

بهینه‌سازی الگوی آج تایر برای کاهش نویز با استفاده از الگوریتم ژنتیک

فردین یوسفی نیا^{۱*}، رئوف خضریان^۲ و حمید گروسی^۳

۱- کارشناس برنامه‌ریزی تولید و مهندسی صنایع، لاستیک بارز کردستان

۲- کارشناس مدیریت ابزار، لاستیک بارز کردستان

۳- کارشناس فرایند، لاستیک بارز کردستان

Fardin.Yousefinia@gmail.com

چکیده: در این پژوهش، مسأله بهینه‌سازی نویز تایر بر پایه تغییر طول گام‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک بررسی شده است. ابتدا با حفظ توزیع فراوانی گام‌ها و تغییر صرف ترتیب آن‌ها، مشخص شد که تعدادی از چینش‌های مختلف با رعایت قیود هندسی تقریباً نویز یکسانی تولید می‌کنند؛ یعنی چند مسیر متفاوت می‌تواند به همان سطح صدای کم برسد و این یعنی تغییرات کوچک در ترتیب گام‌ها تأثیر شنیداری محسوسی ندارد. در ادامه، اثر تغییر هدفمند توزیع فراوانی گام‌ها بر شاخص نویز بررسی شد. داده‌های حاصل از ده سناریوی توزیع (S1-S10) نشان داد که کاهش سهم گام‌های بلند (Pitch 5) و افزایش گام‌های کوتاه‌تر (Pitch 3,1) موجب افت تدریجی و سپس جهشی نویز می‌شود؛ به‌طوری‌که اختلاف نویز بین S1 و S10 بیش از ۴٫۲ دسی‌بل است. این کاهش، که ناشی از بازآرایی طیفی و کاهش انرژی در باندهای حساس گوش است، بر اهمیت راهبرد بهینه‌سازی دوسطحی تأکید می‌کند: ابتدا انتخاب توزیع مناسب، سپس بهینه‌سازی ترتیب گام‌ها. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای طراحی صنعتی تایر با نویز کمتر، با حفظ قیود هندسی و مکانیکی، مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی نویز تایر، الگوریتم ژنتیک

مقدمه

بزرگ و پیچیده، گزینه‌ای جذاب برای حل TNOP محسوب می‌شوند. در این پروژه، هدف اصلی حل مدل ریاضی TNOP با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک است.

بخش تجربی

سطح یک تایر شامل مسیرهای مختلفی است، هر مسیر از یک دنباله از گام‌ها با سایزهای مختلف ساخته شده است (شکل ۲). یک گام به‌عنوان ترکیبی از یک قسمت بالا و یک قسمت پایین به نام شیار پهلوی هم در نظر گرفته می‌شود که در شکل نشان داده شده است. نویز تایر در هنگام برخورد با سطح جاده توسط شیارها تولید می‌شود. به‌منظور محاسبه نویز با برنامه‌ریزی عدد صحیح، نویسندگان [۳] نویز تولیدشده توسط تایر را متناسب با زیر تعریف کرده‌اند.

$$Max_{n \geq 1} (\max(|a_n(f)|, |b_n(f)|))$$

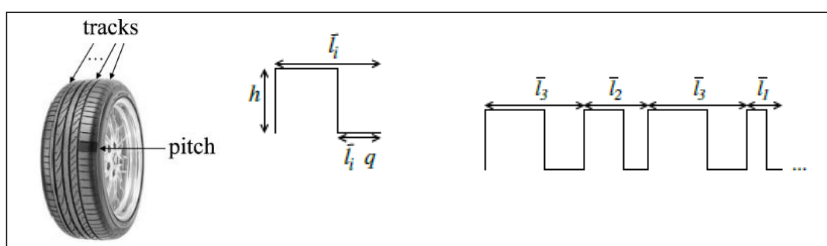
شاخص نویز:

$$A_{0,i,p} = \frac{1}{T} \cdot h \cdot (1-q) l_p = \frac{(1-q) \cdot h \cdot l_p}{T};$$

$$A_{k,i,p} = \frac{h}{k\pi} \left(\sin \left(\frac{2k((i-1) + (1-q)l_p)\pi}{T} \right) - \sin \left(\frac{2k(i-1)\pi}{T} \right) \right);$$

$$B_{k,i,p} = -\frac{h}{k\pi} \left(\cos \left(\frac{2k((i-1) + (1-q)l_p)\pi}{T} \right) - \cos \left(\frac{2k(i-1)\pi}{T} \right) \right)$$

