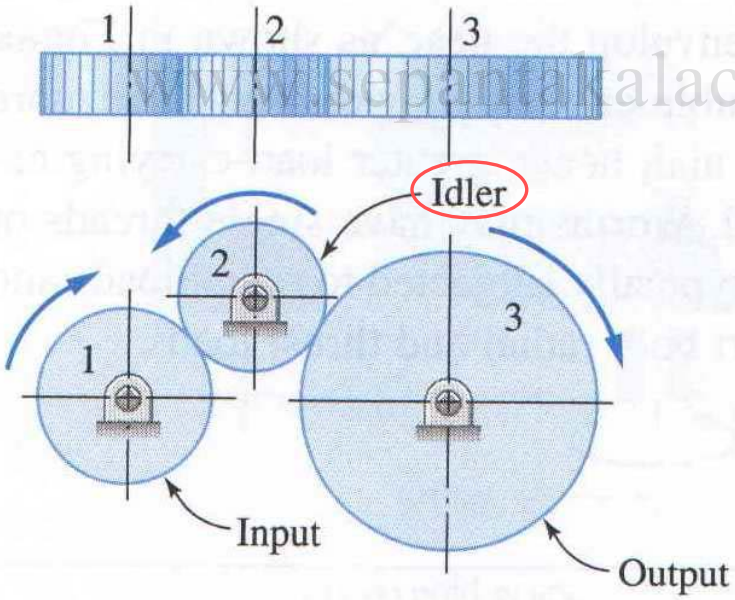
زنجیره چرخ دنده ها (Gear Trains)

- چرخ دنده ها در ترکیب های مختلفی در کنار هم قرار می گیرند تا انتقال قدرت یا حرکت را با نسبت سرعت مورد نظر انجام دهند.

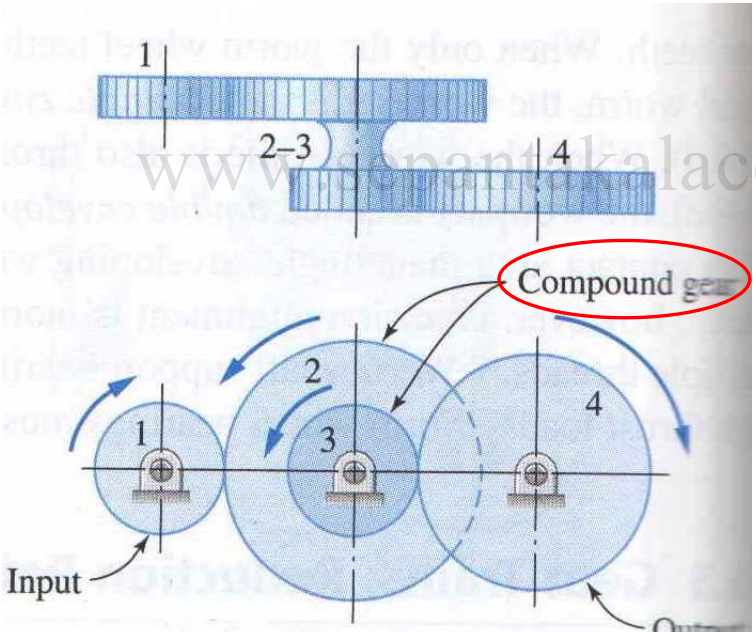
- استفاده از یک هرزگرد (Idler) برای عوض کردن جهت حرکت (یا انتقال حرکت بین دو محور)



(*a*) Simple gear train.

زنجیره چرخ دنده های ترکیبی (Compound Gears Trains)

- اگر دو چرخ دنده به هم متصل باشند و با هم بچرخند، یک چرخ دنده های ترکیبی را تشکیل می دهند.
- اگر در یک زنجیره چرخ دنده ها، حداقل یک چرخ دنده های ترکیبی وجود داشته باشد به آن زنجیره، زنجیره چرخ دنده ترکیبی گفته می شود.

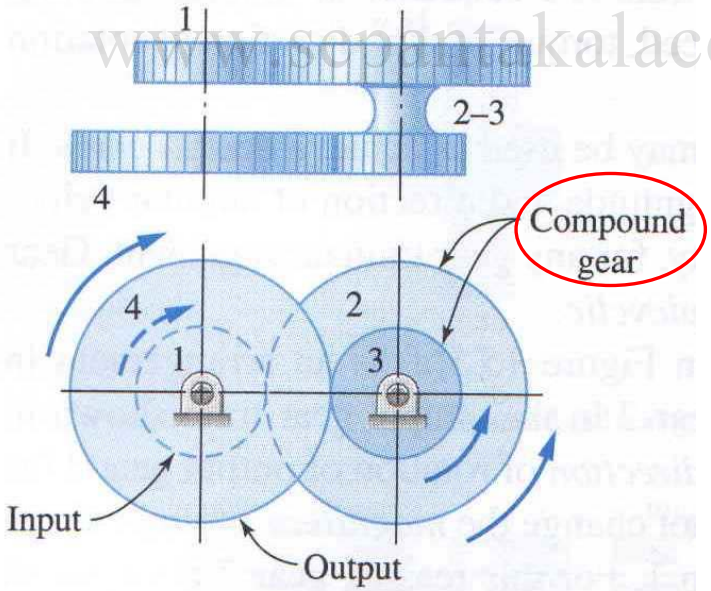


(*b*) Compound gear train; nonreverted.

