



تأثیر عرض دندانه بر ضریب اصطکاک، تنش فون مایزز، نیروهای تماس و فرکانس طبیعی در گیربکس هارمونیک

احمد قادری زفره‌ی^۱، دکتر جعفر اسکندری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه مالک اشتر، تهران

۲- مجتمع مکانیک و فناوری‌های ساخت، دانشگاه مالک اشتر، تهران Eskandari@MUT.ac.ir

خلاصه

چرخ‌دنده‌های هارمونیک به دلیل دقت بالا، نسبت تبدیل بزرگ و وزن کم، در سامانه‌های انتقال قدرت با الزامات عملکردی بالا نظیر رباتیک، صنایع هوافضا و تجهیزات پزشکی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. یکی از پارامترهای کلیدی در بهبود کارایی دینامیکی و دوام این چرخ‌دنده‌ها، پهنای دندانه است که مستقیماً بر رفتار تماس، ضریب اصطکاک و مشخصات ارتعاشی مجموعه تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش، اثر تغییر پهنای دندانه بر ضریب اصطکاک و فرکانس طبیعی چرخ‌دنده هارمونیک به صورت هم‌زمان مورد بررسی عددی و تحلیلی قرار گرفته است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای طراحی بهینه چرخ‌دنده‌های هارمونیک با کارایی تریبولوژیکی و دینامیکی برتر در کاربردهای دقیق مهندسی قرار گیرد.

کلمات کلیدی: گیربکس هارمونیک، پهنای دندانه، ضریب اصطکاک، فرکانس طبیعی، تحلیل مودال، تماس دندانه‌ها، تحلیل اجزای محدود



۱. مقدمه

چرخنده‌های هارمونیک به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین مکانیزم‌های انتقال حرکت و توان در سامانه‌های دقیق، جایگاه ویژه‌ای در صنایع رباتیک، هوافضا، ابزار دقیق و سامانه‌های پزشکی یافته‌اند. ویژگی‌هایی نظیر نسبت تبدیل بالا، دقت حرکتی فوق‌العاده، بازیافت کم و وزن سبک موجب شده است که این چرخنده‌ها در کاربردهایی که نیازمند کنترل موقعیت دقیق و گشتاور بالا در ابعاد کوچک هستند، بر سایر انواع چرخنده‌ها برتری یابند [۱]. عملکرد مکانیکی و دینامیکی این سامانه به شدت به هندسه و مشخصات تماسی دندانه‌ها وابسته است؛ از جمله پارامترهایی که تأثیر چشمگیری بر رفتار اصطکاکی، بازده انتقال توان و پاسخ ارتعاشی دارد، پهنای دندانه است. پهنای دندانه، به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی طراحی، نقش دوگانه‌ای در عملکرد چرخنده هارمونیک ایفا می‌کند. از یک سو افزایش پهنای موجب افزایش سطح تماس مؤثر و در نتیجه کاهش تنش‌های تماسی و بهبود توزیع بار می‌شود، و از سوی دیگر، با تغییر شرایط تماس و ارتعاشات موضعی، می‌تواند موجب افزایش مقاومت اصطکاکی و تغییر در رفتار دینامیکی سامانه گردد [۲]. بررسی دقیق این اثرات، به‌ویژه از دیدگاه تحلیل تریبولوژیکی و مودال، برای طراحی بهینه و افزایش عمر کاری چرخنده‌های هارمونیک اهمیت بسزایی دارد. مطالعات پیشین عمدتاً بر تحلیل استاتیکی، مدل‌سازی هندسی یا شبیه‌سازی‌های تنش تماسی متمرکز بوده‌اند و تأثیر هم‌زمان پهنای دندانه بر ضریب اصطکاک و فرکانس طبیعی کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۳]. در حالی که در سامانه‌های با دقت بالا، تعامل بین نیروهای اصطکاکی و پاسخ دینامیکی نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد کلی، نویز ارتعاشی و بازده مکانیکی دارد. در این پژوهش، با هدف پر کردن این خلأ علمی، یک مطالعه جامع عددی و تحلیلی بر روی اثر تغییر پهنای دندانه بر ضریب اصطکاک و فرکانس طبیعی چرخنده هارمونیک ارائه شده است. در این راستا، ابتدا مدل سه‌بعدی چرخنده در محیط اجزای محدود ایجاد و شرایط تماس واقعی بین حلقه‌منعطف و چرخنده دایره‌ای لحاظ گردیده است [۴]. سپس با استفاده از مدل‌های پیشرفته اصطکاک و تحلیل مودال، تغییرات ضریب اصطکاک مؤثر و فرکانس‌های طبیعی اصلی در پهنای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج این پژوهش می‌تواند در بهینه‌سازی طراحی هندسی، کاهش تلفات اصطکاکی، و بهبود پایداری دینامیکی چرخنده‌های هارمونیک مورد استفاده قرار گیرد و مسیر توسعه نسل جدیدی از سامانه‌های انتقال حرکت با دقت بالا را هموار سازد.