نویز تولیدشده توسط تایر خودرو در حین حرکت، یکی از مهم‌ترین منابع آلودگی صوتی در محیط‌های شهری و بین‌شهری محسوب می‌شود. با افزایش حجم تردد وسایل نقلیه و توسعه شبکه‌های جاده‌ای، کنترل این نویز به یک الزام فنی و قانونی در صنایع خودروسازی و تایرسازی تبدیل شده است. در میان عوامل متعدد اثرگذار بر نویز تایر، الگوی هندسی گام‌ها نقش بسزایی دارد. ترتیب و طول گام‌ها می‌تواند توزیع فرکانسی نویز را به گونه‌ای تغییر دهد که بیشینه انرژی صوتی از محدوده حساس گوش انسان دور شود. این رویکرد که بهینه‌سازی توالی گام‌ها نامیده می‌شود، در سه دهه گذشته به شکل گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۱ این اجزای تکرار شونده که گام (pitch) نامیده می‌شود نشان داده شده است. در ترد تایر گام‌های مختلفی قرار می‌گیرد. این که این گام‌ها چگونه در کنار یکدیگر قرار گیرند در تولید نویز مؤثر است. ترد تایر به‌طور معمول از ۶۰ تا ۷۰ گام ساخته شده است. هر یک از گام‌ها دارای طول مشخصی است. در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است. مدل سازی ریاضی TNOP معمولاً بر پایه آنالیز فوریه انجام می‌شود. در این مدل، تابع هدف به حداقل رساندن دامنه ضرایب فوریه متناظر با هارمونیک‌های اصلی ارتعاش است که بیشترین سهم را در نویز شنیده شده دارند. این چارچوب نیازمند تعریف دقیق متغیرها، قیدها و روابط هندسی و مکانیکی تایر است و اغلب به‌عنوان یک مسأله بهینه‌سازی ترکیبی فرموله می‌شود. الگوریتم‌های فراابتکاری و به‌ویژه الگوریتم ژنتیک به دلیل انعطاف پذیری بالا و توانایی جست‌وجوی کارا در فضاهای جست‌وجوی



شکل ۲- سطح تایر



شکل ۱- دنباله گام‌های تایر

$\sum_{i \in I} x_i^p \geq \min occ_p$	محدودیت ۱۲ و ۱۳ بیانگر حداقل و حداکثر تعداد گام‌های نوع p در یک دنباله است	$\forall p \in P$	(۱۲)
$\sum_{i \in I} x_i^p \leq \max occ_p$		$\forall p \in P$	(۱۳)
$\sum_{k=0}^{maxp-1} x_{i+k \cdot l_p}^p \leq \max_p$	محدودیت ۱۴ حداکثر تعداد گام نوع p را مشخص می‌کند	$\forall p \in P$ $\forall i$	(۱۴)
$x_i^1 + x_{i+l_1}^1 \leq 1$	محدودیت ۱۵ و ۱۶ هم برای اینکه بلندترین و کوتاه‌ترین گام کنار یکدیگر قرار نگیرند	$\forall i$	(۱۵)
$x_i^r + x_{i+l_1}^r \leq 1$		$\forall i$	(۱۶)

یکی از چالش‌های محاسباتی این مدل، ماهیت ترکیبی فضای جست‌وجو است. تعداد توالی‌های ممکن نمایی رشد می‌کند که حتی برای اندازه‌های متوسط، بسیار بزرگ و غیرقابل جست‌وجوی کامل است. به همین دلیل، روش‌های دقیق مانند برنامه‌ریزی عدد صحیح (MIP) معمولاً برای اندازه‌های کوچک کاربرد دارند. برای حل اندازه‌های واقعی (مانند $N=72$ ، نیاز به روش‌های تقریبی و اکتشافی است که بتوانند یک پاسخ نزدیک به بهینه را در زمان قابل قبول ارائه دهند.

نتیجه‌ها و بحث

پس از پیاده‌سازی مدل و اجرای الگوریتم ژنتیک روی نمونه‌های واقعی مسئله TNOP، مجموعه‌ای از توالی‌های گام تولید شد، که همگی قیود هندسی و مکانیکی تعریف‌شده را برآورده می‌کردند. این بخش به تحلیل ویژگی‌های این توالی‌ها، ارزیابی عملکرد آن‌ها از نظر شاخص نویز، و بررسی حساسیت خروجی‌ها نسبت به تغییرات کوچک در ترتیب گام‌ها می‌پردازد.

