

چکیده

در این پژوهش، اثر افزایش نانو سولفید روی بر روی پلی استایرن، و بررسی استحکام مکانیکی نانو کامپوزیت مورد توجه قرار گرفت. بدین منظور، در ابتدا به منظور بررسی ساختار و نحوه عملکرد نانو ذرات نانو سولفید روی، تحلیلی بر روی تصاویر SEM به وسیله دستگاه میکروسکوپ الکترونی پویشی و XRD به وسیله پراش پرتو ایکس نانو ذرات سولفید روی صورت گرفت، سپس با اختلاط نانو ذرات سولفید روی با پلی استایرن در درصد های ۱ و ۴ درصدی با استفاده از دستگاه ZSK25، در دمای ۱۰۰ درجه و فشار 200KP گرانیهای لازم برای انجام آزمایشات مهیا گردید. در مرحله بعد خواص مکانیکی شامل الاستیسیته (مدول کشش)، سختی، MFI اندازه گیری شد. داده های حاصله از این پژوهش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش نانو سولفید روی به پلی استایرن مقدار مدول کشش و سختی به طور معنی داری افزایش پیدا کرد. و مقدار MFI نیز کاهش چشمگیری نسبت به حالت اولیه پلی استایرن را نشان داد که در این بین بهترین حالت مربوط به نانو کامپوزیت ۱ درصد بود.

واژه های کلیدی: نانو سولفید روی، پلی استایرن، مدول کشش، سختی، MFI، نانو کامپوزیت

مقدمه:

از آنجا که انتخاب مواد برای کاربرد ساختاری ویژه، به ویژگی های مکانیکی آن، بستگی دارد. بنابراین، آشنایی با برخی از آزمایشهای استاندارد که برای اندازه گیری این ویژگی ها به کار می رود و نیز درک اهمیت داده های به دست آمده از این آزمایشات، مهم است. ظرفیت یک ماده که بتواند یک نیروی ثابت را تحمل کند، به وسیله ی آزمایش ماده در کشش یا فشار، میتوان تعیین کرد.

آگاهی در مورد مقاومت ماده در برابر تغییر شکل همیشگی را از آزمایشات سختی، میتوان بدست آورد. آزمایش ضربه برای تعیین چقرمگی یک ماده، در شرایط بارگذاری آنی، مورد استفاده قرار میگیرد.

هنگامی که اولین آزمایشات در یک محدوده ی درجه ی حرارت انجام شوند، میتوان از آنها برای آشکار شدن هرگونه تغییر حالت از نرمی به تردی استفاده کرد.

آزمایشات خزش و تنش شکست برای ارزیابی رفتار یک ماده هنگامی استفاده می شود که آن ماده در درجه حرارت بالا و زمان طولانی، تحت نیرو قرار میگیرد.

فصل اول

مروری بر منابع مطالعاتی

۱-۱- تاریخچه و مفاهیم پلیمرها

عنوان پلیمر اولین بار توسط شیمی دان سوئدی به نام برزلیوس در سال ۱۸۳۳ هنگامی که پلاستیک وینیل کلراید را سنتز نمود، به کار رفت. اولین کاربرد تجاری شناخته شده مواد پلیمری در سال ۱۸۴۳ به وسیله یک جراح اهل مالایا به نام دکتر ویلیام مونتهگری صورت گرفت. وی، پی برد که اهالی مالایا از پلیمر طبیعی کائوچو برای ساختن دسته های چاقو و طناب استفاده میکنند، بنابراین رزین جمع آوری شده از درخت کائوچو برای بررسی دانشمندان و صنعتگران به انگلستان فرستاده شد و مایکل فارادی در یافت که چون کائوچو عایق الکتریکی خوبی است و بنابراین آن را برای عایق بندی اولین کابل های انتقالی از اقیانوس اطلس به کار برد [۸]. در شال ۱۸۶۲ الکساندر پارکس از بیرمنگام انگلستان، پلاستیک جدیدی به نام پارکسین ها را معرفی نمود که از نیتروسولوز با کمتر از ۱۲ درصد نیتروژن تولید شده بود. در سال ۱۸۶۸ جان هیت به همراه برادرش ایسایا به طور اتفاقی کافور را با مقدار پیروکسیلین (نیترو سلولز با نیتروژن کم) مخلوط نمود و سلولوئید حاصل شد. این پلاستیک جدید که به سهولت ریخته گری میشد کمتر از پلاستیک های نیتروسولوزی سابق قابلیت انفجار داشت.

در سال ۱۹۰۰ بکلند، اختراع تولید فراورده های پلاستیکی را به ثبت رساند و شروع به تولید آن با نام تجاری بک لایت نمود. تکنولوژی پلاستیک ها با کشف پلیمرهای جدید و روش جدید قالب گیری و شکل پذیری گسترش یافت. در دهه ۱۹۶۰ رشد سریع تولید پلاستیک های گرمانرم تجاری مانند پلی وینیل کلراید، پلی اتیان (سبک و سنگین)، پلی استایرن و پلی پروپیلن آغاز گردید.

به طور کلی پلیمرها به دو گروه اصلی تقسیم می شوند: گروه اول پلیمرهای طبیعی و گروه دوم پلیمرهای مصنوعی را شامل میشود. پلیمرهای طبیعی به صورت گسترده در طبیعت وجود دارند اما پلیمرهای مصنوعی پلیمرهایی هستند که در طبیعت وجود ندارند و توسط فرایندهای شیمیایی و به طور مصنوعی توسط انسان تولید میگردند. پلیمرهای مصنوعی به دو گروه تقسیم می شوند که عبارتند از: پلیمرهای گرمانرم و پلیمرهای گرما سخت [۸]. به مجموعه پلیمرهای گرمانرم و گرما سخت پلاستیک گفته می شود. تفاوت این دو گروه در واکنش آن ها به دما است. گرما نرم ها که با وزن مولوکولی بالا طول زنجیره بلندشان از مواد دیگر تشخیص داده می شوند، هنگامیکه دما از نقطه ذوبشان (TM) بالاتر برود ذوب میشوند و مجددا بر اثر سرد شدن سخت می گردند. ترموپلاستیک ها به دلیل بازیافت، هزینه فرآورش کمتر، انعطاف پذیری طراحی و توانایی پر کردن قالب های پیچیده نسبت به مواد ترموست ارجحیت دارند.