۲. ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش



چرخ‌دنده‌های هارمونیک به‌عنوان یکی از مکانیزم‌های کلیدی در انتقال حرکت دقیق، به دلیل ویژگی‌هایی مانند نسبت تبدیل بالا، گشتاور زیاد، وزن کم و دقت حرکتی فوق‌العاده، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌اند. عملکرد این چرخ‌دنده‌ها به‌شدت به پارامترهای تریبولوژیکی و دینامیکی اجزای آن‌ها وابسته است؛ از جمله هندسه و پهنای دندانه‌ها، که تأثیر مستقیمی بر توزیع تنش تماس، ضریب اصطکاک، و پاسخ ارتعاشی سامانه دارند. در دهه اخیر، مطالعات متعددی در زمینه بهبود عملکرد تریبولوژیکی و دینامیکی چرخ‌دنده‌های هارمونیک انجام شده است که در ادامه مرور می‌شوند. ما، یان، یین و یانگ (۲۰۱۸) یکی از نخستین پژوهش‌های جامع را در زمینه رفتار اصطکاکی چرخ‌دنده‌های هارمونیک در سرعت‌های پایین انجام دادند. آن‌ها با طراحی یک دستگاه آزمایشی دقیق، نشان دادند که رفتار اصطکاکی این چرخ‌دنده‌ها از نوع Strobeck است و ضریب اصطکاک در مراحل مختلف حرکت (شروع، لغزش و پایداری) متغیر است. این مطالعه مبنای مهمی برای مدل‌سازی دقیق اصطکاک در تماس دندانه‌ها محسوب می‌شود [۱]. در ادامه، گروآوانو، موسینو و پنستری (۲۰۲۰) مدلی ساده‌شده اما دقیق برای تحلیل بازده مکانیکی چرخ‌دنده‌های هارمونیک ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که پارامترهای تریبولوژیکی، به‌ویژه ضریب اصطکاک وابسته به فشار و سرعت، بیشترین سهم را در افت راندمان و تلفات انرژی دارند. مدل تحلیلی ارائه‌شده توسط این پژوهشگران، پایه‌ای برای تحلیل اثر پارامترهای هندسی از جمله پهنای دندانه بر عملکرد کلی چرخ‌دنده‌ها فراهم کرد [۲]. لی، لی، گوا و شانگ (۲۰۲۱) با بهره‌گیری از روش اجزای محدود، به بررسی ویژگی‌های مکانیکی تماس میان اجزای انعطاف‌پذیر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییر پهنای دندانه یا طول مؤثر تماس، منجر به تغییر محسوس در توزیع فشار و لغزش نسبی بین دندانه‌ها می‌شود. این یافته تأیید می‌کند که پهنای دندانه نه تنها بر تنش‌های تماسی، بلکه بر رفتار اصطکاکی و سایش موضعی نیز اثرگذار است [۳]. ترانگ (۲۰۲۲) نیز با هدف تسریع فرایند طراحی، یک روش سریع محاسبه تنش برای فلکس‌اسپلین ارائه کرد و نشان داد که پارامترهای هندسی دندانه، به‌ویژه ضخامت و پهنای نقش تعیین‌کننده‌ای در تمرکز تنش دارند. این مطالعه اهمیت در نظر گرفتن پهنای دندانه به‌عنوان یک پارامتر طراحی کلیدی در تحلیل‌های دینامیکی را برجسته کرد [۴]. ژائو و همکاران (۲۰۲۲) تمرکز خود را بر تحلیل فرسایش و سایش سطحی دندانه‌ها قرار دادند و با توسعه مدل عددی بهبودیافته، نشان دادند که هندسه تماس اولیه از جمله پهنای دندانه، نقش تعیین‌کننده‌ای در سرعت سایش و تغییرات ضریب اصطکاک در طول زمان دارد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی بهینه پهنای دندانه می‌تواند طول عمر سیستم را به‌طور چشمگیری افزایش دهد [۵]. در همین راستا، هو و همکاران (۲۰۲۳) در یک مطالعه تجربی، اثر جنس و عملیات سطحی بر اصطکاک خشک و سایش در اسپلین چرخ‌دنده‌های هارمونیک را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که انتخاب مناسب جنس و عملیات سطحی می‌تواند موجب کاهش قابل توجه ضریب اصطکاک شود. این یافته به‌صورت غیرمستقیم نشان می‌دهد که طراحی بهینه پهنای دندانه باید همراه با انتخاب متریال مناسب صورت گیرد تا کارایی تریبولوژیکی به حداکثر برسد [۶]. گوئیدا و همکاران (۲۰۲۴) با رویکردی جامع‌تر، مکانیزم‌های خرابی و زوال عملکردی در چرخ‌دنده‌های هارمونیک را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از تحلیل FMECA نشان دادند که طراحی غیربهینه هندسه دندانه، از جمله افزایش یا کاهش بیش از حد پهنای دندانه، می‌تواند منجر به تمرکز تنش، افزایش دمای تماس و در نهایت خرابی زودرس شود. این مطالعه اهمیت طراحی هندسی دقیق برای جلوگیری از ارتعاشات ناخواسته و افزایش عمر کاری را برجسته می‌کند [۷]. در آخر، هو و همکاران (۲۰۲۴) با معرفی روش اصلاح طولی دندانه‌ها در چرخ‌دنده‌های دارای فلکس‌اسپلین کوتاه، نشان دادند که افزایش پهنای مؤثر دندانه‌ها باعث کاهش فشار تماس و افزایش سختی موضعی می‌شود. نتایج تحلیل مودال این پژوهش حاکی از آن است که افزایش پهنای دندانه موجب افزایش فرکانس طبیعی اولیه سامانه و پایداری دینامیکی بهتر می‌گردد [۸].