در اجرای الگوریتم که در جدول ۱ و شکل ۳ نشان داده‌شده است برای یک دنباله گام که دارای توزیع فراوانی یکسانی از گام‌ها بودند: $\{1: 18, 2: 15, 3: 17, 4: 15, 5: 7\}$ یعنی گام شماره ۱، هیجده بار تکرار شود و... شاخص نویز برای این توالی‌ها که فقط چینش گام‌ها را باتوجه به قیود مدل‌سازی عوض شود در بازه ۷۱٫۸۸ تا ۷۲٫۰۷ دسی‌بل قرار گرفت، که اختلاف حداکثر ۰٫۱۹ دسی‌بل را نشان می‌دهد. این اختلاف از نظر شنود انسانی قابل تشخیص نیست و از منظر مهندسی به معنای دست‌یابی به یک منطقه پایدار است. در نمودار هم نشان داده‌شده است که نمودار مقایسه نویز در مقابل شماره توالی می‌تواند این پایداری را تصویرسازی کند. ثابت ماندن توزیع فراوانی باعث حفظ ساختار طیفی اصلی خروجی صوتی شده و تغییرات جزئی در آرایش گام‌ها، تنها فاز مؤلفه‌های فرکانسی را جابه‌جا می‌کند و چند پیامد مهم دارد:

- انعطاف در طراحی صنعتی: چندین پاسخ هم‌ارزش از نظر نویز وجود دارد که می‌توان براساس عوامل دیگر انتخاب کرد (مانند راحتی تولید یا دوام).
- کاهش ریسک خط تولید: تغییرات ناخواسته در آرایش گام‌ها در حین تولید، احتمالاً اثر عملی مؤثر روی نویز نخواهد داشت.

جدول ۱- فراوانی گام‌ها ثابت، چینش متفاوت

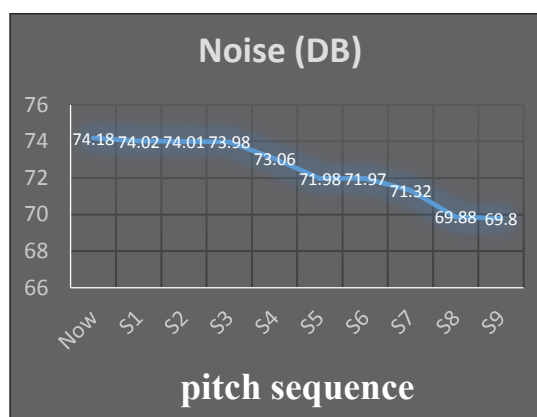
مقدار نویز	فراوانی گام ثابت $\{1:18, 2:15, 3:17, 4:15, 5:7\}$
72	P1 [1, 4, 3, 5, 4, 2, 4, 4, 1, 2, 2, 1, 4, 2, 3, 2, 1, 5, 4, 3, 1, 1, 4, 2, 4, 1, 1, 3, 3, 3, 4, 2, 3, 1, 3, 3, 2, 4, 1, 3, 5, 3, 1, 4, 2, 5, 4, 1, 2, 5, 1, 4, 1, 3, 3, 3, 4, 2, 3, 3, 1, 5, 3, 2, 1, 2, 4, 2, 1, 2, 5]
71.99	P2 [4, 2, 3, 2, 3, 3, 4, 2, 1, 4, 1, 1, 5, 2, 1, 2, 4, 3, 1, 2, 2, 1, 4, 3, 5, 4, 1, 3, 4, 1, 4, 3, 2, 2, 4, 1, 1, 3, 1, 2, 3, 4, 5, 2, 4, 1, 2, 1, 5, 3, 3, 5, 4, 3, 4, 3, 2, 3, 3, 5, 1, 1, 1, 4, 1, 3, 3, 2, 2, 5]
71.97	P3 [1, 3, 5, 1, 4, 2, 4, 2, 4, 5, 1, 4, 4, 3, 3, 5, 3, 1, 3, 2, 2, 3, 2, 4, 2, 1, 3, 3, 1, 5, 1, 4, 3, 2, 2, 1, 4, 4, 3, 1, 4, 3, 2, 3, 1, 1, 5, 2, 1, 2, 4, 3, 2, 3, 4, 1, 1, 5, 2, 1, 1, 4, 4, 4, 3, 2, 1, 3, 1, 3, 5, 2]
72.07	P4 [1, 3, 1, 3, 3, 2, 4, 4, 4, 1, 5, 4, 2, 1, 1, 1, 3, 2, 1, 4, 3, 3, 2, 2, 5, 3, 2, 4, 3, 4, 2, 3, 3, 5, 4, 1, 5, 2, 3, 3, 2, 4, 4, 1, 1, 5, 2, 3, 4, 1, 2, 4, 3, 1, 1, 3, 2, 1, 5, 2, 2, 4, 3, 1, 4, 2, 1, 1, 4, 3, 5, 1]
71.88	P5 [3, 3, 4, 3, 5, 1, 1, 2, 2, 1, 5, 3, 4, 2, 4, 1, 1, 4, 3, 3, 1, 3, 4, 5, 4, 1, 1, 2, 3, 4, 4, 1, 5, 1, 4, 3, 4, 3, 2, 1, 4, 1, 2, 1, 2, 3, 5, 4, 3, 2, 2, 2, 3, 2, 2, 4, 4, 1, 2, 3, 5, 1, 2, 1, 4, 2, 3, 1, 3, 3, 1, 5]

