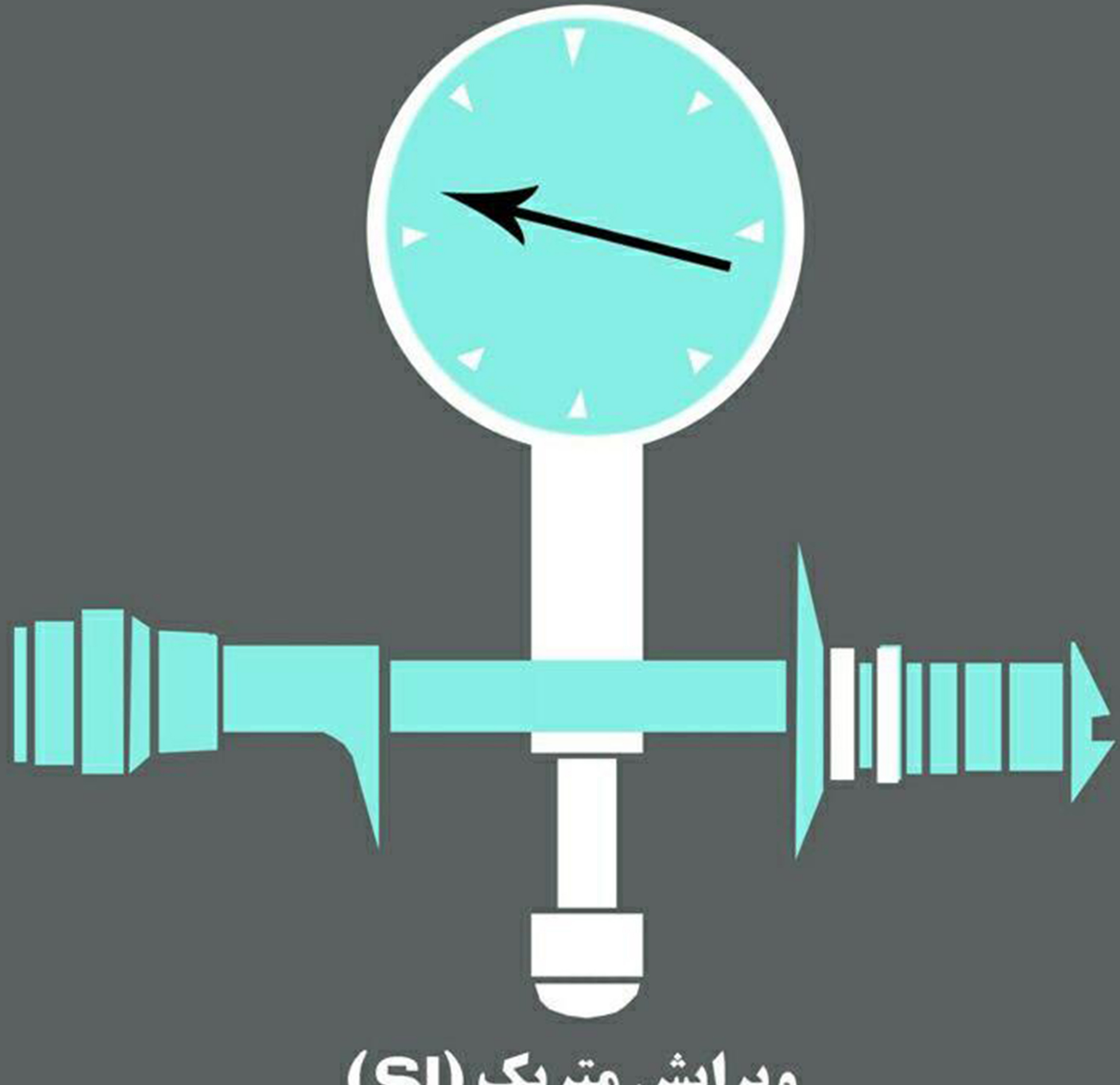
اندازه گیری برای مهندسین

J F W Galyer
C R Shotbolt



ویرایش متریک (SI)

کتاب فنی از انتشارات CASSELL

منبع درسی دانشگاه فنی و حرفه ای

بسم الله الرحمن الرحیم

اندازه گیری برای مهندسین

مترجم:

امیرحسین سرداری زاده

Metrology For Engineers

BY:J. F. W. Galyer

سرشناسه : گالیر، جان فردریک وایز، ۱۹۱۲- م.
-Galyer, J. F. W.(John Frederick Wise), 1912

عنوان و نام پدیدآور : اندازه‌گیری برای مهندسین/ [جان فردریک وایز گالیر، سی.آر شاتبولت] ؛ مترجم امیرحسین سرداری‌زاده.

مشخصات نشر : تهران: سنجش و دانش، ۱۳۹۹.

مشخصات ظاهری : ۲۸۷ ص.

شابک : 978-622-051104-5

وضعیت فهرست نویسی : فیپا

یادداشت : عنوان اصلی: Metrology for engineers, [1964]

موضوع : اندازه‌گیری

موضوع : Measurement

شناسه افزوده : شاتبولت، سی. آر.

شناسه افزوده : Shotbolt, C. R.

شناسه افزوده : سرداری زاده، امیرحسین، ۱۳۵۵-، مترجم

رده بندی کنگره : T۵۰

رده بندی دیویی : ۶۲۰/۰۰۲۸

شماره کتابشناسی ملی : ۶۱۸۰۱۰۴

عنوان: اندازه گیری برای مهندسین

مترجم: امیرحسین سرداری زاده

ناشر:سنجش و دانش

نوبت چاپ: اول–۱۳۹۹

تیراژ: ۵۰۰ نسخه

شابک:۵–۱۱۰۴–۰۵–۶۲۲–۹۷۸

نشانی: میدان انقلاب. خیابان انقلاب. خیابان دانشگاه. پلاک ۱۲۶.

تلفن:۰۲۱۶۱۲۶

www.sanjesh.ir

sanjeshodanesh@iran.ir

««کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر محفوظ می باشد»»

قیمت:۳۵۰۰۰۰ریال

ISBN 978-622-05-1104-5

پیرامون مجوز ترجمه و چاپ

با توجه به قدیمی بودن کتاب، پس از تحقیق در وب، مشخص شد که انتشارات Cassell لندن طی سالیان گذشته تغییرات داشته است. به آخرین آدرس وب سایت منسوب به این انتشارات مراجعه گردید و جهت دریافت مجوز نشر، نامه نگاری شد. نتیجه در تصویر زیر مشاهده می‌گردد.

Subject	Re: translation permission
From	Permissions (UK) <Permissions@octopusbooks.co.uk>
To:	sardaryzadeh@yahoo.com <sardaryzadeh@yahoo.com>
Cc:	Hachette UK Enquiries (UK) <enquiries@hachette.co.uk>
Date	سه‌شنبه, مارس ۱۰, ۲۰۲۰ at ۱۸:۳۵

Thank you for your request regarding Metrology for Engineers.

I am afraid that we have been unable to locate any contractual information on this publication and are therefore not in a position to grant you permission to use the material. We have no objection to your use of this material in the manner indicated in your application but, were you to do so, it would be entirely at your own risk. If you do choose to use this material it is customary to acknowledge the author, the title and the publisher of the publication concerned.

From: "Hachette UK Enquiries (UK)" <enquiries@hachette.co.uk>
Date: Friday, 6 March 2020 at 15:48
To: "Permissions (UK)" <Permissions@octopusbooks.co.uk>
Subject: FW: translation permission

From: AMIR HOSAIN SARDARYZADEH <sardaryzadeh@yahoo.com>
Sent: 05 March 2020 14:08
To: Hachette UK Enquiries (UK) <enquiries@hachette.co.uk>
Subject: translation permission

Dear Siers

Hi

I intend to translate and publish the Metrology for Engineers (editon 1990 by J F W Galyer- ISBN:0-304-93434-8) in Persian.

I request that you guide me to get permission from the publisher(Cassell & Company Ltd.London).

With all respect

Amirhossein Sardarizadeh

Click here to report this email as spam.

مقدمه ای بر ویرایش اول

هدف این کتاب، برطرف نمودن نیاز دانشجویانی است که برای شرکت در آزمونهای اندازه گیری، آماده می شوند. کتاب به گونه ای طراحی شده است که برای آزمونهای دیپلم ملی، آزمونهای دریافت گواهینامه مهندسی مکانیک و مهندسی تولید، آزمونهای عضویت در انجمن مهندسین مکانیک، انجمن مهندسین تولید و انجمن بازرسی مهندسی مناسب باشد. این کتاب، همچنین برای دانشجویان سالهای آخر دوره های کاردانی مهندسی مکانیک مؤسسه شهر و اصناف لندن نیز مفید می باشد.

دانش اندازه گیری و تمرین کاربردهای آن در صنعت بسیار اهمیت دارد. این موضوع درمورد تکنیکهایی که به اندازه گیری مرتبط می شوند اما دقیقا بخشی از آن نیستند نیز درست می باشد. به همین دلیل، فصلی به کنترل کیفیت آماری اختصاص داده شده است. امید است که این فصل نه تنها برای دانشجویان بلکه برای صنعتگرانی که به آگاهی از اصول این تکنیک نیاز دارند مفید باشد.

گسترش تولید مهندسی در گذشته، از اندازه گیری جدا نبوده است. روشن است که تقاضای رو به گسترش صنعت برای مکانیزمها و مجموعه های مونتاژی که به طراحی دقیقتر نیاز دارند، باعث خواهد شد که در آینده به علم اندازه گیری، بیشتر توجه گردد.

نویسندگان این کتاب، جملات کلوین را به دانشجویان خاطر نشان می کنند: من اغلب می گویم وقتی می توانید چیزی را که درباره آن صحبت می کنید اندازه گیری نمایید و آن را با اعداد بیان کنید، می توان گفت درباره آن چیزی می دانید. اما وقتی نمی توانید آن را اندازه گیری نمایید، وقتی نمی توانید آن را با اعداد بیان کنید دانش شما ناچیز است و قانع کننده نمی باشد.

گفته کلوین، دلیل قدرتمندی است که با تکیه بر آن می توان گفت علم اندازه گیری بخشی از دروسی می باشد که یک مهندس به مطالعه آن نیاز دارد. گفته کلوین همچنین به این حقیقت اشاره دارد که اگر می خواهیم کنترل فرایندهای تولید را بیشتر بهبود بخشیم باید وسایل اندازه گیری خود را به طور پیوسته توسعه دهیم. اگر این کتاب بتواند دانش مقدماتی را به دانشجویان ارائه نماید که بر اساس آن پیشرفتهای ضروری بعدی قابل حصول باشد به هدف خود رسیده است.

در نهایت مایل هستیم از شرکتهای متعددی که با اجازه چاپ تصاویر گوناگون خود به آماده سازی کتاب کمک نمودند سپاسگزاری نماییم.

لاتن(Luton)-دسامبر ۱۹۶۳ (۱۳۴۲ شمسی)

J.F. W.G.
C.R.S.

مقدمه ای بر ویرایش سوم

دو عامل باعث شد که چاپ سوم کتاب اندازه گیری برای مهندسین به بازبینی قابل توجهی نیاز داشته باشد. با پذیرفتن طول موج نور به عنوان استاندارد طول، فصل یک تنها از نظر تاریخی اهمیت داشت و بنابراین با فصل جدیدی به نام خطاها در اندازه گیری جایگزین شد. عامل دیگر، پذیرفتن سیستم متریک و بخصوص استفاده از سیستم بین المللی واحدها (SI) در انگلیس بود. بر این اساس تمام کتاب اصلاح شد و واحدهای طول، جرم، نیرو و زمان به ترتیب بر اساس متر، کیلوگرم، نیوتن و ثانیه منظور گردید.

طی چند سال اخیر با تشکیل انجمن نهادهای مهندسی، بازبینی در دوره های دیپلم ملی و رشد پیوسته دوره های مؤسسه شهر و اصناف لندن، تغییراتی نیز در ساختار آموزش فنی پدید آمده است. امید است که این متن بازنگری شده نیز برای دانشجویان شرکت کننده در آزمونهای این مؤسسات و دانش آموزان متقاضی دیپلم ملی مفید واقع گردد.

از زمان اولین چاپ، افراد بسیاری با گوشزد نمودن خطاهای موجود و انتقادهای سازنده به این اثر علاقه نشان داده اند. از همه آنها تشکر می کنیم و امیدواریم متن بازنگری شده نیز مانند متن اول مورد تأیید آنها قرار گیرد. اگر این کتاب بتواند مهندسان جوان امروز را به دنیای آینده که دنیای سیستم متریک است هدایت نماید به هدف خود رسیده است.

لاتن(Luton)-می ۱۹۶۹ (۱۳۴۸ شمسی)

J.F. W.G.
C.R.S.

فهرست مطالب

فصل اول ۱۰
خطاها در اندازه گیری ۱۰
مقدمه ۱۱
انواع خطاها ۱۲
تعیین خطای ترکیبی ۱۸
روشهای آماری ۱۹
روشهای ترسیمی ۲۱
خلاصه ۲۳
فصل دوم ۲۴
استفاده از امواج نور به عنوان استاندارد طول ۲۴
تکامل تدریجی استاندارد طول ۲۵
ماهیت نور ۲۶
پرتوهای تک رنگ ۲۷
کاربرد تداخل سنجی در آزمایش تخت بودن سطح ۳۰
تداخل سنجها (اینتر فرومترها) ۳۶
فصل سوم ۴۷
اندازه گیری خطی ۴۷
مقدمه ۴۸
سنجه های خطا و سنجه های مکعبی شکل ۴۸
سنجه های میله ای شکل طول ۵۰
طراحی و بهره برداری از وسایل اندازه گیری خطی ۵۲
اصول سینماتیک ۵۷
مقایسه سنجه ها ۶۱
طراحی مقایسه گرها (کمپراتور) ۶۲
طراحی و بکارگیری ماشین های اندازه گیری ۸۵
کنترل خودکار ماشین ۸۷
فصل چهارم ۸۹
اندازه گیری زاویه ای ۸۹

و تقسیم مـــدوّر ۸۹
مقدمه : ۹۰
اندازه گیری زوایا از طریق اندازه گیری طول-خط کش سینوسی ۹۰
اندازه گیری سنجه های مخروطی ۹۴
تراز دقیق ۱۰۰
وسایل نوری برای اندازه گیری زاویه ای ۱۰۲
تقسیم مدور (دایروی) ۱۱۰
اندازه گیری تعامد ۱۱۷
فصل پنجم ۱۲۳
حد و سنجه های حدی ۱۲۳
مقدمه : ۱۲۴
سنجه های حدی (فرمانها) ۱۳۰
تئوری تِیْلور در سنجه ها ۱۳۲
رزوه های پیچ ۱۳۶
سنجه های حدی مخروط ۱۴۰
سنجه های عمق سوراخ (thumb nail) ۱۴۲
سنجش قطرهای بزرگ ۱۴۳
جنس سنجه ها ۱۴۷
پرداخت سطح برای سنجه ها ۱۴۹
فصل ششم ۱۵۰
اندازه گیری ماشین ابزار ۱۵۰
لزوم اندازه گیری ماشین ابزار ۱۵۱
آزمایشهای هم راستایی ۱۵۱
آزمایش تعامد ۱۶۱
آزمایشهای عملی (آزمایش دینامیکی-م) ۱۶۵
فصل هفتم ۱۶۶
اندازه گیری چرخ دنده ۱۶۶
مقدمه ۱۶۷
چشم انداز ۱۶۷

منحنی اینولوت ۱۶۸
تابع اینولوت ۱۶۹
تعاریف و ابعاد استاندارد...۱۷۰
چرخ دنده های مارپیچ ۱۷۳
اندازه گیری چرخ دنده ۱۷۷
آزمایش غلتکی چرخ دنده ۱۷۸
اندازه گیری ضخامت دندانه چرخ دنده ساده و مارپیچ ۱۸۱
اندازه گیری با استوانه ها ۱۹۱
اندازه گیری گام چرخ دنده..۱۹۲
آزمایش شکل اینولوت ۱۹۷
خطاهای مجاز در چرخ دنده ساده...۱۹۹
فصل هشتم..۲۰۰
اندازه گیری رزوه های پیچ ۲۰۰
مقدمه.. ۲۰۱
اندازه گیری قطر اصلی ۲۰۲
اندازه گیری قطر فرعی ۲۰۳
اندازه گیری شکل رزوه ها... ۲۰۴
تصویر رزوه پیچ... ۲۰۵
خطای گام در رزوه پیچ.. ۲۱۱
اندازه گیری قطر مؤثر ساده (Effective Diameter) ۲۱۶
قطر مؤثر ظاهری...۲۲۰
اندازه گیری سنجه های حلقه ای پیچ ۲۲۱
فصل نهم ۲۲۳
اندازه گیری پرداخت سطح...۲۲۳
مقدمه.. ۲۲۴
معنی بافت سطح...۲۲۵
روشهای اندازه گیری پرداخت سطح..۲۲۶
تحلیل نمودار خراشیدگی ۲۳۱
میکروسکوپ تداخلی...۲۳۵

کپی برداری از سطح ۲۳۷
فصل دهم ۲۳۹
کنترل کیفیت آماری ۲۳۹
مقدمه ۲۴۰
تغییر پذیری فرآیند ۲۴۱
نمودارهای کنترل (Control Charts) ۲۴۶
نمودار کنترل جزئی ۲۵۷
بازرسی نمونه ای از کالاهای ورودی ۲۶۰
تئوری ساده احتمال ۲۶۱
مشخصات سیستمهای نمونه گیری ۲۶۴
طرح نمونه گیری اقتصادی ۲۶۸
نتیجه گیری ۲۷۲
ضمیمه فصل ششم : ۲۷۳
تعیین تختی یک سطح ۲۷۳
کتاب شناسی ۲۸۵

فصل اول

خطاها در اندازه گیری

(Errors in Measurement)

مقدمه

تمامی مهندسین بدون توجه به این که در چه شاخه ای کار می کنند پیوسته با مسائل اندازه گیری مانند اندازه گیری جرم، نیرو، دما، جریان الکتریکی، طول، زاویه و ... یا اندازه گیری جمعی از این کمیتها روبرو هستند. به کمک نتایج این قبیل اندازه گیری ها، اطلاعاتی فراهم می شود که مهندسین می توانند بر اساس این اطلاعات درباره یک موضوع تصمیم گیری نمایند. به این ترتیب علم اندازه گیری وسیله ای است که به تصمیم گیری هر چه بهتر کمک می نماید.

به بخشی از این اندازه گیریها که طول و زوایای اجسام را ارزیابی می نماید و به مهندسان مکانیک یا مهندسان تولید مربوط است، مترولوژی (علم اندازه گیری) گفته می شود. در مترولوژی، طول یکی از اجزاء مهم اندازه گیری است و حتی به کمک روشهای ویژه ای می توان توسط اندازه گیری طول، زاویه را نیز اندازه گیری نمود.

البته اندازه گیری تا زمانی که بر اساس دقت قابل قبولی اجرا نگردد، کامل نخواهد بود. از آنجایی که هیچ اندازه گیری دقیق نیست، ذکر دقت اندازه گیری در کنار ابعاد اندازه گیری شده بسیار مفید می باشد. اگرچه خطا، عضو جدایی ناپذیر اندازه گیری است و نمی توان آن را بطور کامل برطرف نمود اما به حداقل رساندن آن ممکن است. به عنوان مثال فرض کنید که یک بلوک اندازه گیری در اختیار دارید و اندازه اسمی آن ۳۰ میلی متر می باشد. آیا بیان اندازهٔ بلوک به تنهایی کافی است؟

حال اطلاعات زیر را در نظر می گیریم:

a) خطای اندازه گیری شده در بلوک اندازه گیری ۰/۰۰۰۲- میلی متر است.

b) دقت بلوک اندازه گیری ۰/۰۰۰۴- میلی متر است.

حال هر کسی از این بلوک اندازه گیری استفاده کند اطلاعات کاملی در اختیار دارد که برای اندازه گیری دقیق تر به او کمک می نماید.

گاهی دقت اندازه گیری بالا نیست و می توان از خطا چشم پوشی کرد مثلاً فرض کنید از یک بلوک اندازه گیری برای کنترل خط مبنای یک کولیس که فقط ۰/۰۲ میلی متر دقت دارد استفاده شود. در اینجا خطا قابل چشم پوشی است چرا که مقدار آن ناچیز است حال اگر از

همین بلوک اندازه گیری برای تنظیم یک کمپراتور (مقیاسه گر) که درجه بندی آن تا ۰/۰۰۱ میلی متر را نشان می دهد استفاده شود مقدار خطا مهم است و باید منظور گردد. با ترکیب دقت بلوک اندازه گیری و دقت کمپراتور، کل دقت اندازه گیری حاصل می شود.
با توجه به این توضیحات متذکر می شویم که فصل حاضر برای بررسی و درک مطالب بعدی کتاب مهم است و از این نظر، فصل مرجع محسوب می گردد.

انواع خطاها

معمولاً در هر اندازه گیری دو نوع خطا قابل تشخیص است. خطاهایی که با دقت بیشتر در کار قابل حذف هستند و خطاهایی که عضو جدایی ناپذیر اندازه گیری می باشند یا به عبارت دیگر نمی توان آنها را به صفر رساند.

خطاهایی که می توان آنها را حذف کرد.

الف) خطاهای ناشی از نادرست خواندن :

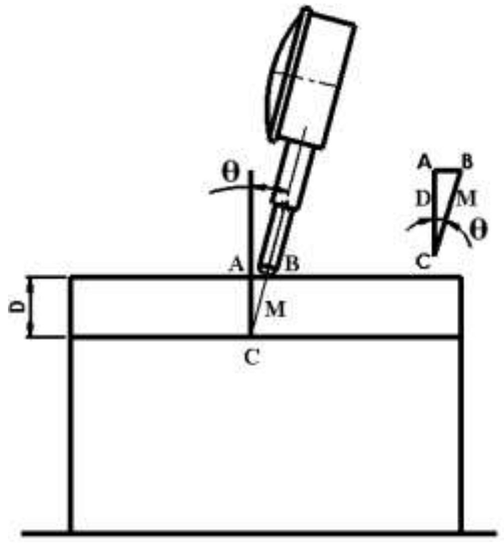
مثلاً میکرومتری که مقدار ۵/۲۸ میلی متر را نشان می دهد ۵/۷۸ یا ۶/۲۸ میلی متر خوانده شود.

ب) خطاهای محاسباتی :

این نوع خطاها معمولاً به هنگام جمع کردن اعداد پیش می آید. مثلاً برای جمع کردن یک ستون از اعداد، دو راه وجود دارد یا از بالای ستون اعداد، آنها را با هم جمع کنیم یا از پایین ستون، عملیات جمع را انجام دهیم که در هر دو صورت جوابها باید یکسان باشد. در بسیاری مواقع این قبیل خطاها (همچنین خطاهای ناشی از نادرست خواندن) نتایج دور از انتظاری ارائه می دهند و البته با تکرار اندازه گیری آشکار می گردند. به این نکته نیز باید توجه نمود که همواره با تکرار اندازه گیری، خطاها مشخص نمی شوند و تنها راه جلوگیری از پیش آمدن چنین خطاهایی دقت و توجه به جزئیات است.

ج) خطاهای محوری :

این نوع خطا زمانی اتفاق می افتد که وسیله اندازه گیری با قطعه کار در راستای درست قرار نداشته باشد که معمولاً بین اندازه حقیقی(D) و مقدار غیر حقیقی(M)یک رابطه مثلثاتی برقرار خواهد بود.



شکل ۱-۱)خطای کسینوسی حاصل از ناراستایی وسیله اندازه گیری

با توجه به شکل، ساعت اندازه گیری با قطعه کار زاویه θ می سازد بنابراین:

$D = M \times Cos\theta$ (۱-۱)

این خطا در اثر ناراستایی امتداد خط دید و درجه بندی دستگاه اندازه گیری نیز ممکن است پدید آید.

د)خطای انحراف از دمای استاندارد :

بیشتر اندازه گیری ها کم و بیش تحت تأثیر شرایط محیطی هستند و مهمترین عامل محیطی نیز دما است. دمای استاندارد و بین المللی که اندازه گیری باید در آن دما انجام شود ۲۰ درجه سانتی گراد می باشد. اگر دمای جسم تغییر کند کنترل دمای محیط سودی نخواهد داشت بنابراین باید سعی کرد دمای جسم نیز ثابت و تا حد امکان به دمای محیط اندازه گیری نزدیک باشد. دست زدن به وسیله اندازه گیری نیز می تواند دمای وسیله را تغییر دهد و از دقت اندازه

گیری آن بکاهد. بنابراین بهتر است که در طول مدت انداز گیری همه وسایل روی یک سطح چوبی یا پلاستیکی قرار داده شود، همچنین تا آنجا که امکان دارد وسیله اندازه گیری دارای دسته عایق باشد. وقتی درباره تأثیر دما بر اندازه گیری بحث می شود باید به دو روش اندازه گیری زیر توجه نمود :

۱)اندازه گیری مستقیم : قطعه کار مستقیماً به کمک ابزار اندازه گیری، اندازه گرفته می شود. در این حالت دمای غیر استاندارد باعث می شود تا خطای نسبی در اندازه گیری پدید آید :

خطا $= E = L \times \alpha \times (t - t_s)$ (۱-۲)

L: طول واقعی (اندازه گرفته شده در دمای استاندارد)

α: ضریب انبساط طولی ماده قطعه کار

$t-t_s$: میزان انحراف دما از دمای استاندارد

۲)اندازه گیری غیر مستقیم (نسبی یا مقایسه ای) : قطعه کار به صورت غیر مستقیم با یک وسیله اندازه گیری ارزیابی می شود (به عنوان مثال انتقال اندازه قطعه کار به کمک پرگار بروی خط کش-مترجم). فرض کنید دو جسم با ضریب انبساط طولی α_1 و α_2 موجود باشد. خطای ناشی از کاربرد دمای غیر استاندارد عبارت است از :

$E = L \times (\alpha_1 - \alpha_2) \times (t - t_s)$ (۱-۳)

اگر مقادیر α_1 و α_2 کوچک باشد، مقدار خطا نیز کوچک می شود. به این ترتیب در اندازه گیری، هم دما بودن تمام اجزای اندازه گیری مهم است. همچنین دمای اجزاء تا حد امکان باید نزدیک به دمای استاندارد باشد. در بعضی از وسایل اندازه گیری علاوه بر دما، عوامل دیگری مانند میزان رطوبت هوا، فشار هوا، میزان دی اکسید کربن و... دقت اندازه گیری را تغییر می دهد. پس باید در تمام طول اندازه گیری عوامل فوق ثبت شود تا به کمک این اطلاعات، مقدار حقیقی اندازه گیری بدست آید. از جمله وسایلی که چنین عواملی، دقت اندازه گیری آنها را تغییر می دهد می توان به تداخل سنجها (اینترفرومترها) اشاره کرد.

ه) <u>خطاهای ناشی از تغییر شکل کشسان :</u>

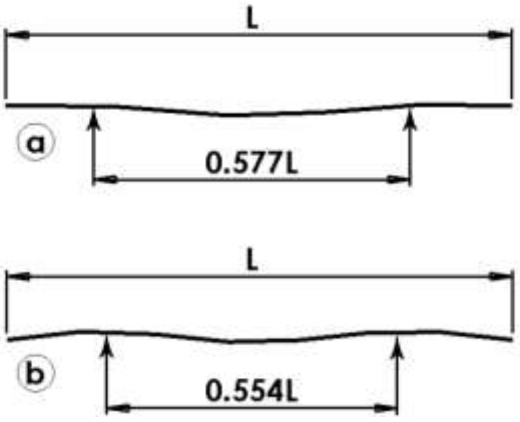
هر شیء کشسان برای تحمل نیرویی که به آن وارد می شود تغییر شکل می دهد و بزرگی این تغییر شکل به بزرگی نیرو، بزرگی سطح تماس و خواص مکانیکی ماده ای که به آن نیرو وارد می شود بستگی دارد. پس باید مراقب بود تا نیروی اندازه گیری وارد بر سطح تماس ثابت و مناسب باشد. در بسیاری از کارخانه ها برای اندازه گیری دقیقتر، از کمپراتورها و میکرومترهای رومیزی استفاده می شود چرا که نیروی اندازه گیری در آنها ثابت است. اگر سطح تماس اندازه گیری به درستی تنظیم نشود باز هم اندازه واقعی به دست نخواهد آمد. بنابراین قبل از اندازه گیری قطعه کار و خواندن وسیله اندازه گیری، باید وضعیت قطعه کار را نسبت به وسیلهٔ اندازه گیری دقیقاً تنظیم نمود.

فرمول زیر مقدار تغییر شکل نهایی در اثر اعمال فشارw بر قطعه ای کروی شکل را نشان می دهد. به عبارت دیگر اگر یک کره استاندارد به شعاع R_1 و یک قطعه کار کره ای شکل به شعاع R_2 زیر فشار اندازه گیری w با یکدیگر تماس داشته باشند تغییر در فاصله مراکز این دو کره یعنی δ، عبارت است از:

(۱-۴) میلی متر $\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)^{\frac{1}{3}} \times (k_1+k_2)^{\frac{2}{3}} \times (w)^{\frac{2}{3}}$ $\delta = 1.774$ = (دلتا)تغییر شکل نهایی

$$k_1=\frac{1-(v_1)^2}{E_1},\quad k_2=\frac{1-(v_2)^2}{E_2}$$

υ_1 و υ_2 (نو یا نیو) به ترتیب ضرایب پواسن برای کره استاندارد و قطعه کار می باشد. E_1 و E_2 نیز مدول الاستیسیته برای کره استاندارد و قطعه کار است. اگر این اندازه گیری به وسیله یک کمپراتور و در دو مرحلهٔ A و B انجام شود مقدار خطا، برابر $\delta_A-\delta_B$ خواهد بود که δ_A تغییر شکل نهایی برای مرحلهٔ اول و δ_B تغییر شکل نهایی برای مرحله دوم است. همچنین باید مقادیر k_1 و k_2 و R_1 و R_2 به طور جداگانه برای هر دو حالت A وB تعیین شود. نوع دیگری از تغییر شکل کشسان وقتی اتفاق می افتد که جسمی زیر فشار وزن خود خم شود. در این حالت برای کاهش خطا باید موقعیت تکیه گاه را تغییر داد.



شکل ۲-۱)موقعیت های تکیه گاهی برای حالتهای مختلف اندازه گیری

در حالت a می بینید که شیب در انتهای قطعه کار صفر است ولی در حالت b شیب در دو انتهای قطعه کار با شیب در وسط قطعه کار برابر است پس تغییر شکل کشسان حاصل از وزن قطعه کار در حالت a کمتر از هر حالت دیگری بر طول تأثیر می گذارد.

خطاهایی که نمی توان آنها را حذف کرد:

الف)خطاهای ناشی از درجه بندی :

اگر درجه بندی که اندازه ها از روی آن خوانده می شود دارای خطا باشد بدیهی است که خود اندازه گیری نیز خطا خواهد داشت. این خطا با میزان سازی (کالیبراسیون) درجه بندی وسایل اندازه گیری مطابق استانداردهای معین طول، تا حدودی بر طرف می شود. می توان خطای ناشی از درجه بندی را در اندازه گیری های مقایسه ای با کوچک کردن تقسیمهای درجه بندی کاهش داد.

ب) خطا در خواندن :

با چه دقتی می توان یک درجه بندی را خواند؟ این موضوع به ضخامت خطوط درجه بندی، فاصله بین آنها و ضخامت خط مبنا یا عقربه ای که برای خواندن بکار می رود بستگی دارد.

برای راهنمایی بیشتر فرض کنید که هرگاه عقربه یک وسیله اندازه گیری بروی یکی از تقسیمات درجه بندی قرار گیرد دقت خواندن اعداد درجه بندی، ٪۱۰± و هر گاه عقربه وسیله اندازه گیری بین تقسیمات قرار گرفت مقدار دقت ٪۲۰± دقت تقسیمات درجه بندی باشد. در این صورت اگر عقربه به عنوان مثال ۳- تقسیم از درجه بندی را نشان دهد و دقت درجه بندی (کوچک ترین مقداری که درجه بندی نشان می دهد یا رزولوشن) ۰/۰۰۱ میلی متر باشد اندازه نسبی که عقربه نشان داده است ۰/۰۰۳- میلی متر و دقت خواندن آن ۰/۰۰۰۱ میلی متر ($\frac{10}{100}\times 0.001$) می باشد. به همین ترتیب اگر عقربه مقداری بین تقسیمات درجه بندی مانند ۳/۴- را نشان دهد مقدار اندازه نسبی ۰/۰۰۳۴- میلی متر و دقت تعیین آن ۰/۰۰۰۲ میلی متر ($\frac{20}{100}\times 0.001$) می باشد. لازم به ذکر است که وقتی یک کمپراتور (مقایسه گر) عمل اندازه گیری را انجام می دهد این دسته از خطاها دو بار اتفاق می افتد. یک بار در حالی که دستگاه به وسیله گیجهای مرجع (اندازه گیرها یا سنجه های مادر) تنظیم می گردد و یک بار زمانی که اندازه قطعه کار از روی دستگاه خوانده می شود.

فرض کنید می خواهیم قطر فرمان توپی ساده ای با اندازه اسمی ۲۵ میلی متر را بدست آوریم. اندازه گیری به کمک کمپراتوری با بزرگ نمایی ۵۰۰۰ برابر که با یک بلوک اندازه گیری به طول اسمی۲۵ میلی متر و دقت ۰/۰۰۰۲± میلی متر تنظیم شده است انجام می شود. خطای بلوک (نسبت به اندازه اسمی-م) ۰/۰۰۰۱± میلی متر می باشد. وقتی بلوک اندازه گیری در دستگاه قرار دارد مقدار صفر خوانده می شود و زمانی که فرمان را در دستگاه قرار می دهیم مثلاً مقدار ۰/۰۰۱۲- میلی متر خوانده می شود. همچنین اثر تغییر شکل الاستیک (برگشت پذیر) قابل چشم پوشی است چرا که جنس بلوک و فرمان و نیروی اندازه گیری برای هر دو یکسان می باشد. همچنین هنگام تماس سطوح، شرایط طوری است که تغییر شکل بسیار اندک می باشد. این مسئله و اطلاعات آن در جدول صفحه بعد خلاصه شده است. بنابراین قطر فرمان عبارت است از:

$$25 + (-0.0013) = 24.9987mm$$

اما با توجه به دقت کل بدست آمده مقدار قطر فرمان بین مقادیر زیر محدود خواهد شد :

$24.9987-0.0005 <$ قطر فرمان $< 24.9987+0.0005$

در نتیجه :

$24.9982mm <$ قطر فرمان $< 24.9992mm$

میزان دقت در تعیین اندازه	مقدار خوانده شده	خطا
$\pm 0.0002mm$	$-0.0001mm$	**هنگام اندازه گیری بلوک با کمپراتور**
$\pm 0.0001mm$	0	**هنگام تنظیم کمپراتور با بلوک اندازه گیری**
$\pm 0.0002mm$	$-0.0012mm$	**هنگام اندازه گیری فرمان با کمپراتور**
$\pm 0.0005mm$	$-0.0013mm$	**جمع**

ج) خطاهای حاصل از لمس کردن ابزار :

دیدید که بعضی خطاها از جمله خطاهای جمع شونده می باشند به این معنی که باید مقدار خطای دیگری به آنها اضافه گردد. گاهی خطایی به عنوان حساسیت که در اثر لمس کردن ابزار یا قطعه کار پیش می آید اضافه می شود. این مقدار به نوع وسیله اندازه گیری که مورد استفاده قرار گرفته است بستگی دارد. عموماً برای حذف چنین اثری (لمس ابزار) از کمپراتورها (مقایسه گرها) استفاده می شود (بااین توضیح، عجیب است که نویسنده این خطا را در گروه خطاهای غیر قابل حذف آورده است!-م).

تعیین خطای ترکیبی

در بسیاری از موارد اندازه محاسبه شده نهایی، تابعی از اندازه های خاص مثل a,b,c و ... است که هر کدام از آنها دارای دقت $\delta_a,\delta_b,\delta_c$ و... می باشد. در این صورت دقت اندازه گیری (dm) را می توان به کمک مشتق جزئی به دست آورد :

$$dm = \frac{\partial m}{\partial a}\times\delta_a + \frac{\partial m}{\partial b}\times\delta_b + \frac{\partial m}{\partial c}\times\delta_c + \dots \quad (۵-۱)$$

منظور از $\frac{\partial m}{\partial a}$ (رُند m به رُندa) مشتق جزئی m نسبت به a است یعنی متغیر های دیگر را در رابطه m ثابت فرض کرده تنها نسبت به متغیر a از رابطه m مشتق می گیریم و به همین نحو

برای $\frac{\partial m}{\partial b},\frac{\partial m}{\partial c}$و... عمل می کنیم. به عنوان مثال به مسئله صفحه ۱۰۳ توجه کنید. در این مسئله دقت اندازه گیری در یک عملیات اندازه گیری با رابطه زیر تعریف شده است :

$$D = L + \frac{W^2}{8L}$$

$$L = 400mm, \quad \delta_L = \pm 0.025mm$$

$$W = 50mm, \quad \delta_w = \pm 1.00mm$$

مقدار دقت D به صورت زیر حاصل می شود :

$$dD = \pm\left[\frac{\partial D}{\partial L}\times\delta L + \frac{\delta D}{\delta W}\times\delta_w\right] = \pm\left[(1 - \frac{W^2}{8L^2})\times\delta_L + \left(\frac{2W}{8L}\right)\times\delta_w\right] =$$

$$\pm\left[(1 - \frac{50^2}{8\times400^2})\times 0.025 + \left(\frac{2\times50}{8\times400}\right)\times 1.00\right] \Rightarrow$$

$$dD = \pm[0.024 + 0.031] = \pm 0.055mm$$

توجه شود که در اثر ایجاد خطای کوچکی در L به اندازهٔ $\delta_L = \pm 0.025mm$، دیفرانسیل D (dD) به

مقدار ۰/۰۲۴ میلی متر تغییر می کند اما با ایجاد خطای بزرگی درw به اندازه $\delta_w = \pm 1.00mm$، دیفرانسیل D به میزان ۰/۰۳۱ میلی متر تغییر می نماید. بنابراین L باید دقیقتر از w تعیین شود چرا که dD شامل ۹۶ درصد δ_L ($100\times\frac{0.024}{0.025} = 96$) و تنها ۳ در صد δ_w($100\times\frac{0.031}{1.00} = 3.1$) است.

روشهای آماری

اگر یک اندازه گیری کامل را چندین بار تکرار کنیم مقادیر متفاوتی برای اندازهٔ x بدست می آید (x مقدار مورد اندازه گیری است). در نتیجه می توانیم با رسم نمودارهای آماری یک فرکانس یا فراوانی توزیع بدست آوریم. همچنین به کمک این اطلاعات می توان میزان انحراف داده ها یعنی σرا پیدا کرد. طبق بررسی های انجام شده ۹۹/۲۸ درصد از مقادیر بدست آمده در اثر تکرار اندازه گیری، بین $(\bar{x}\times 3\ \sigma)+$ و $(\bar{x}\times 3\ \sigma)-$ قرار دارد ($\bar{x}$ میانگین مقادیر است).

پس می توان گفت که برای کارهای عملی، دقت تخمینی $\pm 3\sigma$ است. حال اگر ما این مقادیر را به زیر گروههای تصادفی n تایی تقسیم کنیم و برای این زیرگروهها مقدار میانگین را بیابیم به کمک فرمول های آماری می توانیم یک فراوانی توزیع برای مقادیر $\bar{x}$ پیدا کنیم. طبیعی است که این روش بسیار دقیقتر از آن است که تنها به یک بار اندازه گیری اکتفا کنیم. طبق فرمول زیر می توان مقدار انحراف داده ها را یافت :

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (۱-۶)$$

σm: انحراف میانگین استاندارد، σ: انحراف استاندارد هر اندازه و n : تعداد عضو گروه

بنابراین با توجه به مطالب گفته شده در مورد دقت و $\pm 3\sigma$، می توان گفت که دقت تعیین اندازه میانگین یک نمونه n تایی (n بار تکرار) عبارت است از:

$$(۱-۷) \quad \pm 3\sigma_m \text{ که برابر است با } \frac{\pm 3\sigma}{\sqrt{n}}$$

جداول آماری نشان می دهند که تقریباً ۹۵ درصد از مقادیر اندازه گیری تکرار شده در محدوده $(\bar{x} \times \sigma\ 2) \pm$ قرار دارند. در حدود ۶۵ درصد از مقادیر نیز در محدودهٔ $(\bar{x} \times \sigma\ ) \pm$ قرار می گیرند. حال می توان با اطمینان بیان کرد که مقدار دقت مقادیر را یافته ایم.

برای توضیح بیشتر فرض کنید که دقت تخمین زده شده برای عملیات اندازه گیری $\pm\delta$ و برابر $\pm 3\sigma$ باشد ($\pm\delta = \pm 3\sigma$). با توجه به بررسی های انجام شده این دقت برای بیش از ۹۹ درصد مقادیر قابل اطمینان است. بطور ساده تر می گوییم که دقت $\pm\delta$ برای بیش از ۹۹ درصد مقادیر درست است. به روش مشابه $\pm\frac{2}{3}\delta = \pm 2\sigma$ که این دقت برای حدوداً ۹۵ درصد از مشاهدات اعتبار دارد و بالاخره $\pm\frac{1}{3}\delta = \pm\sigma$ که برای ۶۵ درصد از مشاهدات قابل قبول است.

اگر این فرمولها با n ترکیب شود، داریم :

$$(۱-۸) \quad (\text{محدوده اول}) \ \pm\frac{\delta}{\sqrt{n}} = \text{۹۹ درصد محدودهٔ اطمینان}$$

$$(۱-۹) \quad (\text{محدوده دوم}) \ \pm\frac{\frac{۲}{۳}\delta}{\sqrt{n}} = \text{۹۵ درصد محدودهٔ اطمینان}$$

$$(۱-۱۰) \quad (\text{محدوده سوم}) \ \pm\frac{\frac{۱}{۳}\delta}{\sqrt{n}} = \text{۶۵ درصد محدودهٔ اطمینان}$$

بنابراین به کمک فرمول های داده شده می توان انحراف استاندارد را مشخص کرد و علاوه بر محاسبه دقت تعیین اندازه ها، می توان محدوده اطمینان دقت را نیز بدست آورد.

روشهای ترسیمی

فرض کنید در آزمایشی دو متغیر اندازه گیری شده x و y به دست آمده است. برای یافتن رابطه بین آنها می توان منحنی اندازه های خوانده شده را ترسیم کرد و با رسم یک خط میانگین، رابطه منحنی را تعیین نمود به این معنی که خطاها را در هر یک از اندازه ها به صورت میانگین در می آوریم (منظور از خط میانگین آن است که منحنی حاصل را با تقریب به صورت یک خط به نام خط میانگین تبدیل می کنیم). معمولاً مشاهدات به نحوی انجام می شود که منحنی حاصل، یک خط راست به فرم کلی $y=ax+b$ باشد که a شیب خط و bعرض از مبدأ آن است. چنانچه خط میانگین به وسیله چشم و به صورت تخمینی انتخاب شود امکان ایجاد خطا وجود خواهد داشت اما اگر در هر نقطه، یک مستطیل، رسم و دقت تعیین هر یک از مقادیر مشخص گردد، با توجه به این که از انتهای هر مستطیل دو خط خارج می شود، بنابراین دو خط قابل رسم خواهد بود که در نتیجه دو رابطه نیز به دست می آید. به این ترتیب محدودهٔ دقت رابطه حاصل نیز بدست می آید. البته استفاده از این روش پر زحمت است و معمولاً روش بهتری به نام کوچکترین توان دوم استفاده می شود.

روش کوچکترین توان دوم

فرض کنیم a شیب منحنی باشد. در واقع می توان گفت که a نمو میانگین یا رشد متوسط y است وقتی که به x نمو معینی داده شود :

$$a=\frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sum(x-\bar{x})^2} \qquad (1\text{-}11)$$

عملاً استفاده از فرمول بالا مستلزم محاسبات دشواری است و معمولاً از فرمول زیر که در آن تنها داده های اصلی و اولیه بکار می رود و نیازی به محاسبه مقدار میانگین نیست استفاده می شود :

$$a=\frac{\sum xy-\frac{\sum x\sum y)}{n}}{\sum x^2-\frac{(\sum x)^2}{n}} \qquad (۱-۱۲)$$

به این ترتیب بهترین مقدار برای a محاسبه می گردد. بهترین مقدار برای b را نیز می توان با جایگزین کردن مقدار میانگین x وy در عبارت y=ax+b یافت که در اینجا :

$$,\ \bar{y}=\frac{\sum y}{n}\quad \bar{x}=\frac{\sum x}{n}$$

$$\bar{y}=a\bar{x}+b \qquad (۱-۱۳)$$

بهتر است که جدولی رسم و برای مقادیر x، y، $x^۲$، xy و مقادیر نهایی $\sum xy, \sum x^2, \sum y, \sum x$ ستون هایی در نظر گرفته مسئله را حل کنیم.

متغیر	مقادیر													جمع
x	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۹۱
y	۱۷	۱۸	۲۴	۳۱	۳۳	۳۷	۳۳	۳۶	۴۱	۴۴	۵۷	۵۷	۵۴	۴۸۲
$x^۲$	۱	۴	۹	۱۶	۲۵	۳۶	۴۹	۶۴	۸۱	۱۰۰	۱۲۱	۱۴۴	۱۶۹	۸۱۹
xy	۱۷	۳۶	۷۲	۱۲۴	۱۶۵	۲۲۲	۲۳۱	۲۸۸	۳۶۹	۴۴۰	۶۲۷	۶۸۴	۷۰۲	۳۹۷۷

با توجه به مقادیر جدول و با استفاده از فرمول (۱۲-۱) داریم:

$$a=\frac{3977-\frac{482\times 91}{13}}{819-\frac{91\times 91}{13}}=\frac{3977-3374}{819-637}=3.31$$

$$\bar{y}=\frac{482}{13}\approx 37,\bar{x}=\frac{91}{13}=7$$

با جایگزین کردن آنها در فرمول (۱۳-۱) خواهیم داشت:

$$37=(3.31\ \times 7)+b\Rightarrow b=13.83$$

پس رابطه خط راست به صورت زیر به دست می آید :

$$Y = 3.31x + 13.83$$

حال اگر مقادیرx را در عبارت حاصل قرار دهیم مقدار تئوری y که آن را Y در نظر می گیریم حاصل می شود در این صورت خطا در مقدار مشاهده شده $y-Y$ خواهد بود. اگر این محاسبه نیز در جدول تنظیم شود علاوه بر ستون های محاسبات a وb به دو ستون اضافه برای $\bar{y} = a\bar{x} + b$ و $y-Y$ نیاز است. متذکر می شویم که این روش برای ارزیابی درستی و ثابت بودن نتایج آزمایش بکار می رود.

خلاصه

خلاصه نکات اصلی این فصل به قرار زیر است:

۱-همه اندازه گیری ها خطا پذیر هستند.

۲-انحراف ایجاد شده در اندازه گیری باید برآورد شده به عنوان دقت اندازه گیری ارائه گردد.

۳-دقت را می توان با تکرار اندازه گیری به دفعات متعدد و تعیین مقدار میانگین بهبود بخشید.

۴-بهتر است برای تشخیص دقت و درجه اطمینان روشهای آماری بکار گرفته شود.

۵-همچنین می توان روشهای آماری را برای تحلیل داده های آزمایش بکار برد. این داده ها معمولاً به صورت نمودار نشان داده می شود. روشهای آماری عموماً موجب می گردد بین داده های حاصل از آزمایش و روابط یا قوانین مشتق شده از آزمایش سازگاری بهتری برقرار گردد.

فصل دوم

استفاده از امواج نور به عنوان استاندارد طول

(Light Waves as Standards of Length)

تکامل تدریجی استاندارد طول

اندازه گیری در بسیاری از علوم و فنون اهمیت دارد و درآنها نقش بسزایی ایفا می کند. از طرفی وجود واحد های اندازه گیری عضو جدایی ناپذیر این علم است. این واحدها علاوه بر نقش مهمی که در اندازه گیری دارند، پیشرفت تکنولوژی را نیز موجب می شوند. اما برای قابل استفاده بودن، باید به آنها عمومیت داد یعنی در تمام کشورهای جهان قابل درک باشند و به واحدهای بین المللی تبدیل شوند. به همین دلیل دو سیستم اینچی و متریک ایجاد شد که کشورهای صنعتی جهان سالها است از آنها استفاده می کنند.

در سال ۱۹۶۰ به وسیله کمیتهٔ اوزان و مقادیر، سیستمی به نام سیستم SI تهیه شد (مخفف کلمه های انگلیسی Systeme International Unites) که از دو سیستم mks و mksaمنشعب شده است. سیستم SI هم اکنون در بسیاری از کشورهای صنعتی مهم استفاده می شود و بسیاری از کشورها نیز سیستم واحدهای خود را به آن تغییر داده اند. در این کتاب سیستم SI مورد استفاده قرار می گیرد و به همین دلیل واحد طول، متر خواهد بود.

تعریف متر

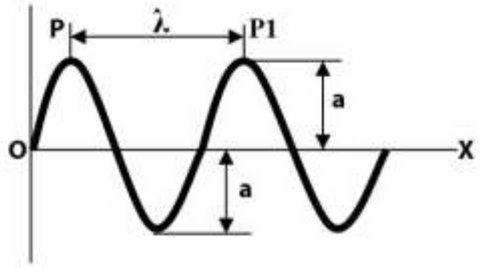
متر عبارت است از : **1650763.73۸** که ۸ طول موج اشعه نارنجی رنگ (قرمز پرتقالی) ایزوتوپ کریپتون ۸۶ در خلاء می باشد. این تعریف توسط کشورهای استفاده کننده از سیستم SI ارائه شده است. هر سیستم بین المللی باید بتواند دقت مورد نیاز در اندازه گیری را برای تمام اهداف علمی و صنعتی تأمین کند. مثلاً در سیستم SI جهت بدست آوردن دقت های مختلف برای متر، زیر واحدهایی مانند ۱۰ و یک دهم تعریف می شود. تکه های اندازه گیری دقیق که به عنوان ابزار مرجع یا استاندارد طول بکار می رود به قدری دقت دارد که برای کالیبره کردن آنها از روش تداخل سنجی یا اینترفرومتری (Interfrometry) که بر اساس طول موج نور انجام می گیرد استفاده می شود.

ماهیت نور

تداخل سنجی شاخه ای از علم است که در آن از یک منبع نور، پرتو نور تولید می گردد و سپس در یک عدسی که معمولاً چشم است تجزیه می شود. تفاوت طول مسیری که پرتو های نور تا قبل از تجزیه شدن طی می کنند مشخص کنندهٔ فاز آنها است. این اختلاف فازها در چشم به صورت نوارهای تاریک و روشن احساس می شود. برای درک پدیده تداخل لازم است که ماهیت نور را بدانیم. برای توضیح ماهیت نور دو تئوری ذره ای و موجی ارائه شده است.

تئوری ذره ای به وسیله نیوتن بیان شد که در آن نور به صورت انتشار ذرات درخشان فرض می شود و تأثیر این ذرات در چشم احساس دیدن نور را ایجاد می کند.

تئوری موجی که به وسیلهٔ هویگنس ارائه شد فرض را بر این گذاشته بود که نور به صورت حرکت موجی است که در فضا منتشر می شود. این تئوری به طور رضایت بخشی پدیدهٔ تداخل نور را توجیه می کند. به این ترتیب نور به صورت یک موج الکترومغناطیسی سینوسی در نظر گرفته می شود.



شکل ۱-۲)نمایش نور به صورت یک موج سینوسی

جهت انتشار در راستای محور ox است و فاصلهٔ طی شده به وسیلهٔ یک موج در دورهٔ تناوب (مدت زمان T) را طول موج گفته آن را با λ نشان می دهیم. همچنین می توان گفت که طول موج، فاصله بین دو نقطه هم موقعیت مثل P و P۱ می باشد (برای مثال پرتو نور سبز رنگ جیوه ۱۹۸ دارای طول موج ۰/۵۴۶۱ میکرومتر است). بیشترین دامنهٔ تغییر a و شدت آن a^3 است. سرعت انتشار vبرابر با $\frac{\lambda}{T}$ است. همچنین فرکانس نور $\frac{1}{T}$ است. برای هر نور تک رنگ مشخص، این پارامترها به شرایط محیطی مانند دما و فشار بستگی دارند.

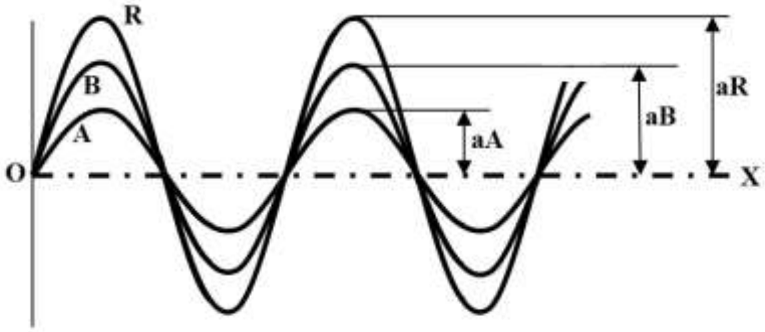
در بسیاری موارد مهندسین از نور سفید استفاده می کنند. این نور متشکل از رنگهایی است که در محدوده طیف مرئی قرار دارند. به همین علت نور سفید منبع مناسبی برای تداخل سنجی خواهد بود. جدول زیر، مقدار تقریبی طول موج رنگهای موجود در طیف مرئی را نشان می دهد. با توجه به این جدول روشن است که نمی توان برای هر رنگ یک طول موج دقیق معین نمود بلکه محدوده ای به عنوان محدوده طول موج ارائه می گردد. به همین دلیل است که بعضی از منابع نور برای اندازه گیری طول قابل استفاده نیست. در مسائل، معمولاً از یک طول موج متوسط به عنوان طول موج نور سفید استفاده می شود که مقدار تقریبی آن ۰/۵µm می باشد. این مقدار به اندازه کافی دقیق است و در نتیجه می توان آن را به عنوان یک استاندارد طول قبول کرد. عدم تعیین دقیق طول موج رنگهای اصلی، مهمترین دلیل تلاش فیزیک دانان طی سالیان متمادی برای یافتن نور تک رنگ خالص بود؛ نوری که علاوه بر ارائه دقت مطلوب قابل تولید نیز باشد (مانند پرتو نور جیوه ۱۹۸ یا کریپتون ۸۶).

رنگ	محدودهٔ طول موج (میکرو متر µm)
بنفش	**۰/۳۹۶-۰/۴۲۳**
آبی	**۰/۴۲۳-۰/۴۹۰**
سبز	**۰/۴۹۰-۰/۵۷۵**
زرد	**۰/۵۷۵-۰/۶۰۰**
نارنجی	**۰/۶۰۰-۰/۶۴۳**
قرمز	**۰/۶۴۳-۰/۶۹۸**

پرتوهای تک رنگ

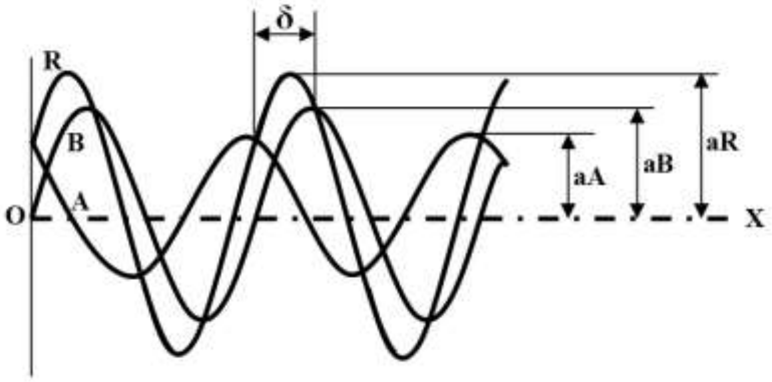
یک پرتو نور تک رنگ، ترکیبی از تعداد نامتناهی امواج با طول موج یکسان است که طول موج، رنگ هر موج را مشخص می کند. در ادامه به بررسی تداخل دو پرتو نور تک رنگ با طول موج یکسان می پردازیم. عمل تداخل می تواند به دو شکل باشد :

الف)اگر دو پرتو A وB هم فاز باشند و هر دو از نقطه O شروع شوند دامنه نوسان بر آیند، عبارت است از $a_R = a_A + a_B$ (شکل۲-۲).



شکل ۲-۲)a_R دامنه برآیند دو موج هم فاز A و B با دامنه های متفاوت a_A و a_B می باشد.

حال اگر اختلاف فازی برابر δ بین A و B ایجاد شود عمل تداخل به صورتی که در شکل۳-۲ نمایش داده شده انجام خواهد گرفت.



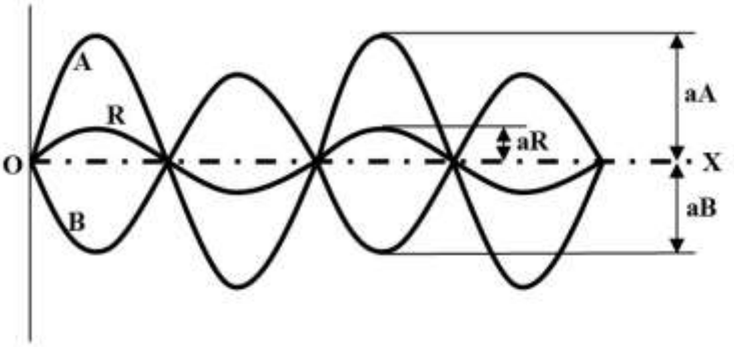
شکل۳-۲)دامنه برآیند a_R برای دو موج A و B با دامنه های a_A و a_B که به میزان δ اختلاف فاز دارند.

اگر $a_A = a_B$, A,B هم فاز باشند $a_R = 2 \times a \times \cos(\frac{\delta}{2})$ که از مقدار Max کمتر است.

در نهایت اگر اختلاف فاز بین آنها به صورتی که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است به اندازه ۱۸۰ درجه یا $\lambda/2$ باشد $a_R = a_A - a_B$ و a_R مقدار Min خواهد بود و در صورتی که $a_A = a_B$

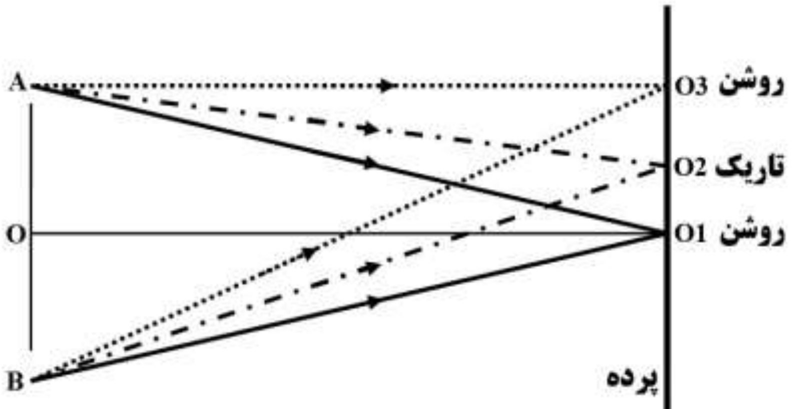
آنگاه $a_R = 0$ که در این حالت چشم، نوری را احساس نمی کند و یک نوار تاریک دیده می شود.

لازم به ذکر است که جابجایی δ، به صورت خطی تغییر می کند و تداخل Max بین دو موج زمانی اتفاق می افتد که $\delta = \lambda/2$.



شکل۴-۲) دامنه برآیند a_R برای دو موج A و B با دامنه های a_A و a_B که نصف طول موج (۱۸۰ درجه) اختلاف فاز دارند.

تداخل دو موج هم فاز A و B که از دو منبع مشابه تولید می شوند را می توان به صورت نشان داده شده در شکل ۵-۲ نیز شرح داد.



شکل۵-۲)تشکیل نوارهای تاریک و روشن پی در پی روی یک پرده-علت تشکیل این نوارها آن است که امواج حاصل از دو منبع A و B مسیرهای متفاوتی را طی می کنند.

پرده ای را در نظر می گیریم که خط OO۱ بر آن عمود است و دو منبع نور همسان و هم فاز A و B در مقابل آن قرار دارند. O وسط A و B است. حال اگر تداخل در نقطهٔ O۱ را بررسی

نماییم روشن است که $AO_1 = BO_1$ بنابراین دو پرتو A و B در نقطه O۱ نیز هم فاز هستند. این حالت به شکل ۲-۲ شباهت دارد. در این نقطه دامنه نوسان دو موج با هم جمع و یک نوار روشن ایجاد می شود که چشم آن را حس می کند. در نقطه O۲ فاصله AO۲ کوچکتر از BO۲ است و داریم : $BO_2 - AO_2 = (2n+1)\times(\lambda/2)$ که n یک عدد صحیح است. پس موج به اندازه ۱۸۰ درجه می چرخد (خارج از فاز). در این حالت دامنه کم می شود یا به صفر می رسد در نتیجه یک نوار تاریک حاصل می گردد. اگر نقطه ای دیگر مانند O۳ را بررسی کنیم داریم : $BO_3 - AO_3 = 2n\times(\lambda/2)$ که در این حالت دامنه ها با هم جمع می شود و در نتیجه یک نوار روشن حاصل می گردد. به این ترتیب می توان گفت در حالتی که نوار تاریک تشکیل می گردد تفاوت مسیر طی شده دو موج A و B تا O۲ مضرب فردی از نصف طول موج است و در حالتی که نوار روشن ایجاد می گردد این تفاوت، مضرب زوجی از نصف طول موج می باشد. توجه نمایید که تداخل زمانی بوجود می آید که منابع نور A و B یکسان باشند. برای این کار در مقابل یک منبع نور دو شکاف A و B قرار می دهند که در نتیجه دو پرتو یکسان به دست می آید. بنابراین به طور خلاصه در تداخل امواج موارد زیر برقرار است :

الف)نور تولید شده از یک منبع به دو جزء یا پرتو تقسیم می گردد.

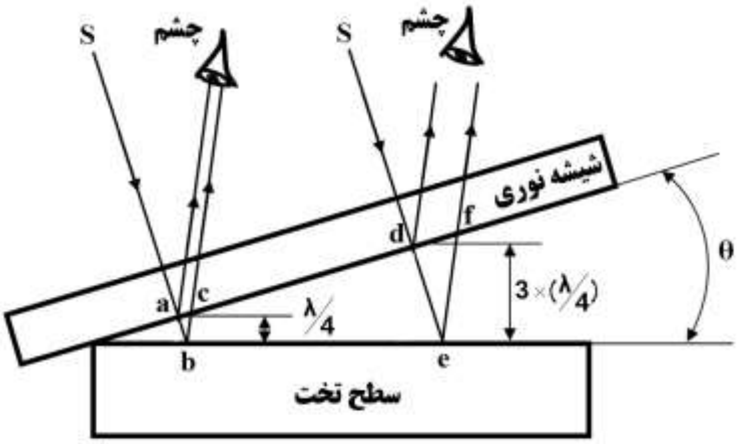
ب)هر پرتو باید مسیری را تا رسیدن به پرده طی کند که تفاوت این مسیرها مضرب عددی در نصف طول موج می باشد.

کاربرد تداخل سنجی در آزمایش تخت بودن سطح

یکی از مسائل مهندسی دقیق که بطور متناوب با آن مواجه می شویم تولید سطوح تخت با مساحت نسبتاً کوچک است. چنین سطوحی طبیعتاً به وسیله سنگ زنی و صیقل کاری سایشی متناوب تولید می گردد تا سطحی با درجه تختی و پرداخت بالا به دست آید. یکی از رضایت بخشترین و مناسبترین روشها برای آزمایش تختی چنین سطوحی، استفاده از پدیده تداخل نور و کاربرد شیشه های نوری به عنوان اندازه گیری های (سنجه های) مرجع می باشد.

شیشه نوری، دیسکی از شیشه تنش گیری شده یا از جنس کوارتز است که هر دو طرف آن تخت، صیقلی و پولیش می گردد. درجه تختی آن بالاتر از سطوحی است که در مهندسی با آن

مواجه می شویم به همین دلیل شیشه های نوری می توانند به عنوان یک مرجع برای سنجش یا مقایسه تختی سطوح بکار روند. شیشه های نوری از قطر ۲۵ تا ۳۰۰ میلی متر ساخته می شود و بزرگترین آنها در حدود ۵۰ میلی متر ضخامت دارد. شیشه های نوری نسبتاً سخت هستند و تنش گیری می شوند. کاربرد درست و مراقبت از این وسائل موجب می گردد که قابلیت اثرپذیری آنها در برابر نور تقریباً نامحدود گردد. اگر یک شیشه نوری را به صورت طبیعی و بدون اعمال هیچ فشاری بروی سطح یک قطعه تخت که می تواند نور را منعکس کند قرار دهیم تماس آنها کاملاً افقی نخواهد بود (شکل ۶-۲) بلکه نسبت به یکدیگر تحت زاویه θ قرار می گیرند و یک لایه هوا بین سطح آنها ایجاد می شود (θ در شکل ۶-۲ اغراق آمیز در نظر گرفته شده است).



شکل۶-۲) شکل گیری نوارهای تداخلی حاصل از پرتوهای موازی یک نور تک رنگ بروی یک سطح تخت به کمک شیشه نوری.

اگر این سیستم تحت تابش پرتوهای موازی یک نور تک رنگ قرار گیرد قسمتی از موج تولید شده از منبع S در نقطه a منعکس می گردد و قسمتی دیگر در امتداد لایه هوا به b منتقل و در این نقطه منعکس می شود (b نقطه ای بروی سطح قطعه کار است). دو پرتو منعکس شده جمع و در چشم دوباره ترکیب می شوند. ولی مسیرهای طی شده به وسیله دو پرتو به اندازه abc تفاوت دارد. اگر $abc = \lambda/2$ (که λ طول موج منبع نور است) آنگاه شرایط برای تداخل کامل رضایت بخش است به این معنی که پرتو تابیده شده از منبع S به دو بخش تقسیم و منعکس می گردد. همچنین این دو پرتو به اندازه نصف طول موج نور با هم اختلاف فاز دارند.

اگر به شیشه نوری، عمودی نگاه کنیم یک خط مستقیم یا یک نوار تداخلی (ناحیه تاریک-م) دیده می شود. در امتداد سطح، نقاط d و e وجود دارد که مشابه نقاط a وb هستند. در اینجا طول مسیر طی شده به وسیله دو پرتو به اندازهٔ def تفاوت دارد. اگر $def = 3\lambda/2$ باشد دوباره تداخل صورت می گیرد و نوار تداخلی (ناحیه تاریک-م) دیگری دیده خواهد شد.

در نقاطی که اختلاف مسیر برابر حاصل ضرب یک عدد زوج در نصف طول موج است دو جزء منعکس شده هم فاز هستند و یک نوار روشن در آن نقطه دیده خواهد شد. بنابراین سطحی متشکل از نوارهای تاریک و روشن پدید می آید که به صورت نوارهای مستقیم خواهد بود. برای سطح تخت، نوارهای تداخلی بصورت نشان داده شده در شکل ۷-۲ تشکیل می شود.

شکل۷-۲) نوارهای تداخلی حاصل از پرتوهای موازی نور تک رنگ که بروی یک سطح تخت ایجاد و از طریق شیشه نوری دیده می شود.

اگر سطح شیشه نوری به اندازه زاویه θ منحرف شود، در سنجش تخت بودن سطح خطا پدید می آید.

دوباره به شکل ۶-۲ باز می گردیم. اگر θ کوچک باشد (که باید چنین باشد) داریم :

$$ab = bc = \lambda/4, de = ef = 3\lambda/4$$

فاصله شیشه نوری و سطح تخت از نقطهٔ b تا e برابر با تفاضل de و ab است :

$$de - ab = 3\lambda/4 - \lambda/4 = \lambda/2$$

پس فاصله شیشه نوری از سطح تخت برابر با نصف طول موج نور است. اگر θ افزایش یابد نوارهای تاریک و روشن به هم نزدیک می شوند و برعکس با کاهش θ سطح شیشهٔ نوری و قطعه کار به موازات هم قرار می گیرند و در نتیجه پهنای نوارها زیاد می شود. عملاً تغییرات θبسیار کوچک است چرا که اگر θ را بزرگ در نظر بگیریم نوارها به یکدیگر نزدیک و در

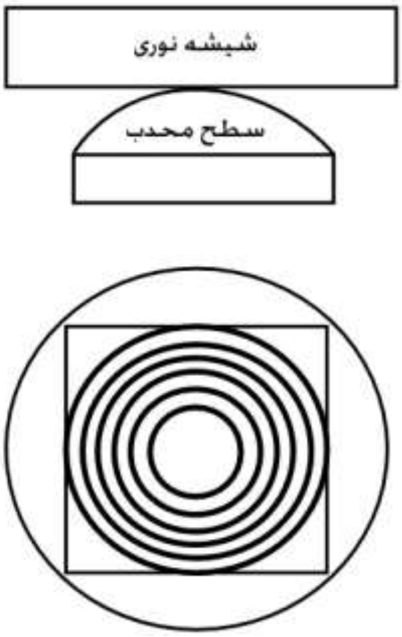
نتیجه غیر قابل تشخیص می شوند. هم چنین اگر θ را خیلی کوچک کنیم (سطح شیشه نوری را به سطح قطعه کار فشار دهیم) هوای موجود بین سطوح از بین می رود و هیچ نواری مشاهده نخواهد شد.

در عمل زاویه θ آن قدر که در شکل ۶-۲ نشان داده شده است، بزرگ نیست و معمولاً تماس در چند نقطه یا چند خط صورت می گیرد. شکل۸-۲ نمونه ای را نشان می دهد که در آن سطح قطعه کار محدب است و قطعه کار با شیشه نوری در نقطه مرکزی با بلندترین ارتفاع تماس می یابد. به همین علت نوارهای تاریک و روشن به صورت دوایری به مرکز نقطه تماس تشکیل می شود. هر نوار، نمایش دهندهٔ مجموعه نقاطی است که از سطح کار به یک ارتفاع هستند. مقدار اختلاف ارتفاع بین نقاط مختلف برابر با **$\lambda/2$** است و اختلاف ارتفاع کل از نقطه تماس برابر است با :

$$n\times\lambda/2$$

λ : طول موج نور مورد استفاده

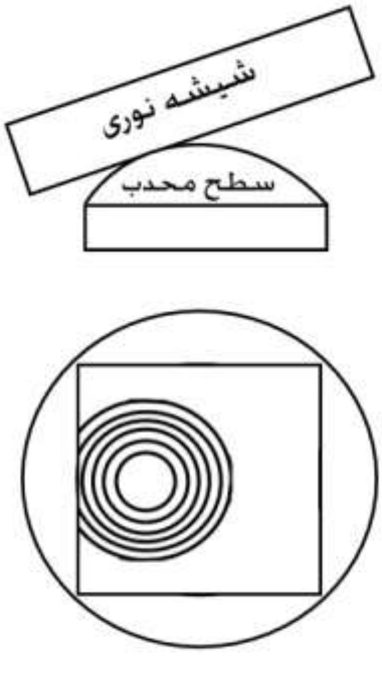
n : تعداد نوارهای مشاهده شده



شکل۸-۲) نوارهای نمونه تولید شده بر روی یک سطح محدب توجه شود که با افزایش زاویه بین سطوح کار و سطح شیشه فوراً نوار ها باریک تر شده و به هم نزدیک می شوند.

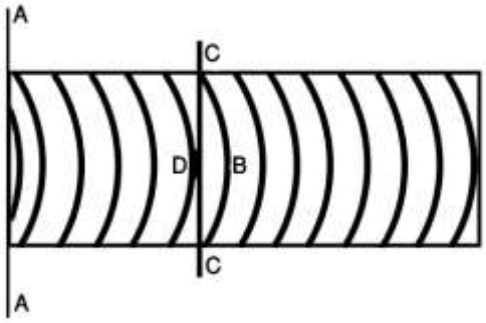
روشن است که نوارهای مشاهده شده وقتی سطح کار محدب است با زمانی که سطح کار مقعر است یکسان می باشد. برای تشخیص این دو حالت، چنان چه سطح محدب باشد و یک گوشه از شیشه نوری را به آرامی فشار دهیم تمامی نوارها به آن سمت متمایل می شوند و مرکز دوایر از وضعیت اولیه خود جابه جا می گردد و نوارهای خارجی تر به هم نزدیک می شوند (شکل ۹-۲). اما اگر سطح مقعر باشد با فشردن گوشه شیشه نوری، در شکل نوارها تغییری ایجاد نمی شود چرا که شیشه نوری با سطح قطعه کار تماس نقطه ای ندارد بلکه بروی خطوطی گرداگرد صفحه قطعه کار با آن تماس می یابد. بنابراین برای تشخیص سطح مقعر کافی است به آرامی مرکز شیشه نوری را بفشاریم که در نهایت دوایر تولید شده به یکدیگر نزدیک تر می شوند و در نتیجه از تعداد آن کاسته خواهد شد.

عموماً شیشه های نوری را در نور طبیعی که دارای طول موج تقریبی ۰/۵ µm است به کار می برند. بنابراین اختلاف ارتفاع بین نقاط تشکیل دهندهٔ هر دو نوار مجاور به اندازهٔ $\lambda/2$ یا ۰/۲۵µm خواهد بود.



شکل ۹-۲)روش آزمایش محدب یا مقعر بودن سطح

نوار های تشکیل شده همانند شکل ۱۰-۲ می باشد.



شکل۱۰-۲) نوارهای تولید شده بروی سطحی
که مرکز آن به اندازه نصف طول موج از لبه هایش بلندتر است.

فرض کنید که نقطه یا خط تماس در AA باشد. در اینجا یادآوری می کنیم که تمام نقاط هم ارتفاع نسبت به سطح شیشه نوری بروی یک نوار تاریک و روشن قرار می گیرد. بنابراین نوارهای نمایش داده شده در حقیقت نقشه ای از سطح تحت آزمایش است و فاصله بین هر نوار، نشان دهنده مقدار اختلاف ارتفاع از سطح شیشه نوری است که مقدار این اختلاف ارتفاع $\lambda/2$ است. در شکل ۱۰-۲ نقطه C به همان اندازه نقطه B از شیشه نوری فاصله دارد ولی به اندازۀ $\lambda/2$ دورتر یا نزدیک تر از نقطه D قرار دارد. بنابراین سطح قطعه کار در C به اندازۀ $\lambda/2$ بلندتریا (کوتاهتر) از سطح در نقطه D است. اگر انحنای نوار به سوی خط تماس یعنی AA باشد سطح کار محدب است و برعکس.

برای تشخیص درست سطح قطعات تولید شده، باید نحوه بکارگیری شیشه های نوری را تمرین کرد.

همچنین هنگام کاربرد آنها باید به نکات زیر توجه داشت :

۱)همیشه شیشه های نوری را به دقت و به تعداد کم جابه جا کنید.

۲)مطمئن شوید که سطح قطعه کار و شیشه نوری کاملاً تمیز باشد. در صورت لزوم آنها را با چرم مخصوص یا پارچه ای که سازنده پیشنهاد داده است خشک و پاک کنید.

۳)هرگز شیشه نوری را به سطح کار نفشارید بلکه آن را آرام بروی قطعه کار قرار دهید ضمناً کج بودن شیشه نوری باعث می شود نوارهای تاریک و روشن نادرستی تولید گردد.

۴)هیچ وقت دو شیشه نوری را به هم نفشارید چرا که جدا کردن آنها مشکل است و امکان دارد هنگام جداسازی سطح آنها خراشیده و خراب شود.

تداخل سنجها (اینتر فرومترها)

شیشه های نوری را می توان در نور روز یا بهتر از آن، در یک منبع انتشار نور تک رنگ شامل یک لامپ تخلیه سدیم که در مقابل یک صافی (فیلتر) زرد رنگ قرار دارد به کار برد. با این وجود گاهی استفاده از شیشه های نوری برای کارهای دقیق با مشکلات زیر همراه است :

۱) بیشتر مواقع، کنترل شیشه نوری بروی قطعه کار مشکل است و از طرفی با کج شدن شیشه نوری دقت نوارهای تولید شده کاهش می یابد.

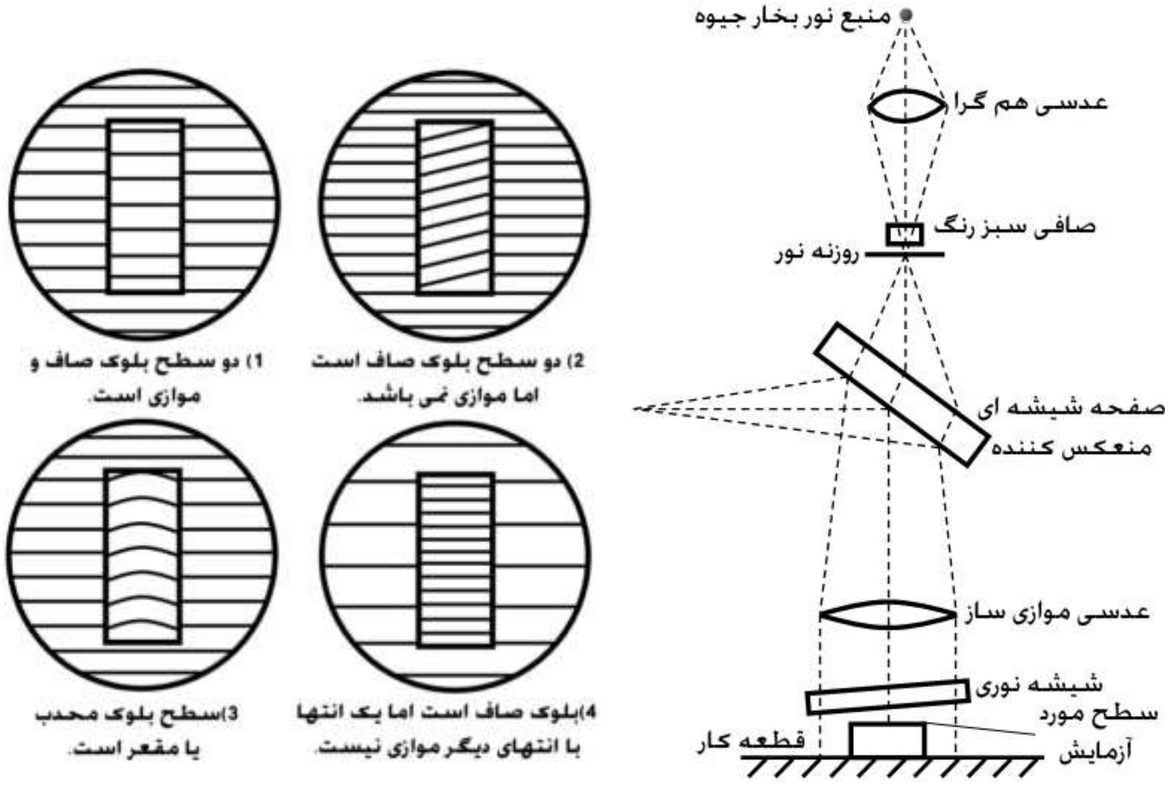
۲)نوارها دقیقاً از بالا و در راستای قائم دیده نمی شوند و کج بودن راستای دید باعث خطا خواهد شد.

این مشکلات با به کار گیری وسائل نوری به نام تداخل سنجها بر طرف می شود. در اینجا دو نوع از آنها شرح داده می شود. نوع اول برای اندازه گیری تختی سطح و نوع دوم جهت کنترل میزان خطای طول بلوکهای اندازه گیری با استفاده از طول موج نور به کار می رود.

تداخل سنج .N.P.L (آزمایشگاه ملی فیزیک) برای تعیین میزان صافی سطح

این وسیله به صورت شماتیک در شکل ۱۱-۲ دیده می شود. این تداخل سنج به وسیله آزمایشگاه ملی فیزیک (National physical laboratory=N.P.L) طراحی و به صورت تجاری توسط شرکت Corentry Gauge and Tool ساخته شده است. این تداخل سنج شامل یک منبع نور بخار جیوه است که از صافی سبز عبور می کند. بنابراین نورهای دیگر جذب می شود و فقط نور سبز با طول موج نزدیک بهμm ۰/۵ عبور می نماید. سپس نور از روزنه ای می گذرد تا منبع نور نقطه ای تولید شود. نور حاصل از چنین منبعی با عبور از عدسی موازی ساز به پرتو موازی تبدیل می شود و مستقیماً به طرف شیشه نوری و قطعه کار تحت آزمایش گسیل می گردد. پس از انجام تداخل نوری و تشکیل نوارهای تاریک و روشن در سرتاسر قطعه کار، تصویر این نوارها دقیقاً از بالای آنها به وسیله یک شیشه منعکس کننده که

تحت زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق قرار دارد به طرف چشم منتقل می شود. برای این که نوارهای تداخلی به بهترین شکل ممکن ایجاد شود باید وضعیت قطعه تحت آزمایش را تغییر داد به همین دلیل سطح مبنای دستگاه که قطعه کار بروی آن قرار می گیرد یک سه پایهٔ قابل چرخش درجه بندی شده است.



شکل ۱۱-۲) ساختمان تداخل سنج برای آزمایش تختی سطح (با اجازه چاپ از N.P.L)

مزیت تداخل سنج آزمایشگاه ملی فیزیک، تعیین موازی بودن سطوح بلوکهای اندازه گیری است. برای این کار دو روش کاربرد دارد :

۱) روش بررسی بلوکهای اندازه گیری با طول کمتر از ۲۵ mm

در این حالت نوارهای تداخلی هم بروی سطح مبنا و هم بروی بلوک مورد بررسی، تولید می شود. اگر فاصله بین نوارهای تولید شده بروی بلوک با نوارهای ایجاد شده بروی سطح مبنا برابر و به موازات یکدیگر بودند سطوح بالایی و پایینی بلوک نیز با هم موازی می باشند.

۲) روش بررسی بلوکهای اندازه گیری با طول بیشتر از ۲۵mm

در این روش دیدن نوارهای تشکیل شده بروی سطح مبنا به علت بزرگ بودن بلوک مورد بررسی، مشکل است. با توجه به این که سطح پایینی بلوک بروی سطح مبنا تکیه دارد، اگر بلوک تخت نباشد سطح بالایی آن انحراف می یابد و با شیشه نوری زاویه ای می سازد (شکل(a) ۱۲-۲). از آن جا که سطح مبنا قابل چرخش است می توان آن را ۱۸۰ درجه دوران داد. در این صورت زاویه انحراف افزایش می یابد (شکل (b) ۱۲-۲) و تعداد نوارهای تداخلی بیشتری قابل مشاهده خواهد بود. برای بلوک اندازه گیری نشان داده شده در شکل۱۲-۲ در حالت اول ۱۰ نوار و در حالت دوم ۱۸ نوار مشاهده می گردد. در حالت اول (شکلa-۱۲-۲) فاصلهٔ بین بلوک و شیشه نوری δ_1 و در حالت دوم (شکل b-۱۲-۲) این فاصله δ_2 می باشد.

همانطور که در بخش ۴-۲ توضیح داده شد اختلاف ارتفاع کل در حالت اول برابر است با :

$$\delta_1 = n_1 \times \lambda/2 = 10 \times \lambda/2$$

و اختلاف ارتفاع کل در حالت دوم :

$$\delta_2 = n_2 \times \lambda/2 = 18 \times \lambda/2$$

پس اختلاف ارتفاع یا مقدار خطا برابر است با :

$$\delta_1 - \delta_2 = 8 \times \lambda/2$$

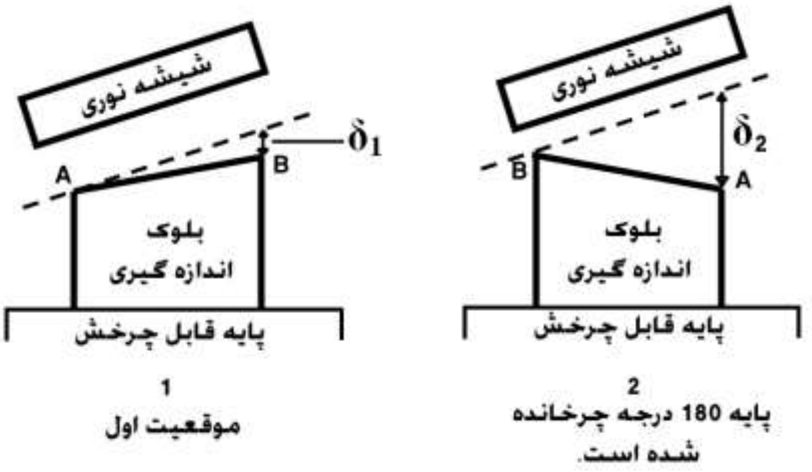
با توجه به این که سطح مبنا ۱۸۰ درجه دوران داده می شود مقدار خطا یا انحراف از توازی، نصف این مقدار می باشد :

$$\frac{\delta_1 - \delta_2}{2} = \frac{8}{2} \times \frac{\lambda}{2} = 4 \times \frac{\lambda}{2}$$

اگر مقدار طول موج ۰/۵ میکرومتر باشد، خطای توازی سطوح مورد آزمایش برابر است با :

$$\frac{\delta_1 - \delta_2}{2} = 4 \times \frac{\lambda}{2} = \frac{4 \times 0.5}{2} = 1\ \mu m$$

یعنی اگر نقطه B به اندازه یک میکرومتر پایین آورده شود، سطوح موازی خواهند شد.