مرور مطالعات اخیر نشان می‌دهد که هرچند تحقیقات متعددی به بررسی جنبه‌های تریبولوژیکی، تماس دندان‌ها، و رفتار دینامیکی چرخ‌دنده‌های هارمونیک پرداخته‌اند، اما تأثیر هم‌زمان پهنای دندان بر ضریب اصطکاک و فرکانس طبیعی کمتر به صورت جامع مورد مطالعه قرار گرفته است. بیشتر پژوهش‌ها یا بر جنبه‌ی استاتیکی تماس و سایش متمرکز بوده‌اند، یا به تحلیل مودال بدون لحاظ اثرات تریبولوژیکی پرداخته‌اند. از این رو، خلای آشکار در ادبیات موجود در زمینه تحلیل هم‌زمان اثرات هندسی (پهنای دندان) بر رفتار تریبولوژیکی و دینامیکی دیده می‌شود. پژوهش حاضر در راستای پر کردن این خلأ، با تلفیق تحلیل‌های تریبولوژیکی (ضریب اصطکاک مؤثر) و دینامیکی (فرکانس‌های طبیعی)، تأثیر تغییر پهنای دندان را در عملکرد کلی چرخ‌دنده هارمونیک مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنایی علمی برای طراحی بهینه چرخ‌دنده‌های هارمونیک با کارایی بالا و عمر کاری طولانی‌تر فراهم آورد.

