مدل سازی طراحی معکوس چرخدنده ساده

محسن حاجی زاده[۱]، عنایت اله حسینیان[۲]

دانشگاه امام حسین(ع)

مرکز تحقیقات صنایع حدید-کیلومتر ۱۱ جاده مخصوص کرج

Mohsen_hajizadeh@yahoo.com

چکیده

چرخدنده قسمتی حساس در مکانیزم‌های مکانیکی است که انتقال قدرت را با نسبت معین انجام می‌دهد. در طراحی چرخدنده‌ها علاوه بر پارامترهای اصلی طراحی، دقت‌های ابعادی و تلرانس‌های هندسی حساسیت خاصی دارند که این حساسیت بخصوص در طراحی معکوس چرخدنده اهمیت بیشتری می‌یابد. در طراحی معکوس چرخدنده متغیرهای مختلفی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته، شناسائی و اندازه‌گیری می‌شود. در این بین متغیرهایی مانند زاویه فشار، لنگی و الونس دندانه نقش مهمی داشته و بر عملکرد چرخدنده در هنگام درگیری تاثیرات فراوان دارند. در این مقاله سعی شده است که با استفاده از ابزارهای معمولی اندازه‌گیری، روشی برای محاسبه و کنترل و بازرسی زاویه فشار، لنگی و الونس دندانه ارائه شود، با توجه به حجم زیاد محاسبات، کد کامپیوتری که سرعت و دقت مناسبی دارد تهیه شده است.

واژه‌های کلیدی: چرخدنده-طراحی معکوس-مدل سازی-تلرانس

مقدمه

چرخدنده عضوی از مکانیزم‌ها است که انتقال قدرت را با نسبت معین انجام می‌دهد. در طراحی چرخدنده‌ها علاوه بر پارامترهای اصلی طراحی (مدول، گام، قطر خارجی، ارتفاع دندانه) دقت‌های ابعادی و تلرانس‌های هندسی نیز از حساسیت خاصی برخوردارند که این حساسیت بخصوص در طراحی معکوس چرخدنده اهمیت بیشتری می‌یابد. اما در بیشتر طراحی‌های معکوس بکار رفته برای چرخدنده‌ها این عوامل مورد توجه قرار نمی‌گیرند و در نتیجه جعبه دنده یا چرخدنده‌ها پس از ساخت و نصب دچار مشکلات فراوان می‌شود. علاوه بر این به علت غیراستاندارد بودن بسیاری از چرخدنده‌های موجود، طراحی معکوس آنها با مشکلات عدیده‌ای روبرو است. در این مقاله سعی شده است روشی برای مهندسی معکوس چرخدنده‌های ساده استاندارد و غیراستاندارد با استفاده از مشخصات ظاهری چرخدنده و با ابزارهای اندازه‌گیری معمولی ارائه شود. با استفاده از این روش پس از شناسائی مشخصات اولیه مقادیر مربوط به زاویه فشار، لنگی و الونس دندانه محاسبه می‌گردد.

شناسایی مشخصات اولیه چرخدنده

مشخصات ظاهری چرخدنده عبارتند از: تعداد دندانه چرخدنده پینیون (N_p) و چرخدنده (N_G)، قطر خارجی، قطر ریشه و فاصله مراکز چرخدنده‌ها (C) روابط حاکم بین مشخصات ظاهری و مدول چرخدنده به صورت زیر است [۱]:

$$C = \frac{m(N_P + N_G)}{2} \qquad (۱)$$

---

[1] کارشناس ارشد

[2] مربی- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

$$m = \frac{2C}{N_P + N_G} \qquad (۲)$$

در طراحی معکوس چرخدنده با استفاده از فرمول(۲) (که از معکوس کردن فرمول(۱) بدست آمده) می‌توان مدول (m) چرخدنده را محاسبه نمود. سایر مشخصات ظاهری مانند قطر خارجی، قطر ریشه و ارتفاع دندانه با استفاده از کولیس قابل اندازه‌گیری است.