گرماسخت ها بسیارهای غیر قابل ذوب می باشند. در پلاستیک های گرما نرم تنها نیروی جاذبه واندروالسی میان زنجیره های پلیمری وجود دارد که این جاذبه های به سهولت در اثر گرما گسسته شده در نتیجه بسیار ذوب می شود[۸]. در خالی که زنجیره های بسیاری در لیمرهای گرماسخت توسط پیوند قوی کووالانسی به یکدیگر متصل شده اند. دو نوع عمده از مواد گرمانرم وجود دارند: بی شکل و بلوری. با این وجود بسیاری از پلیمرها کاملاً بی شکل نیستند و کم و بیش بلوری می باشند.

۱-۲- پلی استایرن (PS)

مقدمه

پلی استایرن پلاستیکی روشن، سخت و شکننده است که از آن اسفنج (استایروفوم) تهیه کرده که دارای وزن حجمی کمی بوده و عایق مناسبی به حساب می آید و به علت محبوس شدن گازها در آن ضریب هدایت حرارتی پایین داشته و در صنایع عایق ساختمانی یا صنایع برودتی (یخچال ها و سردخانه ها) کاربرد دارد.

تاریخچه

اولین بار در سال ۱۹۴۰ پلی استایرن توسط شرکت آلمانی فارین اینداستریز (I.G.Farben Industries) تولید به عنوان عایق در صنایع الکتریک مصرف می شد. در زمان جنگ جهانی دوم که راه ورود لاستیک طبیعی به آمریکا بسته شد این پلیمر در آمریکا به عنوان لاستیک مصنوعی به کار گرفته شد. پس از جنگ که ورود لاستیک طبیعی به آمریکا آغاز شد مصرف استایرن به مراتب کمتر از تولید آن بود. از این رو بازاریابی وسیعی برای مصرف پلی استایرن در مصارف روزمره آغاز گشت در نتیجه امروزه پلی استایرن یکی از معروفترین پلاستیکهایی است که در صنایع مصرف میشود [۱].

۱-۲-۱- طبقه بندی

پلی استایرن به چهار نوع تقسیم می شود: ۱-PS نیمه بلوری با کاربرد عمومی و چند منظوره (MIPS) با (GPPS) (PS medium modified Rubber) ۲-PS اصلاح شده با لاستیک (HIPS)(MIPS)(High با مقاومت ضربه ای بالا (PSExpandable) (HIPS) و ۴-ps قابل انبساط (EPS).

۱-۲-۲- تهیه پلی استایرن

پلی استایرن ها ، پلاستیکهایی هستند که در ساخت آنها ، از منومر استایرن استفاده شده باشد. معروفترین پلاستیکها از این خانواده پلی استایرن ، پلی استایرن اصلاح شده ایمپکت پلی استایرن، استایرن آکریلونیتریل (SAN) و آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) است .

بطور کلی ، پلیمریزاسیون زنجیری به واکنش ترکیب مولکولهای منومر با یکدیگر و تشکیل مولکولهای بزرگ پلیمری گفته می‌شود. در این روش ، تغییر در ترکیب عنصری بوجود نمی‌آید و در روند پلیمریزاسیون ، به هیچ وجه ، محصول جانبی بدست نمی‌آید. واکنش پلیمریزاسیون زنجیری ، برای ترکیباتی که دارای یک و یا چند بند سیر نشده می‌باشند، مورد استفاده قرار می‌گیرد[۲].

مواد اولیه لازم برای سنتز منومر PS، اتیلن و بنزن می باشند که در فرایند سنتز با هم واکنش می دهند تا اتیل بنزن تشکیل شود که در ادامه فرایندهای بیشتری (دیپروژناسیون) بر روی آن انجام می شود تا به منومر وینیل بنزن یا همان استایرن (Styrene) تبدیل شود، مواد اضافی لازم دیگر، اکریلونیتریل (AN) و لاستیک بوتادین می باشد. با استفاده از واکنش گرمایی یا کاتالیز شده منومر استایرن، فرایند پلیمریزاسیون آن آغاز می شود تا پلیمری آموختولید شود. برای بخشیدن و ایجاد خواص مطلوب در PS، افزودنیهای گوناگونی به آن اضافه می شود، همانند لاستیکها، نرم کننده ها، عوامل آزادکننده یا رها کننده و پایدار کننده ها. همچنین در فرمولاسیونهای بر پایه PS از گروههای مختلف افزودنی دیگر همچون رنگین سازها، به تاخیراندازهای شعله (FRs)، پایدارکننده های UV، یا اصلاح کننده های ضربه، استفاده می شود. نوعا GPPS، به علت شفافیت، صلب و سخت بودن و مناسب بودن با کاربردهای گوناگون انتخاب می شود. وقتی که به انعطاف پذیری بیشتری مقاومت ضربه ای زیاد نیاز باشد، از MIPS یا HIPS استفاده می شود. MIPS و HIPS شامل لاستیک بوتادین می باشد به عنوان عامل کوپلیمریزاسیون به منظور افزایش چقرمگی می باشند که سبب مات و کدر شدن رنگ محصول می گردد.

۱-۲-۳- پلی استایرن اتساعی EPS:

پلی استایرن انبساطی یا به اختصار EPS پلی استایرن ضد آتش می باشد، گرانولی سبک و سفید رنگ است. این ماده اولین بار در سال ۱۹۵۰ تولید گردید. انبساط این محصول در اثر وجود مقداری گاز پنتان است که به صورت حل نشده در هنگام تولید در داخل آن محبوس می شود. این گاز در اثر حرارت ناشی از بخار آب از داخل دانه های پلی استایرن خارج شده و باعث انبساط آن می گردد. در اثر خروج این گاز حجم دانه های پلی استایرن تا ۴۰ برابر اندازه اولیه آنها افزایش می یابد. بعد از عملیات انبساط، دانه های منبسط شده بر حسب نوع کاربرد قالب گیری می شوند [۱].

پلی استایرن انبساطی محصولی است که برای محیط زیست و انسان مشکلی ایجاد نمی کند. عدم آسیب رسانی به محیط زیست در تمام مراحل ساخت، کاربرد و بازیافت یا دور ریزی این محصول به چشم می خورد. فوم پلی استایرن ضد آتش در واقع پلی استایرن مقاوم در برابر آتش می باشد.