۳. روش تحقیق

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر پهنای دندان چرخ‌دنده‌های هارمونیک بر ضریب اصطکاک، نیروهای تماس، تنش فون میزز و فرکانس طبیعی سیستم است. برای نیل به این هدف، از روش عددی-تحلیلی استفاده شد که شامل مدل‌سازی هندسی چرخ‌دنده، تحلیل تماس بین دندان‌ها و تحلیل دینامیکی سیستم با تغییر پهنای دندان‌ها می‌باشد. مدل سه‌بعدی چرخ‌دنده هارمونیک شامل اجزای اصلی یعنی مولد موج، حلقه‌منعطف و چرخ‌دنده دایره‌ای طراحی گردید. پهنای دندان به عنوان متغیر مستقل اصلی در نظر گرفته شد و در شش حالت مختلف شامل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. سایر پارامترهای هندسی چرخ‌دنده ثابت نگه‌داشته شدند تا اثر پهنای دندان به صورت خالص بر پاسخ‌های سیستم مطالعه شود. مدل تماس بین دندان‌ها بر اساس تئوری Coulomb Dry Friction و با فرض تماس خشک بین سطوح درگیر شبیه‌سازی شد. ضریب اصطکاک بین سطوح تماس به صورت متغیر با فشار و پهنای دندان اندازه‌گیری و ثبت گردید.

۴. نتایج و بحث

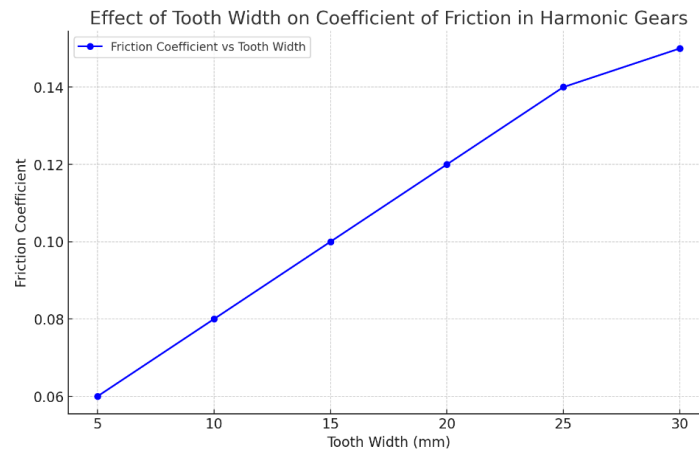
بررسی تأثیر پهنای دندان بر ضریب اصطکاک در چرخ‌دنده‌های هارمونیک

مشاهده می‌شود که با افزایش پهنای دندان‌های چرخ‌دنده هارمونیک، ضریب اصطکاک نیز افزایش می‌یابد. این نشان‌دهنده این است که سطح تماس بیشتر بین دندان‌ها و سایر اجزاء، باعث افزایش اصطکاک می‌شود. افزایش پهنای دندان‌ها باعث می‌شود که سطح تماس بین دندان‌ها و دیگر اجزای چرخ‌دنده بزرگ‌تر شده و اصطکاک بیشتری ایجاد شود. این امر می‌تواند منجر به افزایش حرارت، سایش و در نهایت کاهش عمر مفید چرخ‌دنده‌ها گردد. این نتایج نشان می‌دهند که برای بهینه‌سازی عملکرد چرخ‌دنده‌ها، باید پهنای دندان‌ها به طور دقیق تنظیم شود تا از افزایش بی‌رویه اصطکاک جلوگیری شود. همچنین، بررسی و ارزیابی ضریب اصطکاک در طراحی چرخ‌دنده‌ها ضروری است تا از تأثیرات منفی آن بر روی سایش و عمر مفید سیستم جلوگیری شود.



