



WHITE PAPERS

ASK-RD-ENG-005

R&D Department

ARYA SEPEHR KAYHAN (ASK) | SHAHID SALIMI INDUSTRIAL CITY, TABRIZ, IRAN

شرکت آریا سپهر کیهان با نام اختصاری ASK، طراح و تولیدکننده پمپ های گریز از مرکز و روتاری و ارائه دهنده راهکارهای بهینه سازی سیستم های فرایندی و پمپاژ می باشد.

توجه!

مقالات تخصصی با عنوان White Papers جهت افزایش دانش عمومی پمپ ها در بخش تحقیق و توسعه این شرکت نگارش شده است. استفاده از این مقالات رایگان می باشد و لازم است جهت استفاده از محتویات آن به موارد ذیل توجه فرمایید:

- 1- انتشار مجدد مطالب مقالات (به شکل اولیه و بدون تغییر در ساختار محتوایی و ظاهری) با ذکر منبع، بلامانع است.
- 2- استفاده تجاری از محتویات مقالات در نشریات مجاز نمی باشد.

روش‌های تحلیلی اندازه‌گیری صدای تجهیزات دوار



Analytical Methods for measuring the noises of rotary equipments

وقتی یک طراحی انجام می‌شود، اغلب پیش‌بینی میزان صدای ایجاد شده توسط دستگاه طراحی شده ضروری به نظر می‌رسد. برای انجام هرگونه تست و آزمایشات تجربی پیش از هرچیز نیاز به پیش‌بینی‌های تحلیلی در مورد نتایج مورد نظر است که این تحلیل‌ها می‌تواند ما را به روش‌های آزمایش، تجهیزات آزمایش و نحوه استفاده از آن‌ها هدایت کند. در این مقاله به بررسی چند روش و مثال عینی صنعتی از روش‌های تحلیلی اندازه‌گیری صدا می‌پردازیم.

۱. اندازه‌گیری صدا در داخل و خارج محیط

کاربردترین تناسب در صدای منتشر شده از یک سیستم، تناسب آن با سطح توان صوتی (L_w) به عنوان تابعی از مشخصه‌های مورد اندازه‌گیری سیستم است. سطح فشار صوتی (L_p) تولید شده به وسیله صدای انتشار یافته، به فاصله از منبع و یا قرار گرفتن آن در داخل یا خارج محیط و دیگر فاکتورها بستگی دارد. در این قسمت بهتر است که به دو رابطه کلی را که برای پیش‌بینی سطح فشار صوتی در هنگامی که سطح توان صوتی قابل تعیین است بپردازیم.

برای انتشار صوت در خارج، شدت آکوستیکی برای امواج صوتی، که ضرورتاً امواج کروی نیستند، از رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن Q فاکتور جهت می‌باشد:

$$I = \frac{QW_0}{4\pi r^2} e^{-2\alpha r} = \frac{P^2}{\rho_0 c} \quad (1)$$

اگر ما این مساله را برای مربع ریشه میانگین فشار آکوستیکی حل کنیم و این مساله شامل المان‌های توان و فشار شود، خواهیم داشت ($m = 2\alpha$):

$$\frac{P^2}{P_{ref}^2} = \frac{W_0 Q e^{-mr} \rho_0 c W_{ref}}{W_{ref} r^2 (4\pi) P_{ref}^2} \quad (2)$$

که با گرفتن لگاریتم مبنای ۱۰ از دو طرف معادله بالا خواهیم داشت:

$$L_p = L_w + 10 \log Q - 10 \log r^2 + 10 \log e^{-mr} + 10 \log \frac{\rho_0 c W_{ref}}{(4\pi) P_{ref}^2} \quad (3)$$

$$L_p = L_w + DI - 20 \log r + 10 \log e^{-mr} - 10 \log \frac{(4\pi) P_{ref}^2}{\rho_0 c W_{ref}} \quad (4)$$