شرکت BASF در ابتدای سال ۱۹۵۰ یک فرآیند دو مرحله ای برای تولید فوم پلی استایرن را گسترش داد. در این فرآیند مرحله اول شامل تهیه دانه های حاوی توزیع یکنواخت عامل پف را توسط روش پلیمریزاسیون سوسپانسیونی مونومر استایرن بوده که در مرحله دوم این ماده در داخل یک قالب فرآیند می گردد. سهولت تولید محصول به هر شکل و اندازه از مزایای این روش بوده که باعث توسعه آن شد. با معرفی فوم پلی استایرن به بازار و کاربردهای آن در صنعت ساختمان و سایر صنایع، این فوم جایگاه خود را در این صنعت یافته است [۲].

۱-۲-۴- ویژگی های فوم پلی استایرن ضد آتش :

- ضد حریق
- عایق حرارتی خوب
- خواص مکانیکی ایده آل
- غیر حساس بودن به آب
- توانایی قالب گیری و برش در اشکال مختلف
- هزینه کم به ازای واحد حجم
- چگالی پایین

فوم پلی استایرن ضد آتش، این حسن را دارد که آتش را پخش نمی کند و با دور شدن شعله مستقیم از آن، خیلی زود خاموش می شود. به عبارتی، اگر شما با یک فندک به مدت ۲۰ الی ۳۰ ثانیه در زیر آن

یک شعله روشن کنید، هیچ دود غلیظی و سیاهی از آن بلند نمی شود و همچنین با خاموش شدن شعله فندک، شعله ای باقی نمی ماند.

از دیگر مزایای استفاده از این بلوک های جدید، پایداری آنها در مقابل زلزله است. زیرا به دلیل کاستن بار مرده در مقابل زلزله پایداری بیشتری دارد و خرد نمی شود.

۱-۲-۵- کاربرد های PS :

- ظروف مصرفی تنها، لیوان ها، بشقاب ها و فنجان ها
- کالاهای ویژه بسته بندی همانند جعبه های کاست و قاب های انزک و ظرف CD
- کالاهای مقاوم همانند ظروف خانگی و قوطی ها یا مخازن نگهدارنده ویژه مواد آرایشی
- بسته بندی مواد آرایشی و پزشکی که به روش بادگیری قالب گیری شده اند
- ورقه های جامد اکستروود شده، ورقه های فونت شده یا جهت داده شده در دو سو برای شکل دلدن حرارتی از آمیزه های مخلوط شده با کو پلیمر دسته استایرن-بوتادی ان را بر، در جاهایی که شفافیت و چقرمگی مطلوب است استفاده می شود .
- ورقه های پلاستیکی در نقش پرده مقابل دوش حمام با سطح قابل چاب که به راحتی رنگ می شود.
- کالاهای بسته بندی شده فوم شده ویژه مواد غذایی. همانند: سینی ها ، مخازن قابل تعویض، عایق بندی ساختمان و مواد به کار رفته در مصالح ساختمانی و صنعت ساختمان.
- کالاهایی که در تماس مستقیم هستند و از PS جهت داده شده ساخته شده اند همانند : قوطی های نگهدارنده کلوچه و سبد ها یا سینی های شکلات.
- قطعات قالب گیری شده و اجزای داخلی یخچال ها و لوازم خانگی دیگر، کالاهای مقاوم مصرفی همانند: اسباب بازی ها ، ظروف خانگی ، ویدئو کاست ها .

نام شیمیایی	پلی استایرن
فرمول شیمیایی	C ₈ H ₈
جرم مولی	104.15 g/mol
چگالی	0.909 g/cm ³
دمای ذوب	243 °k
ضریب شکست	1.5469
سختی	70
MFI	11
مقاومت کششی	45

جدول ۱-۱ خصوصیات عمومی پلی استایرن

۱-۳- چند سازه

پیشرفت های فناوری عصر حاضر در واقع بستگی به پیشرفتهایی دارد که در زمینه مواد حاصل شده است و توسعه آنی نیز در گرو مواد موجود در دسترس خواهد بود در این میان چند سازه های معرف قد مهای بزرگی هستند که در راه تکامل مواد مهندسی و نیز مهندسی مواد بر داشته شده است. به این معنی که با ترکیب فیزیکی دو یا چند ماده، علاوه بر این که موادی کارآمد، سبک و مقاوم تر از مصالح سنتی از فبیل پلاستیک و پلیمرهای معمول بدست می آید، بلکه برای هر کاربرد مشخص نیز می توان خواص مورد نیاز را در چند سازه ایجاد کرد که این کار حتی با طراحی دقیق مواد سنتی امکان پذیر نیست.

در کاربردهای مهندسی، اغلب به تلفیق خواص مواد نیاز است. به عنوان مثال در صنایع هوافضا، کاربردهای زیر آبی، حمل و نقل و امثال آنها، امکان استفاده از یک نوع ماده که همه خواص مورد نظر را فراهم نماید، وجود ندارد. به عنوان مثال در صنایع هوافضا به موادی نیاز است که ضمن داشتن استحکام بالا، سبک باشند، و مقاومت سایشی و UV خوبی داشته باشند. از آنجا که نمی توان ماده ای یافت که همه خواص مورد نظر را داشته باشند، باید به دنبال مواد ترکیبی بود. چند سازه ها موادی چند

جزئی هستند که خواص آنها در مجموع از هر کدام از اجزاء تشکیل دهنده آن بهتر است. ضمن آنکه اجزای مختلف کارایی یکدیگر را بهبود می بخشند.

۱-۴-۱- درآمدی بر نانوذرات

نانوذرات از ده ها یا صدها اتم یا مولکول و با اندازه ها و مورفولوژی های مختلف (آمورف، کریستالی، کروی شکل، سوزنی شکل و ...) ساخته شده است [۹]. اغلب نانوذرات که به طور تجاری مورد استفاده قرار می گیرند، به شکل پودر خشک و یا به صورت مایع می باشند. البته نانوذرات ترکیب شده (آمیخته شده) در یک محلول آلی یا آبی که به شکل سوسپانسیون یا خمیری شکل است نیز مورد توجه می باشد. این ذرات در شکل ها و مورفولوژی های گوناگونی یافت می شوند، ساختارهایی از کروی گرفته تا فلسی، ورقه ای، شاخه ای [۱۰].

۱-۴-۱- خواص نانوذرات

با گذر از میکرو ذرات به نانوذرات، با تغییر بر خی از خواص فیزیکی روبه رو می شویم که دو مورد مهم از آنها عبارتند از: افزایش نسبت مساحت سطحی به حجم و ورود اندازه ذره به قلمرو اثرات کوانتومی [۱۰].

