# روش اصلاح شده AGMA در بررسی خستگی سطح دندانه

- این روش بر اساس رابطه تنش هرتز و با در نظر گرفتن ضرایب اصلاحی برای عوامل مختلف (مانند بررسی تنش خمشی) ، تنش سطحی چرخ دنده را محاسبه می‌کند .
- فرمول تنش هرتز را می توان به صورت زیر نوشت :

$$\sigma_{sf} = C_p\sqrt{\frac{F_t}{bd_pI}}$$

$$C_p \equiv \text{elastic coefficient} = \sqrt{\frac{1}{\pi\left(\frac{1-\nu_p^2}{E_p}+\frac{1-\nu_g^2}{E_g}\right)}}$$

www.sepantakalaco.ir

$$I \equiv \text{geometry factor} = \frac{\sin\varphi\cos\varphi}{2}\left(\frac{m_G}{m_G+1}\right)$$

$$m_G = \text{gear ratio} = \frac{d_g}{d_p} = \frac{N_g}{N_p} \text{ (always } \geq 1.0)$$

- سپس با اعمال ضرایب اصلاح رابطه به صورت زیر در می‌آید که در آن، مقادیر ضرایب اصلاح همان مقادیر مربوط به حالت تنش خمشی هستند. ( **ضریب کاربرد $K_a$، ضریب دینامیکی $K_v$، ضریب نصب $K_m$** )

$$\sigma_{sf} = C_p\sqrt{\frac{F_t}{bd_pI}K_aK_vK_m}$$

# استحکام خستگی سطحی دندانه ها

- موسسه AGMA، استحکام خستگی سطحی چرخ دنده‌ها با جنس‌های مختلف را ارائه می‌کند .
- چرخدنده وقتی عملکرد مطلوبی خواهد داشت که تنش سطحی ایجاد شده روی سطح چرخ‌دنده از استحکام خستگی سطح آن کمتر باشد: $\sigma_{sf} \leq S_{sf}$

- استحکام خستگی برای چرخدنده‌های چدنی و برنزی :

**TABLE 15.16 ANSI/AGMA Surface Fatigue Strength $S'_{sf}$ (Pitting Resistance) for Iron and Bronze Gears[1]**

www.sepantakalaco.ir

| Material | Material Designation | Heat Treatment | Typical Min. Surface Hardness[2] | $S'_{sf}$ ksi |
|---|---|---|---|---|
| ASTM A48 gray cast iron | Class 20 | As cast | — | 50–60 |
| | Class 30 | As cast | 174 BHN | 65–75 |
| | Class 40 | As cast | 201 BHN | 75–85 |
| ASTM A536 ductile iron (nodular) | Grade 60-40-18 | Annealed | 140 BHN | 77–92 |
| | Grade 80-55-06 | Q & T[3] | 179 BHN | 77–92 |
| | Grade 100-70-03 | Q & T | 229 BHN | 92–112 |
| | Grade 120-90-02 | Q & T | 269 BHN | 103–126 |
| Bronze | | Sand cast | Min. tensile strength, 40 ksi | 30 |
| | ASTM B-148 Alloy 954 | Heat treated | Min. tensile strength, 90 ksi | 65 |

