مقاله

علل پیدایش صدا در جعبه‌دندهٔ خودرو و روش‌های پیشگیری آن

مهدی ظهور*
دانشیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
mzohoor@kntu.ac.ir

بهمن قربانی
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
شرکت تولیدی موتور، گیربکس و اکسل سایپا (مگاموتور)
b.ghorbani@megamotor.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۱۲

چکیده

چرخ‌دنده‌ها به‌عنوان یکی از منابع مهم تولید صدا و ارتعاش در سیستم‌های قوای محرکه خودرو شناخته می‌شوند. بررسی علل ایجاد سروصدا و روش‌های حذف یا کاهش آن در جعبه‌دنده، در زمرهٔ مسائل مهم صنعت خودروسازی محسوب می‌شود و به‌تازگی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در این مقاله، ابتدا دلائل ایجاد سروصدا در جعبه‌دنده مورد بحث قرار می‌گیرد. سپس عوامل مهم و تأثیرگذار که منجر به بهبود و یا تشدید این حالت می‌شود مطالعه می‌گردد. در ادامه، روش‌های گوناگون کاهش سروصدا مطرح می‌شود. در پایان نتیجه‌گیری می‌شود که در جعبه‌دنده‌های تجاری نمی‌توان سروصدا را به‌کلی حذف کرد، بلکه می‌توان تا اندازه‌ای کاهش داد یا اینکه تا سرحد امکان نامحسوس یا قابل تحمل نمود. همچنین طراحی چرخ‌دنده‌ها و پوستهٔ جعبه‌دنده به‌ترتیب تأثیر به‌سزایی بر ایجاد و نشر صدا دارد.

واژگان کلیدی: چرخ‌دنده، جعبه‌دنده، سروصدا، خودرو

۱. مقدمه

منابع ارتعاشی عمومی سیستم قوای محرکه خودرو شامل موتور، چرخ‌ها و چرخ‌دنده‌ها در جعبه‌دنده می‌باشد. با توجه به افزایش روزافزون خواسته‌های مشتریان با ملاحظات راحتی و آرامش، تولیدکنندگان خودرو درپی روش‌های جدید جهت پاسخ‌گویی به افزایش تقاضای مشتریان هستند [۱].

هدف از این مقاله ارائه یک دید کلی از تحقیقات انجام‌شده در زمینهٔ شناسایی صدای داخل جعبه‌دنده یک خودرو سواری می‌باشد. ابتدا با توجه به علل و پارامترهای مؤثر، تقسیم‌بندی جامعی از انواع منابع صدا ارائه می‌گردد. در ادامه نیز انواع روش‌های کاهش صدا در جعبه‌دنده معرفی می‌شود. اساساً منابع صدای موجود در جعبه‌دنده را می‌توان به چهار دستهٔ زوزه[۱]، تق‌تق[۲] یا تلق‌تلق[۳] کردن، صدای تعویض‌دنده[۴] و نهایتاً صدای بیرینگ‌ها[۵] تقسیم‌بندی کرد [۳]. در ادامه به تشریح هر یک از موارد چهارگانهٔ فوق می‌پردازیم.

شکل ۱. نمایی از جعبه‌دندهٔ ۵ سرعته برای خودرو سواری [۲]

۲. زوزه

صدای تماس دورانی در زوج چرخ‌دندهٔ درگیر تحت بار زوزه نامیده می‌شود. بروز چنین صدایی معلول عواملی است که در ادامه بدان‌ها اشاره می‌شود.

۲-۱. ضربهٔ درگیری[۶]

ضربهٔ درگیری ناشی از خطای ساخت سطح دنده‌ها، خطاهای گام و یا خطاهای هندسی همانند انحراف هم‌مرکزی بین محور و دندانه به‌دلیل تغییرشکل چرخ‌دنده‌ها، محورها و یا هوزینگ تحت بار می‌باشد. اصلاحات پروفیل سبب جلوگیری از این ضربه‌های درگیری می‌شود، اگرچه فقط برای محدودهٔ مشخصی از بار مؤثر می‌باشد.

