استفاده از سیستم پاک کننده ی صوتی به جای سیستم دوده روب بخاری جهت پاک کنندگی سطوح انتقال حرارت از دوده و رسوبات

محمد مهدی زاده[۱]، علی نعمتی[۲]

۱. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک m.mehdizadeh@me.iut.ac.ir

۲. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

چکیده

مقاله حاضر با عنوان "استفاده از سیستم پاک کننده ی صوتی (Sonic Soot Bloower) به جای سیستم دوده روب بخاری(Steam Soot Blower)، جهت پاک کنندگی سطوح انتقال حرارت از دوده و رسوبات" به منظور افزایش راندمان بویلر و کاهش توقفات سیستم می باشد. در این مقاله به بیان مزیت های سیستم پاک کننده ی صوتی بر سیستم های پاک کننده بخاری پرداخته می شود. در ادامه مبانی عملکرد و روش استفاده از این نوع سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. سپس پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم پاک کننده صوتی که شامل فرکانس صوت، فشار آکوستیکی، جهت انتشار امواج و دیگر پارامترها می باشد به طور مفصل توضیح داده شده است.

کلمات کلیدی: سیستم پاک کننده صوتی، دوده روب بخاری، امواج صوت، بویلر

۱- مقدمه

سهم عمده اتلافات بخار در نیروگاه مربوط به دبی بخار کمکی و دبی بخار Soot Blower می باشد. تغییر تکنولوژی سیستم Soot Blower از Steam به Sonic ، افزایش راندمان بویلر و کاهش توقفات را به دنبال دارد. سیستمهای پاک کننده صوتی از سه دهه قبل جهت پاک کنندگی سطوح انتقال حرارت از دوده و رسوبات مورد استفاده قرار گرفته شده است. در این روش از هوای فشرده جهت تولید امواج صوتی و یا فشار صوتی بهره گرفته می شود. امواج صوتی تولید شده سبب ایجاد اختلاف فشار در طول مسیر حرکت ذرات دوده و خاکستر گردیده و به همین دلیل این ذرات دارای حرکتی نوسانی می شوند. نوسان ذرات سبب جلوگیری از بهم پیوستن آنها و همچنین جلوگیری از نشست آنها بر روی سطوح انتقال حرارت می گردد. در نهایت جریان گازهای حاصل از احتراق خروج ذرات را موجب می گردد.

۲- مزایای سیستم پاک کننده صوتی نسبت به سیستم دوده روب بخاری

مزایای سیستم پاک کننده صوتی نسبت به سیستم دوده روب بخاری در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین برای مقایسه بهتر، دو نوع تکنولوژی Soot Blower در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مزایای سیستم پاک کننده صوتی نسبت به سیستم دوده روب بخاری

ردیف	شرح	سیستم پاک کننده صوتی	دوده روب بخاری
۱	حامل انرژی	هوای فشرده	بخار خشک
۲	نحوه عملکرد	حرکت امواج صوتی بر روی سطوح	برخورد بخار با سطوح
۳	اثر پاک کنندگی	پاک شدن تمام سطوح(حتی سطوح غیر قابل دسترس)	پاک شدن تنها سطوحی که در معرض برخورد بخار قراردارند.
۴	طول عمر المان های مبدل حرارتی	امواج صوتی هیچ اثر خوردگی نداشته و طول عمر المان های مبدل حرارتی افزایش می یابد.	برخورد بخار با المان های مبدل حرارتی سبب خوردگی و کاهش عمر آنها می گردد.
۵	نحوه پاک کنندگی	بطور پیوسته سطوح انتقال حرارت تمیز باقی مانده و افت انتقال حرارت صورت نمی گیرد.	دو تا سه بار در هر روز عمل کرده و فقط پس از هر بار عملکرد سطوح تمیز می شود. بنابر این افت انتقال حرارت بالا می باشد.
۶	هزینه های عملکردی	هزینه هوای فشرده مصرفی در حدود ۰/۱۴ – ۰/۱ هزینه بخار مصرفی سیستم دوده روب بخاری می باشد.	هزینه بخار مصرفی در حدود ۱۰ – ۷ برابر هزینه هوای فشرده سیستم پاک کننده صوتی می باشد.
۷	هزینه تعمیرات و نگهداری	کم	بالا