# استحکام سطحی چرخ‌دنده‌های فولادی

**TABLE 15.15 ANSI/AGMA Surface Fatigue Strength (Pitting Resistance) $S'_{sf}$ for Steel Gears[1]**

| | | Metallurgical Quality[2] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Grade 1 | | Grade 2 | | Grade 3 | |
| Material | Heat Treatment | Min. Surf. Hardness[3] | $S'_{sf}$ ksi[4] | Min. Surf. Hardness | $S'_{sf}$ ksi[4] | Min. Surf. Hardness | $S'_{sf}$ ksi[4] |
| Steel | Through hardened | See Figure 15.30 | | | | — | — |
| | Flame or induction hardened | 50 $R_C$ | 170 | — | 190 | — | — |
| | | 54 $R_C$ | 175 | — | 195 | — | — |
| | Carburized and hardened (Min. core hard.) | 55–64 $R_C$ (21 $R_C$) | 180 | 58–64 $R_C$ (25 $R_C$) | 225 | 58–64 $R_C$ (30 $R_C$) | 275 |
| AISI 4140, AISI 4340 steel | Nitrided (through hardening) | 83.5 | 150 | 83.5 | 163 | 83.5 | 175 |
| | | 84.5 $R_{15N}$ | 155 | 84.5 $R_{15N}$ | 168 | 84.5 $R_{15N}$ | 180 |
| 2.5% chrome (no aluminum) | Nitrided | 87.5 $R_{15N}$ | 155 | 87.5 $R_{15N}$ | 172 | 87.5 $R_{15N}$ | 189 |
| Nitralloy 135M | Nitrided | 90.0 $R_{15N}$ | 170 | 90.0 $R_{15N}$ | 183 | 90.0 $R_{15N}$ | 195 |
| Nitralloy N | Nitrided | 90.0 $R_{15N}$ | 172 | 90.0 $R_{15N}$ | 188 | 90.0 $R_{15N}$ | 205 |
| 2.5% chrome (no aluminum) | Nitrided | 90.0 $R_{15N}$ | 176 | 90.0 $R_{15N}$ | 196 | 90.0 $R_{15N}$ | 216 |