امپدانس مشخصه برای حالتی که هوای اتمسفریک در دمای ۳۰۰ درجه کلوین و فشار ۱۰۱.۳۲۵ کیلوپاسکال است برابر است با:

$$Z_0 = \rho_0 c = 408.6 \text{ rayl} \quad (5)$$

با قرار دادن این مقدار در ترم آخر معادله ۴ و نیز ساده‌سازی آن، برای این ترم خواهیم داشت:

$$10 \log \frac{(4\pi)P_{ref}^2}{\rho_0 c W_{ref}} = 10 \log 12.30 = 10.9 \text{ dB} \quad (6)$$

پس برای انتشار صوت در محیط خارج خواهیم داشت:

$$L_p = L_w + DI - 20 \log r - 4.343 mr - 10.9 \text{ dB} \quad (7)$$

و برای انتقال صوت داخلی داریم:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{4}{R} + \frac{Q}{4\pi r^2} \right) + 10 \log \frac{\rho_0 c W_{ref}}{P_{ref}^2} \quad (8)$$

که در آن r فاصله از منبع صوتی بر حسب متر و R ثابت اتاق می‌باشد. با ارائه این توضیحات به سراغ چند نمونه محاسبات تحلیلی کاربردی می‌رویم.

۲. صدای فن

نمونه‌های زیادی از انواع مختلف فن در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. فن‌ها می‌توانند با توجه به طبیعت جریان و اندازه تیغه‌ها طبقه‌بندی شوند. برای هر کدام از این انواع، محاسبات صوت متفاوت می‌باشد. در زیر طبقه‌بندی فن‌ها را مشاهده می‌کنید:

- فن‌های سانتریفیوژ، تیغه‌های ایرفویلی^۱
- فن‌های سانتریفیوژ، تیغه‌های خمیده به عقب^۲
- فن‌های سانتریفیوژ، تیغه‌های شعاعی^۳
- فن‌های سانتریفیوژ، تیغه‌های خمیده به جلو^۴
- فن‌های سانتریفیوژ بلند و گرد^۵
- فن‌های تیغه محوری^۶
- فن‌های لوله محوری^۷
- فن‌های پروانه‌ای^۸

راه‌های مختلفی برای انتشار صوت از فن وجود دارد.

- توان صوتی به صورت مستقیم از خروجی یا ورودی فن انتشار یابد (اگر هیچ اتصالی به ابتدا یا انتهای فن متصل نشده باشد).

¹ Airfoil blades

² Back-wards curved blades

³ Radial blades

⁴ Forward curved blades

⁵ Tubular centrifugal fans

⁶ Vane axial fans

⁷ Tube axial fans

⁸ Propeller fans

- توان صوتی به صورت مستقیم از پوسته فن انتشار یابد.
- صدا به وسیله ارتعاشات انتقال یافته از فن به وسیله پایه‌های نگه‌دارنده فن به ساختار نگه‌دارنده انتقال یابد.

اگر سطح توان صوتی تولید شده داخلی فن را L_w بنامیم، مقادیر سطح صوتی خروجی و ورودی و غیره را می‌توان از طریق زیر محاسبه کرد:

$$L_w(\text{outlet}) = L_w - 3 \text{ dB} \quad (9)$$

$$L_w(\text{inlet}) = L_w - 3 \text{ dB} \quad (10)$$

$$L_w(\text{housing}) = L_w - TL \quad (11)$$

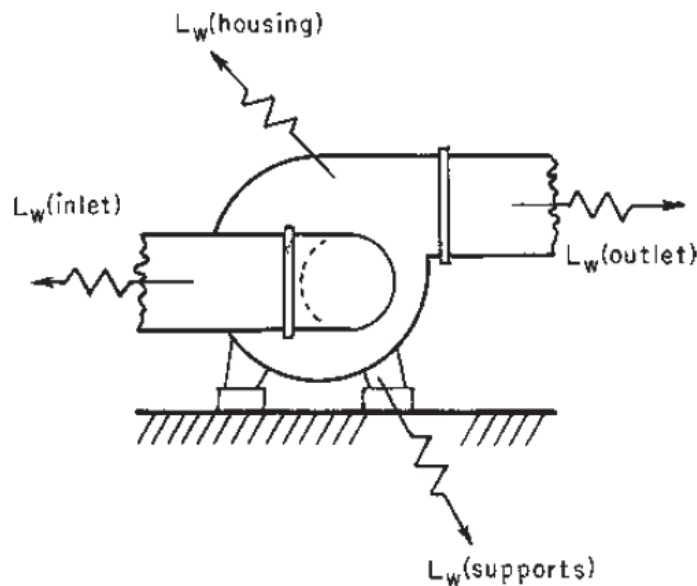
در فرمول ۱۰ مقدار TL افت انتقال را نشان می‌دهد.