چرخدنده استاندارد

در استانداردهای مختلف جهانی روابط بین مشخصات ظاهری چرخدنده‌ها متفاوت است. چرخدنده استاندارد، چرخدنده‌ای است که کلیه ابعاد اصلی آن با مقادیر حاصل از فرمولهای محاسباتی که در جداول آن استاندارد آورده شده است برابری کند. نمونه‌ای از این جداول استاندارد ANSI B6.7-1977 است که در انتهای مقاله جدول شماره (۱) آورده شده است. در این جدول قطر خارجی، قطر ریشه و ارتفاع دندانه به ترتیب از فرمول‌های (۳) و (۴) و (۵) قابل محاسبه است.

$$D_O = (N+2)\times m \qquad (۳)$$

$$D_i = (N-2.5)\times m \qquad (۴)$$

$$h = 2.25\times m \qquad (۵)$$

با استفاده از پارامترهای محاسبه شده در فرمول (۱) تا (۵) می‌توان به استاندارد یا غیراستاندارد بودن چرخدنده پی‌برد. ابعاد اصلی چرخدنده شامل قطر خارجی، قطر ریشه، زاویه فشار، ارتفاع دندانه و مدول می‌باشد. بیشتر این ابعاد به کمک کولیس بطور مستقیم اندازه‌گیری می‌شوند به جز زاویه فشار که برای اندازه‌گیری آن لازم است یا پروفیل دندانه با دستگاه مخصوص مدل سازی شود و یا با استفاده از پین این کار صورت گیرد. توضیحات کامل راجع به این موضوع در بخش‌های بعدی آورده شده است.

چرخدنده غیراستاندارد

چرخدنده غیراستاندارد، چرخدنده‌ای است که یک یا چند بعد از ابعاد اصلی آن با ابعاد حاصل از فرمول‌های جداول استاندارد مطابقت نداشته باشد (به عنوان نمونه به جدول شماره (۱) مراجعه شود).

انواع مختلفی از چرخدنده‌های غیراستاندارد موجود است، رایج‌ترین آنها عبارتند از:

۱- چرخدنده با مدول غیراستاندارد.

۲- چرخدنده سردنده بلند و کوتاه با فاصله مراکز غیراستاندارد.

۳- چرخدنده سردنده بلند و کوتاه با فاصله مراکز استاندارد.

چرخدنده غیراستاندارد نوع اول همانند چرخدنده استاندارد است ابعاد اصلی چرخدنده با استفاده از فرمول‌های محاسباتی چرخدنده استاندارد بدست می‌آید اما مدول آن در لیست مدول‌های استاندارد قرار ندارد (لیست مدول‌های استاندارد معمولاً ۰,۲۵-۰,۵-۰,۷۵-۱-۱,۲۵-۱,۵-۲-۲,۵-و ...است). چرخدنده با مدول غیراستاندارد در بیشتر صنایع و مخصوصاً در صنایع خودروسازی به منظور انحصاری کردن تولید لوازم یدکی (چرخدنده)، استفاده می‌شود. در این حالت چرخدنده با ابزارهای غیراستاندارد ساخته می‌شود تا امکان رقابت، برای سایر شرکت‌های سازنده لوازم یدکی نباشد. پس از محاسبه مدول از فرمول (۲) به راحتی می‌توان به استاندارد یا غیراستاندارد بودن مدول آن پی برد.

در چرخدنده‌های غیراستاندارد نوع دوم و سوم جداول دیگری برای محاسبه ابعاد اصلی وجود دارد و مدول آنها استاندارد است. این جداول پس از اندازه برداری از فاصله مراکز و قطر خارجی چرخدنده قابل شناسائی است. برای این منظور ابتدا فاصله مراکز را اندازه‌گیری نموده، سپس قطر خارجی را به کمک کولیس اندازه‌گیری می نماییم و پس از مراجعه به جداول و با مقایسه نسبت‌های موجود بین قطر خارجی و مدول و ارتفاع دندانه نوع آن را تعیین می‌کنیم.