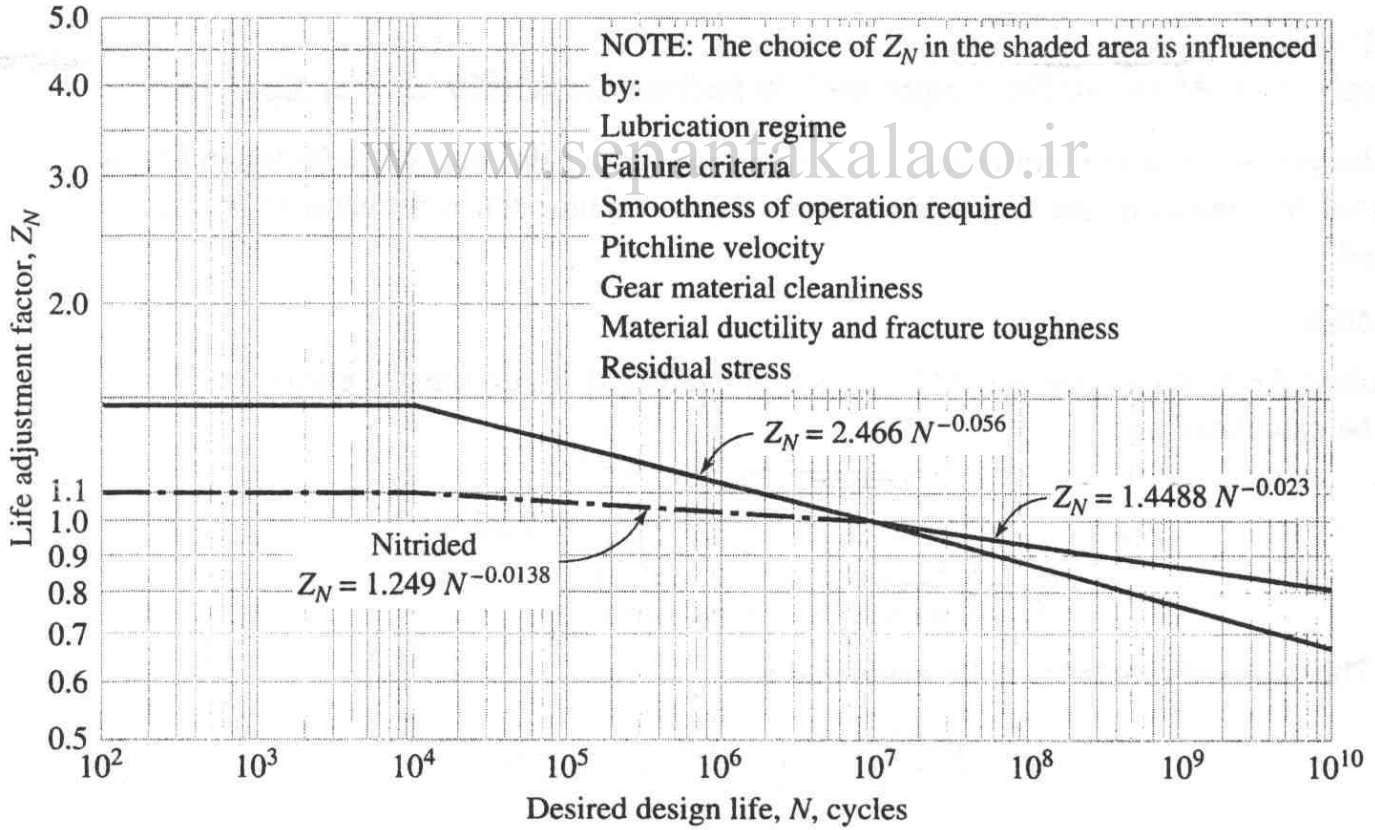
www.sepantakalaco.ir

# طراحی برای عمرها و قابلیت اعتمادهای مختلف

- برای عمرها و قابلیت های اعتماد دلخواه ( متفاوت با عمر $10^7$ دور و قابلیت اعتماد 99% ) ، باید از ضرایب تعدیل استفاده کرد .

$$S_{sf} = Z_N R_g S'_{sf}$$

- مقادیر ضرایب تعدیل $R_g$ ، مانند حالت استحکام خمشی است .
- مقادیر ضرایب تعدیل $Z_N$ ، از شکل زیر بدست می‌آید :




www.sepantakalaco.ir

# روغن کاری چرخ‌دنده‌ها (Gear Lubrication)

- غلتش کامل دو دندانه روی هم:
  - فقط در محل تماس دوایر گام دو چرخ‌دنده (نقطه گام (Pitch point))
  - تماس دو دندانه قبل و بعد از نقطه گام، همراه با لغزش است.
- لزوم روغن کاری دندانه‌ها :
  - کاهش سایش سطوح
  - کاهش ضریب اصطکاک
  - جلوگیری از داغ شدن دندانه‌ها در اثر اصطکاک (Frictional heating)
  - عملکرد نرم‌تر و کم سرو صداتر دندانه‌ها روی یکدیگر
- افت توان برای هر زوج چرخ‌دنده:
  - ساده: 0.5 تا 1 درصد
  - مارپیچ و مخروطی: 1 تا 2 درصد
  - حلزونی: وابسته به سرعت لغزش (قابل محاسبه – بیشتر از 2 درصد)
- یک قاعده عملی (Rule of Thumb):
  - افت توان ناشی از استفاده از یک زوج چرخ‌دنده **ساده، مارپیچ یا مخروطی** با در نظر گرفتن افت یاتاقان‌های محور ها : **حدود 2%** (بازده 98%).