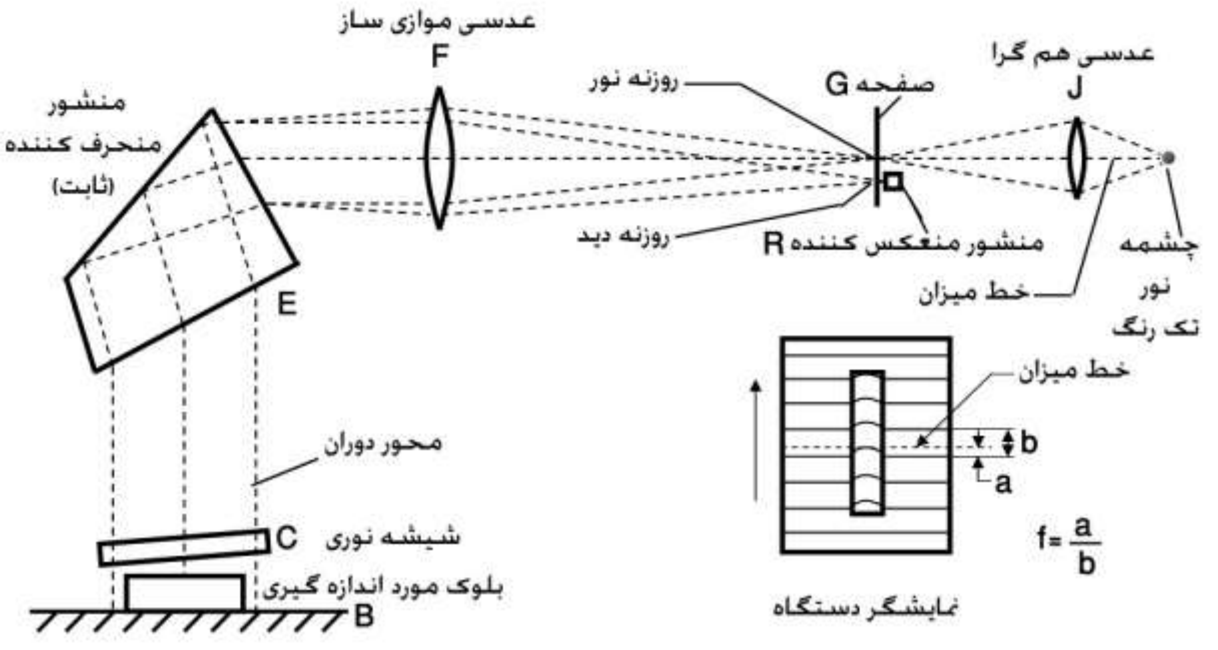


شکل ۱۲-۲) آزمایش توازی سطوح بلوک با طول بیشتر از ۲۵ mm
بوسیله تداخل سنج صافی سطح

تداخل سنج Pitter-N.P.L

کاربرد واحدهای فرعی طول به خصوص هنگامی که ابعاد کوچک بررسی می گردد مشکل و با خطا همراه است. به همین دلیل استفاده از این واحدها در راستای استاندارد : B.S. ۸۸۸ ۱۹۵۰ (که کاربرد آن تنها برای بلوکهایی با طول کمتر از ۵۰ میلی متر می باشد) و با ظهور روشهای تداخل سنجی جهت کالیبره کردن بلوکهای اندازه گیری کنار گذاشته شد.
تداخل سنج Pitter-N.P.L یکی از تداخل سنجهای شناخته شده ای است که عمل اندازه گیری را به طور مستقیم انجام می دهد و به وسیله آزمایشگاه ملی فیزیک طراحی شده است. طرح شماتیک آن در شکل ۱۳-۲ دیده می شود. در این شکل، تصویری که در عدسی چشمی مشاهده می گردد نیز نشان داده شده است. منبع نور، لامپ سدیم است که عدسی هم گرای J پرتو حاصل از آن را در روزنه G جمع می کند و در نتیجه منبع نور نقطه ای ایجاد می شود. پرتو حاصل به طرف عدسی موازی ساز F گسیل می گردد و وارد منشور E می شود. شکل خاص این منشور باعث می گردد که پرتو ها به اندازه ۹۰ درجه به طرف شیشه نوری C دوران کنند. صفحه پایینی منشور به وسیله یک ماده نیمه منعکس کننده از آلومینیم پوشیده شده است و بخش مساوی از پرتوهای تابیده شده را به طرف بالا منعکس می کند اما بخش دیگری را به طرف شیشه نوری C عبور می دهد. پرتوی که از شیشه نوری C می گذرد به سطح بالای

بلوک اندازه گیری و صفحه مبنای B برخورد می کند. نور منعکس شده از روی هر کدام از این سطوح باز می گردد و پس از برخورد به منشور منعکس کننده R به میزان ۹۰ درجه به طرف عدسی سر دوربین و به محلی که چشم قرار دارد می چرخد.



شکل ۱۳-۲) سیستم نوری تداخل سنج Pitter-N.P.L از صفر تا ۱۰۰ میلی متر برای اندازه گیری خطا در بلوکهای اندازه گیری (با اجازه چاپ از N.P.L)

به این ترتیب نوارهای تداخلی تشکیل می شود که تعدادی از آنها بر اثر انعکاس از روی سطح مبنای B تولید می گردد. بروی این نوارها، نوارهای دیگری تشکیل می شود که در اثر انعکاس نور از روی سطح بالایی بلوک اندازه گیری که بروی سطح مبنا قرار گرفته است ایجاد شده است.

معمولاً مجموعه نوارهای تداخلی تشکیل شده به اندازه a از خط میزان، جابجا می گردد. مقدار جابجایی a به نوع رنگ و در نتیجه طول موج نور تجزیه شده (به وسیله منشور منحرف کننده) بستگی دارد. مقدار جابجایی a به صورت کسری از پهنای نوارها یعنیb نشان داده می شود. ($f = a/b$) تنها کافی است مقدار f برآورد شود. f برای ۴ پرتو حاصل از لامپ سدیم (قرمز، سبز، آبی و بنفش) که حاصل از تجزیه در منشور منحرف کننده هستند تعیین شده است. از

آنجا که خط میزان، منطبق بر نوارهای تداخلی تشکیل شده بروی سطح بلوک است می توان گفت که فاصله بین هر نوار بوجود آمده بروی سطح بلوک و نوار مشابه آن که بروی سطح مبنا تشکیل شده است a می باشد. شکل (b-۱۳-۲) به وضوح این مطلب را نشان می دهد.

روش اندازه گیری

به هنگام اندازه گیری، نکته مهم آن است که شرایط فیزیکی محیط در شرایط استاندارد تنظیم گردد یعنی دما ۲۰ درجه سانتی گراد، فشار هوا ۷۶۰ mmHg، فشار بخار آب ۷ mmHg و مقدار Co_2 موجود در هوا ۰/۰۳ درصد باشد. در صورت تغییر هر یک از این مقادیر باید هنگام محاسبه مقادیر تصحیح اعمال شود. اکنون به محاسبه خطای یک بلوک اندازه گیری ۳mm می پردازیم. برای این کار از سه طول موج حاصل از پرتو سدیم به قرار زیر استفاده می کنیم :

نور قرمز: در ۱ میلی متر $3106.31180\times\frac{\lambda}{2}$ وجود دارد پس طول موج آن ۰/۶۴۳۸۵۰۳۷ میکرومتر است ($1mm=1000\mu m=3106.31180\times\frac{\lambda}{2}\Rightarrow\lambda=\frac{2\times1000}{3106.31180}=0.64385037\mu m$-م).

نور سبز: در ۱ میلی متر $3932.48064\times\frac{\lambda}{2}$ وجود دارد پس طول موج آن ۰/۵۰۸۵۸۴۸۳ میکرومتر است.

نور بنفش: در ۱ میلی متر $4275.17205\times\frac{\lambda}{2}$ وجود دارد پس طول موج آن۰/۴۶۷۸۱۷۴۳ میکرومتر است.

با توجه به شکل ۱۴-۲ ارتفاع بلوک، مجموع دو مقدار (صحیح-م) $n\times\frac{\lambda}{2}$ و (کسری-م) $\frac{a}{b}\times\frac{\lambda}{2}$ است :

$$H=n\times\frac{\lambda}{2}\quad,\quad h=\frac{a}{b}\times\frac{\lambda}{2}=f\times\frac{\lambda}{2}$$

پس ارتفاع واقعی بلوک برابر است با :

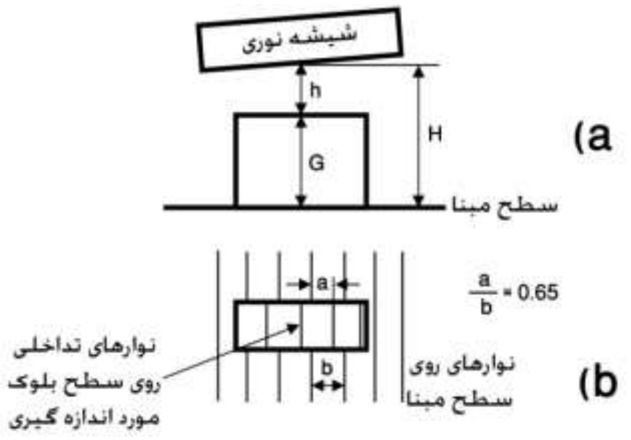
$$G=n\times\frac{\lambda}{2}+f\times\frac{\lambda}{2}=(n+f)\times\frac{\lambda}{2}$$

از آن جا که مقادیر λ، n و f برای هر رنگ (یا طول موج) تفاوت دارد پس :

$$G=(n_1+f_1)\times\frac{\lambda_1}{2}\quad,\quad G=(n_2+f_2)\times\frac{\lambda_2}{2}\quad,\quad G=(n_3+f_3)\times\frac{\lambda_3}{2}$$

اما مقادیر f_1 و f_2 و f_3 همان کسر $\frac{a}{b}$ حاصل از مشاهده می باشند و از طریق محاسبه بدست نیامده اند. اگر G_n ارتفاع اسمی بلوک و N مضرب صحیحی از نصف طول موج و F جابه جایی نوارهای تداخلی برای هر رنگ که از طریق محاسبه تعیین شده است باشند، داریم :

$$G_n = (N_1 + F_1) \times \frac{\lambda_1}{2} \quad , \quad G_n = (N_2 + F_2) \times \frac{\lambda_2}{2} \quad , \quad G_n = (N_3 + F_3) \times \frac{\lambda_3}{2}$$



شکل۱۴-۲) جابجایی بین نوارهای تداخلی بلوک و سطح مبنا

در تداخل سنج نوع Pitter- N.P.L

حال با کم کردن ارتفاع بلوک حاصل از مشاهده، از ارتفاع اسمی بلوک حاصل از محاسبه، میزان انحراف یا خطای اندازه واقعی (G) از اندازه اسمی (G_n) محاسبه می شود :

$$G - G_n = [(n - N) + (f - F)] \times \frac{\lambda}{2}$$

اگر فرض شود که :

$$f_1 = 0.23 \; , \; f_2 = 0.33 \; , \; f_3 = 0.71 \; , \; F_1 = 0.94 \; , \; F_2 = 0.44 \; , \; F_3 = 0.52$$

برای نور قرمز داریم :

$$G-G_n=[(n_1-N_1)+(0.23-0.94)]\times\frac{0.643}{2}=[(n_1-N_1)+(-0.71)]\times\frac{0.643}{2}$$
$$=[(n_1-N_1)+0.29]\times\frac{0.643}{2}$$

توجه نمایید که ۰/۲۹=۰/۷۱-۱

برای نور سبز داریم :

$$G-G_n=[(n_2-N_2)+(0.33-0.44)]\times\frac{0.508}{2}=[(n_2-N_2)+(-0.11)]\times\frac{0.508}{2}$$
$$=[(n_2-N_2)+0.89]\times\frac{0.508}{2}$$

توجه نمایید که ۰/۸۹=۰/۱۱-۱

و برای نور بنفش داریم :

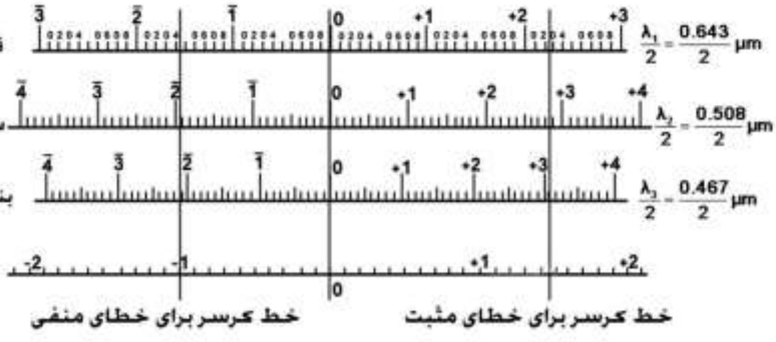
$$G-G_n=[(n_3-N_3)+(0.71-0.52)]\times\frac{0.467}{2}=[(n_3-N_3)+0.19]\times\frac{0.467}{2}$$

اگر چه مقادیر n_1-N_1 و n_2-N_2 و n_3-N_3 مجهول می باشد اما روشن است که اعدادی صحیح و نسبتاً کوچک هستند و می توان آنها را از روش آزمون و خطا پیدا کرد. برای آزمایش بالا چنان چه $n_1-N_1=2$ و $n_2-N_2=2$ و $n_3-N_3=3$ نتیجه مشابه و دقیقی برای هر سه معادله محاسبه می شود (این روشی است که مترولوژیست فرانسوی به نام Benoit برای تعیین n بکار برده است و برای درک بهتر آن خواننده را به کتاب مترولوژی و مهندسی دقیق، نوشته آنتونی اسکار، ترجمه حسین قلیزاده، انتشارات طراح، چاپ اول تابستان ۱۳۸۲، صفحه ۷۸ و ۷۹ ارجاع می دهیم-م). روش بهتر برای حل این مسئله قرار دادن داده ها در یک جدول به شکل زیر است :

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
طول موج (μm)	کسر f	تعداد $\frac{\lambda}{2}$ در ۳ mm	کسر F	ستون۴-ستون۲	انطباق درجات (مقدار درون کروشه)	خطای میانگین در ارتفاع بلوک
قرمز=۰/۶۴۳	۰/۲۳	۹۳۱۸/۹۳۵۴	۰/۹۴	۰/۲۹	۲/۲۹	۱/۴۸ میکرو متر
سبز=۰/۵۰۸	۰/۳۳	۱۱۷۹۷/۴۴۱۹۲	۰/۴۴	۰/۸۹	۲/۸۹	
بنفش=۰/۴۶۷	۰/۷۱	۱۲۸۲۵/۵۱۶۱۵	۰/۵۲	۰/۱۹	۳/۱۹	

(تعداد نصف طول موج در ۱ میلی متر برای هر نور در صفحه ۲۷ داده شده است اما از آن جا که اندازه بلوک ۳ میلی متر است این مقادیر سه برابر و در ستون ۳ ثبت شده است-م)

مقادیر ستون های ۶ و ۷ به وسیله روش انطباق درجات به دست آمده است. این روش ساده ترین راه برای یافتن مضارب صحیح نصف طول موج و مضارب اعشاری نصف طول موج (F) می باشد که در اندازه گیری خطا در بلوک اندازه گیری کاربرد دارد. مقادیری که در ستون ۵ به دست آمده است درجه انطباق دقیقی برای مقادیر ستون ۶ می باشد. در روش انطباق درجات از یک خط کش کشویی (یا خط کش محاسبه که توسط آن سریعتر به جواب می رسیم-م) استفاده می شود (شکل ۱۵-۲).



شکل ۱۵-۲) نمایش درجه بندیهای نصف طول موج بروی خط کش کشویی در تداخل سنج N.P.L

در این خط کش طول موج سه پرتو نور تک رنگ قرمز، سبز و بنفش از یک مبدأ مشترک بروی درجه ها نشان داده شده است. درجه بندی پایین خط کش برابر یک میکرومتر است. از مقادیر ۲/۲۹ و ۲/۸۹ و ۳/۱۹ (حاصل داخل کروشه در فرمول $G-G_n$) که بروی درجه بندی طول پیدا شده اند، یک خط عبور داده می شود. امتداد این خط درجه بندی میکرومتر را در عدد ۱/۴۸mm قطع می کند که همان میزان خطا در ارتفاع بلوک است.

در عمل مشخص شده است که مقادیر f را نمی توان با دقتی بیشتر از ۰/۰۵ پهنای نوار تداخلی خواند. علت این امر وجود اختلاف اعشاری موجود در ستون ۵ است.

از آنجا که خطای خطی بلوک به روش مشاهده حاصل می گردد امکان دارد هنگام مشاهده خطا ایجاد شود. مقدار خطای مشاهده معمولاً کمتر از ۰/۰۲ میکرو متر است و در نتیجه می توان از آن چشم پوشی نمود.

لازم به ذکر است که در خط کش کشویی مقادیر نصف طول موج در طرف منفی درجه بندی $\bar{n}$ هستند نه $-n$ به عبارت دیگر اعداد صحیح می توانند منفی باشند اما کسرها همواره مثبت هستند. اگر در خط کش خط نمایشگر (کِرسِر) سمت چپ قرار گیرد (شکل ۱۵-۲)، برای سه پرتو قرمز، سبز و بنفش جابه جایی به ترتیب عبارت است از :

$$\bar{2}.48 = (-2+0.48) = -1.52 \Rightarrow -1.52\frac{\lambda}{2}$$

$$\bar{2}.09 = (-2+0.09) = -1.91 \Rightarrow -1.91\frac{\lambda}{2}$$

$$\bar{3}.92 = (-3+0.92) = -2.08 \Rightarrow -2.08\frac{\lambda}{2}$$

پس خطای بلوک اندازه گیری برای سه پرتو قرمز، سبز و بنفش به ترتیب برابر است با :

$$-1.52\frac{\lambda}{2} = -1.52\times\frac{0.643}{2} = -0.980\,\mu m$$

$$-1.91\frac{\lambda}{2} = -1.91\times\frac{0.508}{2} = -0.962\,\mu m$$

$$-2.08\frac{\lambda}{2} = -2.08\times\frac{0.467}{2} = -0.975\,\mu m$$

به این ترتیب خطای میانگین، ۰/۹۷۲- میکرومتر می باشد. توجه کنید که از روی درجه بندی نمی توان تا سه رقم اعشار را خواند پس برای یافتن موقعیت انطباق باید از حل تقریبی استفاده کرد. همانطور که نشان داده شد خطای واقعی برای هر طول موج باید محاسبه و سپس مقدار میانگین آنها تعیین گردد. موضوع مهم در این روش اندازه گیری آن است که طول بلوک اندازه گیری بدون مراجعه به استانداردهای فیزیکی و تنها بر حسب طول موج پرتوهای تک رنگ متعدد تعیین می شود.

فصل سوم

اندازه گیری خطی

(Linear Measurement)

مقدمه

در فصلهای گذشته توانستیم بین روشهای اندازه گیری که بر پایه استانداردهای مهندسی طول ایجاد شده بودند و علل استفاده از این قبیل استانداردها ارتباط برقرار کنیم. البته بررسی این ارتباط به علم اندازه گیری مربوط نیست و به طور کامل مربوط به علم فیزیک می باشد. با این همه، ارتباط بین روشهای اندازه گیری و استانداردهای طول از پایه های اندازه گیری خطی است. اندازه گیری خطی، مقایسه قطعه کار با یک اندازه معین مثلاً اندازه یک سنجه مرجع می باشد و به آن اندازه گیری مقایسه ای می گویند. برای انجام موفقیت آمیز اندازه گیری خطی با دقت مورد نظر، اغلب تجهیزات و وسائل نسبتاً ساده ای استفاده می شود اما برای بکارگیری آنها استادی و مهارت لازم است. در اندازه گیری، اصول ساده و مشخصی وجود دارد که همواره باید به آنها توجه نمود. پشتکار، استفاده از روش اندازه گیری مناسب و بکارگیری فنون متعددی که فقط با تمرین به دست می آیند از عوامل مهم در اندازه گیری است. اگر چه در آینده این نکات بهتر تفهیم خواهد شد اما لازم به ذکر است که در اندازه گیری هیچ چیز جانشین تجربه نمی شود.

سنجه های خطا و سنجه های مکعبی شکل

این دو سنجه که از وسایل سودمند سنجش طول در کارهای مهندسی هستند به دلایل متعددی قابل توجه می باشند. جدول صفحه بعد از متن استاندارد B.S ۸۸۸ استخراج شده است و مشخص کننده دقت ابعادی، اندازه ها، صافی و توازی سطوح سنجه های خطا است. البته این جدول تمام مشخصات سنجه های خطا را تعیین نمی کند. در مجموع سنجه های خطا، به علت استفاده از فولاد مناسب جهت ساخت آنها، استحکام بالایی دارند و قابل فشردن به یکدیگر می باشند. علت دیگر این استحکام آن است که سنجه ها به کمک عملیات حرارتی سخت می شوند و رفتار گرمایی آنها ثبات می یابد. این سنجه ها به علت صافی و پرداخت سطوحشان با فشردن، بروی یکدیگر سوار می شوند. هنگامی که دو سنجه به یکدیگر تماس پیدا می کنند نه تنها هوای بین آنها خارج می شود بلکه بین سطوح، جاذبه مولکولی نیز پدیدار می گردد. ایجاد جاذبه مولکولی به کمک این حقیقت قابل نشان دادن است که وقتی دو سنجه

برای مدتی به هم فشرده باقی می مانند جدا کردن آنها مشکل خواهد بود. به همین دلیل نباید سنجه ها برای مدت طولانی به هم فشرده باقی بمانند در غیر این صورت سطوح تماس آنها هنگام جدا کردن آسیب می بیند. عموماً سنجه ها به چهار دسته تقسیم می شوند. هر دسته، دقت معینی دارد و بسته به دقت و نوع کار مورد نیاز استفاده می گردد.

دسته اول سنجه های کارگاهی هستند که برای تمامی مقاصد کارگاهی و محدوده وسیعی از کارهای بازرسی از دقت کافی برخوردار می باشند.

دسته دوم سنجه های بازرسی یا کنترل کیفیت می باشند که به معاینه و بازرسی و تنظیم سنجه ها و همچنین استاندارد کردن کمپراتورها (مقایسه گرها) اختصاص دارند.

دستهٔ سوم سنجه های میزان سازی (کالیبره کردن) می باشند که برای کارهای با دقت بالا مانند بازرسی سنجه های کارگاهی و فرمانها یا سنجه های حدی (limit gauge) استفاده می شوند.

دسته چهام، سنجه های مرجع هستند و همانطور که از نامشان پیدا است فقط زمانی استفاده می شوند که دقت سنجه های دیگر مشکوک به نظر می رسد و احتیاج به بررسی و بازرسی دارند. این سنجه ها در دستگاهها و وسایل بازرسی آخرین ملاک بازرسی محسوب می شوند.

عموماً عمل میزان سازی (کالیبره کردن) به وسیلهٔ سازنده دستگاه انجام می شود. البته سازمانهای معتبر دیگری مانند آزمایشگاه ملی فیزیک نیز این کار را انجام می دهند. برای میزان سازی از روشهای تداخل سنجی شرح داده شده در فصل ۲ استفاده می گردد.

در جدول ۳-۱ بیشترین خطای مجاز در طول، تختی سطح و توازی برای هر گروه از سنجه ها داده شده است. هر جا که دقت کار ایجاب کند باید از سنجه های میزان سازی شده استفاده گردد. معمولاً برای هر گروه از سنجه های خطا، محافظهایی تا ضخامت ۱ mm از جنس تنگستن تهیه می گردد. ترکیب سنجه ها باید به نحوی باشد که از ایجاد فرسودگی زائد در آنها جلوگیری شود.

جدول ۳-۱

اندازه سنجه M	بیشترین خطای مجاز (تا ۰/۰۰۰۱ میکرومتر)											
	گروه مرجع			گروه میزان سازی			گروه کنترل کیفیت			گروه کارگاهی		
	P	F	L	P	F	L	P	F	L	P	F	L
$M \geq 25\,mm$	۸	۸	±۵	۸	۸	±۱۲	۱۰	۱۰	+۲۰ -۱۰	۲۵	۲۵	+۲۵ -۱۰
$M = 30,40,50\,mm$	۱۰	۸	±۱۰	۱۰	۸	±۲۵	۱۰	۱۰	+۲۵ -۱۰	۲۵	۲۵	+۵۰ -۲۵
$M = 75\,mm$	۱۸	۱۰	±۱۵	۱۸	۱۰	±۴۰	۲۰	۲۰	+۴۰ -۲۰	۴۰	۲۵	+۷۵ -۴۰
$M = 100\,mm$	۱۸	۱۰	±۲۰	۱۸	۱۰	±۵۰	۲۰	۲۰	+۵۰ -۲۵	۴۰	۲۵	+۱۰۰ -۵۰

L = طول، F = تختی سطح و P = توازی

سنجه های میله ای شکل طول

طرح کامل این سنجه ها در استاندارد B.S ۱۷۹۰ (استاندارد انگلیسی سال ۱۷۹۰) در چهار گروه از دقت (کارگاهی، بازرسی، میزان سازی و مرجع) ارائه شد. هدف از کاربرد آنها مشابه سنجه های خطا است اما از سنجه های میله ای برای سنجش قطعه کارهای با طول بیشتر استفاده می گردد. به همین دلیل سنجه های میله ای، کمتر در کارهای مهندسی با دقت متوسط و شرکتهای بازرسی استفاده می شوند. سطوح انتهایی هر یک از میله ها صیقل داده شده است اما نمی توان آنها را از این سطوح بروی هم فشرد.

انتهای سنجه های میله ای (به جز آنهایی که ۲۵mm طول دارند) بطور داخلی رزوه تراشی می شود تا بتوان برای اتصال مطمئن آنها به یکدیگر از پیچهایی که دو سر آنها رزوه شده است استفاده کرد.

بهترین شرایط کار با این میله ها، استفاده از آنها بطور عمودی است چرا که وقتی به صورت افقی بکار می روند باید بروی دو نقطه اتکا که فاصلهٔ آنها از انتهای سنجه ((طول میله × ۰/۵۷۷)) است، قرار گیرند (شکل (a) ۲-۱-فصل اول).

دقت سنجه های خطا و سنجه های میله ای باید به وسیله یک شرکت مهندسی معتبر تعیین گردد. البته تعیین دقت باید در دوره های زمانی معین و بطور منظم تکرار شود. برای تعیین دقت سنجه ها لازم نیست که در هر شرکت حتماً یک تداخل سنج طول به عنوان مرجع تعیین دقت سنجه ها وجود داشته باشد بلکه شرکتهای معتبری مانند آزمایشگاه ملی فیزیک این کار را انجام می دهند. به کمک آزمایش، خطای طول در هر سنجه مشخص می گردد. همچنین میزان خطای توازی و تختی سطوح آنها نیز تعیین و ارائه می شود.

چنین سنجه هایی به عنوان استانداردهای مرجع قابل قبول هستند و به کمک آنها و با کاربرد یک کمپراتور (مقایسه گر) با بزرگنمایی بالا و قابلیت مناسب و همچنین تکرار در خواندن مقادیر قرائت شده می توان گروه دوم سنجه ها یعنی سنجه های بازرسی را که در شرکتهای کنترل کیفیت کاربرد دارند میزان (کالیبره) کرد. به روش مشابه می توان سنجه های کارگاهی را نیز میزان سازی نمود. به این ترتیب بین دقت قطعه کار و استانداردهای طول نسبت مستقیمی برقرار می گردد و سنجه مرجع، دیگر سنجه ها و قطعه کار را میزان می کند. شکل ۱-۳ این ارتباط را نشان می دهد.

نخستین استاندارد طول : متر که به وسیله تداخل سنجی تعیین می شود.

⇕

دومین استاندارد : زیر استانداردهای متر که به وسیله تداخل سنجی تعیین می شود.

⇕

سنجه های خطای مرجع یا میزان سازی که دقت آنها به وسیلهٔ تداخل سنجی تعیین می شود.

⇕

سنجه های خطای کنترل کیفیت که دقت آنها به وسیله مقایسه گر با بزرگنمایی بالا تعیین می شود.

⇕

سنجه های خطای کارگاهی که دقت آنها به وسیله مقایسه گر با بزرگ نمایی بالا تعیین می شود.

⇕

دقت قطعه کار که به وسیله روش اندازه گیری مناسب تعیین می شود.

شکل۱-۳

لازم به ذکر است که رسیدگی و تحقیق در مورد سنجه ها باید تحت شرایط مناسب فیزیکی انجام شود. سنجه های مرجع باید همواره در اتاقهای استاندارد قرار داده شوند به طوری که در محیطی آرام و بدون لرزش قرار گیرند. دمای $\pm 20^{oC}$ دمای مطلوب است که با کنترل میزان رطوبت هوا در ارتباط می باشد. برای محکم کاری با استفاده از صافی (فیلتر) ورودی هوای اتاق، کنترل می گردد تا گرد و خاک وارد نشود و از خرابی لوازم و تجهیزات حساس جلوگیری گردد. تمام کمپراتورها (مقایسه گرها) همواره باید طوری بروی تکیه گاه قرار گیرند که علاوه بر حفظ استحکام، تراز باشند. تحت این شرایط و با به کار گیری فنون اندازه گیری دقیق می توان دقت سنجه ها را به صورت کسری از یک میکرومتر تعیین کرد.

طراحی و بهره برداری از وسایل اندازه گیری خطی

اساس وسائل اندازه گیری، علم سینماتیک است. علم سینماتیک، حرکاتهای نسبی را بدون در نظر گرفتن نیروهای تولید کنندۀ حرکت بررسی می نماید. این حرکتها که گاهی نیاز است در قطعات حذف شوند می توانند مستقیم یا دورانی باشند. تجربه حاصل از طراحی در سالهای متمادی نشان می دهد که اصول سینماتیک باید به دقت پیروی شوند. به همین دلیل ماشین ها و وسائلی که طراحی می گردند باید دارای ویژگی های زیر باشند :

۱) حساسیت زیاد

۲) دقت بالا

۳)عدم وجود واریانس (انحراف)

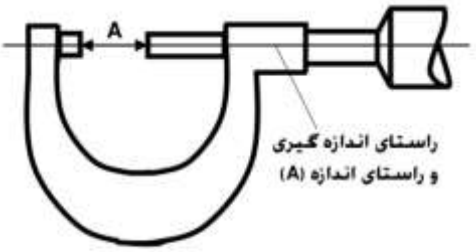
۴)حداقل اینرسی در قسمت های قابل حرکتی که مکانیزم عقربۀ وسیله اندازه گیری را شکل می دهند.

اصل مسیر

علاوه بر این نکات که بوسیلۀ اصول سینماتیک فراهم می شود یک اصل مهم دیگر نیز باید مورد بررسی قرار گیرد. این اصل که به اصل مسیر معروف است می گوید :

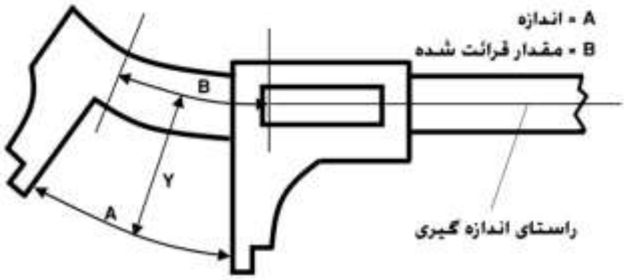
راستای اندازه گیری و راستای اندازه ای که اندازه گیری می گردد باید بر هم منطبق باشند. به عبارت ساده تر قطعۀ مور اندازه گیری و وسیلۀ اندازه گیری باید در یک راستا قرار گیرند.

اصل مسیر، اصل مهمی برای طراحی خوب است و باید رعایت گردد. به عنوان مثال می توان میکرومتر خارج سنج شکل ۲-۳ را بررسی کرد که اصل مسیر در آن به طور کامل بر قرار است.



شکل۲-۳) یک میکرومتر که با اصل مسیر مطابقت دارد.

حال به شکل ۳-۳ توجه کنید. می بینید که اصل مسیر رعایت نشده است بطوری که با افزایش مقدار جابجایی، اختلاف بین اندازهٔ A و مقدار قرائت شده B زیاد می شود.



شکل۳-۳) یک کولیس که اصل مسیر در آن رعایت نشده است.

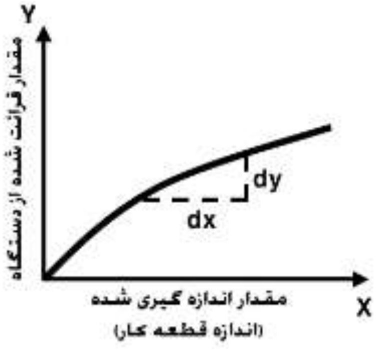
انحنای نشان داده شده ممکن است در اثر فشار دادن بیش از حد شاخک ورنیه به قطعه کار نیز بوجود بیاید. از آنجا که تعیین اندازه (در نبود وسایل لازم برای استاندارد کردن آن) از فردی به فرد دیگر تغییر می کند با چنین کولیسی مقادیر مختلفی برای اندازهٔ A قرائت می شود و در نتیجه درجه اطمینان این کولیس نسبت به میکرو متر شکل ۲-۳ کمتر و تعیین اندازهٔ A با آن مشکلتر خواهد بود. مثالهای دیگری از کاربردهای این اصل را بعداً توضیح خواهیم داد و اکنون به بررسی دیگر پارامتر های مهمی که وسایل اندازه گیری باید دارا باشند می پردازیم :

حساسیت

حساسیت را می توان به این صورت تعریف کرد:

میزان جابجایی عقربهٔ دستگاه با توجه به کمیت اندازه گیری شده (اندازه مورد بررسی)

با در نظر گرفتن چندین قطعه کار و اندازه گیری آنها با دستگاه مورد نظر می توان نموداری را به شکل زیر رسم کرد :



شکل-۴-۳)مقدار حساسیت یک وسیله اندازه گیری

اگر dx مقدار نمو x و dy مقدار نمو y برای دو مقدار متوالی قرائت شده باشد آنگاه برای هر مقدار $y = \frac{dy}{dx}$، حساسیت دستگاه، شیب منحنی در هر مقدار از y است. باید توجه شود که این روش یافتن حساسیت دستگاه، بر اساس نظریات مورد قبول متعددی بسط داده شده است تا از این طریق حساسیت دستگاه به طور کامل و با کمترین تغییر در مقدار اندازه گیری شده (که باعث تغییر زیادی در مقدار قرائت شدهٔ دستگاه خواهد شد) تعریف و تعیین گردد. البته در این تعریف به این حقیقت توجه نشده است که امکان دارد حساسیت تا پس از جابجایی نهایی عقربه دستگاه تغییر کند و ثابت نباشد.

دقت

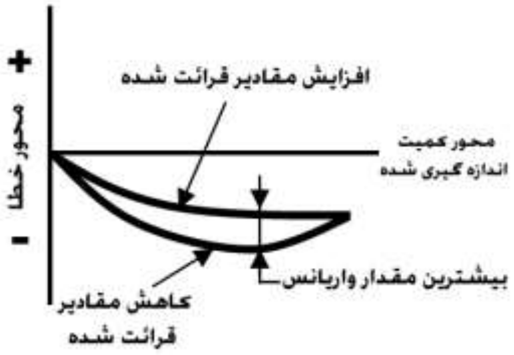
عموماً بین اندازه واقعی و مقدار قرائت شده از روی این اندازه، اختلافی وجود دارد. دقت، میزان تصحیحی است که برای برطرف کردن این اختلاف باید به مقدار قرائت شده اعمال گردد. چنان چه هنگام سوار کردن دستگاه یا آزمایش کردن با آن، درجه بندی دستگاه دقیقاً تعیین گردد این اختلاف برطرف خواهد شد. ممکن است مکانیسم دستگاه در اثر کار فرسوده شود در این

صورت دستگاه باید دوباره میزان (کالیبره) شود تا دقت آن اصلاح گردد. عمل میزان سازی را می توان با سنجه های خطا انجام داد. برای این کار باید نسبت اندازه ی واقعی یک سنجه را به اندازه ی اسمی آن تعیین کرد. این نسبت مقدار خطا در دستگاه است.

واریانس

واریانس، میزان تغییر در مقدار قرائت شده از دستگاه است که با تکرار اندازه گیری یک اندازه معین بدست می آید. واریانس در بسیاری از انواع وسایل اندازه گیری ویژگی ذاتی و جدایی ناپذیر است. مقدار واریانس به چندین عامل از جمله کیفیت ساخت دستگاه و مهارت متصدی آن بستگی دارد. در این جا به عنوان آزمایش، واریانس یک دستگاه اندازه گیری را تعیین می کنیم.

برای این کار ساعت اندازه گیری را انتخاب می کنیم که می تواند با دقت بروی یک سطح مرجع که کاملاً پرداخت شده است حرکت کند. اکنون مجموعه ای از سنجه های خطا را در نظر می گیریم به طوری که اندازه آنها به طور متوالی ۱ mm افزایش یابد تا به این وسیله ی محدودهٔ حرکت شاخص ساعت اندازه گیری را افزایش دهیم. هر سنجه را به نوبت و با دقت بروی سطح مرجع قرار داده شاخص ساعت اندازه گیری را از سطح بالایی سنجه عبور می دهیم. در نتیجه مجموعه ای از قرائت های مشابه بدست می آید که آنها را ثبت می نماییم. برای آن که بتوان این قرائت ها را بروی محور عمودی نمایش داد فرض می کنیم که ساعت اندازه گیری به صورت عمودی بروی سنجه ها حرکت نموده و شاخص آن بالا یا پایین رفته است. بنابراین یک بار شاخص را رو به بالا حرکت می دهیم (به ضخامت سنجه ها اضافه می کنیم-م) و مجموعه ای از قرائت ها حاصل می گردد و بار دوم شاخص را رو به پایین حرکت می دهیم (از ضخامت سنجه ها کم می کنیم-م) و مجموعه ای دیگر از قرائت ها حاصل خواهد گردید. همان طور که در شکل (۵-۳) نشان داده است این دو گروه قرائت را رسم می نماییم.



شکل۵-۳) واریانس در یک ساعت اندازه گیری تحت آزمایش

این قرائت ها دو منحنی تشکیل می دهند که یک گره یا حلقه را می سازند. به این نوع حلقه ها، حلقه یا گره پسماند می گویند که مختص دستگاه اندازه گیری تحت آزمایش است. بیشترین فاصله ی بین این دو منحنی بیشترین مقدار واریانس را نشان می دهد. با توجه به این آزمایش و شکل (۵-۳) می توان نتیجه گرفت که عموماً ساعت اندازه گیری برای اندازه گرفتن اختلاف ارتفاع ها یا اختلاف طولهای بسیار کوچک مناسب نمی باشد.

اینرسی در قسمت های متحرک

بیشتر دستگاههای اندازه گیری خواه به طور کامل و خواه به طور جزئی به اتصالات و سیستم های مکانیکی یا به جابجایی یک سیال وابسته هستند. به همین دلیل عملکرد آنها دستخوش مشکلات ناشی از اینرسی است. تنها دستگاه های اندازه گیری که منحصراً به کاربرد خواص نور وابسته می باشند به کلی از اثرات اینرسی در امان هستند. اینرسی موجب تولید کندی و سستی در دستگاه می شود که می توان آن را برای یک دستگاه معین و با توجه به کوچکترین تغییر در مقدار اندازه گیری شده (که در نتیجه سبب می شود مقدار قرائت شده تغییر کند) مشخص نمود.

به عنوان مثال دستگاهی را در نظر بگیرید که دارای یک دیافراگم است. این دیافراگم از یک سو تحت فشار سیال قرار می گیرد و با انتقال این فشار به یک عقربه که بروی صفحه ای درجه بندی شده قرار دارد عددی را نشان می دهد. چنین دستگاهی فقط زمانی از اثرات اینرسی در

امان است که دیافراگم آن کاملاً کشسان باشد چرا که در غیر این صورت میل به ماندن (اینرسی) باعث می شود تا دیافراگم به طور کامل به وضعیت اولیه خود باز نگردد و در نتیجه اندازه گیری با خطا همراه باشد.

دستگاه های دیگری نیز وجود دارد که عملکرد عقربۀ آنها ناشی از یک سیستم فنردار است. در اینجا هم اگر فنرها بطور کامل کشسان نباشند پدیده ماندگی ایجاد می گردد. بنابراین تصدیق می شود که جدا کردن عیوب تولید کننده خطا در وسایل اندازه گیری کار مشکلی است چرا که در بیشتر موارد این عیوب با یکدیگر در ارتباط هستند. به عنوان مثال حالت لَختی و سستی در وسائل اندازه گیری دقیقاً در ارتباط با حساسیت دستگاه می باشد که در نهایت موجب می شود درجه بندی دستگاه اشتباه قرائت شود.

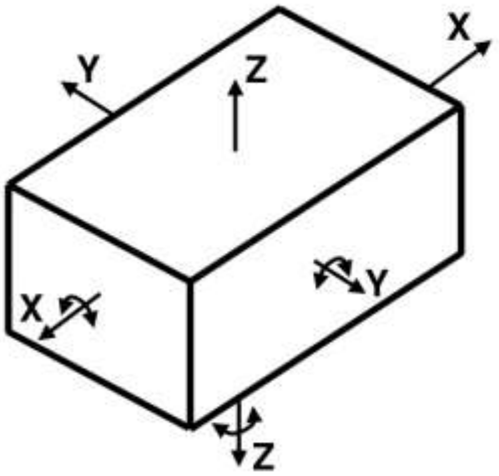
این نکته را به ذهن بسپارید که اجزاء مختلف ماشین های اندازه گیری باید خواص گفته شده را داشته باشند. البته خود این خواص نیز در چهارچوب اصول سینماتیک قرار می گیرند. در حقیت می توان گفت تنها به کمک رعایت دقیق اصول سینماتیک است که می توان یک طراحی مناسب ارائه داد.

اصول سینماتیک

یکی از مهمترین قضایای سینماتیک می گوید که :

هر جسم جامد در فضا دارای شش درجه آزاد است.

همانطور که در شکل ۶-۳ نشان داده شده است جسم می تواند در راستای هر کدام از محورهای X، Y و Z حرکت کند یا حول آنها بچرخد. بنابراین دارای شش درجه آزادی خواهد بود. به همین دلیل برای ثابت نگاه داشتن این جسم در فضا ۶ قید لازم است (هر قید برای ۱ درجه آزادی). در وسایل اندازه گیری عموماً لازم می شود که به عضو مورد نظر تنها ۱ درجه آزادی داده شود پس در ۵ جهت دیگر باید از ۵ قید استفاده گردد.



شکل ۶-۳) شش درجه آزادی- اگر جسمی قادر به حرکت در فضا باشد یک حرکت یا ترکیبی از حرکتهای نشان داده شده را خواهد داشت.

تثبیت کامل

به عنوان مثالی در مورد مطلب اخیر فرض کنید که می خواهیم یک صفحه مسطح را بروی پایه ای سوار کنیم. این کار باید به روشی انجام شود که شرایط زیر برقرار گردد :

۱) صفحه بدون اعمال نیروهای خارجی کاملاً ثابت شود.

۲) صفحه برای منبسط یا منقبض شدن (به علت تغییرات دمای محیط) آزاد باشد.

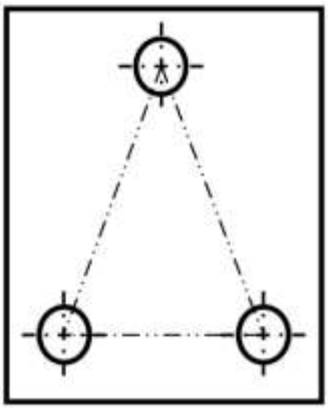
۳) صفحه تغییر شکل ندهد و کج نشود.

۴) از جابجایی یا خروج اتفاقی صفحه از محل تنظیم شده جلوگیری گردد.

البته می توانیم به طور اختیاری شرط دیگری نیز برای سوار کردن صفحهٔ به شرط های بالا اضافه کنیم. مثلاً صفحه در حالتی کاملاً افقی (تراز) قرار گیرد. همهٔ این شرایط با روش زیر در دسترس خواهد بود :

سطح تحتانی صفحه بروی سه گلوله سوار شود به نحوی که مرکز ثقل صفحه، مرکز ثقل مثلثی باشد که اضلاع آن مثلث خطوط عبوری از مراکز گلوله ها است (شکل۷-۳). تکیه گاه هایی که صفحه باید دارا باشد تا این سه گلوله درون آنها قرار گیرند می تواند به صورت سوراخ مخروطی، شیار V شکل و یک سطح تخت باشد (شکل۸-۳). به این ترتیب اگر گلوله ها بروی سوراخ مخروطی، شیار V شکل و سطح تخت قرار گیرند سوراخ مخروطی، همهٔ حرکتهای افقی در راستای محورهای X، Y و Z را مانع می شود. چرخش حول محور Z (محور عمودی) و یکی

از محورهای X یا Y به وسیله شیار V شکل ثابت می شود. از چرخش حول محور افقی باقی مانده نیز به وسیله سطح تخت جلوگیری می گردد. اگر شرط اختیاری ذکر شده (تراز بودن صفحه) را نیز در نظر بگیریم حالت صفحه، دو بعدی خواهد شد و در نتیجه حرکت رفت و برگشتی در راستای Z خود به خود منتفی می گردد (با توجه به شکل ۱۰-۳ این مقاطع باید بروی سطح پایینی و هم بروی سطح بالایی سطحی که صفحه به واسطه آن بروی گلوله ها قرار می گیرد ایجاد شود). به این ترتیب صفحه بطور کامل مهار می شود و شرایط تعیین شده برقرار می گردد. بعداً ذکر خواهد شد که موقعیت صفحه در این حالت دقیق است. ضمناً اگر گلوله ها بروی پیچهای متعادل کننده ای قرار داده شود، با تنظیم ارتفاع گلوله ها توسط این پیچها، می توان صفحه را تراز کرد.

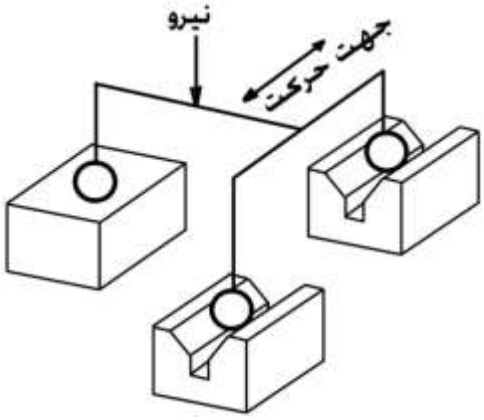


شکل ۷-۳)سطح پایینی صفحه

شکل ۸-۳) سینماتیک دو بعدی پیاده شده برای صفحه

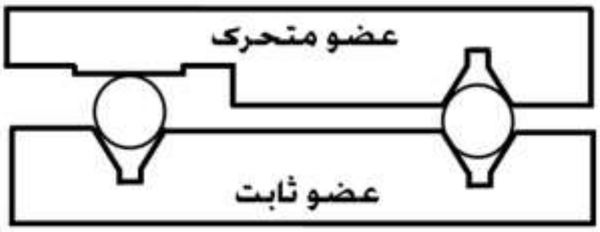
یک درجه آزادی

حال اگر یک درجه آزادی احتیاج داشته باشیم (مثلاً حرکت خطی در طول محور y) کافی است به جای سوراخ مخروطی، یک شیار V شکل را جایگزین کنیم. در این صورت شرایط نشان داده شده در شکل ۹-۳ برقرار می گردد. ضمناً از آنجا که جسم فقط در امتداد محور نشان داده شده می تواند آزادانه حرکت کند مرکز ثقل صفحه، دیگر مرکز ثقل مثلث وصف شده نخواهد بود.



شکل ۹-۳)قیدهای سینماتیکی برای ایجاد حرکت خطی

شکل۱۰-۳ نمونه ای است از بسط قوانین بالا برای لغزیدن دو صفحه بروی یکدیگر که با ساخت شیارهای V شکل به وجود آمده است. برای این که لغزش بهتر انجام شود و همچنین برای کاهش اصطکاک، از گلوله ها استفاده می گردد و برای جلوگیری از پخش شدن گلوله ها، در فواصل مناسب از ریلها، نگاه دارنده های متعددی قرار می دهند. این نوع ریل های کشویی در ماشین های اندازه گیری نیز وجود دارد و طرح آنها بسته به کاربردشان در دستگاه های اندازه گیری تغییر می کند.



شکل ۱۰-۳) ریلهای کشویی V شکل-مسطح و گلوله های موجود در آنها

در اینجا یک بار دیگر تأکید می کنیم که تنها با به کار بردن اصول سینماتیک می توان وسیله ای را طراحی کرد که دقتش در همان حد دقت زمان ساخت باقی بماند. بکار گیری این قوانین باعث می گردد که فرایند ساخت دستگاه ساده تر شود. همچنین هنگام سوار کردن اجزاء

دستگاه، اصول سینماتیک موجب می شوند قسمتهای مختلف دستگاه با هم تطبیق یابند و در نهایت خصوصیات لازم برای دستگاه اندازه گیری به نحوی کاملاً رضایت بخش حاصل گردد.

مقایسه سنجه ها

در قسمتهای پیشین، روشی با نام اندازه گیری مقایسه ای به کمک سنجه های خطا بیان شد. این روش به قدری مهم و اساسی است که می ارزد تا در این جا به تشریح آن بپردازیم. به مسأله زیر توجه کنید :

می خواهیم مجموعه ای از سنجه های درجه کارگاهی را با سنجه های مرجع مقایسه و آنها را میزان (کالیبره) کنیم. وسایل مورد نیاز عبارت است از : مجموعه سنجه های مرجع، سنجه های کارگاهی که می خواهیم آنها را میزان کنیم و یک کمپراتور (مقایسه گر) با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر

روش کار :

ابتدا فرض می کنیم که تمامی وسایل فوق به مدت کافی در اتاق استاندارد یا آزمایشگاه اندازه گیری قرار گرفته اند به طوری که دمای آنها تقریباً ۲۰ درجه سانتی گراد باشد. همچنین سنجه ها باید پس از شسته شدن در یک تمیز کننده مناسب مانند تتراکلریدکربن با چرم بز کوهی خشک شوند. میز کمپراتور (مقایسه گر) را نیز به همین روش شسته و خشک کنید. بهتر است سنجه ها را در نقطه ای مجاور مقایسه گر در دو گروه مرجع و کارگاهی منظم نمایید. حال یک سنجه مرجع را آرام بروی صفحه ی مرجع کمپراتور (مقایسه گر) قرار می دهیم و آن را برای خواندن مقدار خطای معلوم سنجه مرجع تنظیم می کنیم. در این مرحله باید دمای سنجه و محیط اطرافش ثابت بوده توازن داشته باشد. اگر لازم شد مقدار قرائت شده از دستگاه را دوباره با مقدار خطای سنجه های مرجع تطبیق می دهیم .سپس با دقت، سنجه مرجع را برمی داریم، سنجه کارگاهی را با همان اندازه اسمی جایگزین می کنیم و روش مذکور را به کار می بریم. بعضی مواقع ممکن است در عقربه ها لقی پدید آید و در نتیجه هنگام تنظیم صفر دستگاه، خطا ایجاد شود. این خطا در صورت وجود باید ثبت گردد. شرط احتیاط آن است که برای بار دوم، خطای سنجه مرجع، اندازه گیری شود تا از درستی محل صفر دستگاه اطمینان حاصل

گردد (منظور بررسی این موضوع است که وقتی با دستگاه هیچ عمل اندازه گیری انجام نمی شود عقربه یا نمایشگر دستگاه کاملاً روی صفر قرار گیرد). با این کار تغییرات احتمالی ایجاد شده در شرایط اندازه گیری بخصوص تغییرات حاصل از دما را می توان تشخیص داد. بعد از قرائت خطای سنجه ها نتایج را در جدولی مانند جدول زیر خلاصه می کنیم. دقت اندازه گیری به کمک این قبیل روشها معمولاً در محدودهٔ ±۰/۰۵ μm قرار دارد. البته این مقدار قابل تغییر است چرا که به دقت مقایسه گر و همچنین دقت مشاهدات بستگی دارد.

جدول میزان سازی (کالیبراسیون) سنجه های کارگاهی

استاندارد : سنجه های مرجع (واحد : میکرومتر)			اندازه اسمی سنجه کارگاهی (میلی متر)
خطا در سنجه کارگاهی	مقدار قرائت شده برای سنجه کارگاهی	خطای معلوم سنجه های مرجع	
+۰/۳	+۰/۴	+۰/۱	۱
+۰/۸	+۰/۸	۰	۲
+۰/۳	+۰/۵	+۰/۲	۳
+۰/۷	+۰/۶	-۰/۱	۴
-۰/۶	-۰/۵	+۰/۱	۵

طراحی مقایسه گرها (کمپراتور)

مقایسه گرها از وسایل اصلی اندزه گیری خطی می باشند و به همین دلیل، طراحی آنها بسیار مورد توجه است. در این وسایل جهت ایجاد بزرگ نمایی مناسب برای عقربه که حرکت آن متأثر از بُعد در حال اندازه گیری است روشهای مختلفی بکار می رود که اصلی ترین آنها عبارت است از :

۱)مکانیکی

۲)مکانیکی- نوری

۳)بادی

۴)الکتریکی

۵)جابجایی سیال

مقایسه گرهایی که بزرگنمایی بالایی دارند:

این قبیل مقایسه گرها برای استفاده در اتاقهای استاندارد و سازمانهای کنترل کیفیت طراحی شده اند و بطور وسیعی برای میزان سازی سنجه ها بکار می روند. دو نوع از آنها عبارتند از :

۱) مقایسه گر تراز شکل بروکز (A.J.C. Brookes)

۲) مقایسه گر اِدن-رولت (E.M. Eden-F.H. Rolt) یا میلیونیم

این دو مقایسه گر در آزمایشگاه بین المللی فیزیک طراحی شده است و ساخت آنها کار افرادی می باشد که پیشرفت اندازه گیری مرهون تلاش آنها است. هر کدام از این دو وسیله هم اکنون به صورت تجاری تولید می شوند. سادگی کار و درستی نتایج حاصل از آنها به قدری است که هیچ کتاب اندازه گیری نمی تواند از بحث دربارهٔ آنها چشم پوشی کند.

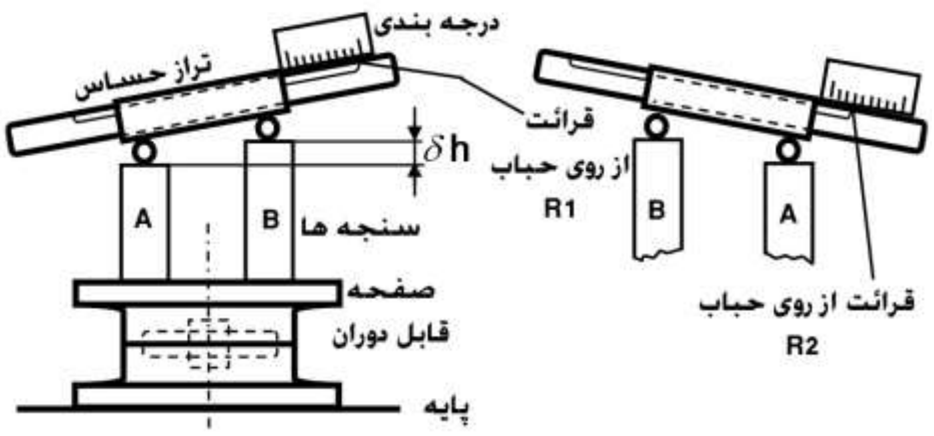
مقایسه گر تراز شکل بروکز

کار این مقایسه گر که در شکل ۱۱-۳ نشان داده شده است مانند تراز بر اساس حرکت یک حباب است. مهمترین بخش این دستگاه، تراز می باشد که حباب آزادانه در آن حرکت می کند. شیب لازم بر اساس اختلاف ارتفاع سنجه های A وB و همچنین میزان چرخش صفحه مبنای مقایسه گر ایجاد می گردد.

در عمل دو سنجه مورد مقایسه بروی صفحه مبنای مقایسه گر قرار داده می شود. سپس تراز با تکیه بر ستون فولادیش پایین آورده می شود به طوری که پایه های توپی شکل آن بروی سنجه های A و B قرار گیرد و فاصله مرکز تا مرکز توپی ها ۱۷/۵ mm باشد. اگر فرض کنیم که A سنجه مرجع است مقدار و جهت شیب تراز به ارتفاع سنجه B نسبت به سنجهA بستگی دارد (موقعیت A-B). در این حالت تراز عددی را نشان می دهد. با چرخاندن سطح مبنا به اندازه ۱۸۰ درجه، موقعیت B-A (شکل b-۱۱-۳) پدیدار می گردد و عدد دیگری از روی تراز خوانده می شود. اختلاف بین مقادیر قرائت شده در این دو موقعیت برابر اختلاف ارتفاع سنجه ها است. پس :

$$\delta h = \frac{R_1 - R_2}{2}$$

R_1 و R_2 مقادیر قرائت شده در این دو وضعیت می باشند. درجه بندی دستگاه تا ۰/۲µm تقسیم بندی شده است ولی بصورت تقریبی می توان تا ۰/۰۴µm را با آن خواند. بنابراین کوچکترین دقت در اختلاف ارتفاع های بدست آمده دو سنجه $\frac{0.04}{2}$ یا ۰/۰۲µm خواهد بود (در فصل۲ این روش برای شکل ۱۲-۲ بکار گرفته شده است برای تفهیم بهتر به این قسمت مراجعه کنید).

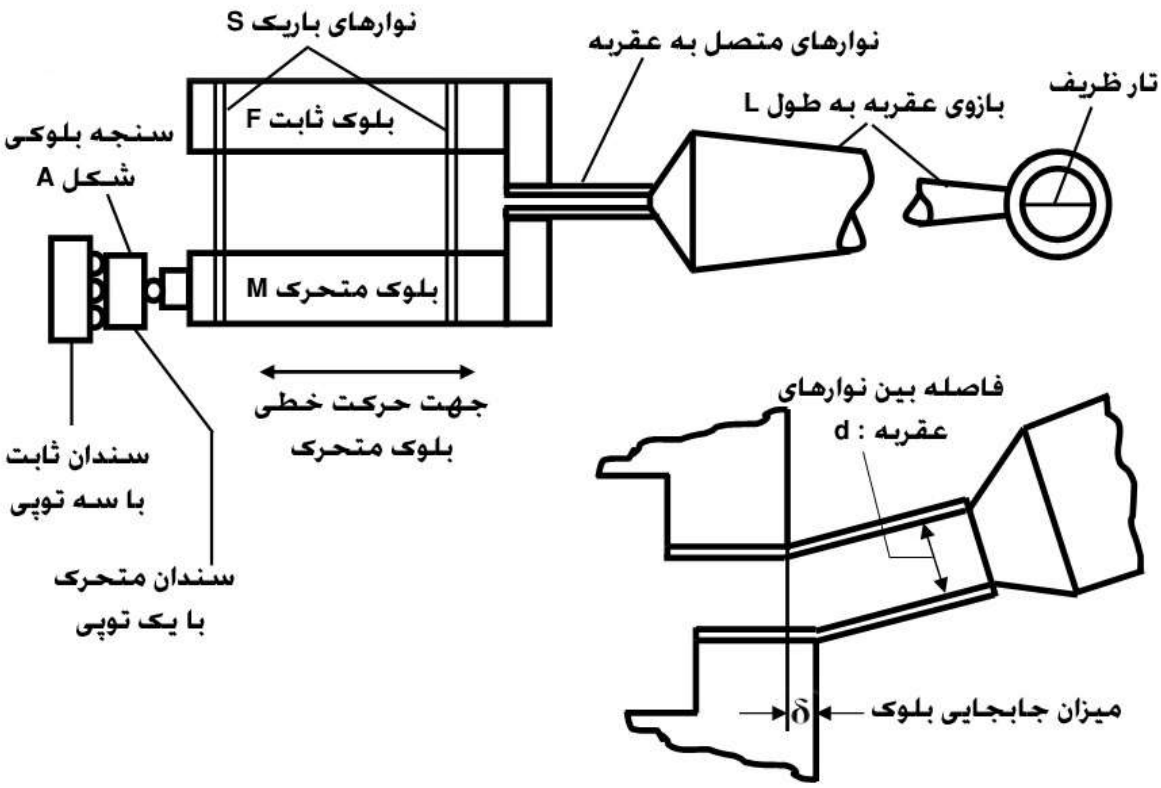


شکل۱۱-۳) اصول اندازه گیری مقایسه ای بوسیله ی مقایسه گر تراز شکل بروکز

یکی از مزایای این دستگاه، مقایسه دو سنجه است بدون این که با هم تماسی داشته باشند. خوبی این ویژگی آن است که وقتی سنجه ها را جداگانه بروی پایه مقایسه گر قرار می دهیم قبل از قرائت تراز، دمای آنها معادل می شود. مدت زمان پیشنهادی برای معادل شدن دمای هر دو سنجه ۱ دقیقه برای هر میلی متر طول است. این مقایسه گر برای سنجه های با طول بیشتر از ۱ m هم ساخته شده است که می توان آن را مزیت دیگری برای این گروه از مقایسه گرها دانست. با وجود آن که سرعت کار با این مقایسه گر مقداری کند می باشد اما چنانچه در اتاق استاندارد و تحت شرایط اندازه گیری مناسب بکار رود برای میزان سازی سنجه ها وسیله کاملاً مناسبی است (همان طور که در فصل قبل شرح داده شد).

مقایسه گر اِدن-رولت (میلیونیم)

این وسیله نیز برای میزان سازی سنجه ها تحت شرایط استاندارد اندازه گیری در اتاقهای استاندارد مناسب می باشد. طرح آن ساده و اقتصادی است و با این وجود بزرگ نمایی بسیار بالایی دارد که حاصل از ترکیب حرکت مکانیکی با یک سیستم نوری می باشد. سیستم مکانیکی در شکل a-۱۲-۳ نشان داده شده است.

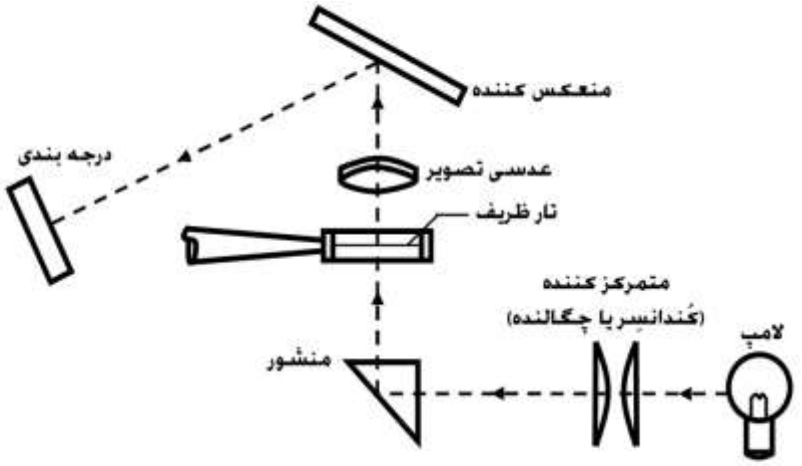


شکل a-۱۲-۳) سیستم مکانیکی مقایسه گر اِدن-رولت با بزرگ نمایی ۴۰ برابر

روش کار مقایسه گر اِدن-رولت (میلیونیم) به این صورت است که وقتی یک سنجه، مثلاً سنجه مرجع A بین سندان و شاخص اندازه گیری قرار می گیرد موجب می شود بلوک M نسبت به بلوک F بصورت خطی حرکت کند.

این دو بلوک توسط دو نوار باریک فولادی S به یکدیگر متصل شده اند و به وسیله نوارهای باریک دیگری با عقربه در ارتباط می باشند. در انتهای این عقربه حلقه ای وجود دارد که درون

آن و در امتداد حلقه یک تار ظریف که با چشم قابل دیدن نیست قرار داده شده است. در اثر حرکت بلوک M و انتقال حرکت به عقربه و در نهایت حلقه، تار بطور محسوسی تغییر مکان می دهد. تغییر مکان تار به کمک سیستم نوری نمایش داده شده در شکل b-۱۲-۳ قابل دیدن است. بزرگ نمایی این سیستم ساده نوری، ۵۰ برابر می باشد. بزرگ نمایی سیستم مکانیکی نیز ۴۰۰ برابر است بنابراین بزرگ نمایی نهایی دستگاه ۴۰۰ ضرب در ۵۰ یا ۲۰۰۰۰ برابر می باشد.



شکل b -۱۲-۳) سیستم نوری مقایسه گر اِدن-رولت با بزرگنمایی ۵۰ برابر

با درجه بندی موجود بروی دستگاه مستقیماً می توان تا ۰/۲µm را خواند ولی فاصلهٔ بین هر دو تقسیم متوالی تقریباً ۵mm است پس می توان بطور تقریبی تا ۰/۰۲µm را با این دستگاه قرائت کرد (توضیح آن که دقت درجه بندیµm ۰/۲ یا ۰/۰۰۰۲mm است. از آنجا که $\frac{1}{5000}=\frac{2}{10000}$ پس درجه بندی دستگاه به ۵۰۰۰ قسمت تقسیم شده است. گفته شد که فاصله بین هر دو قسمت متوالی از درجه بندیmm ۵ می باشد. ۵۰۰۰ ضرب در ۵ می شود ۲۵۰۰۰ یعنی می توان تعداد تقسیمات درجه بندی را $\frac{1}{25000}$ میلی متر یا ۰/۰۴µm در نظر گرفت. همانطور که در مورد مقایسه گر بروکز نیز گفته شد در نهایت دقت تقریبی دستگاه $\frac{0.04}{2}$ یا ۰/۰۲µm است). در نتیجه این طراحی در دو مرحلهٔ نسبتاً ساده، بزرگ نمایی بسیار بالایی تولید می کند. مرحله اول، برای داشتن حساسیت لازم و ساده شدن ساخت به قوانین

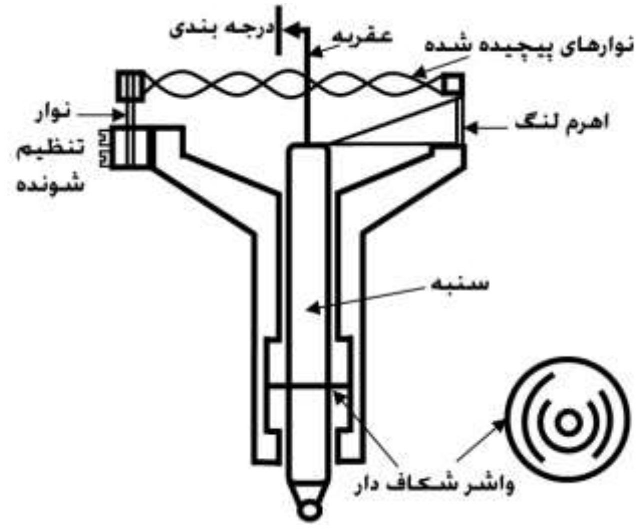
سینماتیک بستگی دارد و دارای اصول مکانیکی است. مرحله دوم، شامل یک سیستم نوری است. همانطور که در شکل a-۱۲-۳ دیده می شود سندان متحرک بلوک M حامل یک توپی است و سندان ثابت آن دارای سه توپی است که در رئوس یک مثلث قرار دارند. به همین دلیل سنجه بدرستی روی سندان می نشیند و ارتفاعش از سطح سندان و نسبت به امتداد حرکت ثابت باقی می ماند.

وسیله ای که ملاحظه شد مثال بارز و برجسته ای از طراحی است که در آن دقت ساخت دستگاه، نقش کمی در دقت قرائت ها ایفا می کند. به عنوان مثال لازم نیست که فاصله بین دو نوار فولادی حامل عقربه و یا طول عقربه دقیق باشد. بزرگ نمایی سیستم نوری نیز ممکن است فقط یک مقدار اسمی باشد. هر خطایی که در دستگاه ایجاد شود (چه در سیستم مکانیکی و چه در سیستم نوری) را می توان به کمک قرائتهای فراهم شده از روی یک مجموعه سنجه خطا که مقدار خطای آنها معلوم است دوباره میزان سازی کرد. اکنون که بررسی این دو نوع مقایسه گر به اتمام رسیده است لازم می دانیم که اصول کار انواع بیشتری از مقایسه گرها و همچنین کاربردشان را شرح دهیم. سعی می شود که معمولی ترین آنها مورد بررسی قرار گیرد. در هر کدام از این مقایسه گرها به روش های بکارگیری اصول سینماتیک توجه کنید.

مقایسه گرهای مکانیکی

<u>میکروکاتور جانسُون</u>

شاید ساده ترین (و تا به حال استادانه ترین) مدل به کار گرفته شده در مقایسه گرها در این دستگاه به کار رفته باشد. ایده این دستگاه از آن یک دانشمند سوئدی به نام آبرامسن (H. Abramson) است که به وسیله شرکت جانسن (C.E. Johansson) ساخته شده است. طرح آن را در شکل ۱۳-۳ می بینید.



شکل(۱۳-۳) چگونگی حرکت میکروکاتور جانسُن

همانطور که مشاهده می کنید این دستگاه از دو نوار به هم پیچیده تشکیل شده است که یک طرف آنها به پایه ی تنظیم شونده (سمت چپ) ثابت شده است و طرف دیگر آنها به یک زانویی (سمت راست) متصل می باشد که از نوار فنری ساخته شده است. یکی از بازوهای این زانو به شاخص دستگاه متصل می شود. هنگامی که شاخص به بالا و پایین حرکت می کند زانو به صورت یک اهرم لنگ عمل می نماید و طول نوارهای به هم پیچیده شده تغییر می کند. در وسط این نوارها قرص شیشه ای سبکی قرار دارد که به عقربه دستگاه متصل است. با تغییر طول نوارهای پیچیده شده این نوارها می چرخند و در نتیجه قرص شیشه ای را به حرکت دورانی وادار می کنند. در نهایت عقربه، متناسب با تغییر طول نوار، مقداری را نشان می دهد. مقدار این عدد عبارت است از :

$$\frac{d\theta}{dL} = -\frac{9.1 \times L}{W^2 \times n}$$

L : طول نوارهای پیچیده شده در امتداد محور آنها

W : پهنای نوارهای پیچیده شده

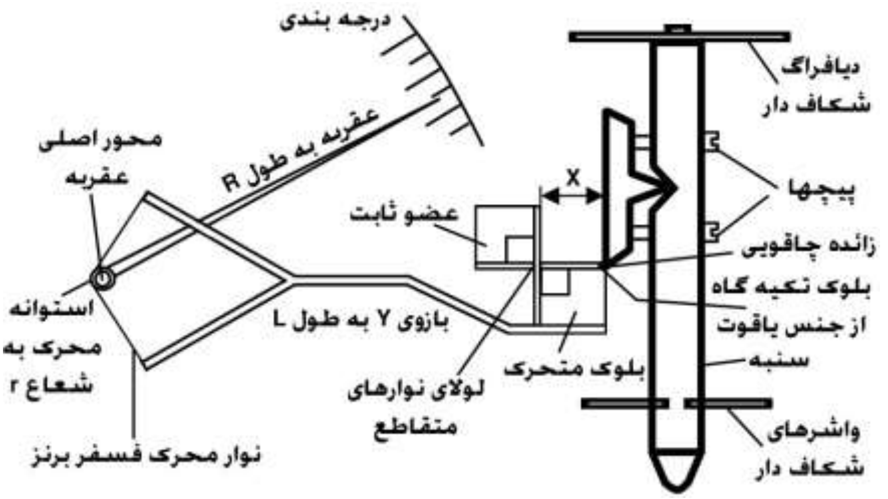
n : تعداد دور یا پیچش

θ: پیچش نقطه ی وسط نوارها نسبت با انتهای آنها (بر حسب درجه)

ضخامت و پهنای نوارهای پیچیده شده معمولاً خیلی کوچک است و بر طبق نوع دستگاه تغییر می کند ولی می توان مقدار متوسط $0.0025^{mm} \times 0.06^{mm}$ را برای ابعاد آنها در نظر گرفت. برای یک کشش معلوم با ایجاد سوراخهای کوچک در امتداد طول نوارها می توان تنش را در آنها کاهش داد. هدف از کاربرد پایه تنظیم شونده، تنظیم طول و پیچش نوارها است. مثلاً اگر نوار در اثر حرکت شاخص بیش از حد پیچ خورده و یا طول مؤثر آن افزایش یافته باشد با حرکت این پایه می توان اثرات فوق را خنثی کرد. می بینید که چگونه یک طراحی مناسب، ساختار دستگاه را ساده تر کرده است. تنظیم نهایی بخش بزرگ کننده را می توان به سادگی و با تغییر طول آزاد نوار تنظیم شونده انجام داد. همانطور که گفته شد حرکت پایه نیز قابل تنظیم است. برای این کار می توان یکی از پیچهای آن را شل کرد و دیگری را سفت نمود. به این ترتیب کشش اولیه نوارهای پیچیده شده قابل تنظیم می باشد. پایین آورنده شاخص به شکل یک واشر است که در آن شکافی به شکل C ایجاد شده است (شکل۱۳-۳). با وجود این واشر، برای حرکت شاخص دیگر به ایجاد محور یا کشو نیازی نیست در نتیجه میزان فرسودگی نیز کاهش می یابد. این دستگاه بسیار محکم و نیرومند است و به صورت تجاری با بزرگ نمایی بیش از ۵۰۰۰ برابر تولید می گردد. به وسیله این دستگاه و تحت شرایط آزمایشگاهی کنترل شده می توان دقتهای بسیار بالایی بدست آورد.

مقایسه گر سیگما

یکی دیگر از مقایسه گرهایی که هنوز دارای طرح استادانه و ساده ای است مقایسه گر سیگما نام دارد که در یک محدودهٔ مشخص از بزرگ نمایی بوسیله شرکت سیگما تولید شده است. شکل۱۴-۳ چگونگی کار این مقایسه گر را نشان می دهد (این شکل نسبت به دستگاه اصلی خیلی خلاصه شده است).



شکل۱۴-۳) مقایسه گر مکانیکی سیگما

شاخص دستگاه بروی یک جفت دیافراگم شکاف دار قرار دارد که موجب می شود تا شاخص حرکت خطی اصطکاکی داشته باشد. حرکت شاخص، زائده چاقویی شکل را تغییر مکان می دهد. حرکت این زائده چاقویی شکل به روی دو نوار باریک و متقاطع که به یک دیگر لولا شده اند اثر می گذارد. در شکل می بینید که این جزء لولا شده دارای یک عضو متحرک و یک عضو ثابت است. بنابراین اگر نیروی خارجی بر عضو متحرک وارد شود این عضو مثل یک لولا حول محور تقاطع می چرخد. عضو متحرک به یک بازوی Y شکل متصل است. اگر طول مؤثر این بازو L باشد و فاصله محور لولا تا زائده چاقویی شکل X باشد اولین مرحلۀ بزرگ نمایی به اندازۀ $\frac{L}{X}$ خواهد بود. در انتهای بازوی Y شکل یک نوار باریک از فسفر برنز قرار دارد که به دور استوانه ای به شعاع r پیچیده شده است و به دو شاخک بازو متصل می باشد. استوانه نیز به عقربه وصل است. اگر طول عقربه R باشد بزرگ نمایی مرحله دوم $\frac{R}{r}$ است. بنابراین بزرگ نمایی نهایی دستگاه $\frac{L}{X}\times\frac{R}{r}$ خواهد بود. بزرگ نمایی را می توان با شل و سفت کردن پیچهای متصل کنندۀ زائده چاقویی شکل به شاخص (و در نتیجه تغییر در فاصله X) تنظیم کرد. زمانی که به مقایسه گری با بزرگ نمایی مختلف نیاز باشد می توان با تغییر شعاع استوانه (r) و تعویض نوار باریک ذکر شده به این منظور دست یافت. قطع نظر از نوع حرکت، این مقایسه گر خصوصیات دیگری نیز دارد که عبارتند از :

۱- ایمنی : از آنجا که زائده چاقویی شکل دور از عضو متحرک لولا حرکت می کند اگر از یک شاخص نیرومند استفاده گردد بارهای ضربه ای حاصل از حرکت شاخص در تمام مدت حرکت به قسمتهای دیگر دستگاه منتقل نخواهد شد.

۲- از بین رفتن نوسانات عقربه : برای این که عقربه با نوسان کم یا بدون نوسان حرکت کند به انتهای عقربه یک دیسک غیر آهنی متصل می کنند و آن را در یک میدان مغناطیسی دائمی قرار می دهند. حرکت چرخشی عقربه و دیسک، بروی دیسک جریانهای گردابی تولید می کند. در نتیجه حرکت چرخشی بر خلاف جهت دوران دیسک و متناسب با سرعت چرخشی آن پدیدار می گردد. نوسانات احتمالی به وسیله این نیروی خفه کننده از بین می رود. این نیرو را می توان متناسب با وسعت و سرعت نوسانات افزایش داد.

۳-تطابق خوب : تنظیم ارتفاع عمودی قطعه کار (یا تنظیم موقعیت عقربه) برای وسایلی از این قبیل که بزرگ نمایی بالایی دارند مشکل است. برای حل این مشکل، صفحه ساعت اندازه گیری را طوری می سازند که حول محورش قابل چرخش باشد. بنابراین تنظیم عقربه با حرکت دادن صفحهٔ درجه بندی ساعت (بدون حرکت دادن قطعه کار) انجام می شود.

۴-تطابق : در این دستگاه بروی تقسیمات درجه بندی یک ماده منعکس کننده نور قرار داده شده است. در این صورت اگر راستای دید کاملاً عمود بر عقربه باشد زمانی که سایه عقربه بروی یکی از این درجه بندی ها قرار گیرد باعث می شود سطح آن نوری منعکس نکند و تاریک به نظر برسد. بنابراین اشتباه در قرائت عدد نشان داده شده بوسیلهٔ عقربه، تا حد زیادی کاهش می یابد. در برخی مدلها روش دیگری بکار برده می شود. به این صورت که عقربه، پشت صفحه درجه بندی قرار می گیرد و شکافی بروی صفحه درجه بندی ایجاد می گردد که فقط نوک عقربه از آن شکاف دیده می شود. بروی نوک عقربه نیز یک نمایشگر کوچک قرار داده شده است. ضخامت این نمایشگر به اندازه ای است که وقتی بروی عقربه قرار می گیرد سطح بالایی آن کاملاً هم سطح با صفحه درجه بندی خواهد بود. بنابراین تطابق (عقربه و صفحه درجه بندی-م) به طور کامل حاصل می گردد.

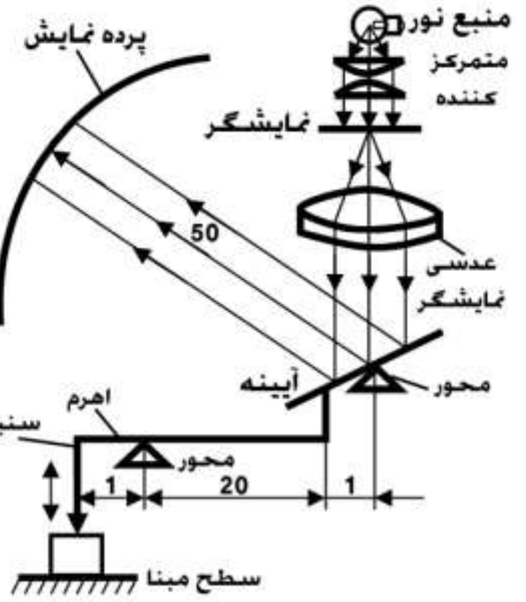
۵- فشار ثابت در اندازه گیری : یکی از قسمتهایی که در شکل ساده دستگاه نشان داده نشده است آهنربایی است که باعث می شود تا فشار اندازه گیری در سطح تماس شاخص و قطعه کار

ثابت باقی بماند. برای دستیابی به این هدف، مانع نگاه دارنده ای بروی شاخص قرار می گیرد و بالای آن یک آهنربای نعلی شکل وصل می شود. هنگامی که شاخص بالا می رود و احتیاج به افزایش نیرو می باشد مانع نگاه دارنده به آهنربا نزدیک می شود و جاذبهٔ آهنربایی بین آنها افزایش می یابد. بنابراین با افزایش نیروی وارد شده به شاخص، نیروی جاذبه آهنربایی بیشتر می شود در نتیجه فشار اندازه گیری ثابت باقی می ماند.

همانطور که ملاحظه شد مقایسه گر سیگما مفصلتر از بقیه مقایسه گرها تشریح گردید چرا که قطع نظر از یک وسیلهٔ اندازه گیری خوب، این مقایسه گر مثال مناسبی برای توضیح مقدماتی فن طراحی می باشد. در مقایسه گر سیگما هر مشکلی، جداگانه مورد بررسی قرار می گیرد و برای رفع آن مشکل، بر پایه اصول ساده و شناخته شده، وسیله ای طراحی شده است.

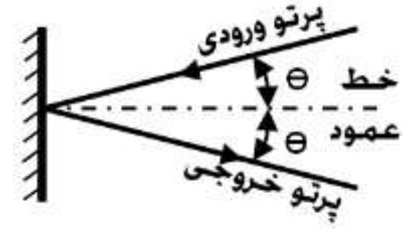
مقایسه گرهای مکانیکی – نوری

به طوری که در شکل ۱۵-۳ می بینید جابجایی های کوچک شاخص اندازه گیری به وسیلهٔ یک سیستم مکانیکی شامل اهرمهایی که قادر به چرخش حول محورهای مشخص شده می باشند به یک آیینه منتقل و آیینه جابجا می شود. سیستم نوری، تصویر یک نمایشگر کوچک را در آیینه شکل می دهد و آیینه هم این تصویر را بروی درجه بندی منعکس می کند که در نتیجه تصویر نمایشگر، عددی را بروی درجه بندی نشان می دهد. این درجه بندی بروی زمینهٔ یک پرده نمایش شیشه ای قرار دارد. در این قبیل سیستمها (با توجه به شکل) بزرگنمایی مکانیکی = واحد **1×20×1=20** و بزرگنمایی نوری = واحد **50×2=100** و بزرگ نمایی نهایی = واحد **20×100=2000**

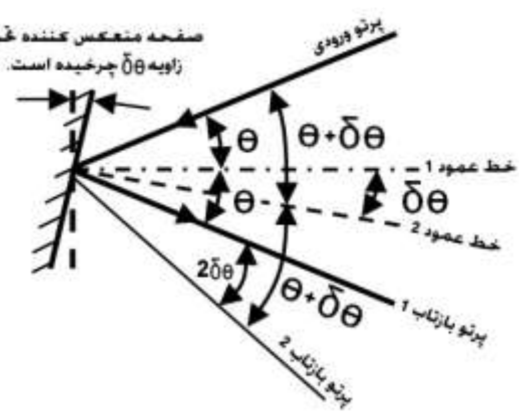


شکل(۱۵-۳) اصول مقایسه گر مکانیکی – نوری

ضریب ۲ در بزرگنمایی نوری به ترتیبی که شرح داده می شود پدید آمده است. همانطور که در شکل ۱۶-۳ می بینید یک پرتو موازی نور تحت زاویهٔ θ نسبت به خط عمود بروی یک صفحهٔ منعکس کننده تابیده است. پرتو منعکس شده نیز تحت همین زاویه نسبت به خط عمود از سطح صفحه خارج می شود. اگر صفحهٔ منعکس کننده تحت زاویه $\delta\theta$ بچرخد مسیر پرتو ورودی بدون تغییر باقی می ماند اما با توجه به شکل b-۱۶-۳ پرتو انعکاسی به اندازهٔ $2\delta\theta$ می چرخد. پس زاویه بین پرتو ورودی و خط عمود بر صفحه در حالت دوم $\theta+\delta\theta$ خواهد شد (برای پرتو خروجی نیز چنین است) و زاویه بین پرتوهای خروجی و ورودی $2(\theta+\delta\theta)$ می باشد. ضریب عددی ۲ در محاسبه بزرگ نمایی نوری دستگاه، حاصل از چنین انعکاسی است. اگر بتوان به وسیله دو صفحه منعکس کننده در مقابل هم که یکی ثابت است و دیگری می تواند به اندازه $\delta\theta$ کج شود یک انعکاس دوگانه تولید نمود در این صورت ضریب ۲ به ضریب ۴ تبدیل می گردد. عموماً برای حصول بزرگ نمایی نوری مناسب از آیینه هایی که پرتو انعکاسی آنها دارای طول مناسبی می باشد استفاده می کنند.

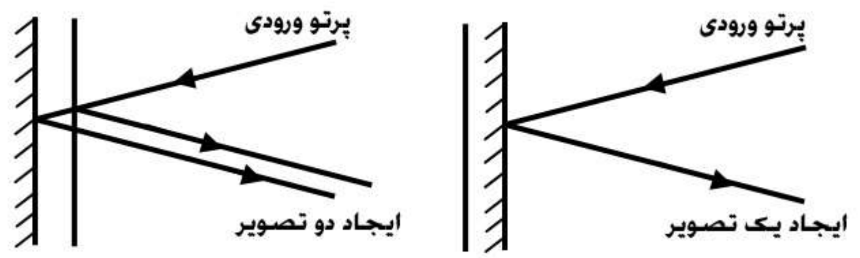


شکل۱۶-۳) انعکاس از سطح یک صفحه



شکلb-۱۶-۳) انعکاس از سطح یک صفحه که تحت زاویه δθ چرخیده است.

یک نکته جالب و تا حدی مهم در آیینه هایی که برای این کار یا مقاصدی مشابه در وسایل اندازه گیری به کار می روند آن است که آنها از نوع جلو منعکس کننده هستند یعنی نور از سطح جلویی آنها انعکاس می یابد. به این ترتیب عدم وضوح تصویر که در اثر کاربرد آیینه های معمولی ایجاد می گردد برطرف خواهد شد (شکل۱۷-۳). هنگام جابجا کردن این قبیل آیینه ها (از جلو تابنده) باید دقت نمود که سطح منعکس کننده آنها خراب نشود. سطح این آیینه ها را باید به کمک برسی از موی شتر پاک کرد.



شکل ۱۷-۳) انعکاس از منعکس کننده های جلو تا بنده و عقب تابنده

شکل ۱۸-۳ کاربرد دقیق اصول گفته شده در مقایسه گرهای مکانیکی- نوری را نشان می دهد. برای فشرده تر کردن دستگاه آن را طوری طراحی می کنند که مسیر نور به وسیله منشور به مقدار ۹۰ درجه دوران کند. درجه بندی دستگاه معمولاً تا ۰/۰۰۱ میلی متر تقسیم بندی شده است.

