

به نام آنکه جان را فکرت آموخت

مقام معظم رهبری:

کشوری که دستش از علم تهی است،
نمیتواند توقع عزت داشته باشد.



روش‌های اندازه‌گیری در مقیاس نانو

محمود افشاری

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک

حسین نوروزی فروشانی

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

احسان سلحشور راد

کارشناس ارشد مهندسی مواد

سرشناسه: افشاری، محمود، ۱۳۶۵ -
 عنوان و نام پدیدآور: روش‌های اندازه‌گیری در مقیاس نانو/ محمود افشاری، حسین نوروزی، احسان سلحشورراد.
 مشخصات نشر: تهران: کتاب شهر علم، ۱۳۹۸.
 مشخصات ظاهری: ک، ۱۷۰ ص: مصور، جدول، نمودار.
 وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا
 یادداشت: کتابنامه
 موضوع: مواد نانو ساختار -- تجزیه و آزمایش، دستگاه‌های اندازه‌گیری سه‌بعدی
 موضوع: Coordinate measuring machines, Nanostructured materials – Analysis
 شناسه افزوده: نوروزی فروشانی، حسین، ۱۳۶۱-
 شناسه افزوده: سلحشور راد، احسان، ۱۳۷۱-
 رده‌بندی کنگره: TA۴۱۸/۹
 رده‌بندی دیویی: ۶۲۰/۵
 شماره کتابشناسی ملی: ۵۹۳۷۲۱۹



عنوان کتاب: روش‌های اندازه‌گیری در مقیاس نانو
 مؤلفین: محمود افشاری، حسین نوروزی فروشانی، احسان سلحشورراد
 ناشر: انتشارات کتاب شهر علم
 طرح روی جلد: محسن عطاری
 صفحه‌آرایی رایانه‌ای: فرشته اشرفی
 ویراستار فنی: احسان سلحشورراد
 ویراستار ادبی: نسیم سبجانی
 شمارگان: ۱۰۰۰ جلد
 نوبت چاپ: اول
 سال چاپ: ۱۳۹۸
 قیمت: ۱۹۰،۰۰۰ ریال
 شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۹۵۵۶۳-۲-۰

کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است.

آدرس: تهران، خیابان انقلاب، خیابان دوازده فروردین، نبش کوچه بهشت آیین، پلاک ۷ طبقه ۲

تلفن: ۰۹۰۳۲۹۵۸۸۳۱ - ۶۶۵۸۳۰۳۰

درباره مؤلفین

آقای محمود افشاری متولد سال ۱۳۶۵ در منطقه قهستان از بخش درمیان از توابع شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی است. وی تحصیلات خود را تا مقطع کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک در دانشگاه صنعتی امیر کبیر گذرانده است. همزمان با کسوت شریف معلمی در هنرستان شهید دکتر چمران شهرستان قائنات، به تدریس در دانشگاه‌های استان خراسان جنوبی نیز مشغول بوده و در کنار آن با تأسیس شرکت های اطلس کوشا در تهران و گروه ماشین سازی افرا در بیرجند در زمینه صنعت، و با تأسیس انتشارات کتاب شهر علم، پخش کتاب بانک کتاب شهر و موسسه‌ی آموزشی سفیران امیرکبیر در تهران، در زمینه فرهنگی نیز فعال بوده است. از سایر فعالیت‌های پژوهشی ایشان می‌توان به چند عنوان اختراع در زمینه ماشین‌آلات صنعتی، سخنرانی در چند کنفرانس تخصصی ملی و بین‌المللی، مشاوره چندین عنوان پروژه مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد، چندین مقاله علمی تخصصی و سه عنوان کتاب در رشته‌ی مهندسی مکانیک و مهندسی مواد اشاره نمود. وی هم اکنون دانشجوی دکتری رشته مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران بوده و بر روی فرایندهای ساخت افزایشی لیزری سوپراآلیاژهای پایه نیکل مشغول به تحقیق می‌باشد.

آقای حسین نوروزی فروشانی متولد سال ۱۳۶۰ در شهرستان خمینی شهر در استان اصفهان است. ایشان دانش آموخته‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر است. همزمان با کسوت شریف معلمی در هنرستان شهید دکتر رجایی شهرستان خمینی شهر، به تدریس در دانشگاه‌های استان اصفهان نیز مشغول می‌باشد. وی در زمینه شبیه‌سازی‌های نرم افزاری، CAD/CAM/CAE، طراحی و ساخت ابزارهای اندازه‌گیری آزمایشگاهی و صنعتی، قالب های تزریق پلاستیک های، دایکست، برش و خمش دارای سابقه‌ی طولانی است. از سایر فعالیت‌های پژوهشی ایشان می‌توان به سخنرانی در چند کنفرانس تخصصی ملی و بین‌المللی، چند مقاله علمی تخصصی، چند اختراع در زمینه ماشین‌آلات ابزار سازی اشاره نمود.

جناب آقای احسان سلحشورراد متولد ۱۳۷۰ در شهرستان مشهد است. وی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در رشته‌ی متالورژی صنعتی و در مقطع کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی مواد در دانشگاه صنعتی مالک اشتر به پایان رسانده‌است. همزمان با دوره‌ی تحصیل و پس از آن، با شرکت‌های دانش بنیان در زمینه‌ی پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی با فناوری نانو همکاری داشته و هم اکنون در یکی از شرکت‌های تابعه وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح مشغول به خدمت می‌باشد. ایشان صاحب چند مقاله در زمینه‌ی نانو کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی می‌باشند.

