

کد مقاله: SBI-FAI-0002

بسمه تعالی



تاریخ انتشار: ۱۳۹۵/۰۷/۰۸

## شبکه بلبرینگ ایران مروری بر تنش های هرتز در رولربیرینگ ها

دپارتمان تحقیق و توسعه

### چکیده:

یکی از مهمترین عوامل خرابی بلبرینگ های غلتشی، جوانه زنی و گسترش ترک های خستگی از زیر سطح تماس غلتک ها و رینگ ها می باشد. این ترک ها به دلیل اعمال تنش های تماسی به المان های غلتشی و مسیر ساچمه رو در هنگام کارکرد بلبرینگ ایجاد می شوند. در این میان، آن چه ممکن است سؤال برانگیز باشد، این نکته است که چرا در اغلب موارد، ترک ها زیر سطح تماس ایجاد می شوند و نه دقیقاً روی آن؟ مقاله حاضر به مطالعه روابط هرتز در خصوص تنش های تماسی اعمالی به رولربیرینگ ها می پردازد تا ضمن درک بهتر روابط حاکم بر تنش ها در بلبرینگ های غلتشی، علت بروز ترک در زیر سطح تماس رولربیرینگ ها را مورد بررسی قرار دهد.

### کلمات کلیدی:

ترک های زیرسطحی، تنش های تماسی، تنش های هرتز، رولربیرینگ ها.

## ۱- مقدمه:

بیرینگ های غلتشی، از جمله پرکاربردترین قطعات مکانیکی در صنایع مختلف می باشند. عامل اصلی خرابی این نوع بیرینگ ها، ایجاد و گسترش ترک های خستگی در زیر سطح المان های غلتشی و مسیر ساچمه رو در رینگ های داخلی و خارجی می باشد. این ترک ها بر اثر تنش های تماسی ناشی از بارهای اعمالی در هنگام غلتش بیرینگ ها ایجاد می شوند. این تنش ها با نام تنش های هرتز<sup>۱</sup> شناخته می شوند.

تئوری هرتز، تغییر شکل الاستیک و توزیع تنش را در نزدیکی محل تماس یک المان غلتشی و مسیر حرکت آن، توصیف می کند. تحت بار، به دلیل تغییر شکل الاستیک، ناحیه تماس بین المان غلتشی و مسیر آن از حالت نقطه ای (برای بلبرینگ ها) و یا خطی (برای رولربیرینگ ها) به یک سطح تماس تبدیل می گردد. مساحت این ناحیه بسیار کوچک بوده و در نتیجه میزان فشار در این ناحیه معمولاً بالاست.

برای محاسبه فشار تماسی ماکزیمم و تغییر شکل ماکزیمم از تئوری هرتز استفاده می شود که بر مبنای فرضیات زیر شکل گرفته است [۱]:

۱- مواد تشکیل دهنده غلتک و مسیر که با هم در تماس هستند، همگن و ایزوتروپیک می باشند.  
 ۲- میزان تنش های وارده کمتر از حد تسلیم مواد است و در نتیجه از تغییر شکل های پلاستیک صرف نظر می شود.

البته در واقعیت، فرض فوق به صورت کامل تحقق نمی یابد و در هنگام اعمال بارهای سنگین، تغییر شکل پلاستیک در محل تماس مشاهده می گردد. ولی اغلب، مقدار تغییر شکل پلاستیک به حدی نیست که میزان واقعی تنش ها با نتایج حاصل از تئوری هرتز اختلاف چشمگیری داشته باشد.

۳- در ناحیه تماس، تنها تنش های عمودی انتقال می یابند. در تئوری هرتز، تنش های برشی ناشی از اصطکاک سطوح در نظر گرفته نمی شوند.

۴- ناحیه تماس صاف است. تأثیر هر گونه انحنای واقعی در تحلیل توزیع تنش ها نادیده گرفته می شود.