این قبیل دستگاهها اجزای متحرک کمی دارند که محدود به شاخص و منعکس کننده می باشد. در اینجا عقربهٔ معمولی که در وسایل مکانیکی استفاده می شود با یک پرتو نور که البته دارای وزن است و از سیستم اهرم نوری که در شکل ۱۶-۳ تشریح گردید پیروی می کند جایگزین می شود. اگر فاصله بین محور شاخص تا محور آیینه X باشد و شاخص فاصلهٔ h را طی کند آنگاه حرکت زاویه ای آیینه برابر است با (شکل ۱۸-۳) :

$$\delta\theta = \frac{h}{X}$$

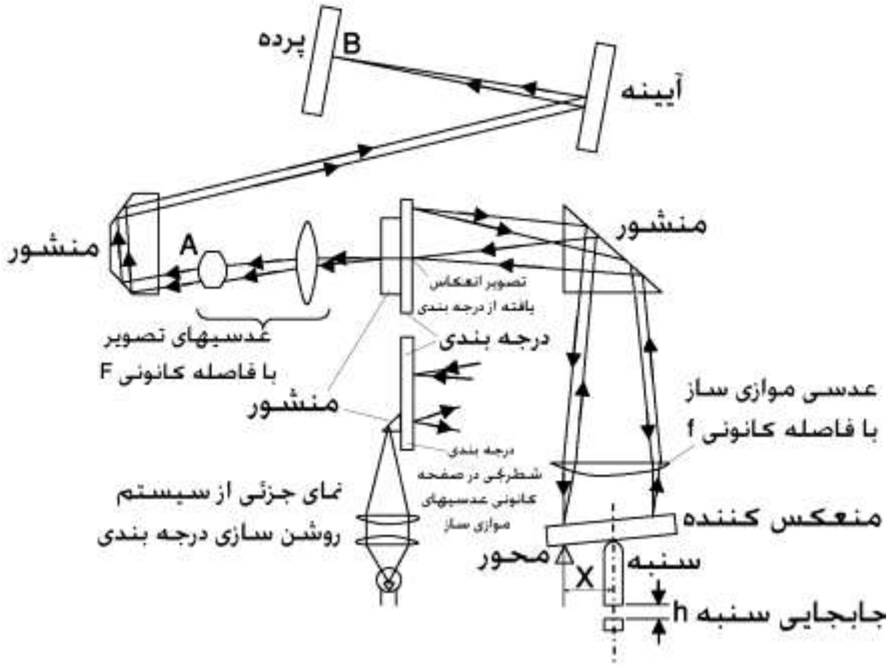
اگر f فاصله کانون عدسی باشد آنگاه حرکت یا جابجایی پرتو بروی درجه بندی $2f\delta\theta$ است (به فصل چهار رجوع شود). بنابراین :

$$\text{جابجایی پرتو بروی درجه بندی} = 2f\frac{h}{X}$$

$$\text{بزرگنمایی دستگاه} = \text{حرکت درجه بندی} \div \text{حرکت شاخص} = \frac{2f\frac{h}{X}}{h} = \frac{2f}{X}$$

اگر این بزرگنمایی را با یک اهرم ساده مکانیکی مقایسه کنیم می بینیم که دو برابر بزرگنمایی اهرم است. در مقایسه گر فوق، X در واقع همان طول بازوی اول اهرم و f (فاصلهٔ کانونی) طول بازوی دوم اهرم در طرف دیگر نقطهٔ اتکا خواهد بود. ضریب ۲ در $\frac{2f}{X}$ حاصل از سیتم نوری دستگاه است. همچنین عدسی چشمی (عدسی سر دوربین دستگاه) خود دارای بزرگ نمایی است بنابراین :

بزرگنمایی کلی دستگاه = $\frac{2f}{X}$ × بزرگنمایی عدسی چشمی



شکل ۱۸-۳) اصول نوری مقایسه گر نوری OMT - این دستگاه تصویر منعکس شده از درجه بندی را بروی یک پرده نشان می دهد.

مقاسیه گرهای بادی (نیوماتیکی)

مقاسیه گرهای بادی که با تغییر فشار یا سرعت وزش هوا کار می کنند در صنعت، اهمیت فراوانی دارند.

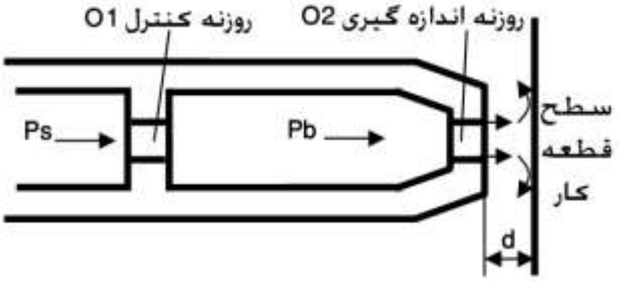
علت این اهمیت، خصوصیات ویژه زیر است :

امکان ایجاد بزرگنمایی خیلی بالا، نداشتن سطح تماس فیزیکی با قطعه کار مورد اندازه گیری، آسان بودن اندازه گیری ابعاد داخلی با توجه به شکل هندسی و تلرانس تعیین شده

به علاوه این مقایسه گرها می توانند به طور هم زمان چندین اندازه را کنترل کنند یا بلافاصله بعد از یک اندازه گیری به اندازه گیری بعدی بپردازند.

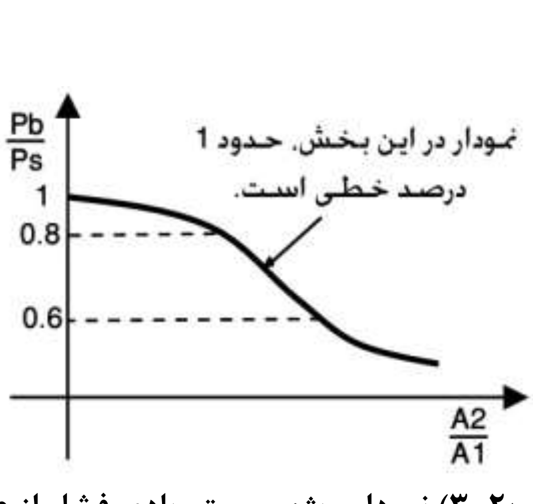
مقایسه گرهای بادی که فشار هوا در آنها از عقب وارد می شود:

سیستم تغییر فشار بر اساس دو سوراخ تعبیه شده در دستگاه می باشد که در شکل ۱۹-۳ نشان داده شده است.



شکل۱۹-۳) اصول یک سیستم اندازه گیری بادی فشار از عقب

هوا با فشار کنترل شده ای به داخل دستگاه وارد می گردد و فشار منبع P_s را تأمین می کند و از طریق سوراخ کنترل O_1 به طرف محفظه بعدی رانده می شود. سوراخ O_1 اندازه ثابتی دارد ولی اندازه مؤثر سوراخ O_2 با تغییر در فاصلهٔ d تغییر می کند. با تغییر فاصلهٔ d فشار P_b نیز تغییر می نماید و در نتیجه مقیاسی حاصل می شود تا با آن بتوان فاصلهٔ d را اندازه گرفت. برای این کار می توان از یک فشار سنج یا مانومتر استفاده کرد که عقربه آن بر اساس فشار P_b بین سوراخها، عددی را نشان خواهد داد. به کمک تطابق مناسب قطرها در سوراخهای O_1 وO_2 و کنترل P_s، فشار P_b را می توان به نحوی تولید کرد که به صورت خطی با اندازه مؤثر سوراخ O_2 تغییر کند. به این ترتیب با داشتن نسبت مساحت های دو سوراخ O_1 و O_2 و نسبت فشارهای موجود در محفظه ها می توان نموداری را که در شکل ۲۰-۳ نشان داده شده است رسم کرد.



شکل۲۰-۳) نمودار ویژه سیستم بادی فشار از عقب

با بررسی نمودار می بینیم که بروی محور عمودی و تقریباً بین اعداد ۰/۶ و ۰/۸، نمودار در حدود ۱٪ خطی است و همین مقادیر هستند که در طراحی این مقایسه گرهای بادی و قطر سوراخ ها (روزنه ها) بکار می روند. با خطی در نظر گرفتن منحنی در این فاصله می توان معادله خط را به این صورت نوشت :

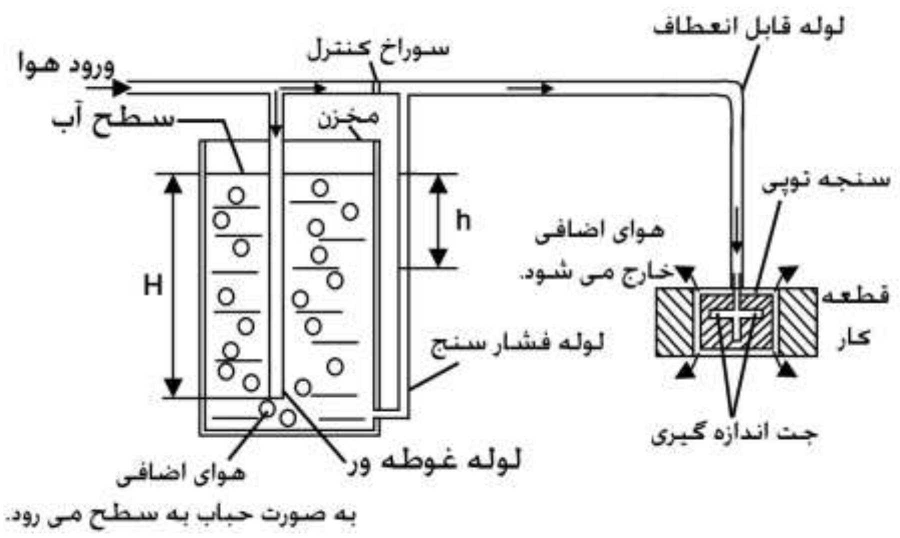
$$\frac{P_b}{P_s} = a - b(\frac{A_2}{A_1})$$

همانطور که در فصول قبل ذکر شد حساسیت یک مقایسه گر عبارت است : نسبت میزان تغییر موقعیت عقربه به میزان تغییر مشابه در موقعیت شاخص (سنبه) دستگاه

عقربه، تغییرات فشار (P_b) را نشان می دهد پس تغییر جزئی در موقعیت عقربه dP_b است. همچنین کوچک و بزرگ شدن قطر سوراخ $O_۲$ یا مساحت آن نشانه جابجایی شاخص در مقایسه گر است. پس در این مقایسه گر $\frac{dP_b}{dA_2}$ حساسیت دستگاه خواهد بود.

$$P_b = P_s.a - \frac{bA_2P_s}{A_1} \Rightarrow \text{مشتق} \quad dP_b = -\frac{b.dA_2P_s}{A_1} \Rightarrow \frac{dP_b}{dA_2} = -\frac{b.P_s}{A_1}$$

با توجه به این فرمول، بزرگ نمایی بادی با فشار اعمال شده متناسب است ولی با مساحت سوراخ کنترل $O_۱$ (یا با توان دوم قطر سوراخ $O_۱$) نسبت عکس دارد (چرا که $A_1 = \frac{\pi.D_1^2}{4}$-م). روشن است که ثابت بودن فشار P_s اصل مفید و مورد نیازی است که باید در دستگاه اعمال شود. بنابراین ضروری است که برای کنترل فشار هوای ذخیره شده از یک رگلاتور ساده فشار استفاده نمود. فشار را تا رسیدن به نسبت $(\frac{55}{1})$ نیوتن بر سانتی متر مربع کاهش می دهیم. شکل ۲۱-۳ تصویر همین دستگاه را نشان می دهد که برای اندازه گیری داخلی تنظیم شده است این دستگاه به وسیله شرکت Solex Air Gauges تولید شده است.



شکل(۲۱-۳) کاربرد سیستم اندازه گیری بادی فشار از عقب (شرکت Solex Air Gauges)

هوای موجود در منبع ذخیره، تصفیه می شود و از یک شیر کاهنده فشار عبور می کند تا فشار کاهش یابد. فشار هوا ثابت نگاه داشته می شود. به کمک یک لوله، هوا به داخل محفظه پر از آبی هدایت می گردد. میزان فشار هوا به کمک اندازه گیری مقدار جابجایی آب، تعیین و هوای اضافی در اتمسفر رها می شود. هوایی که فشار آن کاهش یافته است از سوراخ کنترل می گذرد و از سوراخ کله گی دستگاه (محل اندازه گیری) به بیرون فرار می کند. در مسیر گردش هوا، فشار با میزان جابجایی آب در لولهٔ مانومتر که یک لوله درجه بندی شده است تعیین می شود (درجه بندی خطی است). به این ترتیب تغییرات فشار که اندازهٔ d را تغییر می دهد نشان داده می شود (شکل۱۹-۳). در این سیستم، بزرگنمایی دستگاه بیشتر از ۵۰۰۰۰ برابر است. مقایسه گر فشار از عقب دیگری به وسیله شرکت Mercer Air Gauges تولید شده است که در فشار اندازه گیری ۲۷/۵ نیوتن بر سانتی متر مربع کار می کند. در این دستگاه فشار ثابت به وسیلهٔ یک رگلاتور تولید می گردد و هوا از طریق سوراخ کنترل به طرف محل اندازه گیری رانده می شود. از جمله ویژگیهای جالب مقایسه گر بادی می توان به موارد زیر اشاره نمود :

۱-تنظیم بزرگنمایی : بزرگنمایی با تغییر قطر سوراخ کنترل قابل تغییر است. برای این کار می توان درون سوراخ کنترل یک شیر کنترل که دارای سوزن نوک تیزی است قرار دارد. با تنظیم

بزرگنمایی و صفر دستگاه می توان برای همهٔ قطعات مورد اندازه گیری از یک درجه بندی استفاده کرد.

۲-تنظیم صفر : برای این کار، محلی جهت نشت هوا تعبیه می شود. به این صورت که دریچه ای برخلاف جهت جریان هوا در سوراخ اندازه گیری که با یک شیر سوزن مخروطی کنترل می شود ایجاد می گردد.

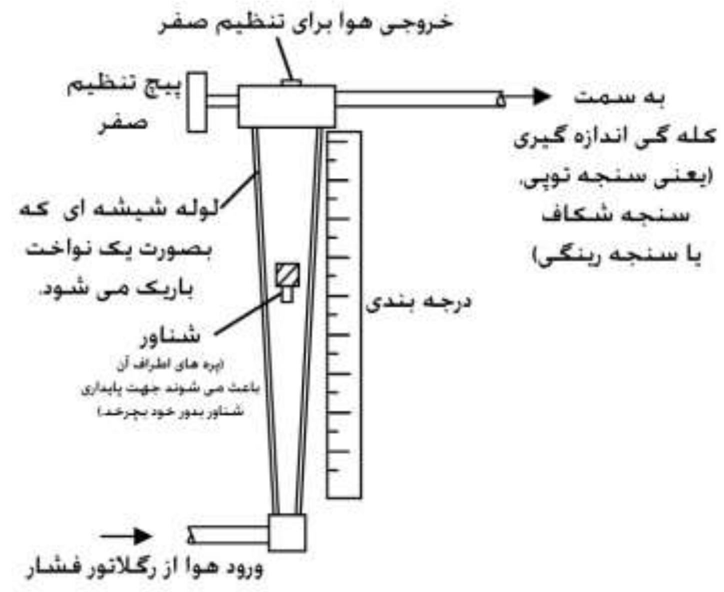
بخش اندازه گیری فشار، یک مانومتر (فشار سنج) لوله ای است. صفحه ساعت دستگاه درجه بندی شده

است و واحدهای آن از نوع واحدهای خطی با تقسیمات ۰/۰۱ mm و ۰/۰۰۱ mm یا واحدهای اینچی می باشد. در تمامی مقایسه گرها، تنظیم اولیه دستگاه بوسیله سنجه های مرجع انجام می شود. سنجه های مرجع و قطعه کار مورد اندازه گیری باید دارای شکل هندسی یکسانی باشند. مثلاً سنجه های تخت را می توان برای سطوح بکار برد اما برای قطعات مدور باید از سنجه های استوانه ای شکل استفاده کرد. در شکل ۲۱-۳ یک سنجه حلقه ای (رینگی) برای تنظیم دستگاه جهت اندازه گیری داخلی بکار رفته است. اگر به این نکته توجه نشود پارامتر افزایش گریز هوا از سوراخ محل اندازه گیری ($O_۲$) تغییر خواهد کرد و بر قرائت مقدار فشار در لوله مانومتر تأثیر می گذارد. از جمله عیوب این مقایسه گر، پایین بودن سرعت پاسخ آن در برخی شرایط استفاده از دستگاه است. روشن است که اگر حجم هوا در سیستم افزایش یابد پاسخ آن به تغییر فشار و در نتیجه قابلیت تراکم آن کاهش می یابد. البته زمانی که طول نهایی مسیر عبور هوا کوتاه است این پارامترها ارتباط زیادی با هم ندارند ولی مثلاً در کنترل ابعاد یک ماشین ابزار که مسیر حرکت هوا نسبتاً زیاد است در دستگاه نقصان ایجاد می شود.

<u>مقایسه گرهای بادی که با سرعت جریان هوا کار می کنند:</u>

دستهٔ دوم از مقایسه گرهای بادی آنهایی هستند که بر پایهٔ سرعت جریان هوا کار می کنند. این سیستم فاقد سوراخ کنترل مثل $O_۱$ است (شکل۱۹-۳). در عوض با اندازه گیری سرعت جریان هوای عبور کننده از سیستم، تغییر جزئی در مساحت مؤثر گریز هوا برای سوراخ $O_۲$

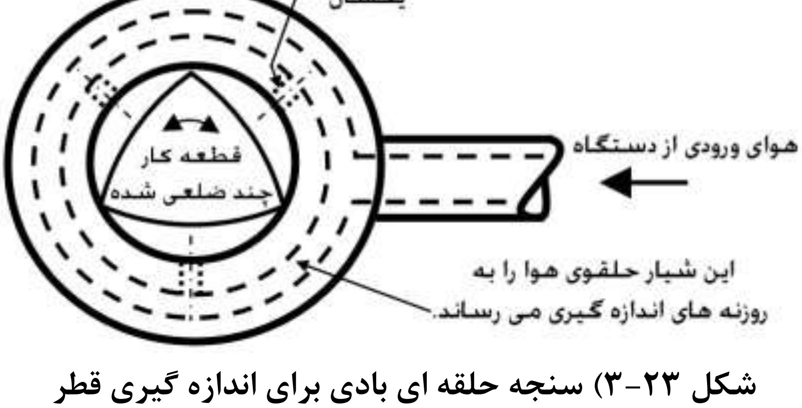
اندازه گیری می شود تا بتوان میزان تغییر در مقدار جریان هوا را یافت. شکل۲۲-۳ این سیستم را نشان می دهد.



شکل ۲۲-۳) مقایسه گر نیوماتیکی که بر اساس سرعت جریان هوا کار می کند.

هوای موجود در منبع ذخیره، تصفیه و فشار آن تنظیم می شود. سپس از درون یک لوله شیشه ای درجه بندی شده که قطر داخلی آن به طور یکنواخت کوچک می شود عبور و شاخص شناور موجود در شیشه را جابه جا می کند (سرعت هوا در لوله ثابت است). سپس هوا از میان سوراخ کله گی دستگاه (محل اندازه گیری) فرار می کند. حال به کمک یک سنجه مرجع با اندازه و شکل هندسی مناسب می توان جریان هوای عبور کننده از سیستم و در نتیجه دستگاه را تنظیم نمود. هر تغییر جزئی در اندازه قطعه کاری که اندازه گیری می شود موجب تغییر جزئی در مقدار جریان عبوری از سیستم می گردد. این کار به وسیلۀ تغییر در سطح مقطع مؤثر سوراخ اندازه گیری انجام می شود. این تغییر نیز به صورت تغییر در ارتفاع شناور (که بوسیله درجه بندی خطی تعبیه شده قابل خواندن است) ظاهر می گردد. این سیستم می تواند تمام کارهای سیستم فشار از عقب را انجام دهد. در عین حال علاوه بر سادگی، دارای سرعت پاسخ گویی بیشتری است که این سرعت به طول مسیر بستگی ندارد.

مزیت هر دو سیستم ذکر شده آن است که سوراخ کله گی دستگاه هیچ تماس فیزیکی با سطح قطعه کار ندارد و در نتیجه احتمال ایجاد صدمه به سطح تماس قطعه کار از بین می رود. مزیت دیگر آنها نشان دادن شکل هندسی قطعه کار است که به این ترتیب تلرانسهای ابعادی کوچک قابل بررسی می باشد. به عنوان مثال همانطور که در شکل ۲۱-۳ دیده شد دو جت اندازه گیری (یا دو روزنۀ خروج هوا) وجود دارد که مخالف جهت یکدیگر درون یک سنجه توپی (مدور) سازگار شونده قرار دارند. این سنجه برای اندازه گیری قطرهای داخلی استفاده می شود. خروج هوا از جت ها، سنجه توپی را باد می کند تا زمانی که سنجه با ابعاد قطعه کار متناسب گردد. مثلاً برای اندازه گیری قطر سوراخ، سنجه آن قدر باد می شود که با قطر داخلی سوراخ سازگار شود. حال کله اندازه گیری ۱۸۰ درجه دوران داده می شود و اندازه گیری تکرار می گردد. به این ترتیب مشخص می شود که سوراخ تحت آزمایش به شکل یک بیضی گون ساده است. اگر مانند شکل ۲۳-۳ از یک کله گی به شکل حلقه استفاده کنیم همانطور که دیده می شود سه جت اندازه گیری خواهیم داشت که به یک فاصله از هم قرار دارند. به کمک این وسیله می توان محور نشان داده شده را اندازه گیری نمود. شکل محور تقریباً یک سه ضلعی (یا به طور کلی چند ضلعی گون) است. با چرخش محور به اندازۀ ۱۲۰ درجه می توان قطر متوسط آن را به دست آورد. به همین ترتیب می توان قطعه کارهای دیگری که به صورت چند ضلعی ناقص هستند را اندازه گیری کرد. با گردش حلقه اندازه گیری بکار برده شده بروی قطعه کار، مطمئن می شویم حلقۀ اندازه گیری که در واقع یک سنجه توپی مانند شکل ۲۱-۳ می باشد بخوبی با کار تماس دارد.

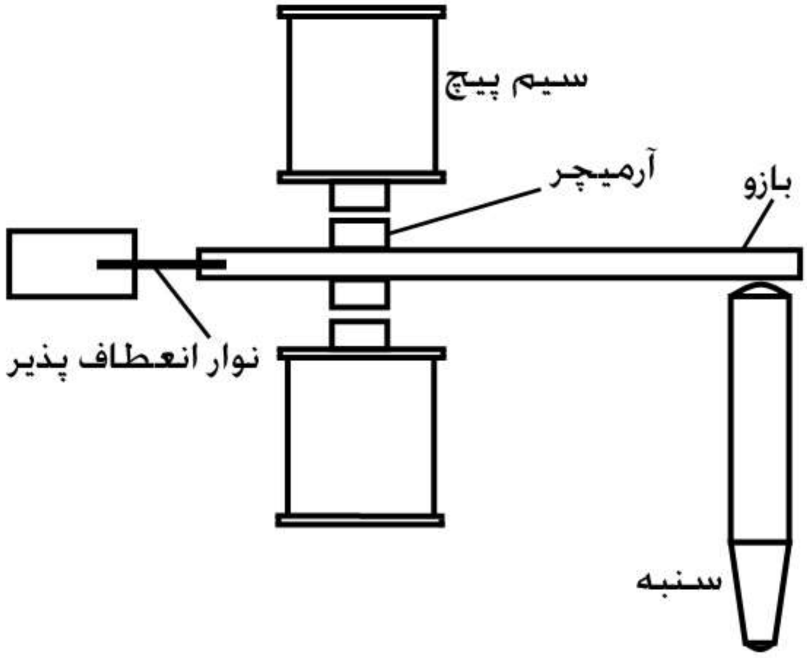


شکل ۲۳-۳) سنجه حلقه ای بادی برای اندازه گیری قطر و بررسی چند ضلعی واری تنظیم شده است.

مقایسه گرهای الکتریکی

عموماً این مقایسه گرها بر اساس کاربرد پل وِتْسْتون در یک مدار D.C کار می کنند. هر جابجایی در موقعیت آرمیچر متصل به بازوی دستگاه، تعادل مقاومت های الکتریکی پل وتستون (در هر بازوی آن) را برهم می زند. عامل برهم زننده این تعادل، حرکت سنبهٔ اندازه گیری است. با جابجایی سنبه، عدم تعادل مدار باعث می شود شدت جریانی پدید آید که بوسیلهٔ یک میکرو آمپرمتر درجه بندی شده، بر حسب واحدهای خطی اندازه گیری می شود.

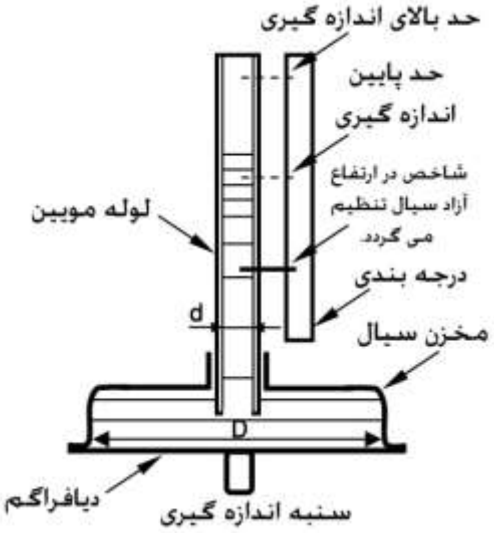
شکل ۲۴-۳ اصولی مشابه اصول فوق را برای یک مدارA.C نشان می دهد. با جابجایی سنبه، آرمیچر پس زده می شود و در نتیجه اندوکتانس (ظرفیت القای مغناطیسی-م) یک جفت سیم پیچ که بروی یکی از بازوهای پل وتستون قرار دارد بطور جزئی تغییر می کند. در شکل دیده می شود که سنبه، بازویی را که بین سیم پیچها سوار شده است و بروی یک نوار باریک فولادی قابل خم شدن قرار دارد پس می زند. بازو، حامل یک آرمیچر است و اندوکتانس سیم پیچها به جابجایی آرمیچر بستگی دارد. در حالت تعادل، درجه بندی دستگاه بروی صفر تنظیم می گردد. سپس شدت جریان حاصل از عدم تعادل ایجاد شده با حرکت سنبه، تقویت می گردد و بروی یک درجه بندی بر حسب واحد های خطی نشان داده می شود. با این سیستم، بزرگنمایی ۳۰۰۰۰ برابر بدست می آید.



شکل ۲۴-۳) کله گی اندازه گیری برای یک مقایسه گر الکتریکی

مقایسه گر جابجایی مایع

یک سوراخ ریز در یک لولۀ مویین ایجاد شده است. انتهای لوله در یک محفظه با سطح مقطعی نسبتاً بزرگ که حاوی یک مایع با غلظت کم می باشد قرار دارد. کف محفظه با یک دیافراگم که به وسیله فشار انتقالی از سنبۀ اندازه گیری قابل تغییر شکل می باشد پوشیده شده است.



شکل۲۵-۳) اصول مقایسه گر جابجایی مایع پرست ویچ (Prest wich)

با بزرگ نمایی تقریبی $\frac{D^2}{d^2}$

تغییر شکل در دیافراگم باعث می شود مقدار کمی مایع از محفظه به داخل لوله مویی جابجا گردد. در نتیجه سطح مایع در لوله بالا می رود تا بالاخره در نقطه ای بالاتر از ارتفاع آزاد مایع ثابت باقی می ماند. به کمک درجه بندی تعبیه شده بروی لوله که حدود اندازه گیری (بیشترین و کمترین حد اندازه گیری) آن مشخص شده است می توان میزان جابجایی مایع را یافت. برای تعیین حدود اندازه گیری از یک سنجه مرجع استفاده می شود. بزرگنمایی این سیستم عبارت است از :

بزرگنمایی مقایسه گر جابجایی مایع = $\frac{D^2}{d^2}$

D سطح مقطع محفظه و d سطح مقطع لوله مویین است.

در این دستگاه نقایصی به شرح زیر وجود دارد :

۱- سطح مایع در اثر تغییرات دما به مانند دماسنج تغییر می کند. هر تغییری در دما، سطح آزاد مایع را تغییر می دهد و ارتفاع آن و حد پایینی باید دوباره تنظیم شود.

۲- وجود ناتوانیهایی ناشی از عملکرد دیافراگم و غلظت مایع در دستگاه

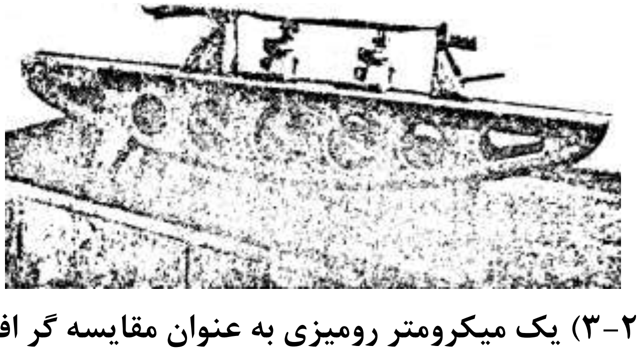
۳- نیروی تغییر شکل دیافراگم در واحد اندازه گیری ثابت نیست. بنابراین با افزایش مقاومت معین دیافراگم، نیروی اندازه گیری افزایش می یابد.

طراحی و بکارگیری ماشین های اندازه گیری

وسایل اندازه گیری که بررسی شد (با اندک استثنایی) دارای دامنه اندازه گیری در حدود ۲۵۰mm می باشند. اما بیشتر قطعه کارهای مورد اندازه گیری، ابعادی بزرگتر از این مقدار دارند. برای همین ماشینهای اندازه گیری با طراحی های گوناگون ساخته شده اند. ساده ترین آنها بر پایه استفاده از میکرومتر رومیزی است. این وسیله، طول یک سنجه مرجع را با قطعه کار مقایسه می کند و اختلاف آنها را نشان می دهد.

مقایسه گرهای افقی طول

یک نمونه نسبتاً ساده از این نوع ماشین در شکل ۲۶-۳ نشان داده شده است.



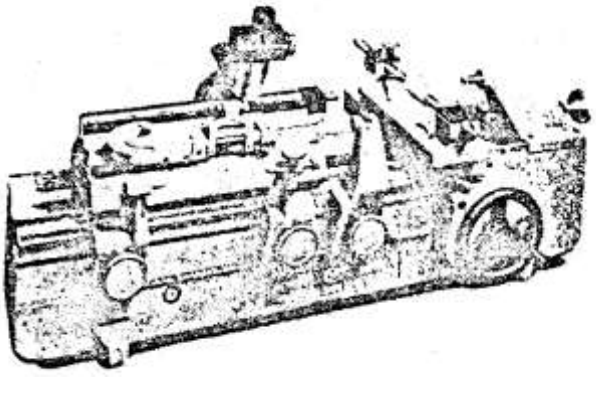
شکل ۲۶-۳) یک میکرومتر رومیزی به عنوان مقایسه گر افقی طول

این مقایسه گر در حقیقت نوعی میکرومتر رومیزی توسعه یافته است و در فصل ۸ به هنگام بررسی اندازه گیری پیچ بطور کامل شرح داده خواهد شد. این وسیله معمولاً برای مقایسهٔ

طولهای بزرگتر از یک متر بکار می رود. اجزای آن به طور کامل مشابه میکرومتر رومیزی است. علاوه بر این در امتداد میز دارای شیارهای V شکل است تا بتوان فک متحرک را به دقت و به اندازهٔ مورد نیاز از فک ثابت دور نمود. همچنین می توان بروی آن یک ساعت اندازه گیری متصل کرد. توجه شود که هنگام اندازه گیری میله ها در یک سطح افقی، تکیه گاههای دستگاه باید L ۰/۵۷۷ (L= طول میله) از یکدیگر فاصله داشته باشند (شکل۲ از فصل ۱). تکیه گاههایی که در شکل ۲۶-۳ نشان داده شده اند V شکل می باشند و ارتفاع و فاصله آنها از هم قابل تنظیم است. برای آن که تکیه گاه ها هم ارتفاع شوند میله را بروی آنها قرار می دهیم. سپس به کمک حرکت ساعت اندازه گیری بروی میله، افقی بودن و در نتیجه هم ارتفاع بودن تکیه گاهها را آزمایش می کنیم. تا آنجا که امکان دارد طول سنجه مرجع باید نزدیک به قطعه کار باشد تا از حرکت زائد پیچ میکرومتر اجتناب شود. همچنین لازم است که قبل از هر قرائتی برای تثبیت دما فکری کنیم.

ماشین های اندازه گیری یونیورسال

از این دسته ماشینها، انواع گوناگونی وجود دارد که محدودهٔ وسیعی از آنها را ماشینهای اندازه گیری یونیورسال تشکیل می دهد. یک نمونه از این ماشین ها در شکل ۲۷-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲۷-۳) ماشین اندازه گیری یونیورسال (با اجازهٔ چاپ از Societe Genevoise)

اصول کار بر پایه قرائت تغییرات، بروی درجه بندی بسیار دقیق دستگاه، بوسیله یک میکروسکوپ است. این تغییرات در اثر حرکت سندان اندازه گیری ماشین ایجاد می شود. در این دستگاه درجه بندی با محور سندان اندازه گیری هم راستا است و در نتیجه اصل مسیر (بخش ۱-۴-۳) رعایت شده است. این ماشین می تواند طول، قطر، رزوه، قطعه های صاف و مسطح و قطعه های مخروطی را با دقت بالا اندازه گیری نماید. در تهیه این ماشینها دو سیستم اندازه گیری هماهنگ بکار می رود و همچنین استانداردهای خطی طول در آنها مورد استفاده قرار گرفته است. برای جلوگیری از خراب شدن درجه بندی دستگاه در اثر تماس فیزیکی یا اتمسفر، بهتر است آن را در محفظه ای تحت پوشش قرار داد. این مطلب در مورد سنجه ها نیز باید رعایت گردد.

میکروسکوپهای فتوالکتریک

با توسعه میکروسکوپهای فتوالکتریک، دقت قرائت ماشینهای اندازه گیری که بر پایه استانداردهای خطی کار می کنند تا حد زیادی افزایش یافته است. اصول کار این نوع ماشینهای اندازه گیری، تصویر کردن یک تار مویی بروی درجه بندی یک میکروسکوپ است. لازم به ذکر است که در این روش نیز ایجاد خطا امکان پذیر می باشد چرا که در هر حال بر پایه علوم تجربی قرار دارد.

کنترل خودکار ماشین

از آنجا که احساس می شود مباحث اندازه گیری و کنترل ماشین اندازه گیری به یکدیگر بسیار نزدیک هستند ناگزیر مطالبی در زمینۀ کنترل ماشین باید ذکر شود. در حقیقت کنترل ماشین مربوط به کتابهای دیگری است و در اینجا امکان بررسی تفصیلی آن وجود ندارد. فرض کنید یک ماشین کار برای تهیه قطعه کاری با ابعاد درست باید از روش زیر پیروی کند :

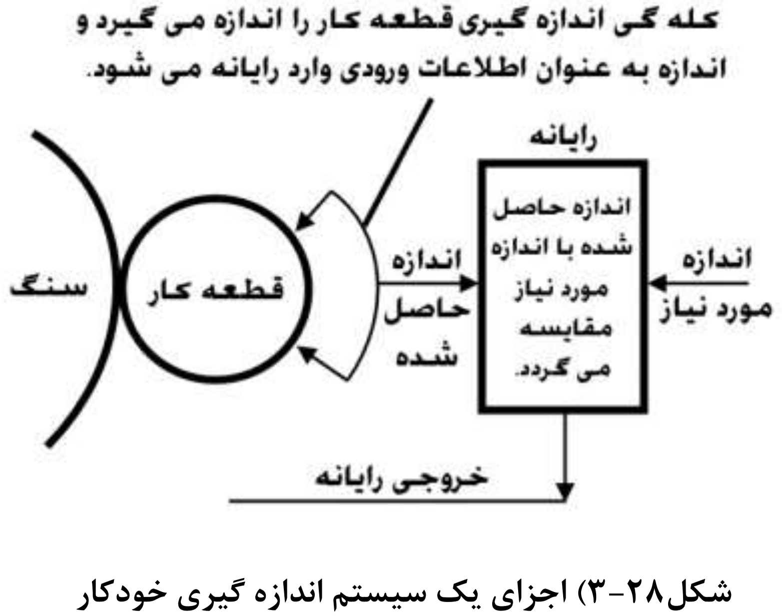
۱- قطعه کار را اندازه گیری نماید.

۲- اختلاف بین اندازه واقعی و اندازه مورد نیاز را محاسبه کند.

۳- میز کشویی عرضی را به اندازۀ نصف این مقدار حرکت دهد.

۴- عمل براده برداری را تنظیم و آن را اجرا نماید.
۵- اندازه نهایی را بررسی کند.

در اندازه گیری خودکار این فرایند بطور پیوسته انجام می شود. در شکل ۲۸-۳ نمونه دیگری را مشاهده می کنید که در آن قطعه کار بوسیلهٔ یک سنگ سنباده پرداخت می شود. یک اندازه گیر بطور مرتب، قطر قطعه کار را اندازه می گیرد و داده ها را به رایانه منتقل می کند. رایانه فوراً داده های ورودی را با اندازه نهایی مورد نیاز مقایسه می کند و به کمک وسایل خروجی خود، دستگاه سنگ زنی را کنترل می نماید. روشن است که در چنین سیستمی وسیله اندازه گیری بسیار مهم می باشد چرا که اندازه های ارائه شده بوسیله آن به عنوان ورودی رایانه محسوب می گردد. در نتیجه این وسیله باید با دقت بالایی عمل اندازه گیری را انجام دهد. انواع مقایسه گرهای بادی فشار از عقب را می توان در چنین مواردی بکار برد. بعضی از شرکتها مانند شرکت Mercer Air Gauge این وسایل را با سیستم اندازه گیری خودکار ترکیب کرده اند. همچنین استفاده از اندازه گیرهای الکتریکی و میکروسکوپ های فتوالکتریک نیز در سیستمهای کنترل خودکار مفید می باشد. در ضمن استانداردهای خطی مناسبی نیز باید بکار رود.



شکل۲۸-۳) اجزای یک سیستم اندازه گیری خودکار

فصل چهارم

اندازه گیری زاویه ای

و تقسیم مـــدوّر

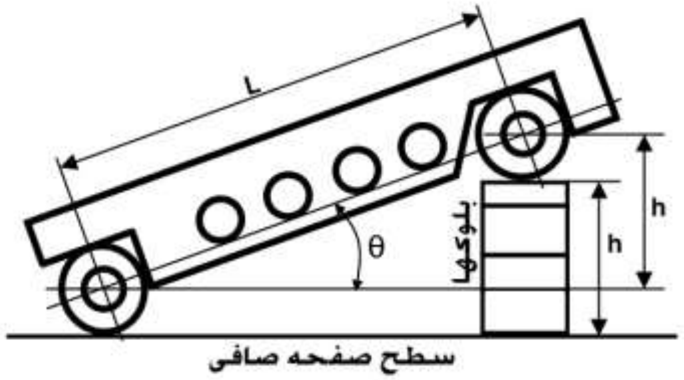
(Angular Measurement and Circular Division)

مقدمه :

اندازه گیری زاویه ای و تقسیم مدور بخش مجزا و مهمی از علم اندازه گیری را تشکیل می دهد و غالباً به دو شاخه تقسیم می گردد. موضوع اندازه گیری زاویه ای در ارتباط با اندازه گیری زوایای خاص است و تقسیم مدور نیز شامل اندازه گیری زوایای داخلی یک دایره می باشد. در گذشته این دو بخش جدای از یکدیگر بررسی شده است. با این حال به نظر می رسد که این دو شاخه از علم اندازه گیری باید با هم در ارتباط باشند. به همین دلیل در این فصل، ابتدا اندازه گیری زاویه ای و به دنبال آن تقسیم مدور بررسی می گردد.

اندازه گیری زوایا از طریق اندازه گیری طول–خط کش سینوسی

در فصل ۱ گفتیم که با استفاده از وسایل اندازه گیری خطی می توان زوایا را نیز بطور دقیق اندازه گیری کرد. بکارگیری خط کش سینوسی و بلوکهای اندازه گیری مثال خوبی از این نوع اندازه گیری ها است. خط کش سینوسی در واقع خط کشی است که بروی دو استوانه با فاصلهٔ مرکز تا مرکز مشخص قرار دارد. طرح اولیه و روش کاربرد آن در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.



شکل۱-۴) خط کش سینوسی که تحت زاویه θ تنظیم شده است.

اگر L فاصله خطی محورهای دو استوانه و h ارتفاع مجموع بلوکهای اندازه گیری باشد آنگاه :

$$\sin\theta = \frac{h}{L}$$

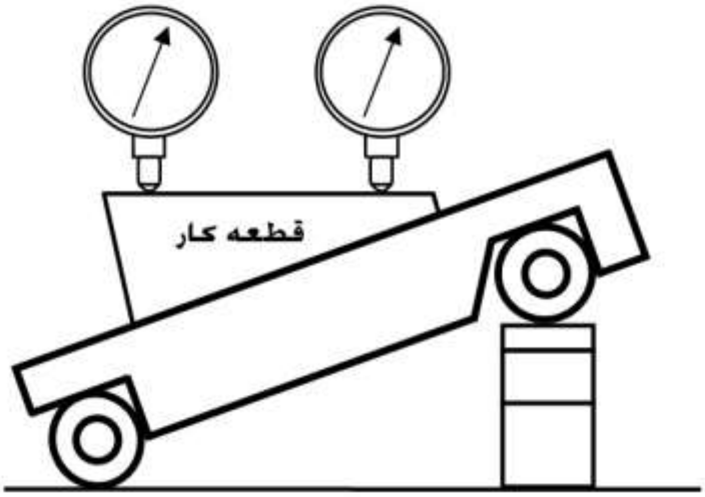
طراحی خط کش سینوسی باید شرایط زیر را داشته باشد. تا هنگامی که این شرایط برقرار هستند اندازه گیری زاویه ای دقیق خواهد بود :

۱- قطر دو استوانه باید یکسان و اصول هندسی استوانه ها در آنها بدرستی بر قرار باشد.

۲- فاصله بین محورهای دو استوانه باید دقیق و معلوم باشد. همچنین این محورها باید با یکدیگر موازای باشند.

۳- سطح بالایی خط کش باید صاف و با محور استوانه ها موازی باشد. همچنین این سطح باید از محور هر دو استوانه فاصله یکسانی داشته باشد.

این شرایط تنها با دقت در ساخت همه اجزاء برقرار می گردد و بهتر است قبل از سنگ زنی و پرداختکاری، خط کش را با عملیات حرارتی سخت کرد. با فراهم آمدن این شرایط می توان خط کش سینوسی را به همراه بلوکهای اندازه گیری برای تشخیص زوایا با دقت بالا بکار برد (مثلاً یک خط کش سینوسی که فاصلهٔ محورهای دو استوانهٔ آن با دقتی برابر یک میکرومتر، ۲۵۰ میلی متر است). بهتر است خط کش سینوسی بروی صفحه صافی از درجهٔ A قرار گیرد. اگر هر دو استوانه خط کش بروی بلوکها قرار داده شود بی نظمی های احتمالی موجود در سطح فوق نیز حذف می گردد. در شکل ۱-۴، h ارتفاع بلوکهایی است که در زیر استوانه قرار دارد. برای اندازه گیری یک زاویه، قطعه کار و خط کش باید در راستای یکدیگر قرار گیرند و اصل مسیر برقرار باشد. جهت حل این مشکل باید خط کش را به آهستگی و بر خلاف شیب قطعه کار نگاه داشت. به همین ترتیب قطعه کار نیز طوری نگاه داشته می شود که شیب آن مخالف شیب خط کش باشد. سپس یک ساعت اندازه گیری بصورت افقی بروی سطح بالایی قطعه کار حرکت داده می شود و مقادیر نشان داده شده قرائت می گردد. اگر تمام قرائتها یکسان باشد آنگاه شیب قطعه کار از فرمول $\sin\theta = \frac{h}{L}$ بدست می آید (شکل ۲-۴).



شکل۲-۴) خط کش سینوسی بکار رفته برای آزمایش زاویه یک قطعه کار گوه ای شکل

در تعیین زاویه یک قطعه کار به کمک خط کش سینوسی، با توجه به این که مقدار ارتفاع بلوکها (h) از طریق آزمون و خطا بدست می آید زمان لازم برای یافتن ارتفاع حتی از زمان تنظیم خط کش سینوسی نیز بیشتر است. با پیروی از روش منطقی زیر این زمان به سادگی قابل کاهش است :

۱- خط کش سینوسی و قطعه کار را به مانند شکل ۲-۴ طوری تنظیم کنید که سطح بالایی قطعه کار تقریباً موازی سطح میز قرار گیرد.

۲- با حرکت دادن ساعت اندازه گیری در امتداد سطح بالایی قطعه کار، تفاوت ارتفاع دو انتهای آن را معین کنید و لبهٔ انتهایی را که پایین تر قرار گرفته است بیابید.

۳- به فرض آن که در شکل ۲-۴ انتهای سمت راست از خط کش سینوسی پایین تر باشد با قرار دادن یک بلوک اندازه گیری ارتفاع آن را افزایش دهید. اندازه این بلوک برابر است با حاصل ضرب اختلاف مقادیر قرائت شدهٔ ساعت اندازه گیری در دو انتهای قطعه کار در نسبت طول خط کش سینوسی به طول قطعه کار.

به عنوان مثال فرض کنید که انتهای سمت راست به اندازهٔ ۰/۰۱ mm پایین باشد. اگر طول خط کش سینوسی ۲۵۰mm و طول قطعه کار ۱۰۰mm باشد در این صورت مقدار عددی که باید به ارتفاع بلوکها اضافه شود $0.01\times\frac{250}{100}=0.025mm$ خواهد بود. اگرچه با این روش نمی توان خط کش را کاملاً درست تنظیم کرد اما از روش آزمون و خطا بسیار سریع تر است. هیچ

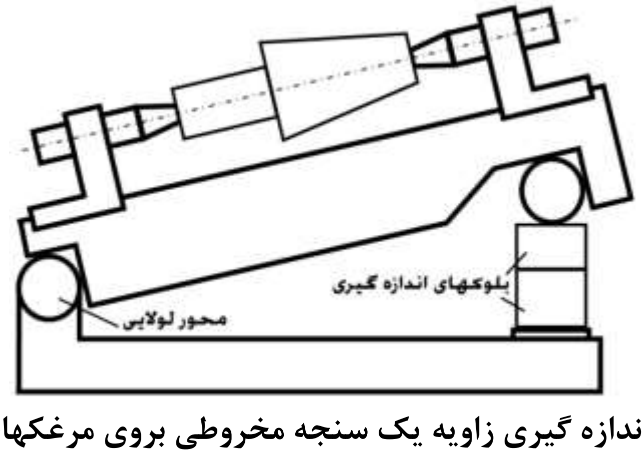
خط کش سینوسی نباید برای زوایای بزرگتر از ۴۵ درجه بکار رود. در غیر این صورت خطای ناشی از فاصلۀ مرکز تا مرکز استوانه ها و خطای بلوکها آشکار می شود و نتیجه اندازه گیری، بسیار اغراق آمیز خواهد بود. می توان نموداری از خطای زاویه ای بر حسب اندازۀ اسمی زاویه (با فرض وجود خطای ۰/۰۲mm در تمامی مقادیر h) رسم نمود. زوایای بزرگتر را می توان با تفریق از زاویۀ قائمه (متمم زاویه) نشان داد.

میز سینوسی

میز سینوسی در حقیقت نوعی خط کش سینوسی توسعه یافته می باشد و روش تنظیم آن مشابه تنظیم خط کش سینوسی است. خط کش سینوسی تنها برای قطعه کارهای نسبتاً کوچک و کم وزن مناسب است اما میز سینوسی سطح کار بزرگتری دارد و بسیار نیرومندتر از خط کش سینوسی می باشد در نتیجه برای قطعه کارهای سنگین و بزرگ مناسب است. وسیله توسعه یافته دیگر، میز سینوسی مرکب می باشد که ترکیب دو میز سینوسی است. محورهای این دو میز، نسبت به یک دیگر زاویه قائمه دارد و هر دو بروی یک پایه مشترک جای گرفته اند. جهت تنظیم زاویه مرکب، آن را در دو صفحه عمود بر هم به زوایای ویژه ای تجزیه می کنند. سپس هر میز بر اساس زاویه خود تنظیم می شود.

مرغک سینوسی

برای آزمایش قطعه کارهای مخروطی که هر دو انتهای آنها مته مرغک زده شده است مرغک سینوسی بکار می رود (شکل۳-۴).



شکل۳-۴) اندازه گیری زاویه یک سنجه مخروطی بروی مرغکهای سینوسی

از آن جا که مرغکها به طور دقیق از اصل مسیر پیروی می کنند قطعه کار به نحو صحیحی در راستای خط اندازه گیری قرار می گیرد. اصول تنظیم این وسیله به مانند خط کش سینوسی است اما مشکلی که در اینجا ممکن است پیش بیاید هم محور نبودن قطعه کار و مرغکها به هنگام سوار کردن قطعه کار بروی دستگاه است. برای رفع این مشکل، ساعت اندازه گیری را بروی قطعه کار (در اینجا مخروط) قرار می دهیم و به آرامی قطعه کار سوار شده بروی مرغکها را می چرخانیم تا به نقطه ای برسیم که در آن ساعت بیشترین مقدار را نشان دهد. سپس در همین حالت زاویه قطعه کار توسط بلوکهای اندازه گیری محاسبه می گردد. در مرحله بعد قطعه کار ۱۸۰ درجه چرخانده و این محاسبه تکرار می شود. میانگین دو زاویه محاسبه شده مشابه زاویه قطعه کار خواهد بود. لازم به ذکر است که اگر قطعه کار از راستای اندازه گیری خارج گردد مقدار اندازه گیری شده مشابه اندازه حقیقی و نه خود مقدار حقیقی می باشد. در نتیجه می توان این اندازه گیری را نپذیرفت و آن را رد کرد.

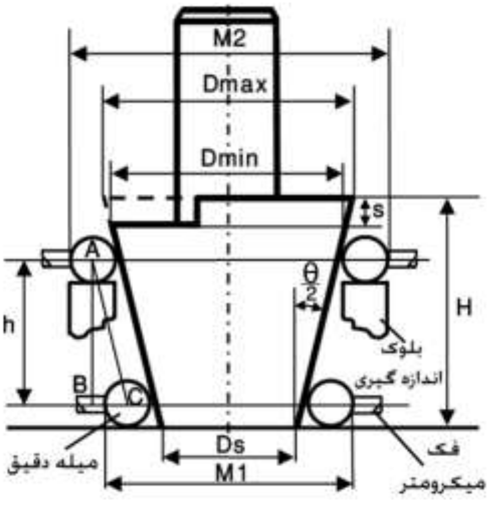
اندازه گیری سنجه های مخروطی

سنجه های مخروطی معمولاً برای اندازه گیری مخروط یا زاویه موجود در سوراخ یک محور به کار نمی روند بلکه جهت یافتن قطر سطح مقطع خاصی از قطعه کار که در محدوده معینی قرار دارد استفاده می شوند. قطر این سنجه ها در هر یک از دو انتهای بخش مخروطی متفاوت است. در حقیقت این سنجه ها مجموعه ای از قطرهای مختلف هستند که بزرگترین و کوچکترین قطرهای بخش مخروطی آنها، حدود حداکثر و حداقل این مجموعه محسوب می گردد. به این ترتیب اندازه گیری یک سنجه توپی یا حلقه ای مخروطی به دو مرحله تقسیم می شود : ۱- تعیین زاویه مخروط و ۲- تعیین قطرهای مخروط

اندازه گیری سنجه های توپی مخروطی (Taper plug gauges)

معمولاً زاویه مخروط یک سنجه توپی مخروطی را با استفاده از مرغکهای سینوسی (بخش۲-۲-۴) تعیین می کنند. اگر این وسیله موجود نباشد می توان این زاویه را به روش اندازه گیری قطر در فاصلهٔ مشخصی از لبه سنجه معین کرد. اندازه گیری معمولاً به وسیلهٔ استوانه هایی که

به طور دقیق میزان (کالیبره) شده اند و دارای قطرهای یکسان هستند انجام می گیرد. برای جلوگیری از جدا شدن استوانه ها از سنجه، بلوکهای اندازه گیری بکار می رود (شکل۴-۴).



شکل۴-۴) اندازه گیری زاویه سنجه توپی مخروطی

در مثلث ABC از شکل۴-۴، h ارتفاع بلوکها است و $BC=(M_2-M_1)/2$ که M_1 و M_2 در شکل نشان داده شده اند. به این ترتیب :

$$tg\frac{\theta}{2}=\frac{BC}{AB}=\frac{M_2-M_1}{2h} \qquad (1)$$

بنابراین زاویه مشابه زاویه مخروط با اندازه گیری مستقیم قابل تعیین است. برای یافتن بزرگترین و کوچکترین قطر بخش مخروطی ابتدا به اندازهٔ D_s (قطر کوچک در شکل۵-۴) نیاز می باشد. شکل ۵-۴ قطر کوچک سنجه را به هنگام اندازه گیری M_1 نشان می دهد. در شکل می توان دید که $M_1=Ds+2r+2x$ و همچنین از شکل ۵-۴ داریم :

$$tg(\frac{90-\frac{\theta}{2}}{2})=\frac{r}{x} \Rightarrow x=r\times Cotgt(\frac{90-\frac{\theta}{2}}{2})$$

$$\therefore M_1=D_S+2r(1+cotg(\frac{90-\frac{\theta}{2}}{2})) \Rightarrow M_1=D_S+d(1+cotg(\frac{90-\frac{\theta}{2}}{2}))$$

که d = قطر استوانه اندازه گیری مورد استفاده است. در نهایت داریم :

$$\therefore D_S = M_1 - d\left(1 + \cot g\left(\frac{90-\frac{\theta}{2}}{2}\right)\right)$$

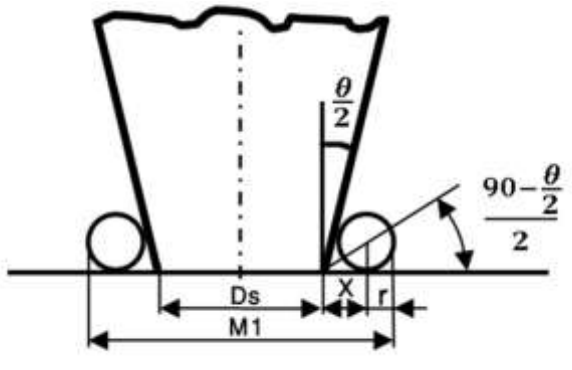
در معادله (۱) دیده می شود که $tg\frac{\theta}{2}$ معادل با میزان افزایش شعاع برحسب واحد طول است. بنابراین :

$2tg\frac{\theta}{2}$ = میزان افزایش قطر (۲ برابر شعاع-م) بر حسب واحد طول

$$\therefore D_{MAX} = D_S + 2H.tg\frac{\theta}{2}$$

$$D_{MIN} = D_S + 2(H - S)tg\frac{\theta}{2}$$

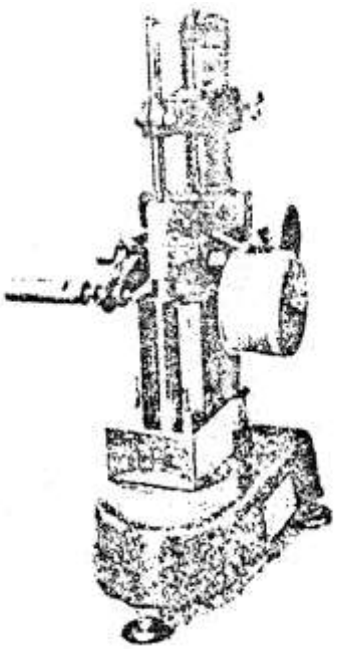
که H ارتفاع سنجه و S ارتفاع پله انتهای آن است. اگر مقدار M_3 را بین M_1 و M_2 (میانگین آنها) در نظر بگیریم آنگاه دو مقدار برای θ بدست می آید (یعنی در رابطه (۱) یک بار M_1 و M_3 و یک بار M_2 و M_3 قرار گیرد تا دو مقدار θ بدست آید-م). اگر این دو مقدار با هم مساوی نباشد شکل هندسی سنجه مخروطی صحیح نیست به عبارت دیگر کناره های آن مستقیم نمی باشد. با در نظر گرفتن مقادیر M_1 و M_2 و M_3 در موقعیتهای مختلف از سنجه می توان به روش مشابه، گردی مخروط را نیز بررسی کرد.



شکل۵-۴) اندازه گیری قطر کوچک سنجه توپی مخروطی

ماشین اندازه گیری مخروط

استفاده از ماشین اندازه گیری مخروط بهتر از بکارگیری روشهایی است که توضیح داده شد. تصویر این ماشین در شکل ۶-۴ دیده می شود. این ماشین از میکرومتری با دقت ۰/۰۰۰۲ میلی متر و یک شاخص که می تواند در امتداد خط اندازه گیری شناور باشد تشکیل شده است. کله گی دستگاه بروی یک ستون سخت و سنگین به بالا و پایین حرکت می کند و قطعه کار بروی پایه سنگینی که سطح پرداخت شده ای دارد قرار می گیرد و به وسیله یک مرغک از بالا در وضعیت لازم نگاه داشته می شود. اگر هنگام کار با دستگاه به اندازه کافی دقت شود میکرومتر نتایج دقیقی ارائه می کند.



شکل ۶-۴) ماشین اندازه گیری مخروط

(با اجازه چاپ از شرکت Coventry Gauge and Tool)

اندازه گیری سنجه های حلقه ای مخروطی

مشابه روش بکار برده شده در سنجه های توپی مخروطی باز هم در اینجا می توان دید که :

$$tg\frac{\theta}{2}=\frac{M_1-M_2}{2h}$$

ولی در این حالت داریم :

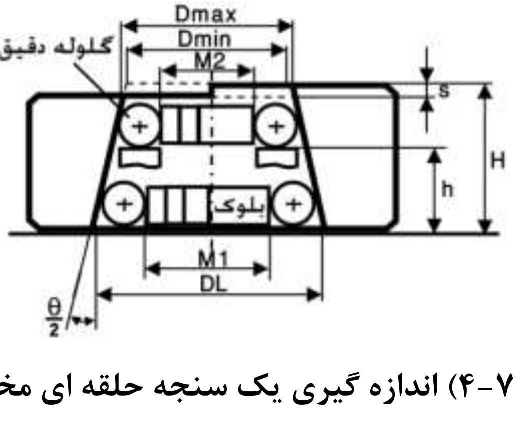
$$D_L = M_1 + d\left(1 + \operatorname{cotg}\left(\frac{90 - \frac{\theta}{2}}{2}\right)\right)$$

$$D_{MAX} = D_L - 2(H - S)\,tg\frac{\theta}{2}$$

$$D_{MIN} = D_L - 2H\,tg\frac{\theta}{2}$$

در این روش دقت تا حد زیادی به تماس صحیح بین گلوله ها و بلوکهای اندازه گیری بستگی دارد. انجام صحیح این روش با تمرین و تجربه حاصل می شود. لازم به ذکر است که در اندازه گیری مقادیرM، چهار نقطه تماس موجود است (فرض می کنیم فشار بین اجزاء، الاستیک باشد) که در بلوک اندازه گیری بزرگتر، نیروی لبه ای بیشتری وارد می شود (شکل۷-۴).

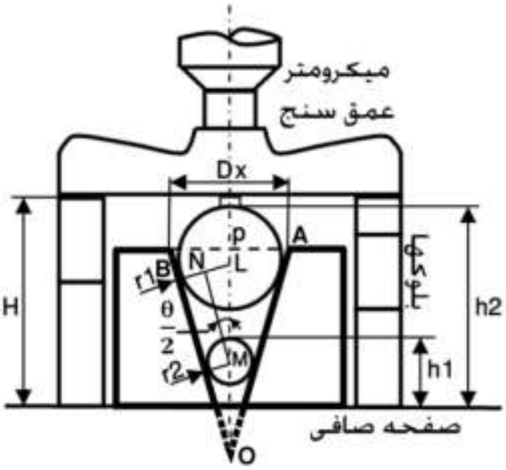
به نظر ایجانب (مؤلف) بهترین روش کار شروع با بلوکهایی کوچکتر از اندازه لازم است. با قرار دادن چنین بلوکهایی آزادی گلوله ها را بررسی می کنیم (می توان گلوله ها را با یک میل بافتنی جدا کرد). سپس اندازه بلوک را ۰/۰۱ mm به ۰/۰۱ mm افزایش می دهیم. به این ترتیب حرکت آزاد گلوله ها به تدریج کاهش می یابد تا در نهایت حرکت آنها بطور کامل مهار گردد. در این حالت بهتر است که تمام اجزای آزمایش (گلوله ها و بلوکهای اندازه گیری) مورد بررسی قرار گیرد و سپس محاسبات لازم انجام شود. استفاده از این روش، معقولتر و بهتر از بکار گیری روشهای حدسی است.



شکل ۷-۴) اندازه گیری یک سنجه حلقه ای مخروطی

اندازه گیری سوراخهای مخروطی

روشی که در بخش پیش شرح داده شد فقط زمانی کاربرد دارد که سوراخ مخروطی قطر بزرگی داشته باشد تا بتوان گلوله ها و بلوکهای اندازه گیری را به آسانی در آن جای داد. اما برای مخروط های با قطر کوچکتر از روشهای اندازه گیری زاویه ای و دیامترال (قطری) استفاده می شود (شکل۸-۴).



شکل۸-۴) اندازه گیری یک سوراخ مخروطی

با توجه به شکل، این روش بر مبنای اندازه گیری ارتفاع گلوله هایی با قطرهای متفاوت است که مستقیماً درون مخروط قرار داده شده اند. فاصلهٔ مرکز تا مرکز گلوله ها یعنی LM عبارت است از :

$$LM = h_2 - h_1 - r_1 + r_2$$

و

$$\mathrm{Sin}\frac{\theta}{2} = \frac{NL}{LM} = \frac{r_1 - r_2}{h_2 - h_1 - r_1 + r_2}$$

بنابراین زاویه مخروط پیدا می شود. برای تعیین یک نواختی مخروط می توان از گلوله سومی استفاده کرد که تقریباً در وسط طول مخروط قرار داده می شود. سپس محاسبات بالا دوباره انجام می گیرد (اگر زاویه θ بدست آمده از گلوله اول و دوم با زاویه θ بدست آمده از گلوله اول و سوم برابر باشد مخروط یک نواخت است). برای یافتن D_x در انتهای بزرگ مخروط فرض

می شود O رأس زاویه مخروط باشد. در مثلث OPA داریم : $D_x = 2(OP.tg \frac{\theta}{2})$ و $\frac{OL}{LM} = \frac{r_1}{r_1 - r_2}$ و $OP = OL + PL$

(که PL=r۱-(h۲-h۳) و از تشابه دو مثلث OBL و MNL داریم $\frac{OL}{LM} = \frac{r_1}{r_1 - r_2} \Rightarrow OL = \frac{r_1}{r_1 - r_2} \times LM \Rightarrow OL = \frac{r_1}{r_1 - r_2} \times (h_2 - h_1 - r_1 + r_2)$ –م).

در این روش نسبت به روش قبل (بخصوص وقتی که زاویه مخروط کوچک است) مشکلات بیشتری وجود دارد. اثر تماس گلوله ها و تغییر شکل الاستیک منتج از آن، هنگام اندازه گیری مقادیر h_1 و h_2، هم برای گلوله ها و هم برای سنجه ها باعث ایجاد خطا می شود که در نهایت، محاسبه نادرست زاویه را در پی خواهد داشت. لازم به ذکر است که به هیچ عنوان نباید گلوله ها به داخل مخروط پرتاب شود. بهتر است آنها را به آرامی و به طور موازی با محور مخروط به داخل مخروط غلتاند. رعایت این نکات و رهایی از دیگر مشکلات موجود در این روش با تمرین و بدست آوردن تجربه، امکان پذیر است.

تراز دقیق

در فصل ۳ مقایسه گرهای تراز شکل بروکز بررسی شد. در این وسیله دیدیم که مبنای مقایسه ارتفاع دو بلوک اندازه گیری، حساسیت حباب یک تراز می باشد. به طور کلی تراز، وسیله ای است که برای اندازه گیری زاویه ای مورد استفاده قرار می گیرد و شامل لوله ای شیشه ای است که با ریختن مایعی در این لوله، حبابی از هوا در آن ایجاد شده است. حساسیت این نوع ترازها به شعاع لوله حاوی مایع و طول پایه تراز بستگی دارد. فرض کنید ترازی طوری درجه بندی شده است که فاصله هر درجه از درجه دیگر L باشد. همچنین شعاع لوله تراز R است. اگر یک انتهای تراز (و در نتیجه لوله حاوی مایع) تحت زاویه δ طوری منحرف گردد که حباب به اندازه یک تقسیم از درجه بندی یعنی به اندازه Lحرکت کند آنگاه (در ریاضی طول کمان، حاصل ضرب زاویه مقابل به کمان بر حسب رادیان در شعاع دایره است–م) :

$\delta = \frac{L}{R}$ (دلتا بر حسب رادیان)

به عنوان مثال اگر فاصلهٔ تقسیمات از هم ۲/۵ mm و زاویهٔ انحراف ۱۰ ثانیه باشد آنگاه :

$$10'' = (\frac{10}{3600})^{\circ} \times \frac{\pi}{180} = (\frac{10}{3600})^{\circ} \times \frac{3.14}{180} \approx 0.0000485 \quad \text{رادیان} = \frac{2.5mm}{R}$$

در نتیجه :

$$R = \frac{2.5mm}{0.0000485} \approx 51546mm$$

پس R تقریباً برابر با۵۱/۵ متر است. با کاربرد زاویه حاصل از این شعاع و در نظر گرفتن طول ۲۵۰mm برای تراز، ارتفاع x (ارتفاعی که تراز باید بالا برده شود تا حباب ۲/۵mm حرکت کند) عبارت است از:

$$0.0000485 \text{رادیان} = \frac{x}{250mm} \Rightarrow x = 0.012mm$$

به همین ترتیب با کاهش طول پایه از ۲۵۰mm، حساسیت افزایش می یابد. مثلاً اگر طول پایه از ۲۵۰ به ۱۲۵mm کاهش یابد هر درجه از تقسیم بندی ۰/۰۰۶ mm (=۲۵۰×۰/۰۰۰۰۴۸۵) را نشان می دهد. کاربرد اصلی ترازهای دقیق برای اندازه گیری مستقیم بودن و عدم پیچ خوردگی ریل های ماشین ابزار است (نه برای اندازه گیری زوایا). این موضوع در فصل ۶ به طور کامل توضیح داده خواهد شد. ولی به طور خلاصه می توان گفت که اگر تراز، ریل ماشین را در فواصلی به اندازه طول پایه اش طی کند از موقعیت اول تراز به عنوان مبنایی برای اندازه گیری ارتفاع نقاط دیگر ریل استفاده می شود. نحوه تنظیم شیشه حامل مایع، نسبت به پایه تراز، دقت تراز را تحت تأثیر قرار می دهد. در بیشتر موارد جهت انطباق صحیح شیشه حاوی مایع به هنگام نصب آن، قیدهای خاصی برای تراز بکار برده می شود. در اندازه گیریهای دقیق با تراز بهتر است فرض کنیم که در تنظیم شیشه حاوی مایع، مقداری خطا وجود دارد. با قبول این فرض، جهت اطمینان از درستی اندازه گیری، به جای یک قرائت، دو قرائت از قطعه کار صورت می گیرد. کافی است پس از قرائت اول، تراز را ۱۸۰ درجه چرخاند و دوباره در همان محل اول قرار داد و قرائت دوم را بدست آورد. میانگین این دو قرائت، خطای تراز سطح مورد اندازه گیری است.

تراز زاویه سنج (The Clinometer)

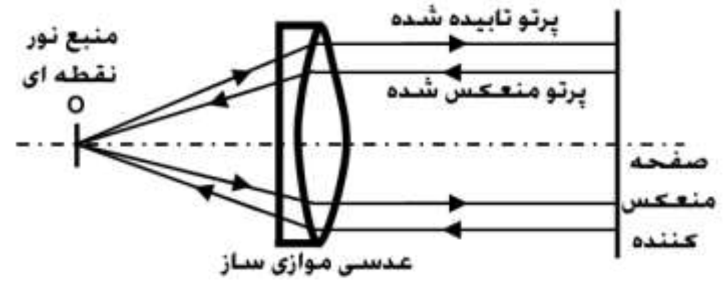
تراز زاویه سنج یا کلینومتر، حالت خاصی از کاربرد ترازهای مایع است که در آن، تراز بروی یک پایه قابل چرخش و در داخل یک محفظه قرار می گیرد و سطحی تکیه گاه دستگاه را تشکیل می دهد. کاربرد اصلی این وسیله، اندازه گیری زاویهٔ دو پیشانی مجاور یک قطعه کار است. هنگام کار، پایه دستگاه بروی یک پیشانی از قطعه کار قرار می گیرد و بدنهٔ قابل چرخش، آن قدر حرکت داده می شود تا حباب تراز در مقابل صفر قرار گیرد. زاویه چرخش لازم برای رسیدن به این حالت به وسیله یک شاخص بروی یک درجه بندی زاویه ای نشان داده می شود. به همین روش پایه دستگاه را این بار بروی پیشانی دوم قرار می دهیم و زاویه چرخش نشان داده شده به وسیله شاخص را می خوانیم. زاویه بین دو پیشانی قطعه کار، اختلاف بین قرائت های اول و دوم است. بسته به نوع دستگاه مورد استفاده می توان مقدار زاویه را تا دقت یک دقیقه بدست آورد.

استانداردهای ترازهای مایعی

استانداردهای مربوط به دقت، حساسیت، میزان سازی (کالیبره کردن)، شرایط کار و دقت سطوح در استاندارد B.S ۹۸۵ شرح داده شده است. برای قطعه کارهایی با دقت عمومی، حساسیت ″10 بسیار مفید است. جابجایی زاویه ای ۱۰ ثانیه ای باعث می شود حباب به اندازه یک تقسیم از درجه بندی حرکت کند. فاصله یک تقسیم از درجه بندی معمولاً ۲/۵ mm است.

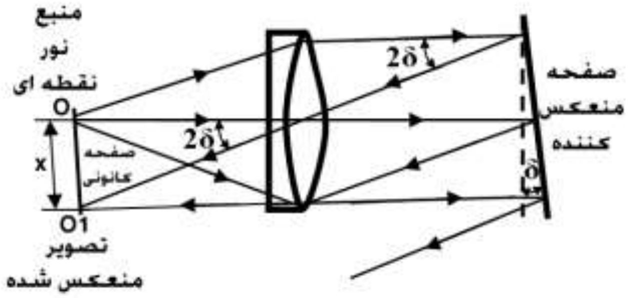
وسایل نوری برای اندازه گیری زاویه ای

برای اندازه گیری اختلاف زاویه ای کوچک، گروهی از وسایل نوری بکار می روند که اساس کار آنها بر پایه موازی سازی پرتو نور است. اگر منبع نور نقطه ای O در کانون عدسی موازی سازی قرار داده شود پرتو خروجی نور موازی خواهد بود (شکل۹-۴ قسمت a).



شکل a-۹-۴) منبع نقطه ای نور در صفحه کانونی یک عدسی موازی ساز

حال اگر این پرتو موازی به یک منعکس کننده که بر محور پرتو نور عمود است بتابد پرتو انعکاسی بروی مسیر نور اولیه بازمی گردد و دوباره در کانون جمع می شود. اما اگر صفحه انعکاسی به اندازه زاویه کوچک **δ** کج شود پرتوهای انعکاسی به اندازه **2δ** خواهند چرخید و در نقطه ای بروی صفحه ی کانونی به فاصلهٔ x از O (نقطهٔ O_1) جمع می شوند. این حالت در شکل ۹-۴ قسمت b نمایش داده شده است.



شکل b-۹-۴) تصویر یک منبع نقطه ای

که از روی یک منعکس کننده تحت زاویه، انعکاس یافته است.

اگر پرتو نور، از مرکز هندسی عدسی مورد بررسی عبور کند (که در این صورت دچار شکست در عدسی نمی شود) آنگاه می توان دید که :

$$X = 2\delta \times f \ \ mm$$

که F فاصله کانونی عدسی است. دربارهٔ این فرمول نکات مهمی وجود دارد که فوراً آشکار نمی شود. این نکات عبارتند از :

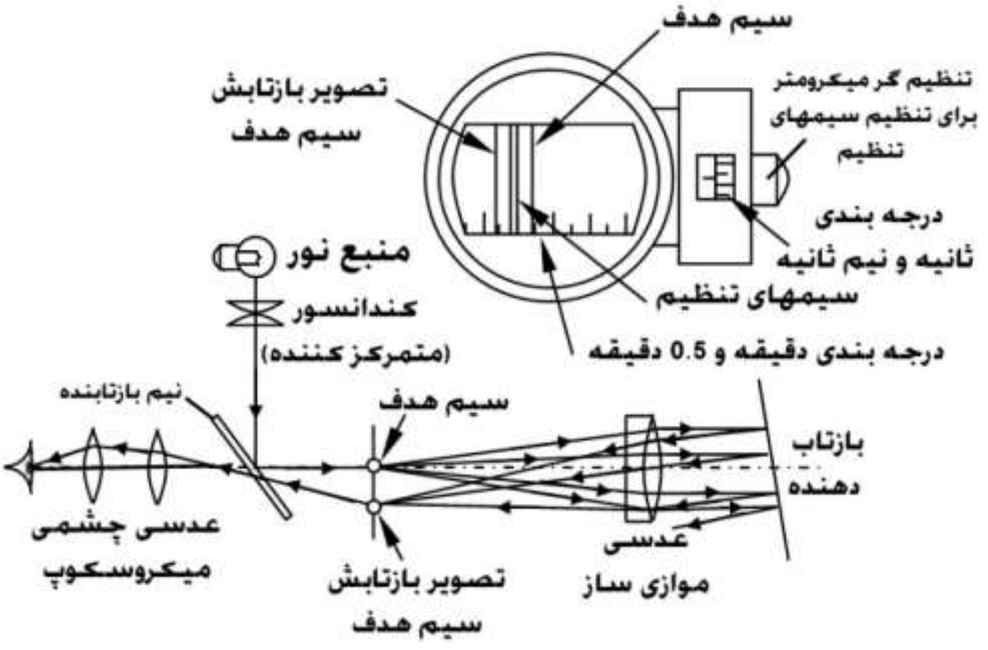
۱- فاصلهٔ بین منعکس کننده و عدسی، اثری بر فاصلهٔ x یعنی فاصلهٔ بین منبع نور و تصویر ندارد.

۲- برای حصول حساسیتهای بالاتر (یعنی بدست آوردن x بزرگتر برای انحراف زاویه ای کوچک δ) فاصله کانونی بلندتری لازم است.

۳- گفتیم که فاصلهٔ عدسی از منعکس کننده، بر قرائت x تأثیری ندارد. اما اگر در یک مقدار معلوم از δ منعکس کننده بیش از حد عقب برده شود همه پرتوهای انعکاسی به طور کامل به عدسی برخورد نمی کنند و در نتیجه تصویری تولید نمی شود. بنابراین برای داشتن میدان دید وسیع، بهتر است فاصلهٔ عدسی و منعکس کننده، کمترین مقدار ممکن باشد. رعایت این مطلب بخصوص در مقایسه گرهای نوری فصل ۳ بسیار مهم می باشد.

اتوکالی ماتور (موازی ساز خودکار = Auto-Callimator)

از آنجا که طرح تشکیل تصویر یک منبع نور نقطه ای، عملاً ممکن نیست در این وسیله، یک جفت سیم به نام سیم هدف در صفحه کانونی عدسی موازی ساز قرار داده می شود که از پشت روشن می گردد و تصویر آنها شکل می گیرد. شکل ۱۰-۴ این سیستم نوری را نشان می دهد.



شکل۱۰-۴) نمایش سیستم نوری و عدسی چشمی موازی ساز خودکار با تنظیم میکرومتر

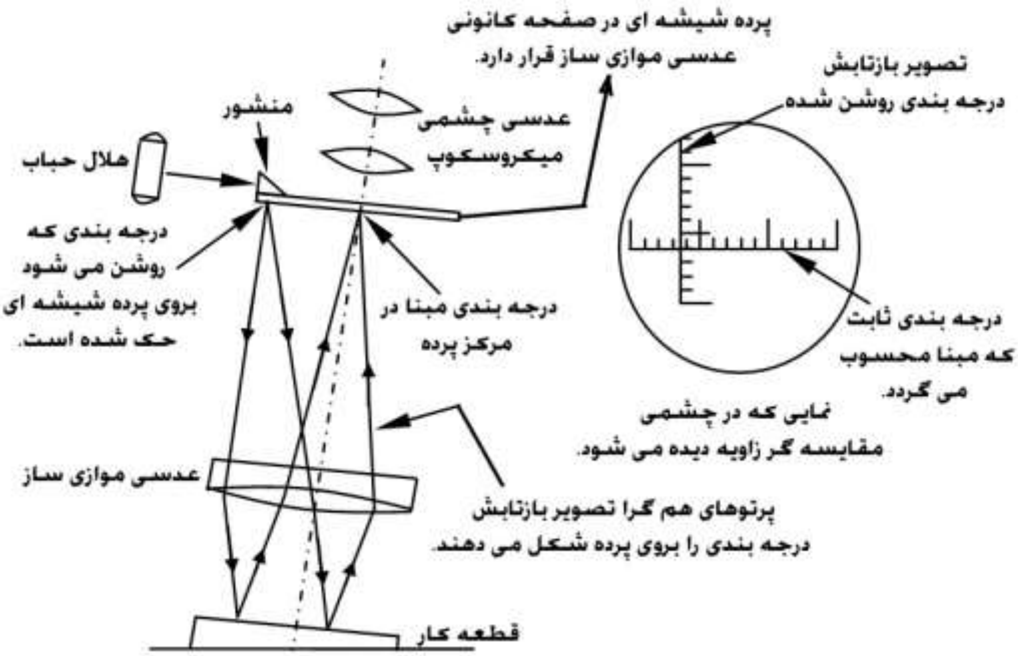
(سیم های تنظیم را طوری حرکت می دهیم که تصویر سیم هدف در بین آنها قرار گیرد سپس مقدار نشان داده شده قرائت می گردد.)

تصویر تشکیل شده از سیم هدف به یک صفحه منعکس کننده برخورد می کند و انعکاس تصویر در نقطه ای بروی صفحهٔ سیمهای هدف (صفحه کانونی) تشکیل می گردد. سیمها و تصویرشان به طور هم زمان در چشمی دیده می شود. چشمی شامل یک جفت سیم قابل تنظیم و یک صفحه درجه بندی شده می باشد. سیمهای تنظیم شونده به وسیلهٔ یک میکرومتر آن قدر جابجا می گردد تا تصویر سیم هدف بین آنها قرار گیرد. دقیق ترین درجه بندی که در چشمی می توان خواند $\frac{1}{2}$ دقیقه می باشد. استوانهٔ میکرومتر (شکل۱۰-۴) که سیمهای تنظیم شونده را در هر دور، $\frac{1}{2}$ دقیقه حرکت می دهد نیز به شصت قسمت مساوی تقسیم شده است. بنابراین یک تقسیم بندی از استوانهٔ میکرومتر نشان دهندهٔ آن است که منعکس کننده، به اندازه $\frac{1}{2}$ ثانیه کج شده است. اگر دستگاه، ارتعاش نداشته باشد و هنگام کار به حد کافی دقت شود می توان زاویه کج شدن را با دقت $0.2''$ بدست آورد. این دستگاه به طور طبیعی دامنه اندازه گیری از ۱۰ دقیقه تا ۱۰ متر دارد. به همین دلیل کاربرد این وسیله در آزمایش هم راستایی ماشین ابزار یا برای هر اندازه گیری با مقیاس بزرگ که شامل انحراف زاویه ای کوچکی است بسیار با ارزش می باشد. در فصل ۶ کاربرد این وسیله برای چنین مقاصدی بطور کامل شرح داده خواهد شد.

مقایسه گر زاویه (The Angle Dekkor)

در این کاربرد از اصل موازی سازی یک درجه بندی بوسیلهٔ منبع نور روشن می گردد بطوری که درجه بندی در صفحه کانونی عدسی موازی ساز و خارج از میدان دید چشمی میکروسکوپ باشد. سپس تصویر آن به صورت پرتو موازی به یک صفحه منعکس کننده در زیر دستگاه برخورد می کند و تصویر منعکس شده توسط عدسی در کانون جمع می شود بطوری که تصویر در میدان دید چشمی قرار گیرد. تصویر درجه بندی بروی یک درجه بندی ثابت مشابه که عمود بر تصویر روشن شده می باشد قرار می گیرد. به این ترتیب درجه بندی ثابت موجود در چشمی، میزان انحراف زاویه ای محور عمود بر محور پرتو نور را نشان می دهد. به کمک این طرح می توان خطاهای زاویه ای را در دو صفحه بررسی کرد و مهمتر از آن می توان قرائت

مربوط به سنجه مرجع و قطعه کار را به طور مشابه در یک صفحه انجام داد و مقدار خطا را در صفحه دیگر قرائت کرد. بنابراین از ایجاد خطاهای زوایه ای ترکیبی جلوگیری می شود. شکل ۱۱-۴ این سیستم نوری و آن چه که در چشمی دیده می شود را نشان می دهد.



شکل ۱۱-۴) سیستم نوری مقایسه گر (کمپراتور) زاویه

طرح فیزیکی ساده این دستگاه شامل یک سطح مبنای پرداخت شده و یک منعکس کننده می باشد. دیگر اجزای نوری در درون یک لوله قرار دارند که متصل به پایه ای قابل تنظیم است. به هنگام استفاده از این دستگاه ابتدا یک سنجه مرجع مانند خط کش سینوسی یا گروهی از سنجه های زاویه دار را (بخش ۱-۲-۵-۴ را ببینید) بروی سطح مبنای دستگاه قرار می دهند و دستگاه طوری تنظیم می گردد که روی هر دو درجه بندی مقدار یکسانی قرائت شود. سپس سنجه مرجع با قطعه کار جایگزین می گردد. جهت انعکاس بهتر، بروی سطحی از قطعه کار که مورد بررسی قرار می گیرد یک بلوک اندازه گیری با سطح پرداخت خوب قرار داده می شود. می توان این بلوک را با نوارهای الاستیک بروی قطعه کار محکم کرد. سپس قطعه کار به آرامی چرخانده می شود تا درجه بندی روشن شده در امتداد درجه بندی ثابت حرکت کند. هنگامی

که مقدار قرائت شده بروی درجه بندی ثابت همان مقداری باشد که در مرحله ی اول بوسیله سنجه مرجع قرائت شد قطعه کار دیگر حرکت داده نمی شود. میزان خطا در زاویهٔ قطعه کار، اختلاف دو مقدار خوانده شده در مرحله اول و مرحله دوم از روی درجه بندی روشن شده خواهد بود. جهت بررسی سطوحی که به طور اسمی بر هم عمود هستند نیاز به سنجه مرجع نیست. کافی است که مانند حالت قبل بروی دو سطح مورد نظر یک بلوک اندازه گیری قرار داده شود و دستگاه تنظیم گردد. اگر دو سطح کاملاً بر هم عمود باشند در چشمی دو تصویر از درجه بندی روشن شده دیده می شود که به طور عمودی در راستای یک دیگر قرار دارند و قرینه هم هستند. اگر دو سطح بر هم عمود نباشند دو تصویر درجه بندی روشن شده، در امتداد یک دیگر قرار نخواهند گرفت و فاصلهٔ بین آنها مقدار انحراف از زاویه قائمه است. در شکل (۱۲-۴) چشمی دستگاه به هنگام آزمایش تعامد دو سطح قطعه کار، نمایش داده شده است.

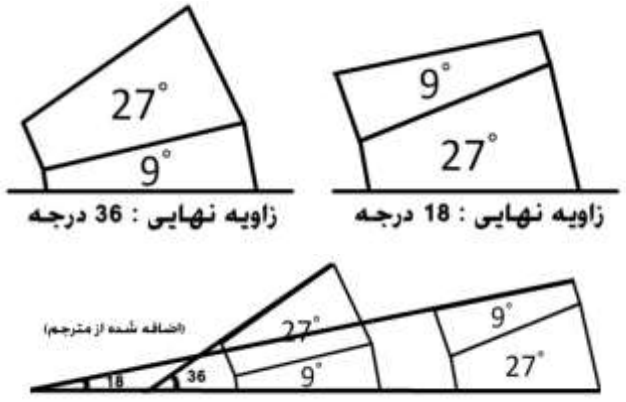
شکل ۱۲-۴) نمای چشمی یک مقایسه گر زاویه به هنگام آزمایش سطوح متعامد

در ابتدای کار با این دستگاه، خواندن مقادیر کمی دشوار به نظر می رسد ولی با تمرین بیشتر تصدیق می گردد که این وسیله برای آزمایش زوایای ۹۰ درجه بسیار سریع و دقیق می باشد. اگر چه این دستگاه، حساسیت موازی ساز خودکار را ندارد اما برای دامنهٔ وسیعی از اندازه گیریهای زاویه ای در فواصل کوتاه بسیار مفید است. به همین دلیل از این وسیله در اتاقهای اندازه گیری و برای کنترل کیفیت قطعات استفاده می شود. بوسیلهٔ آن می توان به طور

مستقیم مقادیری از ۱ تا ۵۰ دقیقه را قرائت کرد. همچنین به طور تقریبی می توان مقادیر قرائت شده را تا دقت ۰/۲ دقیقه بدست آورد.

سنجه های زاویه دار مرکب

در بخش ۲-۵-۴ ذکر گردید که مقایسه گر زاویه به مانند دیگر مقایسه گرها با یک سنجه مرجع تنظیم می شود. همچنین می توان از یک خط کش سینوسی جهت این کار استفاده کرد. اما در سال ۱۹۴۱ شکل بسیار مناسبی از سنجه های مرجع یعنی سنجه های زاویه دار مرکب به بازار عرضه شد. به طور ساده این سنجه ها مکعبهایی هستند که به صورت زوایای دقیقی تولید، سخت و پرداخت شده اند و می توان آنها را بروی یک دیگر سوار نمود. مشابه با بلوکهای اندازه گیری می توان آنها را به هم اضافه یا از هم کم کرد (شکل ۱۳-۴).



شکل(۱۳-۴) اضافه و کم کردن سنجه های زاویه دار مرکب

زوایای این سنجه ها که تعداد آنها ۱۳ عدد می باشد (جدول زیر-م) به صورت یک تصاعد هندسی با قدر نسبت ۳ مرتب شده است. همراه آنها یک بلوک تخت نیز وجود دارد و همگی، زوایای میزان شده (کالیبره) و دقت بالایی دارند. به کمک آنها می توان هر زاویه ای بین صفر تا ۹۰ درجه را با نمو ۳ ثانیه تشکیل داد. این سنجه ها را می توان به یک دیگر اضافه نمود یا از بلوک تخت کم کرد. استانداردهای ساخت این سنجه ها مشابه استانداردهای ساخت بلوکهای اندازه گیری است. با توجه به سطح پرداختی که دارند می توان از خواص انعکاسی آنها در دستگاههای موازی ساز استفاده کرد.