فهرست مطالب

پیشگفتار

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- تاریخچه‌ی اندازه‌گیری ۲
- ۲-۱- تعریف اندازه‌گیری ۳
- ۳-۱- اهمیت اندازه‌گیری ۴
- ۴-۱- روشهای اندازه‌گیری ۴
- ۱-۴-۱- روش‌های مستقیم ۴
- ۲-۴-۱- روش‌های غیر مستقیم ۵
- ۵-۱- ابزارهای اندازه‌گیری ۵
- ۶-۱- اهمیت اندازه‌گیری در مقیاس نانو ۶

فصل دوم: دستگاه اندازه‌گیری مختصات

- ۱-۲- مقدمه ۱۰
- ۲-۲- تاریخچه ۱۱
- ۳-۲- بخش‌های مختلف دستگاه ۱۲
- ۱-۳-۲- سازه مکانیکی ۱۳
- ۲-۳-۲- نرم‌افزار ۱۸
- ۳-۳-۲- پراب‌ها ۲۰
- ۴-۲- کالیبراسیون ۲۳
- ۵-۲- شرایط محیطی ۲۴

فصل سوم: مقدمه‌ای بر فناوری نانو

- ۱-۳- مقدمه ۲۶
- ۲-۳- تعریف نانوتکنولوژی ۲۶
- ۳-۳- تاریخچه فناوری نانو ۲۷
- ۴-۳- روش‌های ساخت نانو مواد ۳۰
- ۱-۴-۳- فراوری مکانیکی ۳۱
- ۲-۴-۳- الکتروریسندگی ۴۶
- ۳-۴-۳- قوس الکتریکی (پلاسما) و لیزر ۴۶
- ۴-۴-۳- رسوبدهی فاز گاز ۴۸
- ۵-۴-۳- روش پاشش حرارتی ۵۰

۵۱	۳-۴-۶- روش سل - ژل
۵۲	۳-۵- مهمترین کاربردهای نانو تکنولوژی

فصل چهارم: روش‌های اندازه‌گیری خواص نانومواد

۵۶	۴-۱- تاریخچه
۵۶	۴-۲- اسپکتروسکوپی الکترون اوزه
۶۱	۴-۳- پراش اشعه ایکس
۶۲	۴-۴- آنالیز بر مبنای یون
۶۳	۴-۵- طیف‌سنج رامان
۶۳	۴-۵-۱- اصول کار طیف‌سنج رامان
۶۴	۴-۵-۲- ساختمان دستگاه
۶۵	۴-۵-۳- کاربردها
۶۶	۴-۶- طیف‌سنجی جرمی
۶۶	۴-۷- سیستم باریکه یونی
۶۶	۴-۷-۱- اصول کار
۶۸	۴-۷-۲- کاربردها
۶۹	۴-۸- طیف‌سنجی مادون قرمز
۷۰	۴-۹- رزونانس مغناطیسی هسته
۷۰	۴-۱۰- پراکندگی بازگشتی رادرفورد
۷۱	۴-۱۰-۱- اصول فیزیکی
۷۱	۴-۱۰-۲- تجهیزات مورد استفاده در RBS
۷۳	۴-۱۰-۳- مزایا و معایب RBS
۷۴	۴-۱۰-۴- کاربردهای RBS
۷۵	۴-۱۱- طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز
۷۵	۴-۱۱-۱- تئوری
۷۷	۴-۱۱-۲- تجزیه کیفی
۷۷	۴-۱۱-۳- کاربردها
۷۷	۴-۱۲- طیف‌نگاری الکترونی برای آنالیز شیمیایی شامل XPS و UPS
۷۹	۴-۱۲-۱- کاربردها
۸۰	۴-۱۲-۲- نمونه‌ها
۸۰	۴-۱۲-۳- محدودیت‌ها
۸۰	۴-۱۲-۴- مدت زمان آنالیز
۸۰	۴-۱۳- میکروسکوپ الکترونی عبوری

۸۱	۱۴-۴- میکروسکوپ الکترونی روبشی
۸۳	۱۵-۴- میکروسکوپ الکترونی محیطی روبشی
	فصل پنجم: اندازه گیری سه بعدی در مقیاس نانو
۸۶	۱-۵- مقدمه
۸۶	۲-۵- میکروسکوپ نیروی اتمی
۸۶	۱-۲-۵- مقدمه
۸۷	۲-۲-۵- نحوه عملکرد AFM
۹۰	۳-۲-۵- آشکارسازی جهت گیری تیرک
۹۲	۴-۲-۵- هندسه ی تیرک
۹۴	۵-۲-۵- سوزن ها
۹۶	۶-۲-۵- نحوه ی برهمکنش سوزن با سطح
۹۷	۷-۲-۵- مدهای مختلف AFM
۱۰۳	۸-۲-۵- کاربردها
۱۰۶	۳-۵- میکروسکوپی نوری میدان نزدیک روبشی
۱۰۸	۴-۵- میکروسکوپ روبشی تونلی
۱۰۸	۱-۴-۵- مقدمه
۱۰۹	۲-۴-۵- نگاهی اجمالی به اصول کلی عملکرد STM
۱۱۱	۳-۴-۵- روش های مبتنی بر استفاده مستقیم از STM در تعیین مشخصات سطوح
۱۱۶	۵-۵- CMM نانو
۱۱۶	۱-۵-۵- مقدمه
۱۱۸	۲-۵-۵- فاکتورهای مختلف دستگاه
۱۱۹	۳-۵-۵- ویژگی های ماشین نانو CMM
۱۲۹	۴-۵-۵- پیشرفت های صورت گرفته
	تصاویر، نمودارها و جداول
۱۳۶	۱- تصاویر مربوط به فصل دوم
۱۳۷	۲- تصاویر مربوط به فصل چهارم
۱۴۵	۳- تصاویر مربوط به فصل پنجم
۱۵۷	مراجع

پیشگفتار

دیرزمانی، اگر کسی مسئله پرواز در آسمان و یا سفر به خارج از این کره خاکی و گردش به دور آن را مطرح می‌کرد، دیگران حتماً او را خیال‌پرداز و مجنون قلمداد می‌کردند و یا به خاطر اظهار بعضی حقایق، فرد را به توبه در کلیسا وامی‌داشتند! زمانی روبات‌ها و ابر کامپیوترها که چندین محاسبه ریاضی را در چند ثانیه انجام می‌دهند، فقط در داستان‌های تخیلی نویسندگان پیدا می‌شد اما اکنون...

همیشه و در تمامی اعصار، وقتی مطلبی فوق دانش و درک مردم آن زمان مطرح می‌شد، در برابر مخالفت‌ها و انتقادات شدیدی قرار می‌گرفت ولی بعد از طی روزگار، همگان با پیشرفت‌های فوق‌العاده در آن زمینه مواجه می‌شدند و حتی این پیشرفت را موجبات فراهم آمدن آسایش بیشتر خود می‌دیدند و حالا در عصر ما بحث نانوتکنولوژی مطرح شده است، موضوعی که در تمامی ابعاد زندگی بشر و رشته‌های مختلف علمی ارتباط مستقیم و مؤثر خواهد داشت.