خطاهایی که ممکن است در ساخت دندانه رخ دهد را می‌توان به‌قرار ذیل دسته‌بندی کرد:

۱. خطای شیب پروفایل[۷] که اغلب خطای زاویهٔ فشار نامیده می‌شود.
۲. خطای شیب لید[۸]
۳. خطای انحنای پروفایل[۹] (خطای نوع کرون)
۴. خطای انحنای لید[۱۰] (خطای کرون لید)
۵. خطای اینولوت

۲-۲. ارتعاش تحریک‌شده

ارتعاش تحریک‌شده ناشی از تغییر صلبیت دندانه با موقعیت درگیری است و مقدار آن به سرعت و هندسهٔ چرخ‌دنده وابسته است. اگر فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی زوج چرخ‌دنده نزدیک باشد، تشدید به‌وجود آورده، به‌ویژه دامنهٔ تشدید بزرگ و منجر به ایجاد صدای نوفهٔ فوق‌العاده می‌شود.

۲-۳. صدای تماس غلتشی[۱۱]

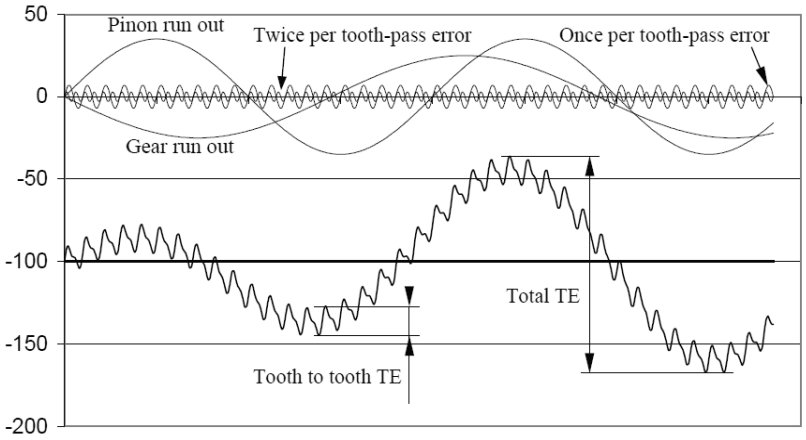
در نتیجهٔ لغزش نسبی بین دندانه‌های درگیر، که ناشی از کیفیت سطح ناکافی سطح دندانه‌هاست، صدای تماس غلتشی اتفاق می‌افتد.

۳. تق‌تق و تلق‌تلق کردن

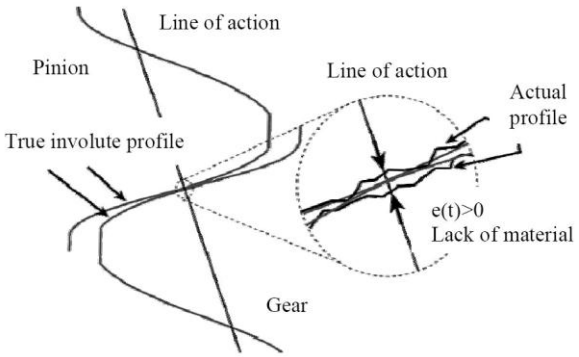
پدیدهٔ تق‌تق از جمله مهمترین و بزرگترین مشکلات ارتعاشی موجود در چرخ‌دنده‌های پس‌زنی و تحت بار در صنعت خودروسازی می‌باشد. در یک زوج چرخ‌دنده وقتی گشتاور اینرسی، که تابعی از شتاب زاویه‌ای است، از گشتاور بار بیشتر شود دندانه‌ها از هم جدا می‌شوند.