سنجه		
دقیقه اعشاری	دقیقه	درجه
۰/۰۵	۱	۱
۰/۱	۳	۳
۰/۳	۹	۹
۰/۵	۲۷	۲۷
-	-	۴۱

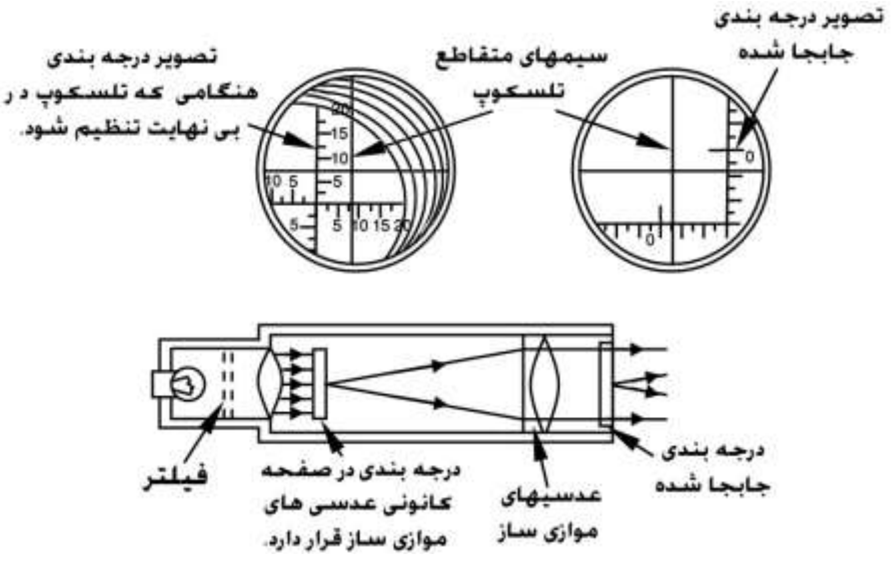
تلسکوپ هم راستایی

کاربرد عمده این وسیله برای آزمایش دقت هم راستایی یاتاقانها، دقت هم راستایی سطوحی که قیدهای مونتاژی بزرگ بروی آنها قرار می گیرد و دقت هم راستایی قطعه کارهای مشابه می باشد. این دستگاه شامل دو قسمت است : بخش موازی ساز و تلسکوپ جمع کننده (یا متمرکز کننده)

بدنۀ هر دو قسمت استوانه ای شکل است. از آنجا که محور نوری و مکانیکی بر هم منطبق می باشد می توان هر قسمت را به طور مستقیم یا بوسیلۀ بوشهای دقیق بین دو یاتاقان که به فاصلۀ معینی از هم هستند قرار داد و سپس تصاویر بدست آمده از بخش تلسکوپ را به بخش موازی ساز منتقل نمود. بخش موازی ساز شامل یک منبع نور و یک عدسی متمرکز کننده (کندانسور) است که جلوی آن شیشه ای با درجه بندی زاویه ای (درجه بندی اول-م) در صفحه کانونی عدسی موازی ساز نصب شده است. این درجه بندی شطرنجی بصورت یک پرتو موازی تصویر می گردد. اگر تلسکوپ در بینهایت تنظیم شود این درجه بندی، بروی خطوط مبنا (سیم های متقاتع تلسکوپ در شکل ۱۴-۴) خواهد افتاد. به این ترتیب ناهم راستایی زاویه ای در دو صفحه قابل تعیین است.

قسمت موازی ساز در جلوی عدسی موازی ساز شامل یک شیشه مدرج زاویه ای دیگر است که دارای دو درجه بندی عمود بر هم (درجه بندی دوم-م) می باشد. اگر فاصلۀ کانونی تلسکوپ کوچک شود این درجه بندی بروی خطوط مبنای تلسکوپ دیده می شود و جابجایی خطی مستقیماً اندازه گیری می گردد. در این حالت چون درجه بندی ناهم راستایی زاویه ای (درجه

بندی اول-م) از کانون خیلی دور است در چشمی تلسکوپ مشاهده نمی گردد. در شکل (۱۴-۴) تصویر واحد موازی ساز و نمایی از چشمی تلسکوپ در دو حالت بالا (اندازه گیری جابجایی و ناهم راستایی زاویه ای) نشان داده شده است. خاطر نشان می شود که فاصله، اثری بر قرائت ناهم راستایی زاویه ای ندارد. چرا که این قرائتها با کاربرد اصل موازی سازی حاصل شده اند. اما این موضوع در مورد جابجایی خطی درست نیست چرا که تلسکوپ، تنها اندازه ظاهری درجه بندی را برای این که بوسیله چشم دیده شود، بزرگ می کند. پس با افزایش فاصله، اندازه درجه بندی جابجایی کاهش می یابد و قابلیت قرائت آن نیز کم می شود بنابراین دقت این قرائت با افزایش فاصله کاهش می یابد.



شکل۱۴-۴) واحد موازی ساز تلسکوپ هم راستایی و نمایش چشمی در دو فاصله کانونی ذکر شده

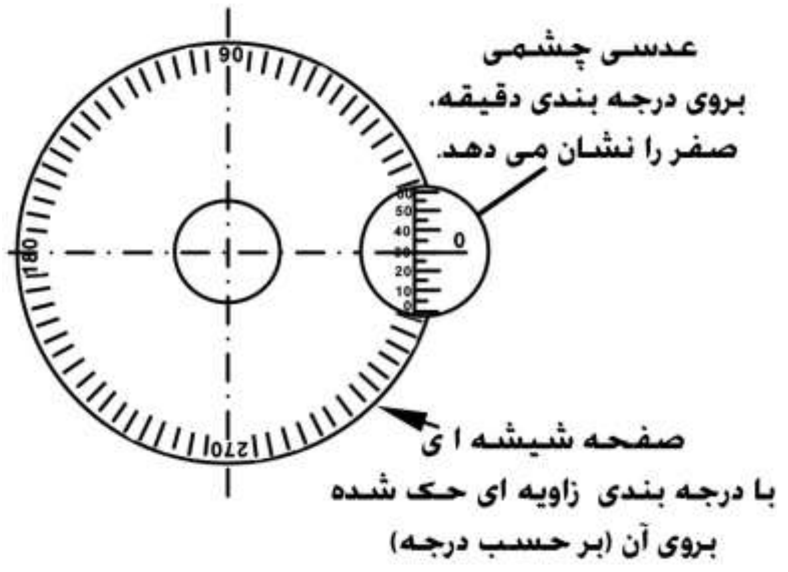
تقسیم مدور (دایروی)

بیشتر تحقیقات پیشین در مورد استانداردهای اندازه گیری به وسیله یک شرکت سوئیسی به نام Societe Genevoise صورت گرفته است. این شرکت تا کنون بیشتر استاندارهای خطی بسیار دقیق، شامل نخستین نمونه های بین المللی و کپی های آنها را تولید کرده است.

اما برای ساخت وسایلی با دقت بالا، درجه بندیهای مدور دقیقی نیز احتیاج بود. در راستای این هدف، سال ۱۸۶۵ دستگاه های تقسیم مدور ساخته شد. در این زمان برای بررسی فضای بین خطوط تقسیم بندی مدور روشی وجود نداشت. این مشکل باعث شد که برای میزان کردن (کالیبراسیون) تقسیم مدور از دستگاه های تقسیم خطی (به شکل یک خط کش سینوسی) استفاده گردد. به این ترتیب اولین درجه بندی تقسیم مدور ساخته شد. از آن به بعد کاربردهای بسیاری برای این قبیل درجه بندیها در ساخت میز چرخشی نوری یا کله گی تقسیم نوری به وجود آمده است.

درجه بندیهای شیشه ای

ساده ترین شکل تقسیم کننده نوری شامل یک درجه بندی شیشه ای است که بروی یک محور، سوار و از طریق یک میکروسکوپ مثل شکل (۱۵-۴) دیده می شود. این درجه بندی شیشه ای از پشت روشن می شود و با قرار گرفتن تصویر آن بروی درجه بندی میکروسکوپ به طور مستقیم اختلاف دو درجه بندی در چشمی قابل قرائت است.

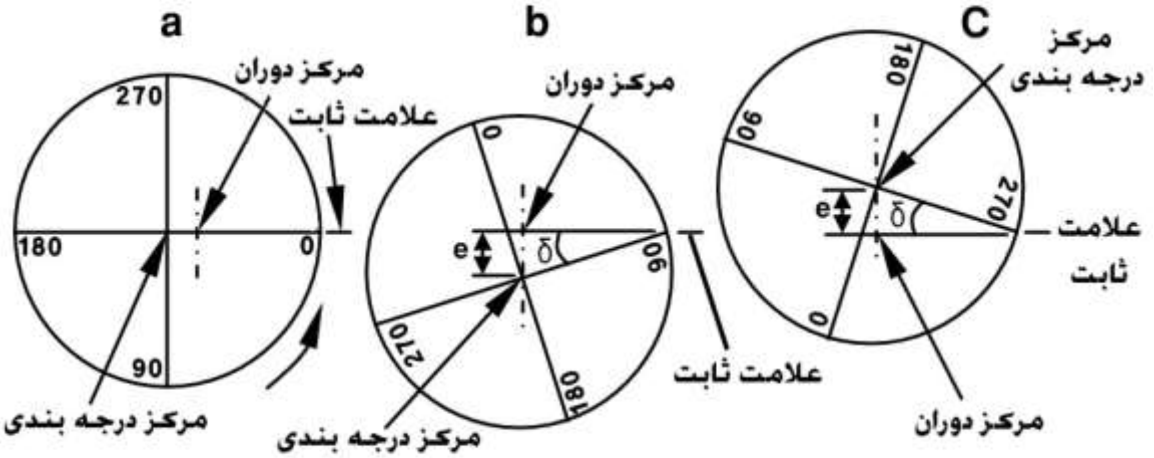


شکل (۱۵-۴) اصول میز چرخشی یا کله گی تقسیم نوری

در این قبیل تجهیزات، لازم است که دایره تقسیم شده طوری نصب گردد که بتواند به درستی حول محور خود بچرخد. اگر به هنگام چرخش، درجه بندی از مرکز خارج گردد در تقسیم مدور، خطایی ایجاد خواهد شد. شکل (۱۶-۴) یک دیسک که دارای خروج از مرکز e است را نشان می دهد. خروج از مرکز به این معنی است که با چرخش دیسک، مرکز آن، دایره ای به شعاع e رسم می کند. دیسک در موقعیت اول (شکل a-۱۶-۴) دقیقاً مقابل خط مبنا است و مقدار صفر قرائت می گردد. در نتیجه میزان خطا صفر می باشد.

حال اگر بخواهیم دیسک زاویهٔ ۹۰ درجه را نشان دهد مرکز دیسک به موقعیت نشان داده شده روی شکل (b-۱۶-۴) می رود. بنابراین برای نشان دادن زاویه ۹۰ درجه دیسک باید به اندازه $90+\delta$ بچرخد (δ میزان خطای زاویه ای است). بطور مشابه در شکل (c-۱۶-۴) برای قرائت زاویه ۲۷۰ درجه باز هم خطای δ ایجاد می گردد. ولی این بار برای رسیدن به زاویهٔ ۲۷۰ درجه، دیسک باید به مقداری کمتر از ۲۷۰ درجه یعنی $270-\delta$ بچرخد. بنابراین میزان خطا از صفر تا δ+ و از صفر تا δ- می باشد. با رسم نمودار خطا یک منحنی سینوسی حاصل می گردد.

بیشترین خطای زاویه ای بین هر دو قرائت فوق 2δ است. با توجه به شکل، $\delta=\frac{e}{R}$ رادیان می باشد. پس اگر دیسک بین ۹۰ تا ۲۷۰ درجه چرخانده شود بیشترین خطای زاویه ای بوجود آمده $\frac{2e}{R}$ رادیان خواهد بود که e خروج از مرکز و R شعاع محدودهٔ قرائتها است (به عبارت دیگر R شعاع صفحه دایره ای مدرج می باشد-م). این نوع تنظیم در وسایل نوری مانند آن چه که در ابتدای این بخش (یعنی بخش ۱-۶-۴) گفته شده قابل کاربرد است.



شکل۱۶-۴) بخش a) قرائت : صفر و خطا : صفر، بخش b) قرائت : ۹۰ و خطا: δ+، بخش c) قرائت : ۲۷۰ و خطا : δ- (اگر مرکز چرخش، مرکز درجه بندی و خط مبنا بروی هم قرار گیرند خطا صفر است.)

میزان سازی (کالیبره کردن) درجه بندیهای مدور

ساده ترین وسیله برای میزان سازی یک دستگاه با درجه بندی مدور (مانند یک کله گی تقسیم) مقایسه آن با یک چند ضلعی دقیق است. این چند ضلعی یک تکه فولاد سخت شده و محکم می باشد که سطوح انعکاسی آن به دقت پرداخت شده و بر تقسیمات روی دایره کاملاً عمود است. بزرگترین چند ضلعی ساخته شده برای این کار ۷۲ ضلع در فواصل اسمی ۵ درجه ای دارد اما معمولاً یک ۱۲ ضلعی در فواصل ۳۰ درجه ای برای بیشتر کارها مناسب می باشد.

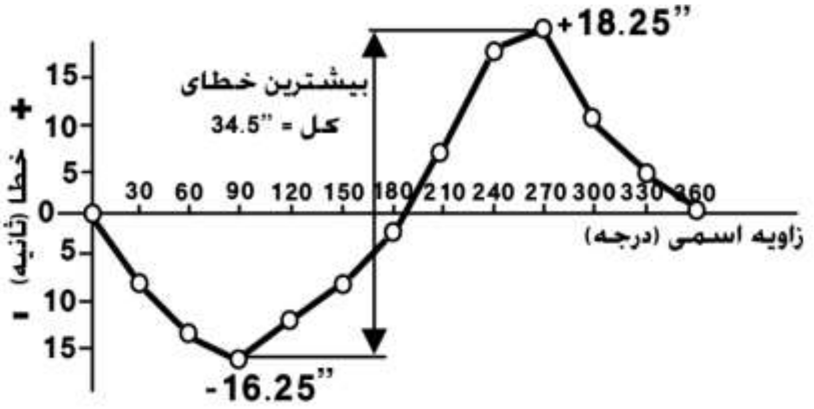
روش کار به این شکل است که چند ضلعی بروی درجه بندی مدور قرار داده می شود و با تنظیم یک موازی ساز خودکار از هر پیشانی چند ضلعی، قرائتی بدست می آید. اگر درجه بندی مدور (نیز به مانند ۱۲ ضلعی-م) در فواصل ۳۰ درجه ای ($\frac{1}{12}$ دایره) تقسیم بندی شده باشد قرائتها باید بوسیله موازی ساز خودکار تکرار گردد. در غیر این صورت اختلاف بین قرائتها در همان مرحله اول، میزان خطا در درجه بندی مدور خواهد بود. اختلاف بین تمامی قرائتها و اولین قرائت، مقدار خطا در هر تقسیم بندی است. معمولاً یک قرائت تکراری بروی اولین پیشانی چند ضلعی انجام می شود و هر خطایی که در این قرائت تکراری بدست آید به طور یک نواخت بین جابجایی تقسیمهای دیگر توزیع می گردد. جدول صفحه بعد مربوط به

قرائتهای بدست آمده از آزمایش کله گی تقسیم یک ماشین فرز است که برای اجرای تقسیمهای ساده ساخته شده است.

در این جدول فرض می شود که چند ضلعی تا حد ممکن دقیق می باشد. خطای زاویه ای در هر پیشانی معلوم است پس می توان برای این خطا مقدار مجازی معین کرد. در شکل (۱۷-۴) نتایج حاصل به صورت نمودار نشان داده شده است.

موقعیت	قرائت		خطای کُل	مقدار تصحیح برای صفر شدن	خطای حقیقی
	دقیقه	ثانیه	(ثانیه)	(ثانیه)	(ثانیه)
صفر	۴	۵۳	صفر	صفر	صفر
۱	۴	۴۵	۸-	۰/۲۵+	۷/۷۵-
۲	۴	۳۸	۱۵-	۰/۵۰+	۱۴/۵۰-
۳	۴	۳۶	۱۷-	۰/۷۵+	۱۶/۲۵-
۴	۴	۳۹	۱۴-	۱/۰۰+	۱۳/۰۰-
۵	۴	۴۲	۱۱-	۱/۲۵+	۹/۷۵-
۶	۴	۴۸	۵-	۱/۵۰+	۳/۵۰-
۷	۴	۵۹	۶+	۱/۷۵+	۷/۷۵+
۸	۵	۰۸	۱۵+	۲/۰۰+	۱۷/۰۰+
۹	۵	۰۹	۱۶+	۲/۲۵+	۱۸/۲۵+
۱۰	۵	۰۱	۸+	۲/۵۰+	۱۰/۵۰+
۱۱	۴	۵۶	۳+	۲/۷۵+	۵/۷۵+
۱۲ (تکرار صفر)	۴	۵۰	۳-	۳/۰۰+	صفر

مقادیر ستون سوم از چپ، حاصل تفریق مقادیر ستون دوم از مقدار قرائت اولیه ۴ دقیقه و ۵۳ ثانیه است.

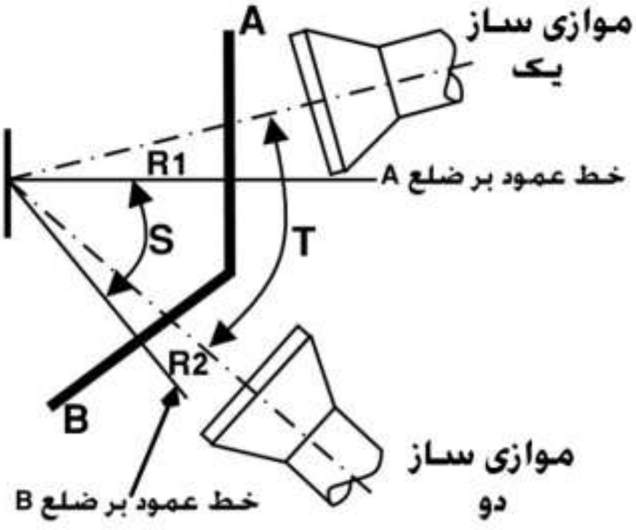


شکل (۱۷-۴) نمودار خطای حاصل در درجه بندی مدوری که دارای محور خارج از مرکز است

(نمودار ستون آخر جدول بالا نسبت به هر ۳۰ درجه تغییر زاویه ای که خطای کل ۳۴/۵ ثانیه می باشد-م).

میزان سازی (کالیبره کردن) یک چند ضلعی دقیق

اگر خطا در چند ضلعی معلوم نباشد برای میزان سازی آن می توان از دو موازی ساز خودکار استفاده کرد. همانطور که در شکل۱۸-۴ نشان داده شده است دو موازی ساز خودکار برای دو پیشانی مجاور چند ضلعی تنظیم شده اند.



شکل (۱۸-۴) نحوه تنظیم دو موازی ساز خودکار برای اندازه گیری خطاهای یک چند ضلعی دقیق (لزومی ندارد که موازی ساز در مرکز چند ضلعی تنظیم گردد. این شکل ساده شده است و در نتیجه حالتی منظم دارد.)

اگر R_1 و R_2 به ترتیب قرائتهای حاصل از موازی ساز ۱ و ۲، S زاویه بین خطوط عمود بر صفحات A و B و زاویه بین دو موازی ساز T باشد آنگاه:

$$S + R_1 = T + R_2$$

یا

$$S = T + (R_2 - R_1)$$

اگر تمام اضلاع چند ضلعی بررسی شود و همه مقادیر S و T و $(R_2 - R_1)$ بدست آیند داریم :

$$\sum S = \sum T + \sum (R_2 - R_1)$$

ولی

$$\sum S = 360$$

پس:

$$360 = \sum T + \sum (R_2 - R_1)$$

با تقسیم این عبارت بر n (تعداد اضلاع چند ضلعی) داریم :

$$\frac{360}{n} = \frac{\sum T}{n} + \frac{\sum (R_2 - R_1)}{n}$$

$\frac{360}{n}$ زاویه اسمی چند ضلعی است و چون T یعنی زاویه بین دو موازی ساز خودکار ثابت است داریم :

$$\frac{360}{n} = T + \frac{\sum (R_2 - R_1)}{n}$$

یا :

$$T = \frac{360}{n} - \frac{\sum (R_2 - R_1)}{n} \qquad (1)$$

با تعیین $\sum (R_2 - R_1)$ می توان مقدار T را معین کرد. این مقدار را می توان در معادلهٔ (۱) قرار داد و برای هر پیشانی، زاویه پیشانی را پیدا کرد (مثلاً برای یک هشت ضلعی-م) :

$$T = \frac{360}{n} - \frac{\sum (R_2 - R_1)}{n} = 45 - \frac{25', \ 47.1''}{8} = 45^\circ - 3', 13.4''$$

$$S = T + (R_2 - R_1) = 45^\circ - 3', 13.4'' + (R_2 - R_1)$$
$$\text{خطا} = (R_2 - R_1) + 3', 13.4''$$

در جدول زیر تمامی محاسبات نشان داده شده است (ستون آخر از رابطه خطا بدست می آید-م).

پیشانیهای بررسی شده	R_1 دقیقه	R_1 ثانیه	R_2 دقیقه	R_2 ثانیه	(R_2-R_1) دقیقه	(R_2-R_1) ثانیه	خطا (ثانیه)
۰-۴۵	۴	۳۲/۵	۷	۴۸/۷	۳	۱۶/۲	+۲/۸
۴۵-۹۰	۵	۱۵/۳	۸	۳۳/۸	۳	۱۸/۵	+۵/۱
۹۰-۱۳۵	۲	۱۷/۶	۵	۲۹/۹	۳	۱۲/۳	-۱/۱
۱۳۵-۱۸۰	۴	۵۲/۱	۸	۷/۲	۳	۱۵/۱	+۱/۷
۱۸۰-۲۲۵	۵	۳/۵	۸	۱۰/۲	۳	۶/۷	-۶/۷
۲۲۵-۲۷۰	۴	۲۲/۹	۷	۴۱/۰	۳	۱۸/۱	+۴/۷
۲۷۰-۳۱۵	۱	۱۶/۸	۴	۲۵/۳	۳	۸/۵	-۵/۹
۳۱۵-۰	۴	۱۸/۹	۷	۳۰/۷	۳	۱۱/۸	-۱/۶
	کل				۲۵	۴۷/۱	-

بنابراین بدونپ رجوع به وسایل مرجعی مانند سنجه های زاویه دار مرکب می توان چند ضلعی را با دقت بالا میزان کرد. در این روش فرض بر آن است که دایره یک تابع پیوسته است به عبارت دیگر مجموع تمام مقادیر زوایای چند ضلعی برابر ۳۶۰ درجه است. توسط این روش می توان سنجه های زاویه دار مرکب را نیز بررسی نمود.

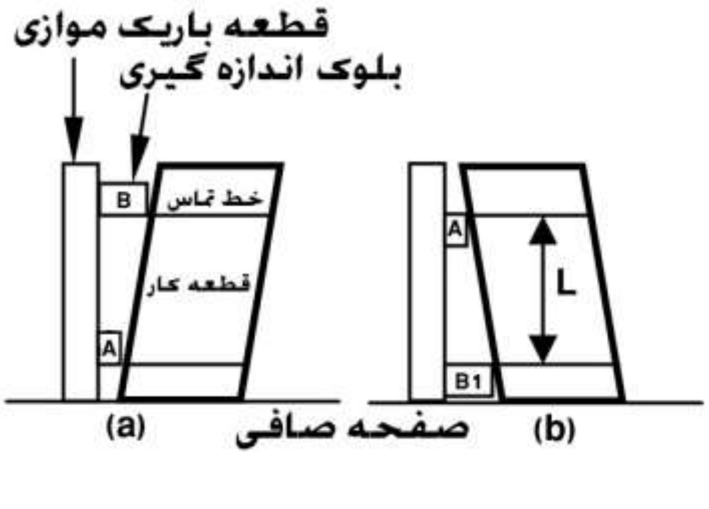
اندازه گیری تعامد

بین زوایای گوناگون زاویه ویژه ای وجود دارد که احتمالاً به علت اهمیتش اسامی خاصی برای آن پدید آمده است. این زاویه، زوایهٔ ۹۰ درجه (عمود، گونیا یا قائمه) می باشد. زوایهٔ ۹۰ درجه در دستگاه های مختلف اهمیت زیادی دارد. به عنوان مثال اگر سوپرت عرضی ماشین تراش به طور عمود بر محور اصلی حرکت نکند به هنگام عملیات پیشانی تراشی سطح صافی ایجاد

نخواهد شد. در یک میکرومتر عمق سنج، اگر محور دستگاه بر تکیه گاهش عمود نباشد اندازه گیری با خطای کسینوسی همراه خواهد بود. در واقع می توان گفت که زاویه قائمه باعث پیشرفت علم مدرن بوده است و اگر امکان ساخت زاویه قائمه با دقت بالا وجود نداشت شاید رسیدن به این مرحله از علم ممکن نبود. خوشبختانه زاویه قائمه در اندازه گیری دقیق کاربرد زیادی دارد و استفاده از آن در بیشتر فنون اندازه گیری مفید است. به عنوان مثال در بخش ۲-۴-۵ و در دستگاه مقایسه گر زاویه، نمونه ای از کاربرد زاویه قائمه مورد بررسی قرار گرفت. در بیشتر موارد نیازی نیست که برای بررسی تعامد از روشهای مهندسی استفاده کرد و تعامد را می توان به سادگی با چشم تشخیص داد. آن چه که بیشتر اوقات مورد نیاز است تعیین میزان خطای تعامد یا میزان انحراف از تعامد می باشد. خطای تعامد را می توان هم از طریق اندازه گیری خطی و هم از طریق اندازه گیری زاویه ای در طول مشخصی از سطح بدست آورد. در هر صورت می توان نتیجه را از یکی به دیگری مثلاً از خطی به زاویه ای یا برعکس تبدیل نمود.

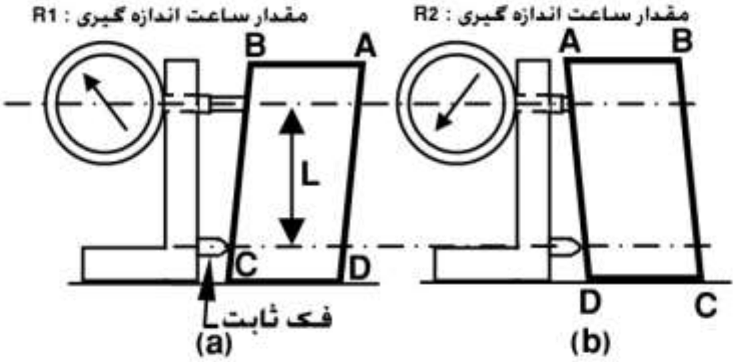
روشهای تماسی اندازه گیری تعامد

قطعه کار نشان داده شده در شکل ۱۹-۴ را در نظر بگیرید.



شکل۱۹-۴) آزمایش تعامد به کمک بلوکها- خطای تعامد در طول L ، عبارت است از $\frac{1}{2}(B-B_1)$

سطوح مقابل این قطعه کار موازی هم می باشد. این توازی را می توان به سادگی و با بکارگیری یک میکرومتر یا یک مقایسه گر (بسته به دقت مورد نیاز) بررسی کرد. توازی با تجهیزات گوناگونی مانند ماشین سنگ زنی تخت قابل تولید است. فرض می شود که قطعه کار بطور دقیق موازی است ولی چهارگوش نیست. مطابق آنچه که در شکل ۱۹-۴ نشان داده شده است در کنار قطعه کار یک قطعه کار کمکی باریک موازی، عمود بر صفحه صافی قرار داده می شود. در دو نقطهٔ A و B دو بلوک اندازه گیری قرار می گیرد به نحوی که فاصله بین بلوک و قطعه کار کمکی را پرکنند. ابعاد این بلوکها ثبت می گردد. سپس قطعه کار ۱۸۰ درجه چرخانده می شود بطوری که این بار بلوک A بالا قرار می گیرد. اگر در این حالت، بلوک B که پایین قرار گرفته است فاصله بین قطعه کار و قطعه کمکی را پر کند قطعه کار متعامد خواهد بود. در غیر این صورت بلوک اندازه گیری دیگری به نام $B_۱$ پیدا می کنیم که این فاصله را پر کند. خطای تعامد قطعه کار در طول L یعنی فاصله بین دو بلوک (و نه در تمام طول قطعه کار) نصف اختلاف اندازه بلوکهای B و $B_۱$ است. در شکل ۲۰-۴ روش دیگری جهت تعیین خطای تعامد نشان داده شده است.



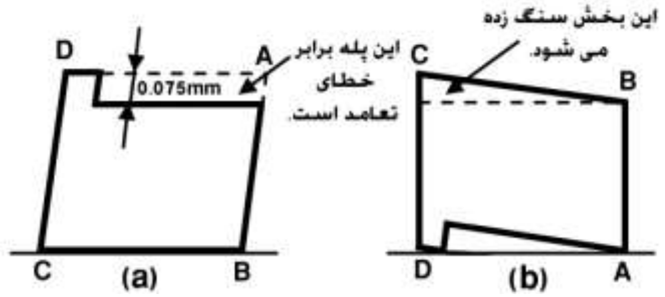
شکل۲۰-۴) بکارگیری ساعت اندازه گیری برای آزمایش تعامد- خطای تعامد در طول L :

$$\frac{1}{2}(R_1 - R_2)$$

در این روش از یک ساعت اندازه گیری استفاده می شود. به این ترتیب که در دو حالت نشان داده شده در شکل ۲۰-۴ دو قرائت از ساعت اندازه گیری بدست می آید. در حالت اول مقدار قرائت شده $R_۱$ و در حالت دوم پس از این که قطعه کار ۱۸۰ درجه چرخانده شد مقدار قرائت شده $R_۲$ می باشد. نصف تفاوت این قرائتها، خطای تعامد در طول L است.

تصحیح خطای تعامد

این مقدار تصحیح، مقدار معینی است که اگر به ترتیب خاصی در ابعاد قطعه کار اعمال گردد موجب از بین رفتن خطای تعامد می شود. با مراجعه دوباره به شکل۲۰-۴ فرض می کنیم که اختلاف قرائتهای ساعت اندازه گیری در دو حالت A وB، ۰/۱۲ mm باشد. به این ترتیب در طول L، قطعه کار به اندازهٔ ۰/۰۶mm خارج از تعامد است. اما در کل طول قطعه کار خروج از تعامد ۰/۰۷۵mm می باشد. بنابراین برای تصحیح تعامد باید از ضلع AD، گوه ای به رأس A و تا عمق ۰/۰۷۵mm از قطعه کار تراشیده شود (شکل ۲۱-۴ قسمت a). همین کار را بروی ضلع BC و از طرف C به طرف B انجام می دهیم به این ترتیب که بیشترین عمق تراشیده شده در نقطهٔ C برابر ۰/۰۷۵mm و کمترین آن در B برابر صفر باشد.

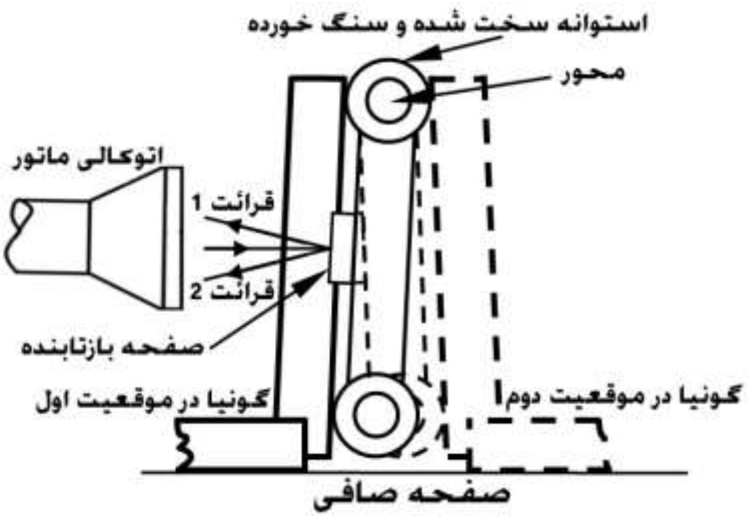


شکل۲۱-۴) روش تصحیح تعامد

همانطور که دیده می شود در نقطهٔ D تکه ای از قطعه کار در حدود ۲/۵ mm باقی خواهد ماند. به این ترتیب خطای تعامد تصحیح می گردد و تنها کافی است که برای موازی بودن ضلع AD با BC، AD را به اندازهٔ لازم سنگ زد (منظور از سنگ زدن ضلع AD سنگ زدن قطعهٔ باقی مانده در نقطه D است تا به موازات ضلع BC قرار گیرد).

روشهای نوری برای بررسی تعامد

در این روش از یک فیکسچر (بست) ساده و یک موازی ساز خودکار یا مقایسه گر زاویه استفاده می شود این دستگاه به وسیله آزمایشگاه بین المللی فیزیک طراحی شده است.



شکل ۲۲-۴) آزمایش تعامد قطعه کار با استفاده از موازی ساز- خطای تعامد برابر است با

$$\frac{1}{2}(R_1 - R_2)$$

(در این شکل پایه سنجه تعامد حذف و تنها اصول کار نشان داده شده است.)

این وسیله از یک میله تشکیل شده است که می تواند حول محور خود گردش کند. به دو انتهای این میله دو استوانه فولادی سخت شده که ابعاد یکسانی دارند و بطور دقیق سنگ زده شده اند متصل شده است. بروی میله، صفحه منعکس کننده ای قرار دارد (شکل ۲۲-۴). همانطور که نشان داده شده است میله حول محورش چرخانده می شود تا استوانه ها بر سطح قطعه کار مماس شوند، سپس بوسیله موازی ساز خودکار یک قرائت بدست می آید. قطعه کار به موقعیت دوم برده می شود و با تکرار مراحل، قرائت دیگری بدست می آید. نصف اختلاف این دو قرائت خطای زاویه ای تعامد است. اگر خطاهای ناشی از قرائت موازی ساز خودکار و یا اشتباه اپراتور (مانند تمیز نکردن سطوح تماس) را در نظر نگیریم تنها خطایی که در این روش ممکن است پیش بیاید خطای حاصل از استوانه ها می باشد. برای تشخیص این خطا می توان قرائتها را یک بار بصورتی که در شکل ۲۲-۴ نشان داده شده است بدست آورد. سپس برای بار دوم، میله را ۱۸۰ درجه می چرخانیم تا جای استوانه ها با یک دیگر عوض شود و در این حالت یک بار دیگر عملیات بالا تکرار می گردد. خطای حقیقی تعامد، میانگین خطاهای بدست آمده (در این دو مرحله-م) خواهد بود.

تمام روشهای آزمایش تعامد که در این فصل به آنها اشاره شد روشهایی ابتدایی هستند و تنها به خواص هندسی ویژه ای بستگی دارند. البته روشهای دیگری نیز وجود دارد که از بررسی آنها چشم پوشی شد. به عنوان نمونه در فصل ۶ که شرح اندازه گیری ماشین ابزار می باشد برای بررسی تعامد ریلهای ماشین ابزار از یک منشور پنج یا چهار گوش استفاده شده است. این روش به دقت منشور بستگی دارد و اگر زاویه بین سطوح منعکس کننده آن ۴۵ درجه نباشد خطای ایجاد شده بوسیله منشور دو برابر می گردد.

فصل پنجم

حد و سنجه های حدی

(Limits and Limit Gauges)

مقدمه :

صحت و دوام بیشتر محصولات، زمانی حاصل می گردد که هنگام مونتاژ، بین اجزای مختلف محصول نسبتهای ابعادی درستی برقرار باشد. به عبارت دیگر اجزای محصول هنگام مونتاژ باید به روش معینی با هم انطباق داده شود. مثلاً برای چرخش یک محور در یک سوراخ باید بین آنها مقداری لقی وجود داشته باشد تا بتوان برای روان کاری، لایه نازکی از روغن را بین آنها قرار داد. اما اگر لقی خیلی زیاد باشد باعث می گردد که محور در راستای شعاع سوراخ، حالت شناور پیدا کند. از طرف دیگر در صورت عدم وجود لقی به طوری که محور با فشار در سوراخ جا زده شود نیروهای کشسانی تولید می گردد که این دو قطعه را به هم پرس می کند. در نتیجه محور نمی تواند حرکت کند و امکان دارد که سوراخ شکافته شود. برای رفع این مشکلات باید برای سوراخ و محور، اندازه های کاملاً دقیقی در نظر گرفته شود. متأسفانه این کار به دو دلیل امکان پذیر نیست :

۱-نمی توان یک قطعه کار را با اندازه کاملاً دقیق ساخت.

۲-اگر بر فرض یک قطعه کار دقیقاً مطابق با همان اندازه مورد نیاز ساخته شود، باز نمی توان آن را دقیقاً اندازه گیری کرد.

مثلاً در مورد بلوکهای اندازه گیری بر طبق استاندارد B.S. ۸۸۸ دیده می شود که بلوکهای با طول بیشتر از ۲۵mm تنها تا ۰/۰۵mm دقت دارند و اندازه آنها دقیقاً مقدار ذکر شده نیست.

مورد دیگری که باید به آن توجه کرد این است که هر چه دقت قطعه کار افزایش یابد هزینه ساخت آن نیز بالا می رود. به عنوان مثال هزینه ساخت قطعه کاری با اندازهٔ اسمی ۰/۲۵ میلی متر کمی بیشتر از هزینه ساخت قطعه کاری با اندازه اسمی ۰/۵mm می باشد. اما ساخت قطعه کاری با اندازهٔ اسمی ۰/۰۰۲mm نسبت به قطعه کاری با اندازهٔ اسمی ۰/۰۱mm هزینهٔ بسیار بیشتری نیاز دارد. به این ترتیب نمودار هزینه–دقت به صورت نشان داده شده در شکل ۱-۵ رسم خواهد شد. همانطور که دیده می شود محور هزینه برای این نمودار یک خط مجانب است یعنی ایجاد دقت ۱۰۰ درصد، بی نهایت هزینه دارد.

شکل ۱-۵) نمودار رابطه بین تلرانس قطعه کار و هزینه ساخت آن

با توجه به توضیحات بالا این پرسش پیش می آید که اگر نمی توان قطعه کار دقیقی تولید کرد چگونه امکان دارد قطعات ساخته شده با هم انطباق یابند و مونتاژ شوند؟ برای پاسخ به این پرسش و رفع این مشکل سه روش در نظر گرفته می شود که هر کدام در صنعت جایگاه خاصی دارد.

ساختن برای انطباق

در روش ساختن برای انطباق ابتدا یک قطعه کار با دقت لازم و به طور اقتصادی ساخته می شود. سپس قطعه کار بعدی به تدریج ماشین کاری می گردد تا زمانی که با قطعه کار اول بطور مناسب انطباق یابد. این روش برای تولید تکی و یا تولید کارهایی که در آنها لازم است دو قطعه کار به سرعت تعویض شود استفاده می گردد و از آنجا که با مطالب کتاب ارتباط چندانی ندارد، بررسی نمی شود.

مونتاژ انتخابی

روش مونتاژ انتخابی زمانی به کار می رود که ساخت قطعات بسیار دقیق به روش ساختن برای انطباق، اقتصادی نباشد. در این مورد روش مونتاژ انتخابی، اقتصادی تر است. در مونتاژ انتخابی، قطعات اندازه گیری شده، به گروههایی که هر یک شامل قطعاتی با اندازه مشابه و محدودهٔ دقت معینی هستند طبقه بندی می گردد. سپس قطعاتی از هر مجموعه که به طور مشابه دسته بندی شده اند مونتاژ می گردد. مثال خوبی که برای این روش می توان ارائه داد، ساخت

بلبرینگ است. بلبرینگ به طور کلی شامل یک حلقه داخلی و یک حلقه خارجی است که به وسیلۀ ساچمه های فولادی از هم جدا شده اند. هر دو حلقه و همچنین ساچمه ها طوری دسته بندی و مونتاژ می شوند که شرایط زیر بر قرار باشد :

۱- ساچمه های بزرگ در داخل حلقه های کوچک داخلی و حلقه های بزرگ خارجی مونتاژ شود.

۲- ساچمه های متوسط در داخل حلقه های داخلی متوسط و حلقه های خارجی متوسط یا حلقه های بزرگ داخلی و خارجی یا حلقه های کوچک داخلی و خارجی مونتاژ شود.

۳- ساچمه های کوچک در داخل حلقه های داخلی بزرگ و حلقه های خارجی کوچک مونتاژ شود.

معمولاً سیستم مونتاژ انتخابی زمانی بکار می رود که به هنگام خرابی، کل مجموعه مونتاژی به عنوان یک سیستم واحد (نه یک جزء از آن) تعویض گردد. به عنوان مثال اگر ساچمه ای در یک یاتاقان خرد شود تمام یاتاقان (نه ساچمه معیوب آن) عوض می شود.

سیستمهای حدی و انطباق

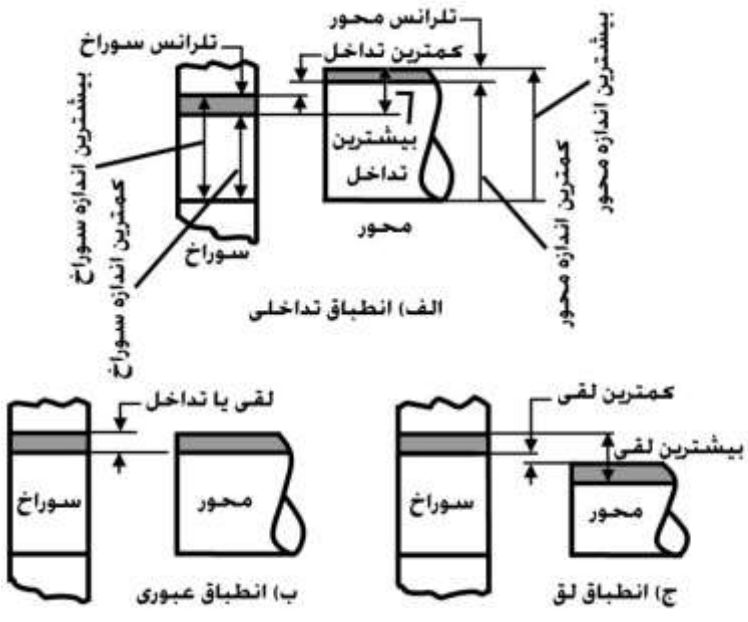
حتی در تولید تکراری قطعات نیز گاهی لازم است که اندازه ها تغییر داده شود. در نتیجه با توجه به شرایط موجود، تلرانسها باید دوباره بررسی و معین گردد. مثلاً در محورها و سوراخها، تلرانسها باید طوری تعیین گردد که هر محور به طور صحیح با سوراخ درگیر شود و به اندازه عمر طراحی شده برای سیستم مونتاژی، کار کند. در مورد محورها و سوراخها معمولاً سه نوع انطباق با مشخصات زیر وجود دارد :

۱- انطباق تداخلی که در آن کوچکترین قطر مجاز محور، بزرگتر از بزرگترین قطر مجاز سوراخ است.

۲-انطباق عبوری که در آن قطر بزرگترین سوراخ مجاز، بزرگتر از قطر کوچکترین محور است ولی قطر کوچکترین سوراخ کوچکتر از قطر بزرگترین محور می باشد.

۳- انطباق لق که در آن قطر بزرگترین محور مجاز، کوچکتر از قطر کوچکترین سوراخ است.

این سه نوع انطباق در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵) روابط ابعادی ممکن بین یک سوراخ و یک محور

در شکل۲-۵ عبارتهایی به کار برده شده است که تعریف آنها به صورت زیر می باشد :

۱- محدوده اندازه : فاصله بین بیشترین و کمترین اندازه مجاز یک قطعه کار، محدوده اندازه آن قطعه کار می باشد.

۲- تلرانس (اختلاف مجاز= Tolerance) : بیشترین تغییر مجاز در اندازه یک قطعه کار را تلرانس قطعه کار گویند.

۳- آلوانس (اضافه مجاز= Allowance) : اختلاف بین حدود اندازه دو قطعه کار را الوانس آنها گویند. لازم به ذکر است الوانس مثبت، انطباق لق و الوانس منفی انطباق تداخلی ایجاد می نماید.

هر شرکت تولیدی انطباقهای گوناگونی نیاز دارد. به عنوان مثال انطباقهایی وجود دارد که برای مونتاژ آنها باید از انقباض یا فشار هیدرولیکی استفاده کرد. در برخی دیگر مانند انطباقهای روان و لق، مونتاژ با فشار مکانیکی کوچکی قابل انجام است. در هر صورت، انطباقهای گوناگون به دو روش زیر قابل تولید می باشد :

الف) استفاده از سیستمی که در آن سوراخ، مبنا می باشد.

در این سیستم، اندازه سوراخ در یک مقدار اسمی مشخص ثابت نگاه داشته می شود و مجموعه ای از انواع انطباقها با تغییر در حدود اندازه محور تولید می گردد. مثلاً برای سوراخی به اندازهٔ $25mm^{+0.02mm}_{-0.00mm}$ محور می تواند دارای مقادیر و انطباقهای زیر باشد :

۱- $25mm^{+0.08mm}_{+0.04mm}$ محوری به این ابعاد با سوراخ، انطباق تداخلی خواهد داشت.

۲- $25mm^{+0.02mm}_{-0.00mm}$ محوری به این ابعاد با سوراخ، انطباق عبوری خواهد داشت.

۳- $25mm^{-0.02mm}_{-0.05mm}$ محوری به این ابعاد با سوراخ، انطباق لق خواهد داشت.

همانطور که ذکر شد تمام این انطباقها تنها برای یک سوراخ به قطر مشخص فراهم شده است.

ب) استفاده از سیستمی که در آن محور، مبنا می باشد.

در این سیستم، اندازه محور در یک مقدار اسمی مشخص ثابت نگاه داشته می شود و مجموعه ای از انواع انطباقها با تغییر در حدود اندازه سوراخ تولید می گردد. در بیشتر کارها سیستم اول استفاده می شود چرا که برای تولید سوراخهای دقیق باید از چند ابزار استاندارد مانند مته ها و برقو ها استفاده کرد. به عبارت دیگر تولید سوراخ دقیق تقریباً مشکل است. در صورتی که محورها به کمک ماشینهایی نظیر ماشین سنگ زنی بدون مرغک با سهولت بیشتری قابل تولید هستند.

با این حال تصدیق می شود که به کار بردن تنها یک گروه از سوراخهای دقیق برای ساخت انواع گوناگون قطعه کار کافی نیست. مثلاً در برقوکاری یک سوراخ برای حصول دقت مورد نظر به مجموعه ای از انطباقها نیاز است. با توجه به این توضیحات، یک سیستم انطباق باید تا حد امکان دارای چهار گروه سوراخ باشد. به این ترتیب می توان مقدار تلرانسها را برای چهار روش تولید معین کرد. همچنین نُه گروه مختلف از محورها نیز احتیاج است تا به کمک آنها نُه نوع انطباق با هر گروه از سوراخها حاصل گردد.

از طرف دیگر اندازه های بزرگتر نیازمند تلرانسهای بزرگتر است. بنابراین اگر شرکتی مبنای کار خود را بر پایه همین سیستمهای انطباق ابتدایی قرار دهد با توجه به محدودیتهای ذکر شده،

کاربرد این سیستمها برای آنها مشکل ساز خواهد بود. خوشبختانه سیستم های استانداردی برای رفع این مشکلات موجود می باشد.

سیستم Newall برای انطباقها

از آنجا که این سیستم، سیستم ساده ای است کاربرد آن نیز بسیار رایج می باشد. این سیستم بر مبنای سوراخ تهیه شده است و دارای دو گروه از سوراخها با دقت مختلف است. همچنین ۶ گروه محور نیز در این سیستم وجود دارد که دو گروه از آنها انطباق تداخلی، یک گروه، انطباق عبوری و بقیه انطباق لق ایجاد می نمایند. این سیستم برای بسیاری از کارها قابل استفاده است. تمام سیستم به شکل یک جدول ارائه شده است و به این ترتیب کار با آن راحت می باشد.

سیستم انطباق B.S.۱۹۱۶:۱۹۵۳

استاندارد B.S.۱۹۱۶:۱۹۵۳ سیستم جامعی برای انطباق ارائه می دهد که برای انواع کارها از دستگاهها و سنجه ها تا کارهای مهندسی بسیار سنگین طراحی شده است. در ابتدا به نظر می رسید که این سیستم، بینهایت پیچیده است به طوری که هیچ سازمانی از آن استفاده نمی کرد. تا این که بالاخره شرکتی که به فنون ساخت زیر سیستمها (زیر مجموعه ها) نیاز پیدا کرده بود این سیستم استاندارد را انتخاب کرد.

این سیستم دارای ۲۱ نوع سوراخ می باشد که با حروف بزرگ انگلیسیD,C,B,A,... مشخص می شوند. همچنین دارای ۲۱ نوع محور است که با حروف کوچک انگلیسی d,c,b,a, نشان داده می شوند. این حروف معرف نوع تلرانس برای اندازه اسمی محور و سوراخ می باشد. مثلاً تمام سوراخهایی که از گروه H هستند محدودۀ تلرانس آنها X+ و ۰- است. بطور مشابه محورهایی که از گروه h هستند دارای محدودۀ X- و ۰+ می باشند و الی آخر. برای هر کدام از این سوراخ ها یا محورها می توان تا ۱۶ گروه تلرانس به کار برد که به وسیله اعداد مشخص می گردد. مثلاً یک سوراخ ممکن است به صورت H۷ نمایش داده شود و یک محور با j۴ مشخص گردد. در این صورت انطباق بین آنها $H7/j4$ خواهد بود. با این توضیحات، شرکتی که به

سیستمی بر مبنای سوراخ نیاز دارد با انتخاب B.S.۱۹۱۶ مجموعه ای از سوراخهای هم نوع را برای کار خود در اختیار خواهد داشت. سپس یک گروه از محورها برای انطباق با آنها انتخاب می گردد. به عنوان نمونه یک سیستم سوراخ مبنا می تواند به صورت زیر باشد:

سوراخها : H۴ – H۷ – H۹ – H۱۱

(لق که با سوراخH۷ بکار می روند.)h۷,g۶,f۷,e۷ و (عبوری) m۶,k۶ و

محورها : u۶,s۶,p۶ (تداخلی)

توضیحات بیشتر در مورد جزییات این سیستم و پیشنهادهای لازم جهت کاربرد آن در استاندارد B.S.۱۹۱۶:۱۹۵۳ قسمت دوم ارائه شده است و قبل از انتخاب سیستم انطباقی مناسب بهتر است به آن رجوع شود.

سنجه های حدی (فرمانها)

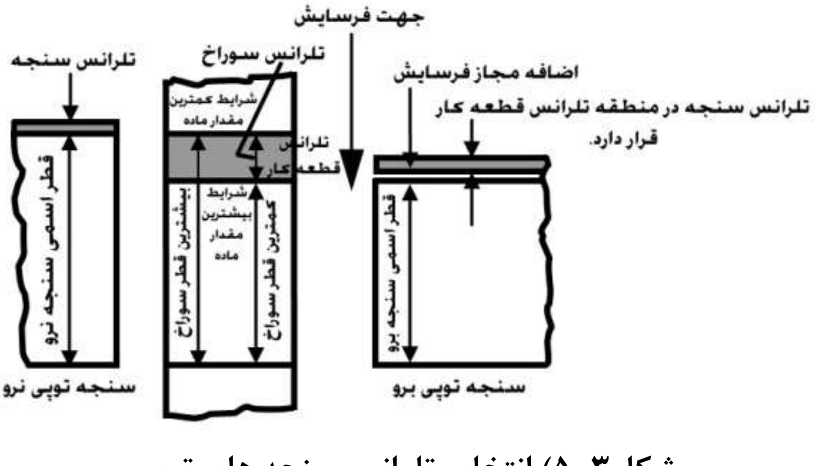
انتخاب یک سیستم انطباق به طور منطقی به کاربرد سنجه های حدی (فرمانها) منجر می گردد. هدف از کاربرد این سنجه ها تعیین اندازۀ قطعه کار نیست بلکه به وسیله آنها معین می شود که آیا اندازه قطعه کار مورد نظر در محدوده معینی قرار دارد یا خیر؟ ساده ترین شکل سنجه های حدی، سنجه های کنترل سوراخ و محور می باشد. این سنجه ها در دو نوع برو و نرو تولید می گردد. به عنوان مثال اگر حدود اندازه قطر سوراخی مشخص باشد سنجه برو برای این سوراخ، استوانه ای است که قطر آن معادل با کوچکترین قطر سوراخ می باشد و سنجه نرو بطور مشابه استوانه ای است که قطرش معادل بیشترین قطر سوراخ می باشد. از آنجا که هیچ اندازه ای دقیق نیست در مورد سنجه ها هم نمی توان اندازه دقیقی ارائه کرد در نتیجه سازندگان سنجه ها برای آنها تلرانسهایی در نظر می گیرند. تلرانس هر سنجه به اندازه اسمی آن بستگی دارد و برای تهیه تلرانس آن روش دقیقی نیاز می باشد. مثلاً اگر تلرانس سنجه، اندازه سنجه برو را افزایش و اندازه سنجه نرو را کاهش دهد سنجه، قطعه کار را خارج از اندازه نشان خواهد داد حال آن که اندازه قطعه کار درست و نزدیک به حدهای بالایی و پایینی مورد

نظر است. به همین ترتیب اگر تلرانس موجب افزایش اندازه سنجه نرو و کاهش اندازه سنجه برو شود سنجه حدی تنها قطعه کارهایی را قبول می کند که خارج از حدود اندازه تعیین شده است. بنابراین در تعیین تلرانس سنجه ها باید دقت نمود. بدیهی است که در یک شرکت برای داشتن کیفیت مطلوب باید سیستمی انتخاب شود که کارهای مشکوک را رد کند. از آنجا که تلرانس سنجه تقریباً ۱۰٪ تلرانس قطعه کار منظور می گردد شرکت از ۲۰٪ تلرانس مجاز خود محروم خواهد شد. توضیحات بیشتر در B.S. ۹۶۹ ارئه شده است. در این استاندارد برای تلرانس سنجه، این موارد پیشنهاد می شود :

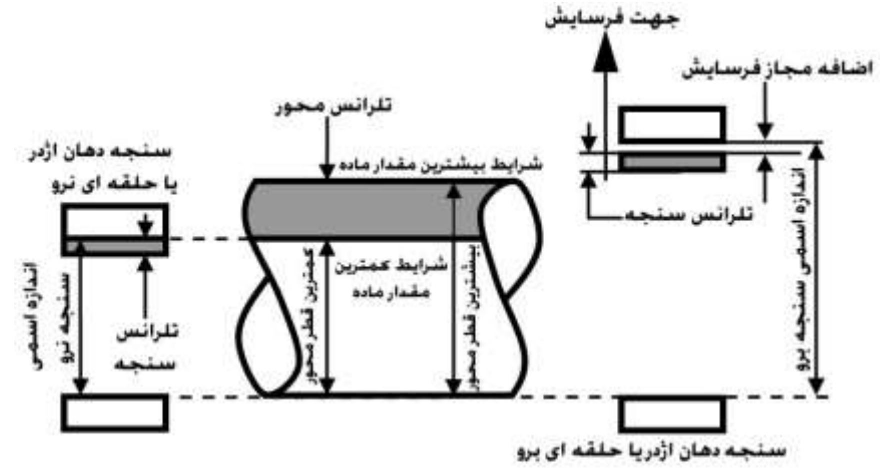
۱-تلرانس سنجه برو در حدود تلرانس قطعه کار خواهد بود.

۲-تلرانس سنجه نرو خارج از تلرانس قطعه کار خواهد بود.

این نکات برای تمامی سنجه های حلقه ای، توپی و سنجه شکاف دار (نعلی یا دهان اژدر = gap gauge) به کار می رود. علاوه بر تلرانس مربوط به ساخت سنجه، مقدار اضافه مجازی (الوانس) برای فرسودگی جزئی که ممکن است بروی سنجه نو ایجاد گردد در نظر گرفته می شود. این مقدار مجاز تقریباً معادل با ۲۰٪ تلرانس سنجه است که بر خلاف جهت فرسایش به اندازه اسمی سنجه اضافه یا از آن کم می شود. وقتی تلرانس کار کمتر از ۰/۱ میلی متر می باشد فرسایش بسیار کوچک است و مقدار مجازی برای فرسایش سنجه در نظر گرفته نمی شود. از آنجا که سنجه های نرو فرسایش کمتری دارند مقدار مجاز فرسایش برای آنها نیز معین نمی گردد. شکلهای ۴-۵ و ۳-۵ این اصول را بطور خلاصه نشان می دهند.



شکل۳-۵) انتخاب تلرانس سنجه های توپی

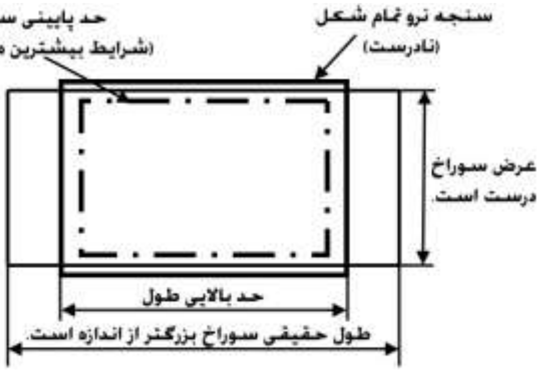


شکل۴-۵) انتخاب تلرانس سنجه حلقه ای یا دهان اژدر

در B.S. ۹۶۹ مشخص شده است که در برخی موارد تلرانس سنجه های توپی کوچکتر از تلرانس سنجه های حلقه ای و دهان اژدر می باشد چرا که سنجه های توپی نسبت به سنجه های حلقه ای و دهان اژدر با سهولت بیشتری تا دقت mm ۰/۰۰۱ و کمتر از آن قابل اندازه گیری می باشد. پس در هر مسئله طراحی، شکل هندسی قطعه کار (در این جا شکل هندسی سنجه) باید مورد بررسی قرار گیرد. این موضوع بخصوص زمانی که تلرانس قطری کوچک می باشد دارای اهمیت زیادی است.

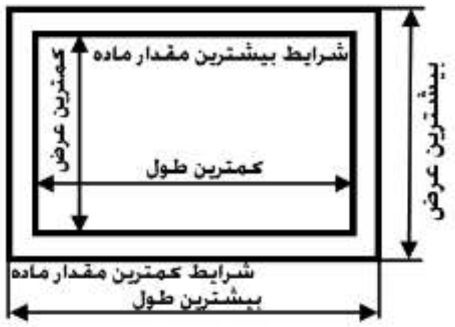
تئوری تِیْلور در سنجه ها

این تئوری کلید طراحی سنجه های حدی است که وظیفه و در نتیجه شکل بیشتر آن ها را تعریف می کند. این تئوری می گوید : سنجه برو بیشترین مقدار ماده (MMC-م) را بررسی می کند و در نتیجه باید بیشترین بُعد ممکن را نیز بازرسی نماید. سنجه نرو کمترین مقدار ماده (LMC-م) را بررسی می کند و در نتیجه باید کمترین بُعد ممکن (تنها یک بُعد) را بازرسی نماید (شکل ۵-۵).



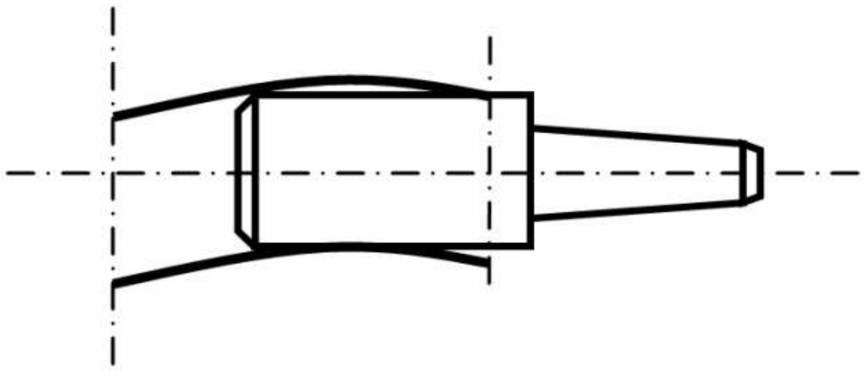
شکل۵-۵) محدودهٔ تلرانس یک سوراخ مستطیلی (دید از بالا-م)

برای بررسی این موضوع که اندازه سوراخ از محدودهٔ بیشترین مقدار ماده (کمترین اندازه سوراخ) خارج نشده باشد از سنجه های برو استفاده می گردد. مطابق آنچه که در بخش ۲-۵ گفته شد باید مقدار مجاز فرسایش و تلرانس سنجه نیز تعیین گردد. اکنون سنجه نرو را در نظر بگیرید. فرض کنیم از این سنجه برای بررسی دو بعد از نوع کمترین مقدار ماده (بیشترین اندازه سوراخ) استفاده گردد (برخلاف تئوری تِیْلور-م). چنان چه یکی از ابعاد مثلاً عرض سوراخ در محدوده اندازه باشد سنجه آن را قبول می کند. اما اگر بعد دوم یعنی طول سوراخ خارج از محدوده اندازه باشد سنجه آن را قبول نمی کند (شکل ۶-۵). به این ترتیب کار بطور کلی توسط سنجه پذیرفته می شود. اما اگر جهت بررسی هر یک از این دو بعد از سنجه نرو جدایی استفاده شود (طبق تئوری تِیْلور-م) یک سنجه قطعه کار را قبول و سنجه دیگر آن را رد می کند. به همین دلیل برای بررسی هر بُعد بهتر است از یک سنجه نرو استفاده شود اما سنجه برو می تواند تا چند بُعد را بررسی کند. این اصل باید در همه سنجه های حدی به کار رود.



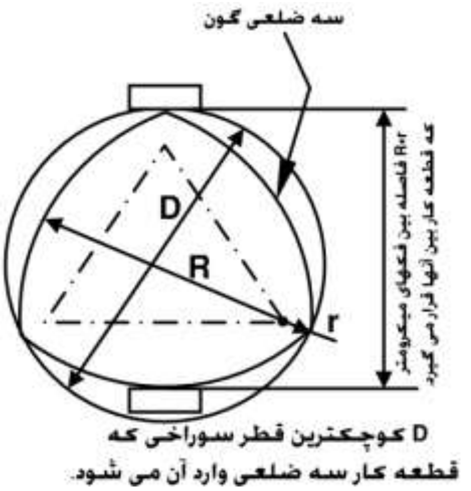
شکل۶-۵) سنجه نرو، سوراخ مستطیلی که از یک طرف خارج از اندازه است را رد نمی کند.

سنجه های نرو همواره کوتاه هستند و معمولاً از نظر طول تقریباً معادل با قطر سوراخ می باشند. ولی سنجه های برو از لحاظ طول در حدود ۳ یا ۴ برابر قطر سوراخ هستند. به همین دلیل تشخیص آنها از روی طول بسیار ساده است. طول سنجه های برو به میزانی است که بوسیله آن می توان انحراف از حالت بیشترین مقدار ماده (ناشی از خطای هندسی قطعه کار) را بررسی نمود. مثلاً در شکل ۷-۵ بلند بودن سنجه برو باعث می گردد خطای هندسی سوراخ یعنی هم راستا نبودن آن مشخص گردد.



شکل۷-۵) طول بلند سنجه توپی برو از ورود آن به سوراخ انحنا دار جلوگیری می کند.

همین مسئله ممکن است در مورد محورها نیز اتفاق بیفتد. در مورد محور به طور ایده آل یک سنجه حلقه ای برو باید به همراه یک سنجه دهان اژدر نرو بکار رود. در عمل برای بررسی محور، همواره دو سنجه برو و نرو دهان اژدر استفاده می شود ولی عاقلانه است که کنترل را با کاربرد یک سنجه حلقه ای برو تکمیل کنیم. این موضوع، بخصوص در مورد قطعه کاری که با ماشین سنگ زنی بدون مرغک ماشین کاری می شود اهمیت دارد چرا که در این ماشین امکان بُروز چند ضلعی واری وجود دارد. اگرچه ساده ترین حالت چند ضلعی واری، سه ضلعی شدن است اما پدید آمدن چند ضلعی با بیشتر از سه ضلع نیز امکان دارد. در شکل ۸-۵ یک قطعه کار سه ضلعی گون بروی مثلث متوازی الاضلاعی قرار گرفته است.

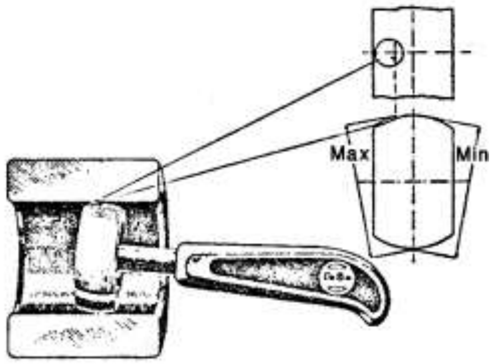


شکل۸-۵) پدیده چند ضلعی واری بروی یک قطعه کار استوانه ای شکل

از هر گوشه مثلث، شعاع های r و R رسم می گردد. اندازه هر شکلی از این قبیل (در صورتی که بین یک جفت صفحه موازی قرار گیرد) R+r می باشد. اما قطر کوچکترین سوراخی که این قطعه می تواند وارد آن شود بزرگ تر از قطر دایره خارجی نشان داده شده است. بنابراین یک سنجه دهان اژدر این قطعه را تأیید می کند. با اندازه گیری توسط میکرومتر نیز به نظر می رسد که قطعه کار ظاهراً در محدوده لازم قرار دارد. اما یک سنجه حلقه ای برو این قطعه کار را رد می کند. می توان ابعاد این قبیل قطعات را با قرار دادن آنها بروی بلوک V شکل با ساعت یا مقایسه گر، اندازه گیری نمود.

سنجه های تِبو (Te– bo) :

گروه خاصی از سنجه های توپی است که به وسیله شرکت سوئیسی S.K.F Ball Bearing Co.Ltd ساخته شده است. سنجه های تِبو معمولاً برای قطرهایی بزرگتر از آن چه که با سنجه های توپی معمولی کنترل می شود بکار می رود. این سنجه ها را به صورت کروی و با قطری معادل قطر سنجه برو برای قطعه کار سنگ می زنند. همچنین برای آنها تلرانس ساخت و فرسایش در نظر گرفته می شود. در شکل ۹-۵ یک نمونه از سنجه های تِبو نشان داده شده است. می توان دید که یک ناحیه دایروی کوچک از سنجه (به اندازهٔ تلرانس در نظر گرفته شده برای سنجه) بصورت برجسته ساخته می شود.



شکل ۹-۵) سنجه توپی از نوع تِبو

(با اجازه چاپ از شرکتS.K.F Ball Bearing Co.Ltd)

سنجه را در سوراخ قرار می دهیم و ابتدا آن را کج می کنیم به نحوی که قسمت دایروی برجسته با سطح فلز، تماس نداشته باشد. در این حالت درستی حد پایینی قطر سوراخ بررسی می شود. سپس سنجه را به عقب حرکت می دهیم به طوری که این بار بخش برجسته با سطح فلز تماس پیدا کند و به این ترتیب از حرکت سنجه جلوگیری شود. در این حالت حد بالایی قطر سوراخ آزمایش می گردد. اگر قسمت برجسته از سوراخ قطعه کار عبور کند قطعه کار رد می شود چرا که بزرگتر از اندازه مورد نظر است. نکته جالب آن که سنجه نرو با اصل تیلور سازگار است و در یک زمان تنها یک بعد را ارزیابی می کند. سنجه تِبو، بیضی واری را نیز می تواند بررسی نماید. سنجه برو (برخلاف سنجه توپی معمولی) نمی تواند سوراخی که قطر آن در محدوده مجاز است را رد کند مگر این که ناهم راستایی سوراخ، موجب عدم برقراری شرط بیشترین مقدار ماده شود.

رزوه های پیچ

خطاهای مجاز در پیچهای تجارتی فقط در مورد قطر ذکر می گردد. به عبارت دیگر برای یک پیچ با گام و شکل مشخص، تلرانسی برای گام و زاویه ی پیچ در نظر گرفته نمی شود بلکه خطا بصورت تلرانس مجاز در قطر مؤثر (متوسط-م) منظور می گردد. علت این کار آن است که خطای گام و زاویه در پیچ خارجی، قطر مؤثر را افزایش می دهد. خطای گام و زاویه پیچ در پیچهای داخلی موجب کاهش قطر مؤثر می شود. تأثیر این خطاها به طور کامل در فصل ۸ به

همراه اندازه گیری رزوۀ پیچ شرح داده شده است. این حقیقت که خطای گام یا خطای زاویۀ پیچ موجب تغییر ظاهری قطر مؤثر می شود در طراحی سنجه های حدی پیچها بسیار با اهمیت است و کاربرد اصل تیلور را ضروری می سازد.

سنجه های حدی برای پیچ ها

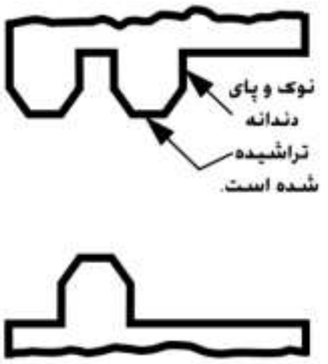
در ابتدا یک سنجه برو- نرو از نوع دهان اژدر را در نظر بگیرید که به طور کامل به شکل پیچ ساخته شده است و در تمام طول پیچ با آن درگیر می شود. لازم به ذکر است که اگر این سنجه ها به طور نادرست طراحی شوند با بررسی عیبهای آنها می توانیم با طراحی درست، عیوب را برطرف سازیم. به عنوان مثال اگر برای کنترل کیفیت قطعات رزوه شده ای که توسط یک قالب تولید شده است از این نوع سنجه ها استفاده شود این سنجه ها کمک مناسبی برای تنظیم اولیۀ قالب خواهند بود. چنان چه قالب، خطای گام تولید کند با وجود درست بودن قطر، قطعه کار وارد سنجه برو نخواهد شد چرا که خطای گام موجب افزایش ظاهری قطر می گردد. بنابراین قالب باید به نحوی تنظیم گردد که قطر پیچ کاهش یابد تا زمانی که بتوان قطعه کار را وارد سنجه برو نمود اما سنجه نرو وارد آن نشود. به این ترتیب قطعه کار تأیید می گردد. البته این تأیید نشانه درستی قطر نیست چرا که برای جبران خطای گام، قطر را کاهش داده ایم. مطلب بالا در حقیقت مثال برجسته ای از سنجه ای است که با اصل تیلور مطابقت نمی کند.
اگر بخواهیم آن را دوباره بر اساس اصل تیلور طراحی کنیم لازم است که :

۱-سنجه برو به طور تمام شکل و تمام طول برای بیشترین قطر پیچ، روزه شود.

۲-سنجه نرو به دو سنجه نرو تغییر داده شود که یک سنجه برای بررسی قطر اصلی (قطر خارجی-م) و دیگری بطور جداگانه (به نحوی که تحت تاثیر خطای گام نباشد) برای بررسی قطر مؤثر بکار رود.

بطور ایده آل سنجه برو باید به شکل سنجه حلقه ای تمام شکل باشد ولی کار با این سنجه ها پر زحمت است و در عمل از یک سنجه دهان اژدر تمام شکل استفاده می شود و سنجه حلقه ای برای بازرسیهای دوره ای بکار می رود. برای جلوگیری از پیدایش خطای گام در سنجه های نرو آنها را در طول کوتاهی روزه می کنند و بوسیله سنجه نرو تنها قطر مؤثر بررسی می گردد.

معمولاً نوک و پای دندانه ها را در سنجه نرو می تراشند. این موضوع در شکل ۱۰-۵ برای یک سنجه دهان اژدر نرو نشان داده شده است.



شکل۱۰-۵) شکل دندانه های یک سنجه نرو برای رزوه از نوع دهان اژدر

اکنون قطعه کاری را در نظر بگیرید که دارای خطای گام است و بوسیله یک سنجه دهان اژدر از نوع شکل۱۰-۵ مورد سنجش قرار می گیرد. به علت وجود خطای گام (قطر رزوه خارجی افزایش می یابد پس-م)، قطر قطعه کار باید کوچک شود تا زمانی که سنجه برو را از خود عبور دهد. زمانی که سنجه نرو امتحان می شود قطعه کار آن را نیز از خود عبور می دهد چرا که قطر، کمتر از اندازه واقعی است و طول رزوه شده مورد بررسی هم آن قدر بلند نیست که خطای گام تأثیر خود را نشان دهد. به طور مشابه برای سنجش ایده آل رزوه های داخلی، باید مجموعه ای از سنجه های توپی شامل سنجه های زیر مورد استفاده قرار گیرد :

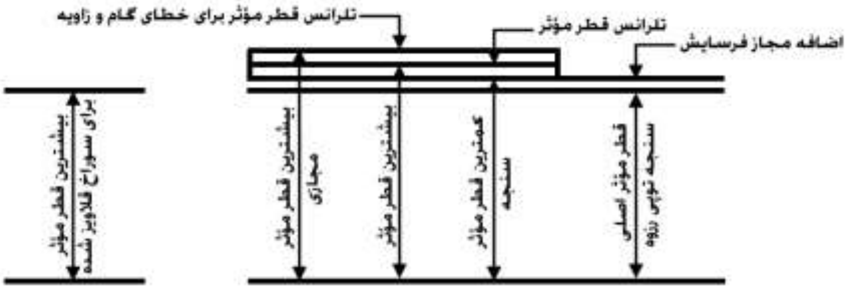
۱- سنجه برو که به طور تمام شکل و تمام طول رزوه شده است.

۲- سنجه نرو که نوک و پایه رزوه های آن صاف شده است (مانند شکل ۱۰-۵) و فقط دارای دو یا سه روزه در طول خود می باشد.

۳- سنجه نرو توپی ساده برای سنجش قطر فرعی (قطر داخلی-م)

در عمل غالباً یک سنجه رزوه شده نرو حذف می گردد و تنها یک سنجه ساده دو طرفه بکار می رود که انتهای برو در آن در تمام طول رزوه می شود ولی انتهای نرو، یک سنجه توپی ساده است که برای سنجش قطر فرعی مورد استفاده قرار می گیرد.

خطاهای مجاز سنجه حدی رزوه در B.S. ۹۱۹ تشریح و طبقه بندی شده است. این استاندارد، تلرانسهای مربوط به قطر اصلی، فرعی و مؤثر سنجه را ارائه می دهد. تلرانسهای مربوط به خطای گام و خطای زاویه پیچ، تبدیل و بر حسب اثرشان بر قطر مؤثر بررسی می گردند. یک سنجه توپی رزوه دارای مقدار فرسایش مجازی است که به اندازه اسمی آن اضافه می گردد. علاوه بر محدوده تلرانسی در نظر گرفته شده برای قطر مؤثر که قابل تخطی نیست منطقه تلرانسی دیگری برای خطای گام و زاویه رزوه بر حسب افزایش قطر مؤثر در نظر گرفته می شود. این مناطق تلرانسی در شکل ۱۱-۵ مشاهده می گردد.



شکل(۱۱-۵) معرفی مناطق تلرانسی در سنجه توپی رزوه برو

مناطق تلرانسی مشابهی برای سنجه های حلقه ای و دهان اژدر رزوه های داخلی ارائه می گردد و مقدار این تلرانسها به صورت جدول تنظیم شده است.

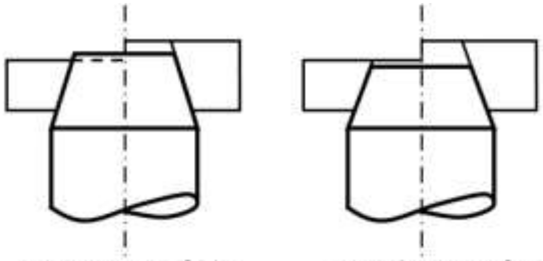
سنجه های مرجع برای پیچها

B.S. ۹۱۹ مناطق تلرانسی و بزرگی آنها را برای سنجه های توپی مرجع پیچ که دارای دقتهای بالایی هستند نیز ارائه می دهد. این سنجه ها برای تنظیم و آزمایش سنجه های دهان اژدر پیچ و سنجه های حلقه ای کوچک مورد استفاده قرار می گیرد. یک سنجه حلقه ای پیچ که دارای قطر کوچکی است را نمی توان با اندازه گیری تمام اجزای آن مورد بررسی قرار داد. به همین دلیل آنها را با کاربرد سنجه های توپی حدی که دقت بالایی دارند مورد سنجش قرار می

دهند. همچنین سنجه های مرجع مشابهی برای کنترل و تنظیم سنجه های دهان اژدر پیچ وجود دارد چرا که سنجه های دهان اژدر را نمی توان از روشهای تماسی مورد اندازه گیری قرار داد.

سنجه های حدی مخروط

سنجه های حدی مخروط را می توان برای بررسی زاویه مخروط قطعه کار استفاده نمود. اما کاربرد اصلی آنها سنجش قطر در یک نقطه معین روی مخروط است تا مشخص گردد که آیا در محدوده مورد نظر قرار دارد یا خیر؟ برای این کار در یکی از دو انتهای سنجه مخروط یک پله با سنگ زنی ایجاد می گردد به طوری که قطرهای بالا و پایین این پله حدود قطر مخروط را نشان می دهد. به کمک حس لامسه می توان متناسب بودن سنجه و قطعه کار را بررسی نمود. این سنجه در شکل ۱۲-۵ دیده می شود.



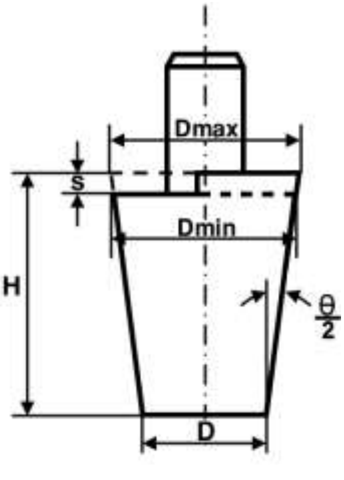
شکل(۱۲-۵) روش کاربرد یک سنجه حدی مخروط

پله سنجه حلقه ای مخروط همواره بروی قطر کوچک آن و پله سنجه توپی مخروط معمولاً بروی قطر بزرگ آن ایجاد می گردد. علت این کار آن است که قطرهای طرف دیگر مخروط، یعنی قطر بزرگ سنجه حلقه ای و قطر کوچک سنجه توپی مخروط ساده ترین قطرهای قابل اندازه گیری می باشند (با توجه به مراحل ساخت سنجه ها در صفحه ۹۹، طول اولیه مخروط پیش از سنگ زنی خارج از اندازه است پس قطرهای D_{max} و D_{min} در ابتدا قابل اندازه گیری نیستند و ساده ترین قطرهای قابل اندازه گیری همان قطر بزرگ سنجه حلقه ای و قطر کوچک

سنجه توپی می باشد-م). محاسبات مربوط به این قطرها به طور کامل در فصل ۴ شرح داده شد. توجه کنید که اندازه گیری مستقیم ابعاد مخروط در حین ساخت آن، با این روشها ممکن نیست. یک سنجه توپی مخروطی را در نظر بگیرید. اگر قطر D، معلوم باشد، قطرهای D_{min} و D_{max} تابع ارتفاع سنجه و زاویه مخروط هستند. در فصل ۴ نشان داده شد که :

$$D_{max} = D + 2Htg\frac{\theta}{2} \quad , \quad D_{min} = D + 2(H - S)tg\frac{\theta}{2}$$

زاویه قطعه کار تحت سنجش، دارای تلرانس است و بنابراین سنجه حدی آن نیز دارای تلرانس می باشد. اگر تلرانس زاویه ای قطعه کار ۱۰ ثانیه باشد (با حدود ۵ ± ثانیه) تلرانس سنجه ۱۰٪ تلرانس قطعه کار، یعنی ۱ ثانیه خواهد بود (با حدود ۰/۵ ± ثانیه). اگر D مطابق اندازه مورد نظر باشد مقدار تلرانس زاویه ای (با توجه به ارتفاع H)، اختلاف مهمی در قطرهای D_{min} و D_{max} ایجاد می کند (شکل ۱۳-۵).



شکل ۱۳-۵) سنجه توپی مخروط

بنابراین برای ساخت این سنجه ها روش زیر به کار برده می شود :

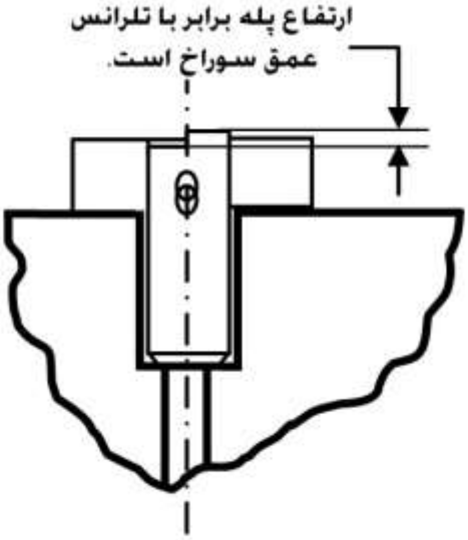
۱- سنجه با طولی خارج از اندازه و تحت زاویه ای که تا حد امکان نزدیک به زاویه اسمی قطعه کار است ساخته می شود.

۲- قطر D و زاویه $\frac{\theta}{2}$ سنجه حاصل به دقت تعیین می گردد.

۳- بر اساس اندازه های به دست آمده از قسمت قبل با محاسبه ارتفاع H، قطر صحیح D_{max} و با محاسبه ارتفاع پله یعنی S، قطر صحیح D_{min} بدست می آید.
۴- سنجه، با دقت مورد نظر و تحت اندازه های H، S، D_{max} و D_{min} سنگ زده می شود.
برای تولید سنجه های حلقه ای مخروط با دقت مورد احتیاج نیز می توان از روشی مشابه روش بالا استفاده کرد.
اگر بخواهیم از سنجه مخروطی جهت بررسی دقت زاویه قطعه کار استفاده کنیم لازم است که دور سنجه را با چند نقطه از ماده ای به رنگ آبی آغشته کنیم. سپس سنجه را درون قطعه کار مخروطی قرار می دهیم و به آرامی می چرخانیم. بسته به اثر باقی مانده از رنگ که در نتیجه عبور قطعه کار از روی سنجه ایجاد می گردد دقت زاویه ای قطعه کار بررسی می شود. اما این روش، مقدار عددی برای خطای زاویه ای ارائه نمی کند. بنابراین بهتر است که از ابتدا سعی شود تا ماشین یا دستگاه تولید مخروط درست تنظیم گردد (تا میزان خطای زاویه ای به حداقل برسد). توجه نمایید که روش گفته شده برای بازرسی محصولات، روش کاملاً مناسبی نیست و تنها برای تنظیم کردن یا بازرسی موضعی در حین فرایند تولید بکار برده می شود.

سنجه های عمق سوراخ (thumb nail)

این سنجه ها، سنجه های حدی برای بازرسی عمق سوراخ می باشند. معمولاً آنها را به شکل استوانه ای تولید می کنند که با انطباق عبوری دقیقی در یک مهره جا زده می شوند. به این ترتیب سنجه می تواند بروی سوراخ مورد بررسی باقی بماند و لبه های دقیق مهره، عمق مورد نظر را از طریق پله موجود بروی استوانه ارزیابی می کند. شکل ۱۴-۵ این نوع سنجه را نشان می دهد.



شکل ۱۴-۵) سنجه عمق سوراخ

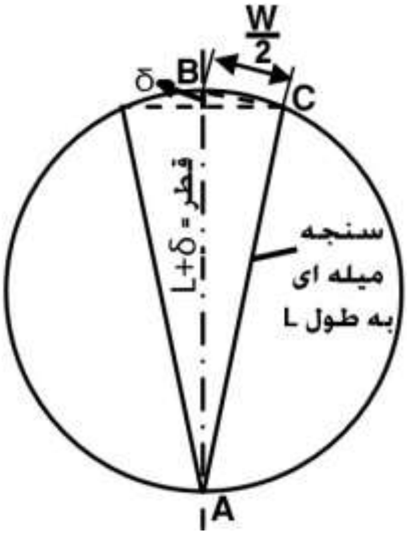
در این نوع سنجه ها لازم است که برای طول سنجه، پله سنجه و ضخامت مهره، تلرانسهایی در نظر گرفته شود. اگر تلرانس عمق سوراخ کوچک باشد لازم است که اجزای فوق با دقت بالایی ساخته شود.

سنجش قطرهای بزرگ

سنجه های قطرهای بزرگ از نوع حدی یا سنجه هایی که روش کاری مشابه با آنها دارند نمی باشد.

سنجش سوراخهای بزرگ

برای این مقصود سنجه ای به شکل میله بکار می رود که طول آن با استفاده از یک ماشین اندازه گیری طول میله ها (فصل ۳) به طور دقیق تعیین شده است. طول این سنجه باید کوچکتر از قطر سوراخ مورد اندازه گیری باشد. این سنجه را درون سوراخ مورد نظر قرار می دهند و مقدار جابجایی آن حول نقطه A توسط یک خط کش یا متر نواری انعطاف پذیر اندازه گیری می شود (شکل ۱۵-۵).