نانوتکنولوژی چنان رویکرد و نگرش، به فناوری را متحول ساخته که در صورت تحقق و رسیدن به مقصدی که ترسیم شده است، شاید بزرگ‌ترین جهش انسان برای صعود به قله‌های رفیع علم باشد. اکنون جهان متوجه این رویکرد متحول کننده شده و متخصصین و دانشمندان در نقاط مختلف این کره خاکی دست به پژوهش و مطالعات وسیعی در این زمینه زده‌اند و طبق گفته برخی از آنان پیشرفت‌های صورت گرفته و روند رو به رشد نانو، بیش از حد انتظار و پیش‌بینی شده است.

مطمئناً با بودجه‌های کلان تخصیص داده شده و تحقیقات گسترده در آینده‌ای کاملاً نزدیک، انسان خواهد توانست در چیدمان اتم به اتم مواد به دلخواه دخالت کند و وسایل و تجهیزات مورد نیاز خود را با هر اندازه و کیفیت و شکلی تولید کند. همان‌طوری که بسیاری از مباحث علمی از درون فعالیت‌ها و پژوهش‌های نظامی به دنیای علم راه پیدا کرده است و یا مانند دانش هسته‌ای سرانجام در مبحث نظامی مورد سوءاستفاده قرار گرفته است، دانش نانو نیز از این مستثنی نخواهد بود و سرانجام در زمینه‌های نظامی به پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای خواهد رسید که در آن وقت دانش هسته‌ای یکی از زیرشاخه‌های نانو به شمار خواهد آمد، با توجه به اهمیت این مسئله مسلم خواهد بود که از دانش نانو به مراتب استفاده‌های سوء بسیار هولناک‌تر و تهدیدآمیزتر صورت خواهد گرفت.

به گفته کارشناسان، این فناوری نوین در آینده‌ای نزدیک با تأثیر و بسیاری از بخش‌های اقتصادی، وضع موجود را به کلی دگرگون خواهد کرد با کمک این فناوری تولید اشیاء با خصوصیات جدید از جمله قدرت درک و گویش توسط ذره‌هایی که اندازه هر کدام از آن‌ها یک میلیون از میلی متر بیشتر نیست امکان پذیر می‌شود با کمک این فناوری آنچه در گذشته‌ای نزدیک غیرممکن بود، تحقق پیدا خواهد کرد.

از این رو، این اثر که یکی از هزاران کتابی است که در زمینه‌ی فناوری نانو به رشته‌ی تحریر درآمده است، به منظور آشنایی هرچه بیشتر نسل جدید و بخصوص نوجوانان و دانش‌آموزان با این فناوری شگفت‌انگیز گردآوری شده و با تلفیق آن با دانش مکانیک و اهمیت دقت اندازه‌گیری در این رشته، اختصاصاً به مباحث مربوط به اندازه‌گیری و اندازه برداری در مقیاس نانو پرداخته است. بخش عمده‌ی کتاب از پایان‌نامه‌ی مقطع کارشناسی جناب آقای محمود افشاری که در سال ۱۳۸۷ در دانشگاه زابل انجام شده است، استخراج گردیده است. همچنین تجربیات چندین ساله‌ی مؤلفین در امر برگزاری دوره‌های آشنایی با فناوری نانو برای دانش‌آموزان نیز در بهبود کیفیت اثر حاضر مؤثر بوده است.

در فصل اول و دوم کتاب، سعی شد است پس از ذکر مقدمه‌ای در باب اهمیت اندازه‌گیری در زندگی بشر، اصول اندازه‌گیری سه‌بعدی در فضای ماکرو و نیز تجهیزات موردنیاز آن بخصوص دستگاه اندازه‌گیری مختصات^۱ (CMM)، موردبررسی اجمالی قرار گیرد. در فصل سوم مقدمه‌ای بر فناوری نانو و روش‌های ساخت نانو مواد موردبحث قرار گرفته و در فصل چهارم اختصاصاً روش‌ها و ابزارهای اندازه‌گیری ابعاد در مقیاس نانو معرفی شده‌اند و در فصل پایانی نیز ایده‌ی ساخت دستگاه اندازه‌گیری مختصات در مقیاس نو (Nano CMM) و پیشرفت‌های صورت گرفته در این زمینه آورده شده است. از آنجاکه هیچ اثری خالی از ایرادت فنی، محتوایی، ادبی و نگارشی نیست، مؤلفین ضمن پوزش از همه‌ی خوانندگان محترم این اثر، از عزیزان صاحب‌نظر تقاضا می‌کنند که نقطه نظرات و اصلاحات پیشنهادی خود را برای آن‌ها ارسال نمایند.

در پایان نگارندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تقدیر و تشکر خود را از همه‌ی عزیزانی که در امر نگارش این اثر به نحوی مؤثر بوده‌اند، تقدیر و تشکر نمایند. از جمله از جناب آقای دکتر سجادیپور سجادی ریاست محترم پژوهشکده‌ی برق و الکترونیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، جناب آقای دکتر رضا شجاع رضوی رئیس مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت دانشگاه صنعتی مالک اشتر و مهندس محسن عطاری که راهنمایی‌های فنی و دقیق این عزیزان چراغ راه بوده است. همچنین از سرکار خانم مهندس فرشته اشرفی و سرکار خانم دکتر نسیمه سبحانی که تشویق و همراهی این عزیزان عامل اصلی پدید آمدن این اثر گردید، تقدیر و تشکر می‌گردد.