افزایش نسبت مساحت سطحی به حجم که به تدریج با کاهش اندازه ذره رخ می دهد، باعث غلبه یافتن رفتار اتم های واقع در سطح ذره به رفتار اتم های درونی می شود. این پدیده بر خصوصیات ذره در حالت انزوا و بر تعاملات آن با دیگر مواد اثر می گذارد. افزایش سطح، واکنش پذیری نانوذرات را به شدت افزایش می دهد زیرا تعداد مولکولها یا اتمهای موجود در سطح در مقایسه با تعداد اتمها یا مولکولهای موجود در تودهء نمونه بسیار زیاد است، به گونه ای که این ذرات به شدت تمایل به آگلومره یا کلوخه ای شدن دارند. به عنوان مثال در مورد نانوذرات فلزی، به محض قرار گیری در هوا، به سرعت اکسید می شوند [۱۱]. در بعضی مواقع برای حفظ خواص مطلوب نانوذرات، جهت پیشگیری از واکنش بیشتر، یک پایدار کننده را بایستی به آنها اضافه کرد که آنها را قادر می سازد تا در برابر سایش، فرسودگی و خوردگی مقاوم باشند.

البته این خاصیت مزایایی هم در بر دارد. مساحت سطحی زیاد، عاملی کلیدی در کارکرد کاتالیزورها و ساختارهایی همچون الکترودها می باشد. به عنوان مثال با استفاده از این خاصیت می توان کارایی کاتالیزورهای شیمیایی را به نحو مؤثری بهبود بخشید و یا در تولید نانوکامپوزیت ها با استفاده از این ذرات، پیوندهای شیمیایی مستحکم تری بین ماده زمینه و ذرات برقرار شده و استحکام آن به شدت افزایش می یابد [۱۲]. علاوه بر این، افزایش سطح ذرات، فشار سطحی را کاهش داده و منجر به تغییر

فاصله بین ذرات یا فاصله بین اتم های ذرات می شود. تغییر در فاصله بین اتم های ذرات و نسبت سطح به حجم بالا در نانوذرات، تأثیر متقابلی در خواص ماده دارد. تغییر در انرژی آزاد سطح، پتانسیل شیمیایی را تغییر می دهد. این امر در خواص ترمودینامیکی ماده (مثل نقطه ذوب) تأثیر گذار است.

به محض آنکه ذرات به اندازه کافی کوچک شوند، شروع به رفتار مکانیک کوانتومی می کنند. خواص نقاط کوانتومی مثالی از این دست است. نقاط کوانتومی کریستال هایی در اندازه نانو می باشد که از خود نور ساطع می کنند. انتشار نور توسط این نقاط در تشخیص پزشکی کاربرد های فراوانی دارد. این نقاط گاهی اتم های مصنوعی نامیده می شوند؛ چون الکترونهای آزاد آنها مشابه الکترونهای محبوس در اتمها، حالات گسسته و مجازی از انرژی را اشغال می کنند.

علاوه بر این، کوچک تر بودن ابعاد نانوذرات از طول موج بحرانی نور، آنها را نامرئی و شفاف می نماید. این خاصیت باعث شده است تا نانوذرات برای مصارفی چون بسته بندی، مواد آرایشی و روکش ها مناسب باشند.

مواد در مقیاس نانو، رفتار کاملاً متفاوت، نامنظم و کنترل نشده ای از خود بروز می دهند. با کوچکتر شدن ذرات خواص نیز تغییر خواهد کرد. مثلاً فلزات، سخت تر و سرامیک نرم تر می شود [۱۳].

۱-۴-۲- طیف وسیع کاربرد نانو ذرات

انواع متعددی از مواد که در حال حاضر می توان به شکل ذرات یا بلورهای در مقیاس نانو ساخت، فقط شامل مثال های آشنایی چون باکی بال ها، نانولوله های کربنی، سلنید کادمیم (CdSe) و نقاط کوانتومی نیست؛ بلکه شامل طیف وسیعی از فلزات و اکسیدهای فلزی، سولفیدها، فلئوریدها، کربنات ها، سیلیکات ها و چندین دسته مواد دیگر نیز می شود [۶]. توسعه در زمینه شیمی نانوذرات و اصول ریخت شناسی و سطح وسیع کاربردهای آن به تدریج آشکار می شود. بعضی از این موارد، به وضوح در مطبوعات علمی به چشم می آیند. استفاده از نانولوله های کربنی در بافت ها، و نانوذرات روی یا اکسید تیتانیم در صفحات خورشیدی، فقط قسمتی از این کاربردهای فراوان است.

از اولین باری که نسل بشر مواد مصنوعی را ساخت، اضافه کردن مواد ریز به مواد زمینه یکی از روش های مرسوم برای تغییر خواص مواد بوده است [۱۱]. به هر حال ذرات افزودنی که اولین بار استفاده شدند بزرگ تر از ابعاد نانو بودند. پس اولین کاربردی که برای نانوذرات می توان متصور شد، استفاده از این مواد در تولید نانوکامپوزیت هاست. با استفاده از نانوذرات در نانوکامپوزیت ها، بسیاری از خواص نوری، الکترونیکی، مغناطیسی، شیمیایی و حرارتی آن تغییر خواهد نمود.

قدرت یک آهنربا یا مغناطیس با افزایش سطح مقطع در واحد حجم، افزایش می یابد. نشان داده شده است که مغناطیس های ساخته شده بر پایه نانوذرات نانوبلوری ایتريم - ساماریم - کبالت، به واسطه ی سطح مقطع فوق العاده بالای آن ها، خواص مغناطیسی بسیار غیر عادی دارند. کاربردهای نوعی برای این آهنرباهای پر قدرت ساخته شده از خاک های نادر عبارتند از: زیر دریایی های آرام تر، آلترناتورهای اتومبیل موتورهای کشتی.

اخیراً در ساخت شیشه های ضد آفتاب از نانوذرات اکسید روی استفاده شده است. استفاده از این ماده علاوه بر افزایش کارایی این نوع شیشه ها، عمر آن ها را نیز چندین برابر می کند. از نانوذرات همچنین در ساخت انواع ساینده ها، رنگ ها، کاتالیزورها، لایه های محافظتی جدید و بسیار مقاوم برای شیشه ها و عینک ها (ضدجوش و نشکن)، کاشی ها، و در حفاظ های الکترومغناطیسی شیشه های اتومبیل و در و پنجره استفاده می شود [۱۳]. پوشش های ضد نوشته برای دیوارها، و پوشش های سرامیکی برای افزایش استحکام سلول های خورشیدی نیز با استفاده از نانوذرات تولید شده اند.