جدول ۲. مقایسه Sonic Soot Blower و Steam Soot Blower

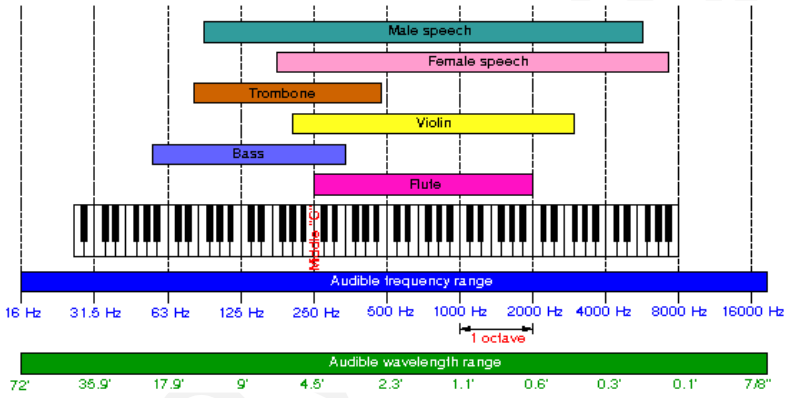
Steam Soot Blower	Sonic Soot Blower
ملاحظات فنی	
ایجاد مشکل در عملکرد بویلر	افزایش توانایی بویلر
ایجاد نوسان در بار تولیدی بویلر	افزایش پایداری بویلر
دور کردن بویلر از شرایط عملکرد بهینه	بهینه کردن شرایط عملکرد بویلر
مناسب برای تعداد کمی از بویلرها	مناسب برای همه نوع بویلر
ساختار پیچیده	ساختار ساده و قابل اطمینان
تعمیر و نگهداری سخت، نیاز به قطعات یدکی زیاد	تعمیر و نگهداری آسان، نیاز به قطعات یدکی کم
ساختار صلب، عدم انعطاف پذیری در تغییرات شرایط بویلر	انعطاف پذیری در تغییرات شرایط بویلر
ملاحظات اقتصادی	
هزینه سرمایه گذاری زیاد، بازگشت سرمایه دیر	هزینه سرمایه گذاری کم، بازگشت سرمایه سریع
افزایش مصرف سوخت	کاهش مصرف سوخت
هزینه تعمیر و نگهداری بالا	هزینه تعمیر و نگهداری کم
معمولا بازگشت سرمایه بسیار طولانی	معمولا بازگشت سرمایه در ۲ سال
ملاحظات زیست محیطی	
افزایش SO_X ،CO_2،NO_X	کاهش SO_X ،CO_2،NO_X
عدم توانایی درکاهش آلودگی صوتی	آلودگی صوتی کم

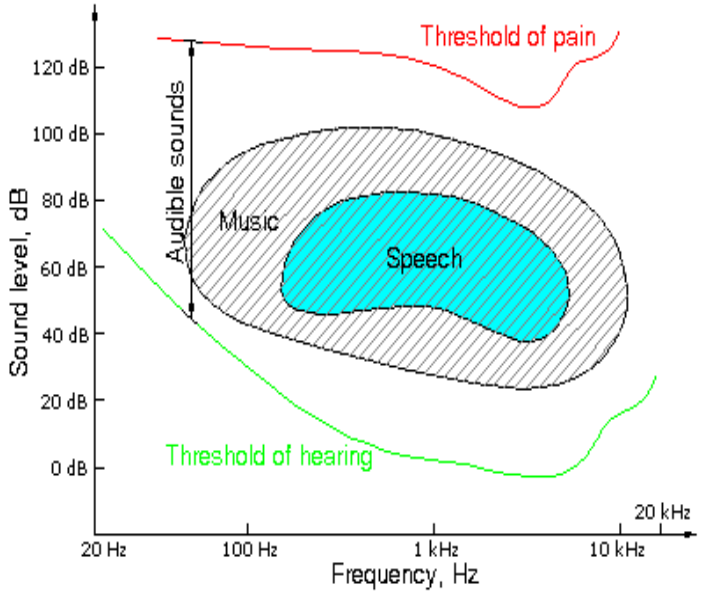
۳- مبانی فیزیکی سیستم پاک کننده صوتی

امواج صوتی سینوسی بوده و یک موج سینوسی با فرکانس و دامنه آن مشخص می گردد. امواج صوتی با فرکانس ۲۰-۲۰۰۰۰Hz در دامنه شنوایی انسان قرار دارد (شکل ۱). امواج صوتی با فرکانس بیش از ۲۰ KHz بعنوان آلتراسونیک(Ultrasound) شناخته شده و امواج صوتی با فرکانس کمتر از ۲۰Hz بعنوان امواج صوتی فرکانس پایین(Infrasound) شناخته می شوند. لازم بذکر است که رابطه بین فرکانس، طول موج و سرعت انتشار صوت بصورت $c=f\lambda$ می باشد.