سهام ضریب فوریه $A_{k,i,p}$ از تابع دارای یک گام از نوع p که در i امین واحد شروع می‌شود و $B_{k,i,p}$ سهم ضریب فوریه b_k از تابع دارای یک گام از نوع p که در i امین واحد شروع می‌شود. هدف مسئله بهینه‌سازی نویز تایر یافتن یک توالی گام (Pitch Sequence) برای سطح تایر است به گونه‌ای که نویز تولیدشده به حداقل برسد، درحالی‌که الزامات هندسی و مکانیکی نیز رعایت شوند. برای مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی از نوتاسیون زیر استفاده می‌کنیم.

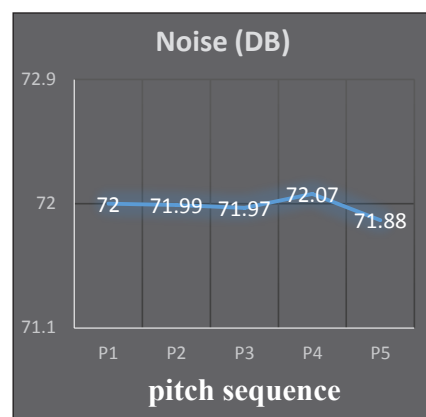
K	نشان‌دهنده جملات ضریب فوریه و از (1 تا 3N) تغییر می‌کند.
N	تعداد کل گام‌ها (Pitch)
i	مکان روی تایر که ما آن را به واحد تبدیل می‌کنیم مثلاً برای طول تایر ۶ از ۱ تا ۶ تغییر می‌کند.
I	نشان‌دهنده مجموعه موقعیت‌های روی تایر که برابر است با $\{1, \dots, T\}$
p	انواع گام‌ها
q	طول هر شیار که ثابت فرض می‌شود.
h	ارتفاع هر گام که ثابت فرض می‌شود.
L_p	طول گام نوع p
T	طول تایر
L_{max}	ماکزیمم طول گام‌ها * تعداد گام‌ها
L_{min}	مینیمم طول گام‌ها * تعداد گام‌ها
$A_{k,i,p}$	سهم ضریب فوریه a_k برای گام نوع p در مکان i
$B_{k,i,p}$	سهم ضریب فوریه b_k برای گام نوع p در مکان i
$\min occ_p$	حداقل تعداد گام‌های نوع p در یک دنباله
$\max occ_p$	حداکثر تعداد گام‌های نوع p در یک دنباله
$\max_p$	ماکزیمم طول یک زیردنباله از گام‌های از نوع p
x_i^p	متغیر باینری است و اگر گام نوع p از مکان i شروع کند مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر
Z	شاخص نویز بهینه
Za_k	ارزش ضریب فوریه a_k
Zb_k	ارزش ضریب فوریه b_k
$A_{k,i,p}$	سهم ضریب فوریه a_k از تابع دارای یک گام از نوع p که در i امین واحد شروع می‌شود.
$B_{k,i,p}$	سهم ضریب فوریه b_k از تابع دارای یک گام از نوع p که در i امین واحد شروع می‌شود.

باتوجه به نوتاسیون تعریف‌شده مدل ریاضی عدد صحیح مسئله TNOP به صورت زیر تعریف می‌شود.