با در نظر گرفتن فرض آخر، تئوری هرتز برای بیرینگ هایی که شعاع انحنای ناحیه تماس در آن ها کوچک است، مانند بلبرینگ های شیار عمیق، چندان دقیق نیست. بلکه این تئوری در خصوص بیرینگ هایی که شعاع انحنای ناحیه تماس در آن ها بزرگ تر است، مانند بلبرینگ های خودتنظیم دقیق تر است. با این وجود، میزان اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر حاصل از محاسبات در اغلب موارد زیاد نیست [۱].

---

1. Hertz

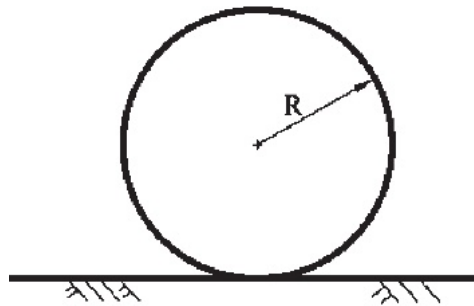
در مقاله حاضر، به منظور ساده تر شدن بحث، فقط روابط مربوط به رولربیرینگ های استوانه ای مورد بررسی قرار می گیرند.

## ۲- تعریف پارامترهای مؤثر بر تنش های هرتز در رولربیرینگ های استوانه ای:

در ابتدا لازم است که تعریف مناسبی برای برخی از پارامترهای مؤثر در محاسبات ارائه گردد.

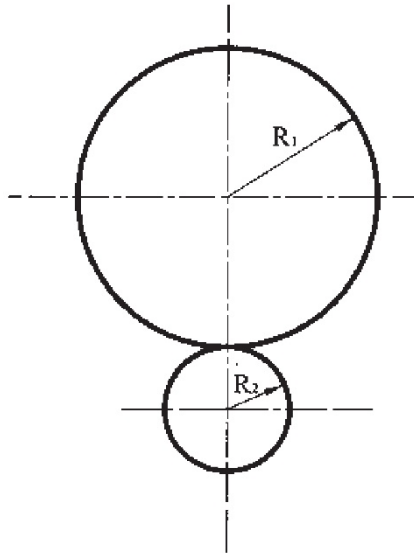
**طول مؤثر:** در رولربیرینگ های استوانه ای، خط تماس در عمل کوچکتر از طول غلتک های استوانه ای است، زیرا گوشه های غلتک ها را گرد می کنند. قسمت گرد شده در هر دو طرف، به طور تقریبی دارای طولی برابر با شعاع استوانه است. بنابراین برای تعیین طول مؤثر، قطر غلتک استوانه ای از طول المان غلتشی استوانه ای کم می شود [۱].

**شعاع معادل:** در تماس یک استوانه و صفحه، شعاع معادل که با  $R_x$  نشان داده می شود، برابر با شعاع استوانه است (شکل شماره ۱). علامت  $X$  نشان دهنده این نکته است که محور  $X$  ها در راستای محور استوانه قرار دارد.



شکل ۱: غلتش یک استوانه بر روی یک صفحه.

ولی در رولربیرینگ ها، تماس غلتک ها و مسیر ساچمه رو، بین دو استوانه ای که انحناهای متفاوتی دارند، رخ می دهد. در تمامی این موارد، یک شعاع معادل  $R_x$  مربوط به منحنی تماس، مورد استفاده قرار می گیرد. تماس بین غلتک ها و رینگ داخلی، مشابه تصویر شماره ۲ می باشد که در آن،  $R_1$  و  $R_2$  به ترتیب شعاع مسیر ساچمه رو در رینگ داخلی و شعاع غلتک می باشند.

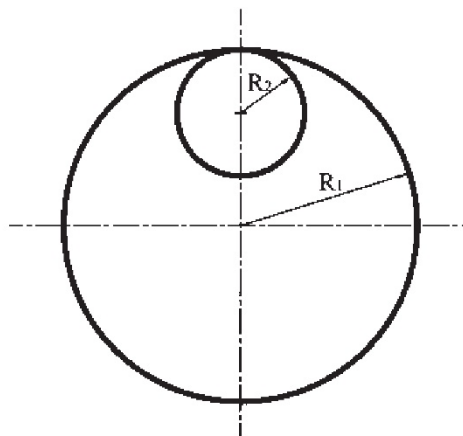


شکل ۲: غلتش یک استوانه بر روی استوانه ای دیگر.