$$J\varphi = T_{drag} \qquad (۱)$$

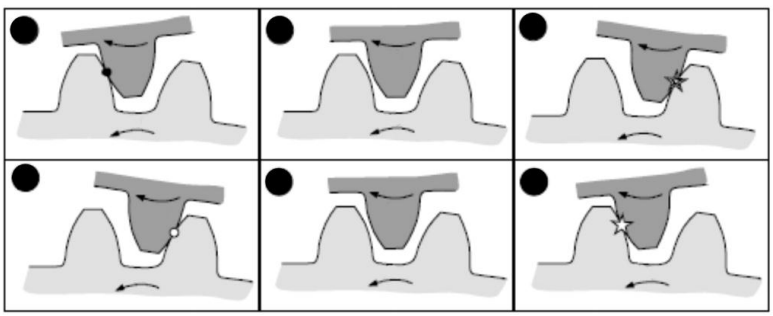
به‌طوری‌که در این رابطه J ممان اینرسی چرخ متحرک، φ شتاب زاویه‌ای چرخ متحرک و نهایتاً T_{drag} گشتاور کششی فعال بر روی چرخ متحرک می‌باشد. این پدیده در اثر جدایش و برخورد ناشی از یک دندانه به دندانهٔ قبلی یا بعدی به‌دلیل لقی دندانه‌ها[۱۲] ایجاد می‌شود. اگر این پدیده در موقعیت خلاص جعبه‌دنده رخ دهد، تق‌تق نامیده می‌شود و اگر در حرکت یک چرخ‌دنده رخ دهد تلق‌تلق خوانده می‌شود [۱-۳]. مشکلات مربوط به تق‌تق در چرخ‌دنده‌های راننده با بارهای سبک، تحرکات گشتاور خارجی و با فرکانس پایین توسط محققان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است [۵-۱۱]. بـزکا[۱۳] و همکارانش پارامترهایی که روی تق‌تق و تلق‌تلق تأثیرگذارند را به پارامترهای هندسی و عملکردی طبقه‌بندی کردند [۱۱]. پارامترهای هندسی شامل، مدول، تعداد دندانه، زاویهٔ مارپیچ، لقی محوری و بک‌لش. پارامترهای عملکردی نیز شامل شتاب زاویه‌ای و فرکانس تحریک می‌باشد.



شکل ۲. مثالی از سیگنال خطای معمولی جعبه‌دنده و قطعات آن

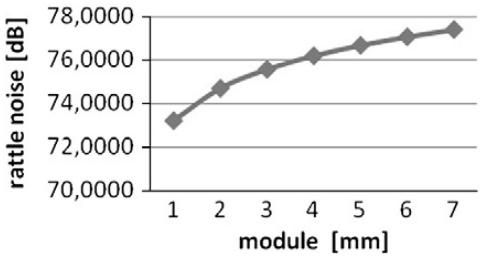


شکل ۳. خطاهای ساخت در پروفیل دندانه [٤]

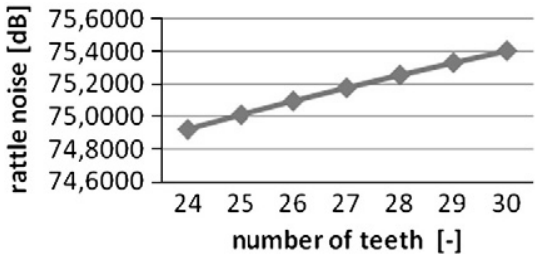


شکل ٤. پدیده تق‌تق برای یک سیستم چرخ‌دنده‌ای

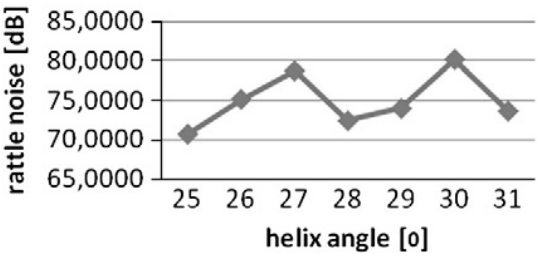
اساساً با افزایش مدول و افزایش تعداد دندانه، صدای تق‌تق نیز افزایش می‌یابد. تغییر در زاویهٔ مارپیچ نیز سبب ایجاد سطوح مختلفی از صدای تق‌تق می‌شود. افزایش در لقی محوری منجر به افزایش صدای تق‌تق تا نقطهٔ مشخصی شده و سپس با افزایش بیشتر مقدار آن صدا کاهش خواهد یافت. افزایش در لقی بین دندانه‌ها (بک‌لش) نیز به کاهش صدای تق‌تق تا نقطهٔ مشخصی خواهد انجامید و سپس با افزایش بیشتر مقدار آن صدا افزایش خواهد یافت. این رفتار نشان می‌دهد که نقطهٔ بهینه‌ای برای مقدار لقی بین دندانه‌ها وجود دارد. نهایتاً اینکه با افزایش شتاب زاویه‌ای و افزایش فرکانس تحریک، صدای تق‌تق افزایش خواهد یافت.