www.sepantakalaco.ir

# روش‌های روغن کاری چرخ‌دنده‌ها

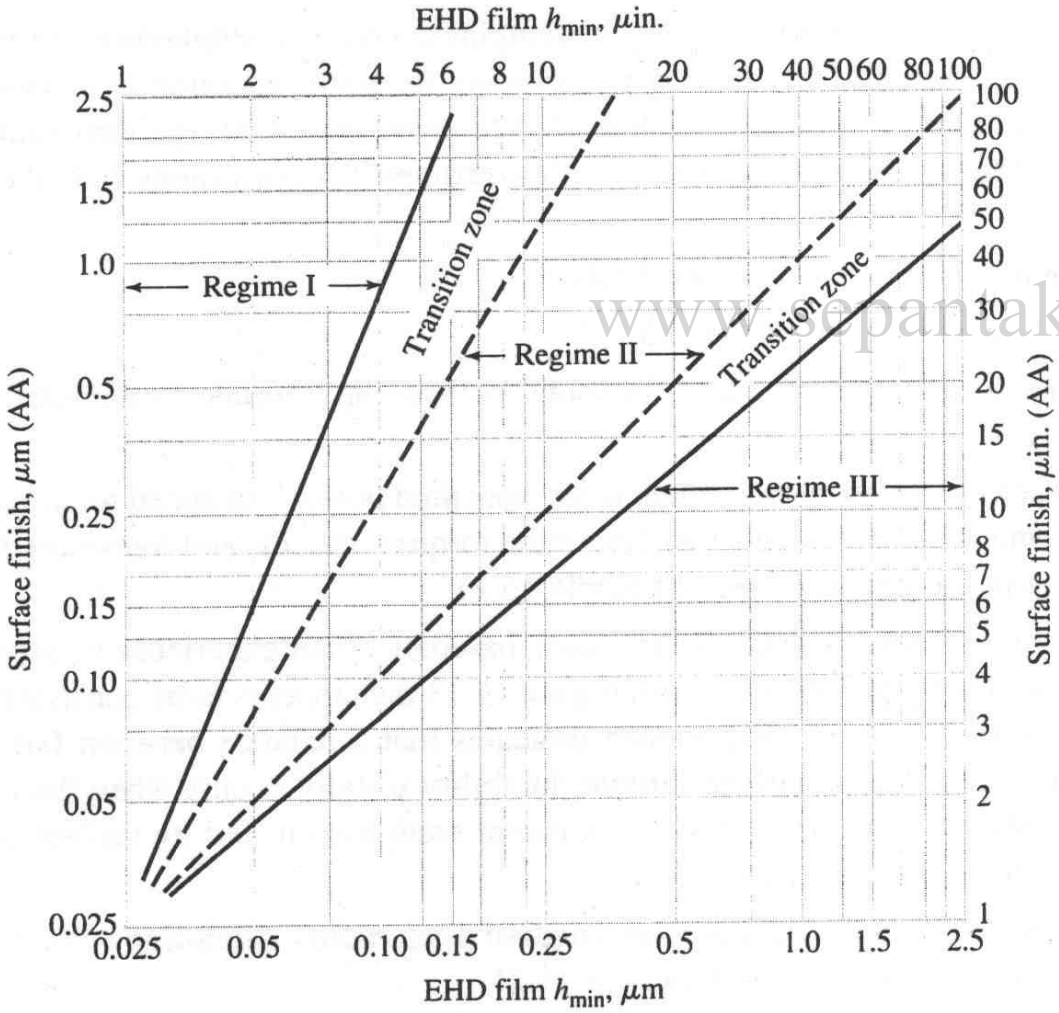
- **سرعت‌ها و بارهای کم:** می‌توان از سیستم چرخ دنده‌های باز (بدون محفظه پوششی) با روغن کاری دستی یا گریس کاری منظم استفاده کرد.
- **سرعت‌ها و بارهای متوسط:** می توان از جعبه دنده بسته (Enclosed) و سیستم پاشش روغن (Oil splash) توسط خود چرخ‌دنده استفاده کرد.
  - قسمتی از چرخ‌دنده در روغن کف محفظه فرو می‌رود و با حرکت چرخ‌دنده آن را به محل تماس چرخ‌دنده‌ها و اعضای دیگر، می‌پاشد.
  - این کار، همچنین باعث خنک شدن دندانه‌ها و هدایت حرارت ایجاد شده در محل تماس به پوسته جعبه دنده، می‌شود.
  - این روش متداول‌ترین روش روغنکاری جعبه دنده‌هاست.
- سرعت‌ها و بارهای بالا: ممکن است لازم باشد از یک سیستم پمپ روغن و پاشش روغن به محل تماس چرخ‌دنده‌ها استفاده کرد.
- اگر روغن زیاد داغ شود:
  - لازم است از مبدل حرارتی (رادیاتور) استفاده کرد تا درجه حرارات روغن را پایین بیاورد.
  - در حالت کلی، درجه حرارت قابل قبول برای روغن زیر $80^oC \sim 180^oF$ است و معمولا پایین‌تر از این درجه انتخاب می‌شود.

www.separtakalaco.ir

# روغنکاری چرخ‌دنده‌ها از نوع الاستوهیدرودینامیک
# (Elastohydrodynamic lubrication)

- روغنکاری بین قطعاتی که در حال غلتش هستند، از موارد روغن‌کاری الاستوهیدرودینامیک است که در آن جریان روغن و الاستیسیته قطعات درگیر به صورت همزمان مدل و بررسی می‌شوند.