برای حالتی که فاصله مراکز بیشتر یا کمتر از استاندارد باشد، ضخامت دندانه در دایره گام از اندازه استاندارد، بیشتر یا کمتر می‌شود. یعنی ابزار برشی کمتر یا بیشتر از اندازه استاندارد داخل ماده خام فرو می‌رود، روابط مربوط به اندازه ضخامت دندانه در دایره گام در فرمول زیر آورده شده است [۲]:

$$t_g = \frac{P_b}{\cos\phi_g} - \frac{t_c\cos\phi_c}{\cos\phi_g} - \frac{2R_{bc}}{\cos\phi_g}\left(inv\phi_c - inv\phi_g\right) \qquad (۶)$$

□□□□□ در این فرمول گام مبنا (P_b)، زاویه فشار ایجاد شده (ϕ_g)، زاویه فشار ابزار برشی (ϕ_c)، ضخامت

دندانه ابزار برشی (t_c)، شعاع دایره مبنای ابزار برشی (R_{bc}) و ضخامت دندانه (t_g) است. برای شناسائی این چرخدنده، پس از اینکه مدول محاسباتی از فرمول (۲) با مدول حاصل از فرمول (۳) مطابقت نداشت ضخامت دندانه در دایره گام با استفاده از فرمول (۶) محاسبه می‌شود و با مقدار اندازه‌گیری شده آن توسط کولیس دنده مقایسه می‌گردد تا ضخامت ابزار برشی محاسبه گردد.

برای حالتی که فاصله مراکز استاندارد است، قطر خارجی چرخدنده بزرگتر، کمتر از اندازه استاندارد بوده و به همان اندازه چرخدنده پینیون بیشتر از اندازه استاندارد است. جداول مربوط به این حالت در انتهای متن آورده شده است (جدول شماره۲) [۱]:

برای شناسائی این چرخدنده، مدول از روی فرمول (۲) به راحتی محاسبه می‌گردد سپس قطر خارجی اندازه‌گیری می‌شود و با مقایسه قطر خارجی استاندارد محاسباتی از فرمول (۳) با مقدار اندازه‌گیری شده، درصد تغییرات بدست می‌آید، همانطور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، برای زوایای فشار و تعداد دندانه‌های مختلف اندازه ضریب تغییرات قطر خارجی متفاوت است.

تعیین زاویه فشار، الونس دندانه، لنگی

پس از شناخت مشخصات اساسی چرخدنده مثل مدول، گام، دایره گام باید زاویه فشار، الونس و لنگی تعیین شود. برای این منظور لازم است به کمک چند پین که اندازه قطرهای آنها نزدیک به مقدار ۱,۷۲۸ برابر مدول باشد، اندازه قطر از روی پین‌های چرخدنده را اندازه‌گیری نمود سپس با یکی از پین‌ها که اندازه قطر آن از ۱,۷۲۸ برابر مدول بیشتر باشد اندازه قطر از روی پین را در چندین دندانه از محیط چرخدنده اندازه‌گیری کرد و مقادیر بدست آمده در هریک از مراحل را بصورت جداگانه در دو سری جدول یادداشت نمود. به کمک مقادیر جدول اول زاویه فشار و الونس دندانه و مقادیر جدول دوم، لنگی چرخدنده در قطر گام محاسبه می‌گردد.

زاویه فشار

زاویه اینولوت در نقطه برخورد منحنی‌های اینولوت دو چرخدنده بیانگر زاویه فشار هر چرخدنده است. برای هر چرخدنده یک زاویه فشار مشخص در نظر گرفته می‌شود که این زاویه فشار، زاویه فشار در محل برخورد دایره گام با منحنی اینولوت چرخدنده است ولی در عمل با تغییر فاصله مراکز چرخدنده‌ها زاویه فشار تغییر می‌کند. تعیین و اندازه‌گیری زاویه فشار کاری بسیار مشکل است که در حالت معمولی با کمک تهیه پروفیل از روی دندانه قابل اندازه‌گیری است. که احتیاج به دستگاههای گرانقیمتی مانند CMM دارد. برای آنکه بتوان با ابزارهای معمولی نیز این کار را انجام داد. از محاسبات ریاضی کمک می گیریم.