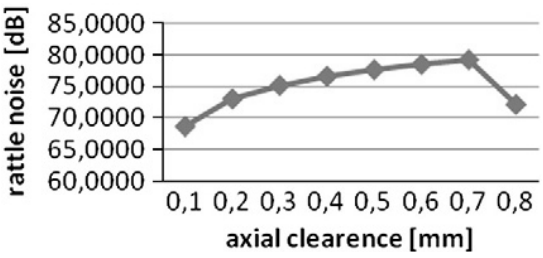
شکل ۵. ارتباط بین مدول و صدای تق‌تق برای دندهٔ یک [۱۱]



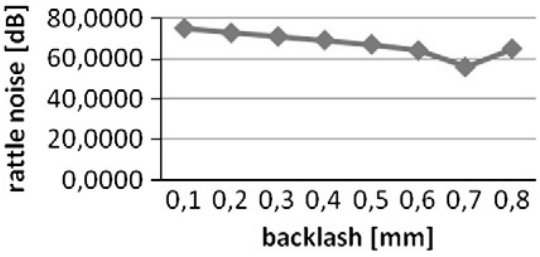
شکل ٦. ارتباط بین تعداد دندانه و صدای تق‌تق برای دندهٔ یک [۱۱]



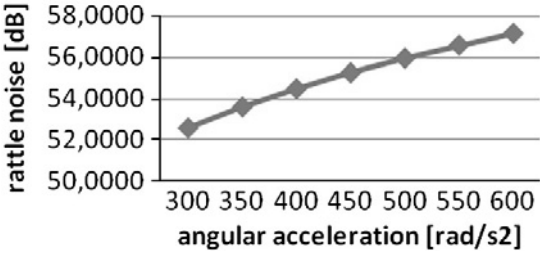
شکل ۷. ارتباط بین زاویهٔ مارپیچ و صدای تق‌تق برای دندهٔ یک [۱۱]



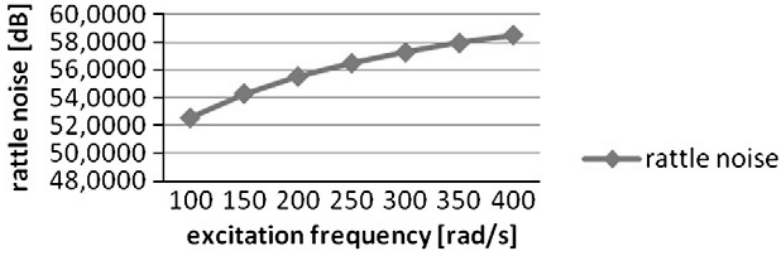
شکل ۸ ارتباط بین لقی محوری و صدای تق‌تق برای دندهٔ یک [۱۱]



شکل ۹. ارتباط بین لقی بین دندانه‌ها و صدای تق‌تق برای دندهٔ یک [۱۱]



شکل ۱۰. ارتباط بین شتاب زاویه‌ای و صدای تق‌تق برای دندهٔ یک



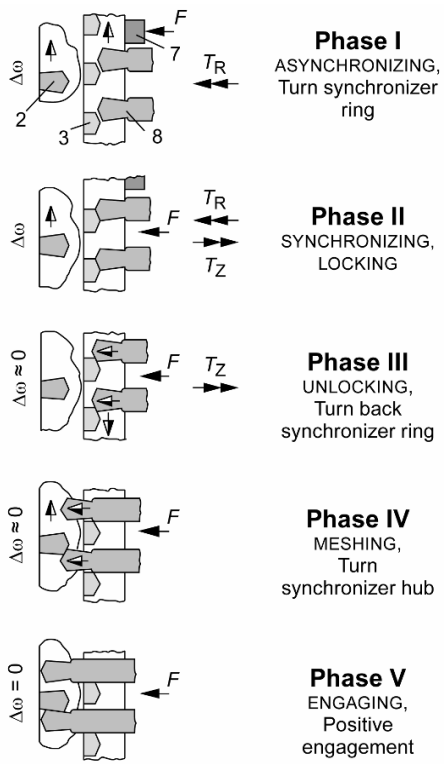
شکل ۱۱. ارتباط بین فرکانس تحریک و صدای تق‌تق برای دنده یک [۱۱]

روغن جعبه‌دنده (واسکازین) به‌عنوان پارامتر طراحی مهندسی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی صدای تق‌تق و تلق‌تلق دارد. فاکتورهای مهم شامل نوع روغن، مواد افزودنی، ویسکوزیته و سطح روغن در جعبه‌دنده، سبب کاهش صدای تق‌تق و تلق‌تلق، خصوصاً در سرعت‌های پایین و فصل سرما می‌شوند [۳]. یک فاکتور قطعی در

کمینه‌کردن صدای تق‌تق، دوران قوای محرکه است، مخصوصاً طراحی صحیح دمپرهای پیچشی در صفحه‌کلاچ دوتایی چرخ طیار جرمی و دمپرها، برای نگه‌داشتن دامنهٔارتعاشات پیچشی قوای محرکه با محدوده‌های معین در تمام حالات عملکردی [۱۲–۱۳].