زنجیره چرخ دنده های برگشتی (Revert Gear Trains)

- برگردان حرکت در امتداد محور ورودی
- محور خروجی پس از تبدیل سرعت، در امتداد محور ورودی است.
- نسبت دندانه ها (سرعت ها) باید طوری باشد که فاصله بین محورها حفظ شود.
- جای کمتری اشغال می کنند و معمولاً در وسایل نقلیه از این نوع جعبه دنده استفاده می شود.

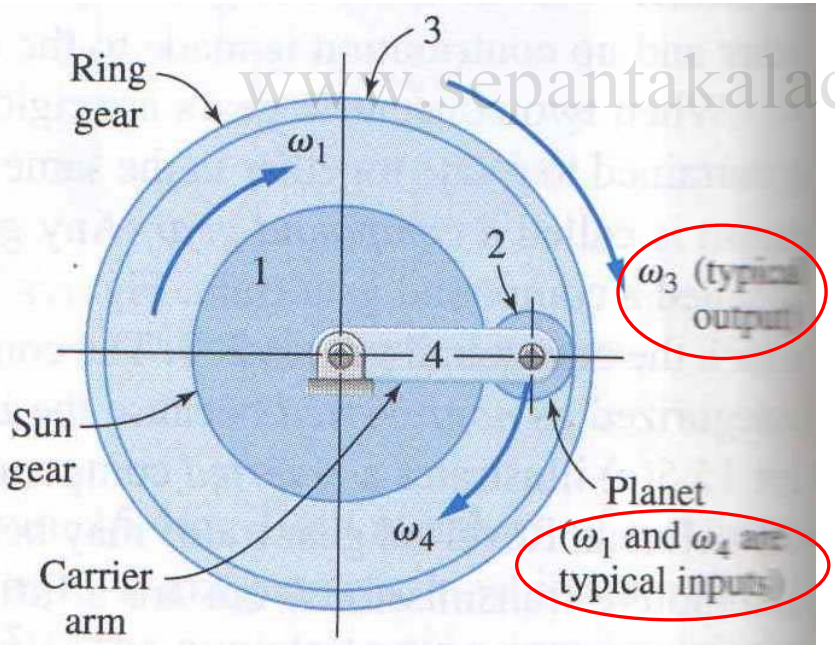
www.sepantakalaco.ir



(c) Compound gear train; reverted.

زنجیره چرخ دنده های سیاره ای (Epicyclic or Planetary Gear Trains)

- در این زنجیره ها، محور بعضی از چرخ دنده ها ثابت نیستند.
- ممکنست بیش از یک سرعت ورودی داشته باشیم و خروجی ترکیبی از این سرعت ها باشد.
- امکان کاهش یا افزایش سرعت با نسبت سرعت های بالا در یک فضای کم همراه با راندمان بالا را ایجاد می کنند (بر عکس چرخ دنده های حلزونی که توان تلف شده بالایی دارند).



(*f*) Epicyclic gear train with ring gear.

www.sepantakalaco.ir

مهمترین مودهای ناکارآیی چرخ دنده ها

- خستگی دندانه زیر بار خمشی
  - با اعمال بار به سر دندانه، در پای دندانه تنش خمشی ایجاد می شود.
  - در هر دور چرخش، دندانه یک بار بارگذاری می شود و این باعث خستگی دندانه می شود.
  - در پای دندانه تمرکز تنش وجود دارد.