الف) نحوه کار Sonic Soot Blower

امواج صوتی انرژی خود را در همه جهات به ذرات معلق حاصل از احتراق منتقل کرده و سطوح را همیشه تمیز نگه می دارند. برای اثر بخشی بیشتر می توان امواج صوتی را در آن واحد از چند منبع گسیل داد. در ضمن امواج صوتی برای سطوح بی ضرر بوده به همین دلیل در تمامی موارد مورد نیاز می توان از آن استفاده کرد.



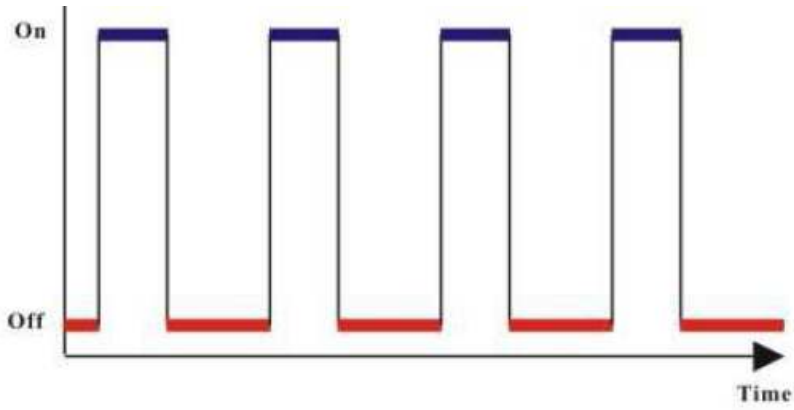


شکل ۱. دامنه شنوایی انسان

ب)زمان کار Sonic Soot Blower:

عملکرد Sonic soot blower در طول ۲۴ ساعت به صورت مداوم و حالت on/off می باشد.

مدت زمان روشن بودن آن در حد ثانیه و مدت زمان خاموش بودن آن در حد دقیقه می باشد (شکل ۲).



شکل ۲. زمان کار Sonic soot blower

۴- پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم پاک کننده صوتی

پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم پاک کننده صوتی به شرح زیر می باشد:

الف- فرکانس صوت (طول موج)

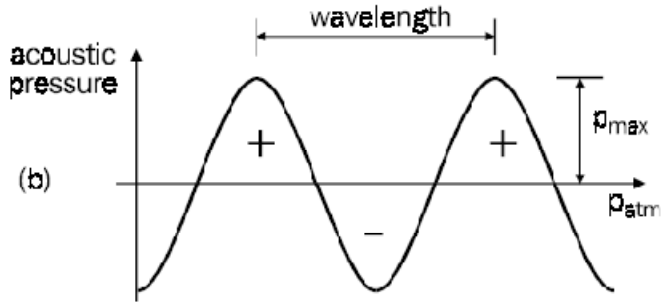
طول موج صوت با فرکانس آن نسبت عکس داشته و بنابراین امواج صوتی با فرکانس پایین تر دارای طول موج بزرگتری می باشند. بعنوان مثال طول موج صوت با فرکانس ۲۰Hz، ۵۰Hz و ۱۰۰Hz به ترتیب ۱۷، ۱۱/۳ و ۳/۴ متر می باشد. لذا سیستم پاک کننده صوتی با فرکانس پایین تر فضای بیشتری را جهت تمیزکاری تحت پوشش قرار می دهد.

ب- فشار آکوستیکی (Acoustic pressure)

امواج صوتی بصورت طولی حرکت کرده و سبب ایجاد اختلاف فشار در یک محیط الاستیک می گردد. اختلاف فشار ایجاد شده بر حسب KPa به عنوان فشار آکوستیکی شناخته می شود(شکل ۳). دامنه فشار آکوستیکی با P_M و مقدار موثر آن با P_{rms} تعریف می گردد. شدت صوت بر حسب W/m^2 بصورت $I=P_{rms}^2/(\rho c)$ تعریف می گردد که در آن ρ دانسیته هوا بر حسب kg/m^3 است و ρc به عنوان مقاومت آکوستیکی شناخته می شود. لازم بذکر است که شدت صوت بر حسب دسیبل(dB) بصورت $dB=20\log(P/P_0)=10\log(I/I_0)$ تعریف می گردد که در آن P_0 فشار مرجع می باشد.