٤. صدای تعویض دنده

اگر دنده‌برنجی‌ها[14] عملکرد صحیح نداشته باشند، نوفهٔ تماس در هنگام تعویض دنده رسا خواهد بود و باعث ایجاد نوفه‌های دلخراش (ساینده) و خراشیدن خواهد شد. دیگر علل ممکن این نوع نوفه شامل تغییرات هم‌مرکزی، خطاهای گام غیرعادی پروفیل دندانه و نحوهٔ تعویض دنده توسط راننده می‌باشد.



شکل ۱۲. فرایند هم‌دور شدن دنده، کشویی و دنده‌برنجی

۵. صدای بیرینگ‌ها

صدای بیرینگ‌ها معمولاً به‌طور فاحش قابل درک است. ویژگی این صدا می‌تواند نشانه‌ای از ظهور خرابی زودهنگام در آن باشد. این مورد، که بی‌شباهت به صدای سوت نیست، معمولاً ناشی از یکی از حالات زیر می‌باشد:

۱. بلبرینگ ضربه‌خوردگی دارد
۲. لقی بلبرینگ بیش از حد مجاز و تعریف‌شده است
۳. بلبرینگ تحت فشار یا نامناسب مونتاژ شده است

نکتهٔ قابل توجه اینکه جهت تفکیک اشکال بلبرینگ محور ورودی از بلبرینگ‌های محور خروجی و هوزینگ دیفرانسیل می‌بایست جعبه‌دنده را در حالت خلاص تست نمود؛ چنانچه اشکال جعبه‌دنده همچنان وجود داشت. بلبرینگ محور ورودی و اگر اشکال جعبه‌دنده ظاهر نشود، یکی از بلبرینگ‌های محور خروجی یا هوزینگ دیفرانسیل ایراد دارد.

٦. پیش‌بینی سطح نوفه

برای فراهم‌کردن پیش‌بینی نوفهٔ چرخ‌دنده، معادلهٔ پیش‌بینی توسط کاتو[15] و همکاران [۱۴] به‌صورت زیر ارائه شده است:

$$L = \frac{20\left(1-\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)\right)\times\sqrt[8]{u}}{f_\upsilon\sqrt[4]{\varepsilon_\alpha}} + 20\log W \qquad (۲)$$

به‌طوری‌که در این رابطه L سطح نوفهٔ کلی در فاصلهٔ ۱ متری از جعبه‌نده، β زاویهٔ مارپیچ، u نسبت دنده، ε_α نسبت تماس عرضی، W قدرت منتقل‌شده (برحسب اسب بخار) و نهایتاً f_υ فاکتور سرعت می‌باشد.

۷. روش‌های کاهش سروصدا

به‌طور کلی روش‌های گوناگونی جهت کاهش سروصدا وجود داردکه در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود:

الف) کاهش سروصدا: سدکردن مسیر عبور امواج صوت با استفاده از فاکتورهای فاصله و جانمایی اشیایی حائل در مسیر صوت.

ب) فاصله: تراکم انرژی امواج صوتی با پراکندگی و انتشار صدا کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش فاصله میان منبع سروصدا و شنونده سبب کاهش شدت صوت می‌شود؛ زیرا

شدت صوت با مجذور فاصلهٔ شنونده از منبع صوت نسبت عکس دارد.

ج) جذب سروصدا: تبدیل و تغییر شکل امواج صوت با مهار پژواک، انعکاس صدا و تشدید.

د) میرایی[۱۶]: در این روش ارتعاشات صوتی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شوند. عبور امواج از چندین لایه از مواد با چگالی متفاوت سبب میرایی صوت می‌شود؛ مثل استفاده از میراکننده‌هایی چون فوم و فلز سرب که باعث میرایی سروصدا می‌شوند.