شکل ۱۵-۵) اندازه گیری سوراخهای بزرگ

از شکل ۱۵-۵ دیده می شود که $D=L+\delta$ و همچنین اگر زاویه جابجایی کوچک باشد $BC=\frac{W}{2}$. چون در یک نیم دایره این زاویه، قائمه خواهد بود بنابراین در مثلث ACB :

$$L^2+\left(\frac{W}{2}\right)^2=(L+\delta)^2 \quad\Rightarrow\quad L^2+\frac{W^2}{4}=L^2+2L\delta+\delta^2$$

L^2 حذف می گردد و اگر مقدار δ کوچک باشد δ^2 نیز قابل چشم پوشی است. پس :

$$\frac{W^2}{4}=2L\delta$$

و در نتیجه :

$$\delta=\frac{W^2}{8L}$$

که L طول سنجه و W مقدار جابجایی می باشد. چون $D=L+\delta$ پس :

$$D=L+\frac{W^2}{8L} \Rightarrow W=\sqrt{(D-L)8L}$$

اگر مقادیر حدی D و طول L در این معادله قرار گیرد آنگاه حدود مجاز مقدار جابجایی بدست می آید. دقتی که از این روش حاصل می گردد بسیار بیشتر از دقتی است که با کاربرد پرگار ورنیه دار که اندازه گیری را به طور مستقیم انجام می دهد بدست می آید. به عنوان مثال اگر طول سنجه ۴۰۰mm و مقدار جابجایی ۵۰mm اندازه گیری شود :

$$D=400+\frac{2500}{8\times 400}mm$$

$\therefore D = 400 + 0.78mm$

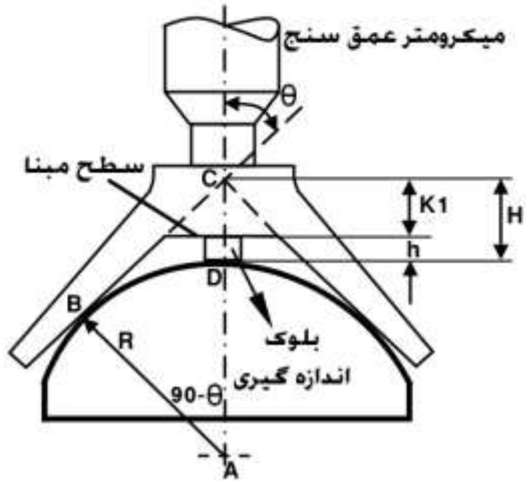
معمولاً دقت اندازه گیری w، ۱± میلی متر می باشد. اگر فرض کنیم خطای w در این جا ۱ میلی متر است :

$$D = 400 + \frac{(51)^2}{8 \times 400} mm = 400 + \frac{2601}{8 \times 400} = 400 + 0.81mm$$

پس با ایجاد خطای ۱ میلی متر در جابجایی (W)، خطای ۰/۰۳ میلی متر ($0.81 - 0.78 = 0.03mm$) در قطر سوراخ (D) ایجاد می گردد که اصلاح آن توسط وسایل اندازه گیری ساده به طور مستقیم مشکل خواهد بود.

اندازه گیری شعاع خارجی قطعات بزرگ

برای انجام این کار از سنجه زاویه داری استفاده می شود که زاویه بین سطوح آن به طور دقیقی معین شده است. مشابه آنچه که در شکل ۱۶-۵ مشاهده می گردد برای آن که سنجه زاویه دار بروی قطعه کار قرار گیرد می توان از یک میکرومتر کمک گرفت. همچنین می توان از بلوکهای اندازه گیری نیز استفاده کرد. ضخامت بلوک متناسب با حدود شعاع تحت بررسی خواهد بود. قابل توجه است که این روش، شعاع قطعه کار را معین می کند (نه قطر آن را). می توان از این روش جهت تعیین شعاع قطعه ای از دایره نیز استفاده کرد (شکل ۱۶-۵).



شکل ۱۶-۵) اندازه گیری شعاع خارجی قطعات بزرگ

اگر θ نصف زاویه بین سطوح سنجه زاویه ای باشد آنگاه با توجه به شکل۱۶-۵ داریم :

$$\text{Cos}(90-\theta)=\frac{AB}{AC}\;,\;\begin{cases}AB=R\\AC=R+H\end{cases}$$

$$\therefore \text{Cos}(90-\theta)=\frac{R}{R+H}$$

$$(R+H)\text{Cos}(90-\theta)=R \Rightarrow H\text{Cos}(90-\theta)=R-R\,\text{Cos}(90-\theta)=R[1-\text{Cos}(90-\theta)]$$

$$\therefore R=\frac{H\text{Cos}(90-\theta)}{[1-\text{Cos}(90-\theta)]}$$

در این عبارت ریاضی، جمله $\text{Cos}(90-\theta)$ در مورد یک سنجه معین ثابت است پس :

$$R=\frac{HK}{1-K}$$

با مراجعه به شکل ۱۶-۵ دیده می شود که :

$$H=h+k_1$$

$$R=\frac{(h+k_1)k}{1-k}$$

$$=(h+k_1)\frac{k}{1-k}$$

که $K=\text{Cos}(90-\theta)$، θ = نصف زاویه سنجه، K_1 = فاصله محل برخورد امتداد اضلاع سنجه تا سطح مبنای سنجه و h = ارتفاع بلوک اندازه گیری (فاصله بین شعاع تا سطح مبنای سنجه)

مقادیر $k1$ و $\frac{k}{1-k}$ برای یک سنجه معین، ثابت می باشد و بهتر است جهت جلوگیری از اشتباه بصورت مقادیر عددی بروی سنجه حک شوند. اگر معادلهٔ بالا را بر حسب h بدست آوریم خواهیم داشت :

$$h=\frac{R(1-k)}{k}-k_1$$

اگر در این معادله، مقادیر حدی (حدود بالا و پایین-م) R قرار داده شود آنگاه مقادیر حدی ضخامت بلوک اندازه گیری (h) بدست می آید. می توان فرض کرد که این مقادیر h، قرائتهای بدست آمده از یک میکرومتر برای R هستند به طوری که میکرومتر در سطح مبنای سنجه، مقدار صفر را نشان دهد. روش دیگر آن است که به جای میکرومتر، یک ساعت اندازه گیری نصب گردد و مقادیر حدی R به کمک قرائتهای h حاصل از ساعت بررسی گردد.

با توجه به این که در این روش، تعیین شعاع با مقداری خطا همراه است به دنبال آن قطر قطعه کار نیز خطا خواهد داشت که مقدار آن دو برابر خطای شعاع است. پس با این روش می توان خطای اندازه گیری قطعه کارهایی با قطر نسبتاً بزرگ را نیز مشخص کرد.

جنس سنجه ها

ماده ای که در ساخت سنجه بکار می رود باید نیازهای مشخصی را برآورده کند. این نیازها یا به واسطه خواص ویژه ای که ماده دارد حاصل می گردد یا به کمک فرایندهای مختلف ساخت و عملیات حرارتی مرتفع می گردد. این نیاز ها عبارت اند از :

۱- سختی : مقاومت در برابر فرسودگی

۲- استحکام : عدم تغییر ابعاد سنجه با گذشت زمان

۳- مقاومت در برابر خوردگی

۴- قابلیت مکانیکی : ماشین کاری راحت قطعه کار برای حصول شکل، دقت و سطح پرداخت مورد نیاز

۵- ضریب انبساط خطی کوچک : از آنجا که سنجه حدی اغلب برای مقایسه با یک قطعه کار به وسیله دست لمس می شود باید ضریب انبساط خطی کوچکی داشته باشد. بخش هایی که با دست نگاه داشته می شود نیز باید انتقال گرمای کمی داشته باشد. به عنوان مثال سنجه های توپی با دسته های پلاستیکی ساخته می شود.

از جمله مواد نسبتاً ارزان و با کیفیت در ساخت سنجه ها، فولاد پر کربن است. با عملیات حرارتی می توان آن را تا درجه بالایی سخت کرد و استحکام سنجه را افزایش داد. فولاد پر کربن، به سادگی ماشین کاری می گردد و پرداخت سطح بالایی ارائه می دهد.

عملیات حرارتی سنجه های حدی

فولاد پر کربن پس از قرار گرفتن در دمای ۷۳۰ درجه سانتی گراد و با سرد کردن در آب به طور کامل سخت می شود. سختی حاصل تقریباً ۶۴ راکول سی می باشد. این درجه از سختی موجب می گردد تا فولاد، بینهایت شکننده شود. بنابراین لازم است که برای کاهش تردی،

سنجه را تمپر کرد (بازگشت داد). البته نباید فولاد در اثر تمپر کردن آن قدر نرم شود که مقاومت آن در برابر فرسایش کاهش یابد. عملیات تمپرینگ همچنین برای موازنه کردن ماده و از بین بردن تنشهای داخلی آن (که با گذشت زمان موجب تغییر شکل سنجه می شود) استفاده می گردد. در دمای تمپرینیگ (۲۰۰ سانتی گراد) تردی سنجه به حدی کاهش می یابد که ورقه ورقه و لب پریده نشود. در این حالت مقدار سختی، ۵۸ راکول سی خواهد بود. اگر سنجه بین ۸ تا ۱۰ ساعت در این دما باقی بماند بینهایت محکم و پایدار خواهد شد. سنجه های روزه نیز ترد هستند و اگر با خشونت بکار برده شوند از بین خواهند رفت. این سنجه ها را باید در دمای ۲۴۰ درجه سانتی گراد تمپر نمود. در این دما سختی ۵۲ راکول سی بدست می آید.

مواد دیگر برای سنجه های حدی

اگر یک تکه بزرگ از فولاد پر کربن پس از حرارت دهی در آب سرد شود احتمالاً ترک بر می دارد. از طرف دیگر اگر برای جلوگیری از ایجاد ترک، فولاد در روغن سرد شود برای آن که در برابر فرسایش مقاومت داشته باشد سختی آن به درجه مناسبی نخواهد رسید. برای حل این مشکلات، سنجه های بزرگ از فولاد ابزار آلیاژی نیکل– کُرم که در روغن سرد می شود تولید می گردد. هنگامی که انبساط حاصل از دما اهمیت ویژه ای دارد (مثلاً در سنجه های بلند و دقیق) ماده ای به نام اینوار (Invar) که شامل ۳۶ درصد نیکل است بکار برده می شود. اینوار ضریب انبساطی کمتر از 1×10^{-6} بر سانتی گراد دارد ولی در مدت زمان طولانی استحکام لازم را دارا نمی باشد. آلیاژ دیگری با ۴۲ درصد نیکل به نام اِلینوار (Elinvar) وجود دارد که محکمتر است اما ضریب انبساط آن 8×10^{-6} بر سانتی گراد برآورد شده است که البته باز هم ضریب انبساط کوچکی می باشد.

می توان سنجه ها را از فولاد کم کربن ساخت و آنها را به طور سطحی سخت کرد. اما این فرایند سخت کردن نسبتاً گران می باشد چرا که شامل کربونیزاسیون، تسویه سازی مغز ماده، سخت کردن سطحی و تمپر کردن است. این قبیل سنجه ها نیز عملکرد رضایت بخشی دارند. انتخاب فولاد پر کربن که به طور سرتاسری سخت شده باشد یا فولاد کم کربن که به طور

سطحی سخت شده است تا اندازه زیادی به نظر مصرف کننده، مواد موجود و مسائل اقتصادی بستگی دارد.

آب کاری مستقیم کُرم روی فولاد نه به جهت مقاصد تزئینی بلکه به دلیل سختی و مقاومت به فرسایش بالای کُرم، نیز روش دیگری در ساخت سنجه ها می باشد که توسعه یافته است. این فرایند را می توان برای ترمیم فرسودگی سنجه ها و یا سنجه هایی که زیر اندازه مورد نظر ماشین کاری شده اند و یا تصحیح خطاهای دیگر نیز مورد استفاده قرار داد.

در طول جنگ جهانی که فولادهای با کیفیت خوب تا حد زیادی ارزش پیدا کرده بود، بخصوص در ایالات متحده آمریکا سنجه های شیشه ای ساخته شد. ادعا شده بود که اگر این سنجه ها بیفتند خرد نمی شوند و صافی خود را حفظ می نمایند و مجدداً قابل استفاده هستند. با این نوع سنجه ها نیز استحکام لازم فراهم می شد ضمن آن که سطح پرداخت بالایی داشتند. مزیت خاص سنجه های شیشه ای این بود که هنگام بازرسی، مانع دیدن قطعه کار نمی شدند. گزارش شده است که برای سنجش لوله های تفنگ، سنجه های شیشه ای عمر طولانی تری نسبت به سنجه های فولادی دارند.

پرداخت سطح برای سنجه ها

هر عاملی که بتواند کاهش جزئی در میزان فرسودگی سنجه ایجاد کند (از جمله پرداخت سطح آن) دارای اهمیت است. سطح پرداخت ضعیفی که تعداد اندکی برآمدگی بلند دارد خیلی زودتر از سطح پرداختی که برآمدگی های بیشتر اما کوتاهتر دارد فرسوده می شود چرا که منطقه تماس بزرگتری را ایجاد می کند. بنابراین سنجه باید بوسیله سنگ زنی با کیفیت بالایی پرداخت شود به طوری که مقدار C.L.A مربوط به آن (فصل ۹) بیشتر از µm ۰/۱ نباشد.

فصل ششم

اندازه گیری ماشین ابزار

(Machine Tool Metrology)

لزوم اندازه گیری ماشین ابزار

در فصل گذشته سنجه های اندازه گیری را بررسی نمودیم. هنگامی که می گوییم سنجه ای دقیق نمی باشد یعنی ابعاد آن درست نیست و پارامترهایی مانند پرداخت سطح و شکل هندسی آن نیز دارای خطا هستند. به همین دلیل در یک اندازه گیری مطلوب، تمام این پارامترها باید متناسب باشد. ایجاد تناسب در این پارامترها به مهارت سازنده و دقت ماشین ابزار بکار رفته در ساخت سنجه بستگی دارد. این مطلب معمولاً در تولید بیشتر قطعات صحیح است (به استثناء قطعاتی که ساخت آنها به مهارت کمتری احتیاج دارد یا تعداد تولید آنها بسیار بالا است). دقت قطعه کارهایی که مونتاژ می شوند تا حد زیادی به دقت ماشین ابزاری که برای تولید آنها بکار می رود بستگی دارد. با توجه به افزایش مداوم تقاضا برای تولید قطعات ماشین کاری دقیق، تحقیقات بسیاری درباره طراحی ماشین ابزار و بخصوص وسایلی که به کمک آنها دقت هندسهٔ ماشین اصلاح می گردد انجام شد. به همین دلیل در این فصل جدای از علم اندازه گیری، مطالبی را در مورد آزمایش هندسی اصل مسیر در ماشین ابزار، تحت شرایط استاتیکی بررسی می کنیم. بسط این مطالب به تعیین دقت هم راستایی ماشین ابزار تحت شرایط دینامیکی خواهد انجامید اما در این بخش تنها آزمایشهای استاتیکی هم راستایی بررسی می گردد. در حال حاضر آزمایشهای دینامیکی، موضوع تحقیقات بسیاری هستند و به خواننده توصیه می شود که برای دستیابی به اطلاعات بیشتر به مقالات تحقیقی موجود رجوع کند.

آزمایشهای هم راستایی

آزمایشهای بکار رفته برای بررسی ماشین ابزار (بدون توجه به نوع ماشین) به گروههای زیر تقسیم می شود (توجه نمایید که آزمایشهای گروه ۵ ماهیت دینامیکی دارند) :

۱- تراز بودن ماشین ابزار نصب شده در سطوح عمودی و افقی

۲- آزمایش محور اصلی (اسپیندل) جهت اطمینان از حرکت محوری صحیح

۳- آزمایش ریلهای بستر از نظر صافی و توازی

۴- آزمایش حرکت خطی اجزایی مانند صفحه رنده بند ماشین تراش و میزها در امتداد ریلهای بستر

۵- آزمایشهای عملی به شکل ماشین کاری نمونه های آزمایشی و برررسی دقت و سطح پرداخت آنها

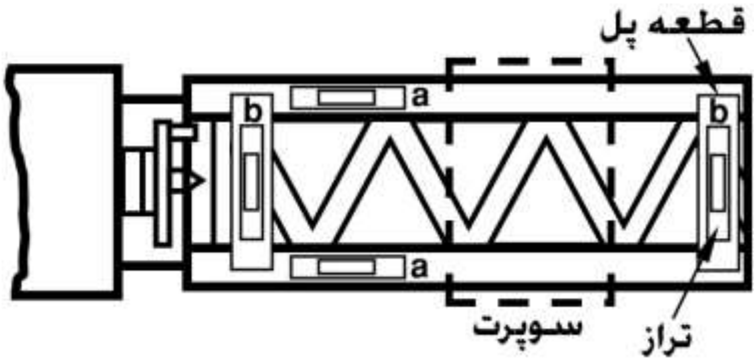
بر طبق نتایج حاصل از اندازه گیری نمونه های ماشین کاری شده در ماشین ابزار، مشخص شده است که رفتار ماشین تحت شرایط عادی کار آشکار می شود. بنابراین بررسی ماشین تحت شرایط بارگذاری استاتیکی برای تشخیص رفتار آن کافی نیست بلکه ارتعاش و تغییر شکل اجزای ماشین تحت بارگذاری دینامیکی نیز باید بررسی گردد. یکی از پیشگامان طراحی و ارزیابی آزمایشهای مناسب برای ماشین ابزار، دکتر G. Schelesingea می باشد که مقاله ای در این باره ارائه کرده است. بعدها مجموعه ای از جداول آزمایش بطور مشترک توسط انجمن مهندسان مکانیک و انجمن مهندسان تولید تهیه شد و به تدریج برای آزمایشهای استاندارد ماشین ابزار منابعی بوجود آمد که بوسیله سازندگان، جهت کنترل کیفیت نهایی ماشین ابزار بکار گرفته شد. اگرچه دقت این جداول به مرور زمان تصدیق گردید ولی اکنون روشهای اندازه گیری اصلاح شده ای ارائه شده است که در ادامه به بررسی آنها می پردازیم.

آزمایش تراز بودن ماشین نصب شده

بسیار تأکید می شود که یک ماشین ابزار در سطوح عمودی و افقی باید به نحو صحیحی نصب گردد. به عنوان مثال اگر ماشین تراشی که دارای بستر بلندی است بدرستی در سطح افقی نصب نگردد روشن است که بستر آن خم می شود. چنان چه در دو طرف بستر ماشین ابزار، تغییر شکلی ایجاد گردد بستر تاب برمی دارد در نتیجه صفحه رنده بند ماشین نمی تواند در راستای یک خط مستقیم حرکت کند و بنابراین ماشین کاری یک استوانه با تراش غیر ممکن خواهد بود.

ایجاد دقت در نصب اولیه ماشین به ضخامت زیرسازی (فونداسیون) که ماشین بروی آن قرار داده شده است بستگی دارد. بیشتر انواع ماشین ابزار به زیرسازی با ضخامت بیشتر از ضخامت کف کارگاه نیاز ندارند (۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی متر از نبشی نصب شده بروی هسته سخت

فونداسیون). در موارد خاص مانند ماشینهای جیگ بورینگ و سنگهای دقیق و بلند تهیه زیرسازی بتنی مخصوص با عمق زیاد و جدا از کف کارگاه لازم می باشد. در شکل ۱-۶ روش آزمایش تراز بودن ماشین ابزار نشان داده شده است. در این شکل بستر و ریلهای یک تراش مرغک دار به طور مختصر رسم شده است.



شکل۱-۶) آزمایش فیزیک ماشین تراش برای بررسی تراز بودن یا تاب داشتن

سوپرت ماشین را تقریباً به وسط ریلهای میز می آوریم. سپس یک تراز دقیق در موقعیت a-a قرار می دهیم تا تراز بودن راستای طولی بررسی شود. برای بررسی تراز بودن راستای عرضی همین کار در موقعیت b-b انجام می گردد. البته ترجیح داده می شود که برای بررسی هر راستا از دو تراز در موقعیتهای نشان داده شده استفاده گردد. به این ترتیب، هم زمان دو موقعیت از یک راستا بررسی می شود. قرائتهای انجام شده، هر تاب یا پیچی را در میز آشکار می کند. اگر میز تراز نباشد قرائتهای بدست آمده مثبت یا منفی است. برای تصحیح خطا باید زیر پایه های تکیه گاه یا بالشتک های ماشین و در نقاط مناسب، گوه یا زیرسَری هایی قرار داد به طوری که قرائتها در هر راستا حداکثر ۰/۰۲ mm با هم اختلاف داشته باشد. تراز مناسب برای این آزمایش باید حساسیت ۰/۰۴mm در متر داشته باشد و پایه آن نیز V شکل باشد تا بتواند با ریلهای V شکل ماشین ابزار به طور مستقیم تماس یابد. معمولاً در موقعیت b-b به قطعه کمکی نیاز است که بروی ریلها قرار گیرد تا تراز بروی آن موقعیت دهی گردد. به این قطعه، پُل گفته می شود و برای ماشین تراشی که میز مسطح دارد باید سطح مسطحی داشته

باشد. در مواردی که ماشین ابزار ریلهای V شکل دارد بهتر است قطعه پُل نیز برای قرار گرفتن بروی ریل، سطح V شکل داشته باشد.

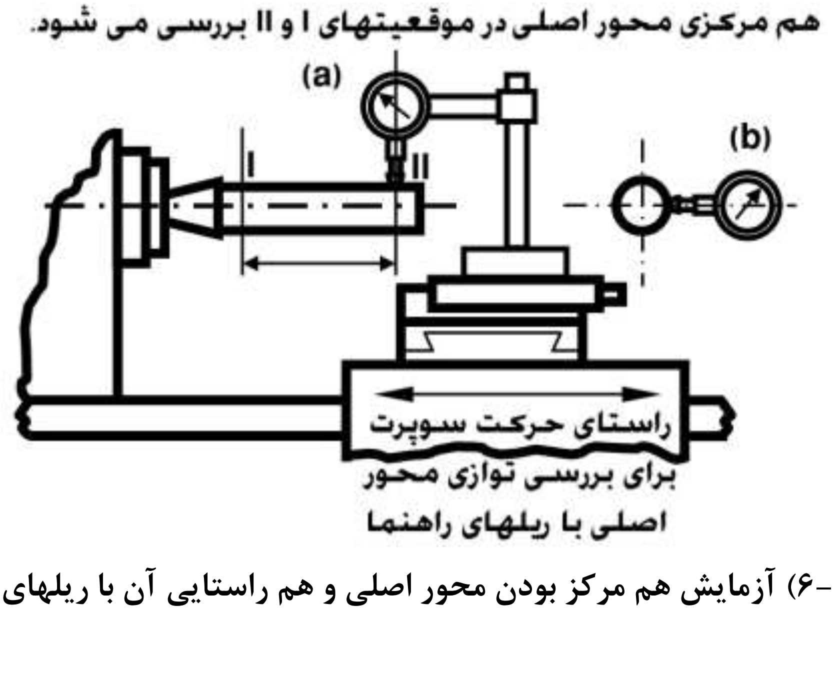
آزمایش محور اصلی (اسپیندل)

یک بار دیگر ماشین تراش مرغک دار را در نظر بگیرید. برای تولید کارهای دقیق، دوران صحیح مخروط داخلی محور اصلی بسیار با اهمیت است. تجهیزاتی که برای این آزمایش مورد احتیاج می باشد عبارت است از :

الف)یک میله آزمایش موازی با افق که دارای ساقه ای مخروطی است. بخش مخروطی آن باید طوری ساخته شده باشد که به نحو دقیقی در نوک مخروطی محور اصلی جای گیرد و با آن هم مرکز شود. معمولاً کل این میله بوسیله عملیات حرارتی، سخت شده است.

ب)ساعت اندازه گیری با دقت ۰/۰۱ mm

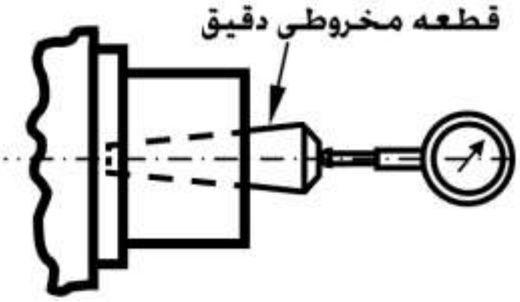
روش کار در شکل ۲-۶ قسمت a نشان داده شده است.



شکل۲-۶) آزمایش هم مرکز بودن محور اصلی و هم راستایی آن با ریلهای ماشین

با دوران میله، مقادیر نشان داده شده بوسیله ساعت اندازه گیری در دو موقعیت ۱ و۲ خوانده می شود. بدیهی است که این مقادیر باید از هر نظر دقیق باشد. فاصله بین موقعیتهای ۱ و۲ نباید بیشتر از ۳۰۰ میلی متر انتخاب گردد. در موقعیت ۱ مقدار خطا از ۰/۰۱ و در موقعیت ۲

از ۰/۰۳ میلی متر نباید تجاوز کند. آزمایش مهم دیگر، آزمایش توازی محور اصلی با ریلهای میز است که در دو سطح عمودی و افقی انجام می شود. روش آزمایش در شکل ۲-۶ قسمت b نشان داده شده است. خطای توازی زمانی آشکار می شود که با حرکت سوپرت ماشین تراش و در هر فاصله ۳۰۰ میلی متری، عقربه ساعت، جابجایی بیش از ۰/۰۲ میلی متر داشته باشد. در سطح عمودی (a)، ساعت اندازه گیری، سرانجام در انتهای آزاد میله آزمایش قرار می گیرد. در سطح افقی (b) خطا باعث می گردد میله آزمایش به طرف ابزارگیر متمایل شود. بنابراین اگر اجازه دهیم تا این خطا در جهت ذکر شده باقی بماند هنگام ماشین کاری، فشار ابزار باعث می شود قطعه کار به حالت اولیه خود باز گردد و در نتیجه خطا کاهش خواهد یافت. در شکل ۳-۶ خطای شناور بودن (بازی کردن-م) محور اصلی آزمایش می شود.

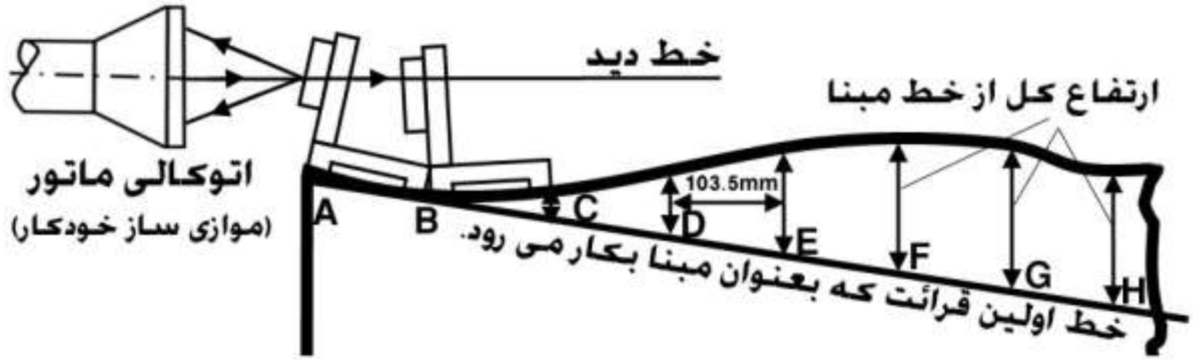


شکل ۳-۶) آزمایش شناور بودن محور اصلی یک ماشین تراش

ساعت اندازه گیری بطور محکم و در موقعیتی مناسب بروی ماشین نصب می شود. یک قطعه مخروطی دقیق که براحتی درون مخروط محور اصلی جای بگیرد را درون محور اصلی قرار می دهیم. پیشانی انتهای بیرونی این قطعه باید مسطح و نسبت به محور مخروط محور اصلی گونیا باشد. راستای ساعت اندازه گیری طوری تنظیم می شود که در امتداد محور چرخش محور اصلی قرار گیرد. در این آزمایش، خطا نباید از ۰/۰۱ میلی متر تجاوز کند. تشخیص بین خطای محوری که در ابتدای این قسمت (۲-۲-۶) بررسی شد و خطای حاصل از بازی کردن انتهای محور اصلی بسیار مهم است. خطای بازی کردن (شناور بودن-م) انتهای محور اصلی در اثر لقی بین یاتاقانها پدید می آید اما خطای محوری در اثر عدم تعامد سطح تکیه گاه یاتاقان نسبت به محور چرخش حاصل می گردد که موجب می شود در انتهای محور اصلی یک حرکت نوسانی تولید گردد.

آزمایش تخت بودن (ریلهای حرکتی-م)

برای آن که سوپرت ماشین تراش بتواند در هر دو راستای افقی و عمودی در امتداد یک خط مستقیم حرکت کند ریلهای راهنمای حرکت سوپرت باید مستقیم و تخت باشند. انجام این آزمایش از راههای متعددی امکان پذیر است. مناسبترین روشها استفاده از تراز دقیق یا موازی ساز خودکار (اتوکالی ماتور) می باشد که در اینجا روش موازی ساز، شرح داده خواهد شد. در هر دو روش مذکور، باید نتایج تک تک اندازه گیریها، جدول بندی و ثبت شود. اصول اندازه گیری با موازی ساز خودکار همان است که در فصل ۴ شرح داده شد. فرض کنید که می خواهیم تخت بودن میز یک ماشین تراش۲ متری را بررسی نماییم. این آزمایش در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶) بکارگیری موازی ساز، جهت بررسی تخت بودن ریلهای راهنمای میز یک ماشین تراش

موازی ساز، مستقل از میز تراش و در حدود نیم متر دورتر از یک انتهای میز تنظیم می شود. پرتو نور موازی این دستگاه در امتداد طول میز تصویر می شود. یک تکیه گاه صلب مخصوص (ترجیحاً از نوع سه پایه) برای تصویر کردن پرتو نور لازم است. به عبارت دیگر منعکس کننده بروی یک سه پایه قرار می گیرد که در امتداد میز ماشین تراش حرکت داده می شود. منعکس کننده در یک انتهای میز و نزدیک به موازی ساز قرار داده می شود و انعکاس آن در موازی ساز تنظیم می گردد تا تصویر سیمهای متقاطع در عدسی چشمی مشاهده گردد. سپس منعکس کننده به بخشهای دیگر میز برده می شود (بطور منطقی راستای حرکت منعکس کننده باید با محور نوری دستگاه موازی باشد). تصویر سیمهای متقاطع مثل حالت اول در عدسی چشمی

دیده خواهد شد. در صورتی که انعکاسهای حاصل در موقعیتهای مختلفی از میز بررسی گردد توسط این روش می توان به طور تقریبی تراز بودن میز ماشین تراش را در سطح افقی بررسی کرد. در صورت تراز نبودن (تخت نبودن-م) می توان یک قطعه صاف و مستقیم را زیر میز ماشین تراش قرار داد تا زمانی که راستای حرکت منعکس کننده در امتداد میز یک خط مستقیم باشد.

فرض کنید که فاصله بین پایه های تکیه گاه منعکس کننده ۱۰۳/۵ میلی متر باشد و فواصل طولی اندازه گیری نیز ۱۰۳/۵ میلی متر منظور گردد یعنی پس از هر بار قرائت از موازی ساز، منعکس کننده ۱۰۳/۵ میلی متر حرکت داده شود. ۱ دقیقه (یک شصتم درجه) از یک کمان برابر $\frac{2\pi}{360\times 60}$ رادیان است پس در طول مبنای ۱۰۳/۵ میلی متر، یک دقیقه از کمان برابر است با :

$$\frac{2\pi}{360\times 60}\times 103.5=\frac{2\times 3.14}{360\times 60}\times 103.5=0.03\text{mm}$$

یعنی اگر منعکس کننده در حین حرکت بروی میز به اندازه ۱ دقیقه کج شود در روی ریل یک بر آمدگی یا فرورفتگی به اندازه ۰/۰۳ میلی متر وجود دارد. جهت اطمینان از دریافت تصویر سیمهای متقاطع بوسیله موازی ساز، هنگامی که منعکس کننده در انتهای میز قرار داده می شود چندین قرائت بدست می آید. در شکل ۴-۶ دو موقعیت ازمنعکس کننده نشان داده شده است (پستی و بلندیهای سطح میز بسیار اغراق آمیز رسم شده است).

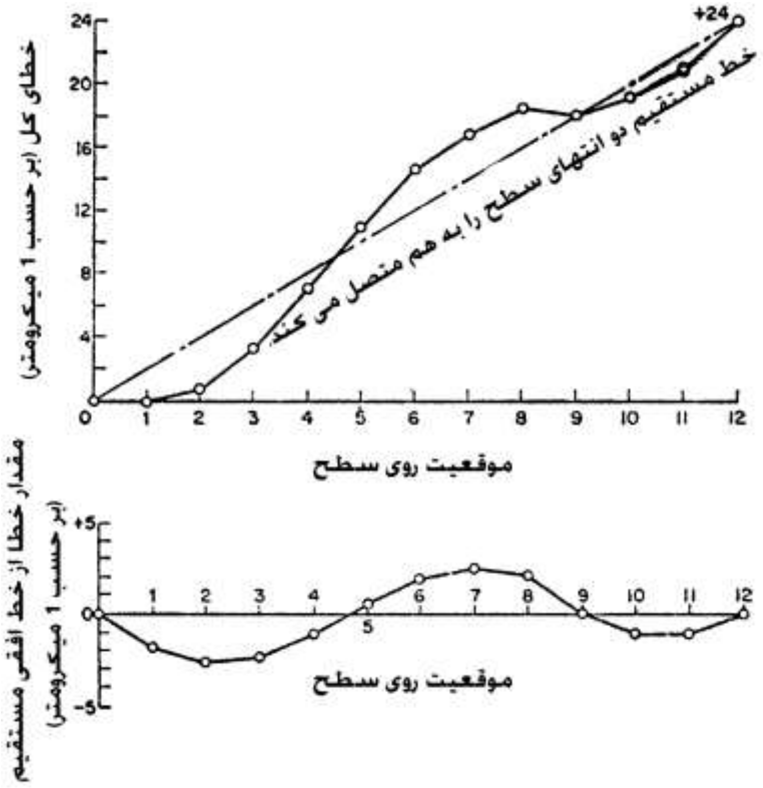
شکل ۴-۶ کاربرد موازی ساز را در بررسی تخت بودن ریلهای میز ماشین تراش نشان می دهد. با تنظیم منعکس کننده در A-B یک قرائت از موازی ساز بدست می آید. سپس منعکس کننده به اندازه ۱۰۳/۵ میلی متر حرکت داده می شود تا به موقعیت B-C برسد و دومین قرائت بدست می آید. به همین ترتیب قرائتهای متوالی در موقعیتهای C-D، D-E، E-F و... بدست می آید تا وقتی که منعکس کننده طول میز را طی کند. حال همین قرائتها را یک بار دیگر انجام می دهیم اما این بار منعکس کننده عکس جهت مرحله قبل، میز را می پیماید تا به این ترتیب خطاهای احتمالی در تنظیمات حالت اول و قرائتها آشکار شود. به فرض این که خطایی وجود نداشته باشد مقدار متوسط هر مجموعه از قرائتها ثبت می شود و به کمک آنها

می توان موقعیتهای زاویه ای منعکس کننده را در هر موقعیت از میز نسبت به محور نوری موازی ساز مشخص کرد. نتایج حاصل از این اندازه گیری در جدول صفحه بعد نشان داده شده است.

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
موقعیت روی سطح	قرائت ثانیه دقیقه	مقدار اختلاف با قرائت اول (ثانیه)	پستی و بلندیها در هر موقعیت از میز (mm ۰/۰۰۱)	پستی و بلندی کل (mm ۰/۰۰۱)	مقدار تنظیم برای صفرکردن هر دو انتها (mm ۰/۰۰۱)	خطای مستقیم بودن (mm ۰/۰۰۱)
صفر	۲۱۰	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر
۱	۲۱۰	صفر	صفر	صفر	-۲/۰	-۲
۲	۲۱۲	+۲	+۱/۰	+۱/۰	-۴/۰	-۳
۳	۲۱۵	+۵	+۲/۵	+۳/۵	-۶/۰	-۲/۵
۴	۲۱۷	+۷	+۳/۵	+۷/۰	-۸/۰	-۱/۰
۵	۲۱۸	+۸	+۴/۰	+۱۱/۰	-۱۰/۰	+۱/۰
۶	۲۱۷	+۷	+۳/۵	+۱۴/۵	-۱۲/۰	+۲/۵
۷	۲۱۵	+۵	+۲/۵	+۱۷/۰	-۱۴/۰	+۳/۰
۸	۲۱۳	+۳	+۱/۵	+۱۸/۵	-۱۶/۰	+۲/۵
۹	۲۹	-۱	-۰/۵	+۱۸/۰	-۱۸/۰	صفر
۱۰	۲۱۲	+۲	+۱/۰	+۱۹/۰	-۲۰/۰	-۱/۰
۱۱	۲۱۴	+۴	+۲/۰	+۲۱/۰	-۲۲/۰	-۱/۰
۱۲	۲۱۶	+۶	+۳/۰	+۲۴/۰	-۲۴/۰	صفر

ستون ۱ موقعیت صفحه منعکس کننده را در فواصل ۱۰۳/۵ میلی متری در امتداد میز نشان می دهد. ستون ۲ قرائت متوسط موازی ساز را با بیشترین دقت ممکن که در عدسی چشمی قابل تشخیص است نشان می دهد. در عمل می توان قرائتها را با دقت کمتر از یک ثانیه (دهم ثانیه، صدم ثانیه و...) انجام داد. ستون ۳ تفاوت هر قرائت را با اولین قرائت نشان می دهد. در ستون ۴ این تفاوتها به مقادیر خطی پستی و بلندیهای میز تبدیل شده است. مبنای محاسبه بر این بوده است که هر انحراف یک دقیقه ای در طول ۱۰۳/۵ میلی متر برابر ۰/۰۳ میلی متر (یا

هر انحراف یک ثانیه ای در طول ۱۰۳/۵ میلی متر برابر ۰/۰۰۰۵ میلی متر) برآمدگی یا فرورفتگی در سطح میز است. صفر دوم در ابتدای ستون۴، ارتفاع دو پایه تکیه گاه منعکس کننده وقتی که در موقعیت ابتدایی خود باشد را نشان می دهد. ستون ۵ ارتفاع پایه های تکیه گاه منعکس کننده را از بالای خط مبنای رسم شده نشان می دهد. مقادیر ستون ۵ با اضافه کردن جبری و پی درپی مقادیر ستون ۴ حاصل شده است. توجه نمایید که تک تک ارتفاعهای ذکر شده در ستون ۴ ارتفاع پایه عقبی تکیه گاه از پایه جلویی آن (و نه از خط مبنا) در هر موقعیت از میز می باشد. بنابراین بدست آوردن مقادیر ستون ۵ الزامی است. با توجه به ستون ۵ بزرگترین برآمدگی سطح میز در امتداد خط اولین قرائت، μm ۲۴ است. در ستون ۶ این بلندی نهایی با ۱۲ قرائت دیگر تحت نمو $\frac{24}{12}=2mm$ متناسب شده است (در حقیقت این مقادیر که تصاعد حسابی با نمو ۲ تشکیل داده اند نشان دهنده خط مستقیمی هستند که از نقاط ابتدایی و انتهایی میز می گذرد-شکل ۵-۶ الف). در نتیجه می توان انحراف مقادیر ستون ۵ از این خط راست که بیان کننده تخت بودن میز است را تعیین کرد. برای هر آزمایش با تقسیم بیشترین مقدار پستی یا بلندی بر تعداد قرائتها (۲=۲۴:۱۲) نمو این تصاعد حسابی بدست می آید (و با داشتن یک جمله آن یعنی همان بیشترین مقدار می توان تصاعدی را در ستون ۶ تشکیل داد). حال مقادیر ستون ۵ را از مقادیر ستون ۶ کم می کنیم (توجه کنید که چون در ستون ۶ علامت تفریق برای همه اعداد گذاشته شده است در این جا فقط کافی است ستون ۵ با ستون ۶ جمع شود). به این ترتیب میزان انحراف از خط مستقیمی که نقاط انتهایی میز را به هم وصل می کند بدست آید (ستون۷). شکل ۵-۶ نتایج این مثال را بصورت نمودار نشان می دهد.



شکل ۵-۶) نمودار خطای ترکیبی و حقیقی میز یک ماشین تراش حاصل از بکارگیری یک موازی ساز

همانطور که دیده می شود در نمودار خطای ترکیبی (نمودار بالا) یک خط مستقیم از نقاط انتهایی عبور داده شده است. این خط، نشان دهنده خط مستقیم متصل کننده دو انتهای میز می باشد. در نمودار خطای تخت بودن (نمودار پایین) این خط به عنوان محور X رسم شده است بنابراین مقادیر رسم شده در نمودار قبلی با آن نسبت مشابهی دارند. توجه به این نکته مهم است که مقادیر ستون ۲ مشخص کننده مقدار افزایش زاویه کج شدن منعکس کننده به سوی محور نوری موازی ساز می باشد. این قرائتها مقادیر معین مثبتی را برای پستی و بلندی های خطی نشان می دهند. پس میز تراش نسبت به خط مبنایی که دو انتهای میز را به هم وصل می کند هم مقعر و هم محدب است (ستون ۵ خطای ترکیبی و ستون ۷ خطای تخت بودن را نشان می دهد که نمودار آنها به ترتیب در شکل ۵-۶ رسم شده است).

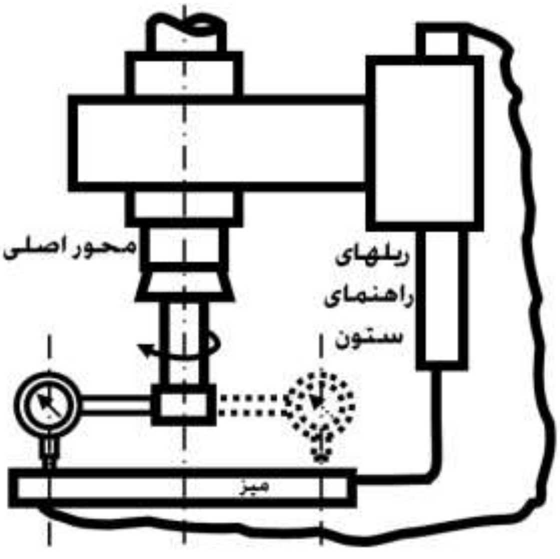
آزمایش شرح داده شده مربوط به ماشین تراشی با میز مسطح است ولی روش دیگری نیز بکار می رود که بوسیله آن می توان ریلهای V شکل را نیز مورد بررسی قرار داد. در این حالت صفحه منعکس کننده باید بروی میزی قرار گیرد که دارای پایه V شکل است بطوری که بتواند

روی ریلهای V شکل میز حرکت کند. شیار V شکل میز صفحه منعکس کننده باید به شکلی باشد که تنها با طرفین شیار ریلهای تراش تماس یابد (با کف تراش تماس نیابد-م). به این ترتیب تختی میز در سطح افقی بخوبی قابل تعیین می باشد. در آزمایش قبلی، منعکس کننده، امتداد میز را در فواصل طولی ۱۰۳/۵ میلی متری می پیمود ولی در این حالت لوله موازی ساز در محفظه اش به اندازه ۹۰ درجه چرخانده می شود بطوری که سیمهای تنظیم در عدسی چشمی عمودی باشد. سپس تغییرات موقعیت تصویر عمودی سیمهای متقاطع از روی میکرومتر موازی ساز خوانده می شود و در ستون ۲ از جدول ثبت می گردد.

در بررسی خطای تخت بودن، ممکن است میز تراش بروی هر یک از ریلها تاب یا پیچ عرضی داشته باشد که خطای متفاوتی در تختی میز ایجاد می کند. این مورد را می توان با موازی ساز تشخیص داد چرا که منعکس کننده در امتداد میز حرکت داده می شود. به عبارت دیگر منعکس کننده حین حرکت در امتداد میز به علت وجود تاب در ریل، بصورت عرضی جابجا می شود و این جابجایی در موازی ساز قابل تشخیص است. عملی ترین و مناسبترین روش آزمایش، قرار دادن یک تراز دقیق بروی میز ماشین در موقعیتهای مختلف است. اگر لازم باشد باید از یک قطعه به عنوان پُل استفاده نمود.

آزمایش تعامد

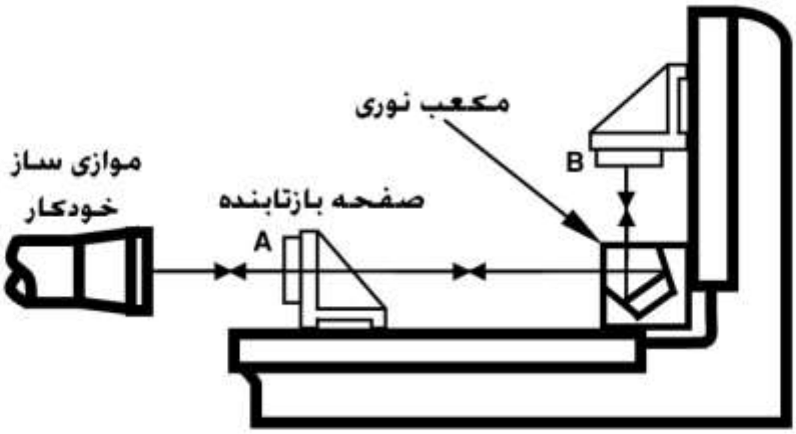
در بسیاری از ماشین ابزارها به عنوان مثال در ماشین مته و ماشین فرز عمودی، عمود بودن محور اصلی بر سطح میز ماشین اهمیت بسیاری دارد. در شکل ۶-۶ یک روش آزمایش تعامد نشان داده شده است. در این آزمایش همانطور که دیده می شود میله ای که در یک انتهای آن ساعت اندازه گیری نصب شده است به محور اصلی نصب می گردد. ساعت اندازه گیری می تواند تحت شعاع معینی (مثلاً ۱۵۰mm) بروی میز حرکت کند.



شکل ۶-۶) آزمایش تعامد محور اصلی یک ماشین مته بر میز آن

سنبه ساعت اندازه گیری بطور مستقیم و به آرامی بروی میز ماشین قرار داده می شود. سپس محور اصلی به آرامی با دست به اندازه ۳۶۰ درجه چرخانده می شود و در هر ۹۰ درجه از دوران محور اصلی یک قرائت از ساعت اندازه گیری ثبت می گردد. در مورد ماشینهای مته (که خطای مجاز در طول ۳۰۰ میلی متر، ۰/۰۵ میلی متر می باشد) اگر میز ماشین در اثر خطای تعامد اندکی به طرف بالا متمایل شود هنگام کار، فشار مته که به طرف پایین اعمال می گردد این خطا را تصحیح می کند.

این آزمایش در مورد ماشینهای فرز عمودی که کله گی ثابت دارند بطور کامل اجرا می گردد اما برای ماشینهای فرز با کله گی گردان تنها در جهت عمود بر میز قابل انجام است. در این مورد، خطای مجاز در طول ۳۰۰ میلی متر، حداکثر ۰/۰۲ میلی متر می باشد. در بعضی انواع ماشین ابزار، دقت ساختار ماشین زیاد است و برای آزمایش دستگاه باید از روشهای نوری استفاده گردد. روشهای نوری به خصوص برای ماشینهای جیگ بورینگ بکار می رود ولی برای ماشینهای فرز در هر دو نوع عمودی و افقی نیز قابل کاربرد است.



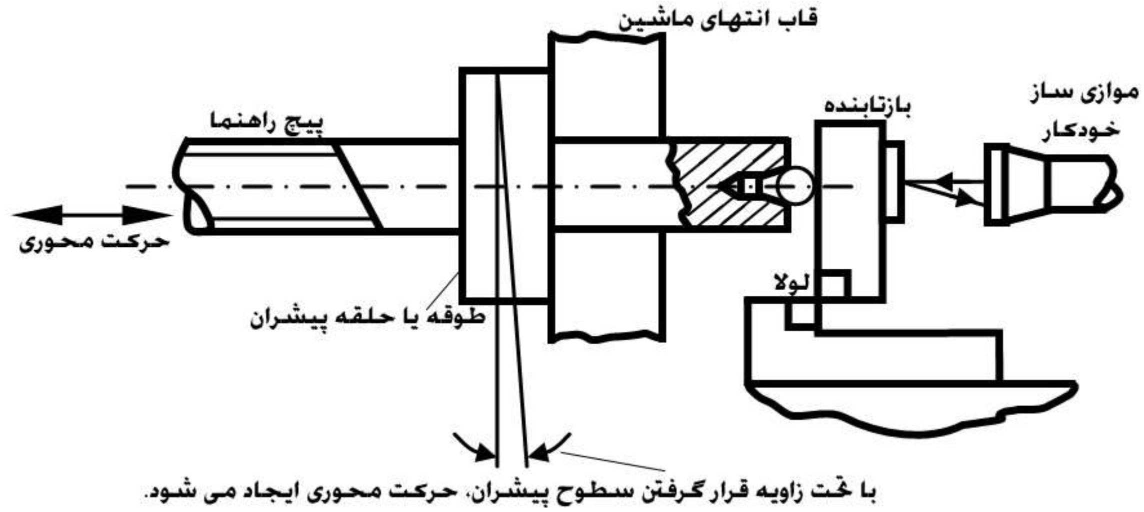
شکل ۷-۶) کاربرد موازی ساز خودکار و یک مکعب نوری جهت آزمایش تعامد ریلهای ماشین

در روش نوری بررسی تعامد توجه کنید که محور پرتو تابنده موازی ساز خودکار (اتوکالی ماتور) مبنای اندازه گیری می باشد. برای بررسی تعامد، پرتو تابنده باید به اندازه ۹۰ درجه چرخانده شود. این کار توسط مکعب نوری (اپتیکی) که در حقیقت یک منشور خاص می باشد انجام می گردد. بدون توجه به زاویه تابش پرتو موازی ساز به سطح منشور، مکعب نوری، پرتو را به اندازه ۹۰ درجه می چرخاند. به فرض این که ریلهای عرضی و پیشانی ستون کاملاً مستقیم باشد تنها لازم است دو قرائت در موقعیتهای A و B از منعکس کننده بوسیله موازی ساز بدست آید. مکعب نوری در محل تقاطع دو سطح مورد اندازه گیری قرار داده می شود. این مکعب همان طور که در شکل ۷-۶ دیده می شود تنها زمانی که منعکس کننده باید در موقعیت B قرار گیرد بکار می رود. اختلاف بین دو قرائت در موقعیتهای A و B خطای تعامد خواهد بود که باید به جهت آن نیز توجه کرد.

اگر بخواهیم خطای تخت بودن را نیز در مورد این دو سطح بررسی کنیم آزمایش بسیار پیچیده می گردد چون همان طور که در بخش ۳-۲-۶ نشان داده شد لازم است برای هر سطح یک آزمایش تخت بودن انجام شود. زاویه بین خطوط مستقیم گذرنده از مقاطع این دو سطح، زاویه متوسط بین سطوح را نشان می دهد.

خطای تعامد که به صورت یک حرکت محوری آشکار می شود به علت عمود نبودن سطح پیشران یا طوقه های پیچ راهنما بر محور چرخش پیچ راهنما ایجاد می گردد. این حالت در شکل ۸-۶ نشان داده شده است. برای آزمایش این تعامد دو روش موجود است :

۱) کاربرد ساعت اندازه گیری و ۲)کاربرد موازی ساز خودکار



شکل ۸-۶ نمایش پیچ راهنما با سطوح پیشران و روش آزمایش تعامد به کمک یک موازی ساز

روش اول (کاربرد ساعت اندازه گیری-م) مشابه با همان روشی است که برای تشخیص خطای محوری محور اصلی (بخش ۲-۲-۶) بکار برده شد ولی این بار در مورد پیچهای راهنمای ماشین تراش، خطای مجاز ۰/۰۱ میلی متر است. این روش بیشتر در مواقعی بکار می رود که خطای دوره ای (پریودی) در گام پیچ ایجاد شده باشد.

روش دوم کاربرد جالبی از موازی ساز خودکار است. در این آزمایش، نوسان محوری پیچ راهنما به حرکت زاویه ای یک صفحه منعکس کننده تبدیل می شود. همانطور که در شکل ۸-۶ می توان دید در پشت صفحه منعکس کننده، ساچمه ای قرار دارد که درون سوراخی در مرکز پیچ راهنما و در انتهای آن قرار داده شده است. برای این که منعکس کننده حرکت زاویه ای داشته باشد به یک لولا متصل شده است. به این ترتیب با نوسان محوری پیچ راهنما، خطا در حرکت

از طریق ساچمه به صفحه منعکس کننده منتقل می گردد و با حرکت صفحه منعکس کننده قرائتهایی از موازی ساز بدست می آید که خطای زاویه ای حرکت را نشان می دهند.

آزمایشهای عملی (آزمایش دینامیکی–م)

همان طور که قبلاً ذکر شد این آزمایشها برای مشخص کردن جمعی از خطاهای بوجود آمده در هم راستایی ماشین و استحکام آن طراحی شده اند. در این نوع آزمایشها یک قطعه کار نمونه تحت شرایط معینی ماشین کاری می شود (سرعت برش، مقدار پیشروی، عمق براده برداری و شکل هندسی ابزار باید معین گردد). سپس این قطعه کار از نظر شکل هندسی، سطح پرداخت و دیگر پارامترهای مورد نیاز، اندازه گیری و نتایج حاصل با استانداردهای موجود مقایسه می شود.

فصل هفتم

اندازه گیری چرخ دنده

(Gear Measurement)

مقدمه

همان طور که فن آوری از انقلاب صنعتی تا به امروز پیشرفت کرده است روشهای بازرسی دقت سیستمهای انتقال نیرو نیز پیشرفت کرده است. بیشترین وسایل بکار برده شده در انتقال نیرو و گشتاور، چرخها، میله های محرک و چرخ دنده ها می باشد.

استحکام دندانه چرخ دنده ها در برابر بار اضافی تا به امروز همواره بهبود یافته است. یکی از ویژگیهایی که چرخ دنده ها باید داشته باشند سرعت ثابت است. تغییر در سرعت، موجب می گردد که بار وارد شده به دندانه ها بطور دوره ای (پریودی) افزایش یابد و علاوه بر ایجاد خستگی، سر و صدا نیز تولیدگردد. مسئله سر و صدا از ابتدای تولید دستگاه هایی که از چرخ دنده استفاده می کردند مورد بررسی قرار گرفت. از جمله راه حلهای این مسئله، بکارگیری بدنه صداگیر و بهتر از آن استفاده از چرخ دنده های مارپیچ است.

از عوامل پیشرفت در ماشینها اعم از ماشینهای صنعتی یا وسایل حمل و نقل، پیشرفت در چرخ دنده ها است. با توجه به این موضوع که سیستمهای انتقال نیرو از جمله سیستمهای چرخ دنده ای در صنعت بسیار مورد استفاده قرار می گیرد اهمیت اندازه گیری چرخ دنده ها فوراً آشکار می شود.

چشم انداز

اگر چه در صنعت مدرن، انواع مختلف چرخ دنده ها بکار می رود اما پیشنهاد می شود که بحث و بررسی تنها با چرخ دنده های اینولوت ساده و مارپیچ ادامه یابد چرا که عمده چرخ دنده های بکار رفته در صنعت از این نوع می باشد. چرخ دنده های مایل، مایل مارپیچ و هیپوئید برای کارهای بسیار تخصصی استفاده می گردد و چرخ دنده های سیکلوئید نیز در مهندسی مدرن کمتر بکار برده می شود و استفاده اصلی آنها در ساعت سازی است که خارج از موضوع این متن می باشد.

در مهندسی، انتخاب منحنی اینولوت جهت نمایش منحنی دندانه چرخ دنده دو مزیت دارد :

۱)میزان سرعت یک جفت چرخ دنده اینولوت بدون توجه به خطاها یا تغییرات جزیی در فاصله مرکز تا مرکز دو چرخ دنده، ثابت است.

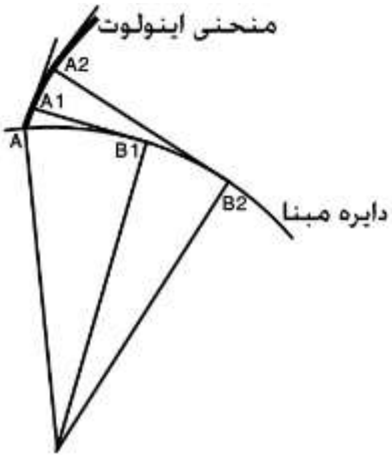
۲) یک چرخ دنده اینولوت دندانه های مستقیمی دارد. به این ترتیب با یک تیغ فرز نسبتاً ساده می توان منحنی اینولوت با شکل پیچیده تولید کرد. به همین دلیل لازم است که منحنی اینولوت به تفصیل مورد بررسی قرار گیرد.

منحنی اینولوت

منحنی اینولوت، مکان هندسی نقطه ای از یک خط مستقیم است در حالی که این خط مستقیم بدون هیچ لغزشی حول یک دایره می چرخد. تعریف دیگری نیز برای این منحنی ارائه شده است به این صورت که :

مکان هندسی یک نقطه از نواری که از یک استوانه ساکن باز می شود منحنی اینولوت می باشد.

بنابراین همانطور که در شکل ۱-۷ دیده می شود منحنی اینولوت بدست می آید.



شکل۱-۷)منحنی اینولوت

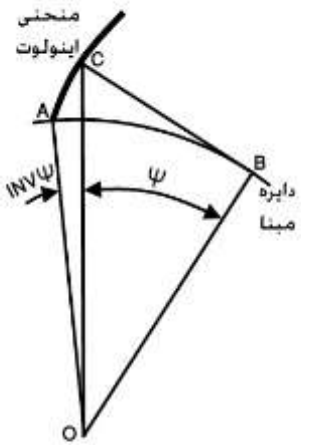
با توجه به شکل، طول مولد با طول کمان دایره مبنا از نقطه تماس تا مبدأ اینولوت در A برابر است (منظور از طول مولد، طول خط مستقیم می باشد. منظور از طول کمان دایره مبنا، فاصله بین نقطه برخورد این خط مستقیم با دایره تا نقطه A است). به عبارت دیگر :

$$A_1B_1 = \overset{\frown}{AB_1} \quad , \quad A_2B_2 = \overset{\frown}{AB_2} \quad , \ldots$$

همچنین مماس بر اینولوت در هر نقطه به عنوان مثال در A_2 بر مولد خود در همان نقطه عمود است. توجه کنید که شکل اینولوت به قطر دایره مبنایی که اینولوت از آن تولید می گردد بستگی دارد. با بزرگ شدن دایره مبنا، انحنای منحنی اینولوت کاهش می یابد و هنگامی که قطر دایره مبنا به بی نهایت برسد یعنی دایره به یک خط راست تبدیل شود منحنی اینولوت نیز به یک خط راست مبدل می گردد.

تابع اینولوت

تابع اینولوت یک زاویه، زاویه ای است که بین شعاع مبدأ اینولوت (OA) و شعاع نقطه برخورد مولد با منحنی اینولوت (OC) ایجاد می گردد (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷) تابع اینولوت یک زاویه

همانطور که می بینید زاویه مورد نظر بین OA (فاصله مبدأ اینولوت از مرکز دایره مبنا) و OC (فاصله نقطه C یعنی محل برخورد مولد با اینولوت از مرکز دایره مبنا) قرار دارد.

در شکل ۲-۷ روشن است که AOC تابع اینولوت COB می باشد بنابراین در مثلث OBC داریم :

$$tg\varphi = \frac{BC}{OB}$$

از طرفی (در ریاضی، طول یک کمان از دایره، حاصل ضرب شعاع دایره در زاویه مقابل به کمان بر حسب رادیان است-م) :

$$\overset{\frown}{AB} = (\varphi^{rad} + inv\varphi^{rad}) \times OB \quad \Rightarrow \quad \frac{\overset{\frown}{AB}}{OB} = \varphi^{rad} + inv\varphi^{rad}$$

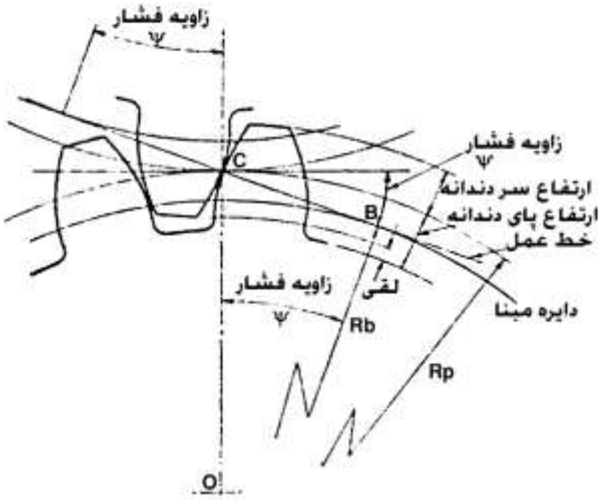
با توجه به شکل ۱-۷ که داشتیم $A_1B_1 = \overset{\frown}{AB_1}$ در شکل ۲-۷ نیز داریم $\overset{\frown}{AB} = BC$ در نتیجه :

$$\frac{\overset{\frown}{AB}}{OB} = \varphi^{rad} + inv\varphi^{rad} \Rightarrow \varphi^{rad} + inv\varphi^{rad} = \frac{BC}{OB} \Rightarrow \varphi^{rad} + inv\varphi^{rad} = tg\varphi^{rad} \Rightarrow inv\varphi^{rad} = tg\varphi^{rad} - \varphi^{rad}$$

به عبارت دیگر تابع اینولوت یک زاویه،اختلاف بین تانژانت زاویه و خود زاویه بر حسب رادیان است.

تعاریف و ابعاد استاندارد

شکل دندانه یک چرخ دنده در حقیقت از دو منحنی اینولوت تشکیل شده است. دندانه های دو چرخ دنده درگیر، در امتداد خط عمل که عموماً مماس بر دایره مبنای هر دو چرخ دنده است با یکدیگر تماس می یابند (شکل ۳-۷).



شکل ۳-۷) دو چرخ دنده ساده درگیر، اصطلاحات چرخ دنده ها را نشان می دهند.

از آنجا که خط عمل، مولد اینولوت هر دو چرخ دنده درگیر است، نیروی بین چرخ دنده ها در امتداد این خط منتقل می گردد. به زاویه بین خط عمل و مماس مشترک دایره گام دو چرخ دنده، زاویه فشار (φ) گفته می شود. از شکل ۳-۷ و در مثلث OBC داریم :

$$\frac{OB}{OC} = Cos\varphi = \frac{R_b}{R_p} \quad \Rightarrow \quad R_b = R_p \times Cos\varphi \quad \Rightarrow \quad D_b = D \times Cos\varphi$$

که D_b قطر دایره مبنا، D قطر دایره گام و φ زاویه فشار است. مقادیر استاندارد زاویه فشار ۱۴/۵ و ۲۰ درجه می باشد. کاربرد زاویه ۲۰ درجه بیشتر است چرا که دندانه های قویتری تولید می کند و در نتیجه می توان تعداد دندانه چرخ دنده را کاهش داد (بدون آن که بین دندانه های درگیر، تداخلی ایجاد شود).

به تعداد دندانه موجود در هر اینچ از قطر دایره گام، گام قطری (دیامترال پیچ = Diametral pitch) گفته می شود که با حروف DP مشخص می گردد. گام قطری مقداری فرضی می باشد و قابل اندازه گیری نیست اما مشخصات چرخ دنده بر اساس آن تعریف می گردد و در نتیجه بسیار اهمیت دارد. در کشورهایی که از سیستم متریک استفاده می شود به جای گام قطری، مدول که با حرف m مشخص می گردد بکار می رود. مدول عکس گام قطری (DP) است :

$$DP = \frac{N}{D} \quad , \quad m = \frac{1^{inch}}{DP} = \frac{D}{N}$$

(D قطر دایره گام و-م) منظور از m در این جا مضرب (multiple) صحیحی از میلی متر است. N تعداد دندانه چرخ دنده است. فاصله کمانی بین یک دندانه تا دندانه مجاور بروی دایره گام، گام دایروی (سیرکولار پیچ=Circular pitch) گفته می شود که با حروف CP مشخص می گردد :

$$CP = \frac{\pi}{DP} \quad , \quad m = \frac{1}{DP} = \frac{D}{N} \quad \Rightarrow \quad CP = \frac{\pi \times D}{N}$$

گام مبنا (P_b) فاصله کمانی از مبدأ اینولوت روی یک دندانه تا مبدأ اینولوت دندانه مجاور بروی دایره مبنا می باشد (بطور کلی روابط چرخ دنده ساده اینچی از قرار دادن $m = \frac{1^{inch}}{DP}$ در روابط چرخ دنده ساده متریک حاصل می شود و برعکس-م) :

$$P_b = CP \times Cos\varphi = \frac{\pi}{DP} \times Cos\varphi = \pi \times m \times Cos\varphi$$

فاصله شعاعی از دایره گام تا نوک دندانه را ارتفاع سر دندانه گویند که مقدار اسمی آن برابر مدول است. ارتفاع سر دندانه برای جلوگیری از تداخل دندانه ها تغییر داده می شود. فاصله شعاعی نوک یک دندانه تا انتهای دندانه درگیر با آن هنگامی که دندانه ها بطور قرینه درگیر شوند را لقی گویند. مقدار لقی بطور استاندارد $\frac{0.157}{DP} = 0.157m$ یا $\frac{0.25}{DP} = 0.25m$ یا

$\frac{0.4}{DP}=0.4m$ انتخاب می گردد. انتخاب هر یک از این مقادیر به نوع چرخ دنده و کاربرد آن بستگی دارد. مقدار ۰,۱۵۷m معمولاً برای زاویه فشار ۱۴/۵ درجه استفاده می گردد. مقدار ۰,۲۵m بطور اسمی برای چرخ دنده های گروه $D,C,B,A_۲$ بکار می رود. ۰,۴m نیز بطور اسمی برای چرخ دنده های گروه $A_۱$ یعنی چرخ دنده هایی که با دقت بالا سنگ زده شده است استفاده می شود. فاصله شعاعی دایره گام تا فضای ته دندانه را ارتفاع ته دندانه می گویند.

ارتفاع ته دندانه = ارتفاع سر دندانه + لقی =

$$\frac{1}{DP}+\frac{0.157}{DP}=\frac{1.157}{DP}=1.157m$$

$$\frac{1}{DP}+\frac{0.25}{DP}=\frac{1.25}{DP}=1.25m$$

$$\frac{1}{DP}+\frac{0.4}{DP}=\frac{1.4}{DP}=1.4m$$

قطر خارجی چرخ دنده (متریک ساده-م) برابر با حاصل جمع قطر دایره گام و دو برابر مدول است :

$$D+2m\ ,D=N\times m\Rightarrow D+2m=N\times m+2m=(N+2)\times m$$

برای قطر خارجی چرخ دنده ساده اینچی داریم :

$$(N+2)\times m=\frac{N+2}{DP}$$

فاصله کمانی از یک پهلوی دندانه تا پهلوی دیگر آن در امتداد دایره گام، ضخامت دندانه چرخ دنده گفته می شود. ضخامت دندانه معمولاً از محل تقاطع دندانه با دایره مبنا اندازه گیری می گردد. ضخامت دندانه بطور اسمی برابر است با :

$$\frac{\pi}{2}\times m=\frac{\pi}{2DP}$$

معمولاً در عمل، ضخامت دندانه به میزانی که به آن پس زنی گفته می شود کاهش می یابد. البته می توان ضخامت دندانه را با تصحیح ارتفاع سر دندانه تغییر داد. پس زنی، میزان حرکت محیطی یک چرخ دنده هنگام درگیری است. پس زنی از طریق درگیر کردن چرخ دنده با یک چرخ دنده ثابت و بروی دایره گام اندازه گیری می شود.

با توجه به توضیحات ارائه شده، هر چرخ دنده ساده را می توان بطور کامل با تعیین مشخصات زیر معرفی نمود :

۱-تعداد دندانه (N)

۲- گام قطری (DP) یا مدول (m)

۳-زاویه فشار (φ)

به هنگام اندازه گیری چرخ دنده هر جا که لازم باشد معادلات ذکر شده را می توان به معادلات مشابه تبدیل نمود.

چرخ دنده های مارپیچ

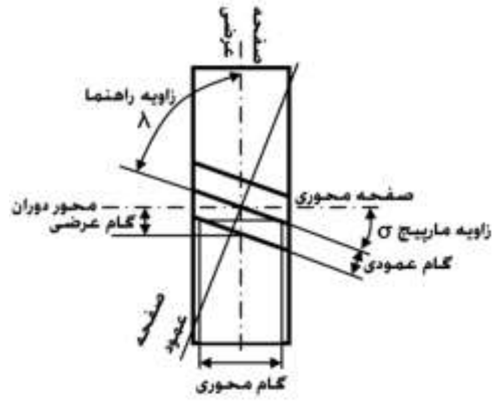
یک چرخ دندهٔ مارپیچ، دندانه های اینولوتی دارد که نسبت به محور چرخش، تحت زاویه ای به نام زاویهٔ مارپیچ تراشیده شده اند (برخلاف چرخ دنده ساده که دندانه های آن به موازات محور چرخش چرخ دنده تراشیده شده است). از چرخ دنده های مارپیچ معمولاً جهت انتقال نیرو بین محورهای موازی استفاده می گردد. این نوع چرخ دنده ها نرمتر و بی سر و صداتر از چرخ دنده های ساده کار می کنند چرا که درگیری دندانه ها موضعی است یعنی هر دندانه در یک زمان مشخص فقط در طول کوتاهی از دامنه اش درگیر می شود و این درگیری به تدریج ادامه می یابد تا دندانه از منطقه درگیری خارج گردد. این چرخ دنده ها را می توان در سه صفحه، اندازه گیری نمود :

۱-صفحه عمود بر دندانه (که با اندیس n مشخص می شود.)

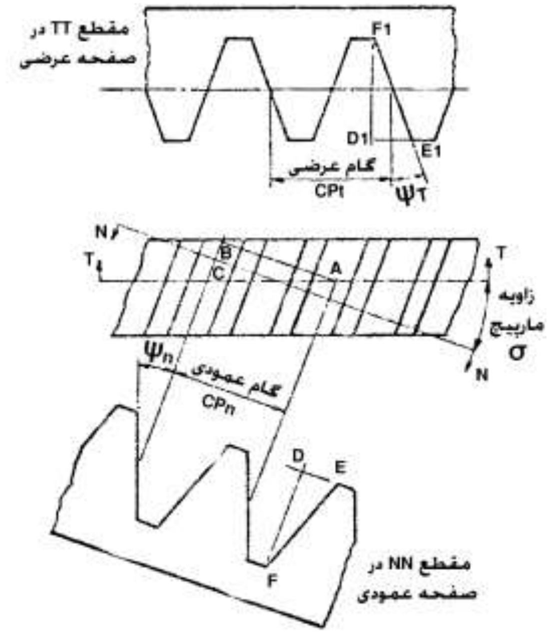
۲-صفحه عمود بر محور چرخش (که به آن صفحه عرضی گفته می شود و با اندیس t مشخص می گردد).

۳-صفحه موازی با محور چرخش (به نام صفحه محوری که با اندیسa مشخص می گردد).

در اینجا تنها اندازه گیری هایی بررسی می گردد که در صفحات عمودی و عرضی انجام می شود. چرخ دنده شانه ای اینچی با گام عرضی CP_t را در نظر بگیرید (شکل۵-۷). σ = زاویه مارپیچ، ψ_n زاویه فشار عمودی، CP_t= گام دایروی عرضی (سیرکولارپیچ عرضی= $CP_t = m_t \times \pi$) می باشد.



شکل۴-۷) نمایش اصطلاحات بکار رفته در متن برای تشریح چرخ دنده های مارپیچ



شکل۵-۷) مقاطع عمودی و عرضی چرخ دنده شانه ای

از شکل ۵-۷ و در مثلث ABC داریم :

$$\frac{AB}{AC} = Cos\sigma \;\Rightarrow\; AB = AC \times Cos\sigma \;\Rightarrow\; CP_n = CP_t \times Cos\sigma$$

چون سیرکولارپیچ = مدول × π پس (برای چرخ دنده متریک-م) :

$$\pi \times m_n = \pi \times m_t \times Cos\sigma \Rightarrow m_n = m_t \times Cos\sigma$$

زاویه پیشانی دامنه چرخ دنده شانه ای در هر صفحه با زاویه فشار سیستم در همان صفحه برابر است. با ملاحظهٔ دوبارهٔ شکل ۵-۷ و در مثلث FDE بدست می آوریم :

$$tg\psi_n = \frac{DE}{DF}$$

برای هر مقطع، DF ثابت و برابر با عمق دندانه است ($DF= D_1F_1$ -م) اما پس : $DE = D_1E_1 \times Cos\sigma$

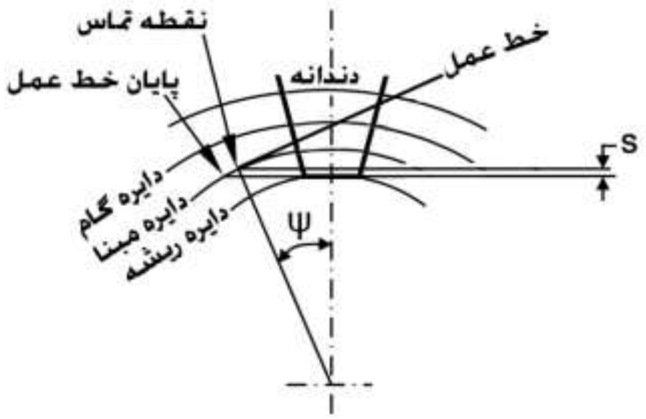
$$tg\psi_n = \frac{D_1E_1 \times Cos\sigma}{D_1F_1} \quad , \quad tg\psi_t = \frac{D_1E_1}{D_1F_1} \quad \Rightarrow \quad tg\psi_n = tg\psi_t \times Cos\sigma$$

به این ترتیب زاویه فشار عمودی بدست می آید و می توان گام مبنای عمودی (P_{bn}) را بدست آورد. چون بروی هر مقطع، گام مبنا برابر است با $\pi \times m \times Cos\psi$ بنابراین :

$$P_{bn} = \pi \times m_n \times Cos\psi_n$$

۷-۷) ریشه تراشی در دندانه های چرخ دنده و اصلاح ارتفاع سر دندانه

اگر در طراحی یک جفت چرخ دنده، چرخ دندهٔ کوچکتر (پینیون Pinion) خیلی کوچک ساخته شود بین دو جفت چرخ دنده درگیر، تداخل پدید می آید و دندانه های چرخ دنده بزرگتر یا چرخ دنده شانه ای تمایل دارد که به ریشه چرخ دنده کوچکتر نفوذ کند. در نتیجه حرکت خشنی ایجاد می گردد و دندانه ها خواهد شکست. اگر چرخ دنده کوچکتر طوری ساخته شود که حالت تداخل پیش بیاید دندانه ها تحت برش قرار می گیرند و تضعیف می شوند. این حالت زمانی اتفاق می افتد که خط عمل از نقطه مماس بر دایره مبنا جلوتر قرار گیرد. شکل ۶-۷ یک چرخ دندهٔ کوچک که اصطلاحاً به وسیلهٔ یک چرخ دنده شانه ای بریده شده است (ریشه تراشی-م) را نشان می دهد.



شکل۶-۷) شرایط وقوع پدیدهٔ ریشه تراشی در ساخت چرخ دنده

همانطور که در شکل نشان داده شده است نوک دندانهٔ چرخ دنده شانه ای از نقطه مماس خط عمل به اندازهٔ S جلوتر آمده است. این حالت موجب ریشه تراشی می شود. می توان با جابه جا کردن چرخ دنده شانه ای به اندازه S به طرف بیرون، تداخل را برطرف کرد. بنابراین برای جبران این پدیده، ارتفاع سر دندانه چرخ دندهٔ بزرگ باید به اندازه k_w کاهش و ارتفاع سر دندانه چرخ دندهٔ کوچک به اندازهٔ k_p افزایش یابد. مقادیر k_p و k_w به ترتیب، ضرایب ارتفاع سر دندانه برای چرخ دنده کوچکتر و چرخ دنده بزرگتر (یا چرخ دنده شانه ای) می باشد و بصورت $S = k \times m$ مستقیماً با S متناسب هستند (مدول=m). استاندارد B.S. ۴۳۶ سال ۱۹۴۰ دو شرط زیر را برای محاسبهٔ K_p و K_w ارائه می دهد :

الف)

اگر $(N + n)\times Sec^3\sigma > 60$ آنگاه $k_p = 0.4\left(1 - \frac{n}{N}\right)$ یا $k_p = 0.02(30 - n\times Sec^3\sigma)$

هر k_p که بزرگتر باشد انتخاب می گردد و $k_w = -k_p$

ب)

اگر $(N + n)\times Sec^3\sigma < 60$ آنگاه $k_p = 0.02(30 - n\times Sec^3\sigma)$ و $k_w = 0.02(30 - N\times Sec^3\sigma)$

در عبارتهای بالا n و N به ترتیب تعداد دندانه های چرخ دندهٔ کوچکتر و چرخ دندهٔ بزرگتر است. σ برای چرخ دنده های مارپیچ، زاویه مارپیچ می باشد. در چرخ دنده های ساده $\sigma = 0$ و $Sec^3\sigma = 1$. اگر $K_w = K_P$ ارتفاع سر دندانه برای چرخ دنده ها عبارت است از :

ارتفاع سر دندانه چرخ دنده کوچکتر $= m_n \times (1 + k_p) = m_n + k_p \times m_n$

ارتفاع سر دندانه های چرخ دنده بزرگتر $= m_n \times (1 + k_w) = m_n + k_w \times m_n$

توجه کنید که در هر مورد، ارتفاع اسمی سر دندانه (که برابر با مدول یا m است) با تغییر در مقدار جابجایی چرخ دنده شانه ای به طرف بالا برای جلوگیری از ریشه تراشی تغییر می کند.

اندازه گیری چرخ دنده

روشهای آزمایش و اندازه گیری چرخ دنده ها تا حد زیادی به نوع چرخ دنده، روش ساخت و تجهیزات موجود بستگی دارد. بطور خلاصه اندازه گیری چرخ دنده را می توان به دو گروه زیر تقسیم نمود :

۱)آزمایشهای عمومی

۲)اندازه گیری تک تک اجزاء

آزمایشهای عمومی

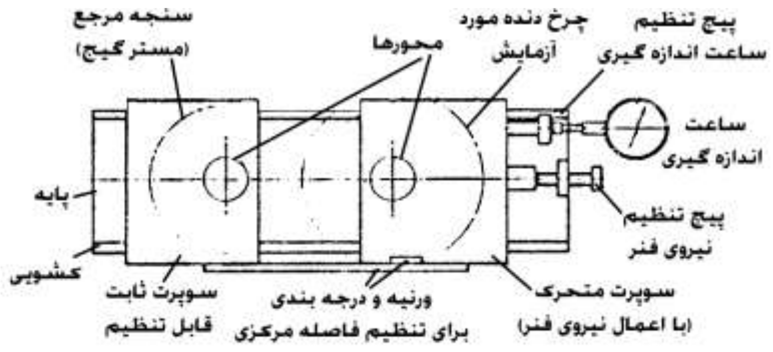
آزمایشهای عمومی در اینجا شامل آزمایش غلتکی است. در این روش چرخ دنده با یک چرخ دندهٔ مرجع که سخت و سنگ زنی شده است از نظر ضخامت دندانه ها و و ابعاد استوانه مقایسه می گردد. شاید به نظر برسد که بررسی این دو مورد، خارج از بحث آزمایشهای عمومی است ولی هنگامی که یک چرخ دنده تراشیده می شود، باید به ابزار براده برداری و دقت تقسیم اهمیت داد چرا که هر دو بر شکل و گام چرخ دنده تأثیر می گذارند. البته به نظر مؤلف، به دقت ابزار برش و تنظیم ماشین ابزار باید بیشتر توجه نمود.

وقتی یک چرخ دنده که مدول کوچکی دارد به کمک فرز هابینگ ماشین کاری می گردد تنها آزمایشهای نوری (اپتیکی) و غلتکی برای کنترل چرخ دنده قابل کاربرد می باشد. به کمک این دو روش، بیشتر خطاهایی که در اثر تنظیم نادرست فرز هابینگ (مانند تنظیم نادرست زاویه مارپیچ چرخ دنده مارپیچ) پیش می آید آشکار می گردد. به کمک روشهای نوری می توان تیغ فرز هابینگ (هاب) که پهلوهای راست و مستقیمی دارد را بررسی نمود. با این کار خطاهای حاصل از تنظیم نادرست، که موجب خطا در شکل چرخ دنده می شوند حذف می گردد.

در ساخت چرخ دنده های بسیار دقیق یعنی چرخ دنده های مرجع و چرخ دنده های به دقت سنگ زده شده لازم است که دقت تک تک اجزاء چرخ دنده بررسی شود. علاوه بر ضخامت دندانه ها، این اجزاء شامل گام و شکل دندانه ها نیز می باشد.

آزمایش غلتکی چرخ دنده

یکی از ماشینهای عمومی برای آزمایش چرخ دنده به روش غلتکی، ماشین پارکسون (Parkson) می باشد که در شکل ۷-۷ نشان داده شده است.



شکل۷-۷) اصول ماشین آزمایش چرخ دنده از نوع غلتکی

این دستگاه به طور کلی شامل یک بدنه می باشد که بروی آن یک سوپرت ثابت و یک سوپرت متحرک قرار دارد. سوپرت ثابت طوری ساخته شده است که می تواند با چرخ دنده هایی به قطرهای گوناگون تطبیق داده شود. هنگام کار، این سوپرت باید قفل گردد. سوپرت متحرک طوری ساخته شده است که به طور جهشی به طرف سوپرت ثابت قابل حرکت می باشد. بروی سوپرت ثابت، محوری تعبیه شده است که سوراخ چرخ دندۀ مرجع داخل این محور جا زده می شود. محوری مشابه برای قرار دادن چرخ دنده مورد آزمایش، بروی سوپرت متحرک قرار دارد. این جفت چرخ دنده بروی سوپرتها قرار می گیرد. سپس با حرکت سوپرت متحرک دو چرخ دنده با هم درگیر و در این حالت دو چرخ دنده چرخانده می شوند. وجود هر گونه خطا در شکل دندانه، گام یا هم محوری خط گام باعث می گردد فاصله مرکز تا مرکز دو چرخ دنده تغییر کند. از آنجا که میزان حرکت سوپرت متحرک توسط یک ساعت قابل تعیین است می توان مقدار خطا را در چرخ دنده مورد آزمایش بدست آورد. روش کار به این صورت است :

۱-با قرار دادن بلوکهای اندازه گیری بین محورها، ساعت اندازه گیری را طوری تنظیم می کنیم که در فاصلۀ مرکز تا مرکز حقیقی، ساعت اندازه گیری مقدار صفر را نشان دهد (فاصله مرکز تا

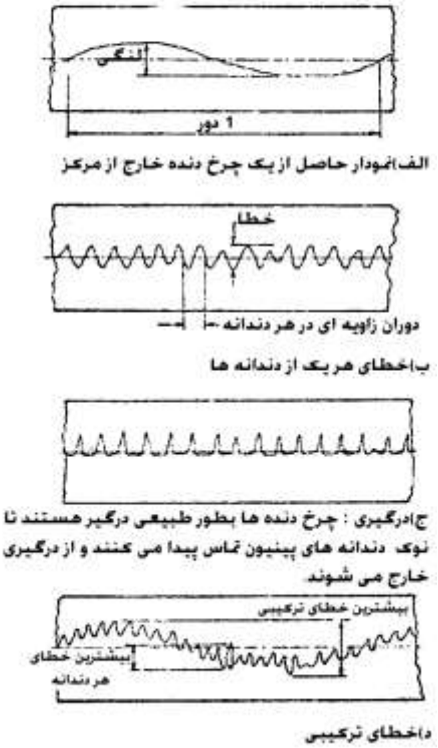
مرکزی که در صورت درستی چرخ دندۀ تحت آزمایش، برقرار می شود که برای دو چرخ دنده خارجی درگیر، با تعداد دندانه n و N برابر است با ($m \times (\frac{N+n}{2})$-م). توجه نمایید که اندازه بلوکها ($C-(\frac{D+d}{2})$) است که C فاصله مرکز تا مرکز حقیقی دو چرخ دنده و D و d قطر محور آنها می باشد.

۲-نشانه های حدی موجود بروی صفحه ساعت اندازه گیری را در محدوده تلرانس مورد نظر قرار می دهیم.

۳-چرخ دندۀ مرجع و چرخ دندۀ مورد آزمایش را نصب می کنیم و جابجایی عقربه ساعت اندازه گیری هنگامی که چرخ دنده ها با دست چرخانده می شود را تحت نظر قرار می دهیم. اگر عقربه از محدوده نشانه های حدی ساعت اندازه گیری خارج شود چرخ دندۀ مورد آزمایش قابل قبول نخواهد بود.

فرم استاندارد آزمایش غلتکی چرخ دنده در صنعت معمولاً به همین شکل است. البته آزمایش کننده می تواند آزمایشهای پیچیده تری انجام دهد. مثلاً با قفل کردن سوپرت متحرک در فاصله مرکز تا مرکز حقیقی دو چرخ دنده و با ثابت نمودن چرخ دنده مرجع، می توان یک ساعت اندازه گیری را در خط گام چرخ دنده قرار داد و مقدار پس زنی را نیز تعیین کرد. همچنین در این آزمایش می توان چرخ دنده ها را از نظر نرمی چرخش نیز بررسی نمود.

با رسم نموداری از جابجایی سوپرت متحرک بر حسب میزان چرخش چرخ دنده می توان خطاهای موجود در چرخ دنده را تحلیل کرد. برای رسم این نمودار، از یک ساعت اندازه گیری به همراه یک بازوی خاص استفاده می شود به این صورت که حرکت ایجاد شده در ساعت، تقویت و با دستگاه اندازه گیری سطح Taly surf ثبت می گردد (این دستگاه در فصل ۹ توضیح داده خواهد شد). در شکل ۸-۷ نمونه ای از طرحهای تولید شده با این روش دیده می شود.



شکل۸-۷) نمونه طرحهای تولید شده بوسیله دستگاه آزمایش غلتکی (از نوع ثبت کننده)

معمولاً این خطاها با هم اتفاق می افتد (خطای ترکیبی-شکل ۸-۷ قسمت د-م) و در نتیجه طرح حاصل از آنها نامتعارف است. لازم به ذکر است که وقتی یک چرخ دنده مارپیچ بروی دستگاه پارکسون آزمایش می شود مؤلفۀ عمودی نیروی موجود بین دندانه ها، تمایل دارد که یکی از چرخ دنده ها را به طرف بالا حرکت دهد یا آن را بروی محورش بفشارد. به همین علت، چرخ دندۀ مرجع باید بین دو مرغک نصب شود و طوری دوران کند که نیروی پیشران به طرف بالا را جذب نماید. به این ترتیب مؤلفۀ مساوی و در جهت مخالف آن، چرخ دنده را به سمت پایین فشار خواهد داد که در نتیجه چرخ دنده در جای خود باقی می ماند. اگر چرخ دندۀ مرجع موجود نباشد می توان از این دستگاه برای برای بررسی یک جفت چرخ دنده نیز استفاده کرد. در این مورد چرخ دنده ها نباید خطاهای قابل جبران داشته باشند. به عنوان مثال اگر هر دو چرخ دنده به یک اندازه از مرکز خارج شده باشند و با نسبت زاویه ای ویژه ای نصب گردند خطای خروج از مرکز، حذف می گردد و خطایی نشان داده نمی شود. بنابراین چنانچه از دستگاه پارکسون برای بررسی یک جفت چرخ دنده استفاده گردد چرخ دنده ها باید دو بار

آزمایش شوند به این صورت که در مرحله دوم، موقعیت زاویه ای آنها نسبت به یکدیگر، ۱۸۰ درجه تغییر داده شود و چرخ دنده ها مجدداً کنترل گردند.