www.sepantakalaco.ir

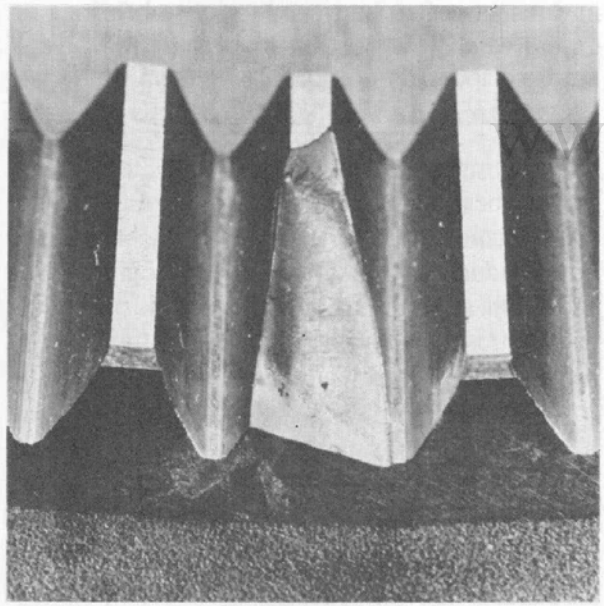
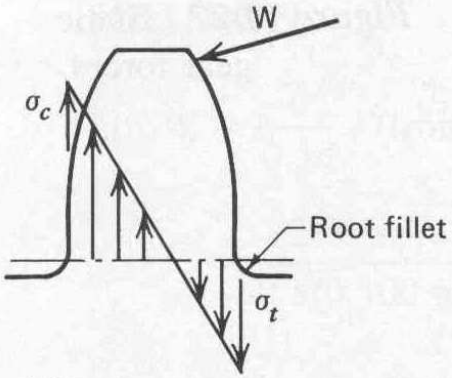
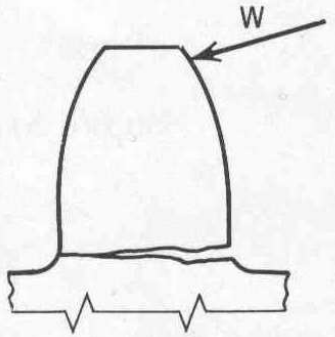


Figure 13-28 Tooth breakage. A typical fatigue failure with its smooth zone. The failure probably resulted from a heavy load or shock load (improper shifting or clutching). (Courtesy Deere and Company Technical Services.)



(*a*) Load and stresses

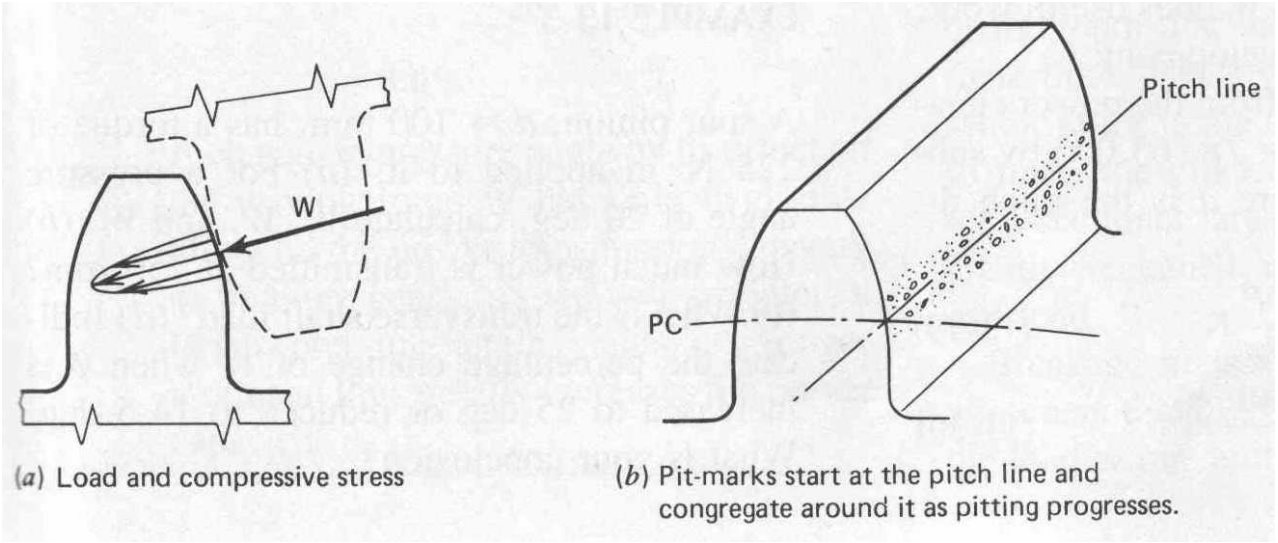


(*b*) Fracture at the root fillet

خستگی سطح دندانه (Surface fatigue)

- سطح دندانه در هر دور چرخش یک بار بارگذاری می شود. این بارگذاری تناوبی باعث خستگی سطح دندانه، ایجاد ترک و حفره (pitting) در سطح می شود
- معمولاً پنیون به علت تعداد دور زده بیشتر، زودتر از چرخ دنده به خستگی سطحی می رسد.
- در محاسبه تنش سطحی از رابطه تنش هرتز (Hertz) برای تنش در محل تماس سطوح منحنی شکل، استفاده می شود.