برای اندازه‌گیری، ابتدا با چند پین مختلف، پین‌هائی که به قطر ۱,۷۲۸ برابر مدول نزدیک باشد، اندازه قطر چرخدنده از روی پین تعیین می شود، در نتیجه محل تماس‌های مختلف برخورد بین پین و منحنی بدست می‌آید. به کمک روابط اندازه قطر از روی پین روابط (۹) و (۱۰) و حل معادله (۸) به روش نیوتون-رافسون می‌توان زاویه فشار را بدست آورد. برای این منظور اندازه قطر از روی پین را برای زوایای فشار و قطر پین‌های مختلف با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) محاسبه کرده و منحنی‌های اندازه قطر از روی پین برای زوایای فشار مختلف برحسب قطر پین رسم می‌گردد. برای انجام این محاسبات ابتدا لازم است که مقدار اینولوت در محل تماس پین‌ها محاسبه گردد که این مقدار به کمک رابطه زیر بدست می‌آید:

$$inva = invA \pm \frac{T}{D} \pm \frac{d_w}{D\cos A} \mp \frac{\pi}{N} \qquad (۷)$$

زاویه فشار (A)، زاویه فشار در نقطه برخورد پین با پروفیل دندانه (a)، ضخامت دندانه در دایره گام (T)، قطر گام (D)، قطر پین (d_w)، تعداد دندانه (N) اندازه قطر از روی پین‌ها را محاسبه نمود.

تابع اینولوت بصورت زیر معرفی می‌گردد:

$\mathrm{inv}\varphi = \tan\varphi - \varphi$ که φ برحسب رادیان است.

مقدار زاویه اینولوت با جاگذاری آن در معادله (۸) که از روش حل عددی نیوتون-رافسون استفاده کرده است بدست می‌آید:

$$\varphi_{new} = \varphi_{old} - \frac{[invA - \varphi_{old} + \tan(\varphi_{old})]}{[\tan(\varphi_{old})]^2} \qquad (۸)$$

دقت نمایید که اندازه زاویه φ در محدوده مثلثاتی بین $[-\frac{\pi}{2},\frac{\pi}{2}]$ قرار داشته باشد، در غیر اینصورت مقدار زاویه φ را می‌بایست به این ناحیه منتقل نمود.

در این برنامه زاویه فشار فرضی، از ۵ درجه تا ۳۵ درجه با فواصل ۵/. درجه‌ای در نظر گرفته می‌شود و سپس اندازه قطر از روی پین به کمک رابطه (۸) یا (۹) برای چرخدنده‌های فرد و زوج محاسبه می‌شود.

برای چرخدنده با تعداد دندانه‌های زوج[۱]

$$M_{even}=\frac{D\cos A}{Cosa}\pm d_w \qquad (۹)$$

برای چرخدنده با تعداد دندانه‌های فرد[۱]

$$M_{odd}=\left(\frac{D\cos A}{Cosa}\right)\left(Cos(\frac{90}{N})\right)\pm d_w \qquad (۱۰)$$

حال با استفاده از مقدار اندازه قطر از روی پین چرخدنده و قطر پین نمودارهائی برای مقادیر تجربی و محاسباتی رسم می‌گردد. با مقایسه منحنی تجربی با منحنی‌های محاسباتی و تشخیص مشابه‌ترین منحنی محاسباتی به منحنی تجربی، منحنی زاویه فشار شناسائی می‌شود. برای این منظور شیب منحنی در نواحی مختلف منحنی‌ها بدست آمده و با هم مقایسه می‌شود، منحنی که شیبی شبیه‌تر به شیب منحنی تجربی داشته باشد، (اختلاف کمتری با منحنی تجربی داشته باشد) به عنوان منحنی زاویه فشار انتخاب می‌گردد. شیب منحنی با استفاده از این رابطه (۱۱) بدست می‌آید.