سرپرست گروه مؤلفین

M.afshari@aut.ac.ir

تهران - پاییز ۱۳۹۸

^۱Coordinate Measuring Machine (CMM)

فصل اول

مقدمه

مقدمه

پیشرفت علم و تکنولوژی مستلزم پیشرفت همزمان روش‌های اندازه‌گیری است. با اطمینان می‌توان گفت که سریع‌ترین راه ارزیابی پیشرفت هر ملت در علم و تکنولوژی، بررسی نوع اندازه‌گیری‌هایی است که انجام می‌دهد و روشی که با آن داده‌ها را از اندازه‌گیری به دست می‌آورد و پردازش می‌کند. این امر دلایل روشنی دارد. همراه پیشرفت علوم و تکنولوژی، پدیده‌ها و معاملات جدیدی کشف می‌شود و این پیشرفت‌ها اندازه‌گیری‌های نوع جدیدی را ضروری می‌سازد. کشفیات جدید اگر با اندازه‌گیری‌هایی عملی پشتیبانی نشوند، ارزش عملی نخواهند داشت. اندازه‌گیری، بی‌شک نه تنها اعتبار یک فرضیه را تأیید می‌کند، بلکه به فهم آن نیز یاری می‌رساند. حاصل، زنجیر بی‌انتهایی است که به کشفیات جدیدی می‌انجامد که خود، روش‌های اندازه‌گیری نو و پیچیده‌تری می‌طلبد؛ بنابراین علم و تکنولوژی جدید با روش‌های پیچیده اندازه‌گیری همراه است. درحالی‌که علم و تکنولوژی قدیمی تنها به روش‌های معمولی اندازه‌گیری نیاز دارد. هر رشته مهندسی دو وظیفه مهم به عهده دارد: طراحی لوازم و فرآیندها و عملکرد و نگهداری درست لوازم و فرآیندها. هردوی این وظایف به اندازه‌گیری نیاز دارند؛ زیرا طراحی، کار با دستگاه و نگهداری درست و باصرفه، نیازمند برگشت اطلاعات است و این اطلاعات از اندازه‌گیری مناسب به دست می‌آید.

۱-۱- تاریخچه اندازه‌گیری

به‌طور کلی اندازه‌گیری قدمتی به‌اندازه تاریخ دارد و زندگی انسان با تکامل و پیشرفت تکنولوژی توسعه‌یافته و همگام با آن استانداردها شکل گرفته و استانداردهای طول که از اولین استانداردها است، تغییر و تکامل یافته است.

از دیرباز، بشر برای اندازه‌گیری طول از ابزارهای قابل‌دسترس که طبعاً این وسایل می‌توانند اعضای بدن انسان باشند، استفاده می‌نموده است. مثل طول پا، قدم، وجب، پهنای چهار انگشت و... معمولاً مقدار شاخص‌های فوق بر اساس طول اعضای بدن پادشاهان و حاکمان در اثر جنگ‌ها و سایر عوامل و ایجاد پادشاهی‌ها و حکومت‌های جدید، نوع شاخص‌ها و مقدار آن‌ها تغییر می‌یافته است. همچنین، با توجه به توسعه و گوناگونی جمعیت‌ها و کشورها، واحدهای

اندازه‌گیری طول ثابت نمانده و متعدد شده‌اند که این موضوع در ارتباط بین قومیت‌ها و ملیت‌ها ایجاد مشکل کرده است.

امروزه ارقام حاصل از اندازه‌گیری به‌عنوانین مختلف و بیشتر از گذشته مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مثال شناخت از این‌که فرایند تولید تحت کنترل است یا خیر؟ معمولاً با استفاده کردن از آماری که از فرایند جمع‌آوری می‌شود اجرا می‌گردد. ارقام و آماری که از فرایند به دست می‌آید با محدوده‌های کنترل آماری محاسبه شده، مقایسه می‌گردد و چنانچه این ارقام خارج از محدوده کنترل قرار گیرند فرایند نیاز به تنظیم خواهد داشت، در غیر این صورت فرایند بدون اصلاحات لازم همچنان عمل خواهد کرد. بنابراین کیفیت ارقام حاصله از اندازه‌گیری به‌طور مستقیم به اندازه‌گیری‌هایی بستگی دارد که از سیستم‌های اندازه‌گیری (ابزار دقیق) که در وضعیت و یا شرایط «تحت کنترل» کار می‌کنند گرفته می‌شود.

۱-۲- تعریف اندازه‌گیری

اندازه‌گیری^۱ فرایند مقایسه‌ای یک کمیت بین یک استاندارد تعریف شده و یک مقدار مجهول است. در عصر شتاب در پیشرفت علمی، استاندارد خدمات، تولید و گسترش روش‌های تولید، روش‌های اندازه‌گیری نیز گسترش درخور توجهی نموده‌اند.

کلمه «اندازه‌گیری» به‌عنوان نمره‌ای است که به چیزهای مورد اندازه‌گیری قرار گرفته اختصاص یافته است. اندازه‌گیری ارتباطی است میان خصوصیت چیز مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و ابزار دقیق. این نتیجه‌گیری در سال ۱۹۶۳ توسط ایزن هارت به این ارتباط داده شد. فرایند اختصاص نمره به شیء مورد ارزیابی «اندازه‌گیری» گفته می‌شود. مترولوژی^۲ نیز اصطلاحی است که به اندازه‌گیری برای مقاصد مهندسی و محاسباتی داده شده است و چون مهندسين در تولید صنایع بیشتر با اندازه‌گیری ابعاد و زوایا سروکار دارند، مترولوژی بیشتر درباره اندازه‌گیری ابعاد و زوایا و کیفیت آن‌ها بحث می‌کند.

^۱Measurement

^۲Metrology

۳-۱- اهمیت اندازه‌گیری

در عصر شتاب در پیشرفت علمی، استاندارد خدمات، تولید و گسترش روش‌های تولید، علوم و صنایع نوین، روش‌های اندازه‌گیری نیز گسترش درخور توجهی نموده‌اند. تقاضای جهانی برای کالاهای ساخته‌شده با سرعت مبهوت‌کننده‌ای رو به افزایش است. صنایع تولیدی نیز با روش‌های جدید و گوناگون به این تقاضا پاسخ می‌دهند. از زمان ظهور تدریجی کنترل عددی و تولید به کمک کامپیوتر تا رسیدن به روش‌های مدرن و سیستم‌های تولید قابل‌انعطاف و تولید به هنگام تا ظهور نانو تکنولوژی، روش‌های تولید تغییرات و پیشرفت‌های بسیاری کرده‌اند. ایجاد این تحولات نیازمند به‌کارگیری روش‌ها و تجهیزاتی جهت کنترل کیفیت و اندازه‌گیری دقیق است که کیفیت و دقت بالاتری را تأمین می‌کند.