اولین تولید صنعتی نانو ذرات در قرن بیستم با تولید دوده و پس از آن در ۱۹۴۰ با تولید سیلیس فومی رخ داد. این مواد امروزه نیز تولید و در مقادیر وسیع استفاده می شوند و بعضی شرکت های شناخته شده مثل دگوسا و کبوت دارایی شان را مرهون این مواد می دانند. با اینکه به دست آوردن اطلاعات جامع مشکل است؛ اما می توان گفت احتمالاً بیش از ۳۴۰ شرکت وجود دارند که نانو مواد را به شکل های مختلف در جهان تولید می کنند و حدود ۲۰۰ شرکت، سازنده نانوذرات هستند.

استفاده از نانوذرات روندی صعودی داشته و بازار آن دارای پتانسیلی است که همگام با افزایش استفاده از نانومواد و پیشرفت تجاری سازی آنها، به طور شگفت آوری در ده سال آینده افزایش خواهد داشت.

۱-۴-۳- سنتز و مونتاژ

مقدمه:

موضوع مشترک این پژوهش در WTEC مهندسی خواص مواد از طریق سنتز کنترل شده و مونتاژ در مقیاس نانو است. گستره کاربرد این فصل بیش از حد وسیع است و طیف وسیعی از برنامه های کاربردی را در بر میگیرد. جزئیات بیشتر را در فصول بعد خواهید دید. استفاده از سنتز و مونتاژ بسیار گسترده است. اما با این حال سنتز چند وجهی و روش ها و برنامه های کاربردی آن و مسائل مشترک مواد نانو ساختارها منحصر به ویژگی آن نانو ساختار می باشد [۱۴].

اول به رسمیت شناختن طول مقیاس بحرانی است که در تعریف ساختار مواد وجود دارد. به طور کلی در محدوده نانومتری خواص ماکروسکوپی اساس تعیین کننده مواد است [۱۵]. تحقیقات در مواد

نانوساختار با انگیزه توانایی کنترل مواد نانو ساختار منجر به بوجود آمدن خواص پیشرفته در ابعاد بزرگ: افزایش سختی، تورق، ترویج مغناطیسی، افزایش کاتالیست، جذب سطحی سلکتیو یا راندمان بالاتر رفتار یا الکترونیکی نوری میشود [۱۶].

وفق دادن سنتز و مونتاژ اولیه از فاز مایع، جامد و گاز با استفاده از روشهای شیمیایی یا فیزیکی رسوب و به طور مشابه در واکنش های شیمیایی و یا فشردگی فیزیکی انجام می گیرد [۱۴].

نوع تکنیک ها در تصویر شماره ۲.۱ به طور شماتیک نشان داده شده است.

"از بالا به پایین" اولین روش از نانو ساختارها در بلوک ساختمانی است و سپس در نهایت مواد را جمع آوری میکنند. یک مثال این روش دستیابی به شکل پودری اجزاء از میان تکنیک های ذرات معلق در هوا است و سپس تراکم اجزاء در مواد پایانی. این تکنیک ها زیاد در شکل مواد چند سازه ساختمانی بکار برده میشود [۱۷]. یک راه مناسب برای دستیابی بالا به پایین با یک مواد آغازگر مناسب شروع میشود. این روش مشابه روش استفاده شده توسط صنعت نیمه هادی در شکل دادن به دستگاههای خارج از بستر الکترونیکی (سیلیکون) با استفاده از تشکیل الگو (مانند لیتوگرافی) و الگوی فرایند انتقال که دارای شرط لازم برای دستیابی به قدرت تفکیک فضایی ایجاد سازه ها در مقیاس نانو است. این زمینه خاص در شکل گیری نانو ساختار دامنه فوق العاده ای دارد [۱۸].

در واقع بسیاری از خط مشی ها برای سنتز و مونتاژ مواد شیمیایی مشخص ادغام این دو روش در ساختار نانو است. درجه کنترل روی اندازه های اجزاء نانو ساختار ملزم به طبیعت توزیع و پیوندشان است نه متکی به مواد نهایی. دستیابی به جذب نوری در مواد اجازه میدهد تا طیف وسیعی از اندازه در مواد نانو ساختار قابل دسترس باشد. روش تراکم ممکن است چسبندگی بسیار عالی برای ارئه مواد نانوکامپوزیتی باشد اما برای بهبود عملکرد ساختاری مواد الکترونیکی غیر قابل قبول است [۱۹].

این فصل قصد دارد مفصلاً ترکیبات مختلف و تکنیک های مونتاژ را در نانو مواد را بررسی می کند. بهتر است برای گرفتن ویژگی های برجسته از انگیزه در زمینه علم و فن آوری نانو از تفاوت های میان ساختار و مونتاژ استفاده کنیم.

۱-۴-۴- مسائلی مهم سنتز و مونتاژ برای نانو ساختار

طیف وسیعی از روشهای سنتز و کنترل بحرانی نقاط به دو دسته تقسیم میشود:

۱. کنترل اندازه و ترکیب اجزاء nanocluster ذرات معلق در هوا

۲. کنترل روابط و توزیع اجزاء درون نانو در کل مواد

با این وجود این مهم است که درک کنیم چگونه بکار بگیریم آنها را در کنترل هسته های نانو ساختار و آنها را رشد دهیم. (به عنوان مثال به حداقل رساندن انعقاد و تراکم) [۲۰]. در آن دسته از اجزاء در سراسر سنتز و مونتاژ و اهمیت مسئله دوم به شرح زیر است:

➤ از جمله ثبات شیمیایی، حرارتی، زمانی تشکیل شده در نانو ساختار

➤ توانایی افزایش به نسبت ثابت سنتز و استراتژیهای مونتاژ برای هزینه های کمتر و تولید در مقیاس بزرگ فرایند از مواد نانو ساختار در حالی که همان حفظ کنترل زمان از ویژگی های مهم برای اندازه و کیفیت روابط است.

همه محققان در این زمینه در حال پرداختن به این مسائل هستند.