$$S=\frac{M(j+1)-w(j+1)}{M(j)-w(j)} \qquad (۱۱)$$

$M(j+1)$ =اندازه قطر از روی پین j+1ام

$M(j)$ =اندازه قطر از روی پین jام

$w(j+1)$ =قطرپین j+1ام

$w(j)$ =قطر پین jام

برای این منظور مقادیر اندازه قطر چرخدنده از روی پین برای هر زاویه فشار در جدول شماره (۳) آورده شده است و در جدول شماره (۴) اختلاف شیب منحنی های محاسباتی با منحنی تجربی در نواحی مختلف منحنی محاسبه شده است و حاصل اختلاف با توجه به روش حداقل مربعات در انتهای جدول شماره (۴) آورده شده است. همچنین می‌توان بصورت ترسیمی هم این اختلاف را در منحنی شکل شماره (۱) مشاهده نمود در این شکل محور افقی منحنی قطر پین و محور عمودی اندازه قطر از روی پین است. با محاسبه خطا بین اندازه‌های محاسباتی در زوایای فشار مختلف و اندازه تجربی زاویه فشاری که خطای کمتری دارد زاویه فشار چرخدنده است.

الونس دندانه

الونس دندانه میزان لاغر شدن دندانه از مقدار استاندارد است. این لاغر شدن بصورت یکنواخت و مطابق با منحنی دندانه است روش بدست آوردن الونس بدین صورت است که پس از بدست آوردن زاویه فشار، با توجه به محاسبات انجام شده مقدار اندازه قطر چرخدنده از روی پین‌های بدست آمده و تجربی را مقایسه کرده و مقدار Cosaرا برای هر دو محاسبه می‌کنیم. با استفاده از فرمول (۷) و دو مقدار برای ضخامت دندانه بدست می‌آید. از کم کردن دو مقدار میزان الونس بدست می‌آید.

لنگی چرخدنده در قطر گام

میزان خارج از مرکزی دایره گام چرخدنده بعلاوه دو پهن بودن استوانه چرخدنده لنگی چرخ دنده در قطر گام است. برای محاسبه میزان لنگی چرخدنده در قطر گام به کمک یک پین با قطر مناسب (نزدیک به قطر ۱,۷۲۸ برابر مدول) شعاع چرخدنده را اندازه‌گیری می‌نماییم. شعاع چرخدنده اندازه شعاع از روی پین تا محور چرخدنده است. این مقدار را روی دندانه‌های مختلف چرخدنده بدست آورده و با هم مقایسه می‌نماییم، اختلاف بین بزرگترین و کوچکترین مقدار بیانگر میزان ماکزیمم لنگی چرخدنده در قطر گام چرخدنده است.

بحث و نتیجه‌گیری

همانگونه که مشاهده شد، چرخدنده‌ها علاوه بر استاندارد یا غیراستاندارد بودن انواع مختلفی از متغیرها دارند که برای شناسایی آنها لازم است ابتدا با متغیرهای گوناگون در چرخدنده وجود دارد آشنا شده و مقادیر آنها را اندازه‌گیری نمود. با شناخت متغیرهای اصلی چرخدنده (مدول، زاویه فشار، الونس دندانه، لنگی) و نوع عملکرد، آن به راحتی می‌توان کلاس کیفیت چرخدنده را شناسایی نموده و آن را طراحی معکوس نمود. اما هرگاه هریک از این متغیرها شناسائی نشود طراحی معکوس چرخدنده دچار مشکل