جدول ۱- تاثیر پهنای دندان بر ضریب اصطکاک در چرخنده های هارمونیک

ضریب اصطکاک	پهنای دندان (میلی متر)
۰.۰۶	۵
۰.۰۸	۱۰
۰.۱۰	۱۵
۰.۱۲	۲۰
۰.۱۴	۲۵
۰.۱۶	۳۰



شکل ۱- نمودار تاثیر پهنای دندانه بر ضریب اصطکاک در چرخ‌دنده‌های هارمونیک

نمودار نشان‌دهنده رابطه افزایش پهنای دندانه‌ها با افزایش ضریب اصطکاک در چرخ‌دنده‌های هارمونیک است. با افزایش پهنای دندانه‌ها، ضریب اصطکاک نیز به طور پیوسته افزایش می‌یابد.

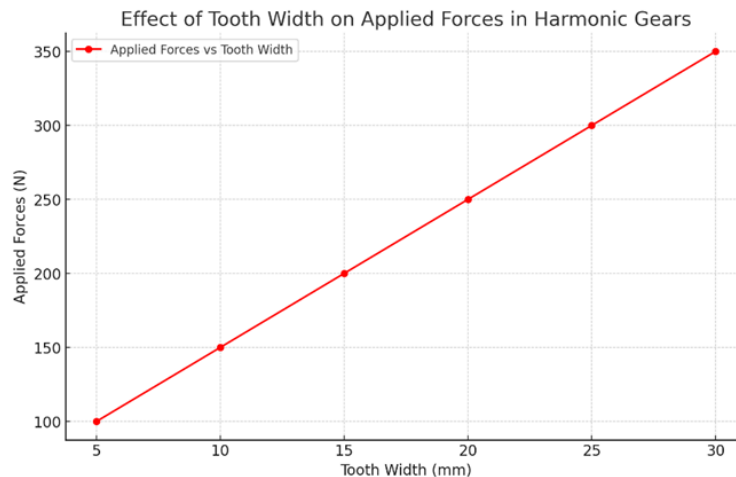
بررسی تاثیر پهنای دندانه بر نیروهای اعمالی در چرخ‌دنده‌های هارمونیک

همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش پهنای دندانه‌ها، نیروهای اعمالی بر چرخ‌دنده‌ها افزایش پیدا می‌کند. این رابطه به صورت خطی است که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم افزایش پهنای دندانه‌ها بر میزان نیروی وارد بر سیستم است. پهنای دندانه‌ها تأثیر زیادی بر نحوه توزیع بار و افزایش سطح تماس بین دندانه‌ها دارد. هرچه پهنای دندانه بیشتر باشد، سطح تماس نیز افزایش می‌یابد و بنابراین نیروی بیشتری می‌تواند بر چرخ‌دنده اعمال شود. این داده‌ها نشان می‌دهند که برای حفظ عملکرد بهینه چرخ‌دنده‌ها، باید تعادل مناسبی بین پهنای دندانه‌ها و نیروهای اعمالی برقرار شود. افزایش بیش از حد پهنای دندانه ممکن است باعث افزایش فشار بر چرخ‌دنده‌ها و در نتیجه کاهش عمر مفید سیستم شود.



جدول ۲- تاثیر پهنای دندانه بر نیروهای اعمالی در چرخنده های هارمونیک

پهنای دندانه (میلی متر)	نیروهای اعمالی (نیوتن)
۵	۱۱۲
۱۰	۱۶۵
۱۵	۲۲۰
۲۰	۲۶۴
۲۵	۳۰۵
۳۰	۳۵۳