۱-۴-۵- به روز آوری فن آوری های متداول

پیشرفت فن آوری در تمام زمینه ها وجود دارد حتی در سنتز و مونتاژ نانو ساختار. پیشرفتهای تکنولوژیک امروزه بینش جدیدی در آنالیز خواص ماکروسکوپی نانو ساختارها بوجود آورده است. توصیف روابط بین نانو ساختار و درک روابط بین آنها و خواص ماکروسکوپی مواد در شکل ۲-۲ مشخص است [۲۱]. بهبود پختگی و کنترل در تعیین اندازه نانو ساختار و قرار دادن شتاب میزان پیشرفت کمکی است به تعریف اجزای حیاتی جدید در زمینه علم و فن آوری نانو ساختار [۲۲].

تکنولوژی پروپ اسکن یکی دیگر از تکنولوژیهای مهمی است که ما را قادر میسازد به طور گسترده ای در این علم پیشرفت کنیم از جمله میکروسکوپ اسکن تونل و میکروسکوپ نیروی اتمی. توسعه سازه های نوک در مواد مختلف متفاوت است. افزایش به تمام اعضای سازه داده میشود قدرت اسکن پروپ شامل چنین طیف گسترده ای از قابلیت های خواص مواد است [۲۳]. توسعه فن آوری نوک نیز تاثیر زیادی بر سنتز و مونتاژ فرایندهای پروپ دارد این فن آوری که به عنوان پایه و الگوی مواد است در مقیاس نانومتری است [۲۴].

فهم و درک سنتز نانو ساختارها بسیار پیچیده است به خصوص برای کسانی که استراتژیهای نظارت آنها در محیط خلاء شکل گرفته باشد. پرتو مولکولی اپکسی (MBE) نشان میدهد بخار فیزیکی (فاز گازی) یک تکنیک برای کنترل رسوبگیری تک لایه ای برای مواد دو بعدی و سه بعدی میباشد [۲۵]. مقدار زیادی از فهم و کنترل مشتق شده از انجام توانایی بر نظارت است. تفرق الکترونی بازتاب انرژی بالا (DEEHR) طبیعت سطح را به تفصیل تشریح میکند [۲۶]. بهبود پیشرفت این تکنولوژی تغییرات اساسی را به وجود آورده است. اما اهمیت بیشتر برای این رشته نوپا استراتژی است که در این علم بکار گرفته شده است [۲۴ و ۲۷]. بیشتر وسایل اندازه گیری در نانو ساختار باید قابل اعتماد باشد که در پایان قادر باشد مواد را با مقیاس عالی تولید کند. در حالیکه حفظ و کنترل نانو ساختار انگیزه ای برای جستجوی اشتراکات استراتژی بین سنتز و مونتاژ مواد است. در این جستجو آشکار است که سنتز و مونتاژ طبیعی مواد بیولوژیکی میتواند به ما برخی بینش های انتقادی را ارائه دهد [۲۸].

۱-۴-۶- استراتژی سنتز نانوذرات:

سنتز فاز گاز و پردازش sol-Gel

تلاشهای عمده در سنتز نانوذرات را میتوان به دو زمینه گسترده گروه بندی کرد

مرحله گاز سنتز و پردازش سل ژل

نانو ذرات را با قطرهای متفاوت از ۱ تا ۱۰ نانومتر که با ساختار بلوری آن سازگار باشد پردازش میکنند. واریانس اندازه عادی در مورد نانوذرات ۲۰٪ است با این حال برای بهبود اندازه گیری از اثر کوانتومی این توان به کمتر از ۵٪ کاهش می یابد [۲۹].

توسعه اولیه مواد کریستالی جدید بر اساس نانوذرات تولید شده توسط تبخیر و میعان گاز ها در پایین تر از جو محیط گاز های بی اثر است. پائین تر از جو محیط گاز های بی اثر تکنیک بهبود پردازش تولید نانوذرات آئروسول های مختلف گزارش شده اند این سنتز ها عبارتند از: احتراق شعله، پلاسما، فرسایش لیزر، اسپری پیرولیز و پلاسما اسپری [۳۰].

روش سنتز شیمیایی روشی است که برای پردازش سل ژل مرطوب میتواند مورد استفاده قرار بگیرد. اندازه و کنترل ثبات کوانتومی محدود نانو ذرات نیمه هادی را می توان از طریق استفاده از معکوس بدست آورد [۲۹].

۱-۴-۷- استراتژی های دیگر:

تکنیک های اضافی در سنتز نانوذرات شامل پردازش sonochemical، پردازش حفره، پردازش میکرومولسیون و انرژیهای زیاد فرزتوپ. در sonochemistry حفره ها میتوانند با روند تولید گذرای صوتی موضعی، منطقه گرم با دمای بسیار بالا تولید کنند. چنین تغییری ناگهانی در دما و فشار کمک به تخریب sonochemical و شکل گیری نانو ذرات میکند. این تکنیک می تواند برای تولید حجم زیادی از مواد در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرد [۳۱]. در حفره های هیدرودینامیکی نانوذرات در حال تولید و آزادی حباب گاز در داخل محلول سل ژل هستند. به وسیله سرعت تحت فشار در محفظه خشک کن فوق بحرانی و گرمایش در درجه حرارت بالا نانوذرات در محلول سل ژل مخلوط میشوند [۳۲]. حباب هیدرودینامیکی مسئول رشد هیته و رفع فوران از نانوذرات است. اندازه ذرات را میتوان با تنظیم فشار و محلول زمان ماند در حفره کنترل کرد [۳۰].

میکرومولسیونها برای نانوذرات فلزی، نیمه هادی، سیلیس، سولفات باریم و ابررساناها استفاده می شود. میکرومولسیونها روش مفید برای مقیاس بزرگ تولید نانوذرات است همچنین این روش نسبتا ساده و ارزان است. در نهایت انرژی فرز توپ تنها رویکرد بالا به پایین سنتز نانوذرات کاتالیزورس و ساختاری برای نسل های نانوذرات مغناطیسی است که استفاده می شود. این تکنیک در حال حاضر کثیف ترین فن آوری به دلیل مشکلات آلودگی در نظر گرفته شده است [۳۳]. با این حال در برنامه های کاربردی به خاطر در دسترس بودن کاربرد تنگستن و استفاده از جو بی اثر و یا فرایندهای خلاء بال ناخالصی های صنعتی کاهش میابد. اشکالات متداول عبارتند از: سطح پایین اندازه شدت توزیع و تا حدی غیرمتبلور بودن [۳۴].