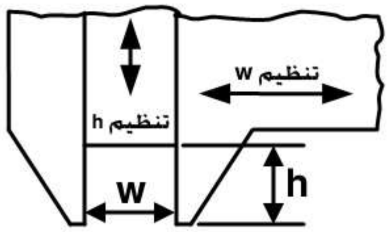
اندازه گیری ضخامت دندانه چرخ دنده ساده و مارپیچ

وسیله ای که اغلب برای اندازه گیری ضخامت دندانه چرخ دنده بکار می رود کولیس دندانهٔ چرخ دنده می باشد. با توجه به آن که ضخامت دندانه از نوک تا دایره مبنا یکسان نیست هر وسیله اندازه گیری ضخامت دندانه باید :

۱-ضخامت دندانه را در موقعیت معینی روی دندانه اندازه گیری کند.

۲-هنگام اندازه گیری در موقعیت مورد نظر ثابت باقی بماند.

بنابراین ضروری است که کولیس دندانهٔ چرخ دنده، یک ورنیه برای اندازه گیری w و یک عمق سنج ورنیه دار برای نگاه داشتن کولیس در ارتفاع h به هنگام اندازه گیری w داشته باشد (شکل ۹-۷).



شکل۹-۷) فکهای کولیس دندانهٔ چرخ دنده

ضخامت دندانه در خط گام

باید متذکر شد که w وتر قوس AC است و ضخامت دندانه فاصله کمانیADC می باشد. همچنین h اندازهٔ EB است که اندکی بزرگتر از ارتفاع سر دندانه (ED) می باشد. با مراجعه به شکل ۱۰-۷ داریم :

$$w = 2AB$$

در مثلث ABO داریم :

$$\sin\theta = \frac{AB}{OA} \;,\; \theta = \frac{360}{4N} = \frac{90}{N} \;,\; OA = R_P = \frac{D}{2} = \frac{N \times m}{2}$$

(گام دایروی، شامل یک فضای خالی و یک دندانه است که ۴ قسمت می شود پس $\theta = \frac{360}{4N}$-م)

بنابراین:

$$AB = OA \times Sin\theta = \frac{N \times m}{2} \times Sin\left(\frac{90}{N}\right)$$

اما w=۲AB پس :

$$w = N \times m \times Sin\left(\frac{90}{N}\right) \qquad (1)$$

همچنین از شکل ۱۰-۷ داریم :

$$h = OE - OB \text{ و } OE = R_P + \text{ارتفاع سر دندانه} = \frac{N \times m}{2} + m$$

$$OB = OA \times Cos\theta = \frac{N \times m}{2} \times cos\left(\frac{90}{N}\right)$$

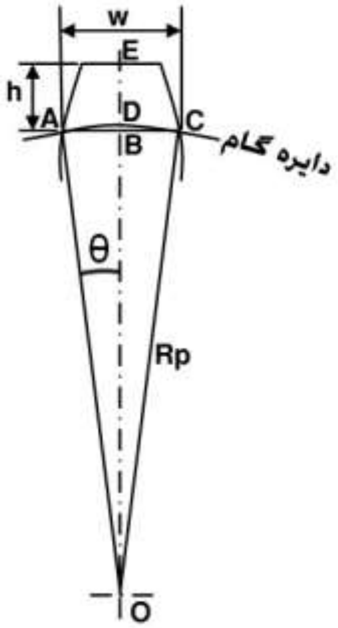
$$h = \frac{N \times m}{2} + m - \frac{N \times m}{2} \times Cos\left(\frac{90}{N}\right)$$

$$h = m \times \left[\frac{N}{2} + 1 - \frac{N}{2} \times Cos\left(\frac{90}{N}\right)\right] \Rightarrow h = m \times \left[1 + \frac{N}{2} \times (1 - Cos\left(\frac{90}{N}\right))\right] \quad (2)$$

و با توجه به معادله ۱ :

$$w = N \times m \times Sin\left(\frac{90}{N}\right)$$

در معادلات بالا h و w مقادیر ایده آل هستند و برایh باید یک مقدار مجاز نیز در نظر گرفت.

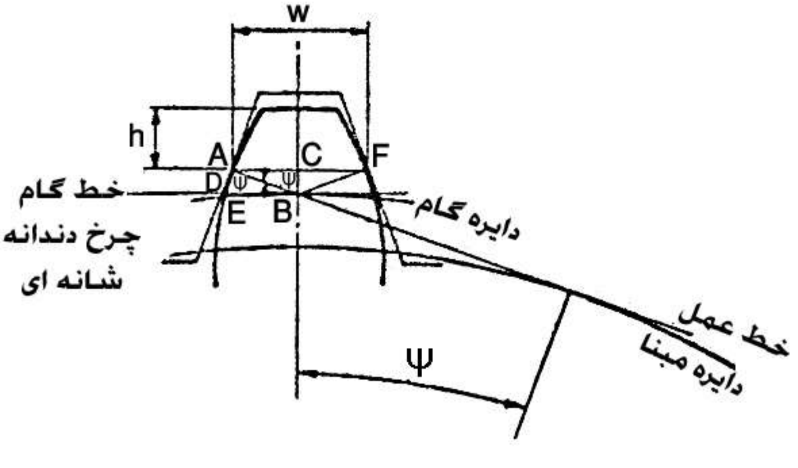


شکل۱۰-۷) اندازگیری ضخامت در خط گام

در مورد چرخ دنده های مارپیچ، اندازه گیری ضخامت دندانه در صفحه عرضی و در خط گام آسان نیست ولی ضخامت عمودی دندانه قابل تعیین می باشد. برای این کار با محدود کردن دقت کولیس دندانه چرخ دنده، می توان ضخامت عمودی دندانه چرخ دنده مارپیچ (W_n) را با ضخامت دندانه یک چرخ دندهٔ ساده مشابه که تعداد دندانه های آن $N_U = N \times Sec3\sigma$ (σزاویه مارپیچ است) برابر در نظر گرفت. به عبارت دیگر برای اندازه گیری ضخامت عمودی دندانه های یک چرخ دنده مارپیچ، در روابط h و w به جای N مقدار N_u قرار داده می شود.

وتر ثابت

در معادلات مربوط به روش ضخامت دندانه در خط گام دیده شد که اندازه h وw به تعداد دندانه چرخ دنده بستگی دارد. بنابراین اگر تعداد چرخ دنده ها زیاد و تعداد دندانه هر کدام متفاوت باشد، انجام محاسبات، برای هر چرخ دنده مشکل و وقت گیر خواهد بود. در شکل۱۱-۷ یک دندانه اینولوت که به طور دقیق و قرینه با یک چرخ دنده شانه ای درگیر شده است دیده می شود. با توجه با این شکل می توان چرخ دنده ها را بدون نیاز به تعداد دندانه و بر اساس مدول (و زاویه فشار-م) اندازه گیری کرد. اگر شرایط شکل ۱۱-۷ برقرار باشد تماس بین دو چرخ دنده همیشه در دو نقطه A و F حاصل می گردد. AF مشهور به وتر ثابت است.



شکل۱۱-۷) اندازه گیری ضخامت دندانه در وتر ثابت

در شکل ۱۱-۷ داریم :

$$BD = \frac{1}{4} \times \text{گام دایروی} = \frac{1}{4} \times CP = \frac{1}{4} \times \frac{\pi}{DP} = \frac{\pi . m}{4}$$

(گام دایروی، مجموع یک فضای خالی و یک دندانه است که چهار قسمت می شود-م) در مثلث ABD :

$$\frac{AB}{BD} = Cos\psi$$

در نتیجه :

$$AB = BD Cos\psi = \frac{\pi.m}{4} Cos\psi$$

در مثلث ABC :

$$\frac{AC}{AB} = Cos\psi$$

در نتیجه :

$$AC = AB\ Cos\psi = \frac{\pi.m}{4} Cos^2\psi$$

$$w = 2AC = \frac{\pi.m}{2} Cos^2\psi \qquad (1)$$

همچنین در مثلث ABC :

$$\frac{BC}{AB} = Sin\psi$$

پس :

$$BC = AB Sin\psi = \frac{\pi.m}{4} Cos\psi\, Sin\psi$$

بنابراین با توجه به شکل ۱۱-۷ :

$$h = m - \frac{\pi.m}{4} Cos\psi\ Sin\psi \qquad (2)$$

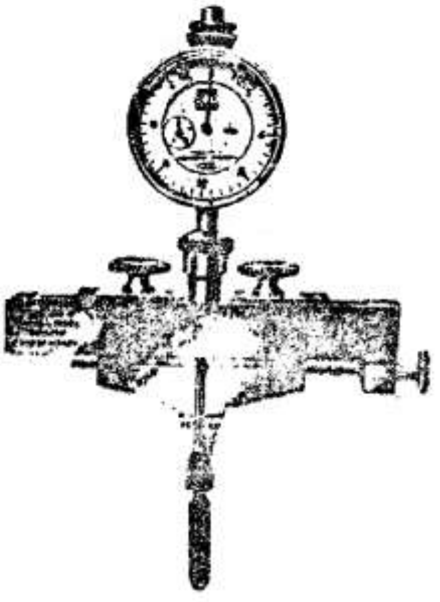
معادلات ۱ و۲ برای چرخ دنده های ساده قابل کاربرد است. در چرخ دنده های مارپیچ، مقدار w_n را می توان با قرار دادن مدول عمودی و زاویه فشار عمودی در معادلهٔ بدست آمده برای w تعیین کرد. به
این ترتیب خواهیم داشت :

$$w_n = \frac{\pi.m_n}{2} Cos^2\psi_n$$

$$h_n = m_n - \frac{\pi.m_n}{4} Cos\psi_n Sin\psi_n$$

اگر بخواهیم برای پس زنی، مقدار مجازی در نظر بگیریم باید آن را از w کم کنیم. اگر مقدار کاهش در w برابر با δw و پس زنی برابر با b باشد آنگاه $\delta w = b.Sec\psi$.

روش وتر ثابت، بسیار حساستر و دقیقتر از روش کولیس دندانه چرخ دنده است. در شکل ۱۲-۷ مقایسه گر (کمپراتور) دندانه چرخ دنده که از روش وتر ثابت ضخامت دندانه را اندازه گیری می کند مشاهده می گردد. این وسیله، متشکل از یک ساعت اندازه گیری و یک میلهٔ نفوذ کننده و دو فک قابل تنظیم در زوایای ۱۴/۵ و ۲۰ درجه (بسته به زاویه فشار مور نیاز) می باشد. این مقایسه گر با یک جفت سنجه توپی مرجع تنظیم می گردد. موقعیت نشانه های حدی بروی صفحهٔ ساعت، تعیین و ثابت می شود. قابل ذکر است که فکهای این مقایسه گر، بزرگ نمایی اضافه ای تقریباً برابر $\frac{2}{1}$ ایجاد می کند. در نتیجه برای چرخ دنده ای با زاویه فشار ۱۴/۵ درجه، چنانچه ضخامت دندانه، خطای ۰/۰۱ میلی متر داشته باشد، ساعت اندازه گیری مقدار خطا را ۰/۰۲ میلی متر نشان می دهد.



شکل۱۲-۷) مقایسه گر دندانهٔ چرخ دنده که از روش وتر ثابت عمل اندازه گیری را انجام می دهد.

روش مماس مبنا

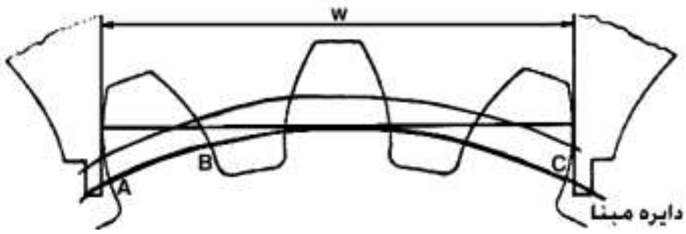
بدون در نظر گرفتن روش مقایسه گر دندانهٔ چرخ دنده که در شکل ۱۲-۷ نشان داده شد باید ذکر کرد که هر دو روش اندازه گیری ضخامت دندانه که مورد بررسی قرار گرفت چنانچه با استفاده از کولیس دندانه چرخ دنده انجام گردد ممکن است غیر قابل اعتماد باشد چرا که :

۱-حتی یک شخص مجرب با تمرین فراوان، بوسیله این کولیس، حداکثر دقتی از ۰/۵ تا ۰/۰۲۵ میلی متر را می تواند بدست آورد.

۲-اندازه گیری به دو قرائت از دو ورنیه که هر یک تابع دیگری است بستگی دارد.

۳-اندازه گیری با یک لبه از فک اندازه گیری و نه با پیشانی آن انجام می شود و بنابراین نتیجه دقیقی بدست نخواهد آمد.

برای برطرف نمودن این مشکلات باید فاصلهٔ بین تعداد مناسبی از دندانه ها را به صورتی که در شکل ۱۳-۷ نشان داده شده است بدست آورد.

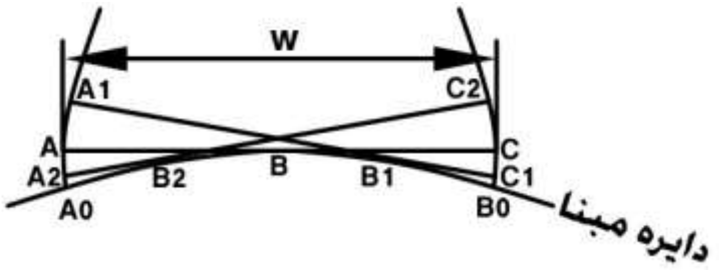


شکل۱۳-۷) اندازه گیری فاصلهٔ بین چند دندانه با یک کولیس

دیده می شود که چگونه با استفاده از یک کولیس می توان بر مشکلاتی که ذکر شد غلبه کرد. البته در کولیسها نیز خطاهایی وجود دارد که با کاربرد تجهیزات بسیار دقیق این مشکل هم قابل حل است.

در شکل ۱۴-۷ خط راست ABC به طول AC را مشاهده می کنید که مماس بر دایره مبنا به جلو و عقب برده شده است. یک انتهای این خط راست به ترتیب نقاط A_1,A,A_2 و انتهای دیگر آن نقاط C_1,C,C_2 را طی می کند. همان طور که دیده می شود این نقاط بروی دو منحنی اینولوت قرار دارد. طول خطوط بدست آمده بروی این دو اینولوت با یک دیگر برابر می باشد یعنی :

$$w = AC = A_2C_2 = A_1C_1 = \overset{\frown}{A_0B_0}$$



شکل ۱۴-۷) تولید یک جفت اینولوت قرینه با یک مولد مشترک
(منظور خط راست ABC است).

A.B. طول کمانی از دایره مبنا است که بین مبدأ دو اینولوت قرار دارد (این حالت را باید با مورد نشان داده شده در شکل ۱-۷ مقایسه کرد). بنابراین موقعیت سطوح اندازه گیری (موقعیت فکهای کولیس-م) بروی دو اینولوت صحیح و مقابل هم، می تواند تغییر کند ولی در هر حال باید این سطوح، موازی هم باشند. کاربرد این روش بهتر از اندازه گیری فاصله چند دندانه می باشد چرا که در روش اندازه گیری فاصله چند دندانه ، اندازه گیری به طور تقریبی در دایره گام چرخ دنده انجام می گردد.
با توجه به شکل ۱۳-۷ دیده می شود که :

$$w = \overset{\frown}{AB} + \overset{\frown}{BC}$$

کمان AB ضخامت دندانه در دایره مبنا و کمان BC عبارت است از (گام مبنا)P_b ×
کمانBC=S

S تعداد دندانه هایی است که فاصله بین آنها اندازه گیری می شود. اگر N تعداد دندانه های چرخ دنده باشد آنگاه گام زاویه ای دندانه ها یعنی P_θ عبارت است از :

$$P_\theta = \frac{2\pi}{N}$$ رادیان(یعنی عدد پی ۳/۱۴ است نه ۱۸۰-م)

و گام مبنا برابر است با :

$$P_b = \frac{2\pi}{N} \times R_b$$

R_b شعاع دایره مبنا است. با توجه به اینکه $R_b = \frac{N.m}{2} Cos\psi$ و مدول = m آنگاه داریم :

$$\therefore P_b = \frac{2\pi}{N} \times \frac{N.m}{2} \text{Cos}\psi$$

و اگر S تعداد دندانه هایی باشد که فاصله بین آنها اندازه گیری می شود آنگاه :

$$\overset{\frown}{BC} = \frac{2\pi}{N} \times S \times \frac{N.m}{2} \text{Cos}\psi \qquad (۱)$$

برای تعیین کمان AB (ضخامت دندانه در دایره مبنا) شکل ۱۵-۷ را ملاحظه کنید که یک دندانه از چرخ دنده را به همراه اطلاعات مناسب نشان می دهد (توجه نمایید که در ریاضی، طول یک کمان از دایره، حاصل ضرب شعاع دایره در زاویه مقابل به کمان بر حسب رادیان است-م) :

$$\overset{\frown}{AB} = 2\overset{\frown}{AD} = 2(\overset{\frown}{AC} + \overset{\frown}{CD})$$

$$\overset{\frown}{AC} = R_b \times \text{Inv}\psi^{rad} \quad \Rightarrow \quad \overset{\frown}{AC} = R_b (\text{tg}\psi - \psi)^{rad}$$

$$\overset{\frown}{AC} = \frac{N.m}{2} \text{Cos}\psi \times (\text{tg}\psi - \psi)^{rad} \qquad (۲)$$

$$\theta \ (\text{رادیان}) = \frac{\overset{\frown}{EF}}{R_p} = \frac{\overset{\frown}{CD}}{R_b}$$

$$\overset{\frown}{EF} = \frac{1}{4} \times \text{گام دایروی} \quad , \quad \theta = \frac{\pi.m}{4} \times \frac{1}{R_p} = \frac{\pi.m}{4} \times \frac{2}{N.m}$$

$$\therefore \theta = \frac{\pi}{2N} \ (\text{رادیان}) \ , \overset{\frown}{CD} = R_b \times \theta$$

$$\overset{\frown}{CD} = \frac{N.m}{2} \text{Cos}\psi \times \frac{\pi}{2N} \qquad (۳)$$

اما $\overset{\frown}{AB} = 2(\overset{\frown}{AC} + \overset{\frown}{CD})$ با قرار دادن معادلات ۲ و ۳ در این عبارت داریم :

$$\overset{\frown}{AB} = 2\left[\frac{N.m}{2} \text{Cos}\psi \times (\text{tg}\psi - \psi)^{rad} + \frac{N.m}{2} \text{Cos}\psi \times \frac{\pi}{2N}\right] = N.m\text{Cos}\psi\left[(\text{tg}\psi - \psi)^{rad} + \frac{\pi}{2N}\right] \quad (۴)$$

با قرار دادن معادلات ۱ و۴ در $w = \overset{\frown}{AB} + \overset{\frown}{BC}$ خواهیم داشت :

$$w = N.m\text{Cos}\psi\left[(\text{tg}\psi - \psi)^{rad} + \frac{\pi}{2N}\right] + \frac{2\pi}{N} \times S \times \frac{N.m}{2} \text{Cos}\psi$$

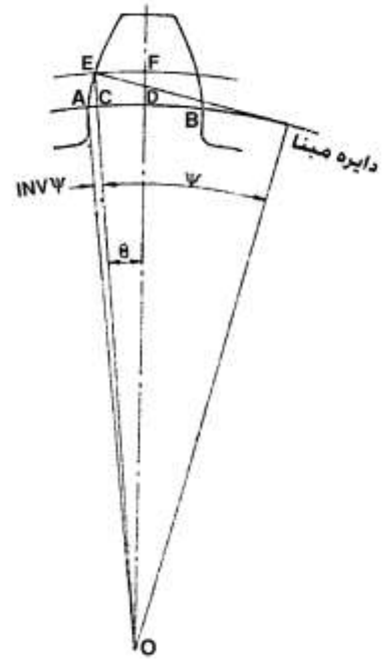
که در نتیجه :

$$w = N.mCos\psi\left[(tg\psi - \psi)^{rad} + \frac{\pi}{2N} + \frac{\pi S}{N}\right]$$

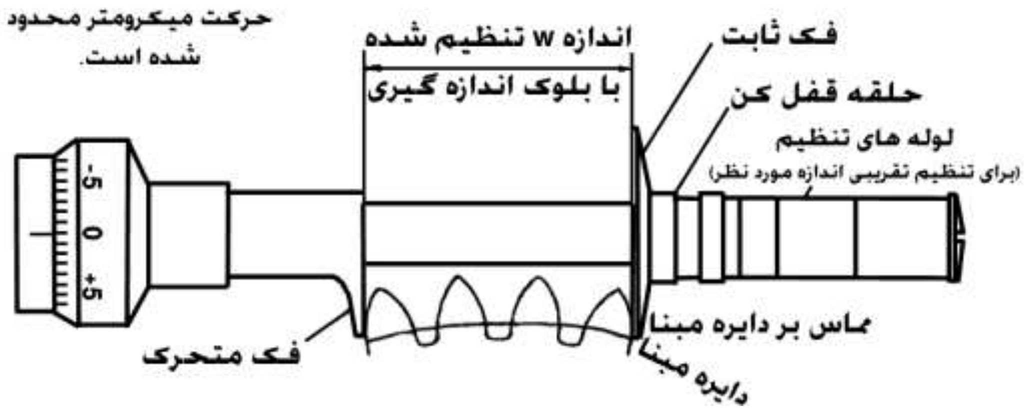
در این معادله، N تعداد دندانه ها، m مدول، ψ زاویه فشار بر حسب رادیان و S تعداد دندانه هایی که در فاصله W قرار گرفته اند می باشد. برای چرخ دنده مارپیچ مقدار W در صفحه عمودی بررسی می گردد بنابراین :

$$w_N = N.m_n\, Cos\psi_n\left[(tg\psi_n - \psi_n)^{rad} + \frac{\pi}{2N} + \frac{\pi S}{N}\right]$$

که در آن m_n مدول در صفحه عمودی و برابر با $m_t\, Cos\sigma$ است که σ زاویه مارپیچ می باشد و ψ_N زاویه فشار در صفحه عمودی است ($tan\psi_N = tan\psi_t\, Cos\sigma$). در این روش، اندازه گیری به کمک میکرومتری که فکهای بشقابی شکل دارد یا به کمک مقایسه گر (کمپراتور) مماس مبنای دیوید براون (David Brown Base Tangent) که در شکل ۱۶-۷ نشان داده شده است به نحو مناسب قابل اجرا می باشد.



شک ۱۵-۷) ضخامت دندانه یک چرخ دنده که در دایره مبنا اندازه گیری شده است.



شکل۱۶-۷) مقایسه گر مماس مبنای دیوید براون

همانطور که دیده می شود این مقایسه گر، متشکل از یک میکرومتر است که دامنه حرکت محدودی دارد. می توان این مقایسه گر را بوسیله بلوکهای اندازه گیری بروی صفر تنظیم کرد. این روش برای چرخ دنده هایی با دندانه های کوچک نیز قابل کاربرد است. برای این کار، تصویر دندانه ها یا با اندازه گیری مستقیم یا به کمک میز عرضی یک میکروسکوپ ابزارسازی (Tool maker) اندازه گیری می شود. در اینجا نیز اندازه گیری w برای دندانه هایی بدون پس زنی ذکر شده است. برای اِعمال پس زنی، فرض می شود δw_b میزان کاهش w برای مقدار مجاز پس زنی δ_b است. پس :

$$\delta w_b = -\delta_b \, Cos\psi_n$$

اگر k میزان تصحیح ارتفاع سر دندانه باشد میزان تغییر w که در اثر تصحیح ارتفاع سر دندانه حاصل می شود عبارت است از :

$$\frac{1}{\delta w_b m}$$

آنگاه :

$$\delta w_b = 2.k.m.Sin\psi_n$$

بنابراین برای یک چرخ دنده (مارپیچ-م) تصحیح شده با پس زنی :

$$w_N = N.m_n \, Cos\psi_n \left[(tg\psi_n - \psi_n)^{rad} + \frac{\pi}{2N} + \frac{\pi S}{N} \right] - \delta_b \, Cos\psi_n$$
$$= N.m_n \, Cos\psi_n \left[(tg\psi_n - \psi_n)^{rad} + \frac{\pi}{2N} + \frac{\pi S}{N} \right] - 2.k.m.Sin\psi_n$$

اندازه گیری با استوانه ها

در شکل ۱۷-۷ استوانه ای را ملاحظه می کنید که بین یک جفت از دندانه های یک چرخ دنده قرار داده شده است به طوری که مرکز آن بروی دایره گام قرار می گیرد. مشابه با آن چه که در روش وتر ثابت گفته شد داریم (در مثلث OAB –م) :

$$Cos\psi = \frac{OA}{OB} \Rightarrow OA = OB\,Cos\psi$$

(شعاع استوانه) $OA = r$ و :

$$OB = \frac{1}{4}OP = \frac{\pi.m}{4}$$

در نتیجه :

$$r = \frac{\pi.m}{4}Cos\psi \Rightarrow \text{قطر استوانه} = \frac{\pi.m}{2}Cos\psi$$

بنابراین :

$$\text{شعاع مورد اندازه گیری} = R_G = R_P + r == \frac{N.m}{2} + \frac{\pi.m}{4}Cos\psi$$

که R_P شعاع دایره گام است. بنابراین فاصله دو استوانه (به قطر $\frac{\pi.m}{2}Cos\psi$ –م) که بروی چرخ دنده و مقابل هم قرار داده شده اند عبارت است از :

$$D_G = 2R_G = N.m + \frac{\pi.m}{2}Cos\psi = m\left(N + \frac{\pi}{2}Cos\psi\right)$$

برای دندانه های اصلاح شده (از نظر پس زنی-م)، شعاع استوانه عبارت است از :

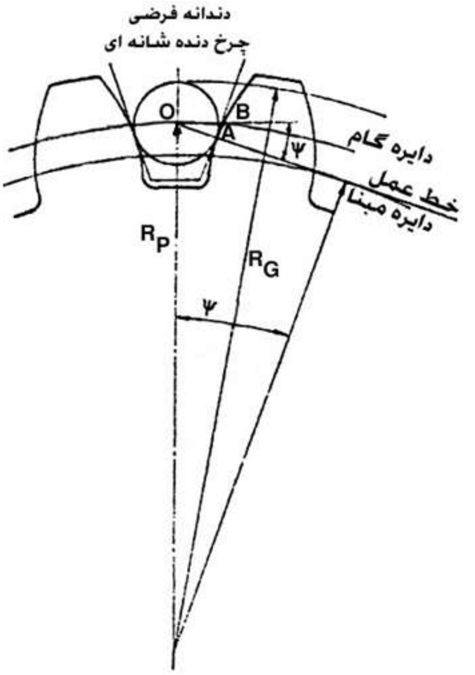
$$r_{\text{اصلاح شده}} = \frac{\pi.m}{4}Cos\psi - 2.K.m.Sin\psi$$

$$\Rightarrow R_G = \frac{N.m}{2} + \frac{\pi.m}{4}Cos\psi - 2.K.m.Sin\psi$$

$$\Rightarrow D_G = N.m + \frac{\pi.m}{2}Cos\psi - 4.K.m.Sin\,\psi = m\left(N + \frac{\pi}{2}Cos\psi - 4.K.Sin\psi\right)$$

در این آزمایش، استوانه باید اندازه خاصی داشته باشد. اگر شعاع استوانه، کوچکتر از $\frac{\pi.m}{2} \times Cos\psi$ در نظر گرفته شود چون از ارتفاع سر دندانه کوچکتر می باشد نوک دندانه ها، استوانه را می پوشاند و اندازه گیری مشکل است. روابط بالا برای چرخ دنده هایی است که تعداد دندانه های آنها زوج می باشد. اما وقتی تعداد دندانه ها فرد است با قرار دادن چرخ دنده

بین دو مرغک و با استفاده از یک مقایسه گر یا یک جفت استوانه، اندازه گیری شعاعی انجام می گردد (البته فرمولهای مشابهی نیز وجود دارد-م).



شکل ۱۷-۷) بررسی چرخ دنده با استوانه ای که مرکز آن روی دایره گام است.

اندازه گیری گام چرخ دنده

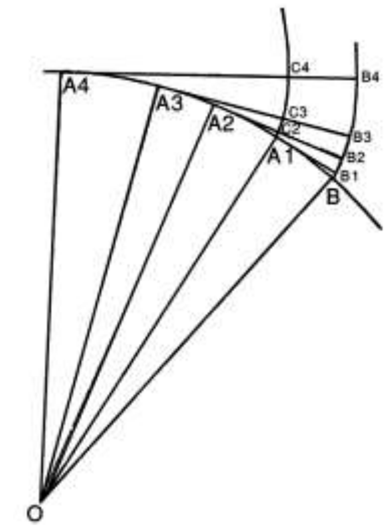
اندازه گیری گام دندانه های چرخ دنده از دو طریق قابل انجام است :

۱-اندازه گیری فاصله بین یک نقطه بروی یک دندانه تا نقطه مشابه بروی دندانه بعدی

۲-اندازه گیری موقعیت یک نقطه مناسب بروی یک دندانه بعد از این که چرخ دنده تحت زاویه ای مناسب چرخانده می شود.

اندازه گیری گام از یک دندانه تا دندانه بعدی

در این روش، گام مبنا توسط وسیله ای که با دست قابل حمل و نگاهداری است اندازه گیری می شود. در شکل ۱۸-۷ گام مبنا A_1B_1 است که بین دو اینولوت با مبدأ های B و A1 قرار دارد.



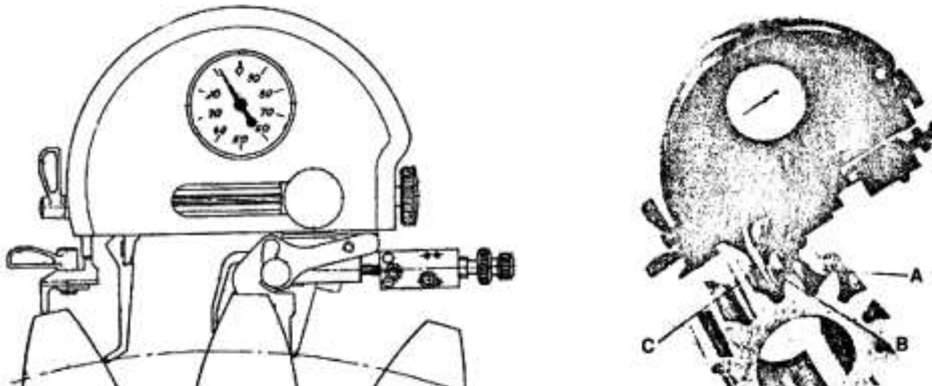
شکل ۱۸-۷) گام مبنا برابر است با فاصله خطی بین یک جفت اینولوت که در امتداد مولد مشترک اندازه گیری می شود.

با توجه به شکل می توان نشان داد : $A_1B = A_1B_1 = C_2B_2 = C_3B_3 = C_4B_4$

یعنی هر مقدار اندازه گیری شده در امتداد خط مماس بر دایره مبنا و بین یک جفت اینولوت مجاور هم، برابر با گام مبنا می باشد. گام مبنا برابر است با :

$P_b = \pi.m.Cos\psi$

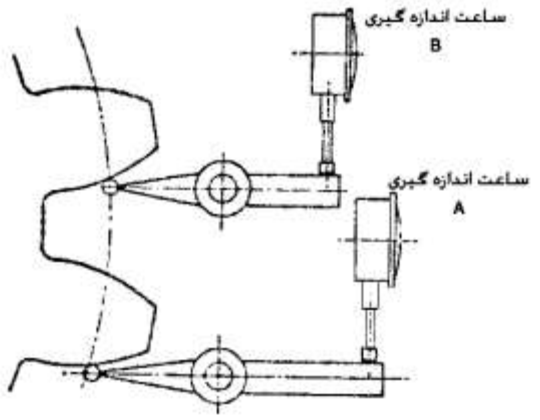
وسیله ای که این مقدار را اندازه گیری می کند دارای سه پایه اندازه گیری می باشد (شکل۱۹-۷).



شکل۱۹-۷) دستگاه اندازه گیری گام- با اجازه چاپ از شرکت MAAG GEAR WHEEL- زوریخ (معروف به اندازه گیر ماگ-شکل چپ : اندازه گیری گام با اندازه گیر ماگ بروی دایره گام-م)

پایه اندازه گیری A در مقابل دندانه جای می گیرد و دستگاه طوری تنظیم می شود که فاصله بین A و C تقریباً برابر با گام مبنا باشد. پایه B برای ثابت ماندن دو پایه دیگر در موقعیت مورد نظر، ساخته شده است. اگر گام، ثابت باشد این اندازه گیری بروی هر دندانه که انجام شود مقدار قرائت شده یکسان خواهد بود.

روش دیگری را که می توان برای بدست آوردن خطای گام بکار برد استفاده از دو ساعت اندازه گیری است (شکل ۲۰-۷).



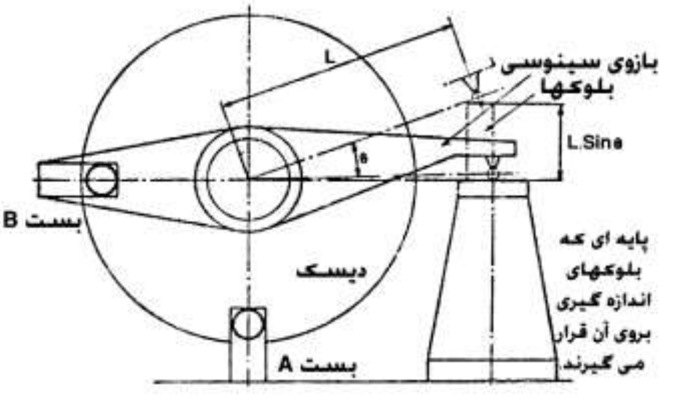
شکل ۲۰-۷) استفاده از دو ساعت اندازه گیری برای تعیین خطای گام در روش اندازه گیری گام از یک دندانه تا دندانه بعدی

در این روش دو ساعت اندازه گیری بروی دایره گام و مماس بر دو دندانه مجاور هم قرار می گیرد (درست مثل آنچه که در شکل ۲۰-۷ نشان داده شده است). چرخ دنده به طور متوالی و هر بار به اندازه گام چرخانده می شود و ساعتهای اندازه گیری تنظیم می گردد. مقدار تفاوت اعداد قرائت شده از ساعت اندازه گیری A و ساعت اندازه گیری B در هر مرحله، نشان دهنده خطای گام خواهد بود. خطای حقیقی، با کم کردن هر قرائت ساعت اندازه گیری B، از مقدار میانگین قرائتها تعیین می گردد.

اندازه گیری خطای کل گام

ساده ترین روش تعیین خطای گام استفاده از ساعت اندازه گیری است به این صورت که ساعت در برابر هر دندانه از چرخ دنده، تنظیم و مقدار نشان داده شده قرائت می گردد. اگر چرخ دنده

به اندازه گام زاویه ای چرخانده شود و قرائت حاصل از ساعت اندازه گیری در موقعیت دوم با موقعیت اول تفاوت داشته باشد اختلاف بین آنها خطای کل گام خواهد بود. موضوع مهم در این روش آن است که بتوان چرخ دنده را دقیقاً به اندازه گام زاویه ای چرخاند چرا که اگر در چرخش چرخ دنده، خطایی برابر $\delta\theta$ رادیان ایجاد گردد در گام، خطایی به اندازه $\delta\theta \times R_p$ حاصل می شود (R_p شعاع دایره گام است). البته اگر زاویه ای که چرخ دنده تحت آن چرخانده می شود همواره یکسان باشد خطای تولید شده قابل تصحیح است. این دستگاه در لابراتور ملی فیزیک تکمیل و ساخته شده است. شرکت Sigma نیز این وسیله را با یک سیستم ظریف اندازه گیری گام ترکیب کرده است. در شکل ۲۱-۷ یک نوع از این وسیله دیده می شود. چرخ دنده بروی یک سنبه نصب می گردد. سنبه به دیسکی متصل است و چرخ دنده می تواند به همراه دیسک بچرخد. یک بازوی سینوسی نیز به طور هم مرکز با دیسک دوران می نماید. بست A، دیسک را به چرخ دنده و بست B بازو را به دیسک قفل می کند. جهت چرخش چرخ دنده در ابتدا، بست A قفل می شود. به این ترتیب دیسک و چرخ دنده به یکدیگر قفل می گردد.



شکل۲۱-۷) یک وسیله چرخشی جهت تعیین خطای کل گام چرخ دنده

روش کار به این صورت است :

۱-در حالی که بست B آزاد است بازوی سینوسی را بلند کنید و بلوکهای اندازه گیری مناسبی را بروی پایه قرار دهید به طوری که بازوی سینوسی تحت زاویه θ بچرخد.

۲-سوزن بازوی سینوسی را بروی بلوکهای اندازه گیری قرار دهید و بست B را قفل کنید.

۳-بست A را آزاد نمایید و بلوکهای اندازه گیری را بردارید.

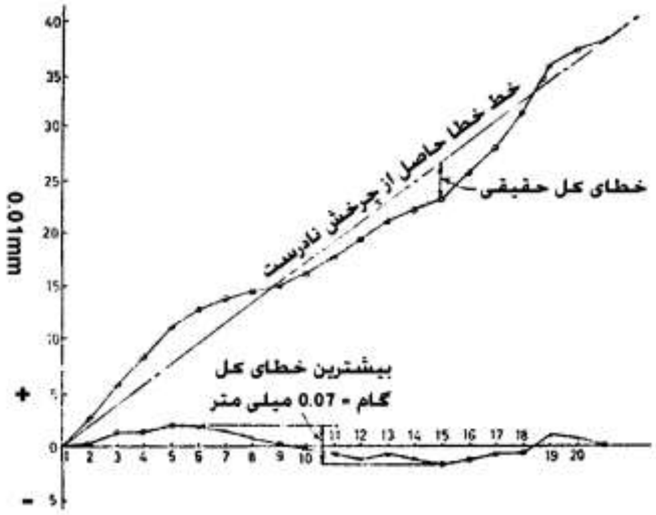
۴-بازوی سینوسی را به پایین بچرخانید تا سوزن آن بروی پایه قرار گیرد. سپس بست A را قفل نمایید.

این فرایند تا زمانی که به وسیله ساعت اندازه گیری برای تمام دندانه های چرخ دنده یک قرائت بدست آید ادامه داده می شود. وقتی به اولین دندانه رسیدیم یک قرائت تکراری برای آن بدست می آوریم. اختلاف اولین و آخرین قرائت (صفر و ۳۸ -م) ، بین قرائتهای موجود میان آنها توزیع می گردد تا خطای گام هر دندانه حاصل شود (ستون سوم از راست که یک تصاعد حسابی با قدر نسبت $1.9 = \frac{38-0}{20}$ است-م). نتایج به دست آمده از یک آزمایش نمونه در جدول زیر ارائه شده است (چون در ستون ۳ برای همه اعداد علامت منفی قرار داده شده است، خطای کل، جمع بین مقادیر ستون ۲ و ۳ است-م).

شماره دندانه	قرائت (بر حسب ۰/۰۱ mm)	مقدار لازم جهت تصحیح خطا (بر حسب ۰/۰۱ mm)	خطای کل (بر حسب ۰/۰۱ mm)
۱	صفر	صفر	صفر
۲	+۲/۵	-۱/۹	+۰/۶
۳	+۶/۰	-۳/۸	+۲/۲
۴	+۸/۰	-۵/۷	+۲/۳
۵	+۱۱/۰	-۷/۶	+۳/۴
۶	+۱۳/۰	-۹/۵	+۳/۵
۷	+۱۴/۰	-۱۱/۴	+۲/۶
۸	+۱۴/۵	-۱۳/۳	+۱/۲
۹	+۱۵/۰	-۱۵/۲	-۰/۲
۱۰	+۱۶/۵	-۱۷/۱	-۰/۶
۱۱	+۱۷/۵	-۱۹/۰	-۱/۵
۱۲	+۱۸/۵	-۲۰/۹	-۲/۴
۱۳	+۲۱	-۲۲/۸	-۱/۸
۱۴	+۲۲	-۲۴/۷	-۲/۷
۱۵	+۲۳	-۲۶/۶	-۳/۶
۱۶	+۲۶	-۲۸/۵	-۲/۵

۱۷	+۲۸	-۳۰/۴	-۲/۴
۱۸	+۳۱	-۳۲/۳	-۱/۳
۱۹	+۳۶	-۳۴/۲	+۱/۸
۲۰	+۳۷/۵	-۳۶/۱	+۱/۴
تکرار قرائت اول	+۳۸	-۳۸/۰	صفر

بنابراین خطای کل گام بین دندانه های ۵ و ۱۵ (شکل ۲۲-۷) و بروی کمانی به اندازه $2\pi\times(\frac{10}{20})$ رادیان، ۰/۰۷ (۷ واحد ۰/۰۱) میلی متر است. در شکل ۲۲-۷ خطای هر دندانه به صورت نمودار رسم شده است.

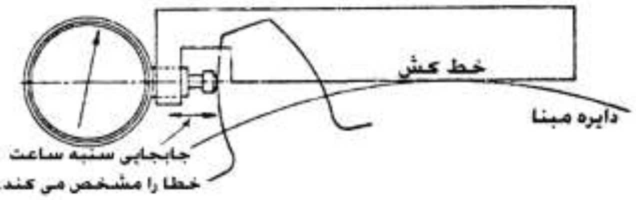


شکل۲۲-۷) نمودار مربوط به قرائتهای بدست آمده از ساعت اندازه گیری و خطای کل (خطای دندانه به دندانه را می توان با کم کردن قرائتهای بدست آمده از دو دندانه مجاور هم بدست آورد.)

آزمایش شکل اینولوت

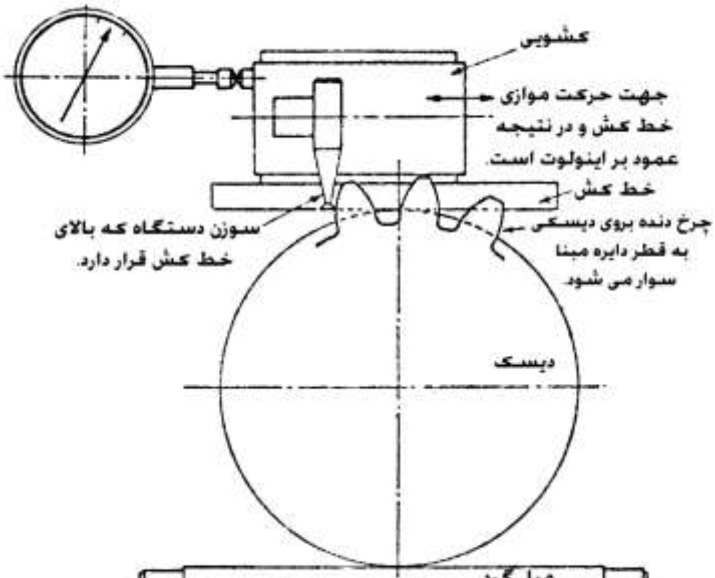
در شکل ۲۳-۷ برای این آزمایش وسیله ای به اختصار نشان داده شده است. سنبه ساعت بروی اینولوت قرار داده می شود. با حرکت دستگاه بروی مسیر اینولوت، تغییر در شکل اینولوت به تغییر در مقدار قرائت ساعت اندازه گیری تبدیل می گردد. اگر خط کش این دستگاه، پیرامون دایره مبنا بدون هیچ لغزشی حرکت کند سنبه ساعت اندازه گیری، منحنی اینولوت حاصل از دایره مبنا را طی می کند. به این ترتیب هنگامی که سنبه ساعت اندازه گیری دندانه را می

پیمایند عقربه از موقعیت صفر جابجا می شود. از آنجا که خطا، عمود بر دندانه یعنی در راستای خط کش، اندازه گیری می شود این وسیله مؤفق عمل نخواهد کرد چرا که ساعت اندازه گیری با دندانه بعدی برخورد می کند. بنابراین استفاده از آن کاربردی نیست. با این حال همین وسیله، مبنای ساخت بیشتر وسایل آزمایش کننده شکل اینولوت می باشد.



شکل۲۳-۷) اصول آزمایش شکل اینولوت

معمولاً چرخ دنده، بروی دیسکی که قطرش بطور دقیق برابر با قطر تئوری دایره مبنا(D_b) می باشد نصب می گردد ($D_b = DCos\psi = N.mCos\psi$). یکی از دستگاههایی که این روش را بکار می برد آزمونگر (تستر) دیوید براون است که در شکل ۲۴-۷ نشان داده شده است.



شکل۲۴-۷) آزمونگر اینولوت دیوید براون

در این وسیله، سوزن دستگاه، دقیقاً در کنار دندانه مورد نظر و در بالای خط کش تنظیم می گردد. سوزن بروی یک کشویی ساچمه دار با دو مقطع V شکل و تخت (شکل ۱۰-۳ فصل ۳)، نصب شده است. به این ترتیب کشویی مجبور است موازی خط کش حرکت کند. مقدار جابجایی کشویی که بوسیله ساعت، اندازه گیری می گردد در حقیقت خطای منحنی اینولوت است. این خطا در امتداد خط کش یعنی عمود بر شکل اینولوت اندازه گیری می شود. برای جلوگیری از ایجاد لغزش، همانطور که در شکل دیده می شود از حرکت جانبی یک میل گرد که در پشت دستگاه قرار دارد استفاده می گردد.

خطاهای مجاز در چرخ دنده ساده

این خطاها در استاندارد B.S. ۴۳۶ : ۱۹۴۰ و بر مبنای ضریبی تحت عنوان ضریب تلرانس (δ) ارائه شده است. این ضریب عبارت است از :

$$\delta = \left[\frac{(N \;\; +60)\times m}{10} + 1\right]$$

عامل دیگری که با خطای گام مرتبط می باشد و هنوز در مورد آن بحث نشده است La می باشد. La طول کمانی از دایره گام است که در آن خطا وجود دارد یعنی :

$$L_a = \frac{n}{N} \times 2\pi \text{ (رادیان) } \times R_P = \frac{n}{N} \times 2\pi \times \frac{N.m}{2} = n.m.\pi$$

n تعداد دندانه هایی است که در آنها خطا وجود دارد، N تعداد دندانه های چرخ دنده و m مدول است. در این استاندارد، جداول خطای مجاز برای ضخامت دندانه، گام و پروفیل (منحنی دندانه-م) چرخ دنده برحسب δ و La آورده شده است. به کمک این جداول که همراه مقادیر محاسبه شده δ و La می باشد می توان تلرانسهای حقیقی را محاسبه نمود.

فصل هشتم

اندازه گیری رزوه های پیچ

(Measurement of Screw Threads)

مقدمه

استاندارد B.S. ۸۴ که درباره تلرانس رزوه پیچهای تجارتی است نشان می دهد که تلرانس این پیچها نسبتاً بزرگ است. این قبیل پیچها معمولاً با سنجه های حدی که در فصل ۵ شرح داده شد بازرسی می شوند. اما برخی رزوه ها مانند رزوه سنجه های حدی که برای بررسی پیچ بکار می روند باید تلرانسهای دقیقتری داشته باشند. رزوه این سنجه ها باید اندازه گیری شود تا معین گردد که آیا دارای دقت مورد نظر هستند یا خیر و به این ترتیب رزوه های خوب را از رزوه های بد جدا کرد. اندازه گیری رزوه پیچ فراتر از بررسی آن با یک سنجه حدی است و گاهی بسیار پیچیده می باشد. در رزوه های پیچ همانطور که نشان داده خواهد شد بخشهای بسیاری باید مورد اندازه گیری قرار گیرد که بعضی از آنها در ارتباط با هم هستند. یک رزوه با دندانه V شکل اساساً از بخشهای زیر تشکیل می گردد که این بخشها در شکل ۱-۸ نشان داده شده است :

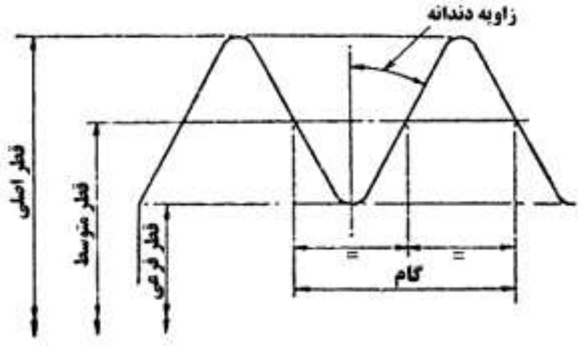
۱) قطر اصلی

۲) قطر فرعی (یا قطر ریشه)

۳) شکل رزوه خصوصاً زاویه دندانه آن

۴) گام

۵) قطر مؤثر ساده (قطر متوسط)



شکل۱-۸) بخشهای یک رزوه V شکل

(نوک رزوه های متریک و یونیفای (یکنواخت شده) تخت و ریشه های آنها شعاع دار است.)

زاویه دندانه، گام و قطر مؤثر ساده را می توان در یک گروه، تحت عنوان قطر مؤثر مجازی دسته بندی نمود. علت آن است که خطا در گام یا زاویه دندانه، قطر مؤثر را تغییر می دهد (فصل ۵). بنابراین قطر مؤثر مجازی یک رزوه همان قطر مؤثر ساده است که با تصحیح خطای گام و خطای زاویه دندانه، اصلاح می شود. قطر مؤثر مجازی مهمترین بُعد سنجه پیچ است.

اندازه گیری قطر اصلی

قطر اصلی یک پیچ، قطر استوانه فرضی است که تمام نقاط روی نوک رزوه ها را در بر گیرد. این قطر را می توان با یک میکرومتر رومیزی که در شکل ۲-۸ نشان داده شده است اندازه گیری کرد.

شکل ۲-۸) میکرومتر رومیزی صفر تا ۵۰ میلی متر (با اجازه چاپ از شرکت وسایل Sigma)

این وسیله توسط لابراتوار ملی فیزیک و به منظور حذف عیوب ذاتی میکرومتر دستی معمولی، طراحی شده است. این عیوب عبارتند از :

۱-تغییرات فشار اندازه گیری

۲-خطای گام در رزوه میکرومتر

در این دستگاه، سندان ثابت با یک فشار سنج قابل اطمینان عوض شده است بطوری که می توان همه اندازه گیریها را تحت یک فشار معین انجام داد. فشارسنج دارای تنظیم کننده موقعیت می باشد که به این وسیله محدوده اندازه گیری دستگاه افزایش داده می شود. از آنجا که رزوه میکرومتر طول کوتاهی دارد هر خطای گام که در میکرومتر وجود داشته باشد حذف می گردد.

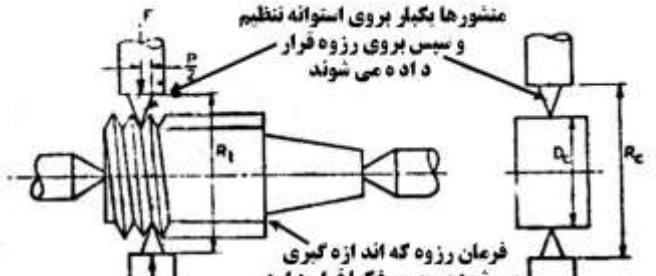
این دستگاه را می توان به عنوان یک مقایسه گر (کمپراتور) بکار برد. در این صورت باید بطور استاندارد تنظیم شود. تنظیم استاندارد این دستگاه را می توان بوسیله یک بلوک اندازه گیری انجام داد اما بهتر است که از یک استوانه میزان شده (کالیبره) استفاد نمود چرا که در این صورت سندانهای میکرومتر جهت قرائت، سطح تماس بزرگتری خواهند داشت. ابتدا قرائتهایی را بطور مستقیم از روی استوانه تنظیم و سپس قرائتهای دیگری را بروی رزوه بدست می آوریم. در نهایت اختلاف بین این قرائتها تفاوت اندازه استوانه و رزوه می باشد. اگر این اختلاف به قطر استوانه تنظیم اضافه گردد قطر اصلی رزوه بدست خواهد آمد. اگر D_c قطر استوانه تنظیم و R_c قرائت میکرومتر روی استوانه تنظیم و R_t قرائت میکرومتر روی رزوه باشد آنگاه :

$$\text{قطر اصلی} = D_c + (R_t - R_c)$$

این اندازه گیری باید بروی سه موقعیت در امتداد رزوه تکرار شود تا از عدم مخروطی بودن استوانه رزوه ها اطمینان حاصل گردد. بهتر است که این اندازه گیریها در سه موقعیت زاویه ای حول استوانه نیز تکرار شود تا عدم بیضی واری نیز مشخص گردد.

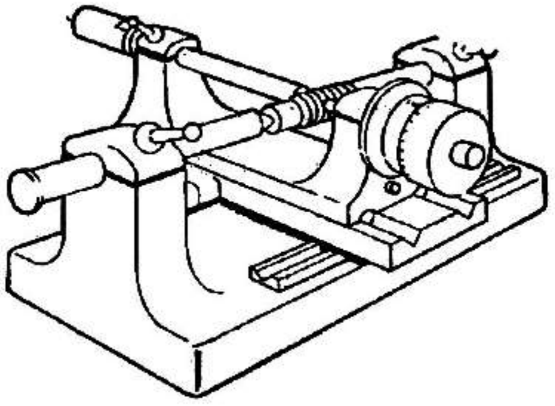
اندازه گیری قطر فرعی

قطر فرعی یک پیچ، قطر یک استوانه فرضی است که تمام نقاط روی ریشه رزوه ها را در بر گیرد. این مورد را نیز می توان مشابه روش به کار برده شده در بخش قبل اندازه گیری کرد اما این بار برای تماس مناسب با ریشه رزوه ها باید از منشورهای فولادی سخت و سنگ زده شده (شکل ۳-۸) استفاده کرد.



شکل ۳-۸) کاربرد منشورها در اندازه گیری قطر فرعی

همانطور که می بینید بخاطر مارپیچ بودن روزه، در اثر اعمال نیروی اندازه گیری F، کوپلی برابر $F\times\frac{P}{2}$ ایجاد می گردد (P گام رزوه است). این کوپل باعث می شود که رزوه به اندازه زاویه ای که به گام بستگی دارد بچرخد و در نتیجه قرائت نادرستی حاصل گردد. برای رفع این مشکل، اندازه گیری بوسیله دستگاهی که در شکل ۴-۸ نشان داده شده است انجام می شود.



شکل ۴-۸) ماشین اندازه گیری قطر با سوپرت متحرک

(با اجازه چاپ از شرکت Gauge Tool)

در این دستگاه، روزه بین دو مرغک قرار داده می شود بطوری که در فضا شناور باشد. سپس میکرومتر رومیزی که سندانهای آن عمود بر محور مرغکها است توسط یک کشویی با مقطع V شکل (فصل ۳) حرکت داده می شود و قطر، اندازه گیری می گردد. همانطور که گفته شد در اندازه گیری قطر فرعی از منشورهای فولادی (شکل ۳-۸) استفاده می شود. این منشورها باید در امتداد سندانهای میکرومتر قرار گیرند. در این صورت قطر فرعی،($D_C + (R_t - R_c)$ است. مانند حالت قبل برای اطمینان از عدم مخروطی بودن و بیضی واری استوانه رزوه بهتر است که این اندازه گیری در سه موقعیت تکرار شود.

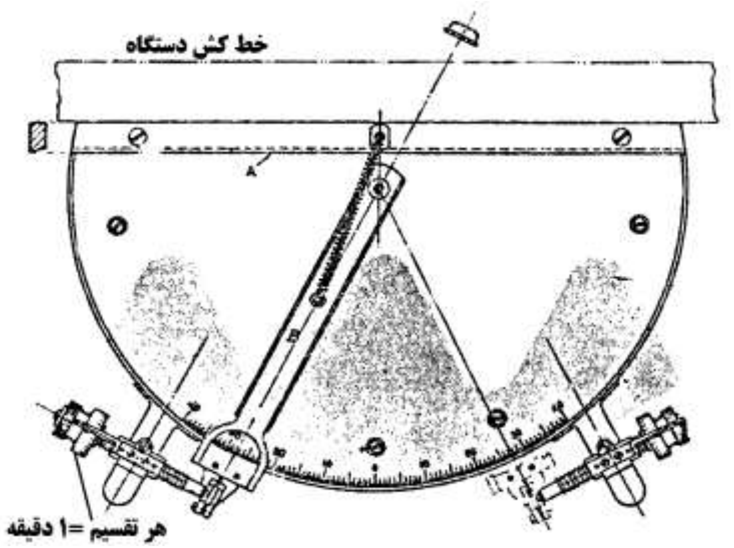
اندازه گیری شکل رزوه ها

مهمترین بخش رزوه پیچ که باید اندازه گیری شود زاویه دندانه آن است. زاویه دندانه، زاویه بین لبه پهلویی رزوه و محور آن است. زاویه دندانه در رزوه های بزرگ با روشهای تماسی قابل

اندازه گیری می باشد ولی معمولاً تنها روش عملی اندازه گیری آن بکارگیری تجهیزات نوری است. بوسیله این تجهیزات می توان تصویر زاویه دندانه را بروی یک پرده تشکیل داد و سپس آن را اندازه گیری نمود. این کار را با میکروسکوپی که کله گی زاویه سنج دارد نیز می توان انجام داد.

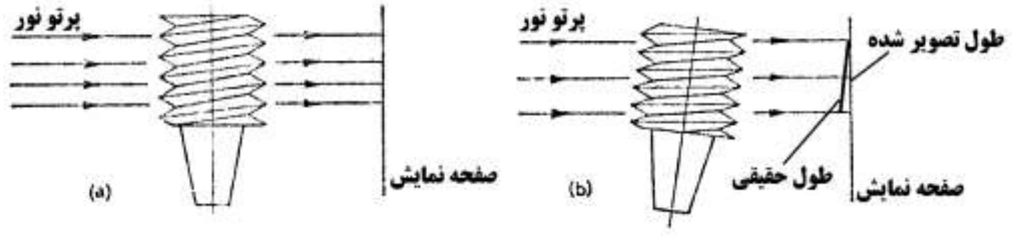
تصویر رزوه پیچ

ساده ترین و احتمالاً مؤثرترین وسیله برای این کار، تصویر کننده N.P.L می باشد که در لابراتوار ملی فیزیک تکمیل شده است. این دستگاه شامل یک لامپ است که در خروجی آن یک عدسی متمرکز کننده (کندانسور) قرار دارد. این عدسی برای تولید روشنایی یک نواخت، در خروجی محفظه لامپ تعبیه شده است. جسمی را که می خواهند تصویر کنند در موقعیتی بین دو عدسی متمرکز کننده و عدسی تصویر قرار می دهند و تصویر بزرگ شده بروی پرده ایجاد می گردد (شکل ۵-۸). جهت بدست آوردن بزرگنمایی مورد نظر، دستگاه تصویر کننده بروی ریلهای عمود بر پرده قابل حرکت است. همچنین برای متمرکز نمودن تصویر، موقعیت قطعه کار نسبت به عدسی تصویر قابل تغییر است. این حرکت به کمک سیمها و پولیهای تعبیه شده انجام می شود.



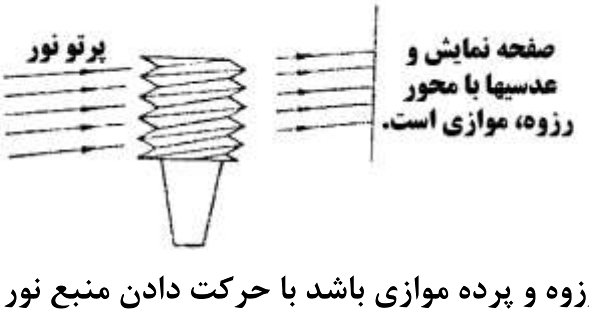
شکل۵-۸) اندازه گیری رزوه یک پیچ که بروی پرده، تصویر شده است.

به این ترتیب تصویر بسیار دقیقی بروی پرده ایجاد می گردد. برای قراردادن پیچ مورد آزمایش در دستگاه، مرغکهایی تعبیه شده است که می توان آنها را از خطوط عمود بر محور نوری منحرف نمود. با این کار از ایجاد تداخل در تصویر حاصل جلوگیری می شود (شکل ۶-۸)



شکل۶-۸) تصویرکردن رزوه پیچ در حالتی که پرتو نور، عمود بر محور روزه است موجب تداخل در تصویر می گردد(a). چرخش رزوه به اندازه زاویه مارپیچ از ایجاد تداخل جلوگیری می کند اما باعث کوتاه شدن گام و بد شکل شدن مقطع رزوه می شود(b).

با چرخاندن رزوه به اندازه زاویه مارپیچ، پرتو نور، موازای روزه خواهد تابید اما در این صورت تصویر ایجاد شده بروی پرده، اندکی کوچکتر از اندازه حقیقی خواهد بود. این مشکل نیز با جابجاکردن محفظه لامپ به اندازه زاویه مارپیچ حل خواهد شد بطوری که پرتو نور برای عبور از رزوه به سمت عدسی چشمی مانعی نخواهد داشت. توجه شود که در این حالت، عدسی و پرده با محور رزوه موازی هستند و در نتیجه اثر کوچک شدن تصویر حذف می گردد (شکل ۷-۸).



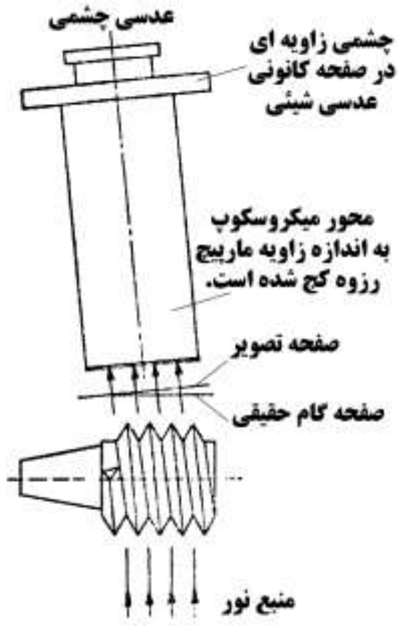
شکل ۷-۸) اگر محور رزوه و پرده موازی باشد با حرکت دادن منبع نور به اندازه زاویه مارپیچ از تداخل جلوگیری می شود. در این حالت تغییر شکل تصویر رزوه به حداقل خواهد رسید.

پس از تشکیل تصویر بروی پرده، جهت اندازه گیری تصویر رزوه از یک نقاله استفاده می شود که بروی لبه پرده نصب شده است. نقاله طوری نصب شده است که به موازات تصویر نوک و ریشه رزوه باشد. با فرض این که نقاله با محور رزوه نیز موازی است می توان از آن برای اندازه گیری تصویر استفاده کرد (شکل ۵-۸).

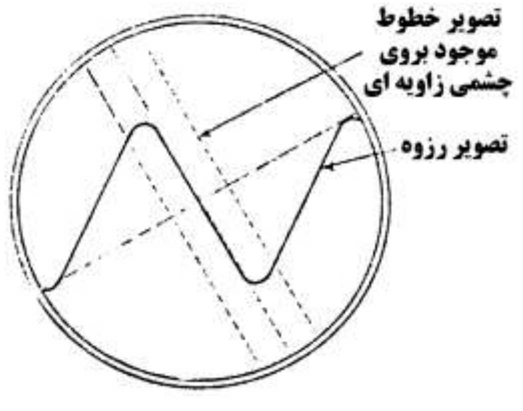
اندازه گیری میکروسکوپی زاویه دندانه

زاویه دندانه رزوه را می توان با یک میکروسکوپ که دارای کله گی زاویه سنج است اندازه گیری کرد. این میکروسکوپ متشکل از یک پرده شیشه ای تمیز است که در صفحه کانونی عدسی چشمی قرار دارد. بروی این پرده شیشه ای خطوط مبنایی حک شده است. ضمناً می توان این پرده را به اندازه ۳۶۰ درجه چرخاند. زاویه چرخش بطور مستقیم تا یک دقیقه و بطور تخمینی تا کسری از یک دقیقه قابل اندازه گیری است. رزوه مورد نظر بروی مرغکهایی نصب و از زیر روشن می گردد. میکروسکوپ در بالای رزوه طوری نصب می شود تا برای قرار گرفتن در امتداد مارپیچ رزوه و جلوگیری از ایجاد تداخل در تصویر بتوان آن را چرخاند. این مطلب در شکل ۸-۸ نشان داده شده است. مرغکها بروی کشویی قرار دارند. در نتیجه می توان مرغکها را به مقدار مساوی و با دقت ۰/۰۰۲ میلی متر به طرف یکدیگر حرکت داد. مرغکها و کشویی نیز بروی یک میز قابل دوران قرار داده شده است. در عمل، میکروسکوپ بروی محور رزوه متمرکز می گردد آنگاه برای جلوگیری از تداخل، میکروسکوپ به اندازه زاویه مارپیچ چرخانده می شود. خطوط مبنا در کله گی میکروسکوپ بروی صفر تنظیم می گردد و میز آن قدر چرخانده می شود تا نوک تصویر رزوه بر خط مبنای افقی منطبق گردد. سپس میز قفل می شود و خطوط مبنا در چشمی میکروسکوپ آن قدر چرخانده می شود تا بر دندانه رزوه منطبق گردند. در این حالت زاویه دندانه از روی درجه بندی چشمی خوانده می شود. قرائتها و تنظیمها را می توان یا به وسیله چشمی میکروسکوپ یا با تشکیل دادن تصویر بروی پرده و مطابق با آنچه در شکل ۹-۸ نشان داده شده است انجام داد. لازم به ذکر است که محور نوری (اپتیکی) بر محور رزوه عمود نیست و در نتیجه ممکن است تغییر شکلهای دیگری نیز در تصویر ایجاد شود. در هر صورت این تکنیک در عین سادگی، نتایج دقیقی دارد. توجه نمایید که میزان خطا در هر دو

ضلع جانبی سمت راست و چپ دندانه رزوه باید تعیین شود چرا که در هر یک از آنها ممکن است تداخل ایجاد شود و هر دو بر قطر مؤثر رزوه تأثیر دارند.



شکل۸-۸) اندازه گیری میکروسکوپی زاویه دندانه

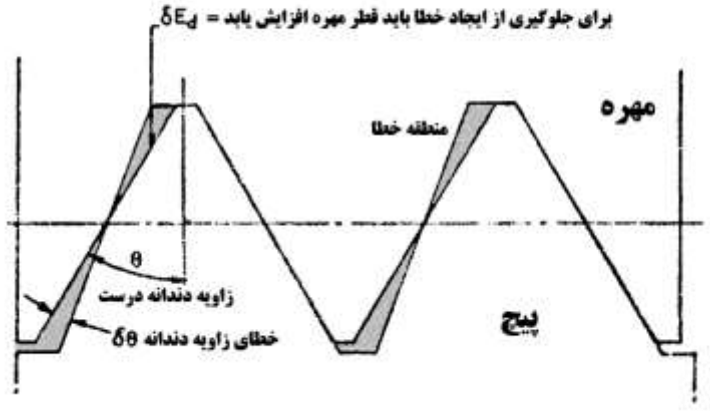


شکل ۹-۸

تأثیر خطای زاویه دندانه

در شکل a-۱۰-۸ یک رزوه با دندانه V شکل را مشاهده می کنید که نوک و ریشه آن تخت است. در این رزوه، گام صحیح می باشد اما در یک پهلو خطایی وجود دارد. اگر خطا مثبت باشد در رزوه، تغییر شکلی مطابق با آنچه که بالای خط گام در شکل a-۱۰-۸ دیده می شود

ایجاد می گردد. اگر خطا منفی باشد تغییر شکل، مطابق با حالتی است که در شکل a-۱۰-۸ زیر خط گام دیده می شود.



شکلa-۱۰-۸) نمایش تغییر شکل رزوه پیچ که در اثر ایجاد خطا در زاویه دندانه (δθ) ایجاد شده است.

برای یک رزوه خارجی اگر بخواهیم از خطا جلوگیری کنیم باید قطر مؤثر را افزایش دهیم. در این صورت نمو قطری لازم δE_d خواهد بود. با بزرگ کردن بخش بالایی یکی از این رزوه ها که در شکل b-۱۰-۸ رسم شده است می توان δE_d را براحتی تعیین کرد. شاید به نظر برسد که نمو قطری $2\delta E_d$ می باشد ولی چنین نیست چرا که وقتی قطر افزایش می یابد یک حرکت محوری تولید می شود (البته در صورتی که ضلعهای جانبی دندانه رزوه که مقابل یک دیگر هستند همچنان با هم تماس داشته باشند). پس افزایش ظاهری، نصف می شود و افزایش خالص در قطر مؤثر δE_d خواهد بود. با توجه به شکلb -۱۰-۸ :

در مثلث EDG :
$$\frac{GD}{ED} = \text{Sin}\theta \quad \Rightarrow \quad ED = \frac{GD}{\text{Sin}\theta}$$

اگر δθ (رادیان) کوچک باشد (AD تقریباً با AC برابر فرض می شود پس در مثلث ADG داریم–م):

$$ED = \frac{GD}{\text{Sin}\theta} \Rightarrow ED = \frac{\delta\theta}{\text{Sin}\theta}.AC$$ و

$$\frac{GD}{AD} = \delta\theta \Rightarrow \frac{GD}{AC} = \delta\theta \Rightarrow GD = AC.\delta\theta$$

ولی در مثلث ABC داریم :

$$\frac{AB}{AC} = \text{Cos}\theta \quad \Rightarrow \quad AC = \frac{AB}{\text{Cos}\theta}$$

اما AB نصف عمق رزوه یعنی نصف h است پس :

$$ED = \frac{\delta\theta}{\text{Sin}\theta} \times AC = \frac{\delta\theta}{\text{Sin}\theta} \times \frac{AB}{\text{Cos}\theta} = \frac{\delta\theta}{\text{Sin}\theta \times \text{Cos}\theta} \times \frac{h}{2} = \frac{h \times \delta\theta}{\text{Sin}2\theta}$$

θ زاویه اسمی دندانه، $\delta\theta$ خطای زاویه دندانه برحسب رادیان و h عمق رزوه بررسی شده تنها در بخش مستقیم دندانه می باشد. با ایجاد تصحیح مشابه در دندانه مقابل خواهیم داشت :

$$\delta E_d = \frac{h}{\text{Sin}2\theta} \times (\delta\theta_1 + \delta\theta_2)$$

$\delta\theta_1$ و $\delta\theta_2$ برحسب رادیان، بیشترین خطای زاویه دندانه راست و چپ می باشند. با استفاده از این معادله برای رزوه ویت ورث می توان مقدار h را برحسب گام مشخص کرد. با توجه به شکل ۱۱-۸ مقدار θ معلوم است (θ=۵۵:۲=۲۷/۵).ضمناً $\delta\theta_1$ و $\delta\theta_2$ از رادیان به درجه تبدیل می شوند. در شکل ۱۱-۸ : در مثلث ABC : $BC = r \times \text{Sin}\theta \Rightarrow \text{Sin}\theta = \frac{BC}{AB}$ و

$$h = 0.6403P - 2r + 2BC$$

از طرفی برای رزوه ویت ورث:

$$r = 0.1373P$$

با جایگزینی θ, r :

$$h = 0.6403P - 2.r + 2.r.\text{Sin}\theta = 0.6403P - 2r \times (1 - \text{Sin}\theta)$$

$$\Rightarrow h = 0.6403P - 0.2746P \times (1 - 0.4617) = 0.4924P$$

اگر این مقدار h در فرمول تغییر قطر مؤثر قرار داده شود خواهیم داشت :

$$\delta E_d = \frac{0.4924P}{\text{Sin}2\theta} \times (\delta\theta_1 + \delta\theta_2)$$

برای رزوه ویت ورث زاویه دندانه $\theta = 27.5^\circ$ اما $\delta\theta_1$ و $\delta\theta_2$ برحسب رادیان هستند و باید به درجه تبدیل شوند :

$$\delta E_d = \frac{0.4924P}{0.8192} \times (\delta\theta_1 + \delta\theta_2) \times \frac{2\pi}{360} \Rightarrow \delta E_d = 0.0105P(\delta\theta_1 + \delta\theta_2)$$

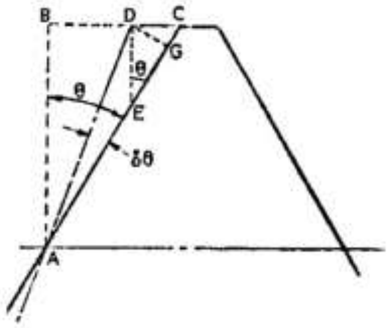
معادلات مشابهی را می توان برای رزوه هایی با شکلهای دیگر به صورت زیر بدست آورد :

برای رزوه های A و B با زاویه ۴۷/۵ درجه : $\delta E_d = 0.0091P(\delta\theta_1 + \delta\theta_2)$

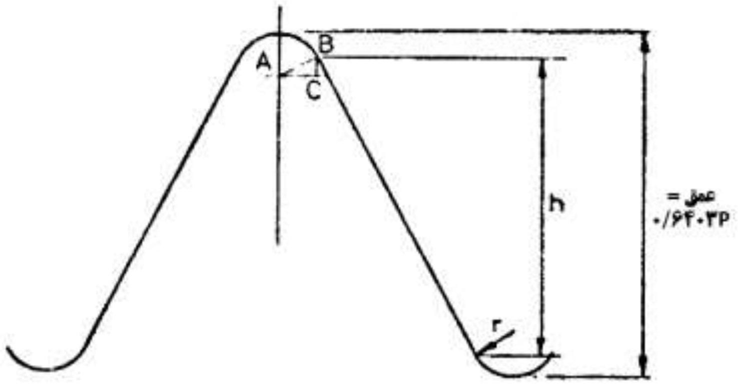
برای رزوه های یونی فای (یکنواخت شده) با زاویه ۶۰ درجه: $\delta E_d = 0.0098P(\delta\theta_1 + \delta\theta_2)$

برای رزوه های متریک با زاویه ۶۰ درجه : $\delta E_d = 0.115P(\delta\theta_1 + \delta\theta_2)$

مقادیر $\delta\theta_1$ و $\delta\theta_2$ خطای زاویه دندانه برحسب درجه و P گام اسمی رزوه مورد اندازه گیری می باشد.



شکل b-۱۰-۸) نمای بزرگ شده رزوه یک پیچ که خطای زاویه دندانه آن $\delta\theta$ می باشد. نمو حقیقی قطر مؤثر δE_d است.



شکل ۱۱-۸) شکل رزوه ویت ورث که در آن $r = 0.1373P$ و $\theta = 27.5^\circ$

خطای گام در رزوه پیچ

اگر رزوه پیچ با ابزار براده برداری تک لبه تولید شود کاهش خطای گام به شرایط زیر بستگی دارد :

۱) نسبت سرعت خطی ابزار و سرعت زاویه ای قطعه کار صحیح باشد. ۲) این نسبت ثابت باشد.

اگر این دو شرط برقرار نباشد خطای گام پدیدار می شود. نوع خطا بستگی به این دارد که کدام یک از دو شرط فوق برقرار نشده است. خطای گام، موجب می گردد که طول درگیری رزوه بیش از حد بزرگ یا کوچک شود. به این خطا، خطای کلی (ترکیبی) گام می گویند و می توان آن را از دو طریق معین کرد :

۱) اندازه گیری خطای هر روزه از پیچ و اضافه کردن جبری آنها به یکدیگر (با توجه به علامت هر خطا)

۲) اندازه گیری کل طول رزوه پیچ (از یک مبدأ مناسب) و کم کردن آن از مقدار اسمی (طول کل روزه پیچهایی که خطای گام δPدارند، $np+\delta p$ است. شکل a-۱۴-۸-م)

انواع خطای گام

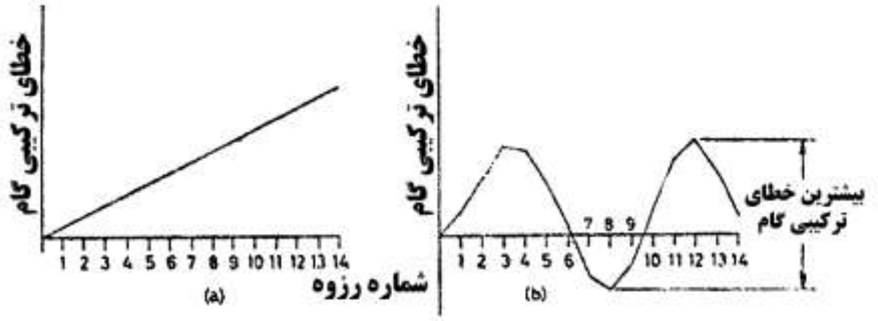
خطای گام پیشرفت کننده

زمانی اتفاق می افتد که نسبت سرعت ابزار و قطعه کار، ثابت اما نادرست است. این خطا ممکن است در اثر نصب مجموعه ای از چرخ دنده های نادرست بین محور نگاه دارنده قطعه کار و پیچ راهنمای ماشین ابزار بوجود آید. مثلاً اگر یک رزوه متریک بدون استفاده از چرخ دنده مبدل (جهت تبدیل سیستم اینچی به متریک یا برعکس) و با یک پیچ راهنمای اینچی تولید گردد خطای گام پیشرفت کننده بوجود می آید. بطور کلی خطای گام پیشرفت کننده در اثر وجود خطای گام در پیچ راهنمای ماشین تراش یا ماشینهای دیگر ایجاد می گردد. اگر به فرض، خطای گام در یک رزوه δPباشد خطای کل گام در سرتاسر رزوه $n\times\delta p$ خواهد بود که n تعداد رزوه های تحت بررسی از پیچ است. بنابراین نمودار خطای کل (ترکیبی) گام برحسب طول رزوه، یک خط مستقیم خواهد بود (شکل ۱۲-۸ قسمت a).

خطای گام دوره ای (پریودی)

این نوع خطا زمانی اتفاق می افتد که نسبت سرعت ابزار و قطعه کار، ثابت نباشد. این خطا ممکن است در اثر وجود خطای گام در چرخ دنده های موجود بین محور نگاه دارنده قطعه کار و پیچ راهنما یا وجود حرکت محوری در پیچ راهنما (که به علت فرسودگی سطوح پیشران

پدید می آید) تولید گردد. این قبیل حرکتها بر حرکت طبیعی ابزار تحمیل و بروی قطعه کار ظاهر می گردد. روشن است که خطاهایی از این دست، دوره ای هستند یعنی گام، بین بیشترین و کمترین مقدار در نوسان خواهد بود. نمودار خطای دوره ای بطور تقریبی یک نمودار سینوسی می باشد (شکل ۱۲-۸ قسمت b). خطای کل (ترکیبی) گام، مقدار پیک تا پیک این نمودار است.



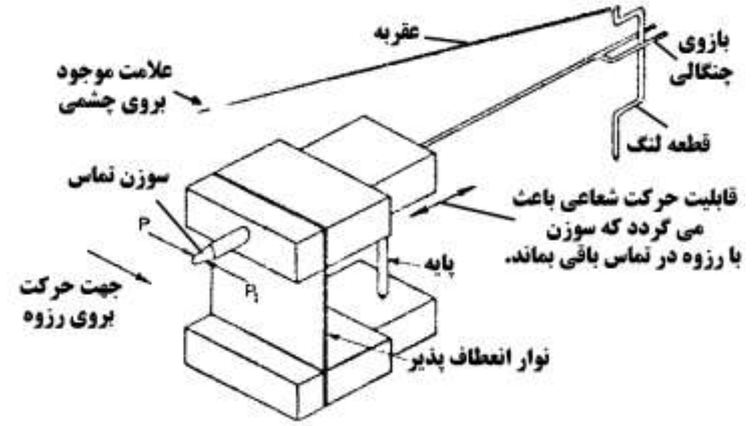
شکل ۱۲-۸) خطای گام پیشرفت کننده(a) خطای گام دوره ای(b)

خطای مارپیچ رزوه(Thread Drunkenness)

حالت خاصی از خطای گام دوره ای است که در فواصلی به اندازه یک گام ظاهر می گردد. این به آن معنی است که مقدار گام، هنگامی که به موازات محور رزوه اندازه گیری می شود همواره صحیح خواهد بود. علت بوجود آمدن این خطا درست تراشیده نشدن مارپیچ رزوه است. در این صورت، گسترده مارپیچ رزوه، یک منحنی خواهد بود نه یک خط مستقیم. تعیین این خطا بسیار مشکل است و البته جز در پیچهای بزرگ، اثر چندانی بر رزوه نخواهد داشت.

اندازه گیری خطای گام

قطع نظر از خطای ذکرشده در بخش قبل (بخش ۳-۱-۵-۸) خطای گام را می توان با بکارگیری یک ماشین اندازه گیری گام تعیین کرد. این ماشین که در لابراتوار ملی فیزیک طراحی شده است در شکل ۱۳-۸ بطور مختصر مشاهده می گردد.



شکل ۱۳-۸) بکارگیری یک ساعت اندازه گیری (اندیکاتور) ثابت در ماشین اندازه گیری گام

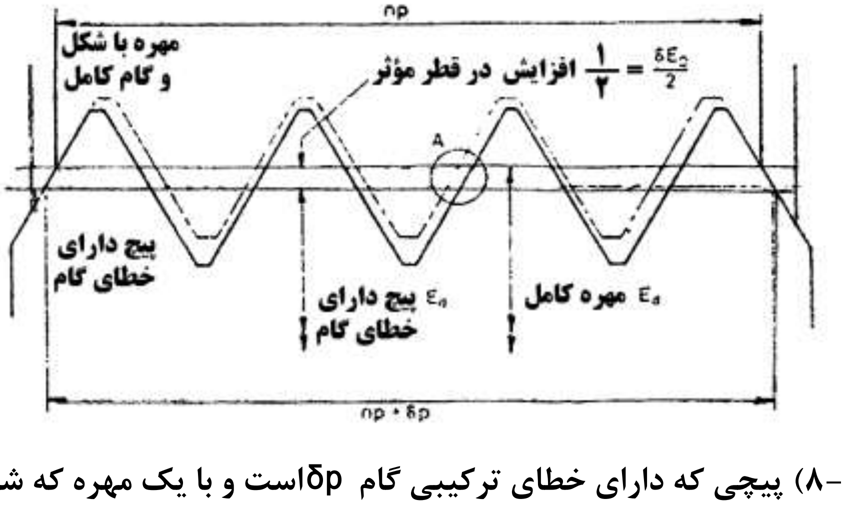
دستگاه دارای سوزنی با نوک گرد است که تقریباً در خط گام با رزوه ها درگیر می شود و در اثر این درگیری، عقربه یک ساعت اندازه گیری (اندیکاتور) ثابت بکار می افتد. رزوه در راستای محور خود نسبت به سوزن حرکت می کند و سوزن توسط یک میکرومتر بروی نوک رزوه ها قرار می گیرد. هر وقت که عقربه ساعت اندازه گیری از مقابل نشانه ثابت جابجا شود، عددی را که میکرومتر نشان می دهد ثبت می گردد. مکانیزم این دستگاه در عین سادگی بسیار جالب است. سوزن دستگاه بروی بلوکی قرار دارد. بلوک سوزن از طریق یک پایه و یک نوار فلزی باریک بروی بلوک دیگری تکیه داده شده است. بنابراین سوزن می تواند با حرکت موازی پایه و نوار، بروی رزوه ها عقب و جلو برود. وقتی سوزن در بین رزوه ها قرار می گیرد و رزوه ها حرکت داده می شود از طرف ضلع جانبی رزوه ها که در طرفین سوزن قرار دارند دو فشار P و P_1 به سوزن اعمال می گردد. اگر این دو فشار با هم برابر نباشد نوار پیچ می خورد و بلوک را حول پایه دوران می دهد. در نتیجه بازوی چنگالی شکل با حرکت دادن قطعه لنگ متصل به عقربه، عقربه را می چرخاند. عقربه تنها زمانی در مقابل نشانه ثابت باقی می ماند که فشار P و P_1 برابر باشند. از آن جا که ممکن است در میکرومتر دستگاه نیز خطایی وجود داشته باشد از یک میله تصحیح بادامکی شکل برای رفع این خطا استفاده می گردد. با توجه و دقت کافی در حین کار می توان به دقتهایی تا ۰/۰۰۲ میلی متر نیز دست یافت.

اگر بخواهیم گام را از یک روزه تا رزوه دیگر تعیین نماییم کافی است هر قرائت میکرومتر از قرائت بعدی کم شود. در بیشتر موارد خطای کل (ترکیبی) گام تعیین می گردد. برای این کار،

قرائتهای میکرومتر ثبت و از مقدار قرائت پیش بینی شده کسر می شوند. اگر محور رزوه های پیچ مورد بررسی با محور مرغکهایی که پیچ بروی آنها سوار شده است منطبق نباشد اندازه گیری تکرار می گردد اما در مرحله دوم، پیچ به اندازه ۱۸۰ درجه چرخانده می شوند. در این صورت میانگین دو قرائت بدست آمده (که معمولاً بصورت گرافیکی معین می شود) به عنوان خطای گام منظور می گردد.

اثر خطای گام

اگر رزوه ای خطای گام داشته باشد تنها داخل مهره ای می شود که شکل و گامی مشابه با رزوه دارد ولی خارج از اندازه ساخته شده است. این مطلب هم برای خطای گام مثبت و هم برای خطای گام منفی صادق است. پس اگر در یک سنجه توپی رزوه، خطای گام وجود داشته باشد سنجه، قطعه کار را رد می کند. در شکل a-۱۴-۸ پیچی را مشاهده می کنید که تعدادی از روزه های آن دارای خطای ترکیبی گام به اندازه δP می باشد یعنی طول آن $np+\delta p$ است. اگر این رزوه با مهره ای که شکل و گام کاملی دارد درگیر شود این درگیری بصورتی که در شکل a-۱۴-۸ نشان داده شده است خواهد بود.



شکل a-۱۴-۸) پیچی که دارای خطای ترکیبی گام δpاست و با یک مهره که شکل و گام کامل دارد درگیر شده است.