که TL برابر است با:

$$TL \equiv 10 \log_{10} \frac{1}{a_t} \quad (12)$$

که در آن a_t ضریب انتقال توان صوتی است.

برای درک بهتر راه‌های انتشار، به شکل زیر توجه کنید:



شکل ۱- مسیرهای صدای فن

صدای تولید شده داخلی توسط یک فن از دو قسمت تشکیل شده است: صدای تولید شده به وسیله انتشار گردابه‌های تیغه‌های فن، و صدای ناپیوسته (صدای تیغه) تولید شده از گذر تیغه از ورودی یا خروجی باز فن. سطح توان صوتی صدای تولید شده به وسیله فن، برای هر اکتاوباندی از فرمول زیر تخمین زده می‌شود:

$$L_w = L_w(B) + DI - 10 \log \frac{Q}{Q_0} + 20 \log \frac{P}{P_0} + B_T \quad (13)$$

ترم $L_w(B)$ ، سطح توان صوتی پایه می‌باشد که برای هر یک از فن‌های ذکر شده در این قسمت متفاوت می‌باشد. Q نرخ جریان حجمی گذرنده از فن و Q_0 نرخ جریان حجمی مرجع می‌باشد ($Q_0 = 0.47195 \text{ m}^3/\text{s}$). P افزایش فشار در گذر از فن و P_0 افزایش فشار مرجع می‌باشد. مقدار فشار مرجع برابر است با ۲۸۴.۸ پاسکال. B_T مولفه صدای تیغه می‌باشد که در همه حال صفر است مگر برای اکتاوباندی که فرکانس گذر از پره در آن قرار داشته باشد. به جدول زیر توجه فرمائید. تمامی مقادیر برای اعداد ثابت فرمول ۱۲، برای انواع فن‌ها در این جدول وجود دارد.

جدول ۱- طیف سطح توان صوتی برای انواع فن‌ها

Fan type	Blade tone, B_T , dB	Octave band center frequency, Hz							
		63	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
Centrifugal fans:									
Airfoil blade	3	35	35	34	32	31	26	18	10
BCB	3	35	35	34	32	31	26	18	10
Radial blade	5-8	48	45	45	43	38	33	30	29
FCB	2	40	38	38	34	28	24	21	15
Tubular	4-6	46	43	43	38	37	32	28	25
Vaneaxial	6-8	42	39	41	42	40	37	35	25
Tubeaxial	6-8	44	42	46	44	42	40	37	30
Propellor	5-7	51	48	49	47	45	45	43	31

برای اکتاوباندی که در آن مولفه صدای تیغه غیرصفر است، مقادیر مولفه صدای تیغه در جدول بالاداده شده است. فرکانس گذر تیغه^۹ (f_B) تعداد دفعاتی است که یک تیغه از یک مجرای فن می‌گذرد.

$$f_B = n_r N_b \quad (14)$$

که در آن n_r سرعت چرخشی فن در ثانیه و N_b تعداد تیغه‌های فن است.

مثال ۱: یک فن سانتریفیوژ با تیغه‌های خمیده رو به جلو در سرعت ۵۲۲ دور در دقیقه در مقابل فشاری ۱۹۰ پاسکالی برای رساندن ۱.۸۰ متر مکعب بر ثانیه کار می‌کند. این فن در محیط خارج (دمای ۳۰۰ درجه کلوین) قرار دارد و فن در ورودی و خروجی دارای مجرای می‌باشد و تنها صدای آن از طریق پوسته آن انتقال می‌یابد. مقدار افت انتقال در جدول ۲ داده شده است.

⁹ Blade pass frequency

مقدار اندیس جهت برای تمامی فرکانس‌ها در حدود ۳ دسی‌بل تخمین زده شده است. سطح فشار صوتی کلی تولید شده به وسیله فن را در فاصله ۳ متری از فن تعیین کنید.