ه) حذف فعال صدا: این روش ایده‌ای جدید است که در آن، ابتدا یک میکروفون صداهای محیط را جمع‌آوری می‌کند. سپس به‌کمک رایانه امواج دریافتی تحلیل می‌شوند؛ امواجی که ۱۸۰ درجه از فاز امواج دریافتی متفاوت است از طریق بلندگوی سیستم خارج می‌شوند. این عمل سبب پیدایش تداخل مخرب و حذف سروصدای آزاردهنده می‌شود.

علاوه بر این موارد، روش‌های دیگری نیز برای مقابله با سروصدای چرخ‌دنده‌ها وجود دارد که از جمله آنها راه‌حلی است که نخستین‌بار باکینگهام در سال ۱۹۲۸ م به شرکت فورد موتور پیشنهاد کرد. در این طرح، در هر جعبه‌دنده دو یا چندمرحله‌ای اگر تعداد تماس‌های دندانه به دندانه در جفت‌های درگیر صدایی ایجاد کنند که با هم هماهنگ باشند، آزار ناشی از صدای درگیری دندانه‌ها کاهش می‌یابد. اغلب با کم و زیاد کردن چند دندانه در مجموعه چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده این کار شدنی است.

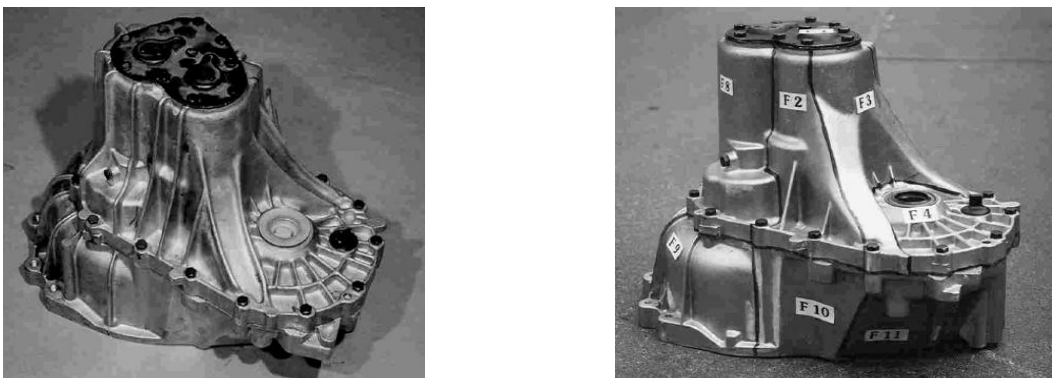
با آنکه از دیدگاه نظری مباحث دینامیک و صوت از شاخه‌های دانش مهندسی مکانیک محسوب می‌شوند، اما شاید ارتباط تنگاتنگ این دو در بحث طراحی ماشین قدری خاص باشد. واقعیت این است که این دو مقوله مستقل از هم نیستند و رابطهٔ نزدیکی میان آنها وجود دارد. به‌عبارت دیگر، تمایز میان موسیقی و سروصدا، تمایز میان دو مقولهٔ مطلوب و نامطلوب است. این نکته بدین دلیل مطرح می‌شود که در مورد جعبه‌دنده‌های تجاری که سروصدایشان را نمی‌توان به‌کلی حذف کرد و تنها می‌توان تا اندازه‌ای کاهش داد یا اینکه تا سرحد امکان نامحسوس یا قابل تحمل نمود؛ زیرا از دیدگاه مهندسی این صداها محلشان مشخص و در دامنهٔ گام‌های پایین یافت می‌شوند [۱۵]. واقعیت این است که سروصدای چرخ‌دنده‌ها بر اثر خطاهای کنش تک‌تک دندانه‌ها ایجاد می‌شود و گوش انسان صداهای برخاسته از ۳۲ تا ۳۸۰۰۰ بار ارتعاش در ثانیه را می‌شنود. بنابراین وقتی تعداد درگیری دندانه‌ای در ثانیه از ۳۲ تجاوز کند، نتیجه آن سروصدای پیوسته‌ای است که به‌صورت ضرب‌آهنگی از این منبع شنیده نمی‌شود. اما از این‌گونه سرعت‌ها فراتر از دامنهٔ معمول کار چرخ‌دنده‌ها هستند.