www.sepantakalaco.ir

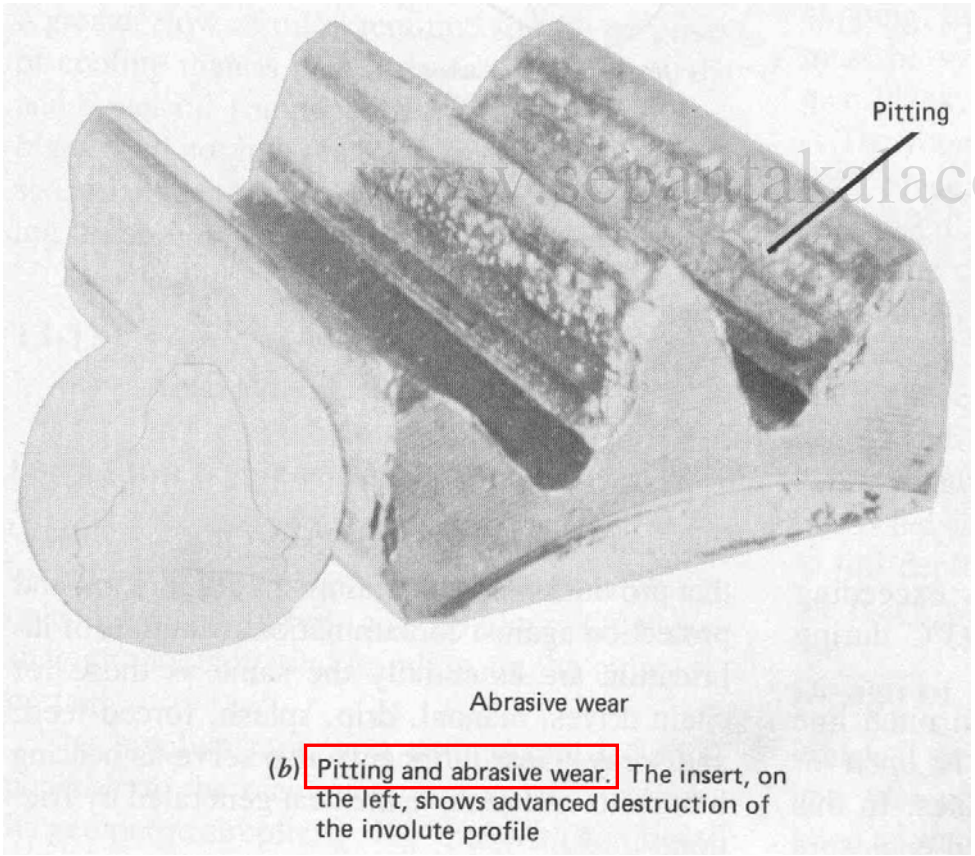


(a) Load and compressive stress

(b) Pit-marks start at the pitch line and congregate around it as pitting progresses.

سایش دندانه ها (Wear)

- لغزش سطوح دو دندانه روی یکدیگر باعث سایش یا خوردگی مکانیکی دندانه ها می شود.
- به صورت تئوری، فقط در نقطه تماس دو دایره گام، چرخ دنده ها هم سرعت هستند. هنگام تماس دو دندانه قبل و بعد از این نقطه، سطوح روی هم لغزش دارند و ساییده می شوند.
- با روغنکاری مناسب می توان اثرات سایش را کم کرد. اگر روغنکاری مناسب نباشد، در سرعت های بالا ممکنست دو دندانه هنگام کار به هم جوش بخورند و قسمت هایی از سطح کنده شود (پدیده galling).



(*b*) Pitting and abrasive wear. The insert, on the left, shows advanced destruction of the involute profile