شکل ۲- نمودار تاثیر پهنای دندانه بر نیروهای اعمالی در چرخ‌دنده‌های هارمونیک

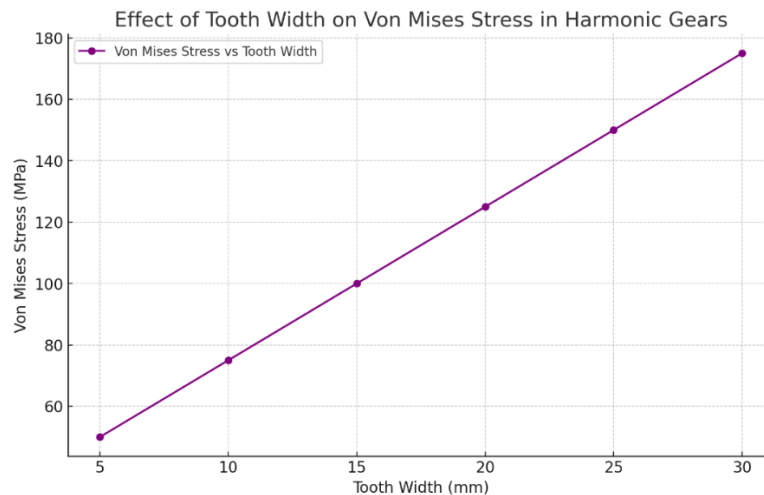
نمودار نشان می‌دهد که با افزایش پهنای دندانه‌ها، نیروهای اعمالی بر چرخ‌دنده‌های هارمونیک به طور خطی افزایش می‌یابد.

بررسی تأثیر پهنای دندانه‌های چرخ‌دنده هارمونیک بر تنش‌های فون مایزر

همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش پهنای دندانه، تنش فون مایزر نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد دندانه‌ها، ممکن است توزیع بار به طور یکنواخت‌تری بین دندانه‌ها صورت نگیرد و این امر می‌تواند باعث افزایش تمرکز تنش‌ها شود. افزایش پهنای دندانه می‌تواند باعث افزایش بار تماس و در نتیجه افزایش تنش‌های اعمالی شود. در طراحی چرخ‌دنده‌های هارمونیک، باید توجه ویژه‌ای به انتخاب پهنای دندانه‌ها داشته باشیم تا از بروز آسیب‌های ناشی از تنش‌های زیاد جلوگیری شود. این نتایج تأکید دارند که طراحی چرخ‌دنده‌ها باید متناسب با نیازهای بارگذاری و توزیع تنش‌ها باشد. انتخاب مناسب پهنای دندانه می‌تواند به بهبود عملکرد و افزایش عمر مفید چرخ‌دنده‌ها کمک کند.

جدول ۳- نمودار تأثیر پهنای دندانه‌های چرخ‌دنده هارمونیک بر تنش‌های فون مایزر

پهنای دندانه (میلی‌متر)	بر حسب مگا پاسکال تنش فون مایزر
۵	۴۸
۱۰	۷۲
۱۵	۹۶
۲۰	۱۲۶
۲۵	۱۵۳
۳۰	۱۷۸



شکل ۳- نمودار تأثیر پهنای دندانه‌های چرخ‌دنده هارمونیک بر تنش‌های فون مایز

نمودار نشان می‌دهد که با افزایش پهنای دندانه‌های چرخ‌دنده هارمونیک، تنش فون مایز نیز به طور خطی افزایش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده تأثیر مستقیم پهنای دندانه‌ها بر میزان تنش‌های اعمالی بر دندانه‌ها است.