قابل ذکر است که در بحث موسیقی تعداد ارتعاشات در ثانیه برای نت اصلی به‌عنوان مقیاس امری کاملاً قراردادی است، با آنکه اختلاف‌نظر در این زمینه بسیار است. اما نسبت بین ضرب‌آهنگ گوناگون، صرف‌نظر از تعداد دقیق ارتعاشات در ثانیه‌ای که به‌عنوان نقطهٔ شروع انتخاب شده باشد، ثابت است. در پیانو، معادل مقیاس اختیاری گام موسیقی با فرکانس مطابق جدول ۱ نشان داده شده است. بنابراین اگر یک جفت چرخ‌دنده با چنان سرعتی بچرخد که مثلاً ۲۴۰ تماس دندانه‌ای در ثانیه رخ دهد، گام صدا تقریباً معادل گام کلید *b* پیانو خواهد بود.

جدول ۱. ارتباط بین فرکانس و نُت کلید پیانو

نُت	فرکانس (هرتز)
c	۱۲۸
d	۱۴۴
e	۱۶۰
f	۱۷۰/۶
g	۱۹۲
a	۲۱۳/۳
b	۲۴۰
C' (*c* میانه در پیانو)	۲۵۶

جعبه‌دنده‌ها دارای پوسته‌اند. این ادوات منبع ارتعاش و پوستهٔ آنها عامل تشدیدکننده محسوب می‌شوند. بنابراین فرکانس ضرب‌آهنگ چرخ‌دنده‌ها در صورتی که سرعتش نزدیک به آن شود، واکنش نشان خواهد داد. حال اگر فرکانس ضرب‌آهنگ یکی از پوسته‌های چرخ‌دنده هم با این فرکانس طبیعی برابر باشد، تمایل به افزایش سروصدا بیشتر خواهد شد و در نتیجه سروصدایی پدید خواهد آمد که از سروصدای اولیه ناشی از چرخش چرخ‌دنده‌ها بسیار شدیدتر خواهد بود. بنابراین از نظر طراحی، پوستهٔ ایده‌ال برای چرخ‌دنده‌ها، پوسته‌ای است که به هیچ ضرب‌آهنگی واکنش نشان ندهد. حال اگر در یک سازوکار مکانیکی دو یا چند جفت چرخ‌دنده درگیر شوند، علاوه بر تشدید باید هم‌صدایی را نیز در نظر گرفت. نتیجهٔ ترکیب ضرب‌آهنگ‌هایی که چند جفت چرخ‌دنده ایجاد می‌کنند ممکن است ناهماهنگ (سروصدا) یا هماهنگ (موسیقی) باشد و این به نسبت بین فرکانس ضرب‌آهنگ‌های آنها بستگی دارد. به‌طور کلی، اختلاف بین موسیقی و سروصدا در این است که سروصدا ناخوشایند و موسیقی لذت‌بخش. در شکل ۱۳ یک نمونه پوستهٔ جعبه‌دنده نمایش داده شده است که با مطالعهٔ میزان نوفه، نسبت به بهینه‌کردن آن اقدام شده است. لازم به توضیح است که افزودن ریب روی پوستهٔ جعبه‌دنده علاوه بر میرانمودن ارتعاشات، سبب تقویت استحکام و همچنین افزایش سطح برای شار حرارتی (جهت کاهش حرارت مجموعهٔ جعبه‌دنده) می‌شود.



(الف) (ب)

شکل ۱۳. نمونه‌ای از پوستهٔ بهینه‌شده جعبه‌دنده؛ الف) پوستهٔ جعبه‌دندهٔ اصلی،) نمونهٔ بهینه‌شده

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله علل ایجاد سروصدا و روش‌های حذف یا کاهش آن در جعبه‌دنده، که در زمرهٔ مسائل مهم صنعت خودروسازی می‌باشد، مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا، انواع صداهای تولیدشده درون مجموعهٔ جعبه‌دندهٔ خودرو و علل آنها تشریح گردید. سپس پارامترهای تأثیرگذار بر آنها مطالعه شد. در ادامه می‌توان بیان نمود که نقش روغن جعبه‌دنده بسیار مهم است، به‌گونه‌ای‌که اگر کل مجموعه به‌طور صحیح طراحی و ساخته شود، اما از نوع واسکازین نامناسب استفاده گردد، کماکان صدا داخل جعبه‌دنده تولید خواهد شد. سپس روش‌های گوناگون کاهش سروصدا شرح داده شد. می‌توان نتیجه گرفت که در جعبه‌دنده‌های تجاری سروصدا را نمی‌توان به‌صورت کلی حذف کرد، بلکه می‌توان تا اندازه‌ای کاهش داد یا اینکه تا سرحد امکان نامحسوس یا قابل تحمل نمود. در نهایت می‌توان بیان کرد که چرخ‌دنده‌ها منبع ارتعاش و پوستهٔ جعبه‌دنده تشدیدکننده می‌باشد و به‌بیان دیگر چرخ‌دنده‌ها تأثیر به‌سزایی بر ایجاد صدا و پوسته تأثیر بر نشر صدا دارد. بنابراین از نظر طراحی، پوستهٔ ایده‌ال برای چرخ‌دنده‌ها پوسته‌ای است که به هیچ ضرب‌آهنگی واکنش نشان ندهد و از انتشار آن تا حد امکان جلوگیری کند.