با توجه به بخش A (که در شکل b-۱۴-۸ بزرگ شده است-م) داریم :

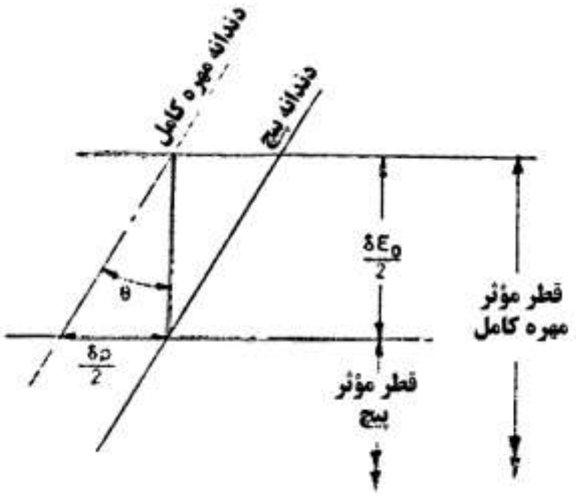
$$tg\theta = \frac{\frac{\delta p}{2}}{\frac{\delta E_d}{2}} = \frac{\delta p}{\delta E_d} \quad \Rightarrow \quad \delta E_d = \delta p.Cogt\theta$$

δp خطای ترکیبی گام در طول درگیر شده و δE_d مقدار افزایش لازم در قطر مؤثر برای جبران این خطا می باشد. این مطلب به خصوص هنگامی که یک رزوه ویت ورث بررسی می شود بسیار اهمیت دارد. در روزه ویت ورث، نصف زاویه دندانه (θ) ۲۷/۵ درجه و $Cotg27.5=1.92$ می باشد.

در نتیجه برای رزوه های ویت ورث : $\delta E_d = 1.92 \times \delta p$

و برای رزوه های متریک : $\delta E_d = 1.732 \times \delta p$

پس در یک رزوه ویت ورث، افزایش قطر مؤثر، تقریباً دو برابر (۱/۹۲ برابر-م) خطای گام است. به این ترتیب سنجه توپی رزوه ویت ورث که خطای ترکیبی گام ۰/۰۰۶ میلی متر دارد تمام مهره های ویت ورث که قطر مؤثر آنها حدوداً ۰/۰۱۲ میلی متر (۱/۹۲×۰/۰۰۶) بیشتر از حد پایینی سنجه است را رد می کند. همچنین سنجه توپی رزوه متریک که خطای ترکیبی گام ۰/۰۰۶ میلی متر دارد تمام مهره های متریک که قطر مؤثر آنها ۰/۰۱ میلی متر (۱/۷۳۲×۰/۰۰۶) بیشتر از حد پایینی سنجه می باشند را رد می کند.



شکل b-۱۴-۸) نمای بزرگ شده A در شکل a-۱۴-۸

اندازه گیری قطر مؤثر ساده (Effective Diameter)

قطر مؤثر ساده پیچ (قطر متوسط-م)، قطر استوانه فرضی هم محور با محور رزوه است و دندانه های رزوه را طوری قطع می کند که فاصله بین هر جفت ضلع دندانه، نصف گام باشد. این

موضوع در شکل ۱۵-۸ نشان داده شده است. اندازه گیری قطر مؤثر با ماشینی که در بخش ۲-۸ شرح داده شد انجام می گردد. اما در اینجا منشورها با مفتولهای فولادی یا استوانه هایی با ابعاد معین جایگزین می شوند. معمولاً بیشتر کارخانه های تولید کننده تجهیزات اندازه گیری، این قطعات را میزان (کالیبره) و به بازار عرضه می نمایند.

به مانند روشی که در قطر فرعی بکار گرفته شد (شکل ۳-۸-م) در اینجا نیز دو قرائت انجام می شود. ابتدا بوسیله مفتولهایی که مناسبترین قطر را دارند یک قرائت از استوانه تنظیم بدست می آید(Rc-م). سپس در مرحله بعدی این مفتولها با رزوه مورد نظر درگیر شده مانند حالت قبل بوسیله میکرومتر قرائت دیگری (Rt-م) حاصل می گردد (پس قطر متوسط حاصل از اندازه گیری، Dc+(Rt-Rc) خواهد بود-م). توجه کنید که اختلاف بین این دو قرائت با اختلاف بین قطر استوانه تنظیم و فاصله T برابر است (Dc-T=Rc-Rt -م). شکل هندسی ۱۵-۸ این مطلب را بطور واضح نشان می دهد. از این شکل جهت بدست آوردن معادله مورد نیاز برای محاسبه قطر مؤثر ساده استفاده می شود :

$$E_d = T + 2x$$

در مثلث ABC داریم : $tg\theta = \frac{BC}{AB} \Rightarrow AB = BC.Cotg\theta$

با توجه به تعریف قطر مؤثر :گام × $BC = \frac{1}{4}$

در نتیجه :(۱) $AB = \frac{P}{4}.Cotg\theta$

در مثلث ADE داریم $Sin\theta = \frac{DE}{AE}$ پس : $AE = \frac{d}{2}Cosec\theta$

حالا :

$$x = AB - AF \qquad (۳)$$

$AF = AE - EF$ و EF نیز مساوی است با $\frac{d}{2}$ پس :

$$AF = \frac{d}{2}Cosec\theta - \frac{d}{2} \Rightarrow AF = \frac{d}{2}(Coec\ \theta - 1) \qquad (۲)$$

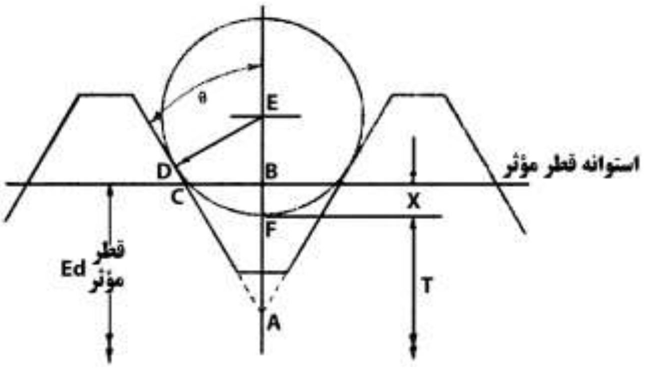
با قراردادن معادلات ۱ و ۲ در معادله ۳ برای یافتن x داریم :

$$x = \frac{p}{4}Cotg\theta - \frac{d}{2}(Cosec\ \theta - 1)$$

جمله 2x برای هر رزوه معین ثابت است :

$$P' = 2x = \frac{P}{2}\text{Cotg}\,\theta - (\text{Cosec}\ \theta - 1)\cdot d \quad \text{و} \quad E_d = T + P'$$

P' گام اسمی، d قطر مفتول و θ نصف زاویه دندانه رزوه می باشد (طبیعی است که در این روش، برای محاسبه قطر متوسط باید مقدار T برای هر مفتول مشخص باشد. به این ترتیب می توان مقدار محاسبه شده را با مقدار اندازه گیری شده مقایسه نمود-م).

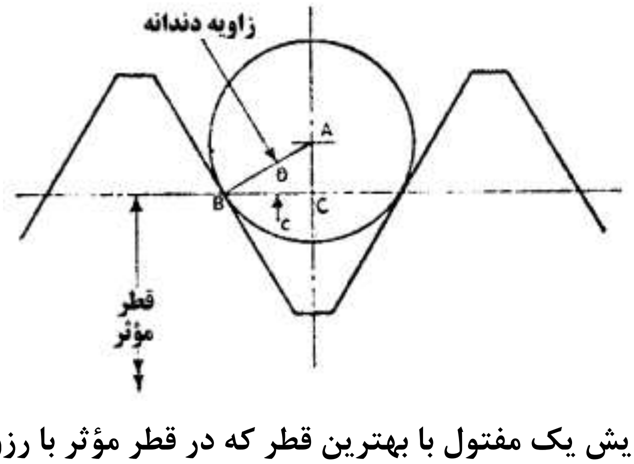


شکل ۱۵-۸) محاسبه قطر مؤثر ساده

محاسبه بهترین قطر برای مفتول

معمولاً وقتی مفتولهای اندازه گیری خریداری می شود برای یک رزوه معین باید مفتول با بهترین قطر انتخاب گردد. اگر چنین مفتولی موجود نباشد بهتر است که آن را بسازیم و مفتولهایی با قطر دیگر بکار نبریم چرا که در این صورت، خطای ناشی از زاویه دامنه، خطای قطری بزرگی پدید می آورد. در شکل ۱۶-۸، AB نصف قطر مفتول و BC ربع گام است (پس در مثلث ABC داریم-م) :

$$\text{Cos}\theta = \frac{BC}{AB} \Rightarrow AB = \frac{BC}{\text{Cos}\theta} \Rightarrow \frac{d}{2} = \frac{P}{4\text{Cos}\theta} \Rightarrow d = \frac{P}{2\text{Cos}\theta}$$



شکل ۱۶-۸) نمایش یک مفتول با بهترین قطر که در قطر مؤثر با رزوه تماس دارد.

به این ترتیب برای تعیین قطر مؤثر، روش آسانی بدست می آید. البته زمانی که مفتول با گام مؤثر به مقدار بسیار کوچکی تماس دارد (مفتول به مقدار کمی در قطر مؤثر قرار گیرد یا اصلاً قطر مؤثر را قطع نکند) نباید از این روش استفاده کرد چرا که تغییر قابل ملاحظه ای در مقدار اندازه گیری شده ایجاد می گردد.

اندازه گیری قطر مؤثر با مفتولها

اگر ماشین اندازه گیری موجود نباشد می توان برای تعیین قطر مؤثر از سه مفتول فولادی استفاده کرد. (روش بهتر که در شکل ۱۷-۸ نشان داده شده است استفاده از سنجه های O-Veeمی باشد). اگر اندازه T_1 ($T_1 = T + 2d$ اندازه پشت تا پشت مفتولها در حالی که بروی رزوه هستند) معین باشد آنگاه :

$$E_d = T + P' = T_1 + P_1 \ , \ P_1 = P' - 2d = \frac{p}{2} Cotg \ \theta - d(Cosec \quad \theta - 1) - 2d$$

$$= \frac{P}{2} Cotg\theta - d \times (Cosec \quad \theta + 1)$$

پس :

$$E_d = T_1 + \frac{P}{2} Cotg\theta - d \times (Cosec \quad \theta + 1)$$

(مثلا برای رزوه متریک ۶۰ درجه که θ=۳۰ داریم : $E_d = T_1 + 0.866 \times P - 3 \times d$ –م)

مقایسه
مقدار قرائت شده را با حدود موجود بروی صفحه داده های سنجه بررسی نمایید.

اندازه گیری
به کمک حلقه های سنجه، از روی رزوه قرائتی بدست می آید.

قرار دادن رزوه
با فشار دادن اهرم منبسط کننده، حلقه سنجه را باز کنید و رزوه را درون آن قرار دهید. از مالش سنجه بروی رزوه جلوگیری کنید.

شکل ۱۷-۸) استفاده از سنجه های فنری O-Vee
(با اجازه چاپ از شرکت سنجه های فنریO-Vee)

تصحیح خطای کج شدگی و تغییر شکل الاستیک

فرمول قطر مؤثر در بخش ۶-۸ با این فرض بدست آمد که اندازه گیری در یک مقطع صفحه ای از رزوه و به موازات محور رزوه انجام شده است. اما در عمل، اندازه گیری بروی یک مارپیچ موجب می گردد مقدار اندازه گیری شده به اندازه C افزایش یابد (مارپیچ رزوه ها باعث می شود تا مفتولهای اندازه گیری، اندکی جابجا شوند و در نتیجه مقدار اندازه گیری افزایش یابد). از طرفی فشار اندازه گیری در نقاط تماس، موجب می شود مفتولها و دندانه رزوه، تغییر شکل الاستیک داشته باشند و در نتیجه مقدار مورد اندازه گیری به اندازه e کاهش می یابد. به این ترتیب مقدار صحیح قطر مؤثر با کاربرد مقادیر C- و e+ حاصل می گردد یعنی :

$$E_d = T + P' - C + e$$

از آنجا که دو مقدار C و e معمولاً خیلی کوچک هستند و علامت آنها نیز مخالف هم می باشد اثر نهایی آنها بسیار کوچک است. پس می توان این مقادیر را در نظر نگرفت. البته در اندازه گیری سنجه های مرجع این مقادیر باید محاسبه شوند. در این مورد خوانندگان به توضیحات لابراتوار ملی فیزیک در کتاب علم کاربردی II (اندازه گیری رزوه های پیچ) ارجاع داده می شوند.

قطر مؤثر ظاهری

از بخشهای ۴-۸ و ۵-۸ نتیجه شد که خطای زاویه دامنه و خطای گام در یک سنجه توپی برای رزوه خارجی موجب می شوند قطر مؤثر بطور ظاهری افزایش یابد. بنابراین قطر مؤثر ظاهری (برای رزوه خارجی یا پیچ-م) به این صورت تعریف می گردد : قطر مؤثر کوچکترین مهره با گام و شکل کامل که پیچ می تواند داخل آن بشود. این پارامتر از ابعاد مهم و اساسی سنجه توپی پیچ می باشد و می توان آن را با اضافه کردن یک مقدار عددی به قطر مؤثر ساده بدست آورد. این مقدار عددی به بزرگی خطای گام و خطای زاویه دندانه بستگی دارد :

قطر مؤثر ظاهری = قطر مؤثر ساده $+K_1.P(\delta\theta_1+\delta\theta_2)+\delta P.\mathrm{Cotg}\theta$

K_1 مقدار ثابتی وابسته به شکل رزوه، P گام رزوه، θ نصف زاویه دندانه رزوه و δP خطای گام در طولی از پیچ که درگیر است می باشد. برای یک رزوه ویت ورث :

قطر مؤثر ظاهری =قطر مؤثر ساده+ $0.0105P(\delta\theta_1+\delta\theta_2)+1.920\delta P$

برای یک رزوه یونی فای (یک نواخت) :

قطر مؤثر ظاهری =قطر مؤثر ساده + $0.0098P(\delta\theta_1+\delta\theta_2)+1.73\delta P$

و برای یک رزوه متریک :

قطر مؤثر ظاهری =قطر مؤثر ساده + $0.0115P(\delta\theta_1+\delta\theta_2)+1.732\delta P$

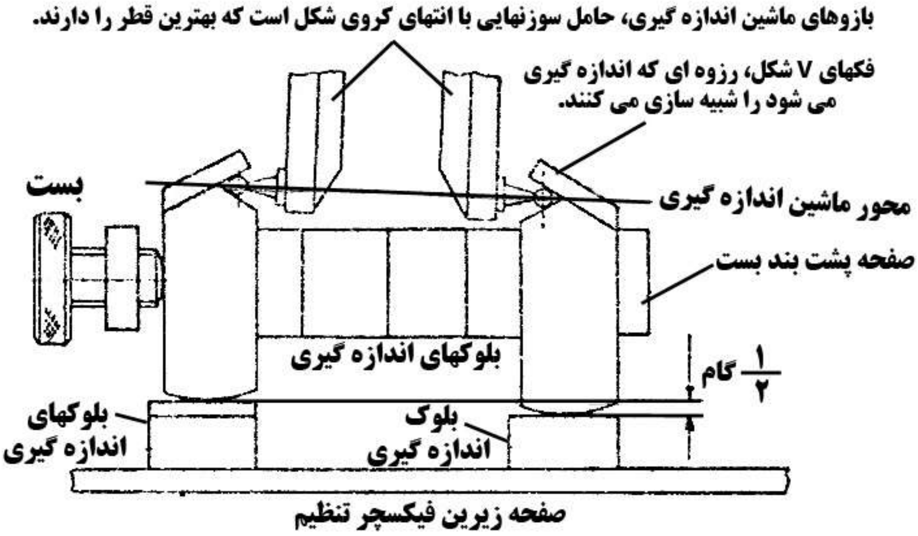
اندازه گیری سنجه های حلقه ای پیچ

روشهای اندازه گیری سنجه های حلقه ای پیچ بطور کلی همان روشهای اندازه گیری سنجه های توپی می باشد. مشکلی که در اینجا وجود دارد خارج از دسترس بودن شکل و ابعاد رزوه ها است. گام با یک ماشین اندازه گیری گام پیچ که برای قرار گرفتن بروی رزوه ها از متعلقات خاصی مانند محوری شبیه یک میله بورینگ استفاده می کند اندازه گیری می گردد. زاویه دندانه را نیز می توان با ساختن یک قالب گچی از رزوه اندازه گیری نمود. ضخامت این قالب باید کوچکتر از نصف قطر رزوه باشد تا بتوان آن را به طرف خارج، از رزوه ها بیرون آورد (اگر به طرف خارج پیچانده شود قالب خراب می شود). این قالب از راههای گفته شده تصویر و بررسی می گردد. قطر مؤثر ساده با کاربرد سوزنهایی که در انتهای آنها ساچمه هایی با مناسبترین قطر وصل شده است در یک ماشین اندازه گیری، معین می شود. ماشین اندازه گیری را می تون با یک سنجه مرجع V شکل تنظیم کرد (این سنجه ها طوری ساخته شده اند که قطر مؤثر آنها مقدار اسمی قطر مؤثر رزوه های مورد اندازه گیری می باشد).

البته این روشها ممکن است تنها برای رزوه های بسیار بزرگ قابل کاربرد باشد. معمولاً برای سنجه های حلقه ای پیچ بسیار کوچک، سنجه های توپی پیچ مرجع بسیار دقیق ساخته می شود. این سنجه ها تلرانسهای اندازه گیری بسیار مختلف دارند و به دو شکل برو و نرو ساخته می شوند.

در پایان لازم به ذکر است که اثر خطای گام و خطای زاویه دندانه در یک سنجه حلقه ای رزوه، منفی است یعنی این خطاها تمایل دارند که قطر مؤثر ساده را کاهش دهند (برخلاف سنجه

توپی-م). در این حالت برای تصحیح این خطاها مقادیر تصحیح باید از اندازه بدست آمده کم شود.



شکل ۱۸-۸) تنظیم ماشین اندازه گیری برای تعیین قطر مؤثر ساده یک پیچ داخلی

(توجه شود که فکهای V شکل به اندازه نصف گام بالا آمده اند و حالت شناوری ایجاد شده اجازه می دهد تا بست به وضعیتی که رزوه تحت آن وضعیت نصب شده است جابجا شود.)

فصل نهم

اندازه گیری پرداخت سطح

(Measurement of Surface Finish)

مقدمه

توسعه تکنولوژی مدرن تنها به منظور کنترل دقت ابعادی نیست بلکه برای اصلاح ترکیب و بافت سطوح (کار شده یا کار نشده) قطعه کار نیز مورد نیاز است. سه مطلب اساسی که باعث می شوند تا کنترل بافت سطح اهمیت پیدا کند عبارتند از :

۱-عمر خستگی

۲-خواص یاتاقانی

۳- فرسودگی

عمر خستگی

اگر قطعه کاری تحت تنشهای برگشتی مکرر قرار گیرد می گویند جسم تحت خستگی است. در این حالت، عمر قطعه کار بطور قابل ملاحظه ای از زمانی که تحت بار ثابت معادلی قرار داشته باشد کمتر است. به نظر می رسد که نقص حاصل از خستگی همواره از یک گوشه تیز جسم که تمرکز تنش در آن جا بیشتر است شروع می شود.

خواص یاتاقانی

یک سطح کامل یعنی سطحی بدون هیچ بی نظمی (سطح صاف) نمی تواند لایه روغن را بروی خود نگاه دارد و در نتیجه تماس فلز با فلز پدید می آید. بهترین سطح برای یک یاتاقان، سطح شکل ۱-۹ قسمت b می باشد چرا که فرورفتگی های کوچک آن، قطرات روغن را بروی سطح حفظ می کند و تماس فلز با فلز برقرار نمی گردد.

فرسایش

در فیزیک، قانون مشهوری وجود دارد که می گوید اصطکاک به مساحت سطح تماس بستگی ندارد. اما میزان فرسایش، به مساحت تماس بستگی دارد (مساحت بزرگتر، نیروی کمتر در واحد سطح و در نتیجه میزان فرسودگی کمتر).

معنی بافت سطح

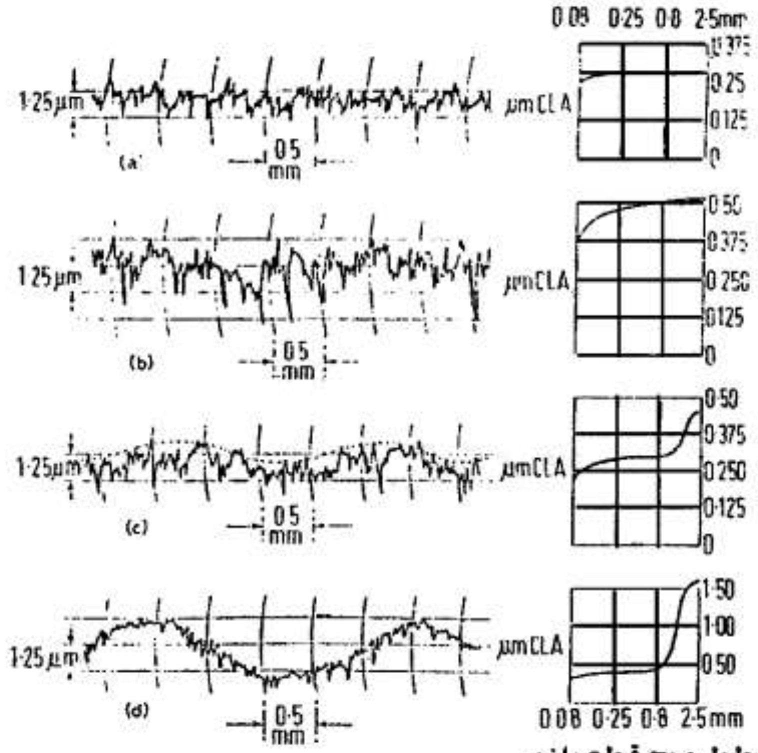
قبل از این که چیزی اندازه گیری شود لازم است که چگونه اندازه گرفتن آن تعریف گردد. این کار در مورد بافت سطح چندان آسان نیست. یک سطح ممکن است زبر باشد یا موج داشته باشد. موج واری، خطای ناشی از هندسه نادرست فرآیند تولید سطح است و معمولاً خارج از مبحث بافت سطح بررسی می گردد. اما زبری، بی نظمیهای موجود بروی یک سطح است که معمولاً نتیجه اجتناب ناپذیری از فرآیندی است که در یک ماشین، حتی با هندسه تولید کاملاً صحیح بوجود می آید. با بررسی نیازهای یک فرآیند براده برداری برای تولید یک قطعه کار استوانه ای شکل می توان نحوه تولید زبری و موج بروی یک قطعه کار ماشین کاری شده را کاملاً درک نمود. روشن است که در تولید این استوانه، ابزار باید موازی محور چرخش قطعه کار حرکت کند. همچنین راستای قطعه کار نیز باید نسبت به ابزار موقعیت صحیحی داشته باشد. مثلاً اگر در ماشین تراش یکی از مرغکها بالاتر از دیگری قرار گیرد سطح ماسوره ای شکلی (هیپربولیکی) تولید خواهد شد. همچنین اگر مسیر حرکت ابزار، خط مستقیم نباشد موجهای کوتاهی در طول منحنی موج ایجاد می گردد. بنابراین می توان چهار نوع بی نظمی که در نهایت موجب می شود استوانه ای با شکل نادرست تولید گردد را ذکر نمود :

موج واری:
- **a) در اثر ناراستایی مرغکها**
- **b) حرکت غیرخطی پیشروی**

زبری:
- **c) در اثر سرعت پیشروی**
- **d) در اثر لرزش ابزار**

برای این که در یک قطعه کار تنها مسئله زبری بررسی شود باید اندازه گیری را در طولی از سطح متمرکز کنیم که طول موجهای بزرگ در آن موجود نباشد. بزرگترین طول موج قابل بررسی، طول موج قطع (Cut Off) نامیده می شود. در انگلستان، استاندارد B.S. ۱۳۴ بکار می رود که سه طول موج ۰/۲۵ و ۰/۸ و ۲/۵ میلی متر را به عنوان بزرگترین طول موج قابل بررسی پیشنهاد می دهد. انتخاب هر یک از این مقادیر به سطح مورد بررسی بستگی دارد. اگر سطحی موج نداشته باشد در تمام قطعه کار، سطح پرداخت یکسانی برای طول مورد نظر بدست می آید (شکل a-۱-۹). با افزایش موج واری به تدریج به طول موج قطع خواهیم رسید

(شکل ۱-۹ قسمت های a,b,c). در شکل ۱-۹ نمونه هایی دیده می شود که با ایجاد ارتعاشهای متفاوت سنگ زده شده اند. قانون کلی برای سطح تولید شده به وسیله ابزار تک لبه وجود دارد که می گوید طول موج قطع نباید از مقدار پیشروی بیشتر باشد.

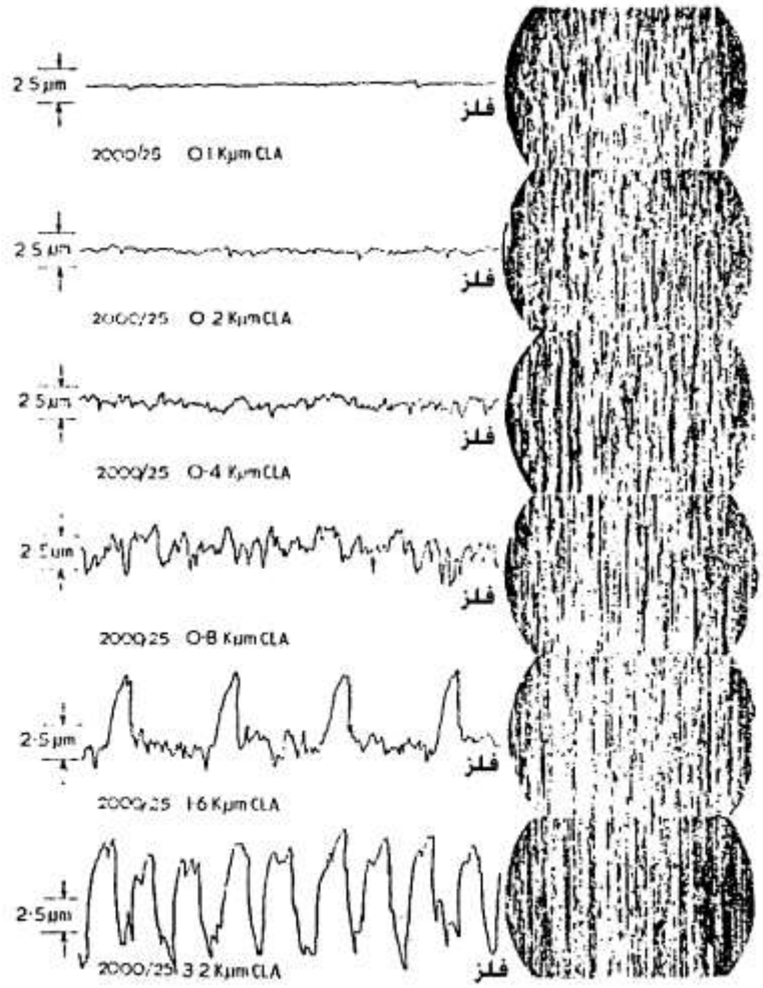


شکل ۱-۹) تأثیر طول موج قطع بر ارزیابی عددی سطح پرداخت شده

روشهای اندازه گیری پرداخت سطح

روشهای اندازه گیری پرداخت سطح به دو گروه اندازه گیری غیرمستقیم (مقایسه ای) و مستقیم، قابل تقسیم است. در روشهای غیر مستقیم یا مقایسه ای، بافت سطح با بازرسی چشمی یا لمس سطح، ارزیابی می شود. مقایسه باید بین سطوحی انجام گردد که از یک روش تولید شده اند چرا که در غیر این صورت نتایج حاصل گمراه کننده خواهد بود (مثلاً سطح فرزکاری شده با سطح فرزکاری شده مقایسه گردد). در بررسی چشمی یک سطح تنها نوع خراشیدگی آن تعیین می گردد اما عمق خراشیدگی مشخص نمی شود. در شکل ۲-۹ بروی

شش سطح مختلف یک بررسی میکروسکوپی انجام و نمودار خراشیدگی آنها نمایش داده شده است. با وجود آن که ظاهر سطوح مشابه است اما نمودار آنها متفاوت می باشد. در این شکل پیشوند k مشخص می کند که طول موج قطع بکار رفته ۰/۸ میلی متر است. لمس کردن سطح برای ارزیابی بافت آن احتمالاً بهتر از مشاهده چشمی سطح است ولی لمس سطح نیز می تواند گمراه کننده باشد.



شکل(۲-۹) سطوحی با ظاهر مشابه که نمودار خراشیدگی مختلفی دارند.

روشهای اندازه گیری مستقیم به این جهت توسعه یافته اند که بوسیله آنها می توان برای پرداخت سطح، مقدار عددی ارائه داد. اندازه گیری مستقیم عموماً بوسیله دستگاه های میل سوزنی و همچنین روشهای تداخل سنجی (که بخصوص برای سطوح منعکس کننده نور مناسب است) انجام می شود.

دستگاه های میل سوزنی

این وسایل معمولاً از واحدهای زیر تشکیل شده است :

۱) کفشک که به آهستگی حرکت و اطلاعات سطح را جمع آوری می کند.

۲) سوزن که به صورت عمودی به کفشک متصل است و بروی سطح حرکت می کند.

۳) تقویت کننده (برای تقویت حرکت سوزن)

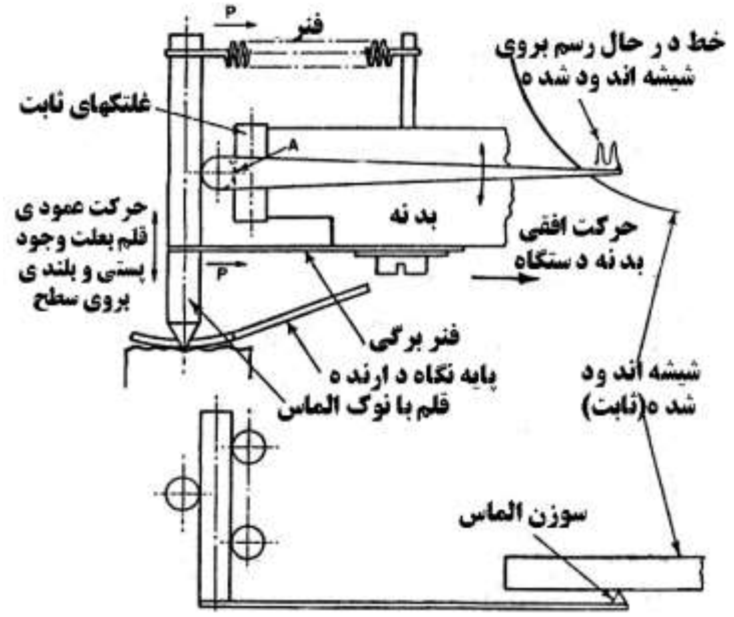
۴) ثبت کننده (برای رسم طرح مقطع طولی (پروفیل) سطح)

۵) تحلیل کننده مقطع طولی (پروفیل) سطح

توجه : میزان بزرگنمایی نمودار خراشیدگی باید درست انتخاب گردد. به عنوان مثال اگر طول ۰/۸ میلی متر، ۵۰۰۰ بار بزرگ شود برای رسم نمودار خراشیدگی آن یک کاغذ ۴ متری نیاز است. بزرگنمایی دستگاه را می توان یا به صورت مکانیکی یا بصورت الکتریکی انجام داد.

سطح سنج تاملینسون (Tomlinson)

این دستگاه که در آزمایشگاه ملی فیزیک و بوسیله دکتر تاملینسون طراحی شده است از بزرگ نمایی مکانیکی- نوری استفاده می کند. طرح کلی این دستگاه در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. کفشک به بدنه دستگاه وصل می شود. برای این که بتوان نوک سوزن را موقعیت دهی کرد کفشک طوری ساخته شده است که ارتفاع آن قابل تنظیم باشد. بوسیله یک فنر برگی و یک فنر مارپیچ از حرکت سوزن جز در راستای عمودی جلوگیری شده است. کشش در فنر مارپیچ P موجب می شود کششی مشابه در فنر برگی ایجاد گردد. نیروهای حاصل، غلتک عرضی را در موقعیتی بین سوزن و یک جفت غلتک موازی، ثابت نگاه می دارند (شکل ۳-۹).

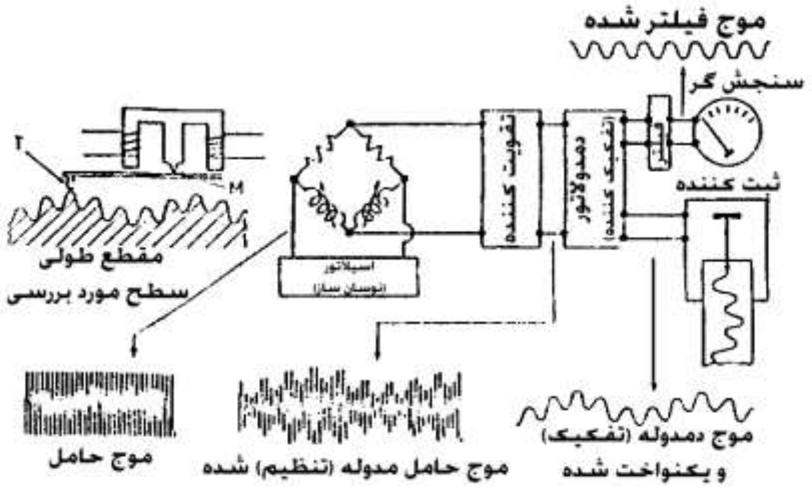


شکل ۳-۹ سطح سنج تاملینسون

به غلتک عرضی، یک بازوی فولادی و فنری سبک متصل شده است و در نوک این بازو تکه ای الماس قرار دارد. این الماس بروی یک پرده شیشه ای اندود شده (مثلاً با دوده) حرکت و نموداری را ترسیم می نماید. دستگاه بوسیله پیچی که با یک موتور الکتریکی سنکرون با سرعت ۱ دور در دقیقه چرخانده می شود به آهستگی تمام سطح مورد آزمایش را طی می کند (پرده شیشه ای ثابت باقی می ماند). بی نظمی موجود در سطح، سوزن را بصورت عمودی حرکت می دهد. سوزن، غلتک عرضی را حول محور A دوران می دهد و در نتیجه، حرکت نوک الماس بازوی متصل به غلتک عرضی تقویت می شود. این حرکت (که در ارتباط با حرکت افقی دستگاه می باشد) بروی سطح شیشه، نموداری رسم می کند. برای رسم این نمودار، حرکت عمودی سوزن ۱۰۰ برابر بزرگ شده است ولی در راستای افقی هیچ بزرگ نمایی وجود ندارد. پس از ترسیم نمودار، شیشه به یک دستگاه تصویر کننده نوری متصل و ۵۰ برابر دیگر بزرگ می گردد. بنابراین حرکت عمودی سوزن جمعاً ۵۰۰۰ بار بزرگتر می شود. می توان بطور دستی یا با روشهای عکاسی، بزرگ نمایی افقی ۵۰ برابر نیز در نمودار ایجاد نمود و سپس به بررسی آن پرداخت.

سطح سنج تیلور- هابسون (the Taylor – Hobson taly surf)

سطح سنج (تالی سِرف) یک وسیله الکترونیکی است که کار آن مشابه دستگاه تاملینسون می باشد و تفاوت آنها بیشتر در روش بزرگ نمایی است. این دستگاه اطلاعاتی مشابه با اطلاعات دستگاه تاملینسون ارائه می دهد اما سرعت و دقت بیشتری دارد. برخلاف دستگاه تاملینسون که اصولاً برای کار در آزمایشگاه ها ساخته شده است سطح سنج در کارخانجات نیز قابل کاربرد می باشد. این وسیله مشابه دستگاه تامیلنسون، متشکل از یک کله اندازه گیری است. کله گی دارای سوزن و کفشک (T) است که توسط یک موتور الکتریکی و جعبه دنده بروی تمام سطح مورد آزمایش کشیده می شوند. طرح کلی این دستگاه در شکل۴-۹ نشان داده شده است.



شکل ۴-۹) طرح شماتیک سطح سنج تیلور- هابسون

در این وسیله بازوی سوزن به شکل آرمیچر است که می تواند حول شاخه میانی یک سیم پیچ با مقطع E شکل بچرخد. برجستگیها و فرورفتگیهای موجود در سطح، موجب می شود سوزن بالا و پایین برود و در نتیجه بازو حول نقطه M می چرخد. به این ترتیب یک طرف بازو به یکی از سیم پیچها نزدیک و طرف دیگر آن از سیم پیچ دیگر دور می شود. با این تغییر فاصله، میدان نوسان شدت جریان AC عبوری از سیم پیچها تغییر می کند. این سیم پیچها بخشی از یک مدار پل را تشکیل می دهند. خروجی این مدار به یک تقویت کننده تغذیه می شود و در

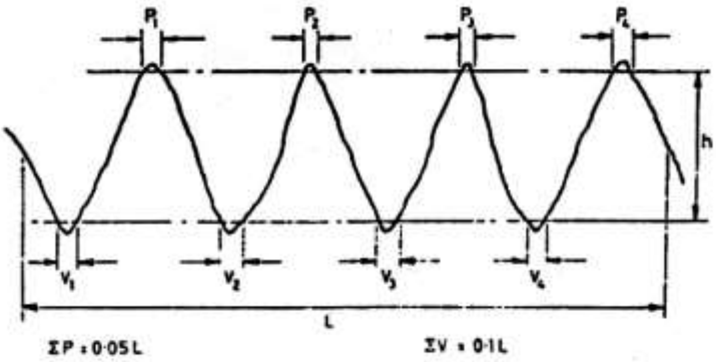
نهایت یک قلم ثبت کننده را بروی کاغذ حرکت می دهد. این خروجی پس از عبور از دمدولاتور (تفکیک کننده) و فیلتر وارد سنجشگر دیگری می شود. سنجشگر برای زبری سطح، مقدار عددی ارائه می دهد. قلم ثبت کننده این دستگاه که برای ترسیم نمودار خراشیدگی سطح مورد آزمایش بکار می رود متشکل از یک شاخص است که نوک آن بطور الکتریکی کمانهایی را بروی یک کاغذ کربنی رسم می کند. مزیت این قلم نسبت به قلم جوهری آن است که در اثر کشیده شدن بروی کاغذ تغییر شکل نمی دهد.

تحلیل نمودار خراشیدگی

ارزیابی عددی زبری سطح را می توان به روشهای مختلفی انجام داد. به همین علت در کشورهای مختلف از فنون گوناگونی استفاده می شود. مثلاً در انگلستان، بسیاری از کشورهای مشترک المنافع و آمریکا (از سال ۱۹۵۵) روش ارتفاع میانگین بکار برده می شود. در کشورهای اروپایی و سوئد از روش ارتفاع قله تا دره (پیک تا پیک) استفاده می گردد. بعضی کشورها نیز روش ریشه مقدار میانگین مربعها را بکار می برند.

ارتفاع قله تا دره (پیک تا پیک-م)

روش ارتفاع قله تا دره روش تجزیه و تحلیل ساده ای است. ارتفاع قله تا دره، فاصله بین دو خط موازی با خواب نمودار خراشیدگی بدست آمده است (یکی از این خطوط قله و دیگری دره ها را قطع می کند) بطوری که در خط بالایی، طولی از خط که بین قله ها قرار می گیرد ۵ درصد طول کل نمودار ($\sum P = 0.05 \times L$) و در خط پایینی ۱۰ درصد طول کل نمودار ($\sum V = 0.10 \times L$) باشد. در شکل ۵-۹ این مطلب به روشنی نشان داده شده است (زبری سطح فاصله بین این دو خط یعنی h می باشد-م).



شکل ۵-۹ نمایش ارتفاع قله تا دره

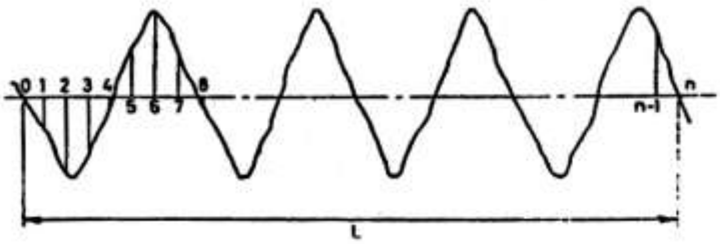
ریشه میانگین مربعها (یا مقدار R.M.S)

این روش اندازه گیری از سال ۱۹۵۵ در آمریکا استاندارد شد و بعد از آن به ارتفاع میانگین تغییر کرد (بخش ۳-۴-۹ را ببینید). ارتفاع میانگین، ریشه دوم میانگین مربعهای ارتفاعهای انتخاب شده در فواصل عرضی مساوی از نمودار خراشیدگی است. با توجه به شکل ۶-۹ این تعریف بهتر درک می گردد. اگر فواصل عرضی معادل به ترتیب در نقاط ۱و۲و۳و..... n در نظر گرفته شود ارتفاعهای مورد نظر $h_1, h_2, h_3, \ldots, h_n$ خواهند بود. بنابراین :

$$h_{R.M.S} = \sqrt{\frac{h_1^2 + h_3^2 + h_3^2 + \ldots + h_n^2}{n}}$$

یا :

$$h_{R.M.S} = \left(\frac{1}{n} \int_0^L h^2 dL \right)^{1/2}$$



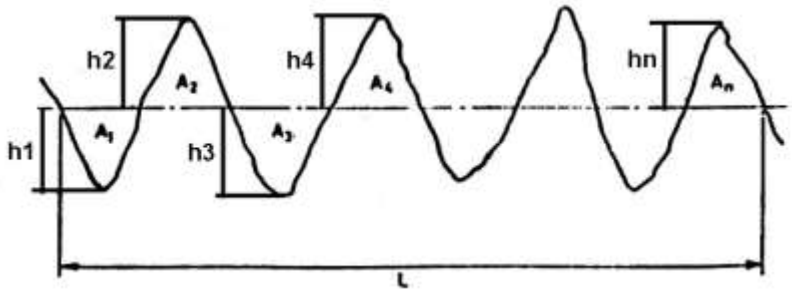
شکل۶-۹) نمایش $h_{R.M.S}$

روش میانگین خط مرکزی (C.L.A)

مقدار C.L.A استانداردی است که در انگلستان و از سال ۱۹۵۵ در آمریکا انتخاب گردید. میانگین ارتفاعهای انتخاب شده در فواصل عرضی مساوی از نمودار خراشیدگی نسبت به یک خط متوسط بدون توجه به علامتهای آنها مقدار C.L.A سطح گفته می شود (شکل۷-۹). بنابراین با توجه به شکل ۷-۹ خواهیم داشت :

$$C.L.A=\frac{h_1+h_2+h_3+h_4+h_5+h_6+\ldots+h_n}{n}=\frac{\sum h}{n}$$

(ابتدا نمودار خراشیدگی حاصل از سطح مورد بررسی به فواصل عرضی مساوی تقسیم بندی می گردد. سپس از ارتفاعهای هر فاصله عرضی میانگین گرفته می شود. مثل آن چه در شکل ۶-۹ می بینید.)



شکل ۷-۹) نمایش گرافیکی C.L.A

تعیین مقدار C.L.A به وسیله رسم فواصل عرضی، کار پر زحتمی است و اگر یک فاصله عرضی نادرست انتخاب گردد ممکن است نقاط مهمی از سطح در نظر گرفته نشود. از طرفی اگر یک مساحت نامنظم بر طولش تقسیم شود آنگاه ارتفاع میانگین مساحت بدست می آید. مساحتهای نامنظم را می توان با استفاده از یک مساحت سنج (Plani meter) اندازه گیری کرد. بنابراین با استفاده از اندازه گیری مساحتها برای یافتن مقدار C.L.A تعداد نامتناهی از فواصل عرضی و تمام نقاط سطح بررسی می گردد. با توجه به شکل۷-۹ دیده می شود که :

$$C.L.A=\frac{A_1+A_2+A_3+\ldots+A_n}{L}=\frac{\sum A}{L}$$

و مقدار حاصل ارتفاع میانگین نمودار می باشد.

جهت بدست آوردن مقدار C.L.A از مساحتها لازم است که این مقدار بر بزرگ نمایی عمودی نمودار تقسیم و در ۱۰^۶ (برای تبدیل به میکرو اینچ) ضرب شود یعنی :

$$C.L.A=\frac{\sum A}{L}\times\frac{10^6}{\text{بزرگ نمایی عمودی}}\ \mu in$$

$\sum A$ جمع مساحتهای بالا و پایین خط متوسط برحسب اینچ مربع، L طول کل نمودار برحسب اینچ است. این فرمول برحسب واحدهای متریک به این صورت خواهد بود :

$$C.L.A=\frac{\sum A}{L}\times\frac{10^3}{\text{بزرگ نمایی عمودی}}\ \mu m$$

$\sum A$ جمع مساحتهای بالا و پایین خط متوسط برحسب میلی متر مربع، L طول کل نمودار برحسب میلی متر است.

قبل از انجام این اندازه گیریها لازم است که موقعیت خط متوسط تعیین گردد. به طوری که مساحتهای بالا و پایین این خط با تلرانس ۵ درصد با یک دیگر برابر باشند. این کار از سه طریق قابل انجام است :

۱) تشخیص موقعیت خط با چشم

۲) اندازه گیری مساحت کل زیر نمودار در بالا و پایین خط مشخص شده

۳) تصحیح موقعیت خط به اندازه مقدار تصحیح که از رابطه زیر بدست می آید (یعنی خط متوسط را در موقعیتی دلخواه قرار می دهیم. سپس به کمک این مقدار، موقعیت آن را تصحیح می کنیم-م) :

$$\text{مقدار تصحیح}=\frac{\sum A\ (\text{بالا}) - \sum A\ (\text{پایین})}{L}$$

مثلاً، سطح فرضی را در نظر می گیریم که بی نظمیهای مثلثی شکل داشته باشد. در ابتدا خط مرکزی به فاصله $\frac{h}{4}$ از نوک قله رسم می شود. سپس مقدار تصحیح به صورت زیر بدست می آید :

$$\text{جمع مساحتهای بالای این خط}=A_1+A_2=2\times\frac{h}{4}\times\frac{b}{4}\times\frac{1}{2}=\frac{h\times b}{16}$$

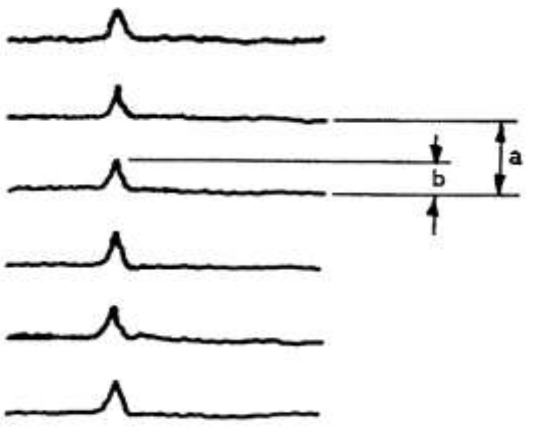
$$\text{جمع مساحتهای زیر این خط}=A_3+A_4=2\times\frac{3h}{4}\times\frac{3b}{4}\times\frac{1}{2}=\frac{9\times h\times b}{16}$$

$$\text{مقدار تصحیح} = \frac{\text{مساحت بالا} - \text{مساحت پایین}}{\text{طول}} = \frac{\frac{hb}{16} - \frac{9hb}{16}}{2b} = -\frac{h}{4}$$

یعنی باید خط مرکزی رسم شده را به اندازه $\frac{h}{4}$ به طرف پایین بیاوریم (بخاطر علامت منفی در $-\frac{h}{4}$) تا در موقعیت صحیح خود قرار گیرد. با این کار فاصله خط مرکزی از نوک قله ها $\frac{h}{2}$ خواهد شد. این روش برای سطوحی با مقطع طولی منظم (مانند سطح فرض شده در مثال بالا) درست می باشد ولی برای سطوحی با مقطع طولی (پروفیل) نامنظم بطور تقریبی صحیح است. این روش تصحیح باید در دستگاه تاملینسون استفاده شود اما دستگاه تالی سِرف، متشکل از یک وسیله جمع کننده است که هنگام حرکت سوزن بروی سطح، بطور خودکار روش بالا را بکار می برد.

میکروسکوپ تداخلی

در فصل دو دیدیم که اگر یک شیشه نوری، تحت زاویه ای کوچک بروی سطح تخت منعکس کننده نور قرار گیرد در سرتاسر سطح، نوارهای تداخلی دیده خواهد شد. انحنای این نوارها بیان کننده میزان تختی سطح است. اگر طول موج نور بکار رفته معلوم باشد میزان تختی سطح با دقت بالایی قابل تعیین است.

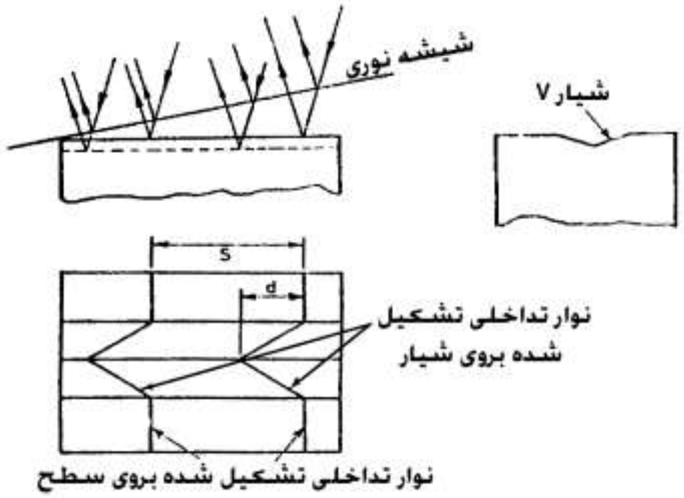


شکل۸-۹)تصویر نوارهای تداخلی نمونه که نمایش دهنده یک خراش بروی یک صفحه تخت می باشند.

در شکل ۸-۹ فاصله نوارها a است و سطح دارای خراش می باشد که بصورت یک بی نظمی (مثلثی شکل-م) به عمق b بروی نوار مشخص شده است. در این صورت عمق خراشها $\frac{b}{a} \times \frac{\lambda}{2}$ میکرومتر می باشد. که λ طول موج نور بکار رفته است. برای آن که نوارهای تداخلی بسیار خوبی ارائه گردد شیشه نوری نسبت به سطح مورد بررسی باید زاویه نسبتاً تندی داشته باشد. به عبارت دیگر در این روش اندازه گیری، شیشه نوری نباید عمود بر سطح قطعه کار قرار گیرد. برای مثال در شکل ۹-۹ نوارهای تداخلی ایجاد شده با نوری به طول موج ۰/۵ میکرومتر بروی سطحی که دارای شیار V شکل می باشد نشان داده شده است. عمق بی نظمی موجود در نوارها (مثلثها-م) که نشان دهنده شیار V شکل می باشد، ۰/۱ میکرومتر است. فاصله بین نوارها، نشان دهنده تغییر در فاصله بین سطح قطعه کار و شیشه نوری است (که بصورت مضربی از نصف طول موج می باشد) و ۰/۲۵ میکرومتر است. پس عمق شیار V شکل عبارت است از :

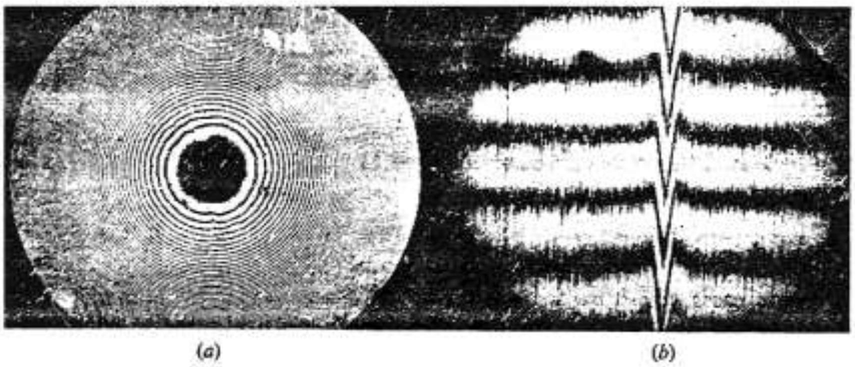
$$\text{عمق شیار} = \frac{d}{s} \times \frac{\lambda}{2} = \frac{0.1}{0.25} \times \frac{0.5}{2} = 0.4 \times 0.25 = 0.1\,\mu m$$

بنابراین بی نظمی نوار تداخلی، عمق بی نظمی سطح را برحسب نصف طول موج نور بکار رفته معین می کند.



شکل۹-۹) نوارهای تداخلی تشکیل شده از یک سطح تخت که در امتداد طولش شیار V شکل دارد.

نوارهای تداخلی به کمک میکروسکوپهای تداخلی که قدرت تحلیل بالایی دارند به نحو مطلوبی قابل مشاهده هستند. به کمک این وسایل می توان نوارهای تداخلی را بروی سطح گلوله های فولادی نیز مشاهده نمود (گردی نوارها مشخص کننده گردی گلوله ها هستند). در شکل ۱۰-۹ قسمت a یک میکرو طرح تداخلی حقیقی از این قبیل سطوح نشان داده شده است. هر گونه بی نظمی در سطح قطعه کار به صورت بی نظمی در نوارهای تداخلی ظاهر خواهد شد. آقایان Milger و Watts میکروسکوپ مناسبی برای این منظور ساخته اند. این میکروسکوپ شامل یک دوربین با قابلیت ضبط و ثبت دائم می باشد. در شکلهای a-۱۰-۹ و b-۱۰-۹ نمونه ای از میکرو طرحهای تداخلی (microinter ferograms) که بوسیله چنین میکروسکوپی حاصل می گردد نشان داده شده است.

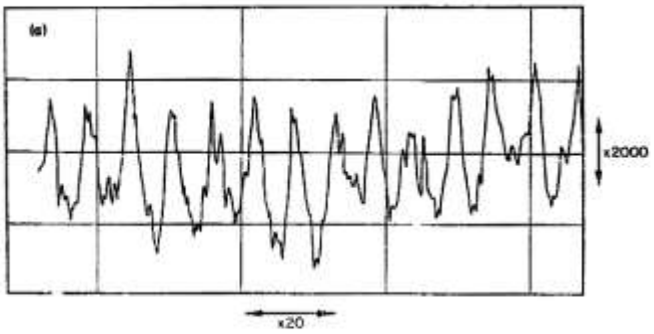


شکل ۱۰-۹) میکرو طرحهای تداخلی از a- سطح یک گلوله فولادی b- خراشی بروی یک سطح تخت که عمق این خراش، تقریباً $\frac{\lambda}{2}$ یا ۰/۲۵ میکرومتر است (با اجازه چاپ از شرکت Hilger, Wahs).

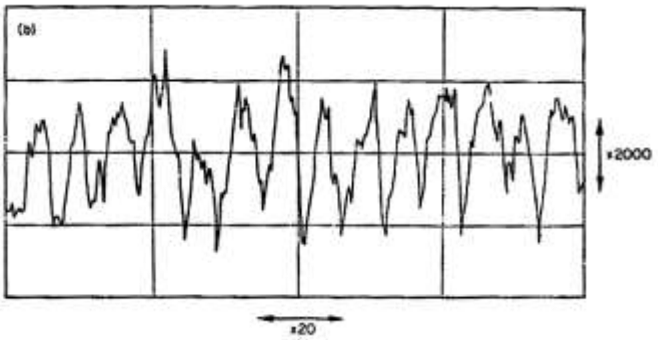
کپی برداری از سطح

این روش هنگامی استفاده می گردد که سطح قطعه کار به سهولت در دسترس نیست و برای کاربرد روشهای تداخلی به اندازه کافی عمل انعکاس انجام نمی شود. اغلب می توان با تولید یک کپی از سطح اصلی، طرحی از بافت سطح بدست آورد. در ابتدا یک تکه از فیلم استات سلولز را جهت نرم شدن در استن مرطوب می کنند و سپس آن را بروی سطح مورد نظر فشار می دهند تا زمانی که این فیلم سخت شود. بازده این روش تا حدود ۸۰ درصد است. در

روشهای پیشرفته از اپوکسی (epoxy) و دیگر رزینها استفاده می گردد که بازده آنها نزدیک به ۱۰۰ درصد است. شکلهای a-۱۱-۹ و b-۱۱-۹ نمودارهایی از بافت یک سطح هستند که اولی از سطح حقیقی و دومی از سطح کپی شده به دست آمده است.



شکل a -۱۱-۹) طرح سطحی که در آن مقدار C.L.A برابر ۳/۶۵ میکرومتر است.



شکل b-۱۱-۹) طرح حاصل از کپی سطح قبل که C.L.A آن برابر ۳/۴۵ میکرومتر است.

فصل دهم

کنترل کیفیت آماری

(Statistical Quality Control)

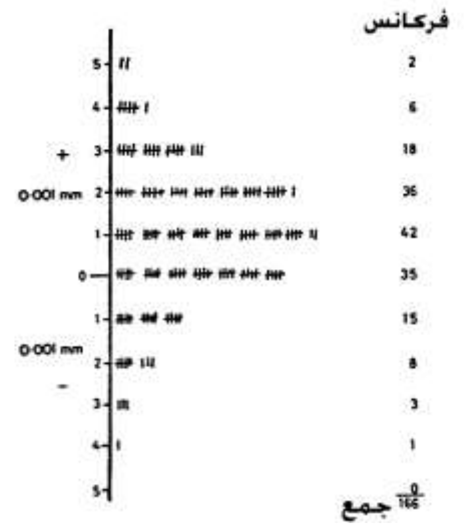
مقدمه

فصول گذشته بر این حقیقت تأکید داشتند که اگر چه دقت، برای مهندسین بسیار مهم است اما دقت مطلق قابل دستیابی نیست. حتی بلوکهای اندازه گیری بسیار دقیق نیز تلرانسهای ساختی به کوچکی چند میلیونیم اینچ (۰/۰۰۰۰۲۵ میلی متر) دارند. این تلرانسها که مقدار آنها به وظیفه قطعه کار بستگی دارد برای ایجاد گوناگونی و تعدد در فرآیندهای تولید لازم است. عملیات ساده ای مانند برش قطعاتی با طول معین از یک میله بوسیله ماشین تراش را در نظر بگیرید. قطعاتی که بدست می آیند باید طولهای مشابهی داشته باشند اما طول برشی که ماشین برای آن تنظیم شده است دچار نوسان و تغییر خواهد شد. این تغییر ممکن است نتیجه عواملی باشد که تأثیر هر کدام به تنهایی قابل چشم پوشی است ولی اگر همه این عوامل، تمایل به افزایش طول داشته باشند آنگاه طول قطعه کار به بیشترین مقدار ممکن خواهد رسید. بطور مشابه اگر همه این عوامل، تمایل به کاهش طول داشته باشند آنگاه طول قطعه کار به کمترین مقدار ممکن می رسد. چنان چه اثرات هر یک از این عوامل ضد یک دیگر باشند، اثر برآیند آنها ناچیز است و طول قطعه کار با طول مورد نظر برابر خواهد شد.

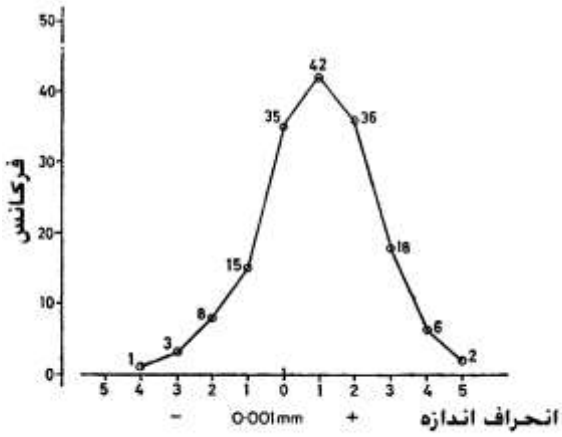
این تغییرات تصادفی، نتیجه ای از عوامل غیر قابل تعیین هستند. وظیفه یک سیستم کنترل فرآیند، تمیز دادن بین عوامل غیر قابل تعیین و عوامل قابل تعیین است. از جمله عوامل قابل تعیین می توان به تغییر در تنظیم ماشین، فرسایش سنگ سنباده و ایجاد نقص دائمی در ماشین اشاره نمود. نقصهای قابل تعیین باید پیش از این که قطعه کارهای معیوب تولید گردد تعیین و تصحیح شوند. علاوه بر تولید، این نقایص ممکن است به هنگام مونتاژ نیز اتفاق بیفتد. به همین دلیل سازندگان بزرگ، کیفیت قطعاتی را که خریداری می کنند بررسی می نمایند. این کار بوسیله روشهای آماری انجام می گردد. فصل حاضر، روشهای آماری که به کمک آنها می توان این وظایف را به نحوی اقتصادی انجام داد بررسی خواهد کرد. البته طبیعت بشر به گونه ای می باشد که ممکن است قطعات ناقص نیز بوسیله بازرس کنترل کیفیت پذیرفته شود و در حقیقت هیچ کنترل کیفیتی، ۱۰۰ درصد صحیح نخواهد بود.

تغییر پذیری فرآیند

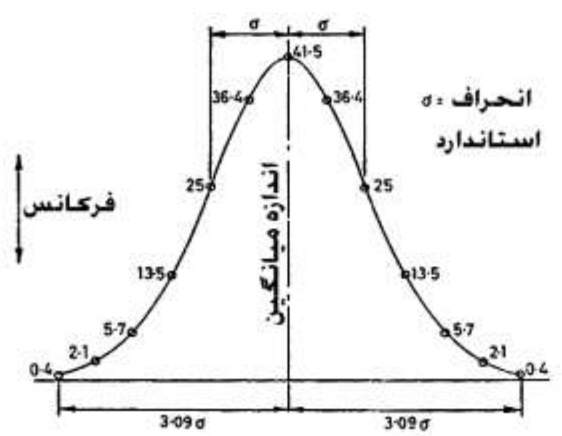
در بخش ۱-۱۰ ذکر شد که تمامی فرآیندهای ساخت، تابع تغییرات تصادفی هستند. این موضوع را می توان با یک آزمایش ساده، شامل اندازه گیری چند قطعه کار و ثبت اندازه های آنها نشان داد. از قطعه کار ساده ای مانند پینهای استوانه ای که با سنگ زنی بدون مرغک (centerless grinding) تولید شده اند استفاده می کنیم. قطر پینها باید با تقریب ۰/۰۰۱ میلی متر ثبت گردد. البته این کار به این معنی نیست که تنها باید قطر قطعه کارها را ثبت کرد بلکه موارد دیگری نیز باید جهت کسب اطلاعات بیشتر بررسی شود. مناسبترین راه برای ثبت چنین اطلاعاتی، تنظیم یک جدول چوب خط مانند شکل ۱-۱۰ است. در این جا قطر ۱۰ پین استوانه ای باید بوسیله یک میکرومتر، اندازه گیری و مقدار میانگین آنها محاسبه گردد. سپس از یک مقایسه گر با بزرگ نمایی مناسب استفاده می شود. میزان انحراف ابعادی هر قطعه کاری که از زیر مقایسه گر بیرون آورده می شود نسبت به مقدار میانگین بدست آمده ممکن است مثبت یا منفی باشد که بصورت یک چوب خط در جدول مشخص می گردد. اندازه گیری با تقریب ۰/۰۰۱ میلی متر انجام می شود. این جدول تعدادی از مشخصات تغییرپذیری فرآیند را نشان می دهد. اما اگر این اطلاعات به صورت نمودار رسم شود نتایج بهتری حاصل خواهد شد. این نمودار که به چند ضلعی فرکانس (یا چند ضلعی فراوانی= frequency polygon) معروف می باشد در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. چند ضلعی فراوانی بسیار مشابه منحنی نرمال یا منحنی گوس نشان داده شده در شکل ۳-۱۰ می باشد. محور افقی این منحنی اندازه قطعه کار و محور عمودی آن تعداد دفعاتی که هر قطعه کار اندازه گرفته شده است (= فرکانس یا فراوانی) می باشد.



شکل ۱-۱۰) جدول چوب خط



شکل۲-۱۰) چند ضلعی فراوانی حاصل از اطلاعات شکل ۱-۱۰



شکل ۳-۱۰) منحنی توزیع نرمال حاصل از اطلاعات شکل ۱-۱۰

پهنای منحنی در حقیقت محدوده طبیعی تولید قطعه کار می باشد اما ممکن است که گروهی از قطعات در محدود اندازه تعریف شده برای قطعه کار قرار نگیرند. روش بهتر استفاده از انحراف استاندارد است. فاصله بین محور عمودی منحنی نرمال و نقطه ای که در آن، انحنای منحنی از محدب به مقعر تغییر می کند را انحراف استاندارد گویند. رابطه این منحنی به شکل زیر است :

$$y=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\times e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$$

دراین رابطه π و e ثابتهای ریاضی، $\bar{x}$ مقدار میانگین اندازه ها، x اندازه هر قطعه، y فراوانی اندازه و σ انحراف استاندارد است. آنچه که این منحنی را مهم می سازد خواص آن می باشد. بهترین خاصیت این منحنی آن است که نشان می دهد، ۹۹/۸ درصد از مساحت زیر منحنی (که با مقیاس کوچکی تعداد کل قطعات بررسی شده را نشان می دهد) در محدوده $\pm 3.09\sigma$ از طرفین مقدار میانگین قرار دارند. بنابراین اگر به عنوان نمونه، یک گروه متشکل از ۲۰۰۰ قطعه کار مورد بررسی قرار گیرد و انحراف استاندارد محاسبه شود می توان فرض کرد در مدتی که ماشین تحت کنترل است هیچ تغییری در تنظیم فرآیند اتفاق نخواهد افتاد و همه قطعات تولید شده بجز ۲ قطعه (که در دو انتهای نمودار قرار دارند) نسبت به مقدار میانگین در محدوده $\pm 3.09\sigma$ قرار می گیرند.

محاسبه انحراف استاندارد

انحراف استاندارد را می توان ریشه دوم میانگین مربعهای انحرافهای هر قطعه کار از مقدار میانگین گروه تعریف کرد که عبارت زیر بدست می آید :

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum F(x-\bar{x})^2}{\sum F}}$$

دراین عبارت، F، فراوانی یک انحراف (variation) معین می باشد (می توان به کمک فرمول $\sigma=\sqrt{\frac{\sum F(x-\bar{x})^2}{n-1}}$ که در آن n تعداد قطعات موجود در یک گروه است مقدار بهتری برای انحراف استاندارد بدست آورد). مناسبترین راه جهت محاسبهٔ σ استفاده از جدولی مشابه آن

چه که در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است می باشد. مقادیر F و X از جدول چوب خط مربوط به شکل ۱-۱۰ بدست می آید. فرض کنید که مقایسه گر به وسیله بلوکهای اندازه گیری که اندازه آنها ۶/۰۰۵ میلی متر می باشد تنظیم شده است. ستونها در جدول به قرار زیر هستند:

ستون ۱-نمایشگر لیست اندازه ها می باشد که برای ساده سازی تنها آخرین رقم بکار رفته است.

ستون ۲ –فراوانی هر یک از این اندازه ها را نشان می دهد.

ستون ۳-F×X را نشان می دهد (حاصل ضرب فراوانی در اندازه مورد بررسی). از نتایج ستونهای ۲ و ۳ مقدار میانگین($\bar{X}$) محاسبه می گردد.

$$\bar{X}=\frac{\sum(F.X)}{\sum F}=\frac{988}{166}=5.95$$

واحد، هزارم میلی متر است پس : $\bar{X}=5.95=0.00595$

ستون ۴-انحراف هر اندازه از مقدار میانگین(که تقریبا ۶ فرض می شود-م)را نشان می دهد ($(x-\bar{x})$).

ستون ۵-مربع اعداد ستون ۴ را نشان می دهد ($(x-\bar{x})^2$).

ستون ۶-حاصل ضرب فراوانی (ستون ۲) و مربع انحراف (ستون ۵) را نشان می دهد ($F(x-\bar{x})^2$). بنابراین با تقسیم جمع ستون ۶ برجمع ستون ۲ و محاسبه ریشه دوم مقدار حاصل، σ بدست می آید :

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum F(x-x)^2}{\sum F}}=\sqrt{\frac{434}{166}}=1.614$$

واحد، هزارم میلی متر است پس : $\sigma=1.614\approx 0.0016\,mm$

در این فرآیند انحراف استاندارد ۰/۰۰۱۶ میلی متر است. پس :

تغییرپذیری فرآیند= $\pm 3.09\sigma=\pm(3.09\times 0.0016mm)=\pm 0.0049^{mm}$ (باتقریب 0.0001^{mm})

بنابراین در این مثال بعید است که ابعاد تولید شده از اندازه حقیقی خود بیشتر از $\pm 0.0049^{mm}$ انحراف پیدا کند. به این ترتیب اگر تلرانس قطعه کار $\pm 0.005^{mm}$ در نظر گرفته شود برای

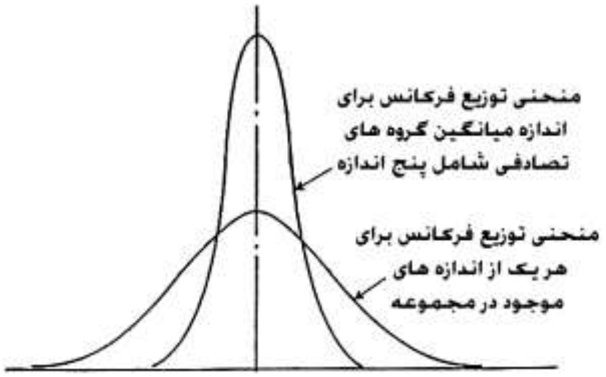
تغییراتی که ممکن است در اثر مثلاً فرسایش ابزار یا سنگ سنباده پدید آید نیز تلرانسی در نظر گرفته شده است.

	۱	۲	۳	۴	۵	۶
	اندازه x	فراوانی F	$F \times x$	$x - \bar{x}$	$(x - \bar{x})^2$	$F(x - \bar{x})^2$
۶/۰۰۱	۱	۱	۱	-۵	۲۵	۲۵
۶/۰۰۲	۲	۳	۶	-۴	۱۶	۴۸
۶/۰۰۳	۳	۸	۲۴	-۳	۹	۷۲
۶/۰۰۴	۴	۱۵	۶۰	-۲	۴	۶۰
۶/۰۰۵	۵	۳۵	۱۷۵	-۱	۱	۳۵
۶/۰۰۶	۶	۴۲	۲۵۲	صفر	صفر	صفر
۶/۰۰۷	۷	۳۶	۲۵۲	+۱	۱	۳۶
۶/۰۰۸	۸	۱۸	۱۴۴	+۲	۴	۷۲
۶/۰۰۹	۹	۶	۵۴	+۳	۹	۵۴
۶/۰۱۰	۱۰	۲	۲۰	+۴	۱۶	۳۲
جمع کل		۱۶۶	۹۸۸			۴۳۴

شکل ۴-۱۰) محاسبه انحراف استاندارد به کمک جدول و بر مبنای توزیع فراوانی شکل ۱-۱۰

انحراف استاندارد میانگینهای زیر گروهها

اگر تعداد قطعات موجود در یک گروه خیلی زیاد باشد می توان آن را به گروه های مثلاً ۵ تایی تقسیم کرد. سپس مقدار میانگین هر زیر گروه محاسبه می شود. این میانگینها را بسیار دقیقتر از تک تک اندازه ها می توان در اطراف اندازه میانگین طبقه بندی کرد. در شکل ۵-۱۰ دو توزیع فراوانی نمونه برای میانگین بدست آمده از هر زیرگروه و مقادیر تک تک اندازه ها نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰) مقایسه منحنی توزیع حاصل از اندازه ها و منحنی توزیع حاصل از میانگین هر زیرگروه بر مبنای اطلاعات شکل ۲-۱۰

اگر σ_g انحراف استاندارد مقادیر میانگینهای زیرگروهها و σ_b انحراف استاندارد مقادیر اندازه ها باشد آنگاه می توان نشان داد که :

$$\sigma_g = \frac{\sigma_b}{\sqrt{n}}$$

که n تعداد قطعات موجود در یک گروه است. کاربرد این اصل در نقشه های کنترل بسیار مهم می باشد.

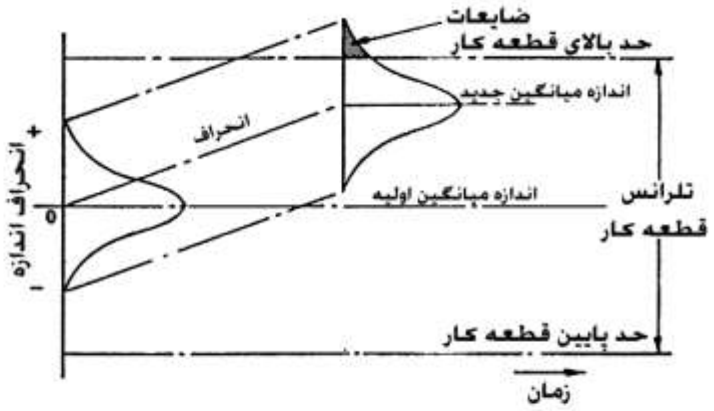
نمودارهای کنترل (Control Charts)

اگر ماشینی برای تولید قطعه کاری با اندازه معین تنظیم شود، ممکن است در کیفیت تولید دو نوع تغییر اتفاق بیفتد :

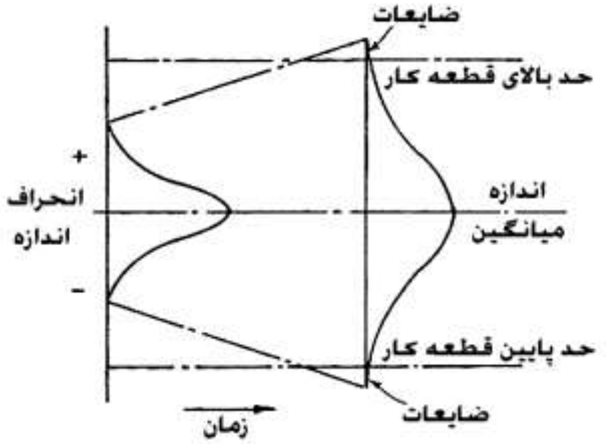
الف-اندازه میانگین قطعه کار تولید شده تغییر کند یعنی تنظیم دستگاه تغییر کند مثلاً ابزار فرسایش یابد.

ب-تغییرپذیری فرآیند تغییر کند یعنی محدوده اندازه قطعه کار تولید شده تغییر نماید. این موضوع معمولاً نتیجه ای از ایجاد مشکلی بسیار اساسی در ماشین است.

در هر یک از این دو مورد تا زمانی که عمل تصحیح صورت نگیرد ضایعاتی تولید خواهد شد. اثر این تغییرات در شکلهای ۶-۱۰ و ۷-۱۰ نشان داده شده است. توجه نمایید که ابتدا قطعه کار در محدوده معینی قرار داشته است.



شکل ۶-۱۰) تأثیر تغییر اندازه میانگین در طول یک فرآیند



شکل ۷-۱۰) تأثیر تغییر در تغییرپذیری فرآیند

این تغییرات چه بصورت تکی و چه به همراه یک دیگر اتفاق بیفتند خروجی نهایی، قطعه کار معیوبی خواهد بود که یا قابل اصلاح است یا قابل اصلاح نیست. اگر این نقایص بخوبی با قطعه کار آمیخته گردند برای آشکار شدن آنها بازرسی ۱۰۰ درصد نیاز خواهد بود. نمودارهای کنترل برای کنترل اندازه تنظیم شده(نمودارهای کنترل میانگین)و کنترل تغییرپذیری فرآیند(نمودارهای کنترل محدوده)بکار می روند.

نمودار کنترل میانگین

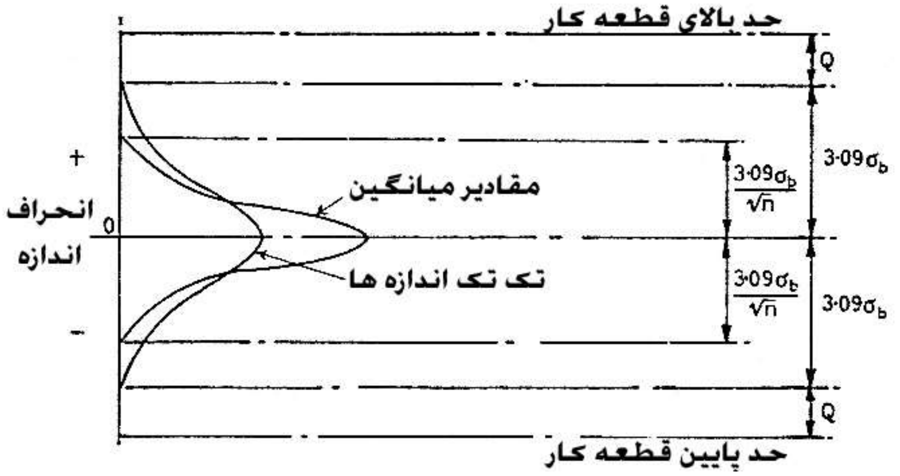
ساده ترین نمودار کنترل، نموداری است که اندازه، حد بالا و حد پایین قطعه کار در آن نشان داده می شود. به این ترتیب هم محدوده فرایند و هم مقدار اندازه هم زمان مشخص می گردد.

اما این روش بازرسی ۱۰۰ درصد، گران است و رسم نمودار آن برای هر قطعه کار به صرفه نیست.

فرض کنید یک بازرس، ماشینی را در فواصل معین بررسی و ۵ قطعه کار صحیح را به عنوان نمونه انتخاب کرده است. او مقدار میانگین را محاسبه و منحنی آن را رسم می نماید. میانگین گروه ها در محدوده اندازه متوسط تغییر می کند و هنگامی که تنظیم ماشین، تغییر نماید مشاهده می شود که مقادیر به جهت مشخصی میل پیدا می کنند. مسئله این است که میانگین تا چه حد اجازه دارد که پیشروی نماید (شکل ۸-۱۰) ؟ شکل ۸-۱۰ حد بالا و پایین قطعه کار، منحنی توزیع تک تک اندازه ها و منحنی توزیع مقادیر میانگین هر گروه را نشان می دهد. همانطور که در شکل دیده می شود می توان به فرآیند اجازه داد تا به اندازه $\pm Q$ پیشروی کند بدون آن که در قطعه کار نقصی ایجاد گردد. از شکل ۵-۱۰ نیز بدست آمد که $\sigma_g = \frac{\sigma_b}{\sqrt{n}}$ پس کل ضایعات منحنی مقادیر میانگین برابر است با :

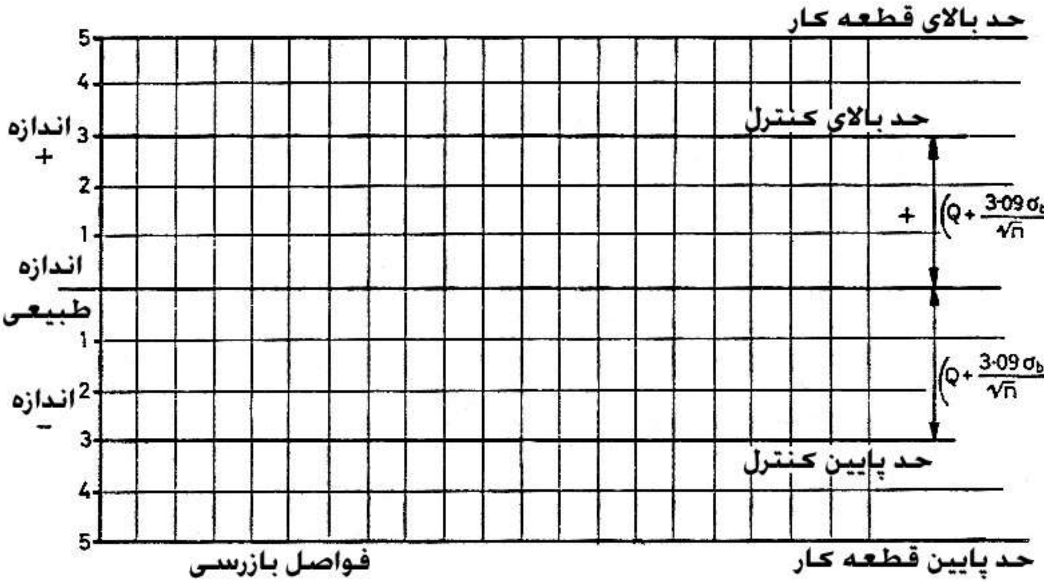
$$\pm 3.09\sigma_g = \pm \frac{3.09\sigma_b}{\sqrt{n}}$$

بنابراین اگر فرآیند تحت کنترل باقی بماند (بطور آماری) منحنی که برای میانگینها رسم می شود همواره باید در محدوده $\pm \frac{3.09\sigma_b}{\sqrt{n}}$ از طرفین اندازه متوسط مورد نظر قرار گیرد. فرآیند می تواند بدون این که ضایعاتی در قطعه کار تولید شود از این مقدار متوسط به اندازه $\pm Q$ پیشروی نماید اما خود مقدار Q به اختلاف بین تغییرپذیری فرآیند و تلرانس قطعه کار بستگی دارد. پس (در منحنی که برای میانگینها رسم می شود-م) حداکثر فاصله از مقدار میانگین $\pm(Q + \frac{3.09\sigma_b}{\sqrt{n}})$ خواهد بود. به محض این که نقطه ای خارج از این محدوده قرار گرفت باید به بررسی و بازرسی آن پرداخت چرا که انحراف، بزرگتر از انحرافی است که از عوامل تصادفی یا غیرقابل تعیین ایجاد می گردد.



شکل ۸-۱۰) ساختار نمودار کنترل میانگین

نمودار کنترل میانگین به صورتی که در شکل ۹-۱۰ نشان داده شده است رسم می گردد.



شکل ۹-۱۰) نمودار کنترل میانگین (نمودار $\bar{x}$ ها)

پس از تعیین نقاط چنان چه منحنی به یک طرف اندازه متوسط، پیشروی داشته باشد فرآیند، مشکوک رفتار کرده است. پیش از این که پیشروی به حدود کنترل برسد فرآیند باید متوقف و دوباره تنظیم گردد. در فرآیندی که منحنی به یک جهت پیشروی می نماید (مانند عملیات سنگ زنی که سنگ سنباده در آن فرسوده می شود) تنظیم مجدد را می توان عمداً در جهت

حد کنترل دیگر انجام داد. بنابراین مدت زمان بین تنظیمهای مجدد فرایند، افزایش خواهد یافت.

روشهای ساده برای تنظیم حدود کنترل

در روش محاسبه انحراف استاندارد که قبلاً شرح داده شد تثبیت موقعیت حدود کنترل نسبت به اندازه میانگین کار پر زحمتی است. اما انحراف استاندارد، شرح دهنده اساس سیستم است. در حقیقت انحراف استاندارد، اندازه ای از محدوده اندازه قطعه کار می باشد که در یک فرآیند معین با تنظیمات معین تولید می گردد. بنابراین باید بین انحراف استاندارد و محدوده اندازه در نمونه های بررسی و رسم شده در نمودار کنترل، روابطی موجود باشد. این روابط تا حد زیادی تنظیم نمودار کنترل را ساده می کنند.

برای رسم نمودار کنترل، بازرس، ابتدا نمونه گیری و سپس اندازه میانگین نمونه را رسم می کند. محاسبات نباید بروی هر کاغذی نوشته شود بلکه این کار باید بروی کاغذ اطلاعات (Data sheet) که بدرستی طراحی شده است انجام گردد. در نتیجه می توان از این کاغذها جهت تنظیم نمودار استفاده کرد. برای تنظیم نمودار کنترل، باید فرکانس، بررسی و اندازه نمونه (sample size) معین گردد. با توجه به اندازه تک تک عضوها در یک نمونه، بازرس، اندازه میانگین نمونه (sample average size) و همچنین محدوده نمونه (sample range) یعنی اختلاف بین بیشترین و کمترین اندازه ها در نمونه (W) را محاسبه می کند. بنابراین با گذشت یک دوره (پریود) زمانی، مقادیری از محدوده نمونه که با W نشان داده می شود بدست می آید. میانگین محدوده های نمونه به این ترتیب محاسبه می گردد :

$$\text{محدوده میانگین نمونه} = \overline{w} = \frac{\sum w}{n_s}$$

که n_s تعداد نمونه های در نظر گرفته شده می باشد. اگر چه انحراف استاندارد نشان دهنده تغییرپذیری فرآیند است اما برای کنترل تغییر پذیری فرآیند پیشنهاد شده است که محدوده نمونه بروی یک نمودار کنترل رسم گردد. پس بین محدوده نمونه و انحراف استاندارد رابطه ای وجود خواهد داشت :

$$\sigma = C\overline{w} \quad \text{و} \quad \Rightarrow \frac{3.09 \times \sigma}{\sqrt{n}} = A\overline{w}$$

که A یک مقدار ثابت وابسته به اندازه نمونه (یعنی n) می باشد. حال حدود کنترل در $\pm A\bar{w}$ تنظیم می گردد. اما این رابطه ارتباط بین تلرانس قطعه کار و تغییر پذیری فرآیند را به حساب نمی آورد و برای فرآیندی که به مقدار Q اجازه پیشروی دارد هیچ قید و شرطی را معین نمی کند. برای تعیین این که فرآیند، قبل از انجام عمل تصحیح تا چه حدی اجازه دارد که پیشروی کند شاخص دقت نسبی (Relative Precision Index) بکار برده می شود. این شاخص، تغییر پذیری فرآیند را به تلرانس کار ارتباط می دهد :

$$R.P.I = \frac{\text{تلرانس قطعه کار}}{w}$$

در جدول ۴ مقادیر R.P.I برطبق اندازه نمونه ارائه شده است (B.S. ۲۵۶۴). با توجه به این جدول می توان فهمید که فرآیند، دقت نسبی پایین، بالا یا متوسط دارد. اگر R.P.I، کم باشد فرآیند رضایت بخش نیست و بخشی از قطعه کارها معیوب خواهد بود یعنی Q منفی است. اگر R.P.I، متوسط باشد فرآیند رضایت بخش است و اگر بخوبی کنترل گردد هیچ قطعه کار معیوبی تولید نخواهد شد. در این مورد Q صفر است و فرآیند نیازمند تنظیم فرکانس است تا کنترل، رضایت بخش گردد. حدود کنترل و اخطار را می توان با ضرب $\bar{w}$ در مقادیر مناسبی از ثابت A' در جدول ۲ بدست آورد. اگر R.P.I، بالا باشد قبل از این که تنظیم صورت گیرد فرآیند پیشروی می کند یعنی Q مثبت خواهد بود. در این حالت حدود نمودار کنترل با ضرب $\bar{w}$ در ثابتهای مناسبی از جدول ۵ بدست می آید. برای آن که فرآیند بتواند پیشروی نماید حدود به اندازه $A''\bar{w}$ از حدود قطعه کار تنظیم می شود. بنابراین در همه موارد، حدود نمودار کنترل با ضرب محدوده میانگین نمونه ($\bar{w}$) در ثابتهای جداول B.S. ۲۵۶۴ بدست می آید.