www.sepantakalaco.ir

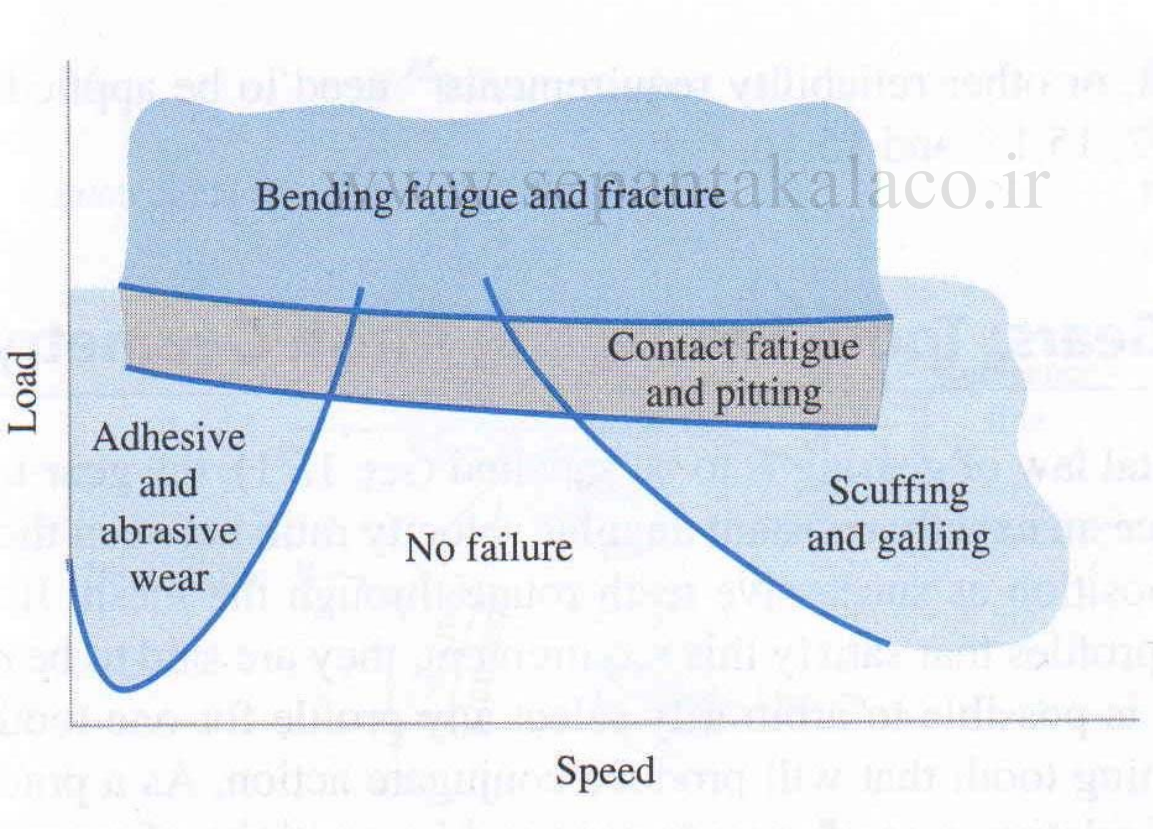
تغییر شکل کشسان ناشی از نیرو (Forced-induced elastic deformation)

- دندانه ها و بدنه چرخ دنده اجزاء الاستیکی هستند که در اثر اعمال نیرو تغییر شکل می دهند و فنریت آنها می تواند ضریب سفتی (Stiffness) مجموعه را کاهش دهد، فرکانس طبیعی آن را کاهش دهد و باعث ایجاد تشدید شود.
- نیروهای دینامیکی ناشی از اینرسی و فنریت چرخ دنده ها قابل توجه است و گاهی به مقدار نیروی ناشی از انتقال قدرت، نزدیک می شود.
- گاهی چرخ دنده ها را از جنس هایی مثل چدن می سازند تا بخشی از ارتعاشات را جذب کرده و میرایی سیستم ارتعاشی را افزایش دهد.

www.sepantakalaco.ir

مودهای ناکارآیی در سرعت ها و بارهای مختلف

- مود ناکارآیی احتمالی یک سیستم چرخ دنده بستگی به عوامل مختلفی دارد.
- دو عامل مهم در مود ناکارآیی:
  - مقدار بار منتقل شده توسط چرخ دنده ها
  - سرعت دورانی چرخ دنده ها



ویژگی های مواد چرخ دنده ها

- با توجه به مودهای ناکارآیی چرخ دنده ها، مواد به کار گرفته شده برای ساخت چرخ دنده ها باید دارای ویژگی های زیر باشند:
  - استحکام خستگی بالا
  - مقاومت سایشی خوب
  - سفتی بالا (جلوگیری از فنریت نامطلوب)
  - چغرمگی خوب (برای تحمل بارهای دینامیکی)
  - قابلیت ماشین کاری (برای قابلیت تولید و ایجاد دندانه ها)
  - جذب و میرا کردن ارتعاشات

www.sepantaksaco.ir

مواد مناسب برای چرخ دنده ها

- با توجه به ویژگی های مورد نیاز برای چرخ دنده ها، از جداول مواد (فصل ۳)، مشاهده می شود که مواد زیر برای ساخت چرخ دنده ها مناسبند:
  - فولادهای کربنی و آلیاژی
    - فولاد قابل سخت کاری کلی (Through hardening)
      (فولادهای بهسازی مثل 4340 و 4140)
    - فولادهای قابل سخت کاری سطحی
      - **فولادهای کربوره (مناسب برای سخت کاری حرارتی)**
      - **فولادهای نیتروره (مناسب برای سخت کاری شیمیایی)**

www.sepantakafaco.ir

  - چدن خاکستری ساده و آلیاژی
    - دارای استحکام متوسط
    - قابلیت جذب ارتعاشات
    - معمولاً چرخ دنده بزرگتر چدنی را با پنیون فولادی استفاده می کنند که حرکت نرمی را ایجاد می کند.
    - برای بارهای ضربه ای مناسب نیست.