می‌شود. در مثال حاضر همانگونه که در منحنی های شکل (۱) مشاهده می‌شود دو منحنی تجربی و محاسباتی با زاویه فشار ۲۰ درجه، تطابق خوبی برهم دارند این تطابق منحنی بیانگر تشابه بین دو منحنی است پس بنابراین زاویه فشار چرخ دنده مورد نظر ۲۰ درجه است. منحنی حاضر حاصل از ۵ نقطه است که از ۵ اندازه برداری بدست آمده است شاید در وهله اول به نظر رسد که کلیه این متغیرها را می توان با یک اندازه‌برداری حساب کرد، ولی با توجه به اینکه تعداد متغیرها زیاد است و هرکدام می‌توانند نقشی موثر بر این اندازه داشته باشند لازم است که از تعداد پین‌های بیشتری استفاده شود تا پروفیل دندانه به خوبی مدل سازی شود. استفاده از تعداد پین‌های بیشتر به مفهوم محاسبات بیشتر و دقیق‌تر است که الزام استفاده از کد کامپیوتری را هرچه بیشتر نشان می‌دهد.

قدردانی و تشکر

در اینجا لازم است از پشتیبانی و حمایت بی دریغ مجتمع صنایع جنگ افزار سازی حدید و زحمات دکتر شاهین خدام که در به ثمر رسیدن این پژوهش همکاری و مساعدت داشتندکمال تشکر را داشته باشیم.

منابع:

1- Berg, Erlk; Jonesfranklin; .Horton, “Machinery's handbook 22nd edition”, press inc , 1984 . industrial

۲- اچ، مابی، هامیلتون، اف، رین هولتز، چارلز ”دینامیک ماشین و مکانیزم“ ترجمه و گردآوری، دکتر شاهین خدام، ویرایش چهارم، نشر سماط، تابستان ۱۳۷۷.

3- MIL-HDBK-, “Criteria for preparation of gear and spline engineering drawing” 1985.

4- AGMA - A88, “Gear classification and inspection handbook tolerance and measuring methods for unassembled spur and helical gears” (including metric equivalents), 1990

5- AGMA 1012-F, “Gear nomenclature, definitions of terms with symbols”

جدول (۱)-نمونه یک استاندارد برای ابعاد چرخدنده [۱]

Tooth Proportions for Fine-Pitch Involute Spur and Helical Gears of 14½-, 20-, and 25-Degree Pressure Angle — American National Standard (ANSI B6.7-1977)

Item	Spur	Helical
Addendum, a	$\frac{1.000}{P}$	$\frac{1.000}{P_n}$
Dedendum, b	$\frac{1.200}{P} + 0.002$ (min.)	$\frac{1.200}{P_n} + 0.002$ (min.)
Working Depth, h_k	$\frac{2.000}{P}$	$\frac{2.000}{P_n}$
Whole Depth, h_t	$\frac{2.200}{P} + 0.002$ (min.)	$\frac{2.200}{P_n} + 0.002$ (min.)
Clearance, c (Standard)	$\frac{0.200}{P} + 0.002$ (min.)	$\frac{0.200}{P_n} + 0.002$ (min.)
(Shaved or Ground Teeth)	$\frac{0.350}{P} + 0.002$ (min.)	$\frac{0.350}{P_n} + 0.002$ (min.)
Tooth Thickness, t At Pitch Diameter	$t = \frac{1.5708}{P}$	$t_n = \frac{1.5708}{P_n}$
Circular Pitch, p	$p = \frac{\pi D}{N}$ or $\frac{\pi d}{n}$ or $\frac{\pi}{P}$	$p_n = \frac{\pi}{P_n}$
Pitch Diameter Pinion, d	$\frac{n}{P}$	$\frac{n}{P_n \cos \psi}$
Gear, D	$\frac{N}{P}$	$\frac{N}{P_n \cos \psi}$
Outside Diameter Pinion, d_o	$\frac{n+2}{P}$	$\frac{1}{P_n}\left(\frac{n}{\cos \psi} + 2\right)$
Gear, D_o	$\frac{N+2}{P}$	$\frac{1}{P_n}\left(\frac{N}{\cos \psi} + 2\right)$
Center Distance, C	$\frac{N+n}{2P}$	$\frac{N+n}{2P_n \cos \psi}$