(۱)		تابع هدف مسئله کاهش شاخص نویز است
(۲)	$\forall k$	$Za_k \leq Z$
(۳)	$\forall k$	$-Za_k \leq Z$
(۴)	$\forall k$	$Zb_k \leq Z$
(۵)	$\forall k$	$-Zb_k \leq Z$
(۶)	$\forall k$	$Za_k = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} A_{k,i,p} \cdot x_i^p$
(۷)	$\forall k$	$Zb_k = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} B_{k,i,p} \cdot x_i^p$
(۸)	$\forall i > 1$	محدودیت ۸ بیانگر این است که یک گام حداکثر در یک مکان می‌تواند شروع شود
(۹)	$\forall i = 1$	حتماً از مکان ۱ شروع به تخصیص شود
(۱۰)		محدودیت ۱۰ بیانگر مجموع طول دنباله‌ها باید با طول تایر یکی باشد
(۱۱)		محدودیت ۱۱ تعداد کل گام‌ها مختلف برابر تعداد کل گام‌های روی ترد است



شکل ۴- محاسبه نویز با تغییر فراوانی گام



شکل ۳- محاسبه نویز با تغییر چینش و فراوانی ثابت

- بخش اول S3-S1: نویز تقریباً ثابت؛ توزیع گام تغییری نکرده، و نتیجه در جدول یک گرفته شد را نشان می‌دهد.
- بخش دوم S7-S4: شیب ملایم کاهش نویز (۰/۳ تا ۰/۸ دسی‌بل در هر تغییر توزیع). این تغییرات نسبی، ناشی از کاهش تدریجی Pitch5 و افزایش Pitch4,1 است.
- بخش سوم S10-S8: افت جهشی نویز (۱/۵ دسی‌بل نسبت به S7) همراه با تغییر شدید به‌سوی Pitch1,3
- تفسیر مهندسی این‌گونه است که Pitch5 غالباً مولد قوی‌ترین مؤلفه‌های پایین فرکانس است که در ترکیب هارمونیک‌ها به طیف حساس گوش اضافه می‌شوند. کاهش آن از ۱۱ به ۴ بار در طول مسیر S10→S1، نویز را پایین آورده.

نتیجه‌گیری

تغییر ترتیب گام‌ها با توزیع ثابت و در نظر گرفتن محدودیت‌های طراحی، نویز را عملاً تغییر نمی‌دهد. تغییر هدف‌مند توزیع گام‌ها در این نمونه بهینه‌سازی شده به‌ویژه کاهش شدید Pitch5 و افزایش Pitch1,3 می‌تواند افتی بیش از ۴ دسی‌بل ایجاد کند. اثر توزیع بر نویز بسیار بیشتر از اثر ترتیب است، و همین امر لزوم بهینه‌سازی در دو گام (توزیع، سپس ترتیب) را برجسته می‌کند. برای طراحی قالب راهبرد دومرحله‌ای پیشنهاد می‌شود: مرحله اول: انتخاب توزیع هدف با کمترین سهم Pitch5 و بیشترین سهم Pitch1,3 با درصدی ملاحظه‌شده از Pitch 4. مرحله دوم: اعمال GA برای پیدا کردن چینش بهینه در همان توزیع

در مسیر دوم تحلیل، همان‌گونه که در جدول ۲ و شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقدار نویز از ۷۴/۰۲ دسی‌بل در S1 به ۶۹/۷۷ دسی‌بل در S10 رسیده، یعنی کاهش بیش از ۴/۲ دسی‌بل، که در مهندسی صدا فاصله‌ای قابل‌توجه و برای شنونده کاملاً محسوس است. روند تغییر کاملاً نزولی است که نشان‌دهنده رفتار یکنواخت و قابل مدل‌سازی سیستم نسبت به تغییرات توزیع است.

جدول ۲- محاسبه نویز با تغییر فراوانی گام

		نوع گام					مقدار
		1	2	3	4	5	نویز
فراوانی هر نوع گام	Now	24	11	12	14	11	74.18
	S1	22	13	14	12	11	74.02
	S2	22	13	14	12	11	74.01
	S3	22	13	14	12	11	73.98
	S4	18	17	15	13	9	73.06
	S5	18	14	19	14	7	71.98
	S6	18	15	17	15	7	71.97
	S7	19	13	17	17	6	71.32
	S8	20	9	20	19	4	69.88
	S9	20	9	20	19	4	69.8
	S10	20	9	20	19	4	69.77

مراجع

- [1] Liang, J., Xu, X., & Chen, H. (2022). Application of evolutionary algorithms in tire noise sequence optimization: A comparative study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 113, 104985. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104985>
- [2] Zhang, X., & Liew, K. M. (2020). A comprehensive review of intelligent optimization techniques for tyre design and noise reduction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 140, 106673. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106673>
- [3] Review of tyre noise and vibration phenomena in automotive applications. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 11(2), 133-149. <https://doi.org/10.1504/IJNVN.2015.068084>