۱۰ با استفاده از طیف‌سنج موسبائر..... ۲۰۵

پیشگفتار

من مایلم بحثی را مطرح کنم که تاکنون کار زیادی در مورد آن انجام نشده است، ولی می‌توان کارهای فراوانی را بر روی آن انجام داد. این زمینه چیز زیادی در مورد فیزیک بنیادی به ما نمی‌گوید و بیشتر به فیزیک حالت جامد شبیه است و مطالب بسیار جالبی در مورد پدیده‌های عجیبی که در موقعیت‌های پیچیده روی می‌دهند به ما می‌گوید. نکته‌ی بسیار مهم این است که کاربردهای فناوری فراوان نیز دارد ... آنچه که من می‌خواهم در مورد آن صحبت کنم دستکاری و کنترل ماهرانه‌ی اشیاء در مقیاس کوچک است ... یک جهان کوچک بهت‌آور در زیر (آنچه که ما داریم) وجود دارد ... اگر ما واقعاً بتوانیم اتم‌ها را آن‌گونه که می-خواهیم بیاراییم، خواص مواد چگونه خواهند بود؟ تحقیق در مورد آن از دید نظری بسیار جالب خواهد بود. من دقیقاً نمی‌توانم بگویم چه اتفاقی خواهد افتاد، اما تصور می‌کنم با کنترل چیدمان اشیاء در مقیاس کوچک، خواص بسیار متفاوتی بروز خواهند یافت ... این چیزی است که اصولاً قابل انجام است، اما عملاً انجام نشده است، زیرا ما بسیار بزرگ هستیم [۱].

ریچارد فیلیپس فاینمن[1]

در سایه‌ی پویش‌های فکری و پژوهش‌های ستودنی بشر کاوشگر، هم‌اینک نظاره‌گر و شاهد جهشی عظیم و خیره‌کننده در عرصه‌ی کوچک‌سازی مواد و اشیا می‌باشیم. فناوری نوظهور نانو که تنها چند دهه از دوران نوپایی خود را پشت سر گذارده است، دستخوش تحولاتی شگرف گردیده و با خیزشی مبهوت‌کننده در عرصه‌ی دانش و فناوری به جایگاهی شایسته و درخور ستایش دست یافته است.

شاید بتوان سنگ بنا و جوهره‌ی اصلی این گستره از علم را نظریه‌ی معروف اتمی دانست. زیرا شناخت ساختار اتم‌ها به‌عنوان اجزای تشکیل‌دهنده‌ی هستی، محور بنیادین در درک و کشف

[1] Richard Phillips Feynman