۴-۱- روش‌های اندازه‌گیری

روش‌های اندازه‌گیری را به‌طور کلی می‌توان به دودسته تقسیم نمود.

۱-۴-۱- روش‌های مستقیم

در این روش‌ها کمیت نامعلوم (یا کمیت اندازه‌گیری شونده) مستقیماً با یک استاندارد مقایسه و حاصل با یک عدد و یک یکا بیان می‌شود. استاندارد در حقیقت، تجسم فیزیکی یکای کمیت است. روش مستقیم اندازه‌گیری برای کمیت‌های فیزیکی مانند طول و جرم و زمان، روش کاملاً معمول است. فرض کنید می‌خواهیم طول میله‌ای را اندازه‌گیری بگیریم و یکای طول متر است. در این صورت "میله فلان مقدار طول دارد" به این معنی است که همان مقدار یکای استاندارد با میله هم طول است. انسان می‌تواند مقایسه مستقیم طول را با دقتی حدود ۰,۲۵ میلی‌متر انجام دهد؛ یعنی به علت عوامل انسانی، اندازه‌گیری بسیار دقیق ممکن نیست. برای اندازه‌گیری طول با دقت زیاد می‌توان روش مستقیم را به کاربرد ولی برای اندازه‌گیری جرم مسئله پیچیده‌تر می‌شود. چون انسان نمی‌تواند تفاوت‌های زیاد جرم را از هم بازشناسد.

۱-۴-۲- روش‌های غیرمستقیم

اندازه‌گیری به روش مستقیم همیشه نه ممکن، نه قابل اجرا و نه عملی است. این روش در بسیاری از موارد به واسطه دخالت عوامل انسانی نه دقیق است و نه زیاد حساس. از این روش‌های مستقیم، مزیتی ندارند و به ندرت به کار می‌روند. در کاربردهای مهندسی از سیستم‌های اندازه‌گیری استفاده می‌شود. این سیستم‌ها برای اندازه‌گیری از روش‌های غیرمستقیم سود می‌جویند. سیستم اندازه‌گیری درواقع شامل یک عنصر تراگردان است که کمیت اندازه‌گیری شونده را به صورت قیاسی تبدیل می‌کند. سپس یک وسیله میانجی، این سیگنال قیاسی را پردازش می‌کند و به قسمت نهایی که نتیجه اندازه‌گیری را ارائه می‌دهد، می‌رساند.

۱-۵- ابزارهای اندازه‌گیری

در اندازه‌گیری معمولاً برای مشخص کردن یک کمیت یا متغیر از یک دستگاه یا ابزار استفاده می‌شود. این ابزار، توانایی‌های انسان را توسعه می‌دهد و او را قادر به تعیین مقدار نامعلوم کمیتی می‌کند که اندازه‌گیری‌اش در توان انسان بدون وسیله نیست. هر ابزار را می‌توان به صورت وسیله‌ای برای تعیین مقدار یا اندازه‌گیری یک کمیت یا متغیر تعریف کرد.

نخستین ابزارها، ماهیت مکانیکی داشتند و اصولی که بر مبنای آن کار می‌کردند هنوز هم متداول است. اولین ابزارهای عملی نیز مانند ابزارهای امروزی دارای این سه عنصر بودند: ۱- آشکارساز ۲- عنصر میانجی انتقال ۳- نشان‌دهنده، ثبات یا حافظه

ابزارهای مکانیکی در حالت‌های ایستا و مانا بسیار اطمینان‌بخش‌اند، ولی عیب بسیار عمده‌ای دارند که نمی‌توانند در اندازه‌گیری حالت‌های پویا و گذرا سریع پاسخ دهند، علت آن است که قسمت‌های متحرک این ابزارها صلب، سنگین و پر حجم‌اند و در نتیجه جرم زیادی دارند. از آنجاکه جرم در اندازه‌گیری پویا را دنبال کنند. برای مثال نمی‌توان یک ولتاژ ۵۰ هرتزی را با روش مکانیکی اندازه گرفت، ولی اندازه‌گیری فشارهای با تغییرات آرام، نسبتاً ساده است. از طرف دیگر، ابزارهای اندازه‌گیری الکتریکی یا الکترونیکی، دارای باز نمود خروجی آشکارساز سریع‌تری نسبت به روش‌های مکانیکی هستند اما این سیستم‌ها نیز در نهایت برای باز نمود، از جزء متحرک مکانیکی استفاده می‌کنند.

برای اندازه‌گیری سه‌بعدی قطعات و یا هر چیزی که اندازه‌های آن با پارامترهایی مانند توازی، تعامد، زاویه، ابعاد و غیره باید به‌صورت سه‌بعدی اندازه‌گیری شوند، در صنایع مختلفی نظیر خودروسازی، ماشین‌سازی، هوافضا، از دستگاه‌های اندازه‌گیری مختصات (CMM) استفاده می‌شود. شرح کامل کارکرد این دستگاه، در فصل دوم آمده است. اصول کارکرد این دستگاه و سایر ابزارهای اندازه‌گیری در مقیاس ماکرو، دقیقاً به فضای نانو برده شده و ابزارهای متناسب اندازه‌گیری در این مقیاس، ساخته شده است.

۱-۶- اهمیت اندازه‌گیری در مقیاس نانو

نانومترولوژی باید به‌عنوان بخشی ضروری و جدایی‌ناپذیر از تمامی بخش‌های فناوری نانو دیده شود. هر فعالیت درون علم و فناوری باید با مرجعی از اندازه‌گیری‌ها صورت پذیرد تا بتوان به مقایسه پذیری نتایج کمی و قابلیت جایگزینی محصول اعتماد کرد.