راه حل:

برای فرکانس گذر از تیغه داریم:

$$f_B = \left(\frac{522}{60}\right) (64 \text{ blades}) = 589 \text{ Hz}$$

این فرکانس در اکتاوباند ۵۰۰ هرتز (۳۵۴-۷۰۷ هرتز) قرار می‌گیرد. مولفه صدای تیغه این فن از جدول شماره ۱ بدست می‌آید:

$$B_T = 2 \text{ dB} \quad \text{in the 500 Hz octave band}$$

$$B_T = 0 \text{ dB} \quad \text{for all other octave band}$$

سطح توان صوتی تولید شده داخلی برای اکتاوباند ۵۰۰ هرتز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$L_w = 34 + 10 \log \frac{1800}{0.47195} + 20 \log \frac{190}{248.8} + 2 = 69.5 \text{ dB}$$

برای اکتاوباند ۲۵۰ هرتز داریم:

$$L_w = 38 + 33.5 + 0 = 71.5 \text{ dB}$$

بقیه مقادیر در جدول زیر مشاهده می‌شود:

جدول ۲- جواب‌های مثال شماره ۱

	Octave band center frequency, Hz							
	63	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
L_w , dB	73.5	71.5	71.5	69.5	61.5	57.5	54.5	48.5
TL, dB	15	21	27	33	39	40	40	40
L_w (housing), given	58.5	50.5	44.5	36.5	22.5	17.5	14.5	8.5
L_p (octave band), dB	41.1	33.1	27.1	19.1	5.1	0.1	-2.9	-8.9

توان صوتی منتشر شده از فن برای هر اکتاوباند را می‌توان با توجه به میزان افت انتقال آن بدست آورد:

$$L_w(\text{housing}) = L_w - TL = 69.5 - 33 = 36.5 \text{ dB}$$

سطح فشار صوتی نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$L_p = L_w + DI - 20 \log r - 4.343 mr - 10.9 \text{ dB}$$

که با توجه به آن که در فاصله ۳ متری می‌خواهیم اندازه‌گیری کنیم، می‌توان از کاهش‌های اتمسفریک صرف نظر کرد. پس خواهیم داشت:

$$L_p = L_w(\text{housing}) + DI - 20 \log r - 10.9 \text{ dB} = 36.5 + 3 - 20 \log 3 - 10.9 = 19.1 \text{ dB}$$

سطح فشار توان صوتی کلی اکتاوباندها از ترکیب مقادیر انرژی آکوستیکی اکتاوباندها بدست می‌آید.

$$L_p(\text{overall}) = 10 \log_{10} \sum 10^{\frac{L(OB)}{10}} = 10 \log_{10}(10^{4.11} + 10^{3.31} + 10^{2.71} + \dots) = 41.9 \text{ dB}$$

با فرض آن که مجرای ورودی برداشته شود، صدای فن می‌تواند از مجرای ورودی نیز خارج شود. پس برای اکتاو باند ۵۰۰ هرتز داریم:

$$L_w(\text{inlet}) = 69.5 - 3 = 66.5 \text{ dB}$$

و برای توان کلی منتشر شده در فرکانس ۵۰۰ هرتز داریم:

$$L_w = 10 \log_{10}(10^{3.65} + 10^{6.65}) = 66.5 \text{ dB}$$

۳. صدای پمپ‌ها

پمپ‌های استاندارد به طور معمول وقتی در سرعت و ظرفیت مشخص و استاندارد خود مورد استفاده قرار بگیرند به عنوان منابع شدید سر و صدا نیستند. سرو صدای ناشی از پمپ‌ها شامل سر و صدای ناشی از منابع هیدرولیکی و منابع مکانیکی می‌شود. بعضی از منابع سر و صدا در پمپ شامل کاویتاسیون، نوسانات فشاری سیال، اثرات سطوح جامد و عدم تعادل دینامیکی روتور می‌باشد. منابع هیدرولیکی معمولاً منابع مهمتری در تولید سر و صدا می‌باشند مگر در شرایطی که یک مشکل مکانیکی وجود داشته باشد به عنوان مثال یک عدم تعادل در روتور. سر و صدای پمپ می‌تواند به محیط اطراف و یا لوله‌کشی و سازه نگه‌دارنده پمپ انتقال یابد. سر و صدای هوایی (انتقال یافته از طریق هوا) برای یک پمپ را با دقت ۳ دسی‌بل، از طریق زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$L_w = K_0 + 10 \log_{10} h_p \quad \text{within } \pm 3 \text{ dB} \quad (15)$$