۱-۵- نانو کامپوزیتهای زمینه پلیمری

نیاز اقتصادی و رو به افزایش سوخت در عرصه های مختلف، تقاضا برای استفاده از مواد جدید سبک وزن مانند پلیمرها را افزایش داده است. اما از طرفی با توجه به پایین تر بودن میزان استحکام پلیمرها در مقایسه با فلزات، تقویت آن ها ضروری به نظر می رسد. تقویت پلیمرها با مواد رایج سبب لطمه

خوردن به دو ویژگی اصلی پلیمرها یعنی سبکی و سهولت فرآیند پذیری می شود. از این رو در تحقیقات اخیر از مقادیر کمی (کمتر از ۱۰٪ وزنی) نانوذرات به عنوان تقویت کننده در پلیمرها استفاده می شود [۳۵] نایلون ۶ اولین پلیمری بود که توسط شرکت تویوتا در سال ۱۹۹۰ برای تهیه نانوکامپوزیت ها به کار گرفته شد، اما امروزه از پلیمرهای ترموست نظیر اپوکسی ، پلی ایمید و پلیمرهای ترموپلاست نظیر پلی پروپیلن ، پلی استایرن عنوان ماده ی زمینه این کامپوزیت ها استفاده می گردد. فاز تقویت کننده که در نانوکامپوزیت ها استفاده می شود شامل نانوذرات، نانوصفحات ، نانوالیاف و همچنین نانولوله ها می باشد. نانوذرات بیشترین کاربرد را به عنوان ماده تقویت کننده در نانوکامپوزیت ها دارند [۳۵]. نانوذره ای که در تهیه اغلب نانوکامپوزیت ها استفاده می شود خاک رس (Nanoclay) است. اما اخیراً نانوذرات دیگری همچون سیلیکا، نانوذرات فلزی و ذرات آلی و غیرآلی نیز مورد استفاده قرار می گیرد. در توسعه مواد چند جزئی چه در مقیاس نانو و یا میکرو سه موضوع مستقل باید مورد توجه قرار گیرد: انتخاب اجزاء، تولید، فرآوری و کارایی. در مورد نانوکامپوزیت های پلیمری هنوز در اول راه می باشیم و با توجه به کاربرد نهایی آن ها زمینه های بسیاری برای توسعه وجود خواهد داشت. به طور کلی سه روش برای تولید نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری وجود دارد. این روش ها شامل مخلوط سازی مستقیم ، فرآوری محلول و پلیمریزاسیون درجا می باشد. در ادامه این روش ها شرح داده خواهد شد.

۱-۵-۱- الف- مخلوط سازی مستقیم

در این روش ابتدا نانوذرات تهیه شده به صورت سوسپانسیون در یک حلال حل شده و سپس به محلول پلیمری اضافه می شود و مخلوط حاصله توسط یک پرس هیدرولیک در یک قالب اکسترود می شود و در نهایت صفحات نازک به دست می آیند. در این روش انتخاب بستر پلیمری، انتخاب نوع ذرات و سازگاری این دو گونه با یکدیگر و نحوه ی توزیع ذرات از نکات حائز اهمیت است که بایستی بر آن فائق آییم [۳۶]. معمولاً برای تولید نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری حاوی نانوالیاف کربنی از این روش استفاده می شود. محدودیت این روش میزان فاز تقویت کننده یا همان مواد پرکننده است. به عنوان مثال برای تولید نانوکامپوزیت سیلیکا/پلی پروپیلن حداکثر میزان نانوذرات سیلیکا ۲۰ درصد وزنی می تواند باشد. البته به نظر می رسد آگلومره شدن (به هم چسبیدن) ذرات نیز از دیگر محدودیت های این روش باشد.

۱-۵-۲-ب- فرآوری محلول

با استفاده از این روش می توان بر بعضی از محدودیت های روش مخلوط سازی مستقیم غلبه کرد، ضمن آنکه میتوان میزان آگلومراسیون و کلوخه ای شدن نانوذرات در ماده پلیمری را کاهش داد. در این روش به دو صورت می توان نانوکامپوزیت های پلیمری را تولید کرد. اگر ماده زمینه پلیمری و نانوذرات تقویت کننده آن در یکدیگر قابل حل شدن باشند، محلول حاصل را می توان در یک قالب؛ ریخته گری کرده و نانوکامپوزیت تولید نمود. در غیر این صورت مخلوط مواد نانوکامپوزیت در یک حلال حل شده و در نهایت با تبخیر حلال، نانوکامپوزیت مورد نظر به دست می آید [۳۶].

۱-۵-۳-ج- پلیمریزاسیون درجا

در این روش پلیمریزاسیون بستر پلیمری در حضور نانوذرات انجام می شود و منومر در حین رشد، ذرات پر کننده را در بر می گیرد. نکته کلیدی در این روش نحوه توزیع ذرات نانو در منومر است. با کنترل پیوند بین ذرات نانو و ماده زمینه، می توان توزیع مورد نظر را به دست آورد. بسیاری از نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری را می توان با این روش تولید کرد [۳۵].

به طور مثال نانوکامپوزیت های حاوی نانولایه های گرافیت که دارای هدایت الکتریکی بالا و نفوذ پذیری کمی هستند، از این روش تولید می شوند. برای تولید این نانوکامپوزیت ها ابتدا با امواج مافوق صوت لایه های گرافیت در منومر به صورت یکنواخت توزیع می شوند و در نهایت با پلیمریزاسیون درجا نانوکامپوزیت به دست می آید.

نکته ای که در روش های تولید نانوکامپوزیت های پلیمری اهمیت دارد و آن را از یکدیگر متمایز می کند، توزیع مناسب ماده پر کننده است. با اصلاح سطحی می توان این توزیع را به شکل یکنواخت به گونه ای انجام داد که از آگلومراسیون اجزای نانومتری ماده پرکننده جلوگیری شود و توزیع مناسب فاز تقویت کننده فراهم گردد. در واقع نکته مهم در تمام این فرایندها، اصلاح فصل مشترک بین پلیمر و نانوذره می باشد. استفاده از فرایندهای سطحی سبب توزیع یکنواخت فاز تقویت کننده در بستر پلیمری شده، افزایش مدول و استحکام نانوکامپوزیت را به دنبال خواهد داشت [۳۶].