- سه نوع روغن‌کاری در محل تماس چرخدنده‌ها ( بسته به ضخامت لایه روغن و صافی سطح چرخ‌دنده‌ها):




www.sepantakalaco.ir

**Regime I:** thin EHD oil film; full metal-to-metal contact.

**Regime II:** thin EHD oil film; partial metal-to-metal contact.

**Regime III:** thick EHD oil film; no metal-to-metal contact.

## انتقال حرارت ایجاد شده در جعبه دنده به محیط

- حرارت ایجاد شده در اثر کارکرد چرخ‌دنده‌ها، باید توسط پوسته جعبه دنده به بیرون منتقل شود، برای جلوگیری از :
  - افزایش درجه حرارت **قطعات**
  - افزایش درجه حرارت **روغن** که باعث کاهش چسبندگی آن و کاهش لایه روغن بین چرخ‌دنده‌ها می‌شود.
- با توجه به تقریب‌هایی که از بازده چرخ‌دنده ها زده می شود، می‌توان حرارت ایجاد شده در یک چرخ‌دنده را برآورد کرد.
- حرارت ایجاد شده باید توسط انتقال حرارت از سطح جعبه‌دنده به بیرون هدایت شود.
- در صورتی که انتقال حرارت به هوای بیرون کافی نباشد، باید از یک سیستم پمپاژ روغن و یک رادیاتور روغن، استفاده کرد.

www.sepantakalaco.ir

$$H_d = k_1 A_h (\theta_s - \theta_a)$$

$k_1$= modified overall heat transfer coefficient, Btu/min-in$^2$-$^o$F

[See chapter 10 for approximate values]

$A_h$= exposed surface area of housing , in$^2$

$\Theta_s$= housing surface temperature, $^o$F

$\Theta_a$=ambient air temperature, $^o$F

## روند طراحی چرخ دنده‌های ساده

– مراحل زیر را برای طراحی یک سیستم چرخ‌دنده ساده، می‌توان در نظر گرفت:

۱. بر اساس مشخصات خواسته شده در صورت مساله، یک نمای کلی از طرح شامل نحوه چیدمان چرخ‌دنده‌ها، نسبت سرعت‌ها، فواصل محورها، پیشنهاد اولیه ای برای تعداد دندانه‌ها،... را تهیه کنید.

۲. مودهای ناکارایی احتمالی چرخ‌دنده‌ها را مشخص کنید.

۳. مواد و عملیات حرارتی موردنظر برای چرخ‌دنده‌ها را انتخاب کنید.

۴. روش‌های تولید و نیز پرداخت نهایی (finishing) چرخ‌دنده‌ها را انتخاب کنید.

www.sepahtakafaco.ir

۵. استاندارد دندانه‌های مورد استفاده را تعیین کنید و بر اساس توان و سرعت چرخ‌دنده‌ها، نیروها و گشتاورهای چرخ‌دنده‌ها و تکیه‌گاهها را تعیین کنید.

۶. یک مدول (و یا گام قطری) مناسب را، بر اساس تجربه گذشته و نمونه‌های متداول ، برای هر زوج چرخ‌دنده انتخاب کنید.

- تجربه نشان می‌دهدکه گام قطری ۸ تا ۱۰ (نظیر مدول‌های ۲ تا ۳)، تعادل خوبی بین تحمل بار خمشی و بار سطحی برقرار می‌کند و مناسب‌ترند.
- معمولاً دندانه‌های ریزتر در اثر خستگی خمشی و دندانه‌های درشت‌تر در اثر خستگی سطحی به ناکارایی می‌رسند.

## روند طراحی چرخدنده‌های ساده (ادامه)

۷. تنش خمشی هر چرخ‌دنده را محاسبه، با استحکام خمشی مقایسه و ضریب اطمینان را محاسبه کنید.

- اگر ضریب اطمینان بدست آمده با ضریب اطمینان مورد نظر متفاوت است، مدول چرخ‌دنده (و در صورت نیاز جنس چرخ‌دنده) را اصلاح و محاسبات را تکرار کنید.
- تنش خمشی را می توان با استفاده از روابط تئوری و یا روش AGMA (دقیق‌تر و عملی‌تر) محاسبه کرد.

۸. ضریب اطمینان چرخ دنده ها را از لحاظ استحکام سطحی محاسبه کنید.

www.sepantakaleco.ir

- اگر ضریب اطمینان بدست آمده با ضریب اطمینان مورد نظر متفاوت است، مدول چرخ‌دنده (و در صورت نیاز جنس چرخ‌دنده) را اصلاح و محاسبات را تکرار کنید.

۹. افت‌های اصطکاکی و حرارت ایجاد شده در چرخ‌دنده‌ها را برآورد کنید و سیستم روغن‌کاری مناسبی برای دفع حرارت ایجاد شده، طراحی کنید.