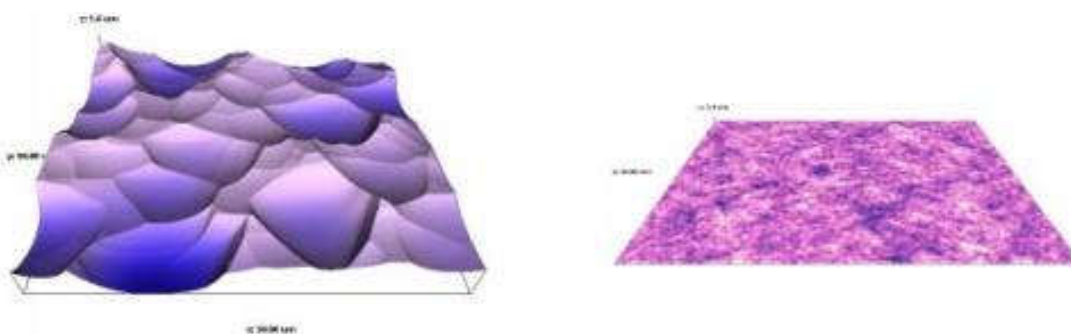
برای نشان دادن این مسئله که هر محصول یا فرایند ساخت به یک تقاضای عملکردی مشخص می‌رسد، اندازه‌گیری کمی باقابلیت ردیابی آن تا یک مقیاس مترولوژی موافقت شده لازم و ضروری است. ازاین‌رو برای آوردن فناوری نانو به درون یک کسب‌وکار موفق و تجاری‌سازی آن، نیاز است که دسترسی به ابزارهای مترولوژی مرتبط تسهیل شود تا در زمینه‌های گسترده‌ای، امکان اندازه‌گیری سه‌بعدی در مقیاس اتمی فراهم شود. اندازه‌گیری در تمام کمیت‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مهم و در سطوح مختلف توسعه نانو سیستم‌ها، از طراحی، ارزیابی نمونه اولیه تا اجرا موردنیاز است. ازاین‌رو، نانومترولوژی باید به‌عنوان یک بخش ضروری و جدایی‌ناپذیر از فناوری نانو دیده شود.

برای به کار بردن یک مترولوژی عملی درزمینه‌ی فناوری نانو، به‌عنوان مثال، اندازه‌گیری در محدوده نانومتر باقابلیت ردیابی تا واحدهای طول، زاویه، کیفیت ماده و نیرو، لازم است استانداردهای اندازه‌گیری عملی ایجاد شود.

توجه به این نکته مهم است که فناوری نانو به یک قدرت و اقتصاد جهانی تبدیل خواهد شد. ازاین‌رو هم استانداردهای نوشته‌شده و هم استانداردهای اندازه‌گیری، باید با یک اجماع جهانی ایجاد شود. گفتن این نکته هم مهم است که نانومترولوژی بدون فناوری نانو بی‌معنی است. بدون

یک فناوری که نیازمند اندازه‌گیری باشد، نیازی به مترولوژی نیست؛ اما بیش از آن، نانومترولوژی عملی، به درجه بالایی از بلوغ فناوری برای ساخت استانداردهای عملی وابسته است.

مثال زیر، مفید بودن نانومترولوژی را بیان می‌کند. شکل زیر تصویر یک میکروسکوپ پراب پویشی از یک صفحه ۵۰ میکرومتر*۵۰ میکرومتری از سطح ویفر سیلیکونی را بعد از برش اولیه سطح شمش الماس (سمت چپ) نشان می‌دهد. در این مرحله طول برش ۱,۸ میکرومتر است. بعد از قلم‌زنی و صیقل دادن، سطح الماس (۱۰ میکرومتر*۱۰ میکرومتر*۳,۴ نانومتر) طبق شکل سمت راست، با یک زبری ۰/۲۴۷ نانومتر نمایان می‌شود. زبری یک پارامتر رقابتی برای سازندگان این ویفر است، زیرا این زبری برای ساخت پوشش بعدی که روی تراشه ایجاد می‌شود، حائز اهمیت است. دقت اندازه‌گیری زبری این ویفر، از اهمیت بالایی برای تعیین کیفیت و ارزش تجاری محصول نهایی برخوردار است.



شکل ۱-۱. برش الماس و سطوح شفاف سیلیکونی.

فصل دوم

دستگاه اندازه گیری مختصات

۲-۱- مقدمه

دستگاه‌های اندازه‌گیری مختصات^۱ (CMM) در فرایند اندازه‌گیری ابعاد و موقعیت هر نقطه از یک قطعه در فضای سه‌بعدی، یکی از بهترین ابزارها می‌باشند و در اموری که نیاز به دقت بالا و یا انجام عملیات اندازه‌گیری خاص مانند هم‌محوری دو سوراخ، توازی، تعامد... و همچنین ایجاد شکل موردنظر مانند بدنه‌های پیچیده خودروها، قالب‌ها... و مهندسی معکوس کاربرد دارند. امروزه با افزایش درخواست‌ها از بخش‌های تولیدی برای بهبود هر چه بیشتر در کیفیت محصولات، CMM ها تبدیل به ستون فقرات بخش کیفیت شده‌اند. به‌طور کلی جایگاه CMM در سیستم‌های تولیدی به شرح ذیل می‌باشد:

- در مرحله کنترل کیفیت و تست ابعادی قطعه تولیدشده.
- در مهندسی معکوس با نقطه برداری از قطعه مرجع و استفاده از ابر نقاط به دست آمده در سیستم‌های طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر^۲ (CAD/CAM).
- استفاده از اطلاعات خروجی دستگاه‌های CMM به عنوان شاخص‌های تصمیم‌گیری مدیریت طراحی، ساخت و کنترل کیفیت.

در این نوع اندازه‌گیری سه‌بعدی، از یک سیستم مختصات برای بیان حرکت دستگاه اندازه‌گیری استفاده می‌شود. سیستم مختصات رایج در صنعت که همان سیستم مختصات دکارتی یا کارتزین نام دارد، توسط فیلسوف و ریاضیدان معروف فرانسوی رنه دکارت^۳ در اوایل سال‌های ۱۶۰۰ میلادی ابداع گردید. از آنجایی که در سیستم مختصات هر نقطه فقط یک مختصات X Y Z دارد و هر مختصات مشخص فقط مربوط به یک نقطه می‌باشد، می‌توان از این هویت مشخص برای هر نقطه استفاده کرد و با دقت بالا، به آن دسترسی پیدا کرد. کاری که دستگاه CMM انجام می‌دهد دقیقاً همین است. این دستگاه امکان حرکت در راستای سه محور مختصات که این محورها، تشکیل‌دهنده محورهای مختصات دکارتی X Y Z هستند را دارد. در این دستگاه سه موتور برای حرکت دادن هد دستگاه در راستای سه محور مختصات و همچنین وسیله‌ای خاص در سر دستگاه وجود دارد تا هنگام تماس آن با سطح قطعه کار

^۱Coordinate Measuring Machine

^۲Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing

^۳Rene Descartes

سیگنالی برای موتورهای فرستاده و آنها را از حرکت بازداشته و سیگنالی برای خط کش نوری^۱ فرستاده و توسط آنها مختصات نقطه تماس را به دست می آورد.