۱-۶-۶- سختي

هر يك از ما از دوران كودكي با واژه سختي آشنا بوده ايم و به آن به عنوان موضوع ساده اي نگاه مي كرديم. اگر از دوستانمان بخواهيم كه سختي را تعريف كنند، بعضي ها ماده اي را سخت مي دانند كه در مقابل سايش مقاوم باشد و بعضي ديگر مقاومت در مقابل خمش و نفوذ را معيار سختي مي دانند كه بتواند مواد ديگر را در اثر ضربه بگشند و يا روي آن خراش ايجاد كند. به اين ترتيب از پاسخ هاي گوناگوني كه دريافت مي كنيم درمي يابيم كه تعاريف متفاوتي نسبت به سختي مواد وجود دارد [۳].

سختي ويژگي ذاتي و بنيادي يك ماده نيست. براي واژه سختي مي توان بيش از يك معني در نظر گرفت؛ مي توان آن را مقاومت ماده در برابر سايش يا مقاومت در مقابل تغيير شكل مومسان (تغيير فرم دائمي يا پلاستيك) دانست. روش هاي گوناگون آزمون سختي سنجي بر اندازه گيري يكي از اين دو ويژگي ماده استوار است. اين آزمون ها از نوع نفوذي هستند و ممكن است استاتيک (ايستا) يا ديناميک (پويا) باشند [۳]. در آزمون هاي نفوذي استاتيک كه متداول تر هستند، حفره اي با استفاده از نيرويي معين در قطعه ايجاد شده و ابعادهش اندازه گيري مي شود. در آزمون هاي نفوذي ديناميک، پرتابه اي كه آزادانه رها مي شود به سطح ماده برخورد مي كند. بخشي از انرژي پرتابه برخوردكننده صرف تغيير شكل ماده شده و باقيمانده آن موجب برگشتن وزنه از سطح مي شود.

۱-۶-۱- آزمون هاي نفوذي استاتيک

در تمام آزمون هاي نفوذي استاتيک، نوعي فروزنده تحت اثر نيروي خارجي به سطح نمونه فرو برده مي شود [۳۷]. يكي از ابعاد اين فرورفتگي (عمق يا طول) اندازه گيري شده و براي تعيين عدد سختي به كار مي رود. اندازه فرورفتگي با ذات ماده، اندازه و نوع فرورونده و همچنين مقدار نيروي وارد شده تغيير مي كند [۳۸]. راکول (۱)، برينل (۲)، نوپ (۳) و ويكرز (۴) روش هايي هستند كه غالبا براي تعيين سختي استفاده مي شوند. اصل بنيادي به كار گرفته شده در تمام اين آزمايش ها، مجموعه نيروهايي هستند كه به يك فرورونده به منظور تعيين مقاومت ماده در برابر نفوذ، اعمال مي شوند. اگر ماده سخت باشد، فرورفتگي اي كوچك و كم عمق حاصل مي شود در حالي كه اگر ماده نرم باشد، فرورفتگي اي كاملا بزرگ و عميق حاصل خواهد شد [۴].

روش هاي اندازه گيري موجود شامل مشاهده بصري فرورفتگي يا عمق سنجي مي شود. آزمايشگرهاي راکول قادر به تعيين عمق فرورفتگي هستند در حالي كه آزمايشگرهاي برينل، نوپ و ويكرز نياز به قطرسنجي فرورفتگي دارند [۴].

۱-۶-۲- آزمون سختي برينل

اولین آزمون سختی استاندارد شده از نوع نفوذی که با استقبال گسترده ای همراه بود، توسط یک مهندس مکانیک سوئدی به نام "یوهان آگوست برینل" در سال ۱۹۰۰ ارائه شد. آزمون سختی برینل از ایجاد فرورفتگی در سطح فلز به وسیله یک گلوله (به آن گوی یا ساچمه هم گفته می شود) با قطر ۱۰ میلی متر تحت اثر نیروی ۳ هزار کیلوگرم نیرو که به مدت ۱۰ تا ۱۵ ثانیه روی نمونه اعمال می شود، استفاده می کند. (۳ هزار کیلوگرم نیرو برای فولاد و چدن مناسب است و برای فلزات و آلیاژهای نرم تر غیر آهنی از نیروهای کمتر استفاده می شود) قطر فرورفتگی پس از برداشته شدن نیرو به وسیله میکروسکوپ مدرج اندازه گیری می شود. سپس میانگین قطرهای عمود بر هم فرورفتگی را باید به دست آورد. عدد سختی برینل از تقسیم نیروی اعمالی بر مساحت سطح فرورفتگی به دست می آید [۵].

۱-۶-۳- آزمون سختی ویکرز

این آزمایش در سال ۱۹۲۳ توسط "اسمیت" و "ساندلند" در شرکت ویکرز لیمیتد انگلستان به عنوان جایگزینی برای سختی برینل توسعه یافت و استفاده شد. در این آزمون از یک هرم الماسی مربع القاعده به عنوان فرورونده استفاده می شود. زاویه بین وجوه مقابل هرم ۱۳۶ درجه است. عدد سختی ویکرز تحت عنوان نیرو تقسیم بر مساحت سطح فرورفتگی تعریف می شود. در آزمایش، این سطح از طریق اندازه گیری میکروسکوپی طول قطرهای فرورفتگی محاسبه شده است [۶].

امتیاز آزمون ویکرز در مقایسه با برینل این است که بدون توجه به اندازه فرورفتگی، شکل هندسی حفره های آزمون ویکرز همیشه یکسان است؛ در نتیجه الگوی سیلان مومسان برای حفره های کم عمق و عمیق مشابه است و بنابراین سختی محاسبه شده مستقل از اندازه نیروی وارده خواهد بود. نکته مهم برای دستیابی به بهترین جواب آزمون سختی، انتخاب نیروی مناسب برای مواد مختلف است. فولاد و چدن با نیروی ۳۰ کیلوگرم نیرو، آلیاژهای آلومینیوم با ۵ کیلوگرم نیرو و آلیاژهای مس با نیروی ۱۰ کیلوگرم نیرو آزمون می شوند [۵و۶].

۱-۶-۴- آزمون سختی راکول

این روش سختی سنجی توسط "استنلی. پی. راکول" در ۱۹۱۹ ابداع شد. دستگاه آزمایش راکول، دستگاه آزمایش سریع با خواندن مستقیم است. استقبال گسترده از آن به خاطر سرعت بالای آن، نبود خطای اپراتور در اندازه گیری، توانایی تشخیص کوچک ترین تفاوت سختی در فولادهای سخت شده و نیز اندازه کوچک فرورفتگی می باشد. قطعاتی که عملیات حرارتی شده اند با این روش آزمون شده و