۹. مآخذ

[۱] فرشیدیان‌فر، انوشیروان، امین ثقفی، ایمان ثقفی، "ارتعاشات در سیستم‌های چرخ‌دنده‌ای"، *صوت و ارتعاش*، س. ۱، ش. ۱، ۱۳۹۱.

[2] Bozca, Mehmet, "Torsional vibration model based optimization of gearbox geometric design Parameters to reduce rattle noise in an automotive transmission." *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 45, pp.1583-1598, 2010.

[3] Naunheimer, Harald, Bernd Bertsche, Joachim Ryborz, Wolfgang Novak, *Automotive Transmission*, 2nd Edition, 2010.

[4] Bonori, G., F. Pellicano. "Non-smooth dynamics of spur gears with manufacturing errors." *J. Sound & Vibration*, Vol. 306, pp. 271–283, 2007.

[5] Sakai, T., Y. Doi, K. Yamatommo, T. Ogasawara, M. Narita. "Theoretical and experimental analysis of rattling noise of automotive gearbox." *SAE Paper*, pp. 810-773, 1982.

[6] Ottewill, J.R., S.A. Neild, R.E. Wilson, "An investigation into the effect of tooth profile errors on gear rattle." *J. Sound & Vib.*, Vol. 329, pp. 3495–3506, 2010.

[7] Singh, R., H. Xie, R. J. Comparin. "Analysis of automobile neutral gear rattles." *J. Sound & Vib.*, Vol. 131, pp. 177–196, 1989.

[8] Comparin, R.J., R. Singh. "An analytical study of automobile neutral gear rattle." *ASME J. Mech. Des.*, Vol. 112, pp. 237–245, 1990.

[9] Brancati, Renato, Ernesto Rocca, Sergio Savino. "A gear rattle metric based on the wavelet multi-resolution analysis: Experimental investigation." *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 50-51, pp. 161–173, 2015.

[10] Smith, J. Derek, *Gear noise and vibration*, 2nd edition, Cambridge University, 2003

[11] Bozca, Mehmet, Peter Fietkau. "Empirical model based optimization of gearbox geometric design parameters to reduce rattle noise in an automotive transmission." *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 45, pp. 1599–1612, 2010.

[۱۲] بیگ‌زاده عباسی، مجتبی، "بررسی آزمایشی و تئوری تاثیر چرخ طیار دو جرمی در کاهش نوسانات سیستم انتقال قدرت وسیلهٔ نقلیه"، *مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۳، شماره ۱۲، ص. ۱۵۵–۱۴۴، ۱۳۹۲.

[۱۳] محمدی بیدهندی، هادی، سید مسعود هاشمی، "اثر چرخ طیار دو جرمی در ارتعاشات خط انتقال قدرت"، *مهندسی مکانیک*، ش. ۸۹ س. ۲۲، ص. ۳۹–۵۳، ۱۳۹۲.

[14] Masuda T., Abe T., Hattori K., "Prediction Method of Gear Noise Considering the Influence of the Tooth Flank Finishing Method." *Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, Vol. 108, pp 95-100, 1986.

[۱۵] تقی‌زاده، جهان، شهره شاملو، "دلائل ایجاد سروصدا در چرخ دنده‌ها و روش‌های حذف آن"، *مهندسی مکانیک*، ش. ۹۵، س. ۲۳، ص. ۱۶–۲۳، ۱۳۹۳.

پی‌نوشت

1. whine
2. rattling
3. clattering
4. shifting noise
5. bearing noise
6. meshing impact
7. profile slope error
8. lead slope error
9. profile curvature error
10. lead curvature error
11. rolling contact noise
12. backlash
13. Bozca
14. synchronizer ring
15. Kato
16. damping