بررسی تأثیر پهنای چرخ‌دنده‌ها بر فرکانس طبیعی چرخ‌دنده‌های هارمونیک

فرکانس طبیعی در چرخ‌دنده‌های هارمونیک به فرکانسی اشاره دارد که در آن سیستم تمایل به نوسان یا ارتعاش دارد. این فرکانس‌ها ناشی از ویژگی‌های ارتعاشی و دینامیکی چرخ‌دنده‌ها و سیستم‌های مربوط به آن‌ها هستند. در واقع، فرکانس طبیعی به دلیل ویژگی‌های سیستم مانند جرم، سختی، و شکل هندسی آن‌ها بوجود می‌آید. اگر سیستم در فرکانس‌های طبیعی خود قرار گیرد، می‌تواند باعث ارتعاش‌های ناخواسته، کاهش دقت و حتی خرابی چرخ‌دنده‌ها شود. فرکانس طبیعی در چرخ‌دنده‌های هارمونیک معمولاً به صورت زیر تعیین می‌شود. ویژگی‌های هندسی مانند اندازه دندانه‌ها، فاصله بین دندانه‌ها و عمق دندانه‌ها می‌تواند تأثیر زیادی بر فرکانس طبیعی داشته باشد. طراحی چرخ‌دنده‌ها باید به گونه‌ای باشد که ارتعاشات ناشی از آن‌ها در فرکانس‌های طبیعی سیستم قرار نگیرد. مواد مورد استفاده در ساخت چرخ‌دنده‌ها تأثیر زیادی بر فرکانس طبیعی دارند. مواد با سختی بیشتر و چگالی بالاتر معمولاً فرکانس طبیعی بالاتری دارند. از طرفی، مواد با خواص انعطاف‌پذیرتر ممکن است فرکانس‌های طبیعی پایین‌تری داشته باشند. بارهای وارد بر چرخ‌دنده‌ها و گشتاوری که بر آن‌ها اعمال می‌شود، می‌تواند فرکانس طبیعی سیستم را تغییر دهد. افزایش بار ممکن است موجب کاهش فرکانس‌های طبیعی شود و به ارتعاشات یا آسیب‌های غیرعادی منجر شود. سرعت چرخش چرخ‌دنده‌ها و سرعت حرکت نسبی در تماس دندانه‌ها نیز می‌تواند بر فرکانس‌های طبیعی تأثیر بگذارد. سرعت بالا ممکن است باعث افزایش ارتعاشات در سیستم شود. محل نصب چرخ‌دنده‌ها و شرایط محیطی نیز می‌تواند بر رفتار دینامیکی چرخ‌دنده‌ها تأثیرگذار باشد. عواملی مانند دمای محیط، شرایط روانکاری، و حتی نوع نصب چرخ‌دنده‌ها می‌تواند موجب تغییر در فرکانس‌های طبیعی سیستم شود.

عوامل تأثیرگذار بر فرکانس طبیعی در گیربکس‌های هارمونیک

- سختی و تنش‌های اعمالی: چرخ‌دنده‌ها در شرایط بارگذاری و تنش‌های مختلف قرار دارند. این تنش‌ها می‌تواند باعث تغییر در فرکانس‌های طبیعی سیستم شوند. اگر بار وارد بر چرخ‌دنده‌ها به اندازه‌ای باشد که باعث تغییر خواص مکانیکی آن‌ها شود، فرکانس طبیعی نیز تغییر خواهد کرد.