۲-۲- تاریخچه

دستگاههای اندازه گیری مختصات در سالهای ابتدایی دهه ۶۰ میلادی برای اولین بار ارائه شدند و نسبت به دیگر دستگاههای صنعتی جوان هستند. از آن پس صنعت دستگاههای اندازه گیری مختصات به سرعت رشد کرد. نیاز به دستگاه CMM وقتی احساس شد که دستگاههای کنترل عددی^۲ (NC) برای تولید قطعات پیچیده سه بعدی طراحی و ساخته شدند. اولین دستگاه یک ابزار سه بعدی بود که به همراه یک نمایشگر از نوع DRO مختصات X Y Z صفحه مختصات دستگاه را مشخص می کرد. سالها در مورد اینکه ابداع گر اولیه این دستگاه که بوده و چه کسی سه حرف مخفف CMM را ابداع کرده است بحث و جدل بود. با این حال امروزه نام CMM به عنوان یکی از دقیق ترین ابزارهای اندازه گیری در ابعاد ماکرو و در مقیاس صنعتی برده می شود. نسل های مختلف این دستگاه از آغاز تاکنون را می توان به صورت زیر معرفی کرد:

- بدون نمایشگر - ورنیه ای
- نمایشگر ساده - نمایشگر مختصات
- پردازنده ساده با توانایی محدود
- کامپیوتر با نرم افزار ساده - سیستم عامل DOS
- پیشرفته

اولین CMM توسط شرکت DEA ارائه شد که قالب و طرح دستگاه شبیه به یک دروازه بود که به همراه یک کاوشگر^۳ سخت بود. کمی بعد شرکت اندازه گیری فرانتی^۴ از کشور اسکاتلند

^۱Encoder

^۲Numerical Control

^۳Digital Electronic Automation

^۴Probe

^۵Ferranti

CMM طرح پایه‌ای خود را با یک DRO و یک کاوشگر ثابت ارائه کرد. دستگاهی که شرکت DEA ساخته بود فقط چند ماه زودتر از CMM شرکت فرانتی ارائه شد. شرکت فرانتی که امروزه بنام شرکت سیستم‌های بین‌المللی اندازه‌گیری^۱ (I M S) نامیده می‌شود احتمالاً اولین دستگاه با کنترل مستقیم کامپیوتر^۳ (DCA CMM) را ارائه کرده است. صنعت ابزارسازی، سالیانه بیش از ۶۰۰۰ دستگاه CMM تولید می‌کند. هر کشور صنعتی در جهان، CMM مختص به خود را دارد و بزرگ‌ترین سازندگان این دستگاه از کشور انگلستان هستند.

۲-۳- بخش‌های مختلف دستگاه

این دستگاه در اصل شامل چهار بخش می‌باشد:

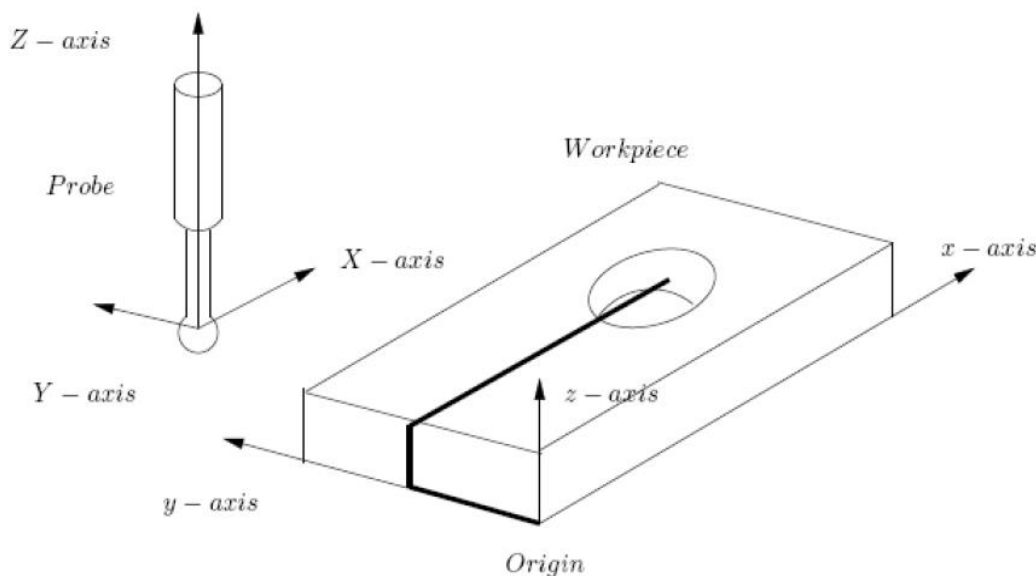
- خود دستگاه (سازه).
- مجموعه سیستم پراب و کنترلرها (کاوشگر).
- سیستم کامپیوتری.
- نرم‌افزار اندازه‌گیری.

این دستگاه از یک سازه تشکیل شده که عموماً از آن به‌عنوان ماشین یاد می‌شود ولی باید دانست که این فقط یک از بخش از دستگاه است. سازه در سه محور قادر به حرکت خواهد بود. بازوها و یا محورهایی که بر روی سازه قرار گرفته‌اند مطابق با محورهای دستگاه مختصات کارترین Z, Y, X نامیده می‌شوند. بخش دیگر CMM بخش کنترل کامپیوتری است که رابط بین نرم‌افزار و سخت‌افزار دستگاه می‌باشد. نرم‌افزار یکی از الزامات این دستگاه می‌باشد که قادر است به دستگاه فرمان‌های لازم را برای انجام عملیات لازم اندازه‌گیری ارائه نماید.