All dimensions are in inches.
P = Transverse Diametral Pitch
P_n = Normal Diametral Pitch
t_n = Normal Tooth Thickness at Pitch Diameter
p_n = Normal Circular Pitch
ψ = Helix Angle
n = Number of pinion teeth
N = Number of gear teeth

جدول (۲)-یک نمونه از طبقه‌بندی کیفیت چرخ‌دنده‌ها [۴]

AGMA Applications and Quality Numbers for Racks and Gears — I

Gearing Application	Quality No.*
AEROSPACE	
Actuators	7–11
Control Gearing	7–11
Engine Accessories	10–13
Engine Power	10–13
Engine Starting	10–13
Loading Hoist	7–11
Propeller Feathering	10–13
Small Engines	12–13
AGRICULTURE	
Baler	3–7
Beet Harvester	5–7
Combine	5–7
Corn Picker	5–7
Cotton Picker	5–7
Farm Elevator	3–7
Field Harvester	5–7
Peanut Harvester	3–7
Potato Digger	5–7
AIR COMPRESSOR	10–11
AUTOMOTIVE INDUSTRY	10–11
BALING MACHINE	5–7
BOTTLING INDUSTRY	
Capping	6–7
Filling	6–7
Labeling	6–7
Washer, Sterilizer	6–7
BREWING INDUSTRY	
Agitator	6–8
Barrel Washer	6–8
Cookers	6–8
Filling Machine	6–8
Mash Tubs	6–8
Pasteurizer	6–8
Racking Machine	6–8
BRICK MAKING MACHINERY	5–7
BRIDGE MACHINERY	5–7
BRIQUETTE MACHINES	5–7
CEMENT INDUSTRY	
(Quarry Operation)	
Conveyor	5–6
Crusher	5–6
Diesel Electric Locomotive	8–9
Electric Dragline	
(cast gear)	3
(cut gear)	6–8
Electric Locomotive	6–8
Electric Shovel	
(cast gear)	3
(cut gear)	6–8
Elevator	5–6
Locomotive Crane	
(cast gear)	3
(cut gear)	5–6
(Plant Operation)	
Air Separator	5–6
Ball Mill	5–7
Compeb Mill	5–6
Conveyor	5–6
Cooler	5–6
Elevator	5–6
Feeder	5–6
Filter	5–6
Kiln	5–6
Kiln Slurry Agitator	5–6

Gearing Application	Quality No.*
CEMENT INDUSTRY (Continued)	
Overhead Crane	5–6
Pug, Rod and Tube Mills	5–6
Pulverizer	5–6
Raw and Finish Mill	5–6
Rotary Dryer	5–6
Slurry Agitator	5–6
CHEWING GUM INDUSTRY	
Chicle Grinder	6–8
Coater	6–8
Mixer-Kneader	6–8
Molder-Roller	6–8
Wrapper	6–8
CHOCOLATE INDUSTRY	
Glazer, Finisher	6–8
Mixer, Mill	6–8
Molder	6–8
Presser, Refiner	6–8
Tampering	6–8
Wrapper	6–8
CLAY WORKING MACHINERY	5–7
CONSTRUCTION EQUIPMENT	
Backhoe	6–8
Cranes	
Open Gearing	3–6
Enclosed Gearing	6–8
Ditch Digger	3–8
Transmission	6–8
Drag Line	5–8
Dumpster	6–8
Paver Loader	3
Transmission	8
Mixer	3–5
Swing Gear	3–5
Mixing Bucket	3
Shaker	8
Shovels	
Open Gearing	3–6
Enclosed Gearing	6–8
Stationary Mixer	
Transmission	8
Drum Gears	3–5
Stone Crusher	
Transmission	8
Conveyor	6
Truck Mixer	
Transfer Case	9
Drum Gears	3–5
COMMERCIAL METERS	
Gas	7–9
Liquid, Water, Milk	7–9
Parking	7–9
COMPUTING AND ACCOUNTING MACHINES	
Accounting-Billing	9–10
Adding Machine-Calculator	7–9
Addressograph	7
Bookkeeping	9–10
Cash Register	7
Comptometer	6–8
Computing	10–11
Data Processing	7–9
Dictating Machine	9
Typewriter	8