مقدار h_p توان اسمی برای پمپ می‌باشد. برای پمپ‌های دارای سرعت بالای ۱۶۰۰ دور بر دقیقه مقادیر ثابت K_0 طبق روابط زیر می‌باشد:

$$K_0 = 65 \text{ dB} \quad \text{برای پمپ‌های سانتریفیوژ}$$

$$K_0 = 70 \text{ dB} \quad \text{برای پمپ‌های پیچی}$$

$$K_0 = 68 \text{ dB}$$

برای پمپ‌های رفت و برگشتی

برای پمپ‌هایی که با سرعتی زیر ۱۶۰۰ دور بر دقیقه کار می‌کنند، از مقادیر ثابت بالا ۵ دسی‌بل باید کم کرد. برای تبدیل سطح توان صوتی کلی به سطح توان صوتی در اکتاو باند خاص باید از تبدیل زیر استفاده کرد:

$$L_w(\text{octave band}) = L_w - CF_2 \quad (۱۶)$$

ضرائب CF_2 در جدول زیر برای اکتاو باندهای مختلف دیده می‌شود:

جدول ۳- ضرائب تبدیل برای اکتاو باندهای مختلف

Octave band center frequency, Hz								
	63	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
CF_2 , dB	10	9	9	8	6	9	12	17

۴. سر و صدای الکتروموتورها

صدایی که توسط یک الکتروموتور تولید می‌شود به تنهایی زیاد نمی‌باشد. سر و صدایی که از یک الکتروموتور ایجاد می‌شود می‌تواند تابعی از چند فاکتور فیزیکی باشد که در این قسمت به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌کنیم:

- صدای حاصل از کاهش دور وسیله گردنده در اثر پسای هوای فن خنک‌کاری موتور
- صدای ناشی از شیارهای پوسته الکتروموتور و روتور
- صدای ناشی از روتور- استاتور
- صدای ناشی از تغییر دانسیته جریان مغناطیسی
- صدای ناشی از عدم توازن دینامیکی
- صدای ناشی از یاتاقان‌ها

در یک تقسیم‌بندی اولیه دو نوع الکترو موتور وجود دارند: الکتروموتور ضد آب^{۱۰} که خود را به وسیله القا کردن جریان هوای اطراف موتور و چرخاندن این هوا به دور کانداکتورهای الکتریکی خنک می‌کند. نوع دوم الکتروموتورهای خنک شونده به وسیله فن^{۱۱} می‌باشند که از یک فن داخلی برای خنک‌کاری موتور استفاده می‌کنند.

برای موتورهای ضد آب داریم:

¹⁰ Drip-proof(DRPR)

¹¹ Totally enclosed fan-cooled(TEFC)

$$L_w(A) = 65 \text{ dBA} \quad (\text{for } hp < 7hp) \quad (17)$$

$$L_w(A) = 20 \log hp + 15 \log n_r - 3 \quad (\text{for } hp \geq 7hp) \quad (18)$$

و برای الکتروموتورهای خنک شونده به وسیله فن داریم:

$$L_w(A) = 78 \text{ dBA} \quad (\text{for } hp < 5hp) \quad (19)$$

$$L_w(A) = 20 \log hp + 15 \log n_r + 13 \quad (\text{for } hp \geq 5hp) \quad (20)$$

تمامی فرمول‌های بالا برای حالت وزنی A می‌باشد. در این فرمول‌ها hp توان اسمی الکتروموتور و n_r سرعت چرخشی الکتروموتور می‌باشد.