مواد مناسب برای چرخ دنده ها (ادامه)

- برنز (مس + قلع) یا برنج (مس + روی)
  - برای بارهای پایین تر
  - بیشتر در چرخ حلزون برای حلزون فولادی استفاده می شوند تا ضریب اصطکاک لغزشی و سایش را کاهش دهند.
- انواع مخصوص پلیمرها
  - برای بارهای پایین
  - گاهی برای افزایش استحکام، از انواع الیاف داخل این مواد پلیمری استفاده می شود.
  - کاربرد چرخ دنده های پلیمری در حال افزایش است.
    - **هزینه پایین**
    - **شکل پذیری خوب در قالب**
  - کتاب Mott اطلاعات خوبی را در زمینه چرخ دنده های پلیمری در اختیار می گذارد.

www.sepantakalaco.ir

- استحکام خمشی بعضی از فلزات: جداول 15.10 تا 15.12
- استحکام سطحی بعضی از فلزات: جداول 15.15 و 15.16

هندسه دندانه

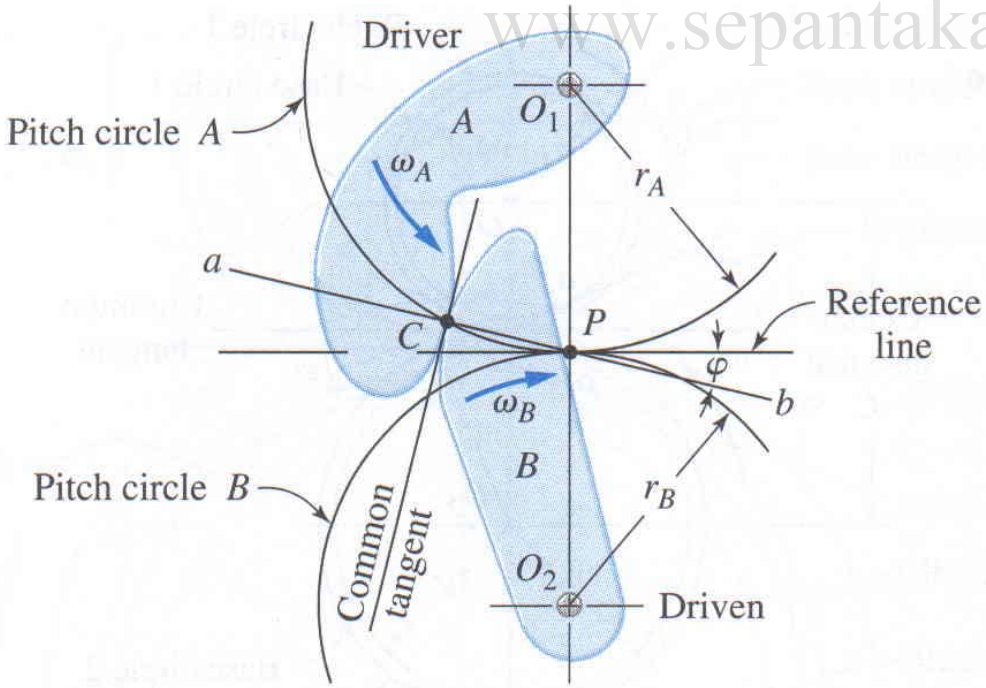
- شکل منحنی های دو دندانه درگیر باید قانون پایه چرخ دنده ها را ارضاء کند:

Fundamental law of gearing: $\omega_2 / \omega_1 = \text{cte}$

- این قانون ثابت بودن نسبت سرعت لحظه ای دو چرخ دنده را تضمین می کند.
- هر دو منحنی ای که این قانون پایه را ارضاء کنند، منحنی های مزدوج (Conjugate profiles) نامیده می شوند.
- اگر دو عضوشکل زیر، روی هم حرکت داشته باشند، نسبت سرعت:

$$\frac{\omega_B}{\omega_A} = -\frac{O_1P}{O_2P} = -\frac{r_A}{r_B}$$

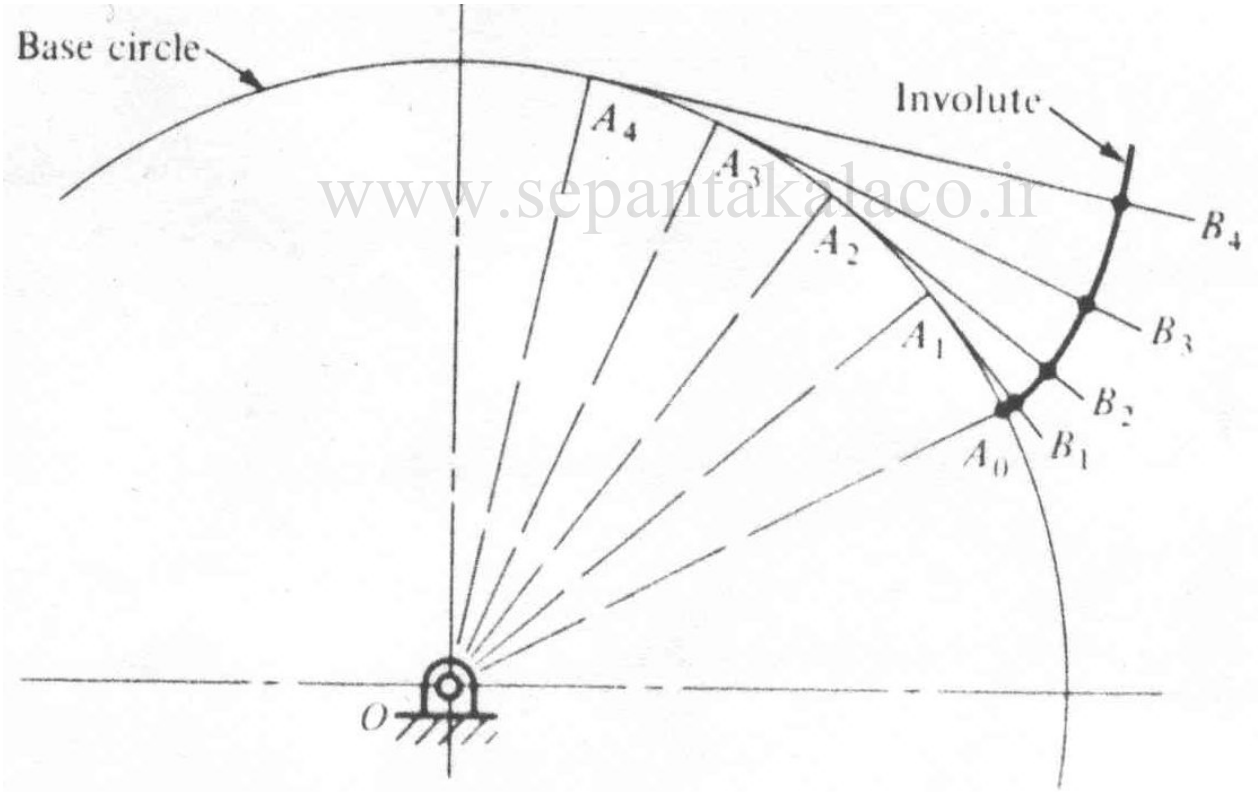
www.sepantakalaco.ir



- نقطه P: نقطه قطع عمود مشترک دو عضو در محل تماس با خط المرکزین نقاط دوران دو عضو
- برای ثابت بودن نسبت سرعت، این نقطه باید ثابت بماند.
- این نقطه محل تماس دوایر گام دو چرخ دنده است.

یک منحنی استاندارد دندانه : اینولوت (Involute)

- منحنی اینولوت یا منحنی باز شدن نخ از روی قرقره متداول ترین منحنی مورد استفاده در چرخ دنده هاست.