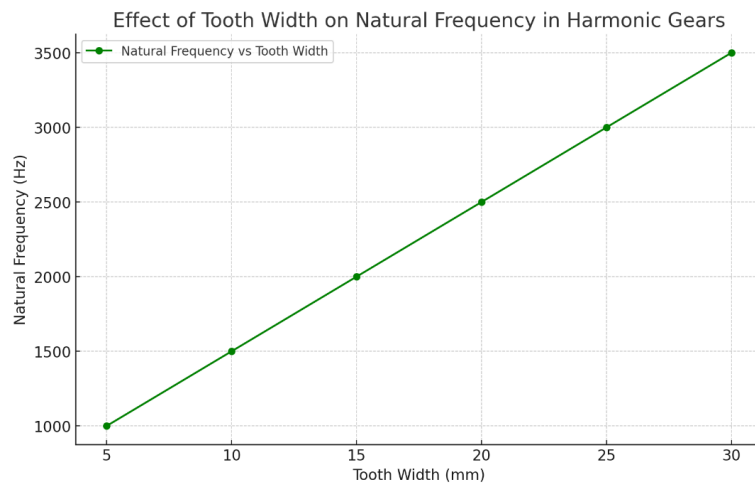


- اصطکاک: اصطکاک بین دندانه‌ها و یا بین چرخ‌دنده‌ها و سایر قطعات سیستم می‌تواند باعث تغییرات در دامنه ارتعاشات و فرکانس‌های طبیعی شود. این تغییرات معمولاً به دلیل افزایش حرارت و سایش ناشی از اصطکاک است.
 - شکل و هندسه چرخ‌دنده‌ها: چرخ‌دنده‌های هارمونیک معمولاً به گونه‌ای طراحی می‌شوند که انتقال گشتاور و سرعت دقیق باشد. اما هندسه خاص این چرخ‌دنده‌ها و نحوه برش دندانه‌ها می‌تواند باعث تغییر در رفتار ارتعاشی و فرکانس‌های طبیعی شود.
 - دمای محیطی: تغییرات دما می‌تواند تأثیر زیادی بر خواص مواد و ارتعاشات چرخ‌دنده‌ها داشته باشد. افزایش دما ممکن است باعث کاهش استحکام مواد و تغییر فرکانس‌های طبیعی شود.
- در مجموع، فرکانس طبیعی چرخ‌دنده‌های هارمونیک به عوامل متعددی بستگی دارد، و بررسی این فرکانس‌ها اهمیت زیادی در طراحی و عملکرد سیستم‌های پیچیده‌ای مانند روبات‌ها، تجهیزات فضایی، و دیگر سیستم‌هایی که از این چرخ‌دنده‌ها استفاده می‌کنند، دارد.

جدول ۴- تأثیر پهنای دندانه‌های چرخ‌دنده هارمونیک بر فرکانس طبیعی

فرکانس طبیعی (هرتز)	پهنای دندانه (میلی‌متر)
۱۰۶۸	۵
۱۵۲۶	۱۰
۱۹۶۸	۱۵
۲۵۰۳	۲۰
۳۰۱۲	۲۵
۳۵۰۸	۳۰

همانطور که در نمودار مشاهده می شود، افزایش پهنای دندانه ها باعث افزایش فرکانس طبیعی چرخ دنده ها می شود. این امر نشان می دهد که دندانه های پهن تر به طور معمول مقاومت بیشتری در برابر ارتعاشات دارند و باعث افزایش فرکانس طبیعی سیستم می شوند. وقتی که پهنای دندانه ها افزایش می یابد، سطح تماس بیشتری بین دندانه ها و سایر اجزاء سیستم وجود دارد که موجب می شود ارتعاشات در سطح وسیع تری پخش شوند. این تغییر در هندسه دندانه ها و تماس های بیشتر باعث افزایش فرکانس طبیعی می شود. این نتایج نشان می دهند که در طراحی چرخ دنده های هارمونیک باید به پهنای دندانه ها توجه شود، زیرا تغییرات در این پارامتر می تواند تأثیر قابل توجهی بر رفتار دینامیکی سیستم و فرکانس های طبیعی آن داشته باشد. این نکته می تواند برای جلوگیری از وقوع ارتعاشات نامطلوب یا لرزش های خطرناک در سیستم اهمیت زیادی داشته باشد.



شکل ۴- نمودار تأثیر پهنای دندانه های چرخ دنده هارمونیک بر فرکانس طبیعی

نمودار نشان می دهد که با افزایش پهنای دندانه ها، فرکانس طبیعی چرخ دنده ها به طور پیوسته افزایش می یابد.

۵. مراجع

- [1] Ma, D., Yan, S., Yin, Z., & Yang, Y. (2018). Investigation of the friction behavior of harmonic drive gears at low speed operation. Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA).
- [2] Gravagno, F., Mucino, V. H., & Pennestrì, E. (2020). The mechanical efficiency of harmonic drives: A simplified model. Journal of Mechanical Design, 143(6), 063302.
- [3] Li, F., Li, X., Guo, Y., & Shang, D. (2021). Analysis of contact mechanical characteristics of flexible parts in harmonic gear reducer. Shock and Vibration, 2021, Article ID 5521320.
- [4] Trang, T. T. (2022). A quick stress calculation method for flexspline in harmonic drives. Cogent Engineering (Taylor & Francis
- [5] Zhao, Q., et al. (2022). An improved modeling and numerical analysis method for [tooth surface/wear/contact] in harmonic gears. (PMC article). PubMed Central.



- [6] Hu, G., et al. (2023). Influence of materials on dry friction and wear performance of harmonic reducer circular spline. *Metals*, 13(2), 378
- [7] Guida, R., et al. (2024). Comprehensive analysis of major fault-to-failure mechanisms in harmonic drives. *Machines*, 12(11), 776.
- [8] He, X., et al. (2024). Circular spline tooth longitudinal modification design and contact analysis for harmonic drives with short flexspline. *Machines*, 12(11), 777.