برای تبدیل حالت وزنی A به حالت کلی از تبدیل‌های زیر استفاده می‌کنیم:

$$1hp \text{ to } 250 hp, \quad L_w = L_w(A) + 1.1 \quad (21)$$

$$251hp \text{ to } 300 hp, \quad L_w = L_w(A) + 1.2 \quad (22)$$

$$301hp \text{ to } 400 hp, \quad L_w = L_w(A) + 1.3 \quad (23)$$

$$401hp \text{ to } 450 hp, \quad L_w = L_w(A) + 1.5 \quad (24)$$

$$451hp \text{ and larger}, \quad L_w = L_w(A) + 1.7 \quad (25)$$

حال برای تبدیل سطح توان صوتی کلی وزنی A به سطوح توان صوتی اکتاواند، از ضرائب تبدیل موجود در جدول زیر استفاده می‌شود:

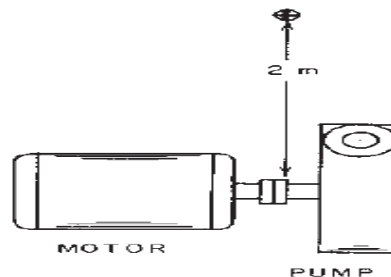
$$L_w(\text{octave band}) = L_w(A) - CF_1 \quad (26)$$

جدول ۴- ضرائب تبدیل برای تبدیل سطح توان وزنی به سطح توان اکتاوباند

Motor Size	Octave band center frequency, Hz							
	63	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
1 to 250 hp	16	12	8	4	4	8	12	16
300 to 400 hp	21	15	9	3	3	8	15	22
450 hp and above	19	13	7	3	3	8	14	22

در ادامه این مبحث و برای درک بهتر مطالب گفته شده به حل مثالی در مورد یک پمپ و الکتروموتور آن می‌پردازیم.

مثال ۲: یک الکتروموتور ۱۸ کیلوواتی از نوع ضد آب در پمپ سانتریفیوژی با توان ۲۰ اسب بخار با سرعت ۱۸۰۰ دور بر دقیقه استفاده می‌شود.



شکل ۲- شماتیکی از پمپ و الکتروموتور

فاکتور جهت برای تمامی فرکانس‌ها در این پمپ ۴ است ($Q = 4$). سیستم در اتاقی با ثابت ۵۰ متر مربع قرار داده شده است. سطح فشار صوتی کلی را در فاصله ۲ متری از سیستم تعیین کنید.

راه حل:

اسب بخار اسمی موتور از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$hp = (18kw) \cdot \left(1.3410 \frac{hp}{kw}\right) = 24.14 hp$$

از معادله ۱۸ داریم:

$$L_w(A) = 20 \log hp + 15 \log n_r - 3 = 20 \log 24.14 + 15 \log 1800 - 3 = 73.5 dBA$$

برای حالت کلی و بدون وزن این الکتروموتور و طبق معادله ۲۱ داریم:

$$1hp \text{ to } 250 hp, \quad L_w = 73.5 + 1.1 = 74.6 \text{ dB}$$

برای سطح توان صوتی پمپ از رابطه ۱۵ داریم:

$$L_{w,p} = 65 + 10 \log_{10} 20 = 77 \text{ dB}$$

حال برای بدست آوردن توان صوتی مجموع داریم:

$$L_w = 10 \log \left(10^{\frac{74.6}{10}} + 10^{\frac{77}{10}} \right) = 78.97 \text{ dB}$$

پس می‌توان نتیجه گرفت که الکتروموتور بر روی سر و صدای این پمپ بی‌تاثیر می‌باشد. سطح فشار صوتی کل با توجه به سر و صدای پمپ و الکتروموتور از رابطه ۸ بدست می‌آید:

$$L_p = 78.97 + 10 \log \left(\frac{4}{50} + \frac{4}{4\pi(2)^2} \right) + 0.1 = 71.07 \text{ dB}$$

مراجع

- [1]. ISO 3744, second edition, 1994
- [2]. KSB, Centrifugal Pump Lexicon, 1990
- [3]. Val s. Lobanoff, Centrifugal Pumps design and application, second edition, Gulf publishing company, 1992
- [4]. NASA, HANDBOOK FOR INDUSTRIAL NOISE CONTROL, 1981
- [5]. Randall F. Barron, Industrial Noise Control and Acoustics, Marcel Dekker, 2001