* Quality Numbers are inclusive, from the lowest to highest numbers shown.

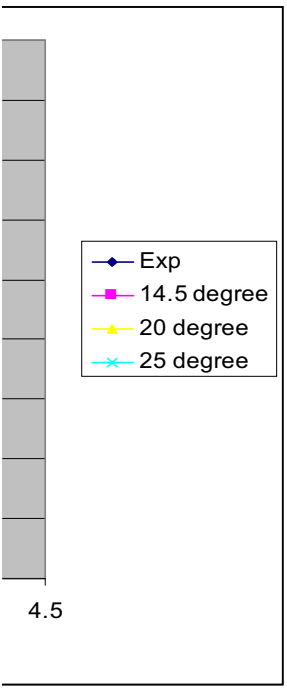
جدول (۳)- مقادیرمحاسباتی و اندازه‌گیری شده قطر از روی پین چرخ‌دنده نمونه

اندازه محاسباتی برای زاویه فشار ۲۵ درجه	اندازه محاسباتی برای زاویه فشار ۲۰ درجه	انـدازه محاسـباتی برای زاویه فشار ۱۴,۵ درجه	اندازه‌گیری تجربی	قطـــر پیـــن اندازه‌گیری

۲,۷۵	۵۴,۱۲	۵۳,۲۹	۵۴,۱۳	۵۴,۵۱
۳,۰۷	۵۵,۳۹	۵۵,۱۹	۵۵,۴	۵۵,۸۵
۳,۳۱	۵۶,۳۲	۵۶,۲۶	۵۶,۲۹	۵۶,۳۵
۳,۶	۵۷,۳۱	۵۷,۴۲	۵۷,۳۰۴	۵۷,۲۶
۳,۹۳	۵۸,۳۸	۵۸,۶۴	۵۸,۴	۵۸,۲۷
۴,۲۸	۵۹,۵۶	۵۹,۸۴	۵۹,۵۵	۵۹,۳۱
۴,۵۸	۶۰,۴۸	۶۰,۸۳	۶۰,۴۵۴	۶۰,۱۸

جدول (۳)- مقادیرخطای بین شیب منحنی های اندازه قطر از روی پین تجربی و محاسباتی برحسب قطر پین و با استفاده از روش حداقل مربعات

فاصله بین نقا	خطا شیب منحنی ۱۴,۵ درجه	خطا شیب منحنی ۲۰ درجه	خطا شیب منحنی ۲۵ درجه
۳,۰۷-۲,۷۵	-۰,۲۵۹	۰,۰۳۱	-۱,۲۱۲
۳,۳۱-۳,۰۷	-۰,۸۳۳	۰,۰۴۱	۱,۹۱۶
۳,۶-۳,۳۱	-۰,۲۰۶	-۰,۱۳۷	۰,۱۰۳
۳,۹۳-۳,۶	۰,۳۳۳	-۰,۱۸۱	۰,۱۵۱
۴,۲۸-۳,۹۳	۰,۷۴۱	۰,۰۵۷	-۰,۲۵۷
۴,۵۸-۴,۲۸	۰,۹۳۳	-۰,۰۳۳	-۰,۸۳۳
خطا کلی	۲,۳۳۳	۰,۰۵۸	۵,۹۳۳



شکل (۱)- منحنی مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی قطر از روی پین