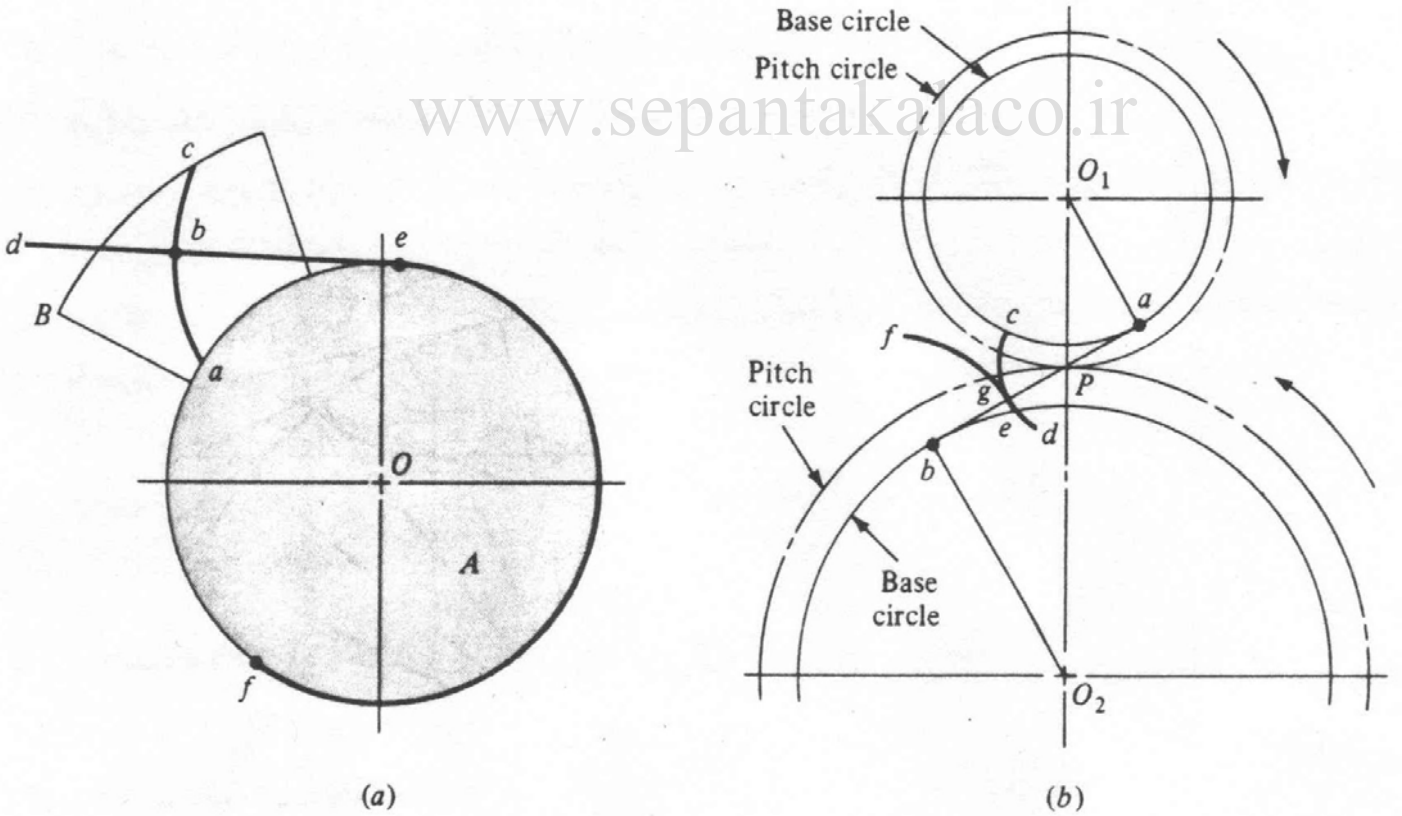


www.sepantakalaco.ir

یک زوج منحنی اینولوت: منحنی های مزدوج

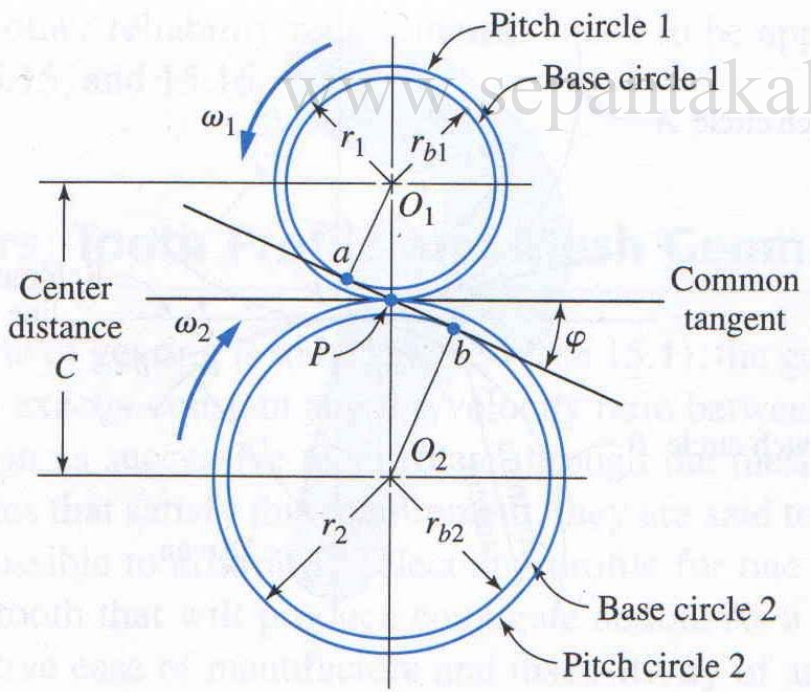
- فرض کنید نخی روی دو قرقره (دایره مبنا (base)) پیچیده شده باشد و در حالت کشیده باشد.
- در اثر حرکت قرقره ها (چرخ دنده ها)، یک نقطه روی نخ اثرهایی روی صفحات متصل به قرقره ها جا می گذارد که دو منحنی اینولوت هستند که همواره بر هم مماسند و امتداد عمود مشترک آنها همواره ثابت است (امتداد ab).
- بنابرین نقطه تقاطع عمود مشترک سطوح و خط المرکزین (P) ثابت است و نسبت سرعت ها همواره ثابت می ماند. نقطه تماس دو منحنی در امتداد ab تغییر می کند ولی P ثابت است.

www.sepantakalaco.ir



خط عمل (Line of action) و زاویه فشار (Pressure angle)

- خط عمل: امتداد عمود مشترک (امتداد ab) دو منحنی که نیروهای فشاری در این امتداد بین دو دندانه اعمال می شوند.
- زاویه فشار: زاویه ای که خط عمل با امتداد مماسی (مماس مشترک دوایر گام) می سازد.
  - **مقادیر استاندارد زوایای فشار: 20, 22½, 25 درجه.**
  - **در موارد خاص مانند چرخ دنده های حلزونی از 14½ درجه هم استفاده می شود.**



$$r_b = r\cos\varphi$$

www.sepantakalaco.ir