در این صورت، شعاع معادل، از رابطه زیر به دست می آید [۱]:

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

تماس بین غلتک ها و رینگ داخلی، مشابه تصویر شماره ۳ می باشد که در آن،  $R_1$  و  $R_2$  به ترتیب شعاع مسیر ساچمه رو در رینگ داخلی و شعاع غلتک می باشند.



شکل ۳: غلتش یک استوانه در داخل استوانه ای دیگر.

در این صورت، شعاع معادل، از رابطه زیر به دست می آید [۱]:

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \quad (\text{رابطه ۲})$$

مدول الاستیسیته معادل: برای تماس دو ماده مختلف، مدول الاستیسیته معادل، که با  $E_{eq}$  نشان داده می شود، به صورت زیر تعریف می گردد [۱]:

$$\frac{2}{E_{eq}} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این جا،  $\nu_1$  و  $\nu_2$  نسبت پواسون و  $E_1$  و  $E_2$  مدول الاستیسیته استوانه هایی هستند که با یکدیگر در تماس می باشند. اگر مانند اغلب رولربیرینگ های استاندارد، هر دو استوانه از ماده یکسانی ساخته شده باشند، معادله فوق به صورت زیر ساده می شود:

$$E_{eq} = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

بار ماکزیمم اعمالی به هر غلتک: در هر لحظه، بار بیرینگ به صورت غیر یکنواخت روی تعدادی از المان های غلتشی آن توزیع می گردد. در مورد رولربیرینگ های استوانه ای، بار ماکزیمم روی یک غلتک که با علامت  $W_{max}$  نشان داده می شود، توسط رابطه شماره ۵، که بر مبنای فرض لقی صفر بنا شده است، به دست می آید [۱]:

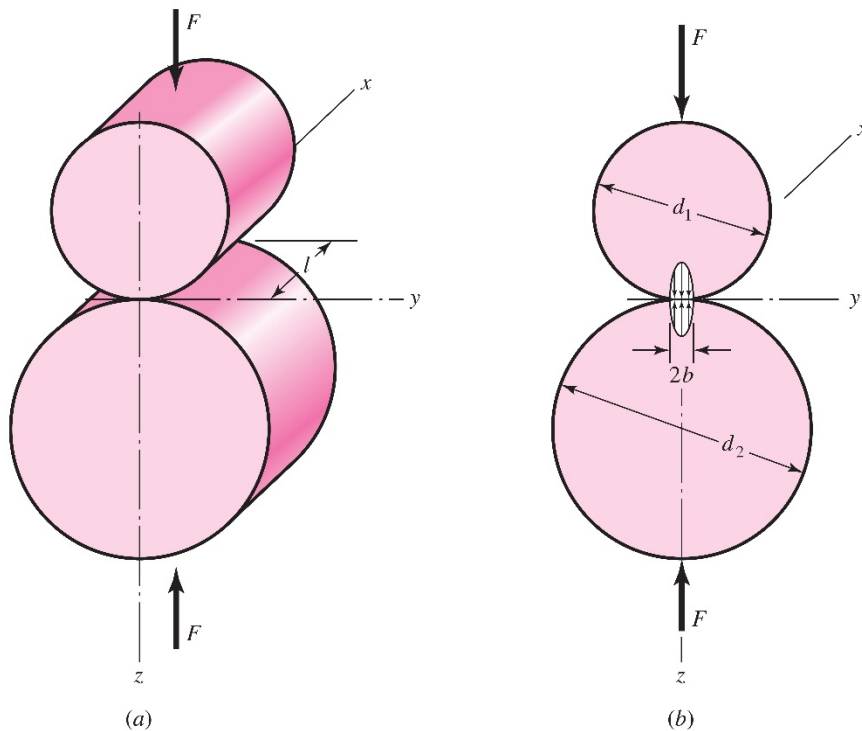
$$W_{max} \approx \frac{4 W_{bearing}}{n_r} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن  $n_r$  تعداد غلتک های بیرینگ و  $W_{bearing}$  برابر با بار شعاعی معادل بیرینگ می باشد.