نمودار کنترل محدوده

در بخش ۳-۱۰ نشان داده شد که مانند نمودار کنترل میانگین برای کنترل تغییرپذیری فرآیند، به نمودار کنترل محدوده نیاز می باشد. حدود کنترل (Control Limits) برای این نمودار مانند حدود کنترل در نمودار میانگین تنظیم می گردد. یعنی با ضرب محدوده میانگین نمونه ($\bar{w}$) در مقادیر ثابت، موقعیت حدود بالا و پایین نمودار کنترل محدوده بدست می آید.

این ثابتها در جدول ۳ از استاندارد ۱۹۶۵: B.S. ۲۵۶۴ نشان داده شده است. در ادامه، این جداول مطابق با استاندارد ذکر می گردد :

جدول ۲ : حدود نمودار کنترل برای میانگین نمونه ($\bar{x}$)

اندازه نمونه	برای حدود درونی	برای حدود بیرونی
n	$A'_{0.025}$	$A'_{0.001}$
۲	۱/۲۳	۱/۹۴
۳	۰/۶۷	۱/۰۵
۴	۰/۴۸	۰/۷۵
۵	۰/۳۸	۰/۵۹
۶	۰/۳۲	۰/۵۰

برای بدست آوردن حدود کنترل، $\bar{w}$ در مقادیر مناسبی از $A'_{0.025}$ و $A'_{0.00}$ ضرب و سپس به مقدار میانگین عمومی ($\bar{x}$) اضافه یا از آن کم می شود.

جدول ۳ : حدود نمودار کنترل محدوده ($\bar{w}$)

اندازه نمونه	برای حدود پایین*		برای حدود بالا		برای انحراف استاندارد
n	$D'_{0.001}$	$D'_{0.025}$	$D'_{0.975}$	$D'_{0.999}$	d_n
۲	۰/۰۰	۰/۰۴	۲/۸۱	۴/۱۲	۱/۱۳
۳	۰/۰۴	۰/۱۸	۲/۱۷	۲/۹۹	۱/۶۹
۴	۰/۱۰	۰/۲۹	۱/۹۳	۲/۵۸	۲/۰۶
۵	۰/۱۶	۰/۳۷	۱/۸۱	۲/۳۶	۲/۳۳
۶	۰/۲۱	۰/۴۲	۱/۷۲	۲/۲۲	۲/۵۳

*حدود پایین معمولاً بکار نمی رود.

برای بدست آوردن حدود کنترل، $\overline{w}$ در مقدار مناسبی از D' ضرب می شود. برای تعیین انحراف استاندارد (σ)، $\overline{w}$ بر مقدار مناسبی از d_n تقسیم می شود.

جدول ۴ : طبقه بندی تغییر پذیری فرآیند نسبت به تلرانس قطعه کار

R.P.I = تلرانس تقسیم بر محدوده میانگین

(اگر محدوده، خارج از کنترل بود این جدول نباید بکار برده شود.)

کلاس اندازه نمونه n	دقت نسبی پایین R.P.I	دقت نسبی متوسط R.P.I	دقت نسبی بالا R.P.I
۲	کمتر از ۶/۰	بین ۶/۰ تا ۷/۰	بزرگتر از ۷/۰
۳	کمتر از ۴/۰	بین ۴/۰ تا ۵/۰	بزرگتر از ۵/۰
۴	کمتر از ۳/۰	بین ۳/۰ تا ۴/۰	بزرگتر از ۴/۰
۵ و ۶	کمتر از ۲/۵	بین ۲/۵ تا ۳/۵	بزرگتر از ۳/۵
وضعیت تولید	غیر رضایت بخش* -ایجاد قطعات ناقص اجتناب ناپذیر است.	رضایت بخش- اگر میانگینها در محدوده کنترل باشند.	رضایت بخش-اگر میانگینها در محدوده اصلاح شده باشند.

*اگر مشخصات اجازه دادند که بخش کوچکی از تولید خارج از محدوده باشد کاربرد این بخش ضروری نیست. در این صورت مقادیر حدی دقت نسبی کم، ۰/۸ آنچه که در این ستون داده شده است خواهد بود.

جدول ۵ : حدود نمودار کنترل اصلاح شده برای میانگین نمونه($\bar{x}$)- گروه دقت بالا

اندازه نمونه n	برای حدود درونی اصلاح شده $A''_{0.025}$	برای حدود بیرونی اصلاح شده $A''_{0.001}$	برای حدود تناوبی* اصلاح شده درونی $A''_{0.025}$	برای حدود تناوبی* اصلاح شده بیرونی $A''_{0.001}$
۲	۱/۵۱ (۰/۸۳)+	۰/۸۰ (۰/۱۲)+	۲/۳۲	۱/۶۱
۳	۱/۱۶ (۰/۷۱)	۰/۷۷ (۰/۳۲)	۱/۷۰	۱/۳۱
۴	۱/۰۲ (۰/۶۵)	۰/۷۵ (۰/۳۸)	۱/۴۶	۱/۱۹
۵	۰/۹۵ (۰/۶۲)	۰/۷۳ (۰/۴۱)	۱/۳۴	۱/۱۲
۶	۰/۹۰ (۰/۶۰)	۰/۷۱ (۰/۴۲)	۱/۲۶	۱/۰۸

*برای ایجاد اطمینان بیشتر به ضایعات ساخت.

+ اعداد داخل پرانتز زمانی به کار می رود که تولید، ضایعات اندکی داشته باشد و R.P.I از مقدار داده شده در ستون ۲، جدول ۴ تخطی کرده باشد.

برای بدست آوردن حدود کنترل، $\bar{w}$ را در مقادیر مناسب $A''_{0.025}$ و $A''_{0.001}$ ضرب و سپس به حد ترسیم پایینتر (lower drawing limit) اضافه و از حد ترسیم بالاتر (upper drawing limit) کم می کنند. وقتی حدود داخلیتر و خارجیتر به یک دیگر نزدیک می شود یکی از آنها را می توان حذف نمود.

کاربرد حد کنترل پایین به نظر غیر متعارف می رسد و در بسیاری از حالات این حد استفاده نمی شود. اما باید به خاطر داشت که بطور آماری، هر محدوده دارای حدود کنترل است یعنی هم حد کنترل بالا و هم حد کنترل پایین دارد.

بالا و پایین رفتن این محدوده نیز ناشی از عوامل غیر قابل تغییر است. اگر در نمودار کنترل محدوده، نقطه ای بیرون از حد کنترل بالا قرار گیرد فرآیند باید متوقف شود و مورد بررسی قرار گیرد. اگر نقطه ای بیرون از حد کنترل پایین قرار گیرد یعنی تغییر پذیری فرآیند کاهش

و فرآیند بهبود یافته است. چنان چه بتوان عوامل ایجاد تغییر در فرآیند را پیدا کرد می توان عملیات مشابه آینده را نیز اصلاح نمود و کیفیت کلی قطعه کار را بهبود بخشید.

خلاصه ای از روش تنظیم یک نمودار کنترل

در این بخش، روش تنظیم نمودار کنترل بطور گام به گام بیان می گردد. به عنوان مرجع به شکلهای ۱۰-۱۰ و ۱۱-۱۰ توجه کنید. اطلاعات یا داده هایی که استفاده می شود همان داده های جدول چوب خط شکل ۱-۱۰ است.

برای تنظیم نمودار کنترل می توان کاغذ اطلاعات شکل ۱۰-۱۰ را نیز بکار برد. پیشنهاد می شود که کاغذ اطلاعات، پشت نمودار کنترل که باید یک کاغذ چهارگوش باشد چاپ شود. می توان این کاغذ را در یک محفظه شفاف (مثلاً یک محفظهٔ شیشه ای) بروی ماشین و در مقابل اپراتور قرار داد و وقتی که تکمیل شد آن را برگرداند :

گام اول : اندازه نمونه و فرکانس بازرسی را معین کنید. این دو مقدار باید طوری انتخاب شود که ۱۰ الی ۲۰ درصد کل تولید را در برگیرند. اندازه نمونه (sample size) خوب، ۷ است. اما اندازه نمونه ۵ برای محاسبه میانگینها مناسبتر است.

گام دوم : نمونه ها را با فرکانس انتخاب شده، بررسی و اندازه آنها را بروی کاغذ اطلاعات ثبت کنید.

گام سوم : برای هر نمونه، میانگین نمونه و محدوده نمونه (W) را حساب کنید.

گام چهارم : وقتی که تعداد قطعات مورد بررسی به حد کافی رسید (از ۸۰ تا ۱۰۰ قطعه بررسی شد) و اندازه آنها ثبت گردید محدوه میانگین نمونه ($\overline{W}$) را حساب کنید.

گام پنجم : شاخص دقت نسبی را حساب کنید :

$$R.P.I = \frac{\text{تلرانس قطعه کار}}{w}$$

گام ششم : بسته به R.P.I و با کاربرد جدول ۲ یا جدول ۵ (B.S. ۲۵۶۴) حدود نمودار $\bar{x}$ را پیدا کنید.

گام هفتم : با کاربرد ثابتهای جدول ۳ حدود کنترل را برای نمودار کنترل محدوده تنظیم کنید.

شرکت تولیدی G & S با مسئولیت محدود

کاغذ اطلاعات نمودار کنترل

اندازه بررسی شده: $6.00^{+0.01}_{+0.00}$ mm

شماره کاغذ اطلاعات : ۵۳۵/۱۸۲

مدت بازرسی: ۳۰ دقیقه

اندازه نمونه: ۵ عضوی

نام قطعه کار : میخ پرچ Bloggs

شماره قطعه کار : XTH-۵۳۵

بازرس : J.C.

ماشین : سنگزنی بدون مرغک Doaks

شماره ماشین : N۲-DNM

اپراتور : C.J.

شماره نمونه

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱
۱	۱	۲	۴	-۴	-۳	-۲	-۱	۱	۲	-۱	-۲	۲	۱	۰	۵	۰	۱	۲	-۲	۲	۳	-۲	۰	۰	۳	۲	۱	۲	-۱	۲	۲
۲	-۲	۰	۲	۰	۱	۰	۱	۳	-۱	۳	-۱	۲	۲	۰	۲	۳	۱	۲	۲	۱	۰	۳	۰	۲	۰	۲	۳	۱	۰	-۱	۱
۳	۳	۲	۰	-۱	۱	۱	۰	۰	-۲	۰	-۱	۰	۲	-۲	۰	-۱	۰	-۱	۰	۰	۲	۲	۱	۴	۲	۱	۲	۲	-۱	۲	۳
۴	۱	-۳	-۱	۱	۰	۳	۰	۲-	۲	۱	۰	۱	۱	۴	۱	۲	۲	۰	۲	-۱	۱	-۱	۱	۲	۱	۳	۲	۰	۳	۱	۲
۵	۰	۴	۱	۱	-۱	۵	-۳	۱	۱	۱	۳	۰	۰	۰	۱	۲	۰	۰	۳	۱	۱	۳	۲	۱	۰	۰	۱	۲	۲	۳	۰
۶																															
۷																															
۸																															
میانگین	۰/۲	۱	-۰/۴	-۰/۶	-۰/۴	۱/۴	-۰/۶	۰/۶	۰/۴	۰/۸	-۰/۲	۱	۱/۲	۰/۴	۱/۸	۱/۲	۰/۸	۰/۶	۱	۰/۴	۱/۴	۱	۰/۸	۱/۴	۱/۲	۱/۶	۱/۶	۱/۴	۱	۱/۴	۱/۶
محدوده (W)	۵	۷	۵	۵	۴	۷	۴	۵	۴	۴	۵	۲	۲	۶	۵	۴	۲	۳	۵	۳	۳	۵	۲	۴	۳	۳	۲	۲	۳	۴	۳

نمودار محدوده

حدود بالایی :

کنترل = ۲/۳۶×۰/۰۰۳۹

=۰/۰۰۹ میلی متر

اخطار = ۱/۸۱×۰/۰۰۳۹

=۰/۰۰۷ میلی متر

حدود پایینی در این مورد بکار نمی رود.

نمودارمیانگین

حدود کنترل :

= میانگین نمونه ± ($A'0.001\overline{W}$)

=(۰/۰۰۳۹×۰/۵۹)±۶/۰۰۵

=۰/۰۰۲۳±۶/۰۰۵ میلی متر

حدود اخطار :

=(۰/۰۰۳۹×۰/۳۸)±۶/۰۰۵

=۰/۰۰۱۵±۶/۰۰۵ میلی متر

ضریب دقت نسبی :

$$R.P.I = \frac{\text{تلرانس قطعه}}{\overline{W}} = \frac{0.010}{0.0039}$$

=۲/۵۷

فرایند دارای دقت نسبی متوسط است

محاسبات

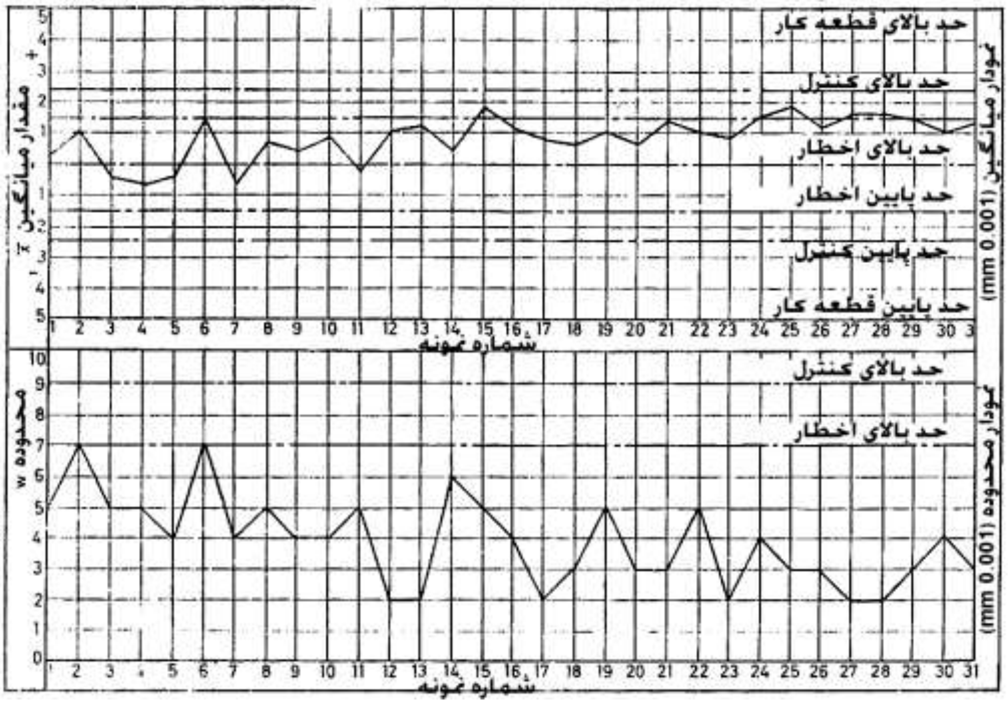
جمع W = ۱۱۸

محدوده میانگین =

$$\overline{W} = \frac{\text{جمع W}}{\text{تعداد نمونه}} = \frac{118}{31}$$

= ۳/۹ (۰/۰۰۳۹) mm

شکل ۱۰-۱۰) کاغذ اطلاعات نمودار کنترل (این کاغذ بر اساس اطلاعات شکل ۱-۱۰ تهیه شده است و باید همراه نمودار کنترل شکل ۱۱-۱۰ بررسی گردد.)



شکل ۱۱-۱۰) نمودار کنترل محدوده (W) و کنترل میانگین ($\overline{X}$)

(این نمودار، معمولاً پشت کاغذ اطلاعات شکل ۱۰-۱۰ قرار داده می شود. چون در نمودار کنترل میانگین انحراف به سمت حد بالای کنترل تمایل دارد در مدت زمان کوتاهی فرایند باید مجدداً تنظیم گردد.)

نمودار کنترل جزئی

موارد بسیاری در صنعت وجود دارد که اگر چه کاربرد نمودارهای کنترل در آنها مطلوب است اما این کار به روشی که در بخش ۳-۱۰ نشان داده شد امکان پذیر نیست. چرا که در این موارد، کنترل فرایند ساخت از طریق کنترل تعداد اندکی از ابعاد مناسب، مورد پذیرش نمی باشد. خط تولیدی را در نظر بگیرید که مجموعه ای را تولید می کند. محصول بوسیله مشتری از طریق یک سیستم نمونه گیری و بر مبنای این فرض که تولید بطور متوسط دو درصد محصول معیوب دارد بررسی می گردد. پس شرایط مطلوب آن است که بطور متوسط در فرایند، بیش از دو درصد محصول معیوب تولید نگردد.

در مثالهایی از این قبیل، بهتر است نمودار کنترل برای بخشی از نمونه که معیوب است تنظیم گردد. این نمودارها را نمودارهای کنترل جزئی می گویند که در آنها درصد قطعات معیوب، معین است و حد کنترل طوری تنظیم می شود که قطعات معیوب بالای این حد قرار گیرند. زیر این حد کنترل، تغییر در درصد قطعات معیوب، طبیعی و قابل انتظار است و در اثر عوامل غیر قابل تعیین ایجاد می گردد.

اگر در فرایندی بطور متوسط G درصد از قطعات خوب و B درصد (یعنی ‎1-G%‎) آنها معیوب باشد و نمونه ها n قطعه ای انتخاب گردد تعداد قطعات معیوب در نمونه، پیرامون B درصد nتغییر خواهد کرد و این مقدار، تعداد مورد انتظار قطعات معیوب در نمونه می باشد. توزیع تغییرات تعداد قطعات معیوب را می توان بصورت بسیار دقیق به کمک توزیع احتمال پواسون (Poisson probability distribution) که در بخش ۲-۶-۱۰ بررسی می گردد توضیح داد.

اگر x (تعداد مورد انتظار قطعات معیوب در نمونه) برابر B درصد n و n اندازه نمونه باشد هر جمله از بسط $e^{-x}e^{x}$ عبارت است از احتمال این که صفر قطعه معیوب، ۱ قطعه معیوب، ۲ قطعه معیوب، ۳ قطعه معیوب و... در نمونه ظاهر گردد. حدود اخطار و کنترل به ترتیب در $\frac{1}{20}$ و $\frac{1}{200}$ احتمالات تنظیم می گردد. بنابراین انتظار داریم که بتوانیم تعداد قطعات معیوب در نمونه را با این احتمالات پیدا کنیم. فرآیندی را با ۲/۵ درصد قطعه معیوب در نظر بگیرید. اندازه نمونه بکار رفته ۱۵۰ می باشد. پس :

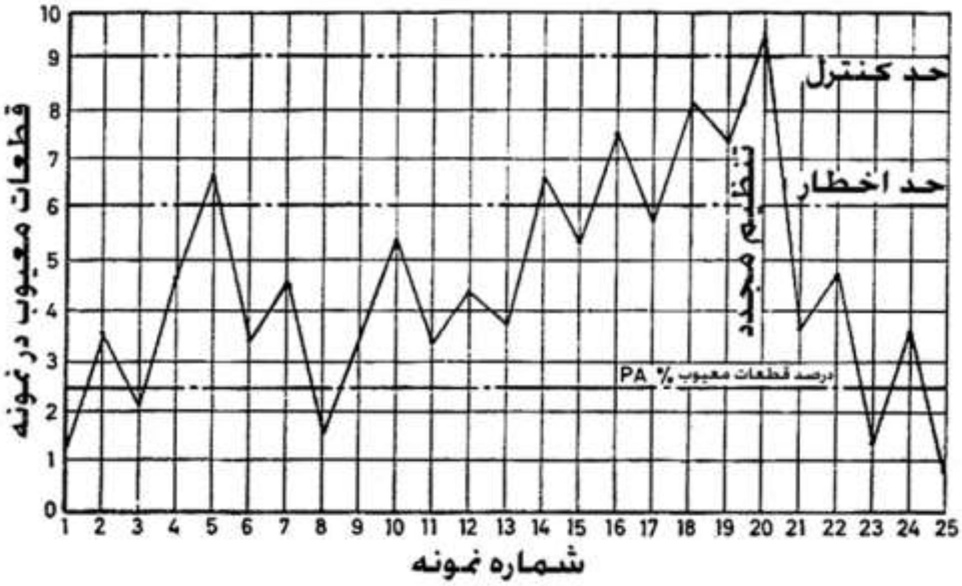
X= ۱۵۰ درصد ۲/۵= ۰/۰۲۵ × ۱۵۰ = ۳/۷۵

از جداول e^{-x} داریم **0.0235** = e^{-x} (و ۳/۷۵ =X) حال :

$$e^{-x}e^{x} = e^{-x} + xe^{-x} + \frac{x^2e^{-x}}{2} + \frac{x^3e^{-x}}{3} + \frac{x^4e^{-x}}{4} + \frac{x^5e^{-x}}{5} + ...$$

$$= 0.0235 + 0.088 + 0.163 + 0.206 + 0.194 + 0.145 + 0.091 + 0.049 + 0.028 + 0.0095 + 0.0035$$

می توان دید که هفتمین جمله که نشان دهنده احتمال وجود ۶ قطعۀ معیوب در نمونه است ۰/۰۹۱ می باشد و هشتمین جمله (احتمال ۷ قطعۀ معیوب) ۰/۰۴۹ می باشد. پس حد اخطار که در احتمال ۰/۰۵ (۰/۰۵=۱:۲۰)تنظیم می گردد باید در ۶ قطعه معیوب منظور شود بطوری که تعداد قطعات معیوب بیش از این تعداد با احتمال کمتر از ۰/۰۵ تولید خواهد شد. بطور مشابه یازدهمین جمله نشان می دهد که تنها با احتمال کمتر از ۰/۰۰۵ (۰/۰۰۵=۱:۲۰۰)، ۱۰ قطعه معیوب تولید خواهد شد بنابراین حد کنترل در ۹ قطعه معیوب تنظیم می گردد. این حدود در نمودار شکل ۱۲-۱۰ نشان داده شده است. توجه کنید که از حد اخطار در نمونه شماره ۵ تخطی شده است ولی فرآیند بعداً بهبود یافته و در نتیجه هیچ اقدامی صورت نگرفته است. این وضعیت در نمونه شماره ۱۴ دوباره دیده می شود اما فرآیند بدتر شده و بهبود نیافته است تا این که در شماره ۲۰ و زمانی که از حد کنترل نیز تخطی شده است فرآیند دوباره تنظیم می گردد. نمونه ها در فواصل منظمی در نظر گرفته می شود بطوری که ۵ الی ۱۰ درصد کل تولید بازرسی گردد و قطعات معیوب بصورت جزئی (درصدی از نمونه) در نمودار رسم می شود.



شکل ۱۲-۱۰) نمودار کنترل جزئی

اندازه نمونه (که بر مبنای درصد متوسط قطعات معیوب در فرآیند می باشد) باید طوری انتخاب شود که حداقل یک قطعه کار معیوب در آن وجود داشته باشد. مثلاً اگر درصد قطعات معیوب در فرایند بطور متوسط ۲/۵ درصد است کوچکترین نمونه ای را که می توان بکار برد ۴۰ = ۲/۵ : ۱۰۰ (یعنی نمونه ۴۰ قطعه ای-م) می باشد. اگر اندازهٔ نمونه افزایش یابد سیستم بازرسی حساستر می شود. چنان چه از حد کنترل تخطی شود مفهوم این خواهد بود که فرآیند تولید، خارج از کنترل است و از درصد مجاز و متوسط تعداد قطعات معیوب در فرآیند تخطی شده است. اگر درصد متوسط قطعه کارهای معیوب فرآیند، نامعلوم باشد با درنظر گرفتن تعدادی از نمونه ها (وقتی که فرآیند بطور طبیعی در حال انجام است) مقدار متوسط درصد قطعه کارهای معیوب در نمونه ها بدست می آید. در B.S. ۲۵۶۴ مفهوم ساده ای از یافتن حد کنترل به همراه توضیح کاملی از عملکرد این قبیل سیستمهای کنترل کیفیت در نمودارهای کنترل جزئی ارائه شده است.

نمودارهای کنترل حدی فشرده

در بخش ۴-۱۰ شرح داده شد که سیستم نقص جزئی (fraction defective) تنها زمانی بکار می رود که تعداد قطعه کارهای معیوب معینی مورد انتظار است. با ایجاد اصلاح ساده ای بروی این سیستم می توان آن را برای زمانی که کنترل ابعادی توسط سنجه حدی انجام می

شود نیز بکار برد (به فرض، نرخ ضایعات خیلی پایین است). این کار توسط سنجه حدی فشرده (compressed limit gauge) انجام می شود. یک سنجه حدی را در نظر بگیرید که برای بررسی قطعه کار استفاده می گردد. حد اندازه و اندازه بکار رفته برای ساخت سنجه بخوبی در محدوده ابعادی قطعه کار قرار دارد. در اثر کاهش تلرانس قطعه کار، سنجه حدی، تعداد مشخصی از قطعه کارهای خوب را در هر دو انتهای منطقه تلرانسی (tolerance zone) قبول نخواهد کرد. اگر این قبیل سنجه ها به همراه یک نمودار کنترل جزئی بکار رود (ملاحظه می گردد که-م) قطعات ظاهراً معیوب در حقیقت قابل قبول هستند و مبنای غیر واقعی برای نمودار تهیه شده است. ابعاد این سنجه ها در هر دو سنجه برو و نرو معمولاً معادل با ابعاد حدی قطعه کار و کوچکتر از ۲۰ درصد تلرانس کلی قطعه کار می باشد. بنابراین تلرانس بکار رفته برای سنجش با سنجه تنها ۶۰ درصد تلرانس حقیقی قطعه کار است. کاربرد این قبیل سیستمهای بازرسی محدود به سنجش ابعادی مستقیم با سنجه نیست. به عنوان مثال، حدود میزان سازی (calibration limits) یک سرعت سنج، حدود فشار یک پمپ بنزین یا مقادیر حدی یک مقاومت الکتریکی، همگی قابل فشرده سازی و بکارگیری این قبیل سیستمهای بازرسی می باشد.

بازرسی نمونه ای از کالاهای ورودی

بیشتر شرکتهای صنعتی، بخش قابل توجهی از قطعات مورد نیاز خود را از سازندگان خاصی خریداری می کنند. این شرکتها به منظور حفظ اعتبار خود مجبور هستند که کالاهای خریداری شده را کنترل کیفیت کنند. ارزیابی قطعات در گروههای بزرگ با سه روش قابل انجام است :

الف-بررسی نقطه ای (spot checking)

در این روش نمونه کوچکی از قطعات موجود در گروه بررسی می گردد. بنابراین نتایج حاصل تا حدی منعکس کننده کیفیت این گروه از قطعات خواهد بود. این روش اگر چه ارزان است ولی خطای بالایی دارد ضمن آن که عوامل خطا ناشناخته هستند.

ب-بازرسی صد در صد (inspection ٪۱۰۰)

بازرسی صد در صد که شامل بررسی تک تک قطعات است بدون شک بهترین روش کنترل کیفیت می باشد اما به علت خستگی اپراتور، روش قابل اعتمادی نیست. به علاوه روش بسیار گرانی می باشد.

ج-نمونه برداری آماری (statistical sampling)

در این روش، نمونه ای که اندازه آن به دقت محاسبه شده است بصورت تصادفی از گروه قطعات انتخاب می گردد. اگر نمونه دارای کمتر از x نقص باشد گروه قابل قبول خواهد بود. اگر نمونه بیش از y نقص داشته باشد گروه قطعات، مردود اعلام می گردد و برای بازرسی یا کنترل کیفیت صد در صد به سازنده بازگردانده می شود. اگر چه در بیشتر موارد، کنترل کیفیت نمونه برداری نمی تواند جانشین کنترل کیفیت ۱۰۰ درصد شود اما گاهی بکارگیری آن هزینه ها را بطور قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. به علاوه عوامل خطا در این روش مشخص است. بنابراین می توان عوامل خطا را در قیمت گذاری و تقاضاهای تضمینی و مواردی از این دست اعمال نمود. این قبیل سیستمهای کنترل کیفیت برمبنای موارد زیر قرار دارند :

-نمونه، نماینده گروه است.

-یک گروه از قطعات بر اساس درجه معینی از نقصها قبول یا رد می شود.

برای درک این نکات باید از تئوری ساده احتمال، آگاهی داشته باشیم.

تئوری ساده احتمال

احتمال یک رویداد در بازه [0,1] اندازه گیری می شود. رویدادی که حتماً اتفاق می افتد احتمال ۱ دارد و رویدادی که اتفاق نخواهد افتاد دارای احتمال صفر می باشد. مثلاً اگر مرگ را به عنوان یک رویداد در نظر بگیریم احتمال این رویداد ۱ است. همچنین پیروزی در مسابقه شرط بندی فوتبال اگر فراموش شده باشد که فیش مربوط به مسابقه پست شود دارای احتمال صفر خواهد بود. تمام احتمالات دیگر بین این دو احتمال اتفاق خواهد افتاد. از طرفی یک رویداد ممکن است از چند راه مختلف اتفاق افتد بنابراین مجموع احتمال تک تک روشهای وقوع یک رویداد، ۱ خواهد بود.

توزیع احتمال دو جمله ای(binomial probability distribution)

فرض کنید اگر یک دسته کارت قرمز و سیاه رنگ بر زده و از میان آنها کارتی بیرون کشیده شود احتمال قرمز یا سیاه بودن کارت یکسان باشد. بنابراین چون کارتها یا قرمز یا سیاه هستند احتمال قرمز ۰/۵ و احتمال سیاه نیز ۰/۵ خواهد بود. بنابراین دو رویداد خواهیم داشت. وقوع کارت قرمز یا R و وقوع کارت سیاه یا B که بنابراین مجموع احتمال وقوع آنها ۱ خواهد بود :

$$0.5+0.5=1$$

حال فرض می کنیم که دو کارت با هم بیرون کشیده شود پس خواهیم داشت: BB یا BR یا RB یا RR

با توجه به این که RB و BR هر دو یک رویداد هستند داریم :

$$RR+2BR+BB=(0.5\times 0.5)+2\times(0.5\times 0.5)+(0.5\times 0.5)=0.25+0.5+0.25=1$$

پس احتمال این که هر دو کارت قرمز باشد $1/4$ یا ۰/۲۵، احتمال این که هر دو کارت سیاه باشد نیز ۰/۲۵ و احتمال این که یکی سیاه و یکی قرمز باشد $1/2$ یا ۰/۵ است. اگر سه کارت با هم بیرون کشیده شود :

$$\underbrace{RRR}_{RRR},\underbrace{RRB,RBR,BRR}_{3RRB},\underbrace{BBR,BRB,RBB}_{3BBR},\underbrace{BBB}_{BBB}$$

$$0.5^3+(3\times 0.5^3)+(3\times 0.5^3)+0.5^3=0.125+0.375+0.375+0.125=1$$

پس احتمال این که هر سه کارت قرمز باشد $1/8$ یا ۰/۱۲۵، احتمال این که دو کارت قرمز و یکی سیاه باشد $\frac{3}{8}$ یا ۰/۳۷۵، احتمال این که دو کارت سیاه و یکی قرمز باشد ۰/۳۷۵ و احتمال این که همه کارتها سیاه باشد ۰/۱۲۵ است. بنابراین معادله احتمال سه حالت فوق الذکر به ترتیب عبارت است از :

(۱) $R+B$

(۲) $R^2+2RB+B^2$

(۳) $R^3+3R^2B+3RB^2+B^3$

همانطور که دیده می شود این معادلات از بسط دو جمله ای (binomial expansion) پیروی می کند. این قضیه، احتمال وقوع یک حادثه از یک روش را به خوبی شرح می دهد. در

حقیقت اگر یک رویداد به دو روش اتفاق بیفتد (مثلاً سیاه یا قرمز، درست یا غلط، مردود یا قبول) و n حادثه نیز به وقوع بپیوندد، جمله های متوالی بسط صفحه بعد، احتمال روشهای مختلف وقوع حادثه ها می باشند :

$$(R+B)^n = R^n + nR^{(n-1)}B + \frac{n(n-1)R^{(n-2)}B^2}{2!} + \frac{n(n-1)(n-2)R^{(n-3)}B^3}{3!} + \dots$$

اگر احتمال B و R در مورد کارتها ۰/۵ و ۰/۵ باشد و آنها را در بسط فوق قرار دهیم آنگاه جملات متوالی به ترتیب، احتمال بیرون آمدن تمام قرمزها، یک سیاه، دو سیاه، سه سیاه و تمام کارتهای سیاه می باشد. گروهی از قطعات را در نظر بگیرید که R درصد آنها قطعه کارهای خوب و B درصد آنها قطعه کارهای بد باشد. اگر یک نمونه n قطعه ای انتخاب شود جملات متوالی بسط $(R+B)^n$ احتمال این که نمونه شامل $0,1,2,3,\dots,n$ قطعه معیوب باشد را بدست می دهد. به عنوان مثال اگر نمونه، شامل ۱۰ درصد قطعه کار معیوب و ۹۰ درصد قطعه کار مورد قبول باشد و یک نمونه ۴۰ تایی در نظر گرفته شود :

$$(0.9+0.1)^{40} = (0.9)^{40} + 40(0.9)^{39}(0.1) + \frac{40\times 39(0.9)^{38}(0.1)^2}{2} + \dots$$

$$= 0.0148 + 0.065 + 0.142 + \dots$$

در نتیجه احتمال وجود صفر نقص در نمونه ۰/۰۱۵، یک نقص ۰/۰۶۵، دو نقص ۰/۱۴۲ و.... می باشد. احتمال یک نقص یا کمتر، مجموع اولین دو جمله می باشد یعنی : $0.015+0.065=0.08$ و احتمال ۲ نقص یا کمتر، مجموع اولین سه جمله است :

$0.142+0.065+0.015=0.222$

توزیع احتمال پواسون (the poisson probability distribution)

محاسبه احتمال به کمک سیستم دو جلمه ای، دشوار است. بسط دیگری که برای این کار بسیار مناسب می باشد از بسط $e^x e^{-x}$ بدست می آید. در این بسط، جملات متوالی، احتمال وجود $0,1,2,3,\dots,n$ قطعه کار معیوب در نمونه است و x تعداد قطعات معیوب مورد انتظار یا مجاز در نمونه می باشد.

$$e^{-x}e^x = e^{-x}\left(1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots\right)$$

$$= e^{-x} + xe^{-x} + \frac{x^2e^{-x}}{2!} + \frac{x^3e^{-x}}{3!} + \dots$$

از آنجا که مقادیر e^{-x} در جداول ریاضی، جداول لگاریتمی و دیگر جداول موجود است عمل محاسبه در این روش ساده تر می باشد. حال یک بار دیگر مثال ذکر شده که در آن ۱۰ درصد قطعات معیوب و نمونه دارای ۴۰ قطعه کار بود را در نظر می گیریم. بنابراین ۴ = ۱۰درصد۴۰ = x می باشد. پس انتظار می رود که چهار نقص در یک نمونه ۴۰ تایی موجود باشد.

$$e^{-x}e^{x} = e^{-4} + 4e^{-4} + \frac{4^2e^{-4}}{2!} + \frac{4^3e^{-4}}{3!} + \dots$$

$$= e^{-4} + 4e^{-4} + \frac{16e^{-4}}{2} + \frac{64e^{-4}}{6} + \dots = 0.018 + 0.072 + 0.144 + 0.192 + \dots$$

یعنی احتمال وجود نقص صفر در نمونه ۰/۰۱۸، احتمال وجود یک نقص در نمونه ۰/۰۷۲، احتمال وجود دو نقص در نمونه ۰/۱۴۴، احتمال وجود سه نقص در نمونه ۰/۱۹۲، احتمال وجود یک نقص یا کمتر در نمونه ۰/۰۹ ($0.018+0.072$) و احتمال وجود دو نقص یا کمتر در نمونه ۰/۲۳۴ ($0.018+0.072+0.144$) و الی آخر است. بررسی این احتمالات نشان می دهد که توزیع حاصل چقدر با توزیع احتمال دو جمله ای که در بخش ۱-۶-۱۰ توضیح داده شد مشابه است. در حقیقت نتایج یک مسئله، حاصل از هر دو روش فوق الذکر، بسیار مشابه می باشد و تفاوت آنها تنها در سادگی محاسبه و رسیدن به جواب است.

مشخصات سیستمهای نمونه گیری

فرض کنید برای کنترل کیفیت از سیستم نمونه گیری استفاده شده باشد که در آن به بازرس، موارد زیر دستور داده شده است :

-از گروه قطعات مورد نظر یک نمونه تصادفی ۴۰ تایی انتخاب شود.

-اگر نمونه شامل یک قطعه کار معیوب یا کمتر از آن باشد گروه قطعات مورد قبول است. اگر نمونه شامل دو قطعه کار معیوب یا بیشتر از آن باشد گروه قطعات مردود است.

این سیستم بصورت $40\frac{1}{2}$ نشان داده می شود. اگر گروهی، شامل درصد معینی قطعه کار معیوب باشد، دانستن احتمال مورد قبول (یا مردود) بودن گروه لازم است. در بخش ۲-۶-۱۰ نشان داده شد که احتمال وجود $0,1,2,3,\dots,n$ قطعه معیوب، جملات متوالی بسط $e^{-x}e^{x}$ می

باشد. در این مورد برای تعیین احتمال پذیرش گروه قطعات با فرض این که مقدار مجاز قطعات معیوب در نمونه، ۱ یا کمتر از آن (یعنی ۱ یا صفر) باشد به جمع اولین دو جمله این بسط نیاز خواهیم داشت :

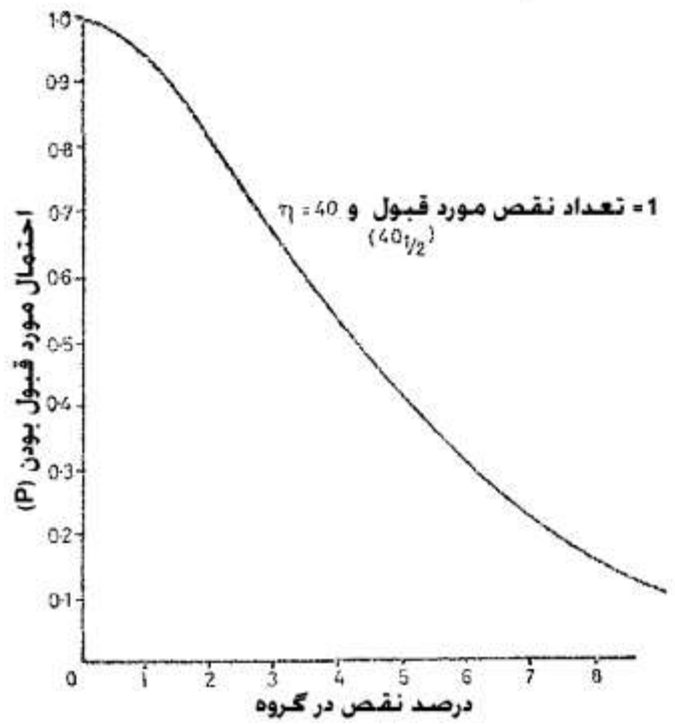
احتمال پذیرش $= e^{-x} + xe^{-x}$

که در آن x تعداد قطعات معیوب مورد انتظار یا مجاز در نمونه می باشد :

درصد قطعات معیوب در گروه $\times n = x$

n تعداد قطعات موجود در نمونه است. بهترین راه برای نشان دادن مشخصات سیستم، رسم نمودار احتمال پذیرش گروه برحسب درصد قطعات معیوب گروه می باشد. این منحنی که به آن منحنی مشخصه کار (Operating Characteristic Curve) یا بطور مخفف، منحنی O.C. می گویند در شکل ۱۳-۱۰ برای یک سیستم نمونه گیری مفروض نشان داده شده است. مؤلفه هایی که باید برای این کار بدست آید بصورت زیر در جدول نمایش داده می شود :

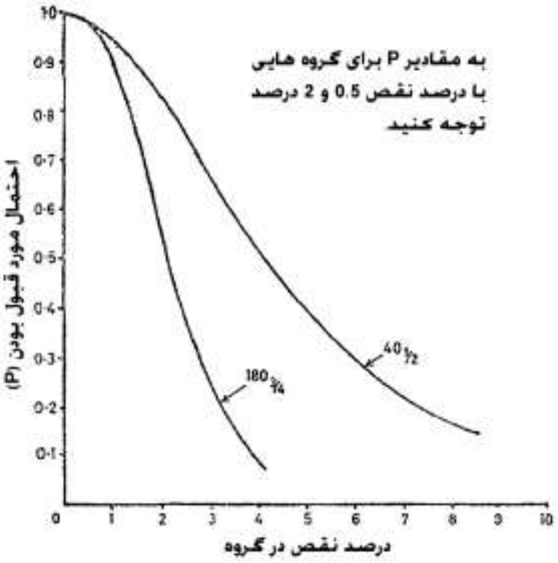
درصد نقص در گروه	$x = Bn$	e^{-x}	xe^{-x}	احتمال مورد قبول بودن $P = e^{-x} + xe^{x}$
۰/۵	۰/۲	۰/۸۲	۰/۱۶۴	۰/۹۸۴
۱/۰	۰/۴	۰/۶۷	۰/۲۶۸	۰/۹۳۸
۱/۵	۰/۶	۰/۵۵	۰/۳۳	۰/۸۸
۲	۰/۸	۰/۴۵	۰/۳۶	۰/۸۱
۳	۱/۲	۰/۳۰	۰/۳۶	۰/۶۶
۴	۱/۶	۰/۲۰	۰/۳۲	۰/۵۲
۵	۲/۰	۰/۱۴	۰/۲۸	۰/۴۲
۶	۲/۴	۰/۰۹۰	۰/۲۱۶	۰/۳۰۶
۷	۲/۸	۰/۰۶۰	۰/۱۶۸	۰/۲۲۸
۸	۳/۲	۰/۰۴۰	۰/۱۲۸	۰/۱۶۸



شکل ۱۳-۱۰) منحنی مشخصه کار برای سیستم نمونه گیری

از رسم اولین ستون برحسب آخرین ستون، منحنی مشخصه کار که در شکل ۱۳-۱۰ مشاهده می گردد حاصل می شود. این منحنی به اندازه گروه (batch size) بستگی ندارد. در حقیقت یک طرح نمونه گیری معین، منحنی .O.C مشابهی را برای گروهی از قطعات با هر تعداد ارائه می دهد به شرطی که نمونه انتخابی از آن گروه از حدود ۲۰ درصد گروه بیشتر نباشد. اگر نمونه بزرگتری با تعداد نقص مورد پذیرش بیشتر، استفاده شود تعداد بیشتری از گروههای خوب، قبول و تعداد بیشتری از گروههای بد، مردود خواهد شد. روش تشخیص در شکل ۱۴-۱۰ نشان داده شده است. در این شکل، منحنی .O.C برای طرحهای نمونه گیری $40\frac{1}{2}$ و $180\frac{3}{4}$ مقایسه شده است ($180\frac{3}{4}$ یعنی اندازه نمونه برابر با ۱۸۰ قطعه کار است و اگر سه یا کمتر از سه قطعه کار معیوب در نمونه موجود می باشد گروه مورد قبول خواهد بود). جدول طرح نمونه گیری $180\frac{3}{4}$ بصورت زیر است :

درصد نقص در گروه	x	e^{-x}	xe^{-x}	$\frac{x^2e^{-x}}{2!}$	$\frac{x^3e^{-x}}{3!}$	P
۰/۵	۰/۰	۰/۴۰۷	۰/۳۶۶	۰/۱۶۳	۰/۰۴۹	۰/۹۸۵
۱/۰	۱/۸	۰/۱۶۵	۰/۲۹۷	۰/۲۶۷	۰/۱۴۰	۰/۸۶۹
۱/۵	۲/۷	۰/۰۶۷	۰/۱۸۱	۰/۲۴۵	۰/۲۱۶	۰/۷۰۹
۲	۳/۶	۰/۰۲۷	۰/۰۹۷	۰/۱۷۵	۰/۲۰۹	۰/۵۰۸
۳	۵/۴	۰/۰۰۵	۰/۰۲۷	۰/۰۷۳	۰/۱۳۱	۰/۲۳۶



شکل ۱۴-۱۰)مقایسه منحنی O.C. برای دو سیستم نمونه گیری $40\frac{1}{2}$ و $180\frac{3}{4}$

توجه کنید که احتمال برابر است با : $P = e^{-x} + xe^{-x} + \frac{x^2e^{-x}}{2!} + \frac{x^3e^{-x}}{3!}$

با بررسی این منحنیها دیده می شود که اگر یک گروه شامل $\frac{1}{2}$ درصد قطعه کار معیوب باشد آنگاه در هر دو منحنی، احتمال پذیرش ۰/۹۸ خواهد بود. اگر یک گروه $1\frac{1}{2}$ درصد قطعه کار معیوب داشته باشد آنگاه طرح نمونه گیری $40\frac{1}{2}$ احتمال پذیرش ۰/۸۸ را ارائه می دهد در حالی که طرح نمونه گیری $180\frac{3}{4}$ احتمال پذیرش ۰/۷۱ را بدست می دهد. با افزایش درصد قطعات معیوب در گروه، این اختلاف در احتمال پذیرش نیز افزایش می یابد.

اکنون دو پرسش به نظر می رسد. اول این که آیا هرکدام از دو طرح نمونه گیری بالا را می توان بطور دلخواه انتخاب نمود؟ پاسخ آن است که در عمل، طرحی که مسائل اقتصادی را نیز در نظر می گیرد مناسبتر می باشد. دوم این که چند درصد قطعات معیوب از طریق یک شرکت کنترل کیفیت که با سیستم نمونه گیری کار می کند به فروشگاهها و انبارهای شرکت وارد می شود؟ پس بطور خلاصه طرح اقتصادیتر و درصد قطعات معیوب دو مسئله مهمی هستند که باید در ادامه مورد بررسی قرار گیرند.

طرح نمونه گیری اقتصادی

هر سیستم نمونه گیری با خطاهایی(risks) همراه است. پرسشهایی که فوراً مطرح می شود عبارتند از :

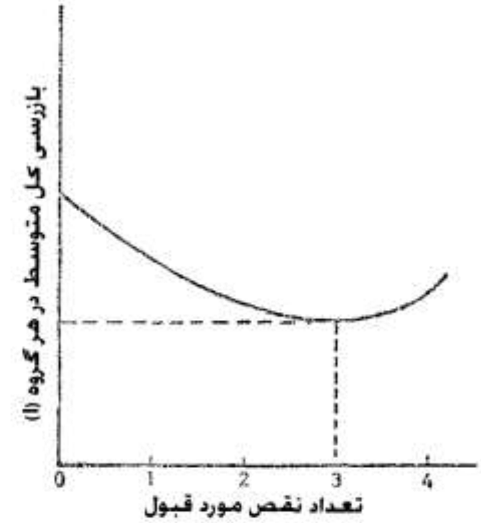
الف-بدترین گروه مورد قبول که به گروه L.T.P.D معروف است چیست؟ (L.T.P.D یعنی با بیشترین درصد نقص یا Lot Tolerance Percent Defective)

ب-با قبول کردن گروهی بدتر از L.T.P.D که حاصل نمونه ای به نظر خوشبین می باشد چه خطایی ایجاد می گردد (به این خطا، خطای مصرف کننده (Consumer's Risk) می گویند)؟

منحنی .O.C در هر طرح نمونه گیری که انتخاب می شود باید از نقطه ای عبور نماید که طول آن برابر خطای مصرف کننده (بروی محور احتمال پذیرش) و عرض آن برابر L.T.P.D (بروی محور درصد قطعات معیوب در گروه) باشد. تنها تعدادی از طرحهای نمونه گیری چنین منحنی .O.C خواهند داشت. اقتصادیترین طرح نمونه گیری آن است که با کمترین تعداد بازرسی به بهترین شکل، مجموعه تحت بررسی را پوشش دهد. در هر سیستم بازرسی، تمامی گروه ها یک نمونه بازرسی شده n قطعه ای دارند. تمام گروه های مردود شده، باقی مانده N-n قطعه کار ۱۰۰ درصد بازرسی می شوند. یک فرآیند، طی روندی طولانی و هنگامی که بطور طبیعی کار می کند، درصد متوسطی از قطعات معیوب تولید خواهد کرد که معروف به میانگین فرآیند است :

$$I = n + (N - n) \times R$$

N اندازه گروه(batch size)، n اندازه نمونه(sample size) و R خطای تولیدکننده است. I تابع اندازه گروه و R تابع اندازه نمونه می باشد. اگر برای یک N معین، I برحسب اندازه نمونه رسم گردد، منحنی مانند شکل ۱۵-۱۰ حاصل خواهد شد. این منحنی برای گروه قطعات مورد نظر، اقتصادیترین اندازه نمونه را بدست می دهد. آقایان Dodge و Romig (پیشگامان این کار) در کتاب خود به نام جداول کنترل کیفیت نمونه گیری که توسط انتشارات Wiley در سال ۱۹۵۹ منتشر شده است اقتصادیترین طرحها برای L.T.P.D و خطای مصرف کننده را ارائه نموده اند.



شکل ۱۵-۱۰)برای یک اندازه گروه و درجه حفاظت خاص، سیستم نمونه گیری موجود می باشد که طی دوره طولانی به کمترین بازرسی برای هر گروه نیاز دارد. در این شکل، سیستم نمونه گیری با کمترین نیاز به بازرسی، سیستمی است که گروه قطعات را زمانی قبول می نماید که در نمونه انتخابی آن، سه یا کمتر از سه قطعه کار معیوب وجود داشته باشد.

سطح کیفیت متوسط مورد پذیرش برای موجودی

سطح کیفیت متوسط حاصل شده (Average Outgoing Quality Level=A.O.Q.L) یا بطور خلاصه سطح کیفیت برای یک طرح نمونه گیری معین، به راحتی و توسط منحنی O.C. قابل محاسبه است. طرح نمونه گیری $180\frac{3}{4}$ را در نظر بگیرید و فرض کنید که ۱۰۰۰ گروه ۱۰۰۰ قطعه ای بازرسی شده است (تمام گروه ها ۱٪ قطعه کار معیوب دارند). ۱۰۰۰ گروه ۱۰۰۰ قطعه ای، ۱/۰۰۰/۰۰۰ قطعه کار را شامل می شود. از منحنی O.C. و با در نظر

گرفتن ۱٪ قطعه کار معیوب در گروه ها، ۸۶/۹٪ از گروه ها مورد قبول خواهد بود و گروه های باقی مانده (۱۳/۱ درصد از ۱۰۰۰ گروه) رد خواهد شد. بنابراین ۱۳۱۰۰۰ قطعه کار مردود می شود. حال از ۸۶۹۰۰۰ قطعه کار پذیرفته شده ۱٪ معیوب هستند. پس در کل موجودی، ۸۶۹۰ قطعه کار، معیوب می باشد. اکنون اگر ۱۳۱۰۰۰ قطعه کار رد شده ۱۰۰٪ بازرسی شود و هر قطعه کار معیوب با یک قطعه کار خوب تعویض گردد کل قطعات ۱/۰۰۰/۰۰۰ است که از بین آنها ۸۶۹۰ قطعه معیوب می باشد.

درصد قطعات معیوب در موجودی $= \frac{8690}{1000000} \times 100 = 0.869\%$

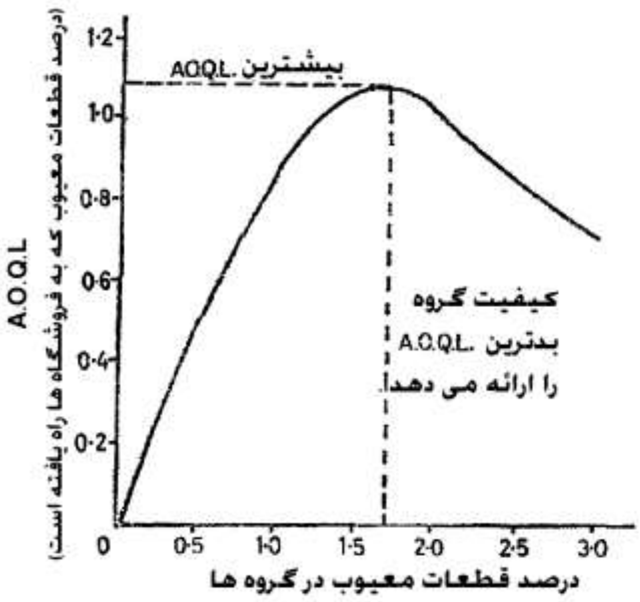
حال :

A.O.Q.L = درصد قطعات معیوب در گروه × احتمال پذیرش = 0.869%

با جدول بندی نتایج، برای طرح نمونه گیری $180\frac{3}{4}$ خواهیم داشت :

درصد نقص در گروه	احتمال قبولی	A.O.Q.L
۰/۵	۰/۹۸۵	۰/۴۹۳
۱/۰	۰/۸۶۹	۰/۸۶۹
۱/۵	۰/۷۰۹	۱/۰۶۴
۲	۰/۵۰۸	۱/۰۱۶۰
۳	۰/۲۳۶	۰/۷۰۸

با رسم A.O.Q.L برحسب درصد قطعات معیوب در گروه، منحنی مشابه با منحنی شکل ۱۶-۱۰ ایجاد خواهد شد. بنابراین بدترین A.O.Q.L تقریباً ۱/۱ درصد می باشد که رسیدن به آن دور از ذهن است. مقدار ۱/۱ درصد تنها وقتی اتفاق می افتد که تمام گروه ها حدوداً ۱/۷ درصد قطعه کار معیوب داشته باشند که این موضوع البته بعید است (ارقام به مثال بالا مربوط می شود). گروه های خوب، قطعات معیوب کمی دارند و سیستم مراقبت می کند که بیشترین گروه های بد ممکن، مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۱۶-۱۰) نمودار A.O.Q.L که بر اساس درصد قطعات معیوب در گروه ها رسم شده است.

نمونه گیری دوتایی(double sampling)

سیستم نمونه گیری تکی که در بخش قبلی شرح داده شد در بهبود اقتصادی و کنترل کیفیت بسیار مؤثر می باشد اما بازرسی هر نمونه کار مشکلی است (مثلاً بازرسی کامل یک نمونه ۱۸۰ قطعه ای کار بسیار پر زحمتی است).

اگر گروهی، خیلی خوب یا خیلی بد باشد یک نمونه کوچک از آن، این موضوع را روشن خواهد کرد. این مطلب به وسیله Romig و Dodge بیان شد. آنها برای کاهش تعداد کل بازرسی یک سیستم دو نمونه ای را پیشنهاد کردند. در این سیستم دستورات مربوط به نحوه بازرسی عبارت است از :

الف-از گروه، یک نمونه تصادفی n_1 را انتخاب کنید (n_1 تعداد قطعات موجود در نمونه است).

ب-اگر نمونه، شامل x قطعه کار معیوب یا کمتر از آن بود گروه را قبول کنید.

ج-اگر نمونه، شامل y قطعه کار معیوب یا بیشتر بود گروه را مردود اعلام کنید.

د-اگر نمونه، بیشتر از x و کمتر از y قطعه کار معیوب داشت یک نمونه دیگر انتخاب کنید که n_2 قعطه کار را شامل گردد.

ه-اگر در کل قطعات این دو نمونه (n_1+n_2)، کمتر از y قطعه کار، معیوب بود گروه را قبول کنید.
و-اگر در کل قطعات این دو نمونه، y یا بیشتر از y قطعه کار، معیوب بود گروه را مردود اعلام کنید. جداول Dodge-Romig جزئیات دیگری از سیستم نمونه گیری دوتایی را نیز ارائه می دهند. برای بررسی بیشتر جزئیات، به این جداول مراجعه نمایید.

نتیجه گیری

کتابهای زیادی در مورد کنترل کیفیت آماری وجود دارد که به تفصیل به این موضوع پرداخته اند. در این فصل تنها خلاصه ای از کنترل کیفیت آماری ارائه شد که امیدواریم قابل فهم بوده باشد. مشابه فصول دیگر، در این فصل نیز مهمترین و جالبترین موضوعات آماری که ابزاری برای بازرس و بازرسی است بررسی گردید. البته اهمیت و پیچیدگی کنترل کیفیت آماری پیوسته رو به رشد می باشد و کاربردهای آن به مرور افزایش یافته است. با این همه، تأکید می شود که استفاده از آمار نمی تواند تمام مشکلات صنعت را بهبود بخشد. در این فصل فرض بر آن است که با گذشت زمان، روشهای بکار گرفته شده و نتایج حاصل از آنها به مرور اصلاح می گردد.
نکته آخر این که کاربرد یک نمونه به تنهایی، اطلاعات جزئی یک گروه از قطعات را ارائه نمی کند. اما با گذشت زمان برخی از نمونه ها، می توانند جزئیات بیشتری را درباره گروه ارائه نمایند.

ضمیمه فصل ششم :

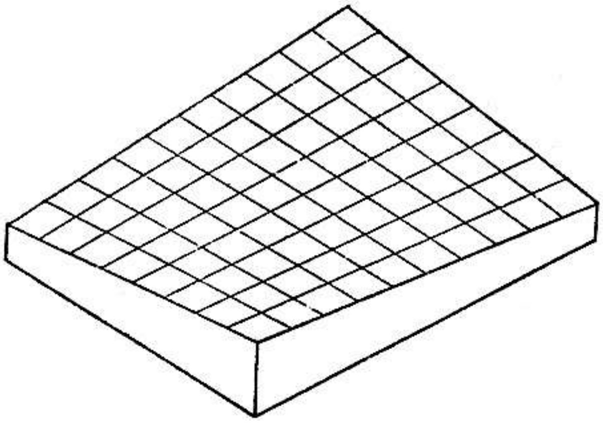
تعیین تختی یک سطح

در فصل ۶ شرح داده شد که چگونه از یک اتوکالیماتور یا تراز برای اندازه گیری خطای تخت بودن کشویی ماشین ابزار استفاده می گردد. برای تعیین میزان انحراف از تخت بودن یک صفحه که زیرمجموعه ای از یک سطح بزرگ مانند سطح یک میز یا میز ماشین ابزار است نیز اصول مشابهی بکار برده می شود. یک سطح تخت متشکل از بی نهایت خط می باشد که به آنها مولد می گویند. برای این که سطح دقیقاً تخت باشد باید شرایط زیر برقرار گردد :

الف-تمام مولدها باید مستقیم باشد.

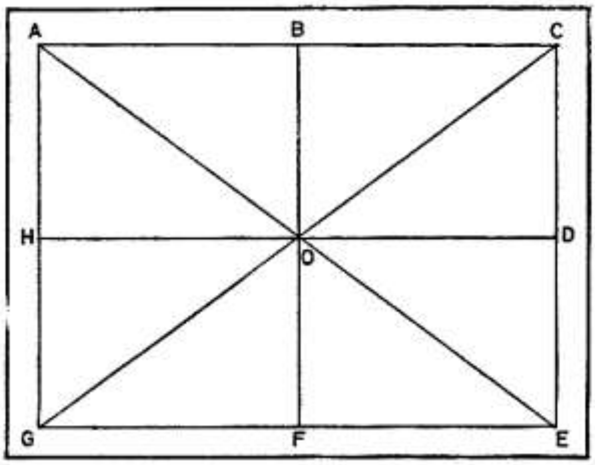
ب-تمام مولدها باید در یک صفحه قرار گیرد.

مشکل اصلی برقراری شرط دوم است و شرط اول معمولاً بطور کامل قابل دستیابی است. ممکن است همه مولدها مستقیم باشد ولی سطح مورد نظر تخت نباشد. بعنوان مثال قطعه کار نشان داده شده در شکل ۱-۱۱ را در نظر بگیرید. اگر تخت بودن چنین سطحی به موازات اضلاعش بررسی گردد سطح، تخت به نظر خواهد رسید حال آن که در سرتاسر یک قطر، مقعر و در سرتاسر قطر دیگر، محدب است. از شکل ۱-۱۱ فوراً مشخص می شود که برای اندازه گیری تخت بودن باید قطعه کار در جهت قطرهایش بازرسی گردد. به علاوه مولدهای موازی با اضلاع نیز باید بررسی شود. اندازه گیری مستقیم بودن تمام این خطوط (قطرها و مولدهای موازی با اضلاع قطعه کار) را می توان همان گونه که در فصل ۶ ذکر شد بوسیله اتوکالیماتور انجام داد ولی جهت انجام این اندازه گیریها لازم است که هر خط مورد آزمایش را با خطوط دیگر ربط داد یعنی درستی شرط دوم را برای آنها به اثبات رساند.



شکل ۱-۱۱) سطحی که تمام مولدهایش موازی اضلاع و مستقیم هستند اما سطح تخت نیست.

سطح نشان داده شده (به صورت دو بعدی) در شکل ۲-۱۱ را ببینید. در این شکل، ۸ مولد اصلی نشان داده شده است. این مولدها همان طورکه دیده می شود باید درست در داخل لبه های میز انتخاب شود تا از بررسی لبه های میز که مستعد خراب شدن هستند اجتناب گردد. طول همه خطوط باید مضربی از طول پایه تراز یا پایه منعکس کننده (reflector stand) هر وسیله اندازه گیری که بکار گرفته شده است باشد. بهتر است که طول اضلاع و قطرها با نسبت ۵ : ۴ : ۳ انتخاب گردد.



شکل ۲-۱۱) سطح میزی که برای انجام آزمایش تخت بودن
با کمترین مولدها علامتگذاری شده است.

روش کار به این صورت است :

۱- مستقیم بودن هر مولد بررسی می گردد.

۲- خطای کل هر مولد به صورت ستونی و در یک جدول قرار داده می شود.

خطای کل مربوط به هر مولد در آزمایش مستقیم بودن مولدها

خطوط مورد آزمایش

A-C	A-E	A-G	G-C	G-E	C-E	B-F	H-D
صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر
صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر
-۱	صفر	+۱	+۲	+۱	-۱	+۱	+۳
-۴	-۱	+۲	+۴	-۳	+۲	+۲	+۷
-۷	-۲	-۲	+۵	-۶	+۵	-۲	+۹
-۱۲	-۴	-۶	+۶	-۸	+۳	-۵	+۹
-۱۵	-۸	-۶	+۴	-۹	+۲	-۷	+۶
-۱۵	-۱۲		+۲	-۱۱			+۹
-۱۸	-۱۷		صفر	-۱۲			+۱۰
	-۲۱		-۲				
	-۲۴		صفر				

۳-انتهای مولدهایAC، AG و CG را برای رسیدن به مقدار صفر تصحیح کنید. این کار باعث می گردد ارتفاع نقاط A و C و G صفر شود و این سه نقطه یک صفحه مبنای انتخابی تشکیل دهند. به این ترتیب ارتفاع نقاط دیگر نسبت به این صفحه سنجیده شود.

۴-با توجه به قسمت قبل، ارتفاع O نسبت به صفحه ACG (=OOO) معین است. چون O نقطه میانی مشترک AE، CG، BF و HD است پس تمام نقاط AE معین خواهد بود. این کار با صفر قرار دادن A (A=O) و تصحیح O بروی AE به طوری که بر نقطه میانی خط CG منطبق شود انجام می گردد.

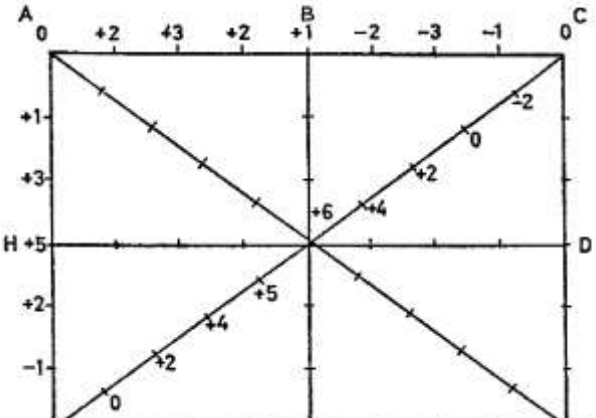
۵-تمام نقاط دیگر AE را به مقداری متناسب با جابجایی نقطه میانی تصحیح کنید. چون ارتفاع E تا A دو برابر ارتفاع E از نقطه میانی است مقدار تصحیح آن نیز دو برابر نقطه میانی (O) خواهد بود.

۶-اکنون چون E ثابت شده است و C و G در ارتفاع صفر قرار دارند می توان تمام نقاط روی مولدهای CE و GE را نیز تصحیح کرد.

۷-موقعیتهای H، D، B و F مشخص می باشد. بنابراین اکنون می توان خطوط HD و BF را بر هم منطبق کرد. این کار باعث می شود که مراحل قبل نیز ارزیابی گردد. اگر مراحل قبل به درستی انجام شده باشد نقاط میانی خطوط HD و BF باید منطبق بر هم و منطبق بر موقعیت O یعنی مرکز سطح تحت بررسی باشد.

به این ترتیب ارتفاع تمام نقاط سطح، نسبت به صفحه مبنای اختیاری ACG معین می باشد. البته این صفحه بهترین صفحه مبنا نیست و در مورد این صفحه مبنا نیز باید تجدید نظر و تصحیحی صورت گیرد.

حال مطالب بالا را عملاً در مورد سطح شکل ۳-۱۱ بررسی می نماییم.



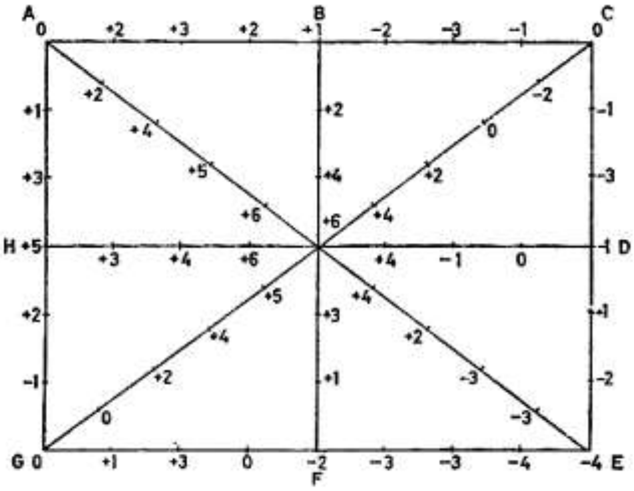
شکل ۳-۱۱) سه گوشه سطح در ارتفاع صفر تنظیم شده است تا مرکز سطح نسبت به صفحه گذرنده از این سه گوشه ارتفاع معینی داشته باشد و ارتفاع دیگر گوشه ها نیز نسبت به آن صفحه سنجیده شود.

همانطور که در شکل دیده می شود خطوط AC، AG و CG در هر انتها تا رسیدن به مقدار صفر تصحیح شده است. به این ترتیب صفحه ACG با صفر شدن نقاط A، C و G معین می

گردد و بنابراین نقاط روی این سه خط نسبت به صفحه ACG، معین می شود. می بینید که نقطه میانی، ۶+ واحد بالاتر از صفحه مبنای ACG قرار می گیرد و نقطه میانی خط AE باید با این موقعیت منطبق باشد (زمانی که A صفر شد). از جدول خطای کل می بینیم که ارتفاع نقطه میانی AE، ۴- واحد است. پس برای رساندن این ارتفاع به ۶+ باید آن را به اندازه ۱۰+ واحد بالا آورد. به این ترتیب نقطه E که دو برابر دورتر از A است باید به اندازه ۲۰ واحد بالا برود که ارتفاع نهایی آن ۴- = ۲۰+۲۴- خواهد شد. تمام نقاط دیگر AE با مقادیر مناسب تصحیح می گردد بطوری که جدولی مانند جدول تصحیح مولد AE حاصل شود. این مقادیر را می توان بروی سطح (شکل ۳-۱۱) بصورت یک نمودار درج کرد. شکل ۴-۱۱ تمام مقادیر تصحیح را نشان می دهد. مطالب گفته شده با توجه به این دو شکل، روشن می گردد.

جدول تصحیح مولد AE

ارتفاع نسبت به صفحه ACG	مقدار تصحیح	خطای ترکیبی (کل)
صفر	صفر	صفر
۲+	۲+	صفر
۴+	۴+	صفر
۵+	۶+	۱-
۶+	۸+	۲-
۶+	۱۰+	۴-
۴+	۱۲+	۸-
۲+	۱۴+	۱۲-
۱-	۱۶+	۱۷-
۳-	۱۸+	۲۱-
۴-	۲۰+	۲۴-



شکل ۴-۱۱) ارتفاع تمام نقاط مورد اندازه گیری نسبت به صفحه مبنای ACG

ارتفاع نقطه E که نسبت به صفحه ACG، ۴- واحد تعیین شده است باعث می گردد ارتفاع تمام نقاط روی CE و GE نسبت به این صفحه معین شوند. با بررسی خط CE می بینیم که ارتفاع E در جدول خطای کل، ۲+ واحد است. پس برای رساندن آن به ۴- باید E به اندازه ۶- واحد تصحیح گردد. در ادامه تمام نقاط دیگر نیز باید به اندازه مناسب تصحیح شود. بطور مشابه بروی خط GE، ارتفاع نقطه E برابر ۱۲- است که باید به میزان ۸+ واحد تصحیح گردد و به دنبال آن تمام نقاط دیگر موجود بروی این خط نیز باید با مقادیر مناسب تصحیح شود. جداول تصحیح مربوط به این خطوط در صفحه بعد آورده شده است. در نهایت باید تمام نقاط خطوط BF و HD نسبت به صفحه ACG معین شوند. با بررسی خط BF می بینیم که ارتفاع B نسبت به صفحه ACG، ۱+ واحد است. اما ارتفاع نقطه B در جدول خطای کل، صفر است. بنابراین در ابتدا باید ارتفاع تمام نقاط روی BF به اندازه ۱+ واحد افزایش داده شوند. به این ترتیب نقطه F که مقدار خطای کل آن با تصحیح ۱+ واحدی، ۸- می گردد جهت انطباق نسبت به صفحه ACG باید به ارتفاع ۲- واحد برسد یعنی به اندازه ۶+ واحد بالا آورده شود. نقاط دیگر موجود بروی این خط نیز باید با مقادیر مناسبی تصحیح شوند. همین روش را در مورد مولد HD نیز انجام می دهیم تا نتایج شکل ۴-۱۱ بدست آید. نقاط میانی این دو خط به نحوی صحیح با ارتفاع ۶+ که ارتفاع نقطهٔ میانی سطح مورد بررسی است منطبق می شوند.

جدول تصحیح خط CE

مقدار خطا نسبت به صفحه ACG	مقدار تصحیح نسبت به صفحه ACG	خطای کل
صفر	صفر	صفر
-۱	-۱	صفر
-۳	-۲	-۱
-۱	-۳	+۲
+۱	-۴	+۵
-۲	-۵	+۳
-۴	-۶	+۲

جدول تصحیح خط GE

مقدار خطا نسبت به صفحه ACG	مقدار تصحیح نسبت به صفحه ACG	خطای کل
صفر	صفر	صفر
+۱	+۱	صفر
+۳	+۲	+۱
صفر	+۳	-۳
-۲	+۴	-۶
-۳	+۵	-۸
-۳	+۶	-۹
-۴	+۷	-۱۱
-۴	+۸	-۱۲

جدول تصحیح خط BF

مقدار خطا نسبت به صفحه ACG	مقدار تصحیح	مقدار تصحیح اولیه	خطای کل
۱+	صفر	۱+	صفر
۲+	۱+	۱+	صفر
۴+	۲+	۲+	۱+
۶+	۳+	۳+	۲+
۳+	۴+	۱-	۲-
۱+	۵+	۴-	۵-
۲-	۶+	۸-	۹-

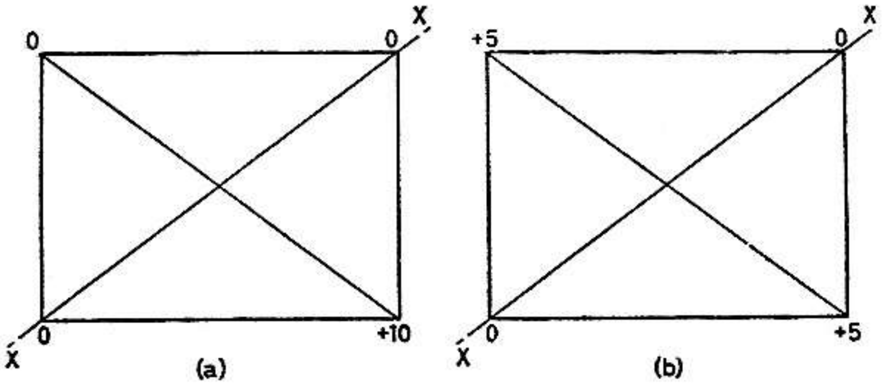
جدول تصحیح خط HD

مقدار خطا نسبت به صفحه ACG	مقدار تصحیح	مقدار تصحیح اولیه	خطای کل
۱+	صفر	۱+	صفر
۲+	۱+	۱+	صفر
۴+	۲+	۲+	۱+
۶+	۳+	۳+	۲+
۳+	۴+	۱-	۲-
۱+	۵+	۴-	۵-
۲-	۶+	۸-	۹-

موردی که باقی می ماند خود صفحه ACG است. این صفحه بطور دلخواه انتخاب شده است و امکان دارد صفحه مناسبی نباشد. به همین دلیل معمولاً مقدار تصحیح نهایی تعیین می شود که در ادامه روش تعیین آن ذکر می گردد.

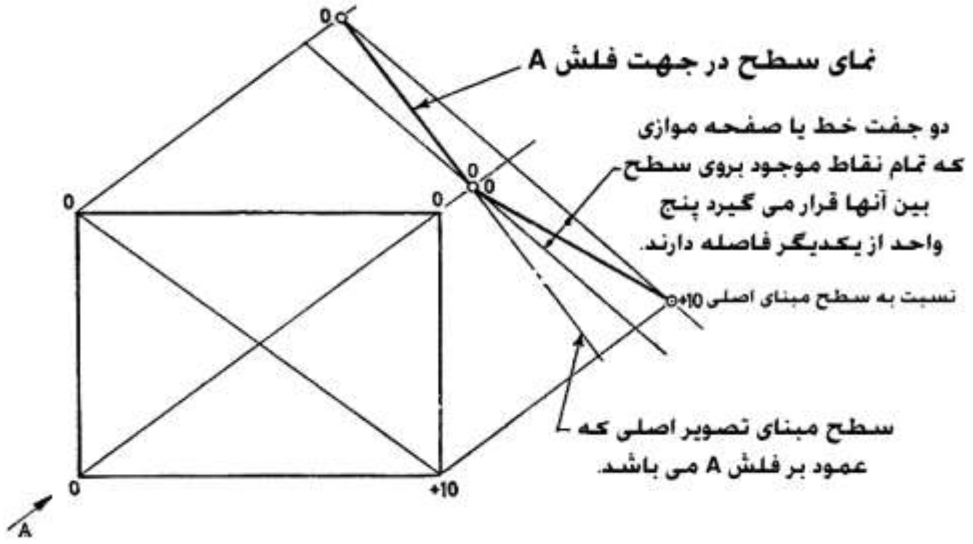
طبق تعریف، خطای تخت بودن، حداقل فاصله بین یک جفت صفحه موازی است که بطور کامل همه نقاط سطح را شامل گردد. سطحی مانند آنچه که در شکل a-۵-۱۱ نشان داده شده

است را در نظر بگیرید. در این سطح، نسبت به یک صفحه دلخواه مشابه، سه گوشه دارای ارتفاع صفر هستند و گوشه چهارم نسبت به این صفحه دلخواه، ارتفاع ۱۰+ واحد دارد. شاید به نظر برسد که خطای تخت بودن در این سطح ۱۰+ واحد است. اما اگر صفحه، حول محور xx بچرخد تا زمانی که ارتفاع دو گوشه مقابل هم، برابر شود (شکل b-۵-۱۱) خطای تخت بودن تنها ۵ واحد است.



شکل ۵-۱۱) a-ارزیابی اولیه نشان می دهد که خطای تخت بودن نسبت به صفحه مبنای دلخواه، ۱۰+ واحد است. b-با کج کردن تمام سطح حول محور xx خطای حقیقی ۵+ واحد شده است.

اگر این روش برای سطح نشان داده شده در شکل ۴-۱۱ اجرا گردد دیده می شود که مقدار بالا رفتن یا پایین آمدن هر نقطه معین، به فاصله آن نقطه از محور بستگی دارد. پس محاسبه مقدار تصحیح نهایی (برای تعیین حداقل فاصله بین یک جفت صفحه موازی که نقاط سطح مورد آزمایش را کاملاً در برگیرند) می تواند بی نهایت دشوار باشد (بخصوص هنگامی که فرآیند باید دو یا بیشتر از دو بار تکرار گردد). بنابراین جهت یافتن مقدار تصحیح نهایی از روش تصویری (گرافیکی) که در شکل ۶-۱۱ نشان داده شده است استفاده می گردد. شکل a-۵-۱۱ را در نظر بگیرید. در امتداد محور کج کردن سطح، تصویری از سطح بدست آورید (شکل ۶-۱۱).



شکل ۶-۱۱) خطای حقیقی تخت بودن که در شکل b-۵-۱۱ با کج کردن سطح بدست آمد به کمک تصویرکردن نیز قابل حصول است.

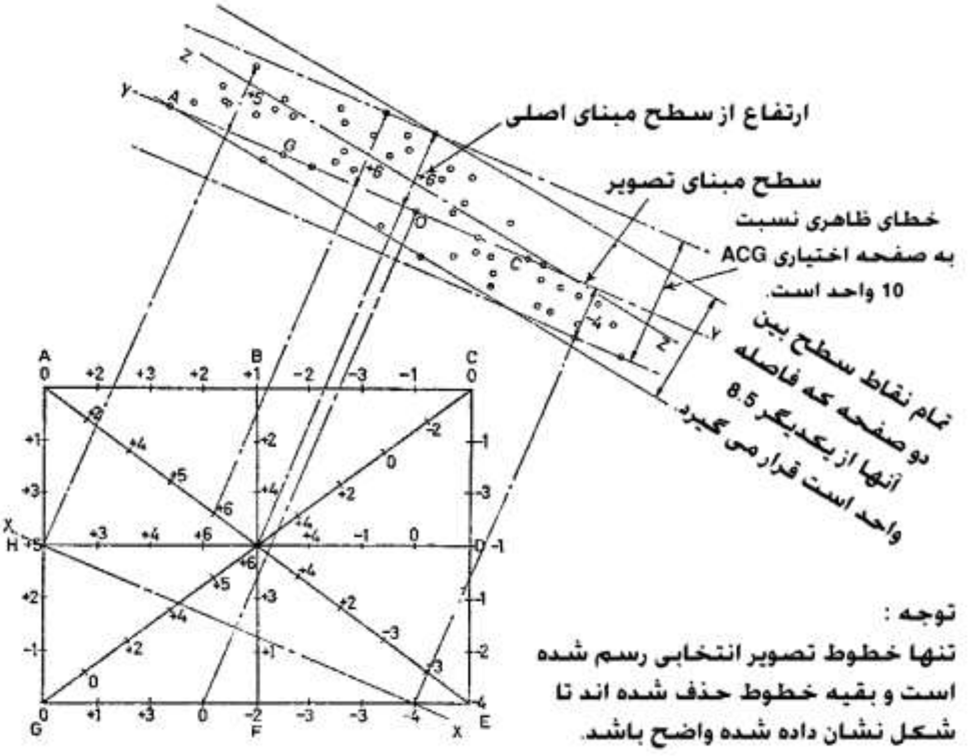
همانطور که دیده می شود می توان دو خط موازی رسم کرد که این تصویر (و در نتیجه کل سطح) را در برگیرند. فاصله بین این دو خط طبق تعریف، میزان تصحیح نهایی است و همانطور که در شکل دیده می شود مقدار آن برای شکل ۵-۱۱ بسیار کمتر از ۱۰ واحد است. مراحل اجرای کار به این صورت می باشد (مثال شکل ۴-۱۱ بررسی می گردد. برای درک بهتر شکل ۷-۱۱ را نیز بررسی کنید) :

الف-دو نقطه که بهتر است بروی اضلاع مقابل هم باشند انتخاب کنید. ارتفاع این دو نقطه نسبت به صفحهٔ انتخابی دلخواه (در شکل ۴-۱۱ صفحه ACG) باید بیشترین مقدار مثبت و بیشترین مقدار منفی موجود در سطح باشد. این نقاط را به یکدیگر وصل کنید. تصویر قائم را نسبت به محور XX (خط متصل کننده دو نقطه) تعیین نمایید.

ب- با مقیاس معین، ارتفاع تمام نقاط را نسبت به خط YY که به موازات محور XX رسم شده است پیدا کنید تا همه نقاط تصویر شوند. در این صورت صفحهACG هم تصویر می گردد.

ج-نزدیکترین جفت خط موازی که شامل تمام نقاط تصویر شده سطح باشند را پیدا کنید. توجه شود که یکی از این دو خط، دو نقطه از سطح و دیگری یک نقطه از آن را شامل می گردد.

د-فاصلهٔ بین این دو خط، مقدار تصحیح نهایی است. اگر لازم باشد که فرآیند تکرار شود خط ZZ بین این دو خط و به موازات آنها رسم می شود و این بار ارتفاع نقاط نسبت به خط ZZ بدست می آید. این دو خط موازی در حقیقت صفحه هایی عمود بر سطح کاغذ هستند. با تغییر دادن و دوران آنها می توان باز هم آنها را به یکدیگر نزدیک نمود. این کار با تکرار مراحل بالا یعنی رسم خط ZZ، تصویرکردن مجدد و یافتن دو خط موازی دیگر حاصل می گردد.



شکل ۷-۱۱) تعیین خطای تخت بودن از روش تصویری (فقط اولین تصویر نشان داده شده است.)

ممکن است لازم شود تصویر قائم نقاط نسبت به محور ZZ و نسبت به تصویر اولیه دوباره بدست آید. بعید به نظر می رسد که در این مثال چنین کاری لازم باشد چرا که بعضی از مقادیر max جدید که در اثر تصویر کردن مجدد پدید می آیند از هم خیلی فاصله دارند.

این روش چندان دقیق نیست چرا که مقیاس درنظر گرفته شده برای طولها و ارتفاعهای سطح، متفاوت است و در نتیجه خطایی پدید می آید. در یک آزمایش، ممکن است به دوبار تصویرکردن نیاز باشد ولی در عمل مشخص شده است که درصد کاهش فاصله صفحات موازی

در برگیرنده سطح مورد آزمایش، در اثر تصویرکردن پی در پی، زیاد نیست مگر این که خط تصویر اولیه از روی عمد بد انتخاب شده باشد.

روش دیگری نیز وجود دارد به این ترتیب که تمام نقاط سطح مورد آزمایش به محورهای X، Y و Z ارجاع داده می شوند. بنابراین تمام نقاط در فضا معین و ثابت خواهد بود. سپس می توان با پیدا کردن بهترین صفحۀ راهنما، صفحات موازی دربرگیرنده سطح مورد آزمایش را با حداقل فاصله از هم طوری یافت که مجموع مربعات فواصل همه نقاط از آن صفحه، کمترین مقدار ممکن باشد. به این روش، بسط روش کمترین مربعات (least squars) در فضای سه بعدی می گویند. برای بررسی تعداد نقاط بیشتر به یک رایانه نیاز خواهیم داشت. به نظر مؤلف، بدون استفاده از رایانه، روش تصویری (گرافیکی) بخصوص با افزایش تعداد نقاط مورد بررسی، پیشرفت کمی دارد.

پایان

کتاب شناسی

BARNARD, C. P., 'Notes on Circular Dividing Apparatus' (N.P.L.), H.M.S.O.

BARRELL, H., 'The Bases of Measurement', Sir Alfred Herbert Paper, 1957, I. Prod. E.

—— 'Engineering Dimensional Metrology' (N.P.L. Symposium), Vols. I and II, H.M.S.O.

CHAPMAN, W. A. J., *Workshop Technology*, Parts II and III, Arnold.

EVANS, J. C., 'The Pneumatic Gauging Technique in its Application to Dimensional Measurement', J. I. Prod. E., **36**, No. 2, 1957.

HABELL, K. J. and COX, A., *Engineering Optics*, Pitman.

HEMSLEY, S. H., *Optical Instruments in Engineering*, Paul Elek.

HUME, K. J., *Engineering Metrology*, MacDonald.

—— 'Developments in Dimensional Accuracy', J. I. Prod. E., **40**, No. 5, 1961.

JUDGE, A. W., *Engineering Precision Measurements*, Chapman & Hall.

KING, G. K. and BUTLER, C. T., *Principles of Engineering Inspection*, Cleaver-Hume.

LOXHAM, J., 'The Control of Quality in Engineering Manufacture', Proc. of Conference on Technology of Engineering Manufacture, I. Mech. E., 1958.

—— 'An Experiment in the use of a Standard Limit System', Proc. I. Mech. E., **156**, 1947.

—— 'The Potentialities of Accurate Measurement and Automatic Control in Production Engineering', J. I. Prod. E., **39**, No. 12, 1960.

MERRITT, H. E., *Gears*, Pitman.

NICKOLS, L. W., 'The Effective Diameter of a Parallel Screw Thread', J. I. Prod. E., **40**, No. 5, 1961.

PARKINSON, A. C., *Gears, Gear Production and Measurement*, Pitman.

POLLARD, A. F. C., *Kinematical Design of Couplings*, Adam Hilger.

—— 'Kinematic Design in Engineering', Prod. I. Mech. E., **125**, 1933.

ROLT, F. H., *Gauges and Fine Measurements*, Vols. I and II., Macmillan.

—— 'The Development of Engineering Metrology', Sir Alfred Herbert Paper, I. Prod. E., 1952.

SCHLESINGER, G., *Testing Machine Tools*, Machinery Pub. Co.

SHARP, K. W. B., *Practical Engineering Metrology*, Pitman.

—— 'Notes on Inspection Organisation and Dimensional Control' (Admiralty), H.M.S.O.

—— 'Gauge Making and Measuring' (N.P.L.), H.M.S.O.

—— 'Gauging and Measuring Screw Threads' (N.P.L.), H.M.S.O.

STEEDS, W., *Mechanism and Kinematics of Machines*, Longmans, Green.

TANNER, C. J., 'Air-Gauging—History and Future Development', J. I. Prod. E., 37, No. 7, 1958.

TIMMS, C., 'Recent Development in Spur and Helical Gears', J. I. Prod. E., 39, No. 6, 1960.

TOWN, H. C., and COLEBOURNE, R., *Engineering Inspection, Measurement, and Testing*, Odhams.

TWYMAN, F., *Prism and Lens Making*, Adam Hilger.