^۱Cantilever

^۲International Measurement System

^۳Direct Computer Assist



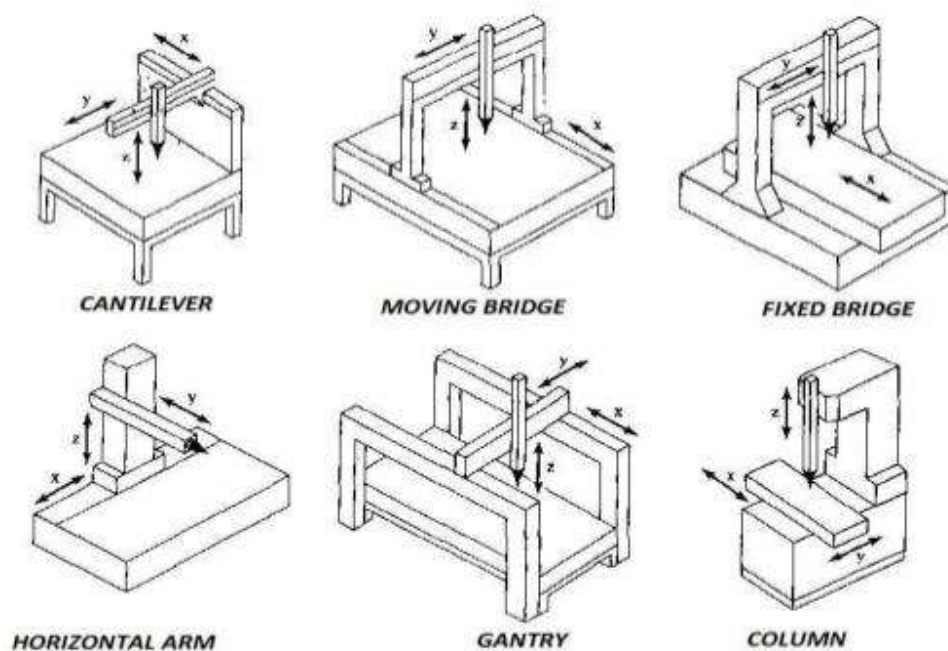
شکل ۱-۲. جهت‌های حرکتی CMM.

میز دستگاه از دیگر بخش‌های این دستگاه می‌باشد که صافی سطح بالائی داشته و عموماً از جنس گرانیات ساخته می‌شود. صافی سطح میز و ضریب انبساط دمایی کم، دو ویژگی بسیار مهم میز دستگاه می‌باشند. پراب‌ها بخش دیگر دستگاه هستند. پراب خود از دو بخش ساقه و نوک کروی شکل تشکیل شده است. البته پراب خود بر روی سیستم پراب گیر بسته می‌شود و این مجموعه خود بر روی یکی از محورها با توجه به نوع طرح سازه بسته می‌شود.

۲-۳-۱- سازه مکانیکی

سازه‌های مختلفی برای CMM وجود دارند که این سازه در طول سالیان مختلف برحسب نیاز و شرایط موجود طراحی و ساخته شده و به مرور بهبود یافته‌اند. این طرح‌ها باهدف افزایش دادن سرعت و شتاب CMM، بهبود مشخصات اندازه‌گیری و بهینه نمودن عملیات اندازه‌گیری و دسترسی بهتر به قطعه کار، بنا می‌شوند. برخی از این طرح‌ها عبارتند از پایه‌دار با میز ثابت؛

پل متحرک^۱، دروازه‌ای^۲، ستونی^۳، بازویی با میز ثابت^۴، بازوی تا شونده^۵ و دستگاه CMM پل ثابت^۶.



شکل ۲-۲. طرح‌های مختلف دستگاه CMM.

^۱Moving Bridge

^۲Gantry

^۳Column

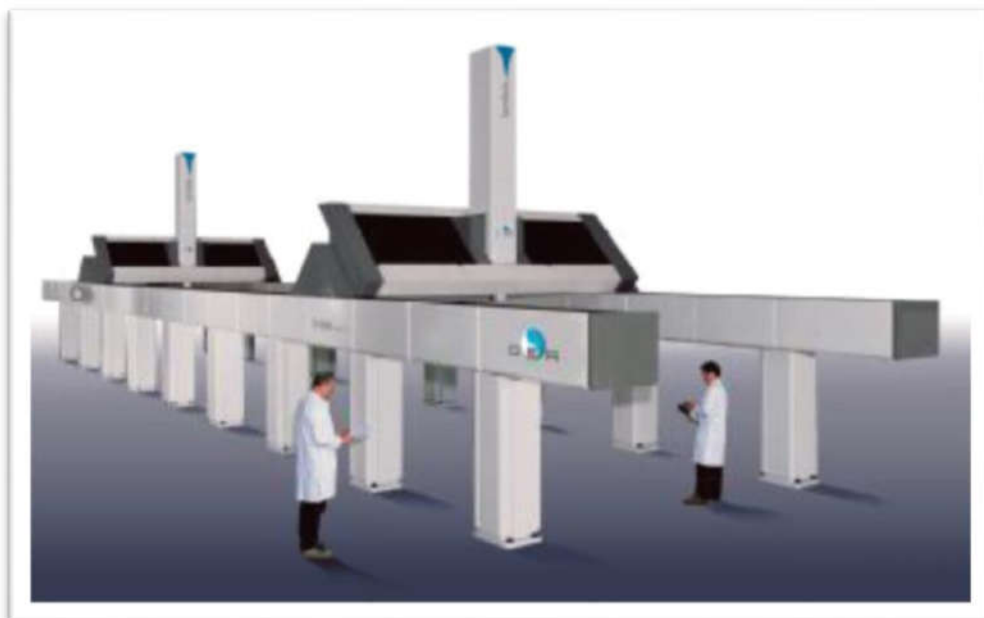
^۴Fixed Table Horizontal Arm

^۵Articulated Arm

^۶Fixed Bridge



شکل ۲-۳. دستگاه CMM پل متحرک.



شکل ۲-۴. دستگاه CMM دروازه‌ای.