بار شعاعی معادل برای هر بیرینگ، برابر با نیرویی شعاعی است که تأثیر آن بر بیرینگ، معادل با تأثیر مجموعه نیروهای شعاعی و محوری وارد بر بیرینگ می باشد. (بحث در خصوص نحوه تعیین اندازه بار معادل بیرینگ ها، خارج از موضوع این مقاله است. برای کسب اطلاعات بیشتر در این خصوص، می توانید به کتابچه های راهنمای تولید کنندگان بیرینگ، مراجعه نمایید).

### ۳- هندسه ناحیه تماس:

شکل شماره ۴، غلتش یک استوانه بر روی استوانه ای دیگر را نشان می دهد. اگر هیچ نیرویی به استوانه ها اعمال نشود، سطح تماس این دو استوانه با یکدیگر، به شکل یک خط می باشد. ولی با اعمال بار، تغییر شکل الاستیک در ناحیه تماس رخ می دهد و خط تماس به یک ناحیه تماس مستطیلی شکل تبدیل می شود که عرض آن برابر با  $2b$  است و از رابطه شماره ۶ به دست می آید [۱]، [۲] و [۳]:



شکل ۴: ناحیه تماس بین دو استوانه در صورت اعمال نیرو.

$$b = \sqrt{\frac{8 F R_x}{\pi L E_{eq}}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

این رابطه هم برای غلتش استوانه بر روی یک صفحه و هم برای غلتش یک استوانه در داخل یا بر روی یک استوانه دیگر، صادق است و همان طور که پیشتر اشاره شد، تنها مقادیر  $R_x$  تغییر خواهد کرد.

در خصوص رولربیرینگ های استوانه ای،  $W_{max}$  را از رابطه شماره ۵، محاسبه کرده و مقدار آن را به جای  $F$  در رابطه شماره ۶، جاگذاری می کنیم.

#### ۴- روابط هرتز در خصوص تنش های تماسی:

بر اساس تئوری هرتز، توزیع فشار در ناحیه تماس، سهمی وار خواهد بود و مقدار فشار ماکزیمم که در خط مرکزی ناحیه تماس رخ می دهد، از رابطه شماره ۷، به دست می آید [۲]:

$$p_{max} = \frac{2F}{\pi b l} = \sqrt{\frac{F E_{eq}}{2\pi L R_x}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

همان طور که اشاره شد، برای رولربیرینگ های استوانه ای از  $W_{max}$  به جای  $F$  استفاده می کنیم.

یکی از مواردی که مورد توجه مهندسين قرار گرفته است، اندازه مؤلفه های مختلف تنش در زیر سطح ناحیه تماس می باشد. روابط ۸، ۹ و ۱۰ بیانگر میزان این مؤلفه ها بر روی محور  $Z$  می باشند [۲]:

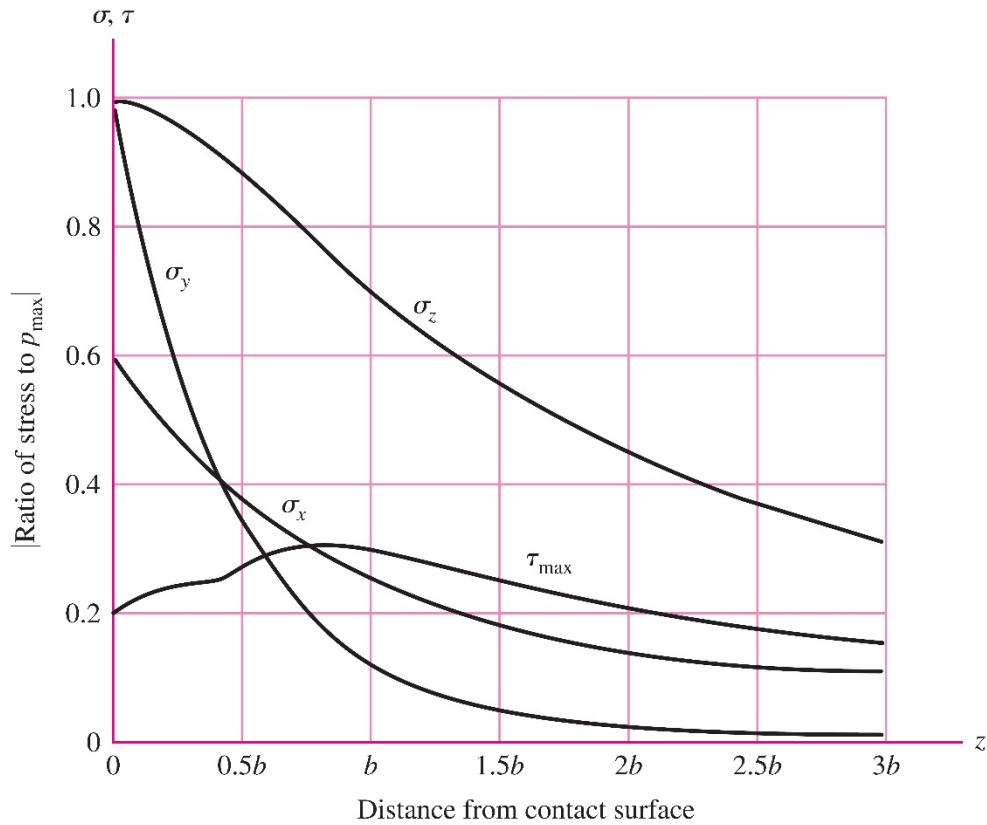
$$\sigma_x = -2\nu p_{max} \left( \sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}} - \left| \frac{z}{b} \right| \right) \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$\sigma_y = -p_{max} \left[ \left( 2 - \frac{1}{1 + \frac{z^2}{b^2}} \right) \sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}} - 2 \left| \frac{z}{b} \right| \right] \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$\sigma_z = \frac{-p_{max}}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}}} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

#### ۵- بحث و نتیجه گیری

نمودارهای مربوط به روابط ۸، ۹ و ۱۰ به همراه تنش برشی ماکزیمم، برای یک نمونه با نسبت پواسون ۰/۳۰ (که مقداری پذیرفته شده برای اغلب فلزات مهندسی است) در شکل شماره ۵، ترسیم شده اند.



شکل ۵: نمودار مؤلفه های تنش در زیر سطح تماس و روی محور z [۲].

با دقت در نمودار شکل شماره ۵، مشخص می شود که مقدار تنش برشی ماکزیمم در زیر سطح و در عمق  $\frac{z}{b} = 0.786$  بیشترین مقدار را داشته و مقدار آن برابر با  $0.30 p_{max}$  می باشد. این نکته که تنش برشی ماکزیمم در زیر سطح رخ می دهد، یکی از ویژگی های مهم تنش های تماسی است و در بسیاری از موارد، این امر دلیل رشد ترک های خستگی زیرسطحی و گسترش آن ها به سمت سطح فلز و در نهایت واماندگی خستگی بیرینگ های غلتشی است. شکل شماره ۶، یک نمونه از این نوع آسیب را در رینگ داخلی یک رولربیرینگ دو ردیفه، نشان می دهد.





شکل ۶: جوانه زنی و رشد ترک خستگی از زیر سطح به سمت سطح بیرونی رینگ داخلی یک رولربیرینگ [۴].

#### منابع:

- [1] Harnoy; A. (2005), "Bearing Design in Machinery", Marcel Dekker INC. New York.
- [2] Budynas, R.G. & Nisbett J.K. (2011), "Shigley's Mechanical Engineering Design", 9<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill.
- [3] Boresi, A.P. & Schmidt R.J. (2003), "Advanced Mechanics of Materials", 6<sup>th</sup> Edition, John Wiley & sons INC.
- [4] <http://www.ntglobal.com>, Date of access: 2016.09.24.