یک سیستم پاک کننده صوتی باید توان آکوستیکی لازم، جهت تامین شدت صوتی مورد نیاز در ناحیه تمیزکاری را دارا باشد. تعیین شدت صوتی خروجی مورد نیاز سیستم پاک کننده صوتی جهت حرکت موثر ذرات، بر

اساس فرکانس صوتی آن سیستم صورت می گیرد. در فرکانس های صوتی پایین تر، شدت صوتی خروجی مورد نیاز سیستم پاک کننده صوتی برای حرکت موثر ذرات کمتر می باشد.



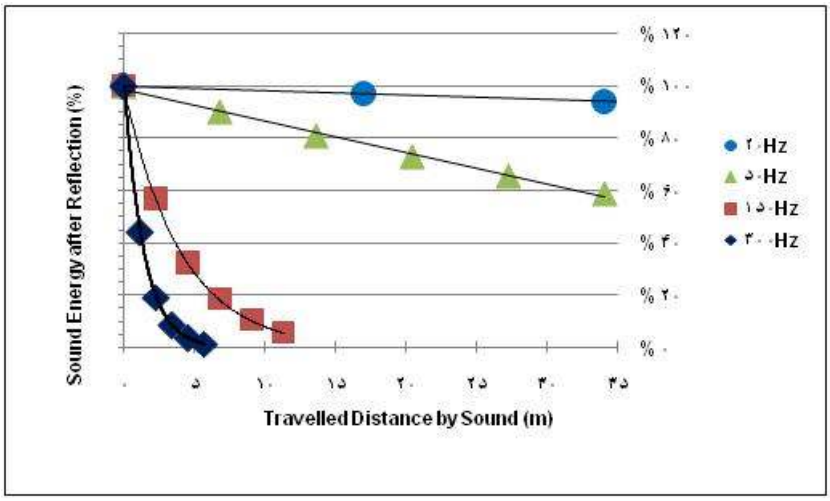
شکل ۳. فشار آکوستیکی

ج-مقدار جذب امواج صوتی پس از برخورد با اجسام

میزان جذب انرژی صوت پس از برخورد با دیواره ها وابسته به فرکانس صوت بوده و با افزایش فرکانس، افزایش می یابد. در جدول ۳ میزان جذب انرژی چند منبع صوتی با فرکانس های مختلف و. همچنین میزان انرژی موجود در امواج صوتی بعد از برخوردهای متوالی با دیواره ها ارائه شده است. بنابر این صوت تولیدی توسط سیستم پاک کننده صوتی با فرکانس پایین تر پس از برخورد با دیواره ها انرژی کمتری را از دست داده و در نتیجه قدرت تمیزکنندگی سیستم بیشتر می باشد. همچنین در شکل ۴ میزان جذب انرژی صوت پس از برخورد با دیواره ها وابسته نمایش داده شده است.

جدول ۳. میزان جذب انرژی صوت پس از برخورد با دیواره ها وابسته

Sound Frequency (Hz)	**Wave Length (m)**	**Energy Absorption Factor (%)**	**Reflection Factor (%)**	**Sound Energy after Reflection**					
				-	**1st**	**2nd**	**3rd**	**4th**	**5th**
20 Hz	17.00	3.0%	97.0%	100%	97%	94%	91%	89%	86%
50 Hz	6.80	10.0%	90.0%	100%	90%	81%	73%	66%	59%
150 Hz	2.27	43.0%	57.0%	100%	57%	32%	19%	11%	6%
300 Hz	1.13	56.0%	44.0%	100%	44%	19%	9%	4%	2%
Sound Frequency (Hz)	**Wave Length (m)**			**Travelled Distance by Sound (m)**					
20	17.00			0	17	34	51	68	85
50	6.80			0	7	14	20	27	34
150	2.27			0	2	5	7	9	11
300	1.13			0	1	2	3	5	6



شکل ۴. میزان جذب انرژی صوت پس از برخورد با دیواره ها وابسته

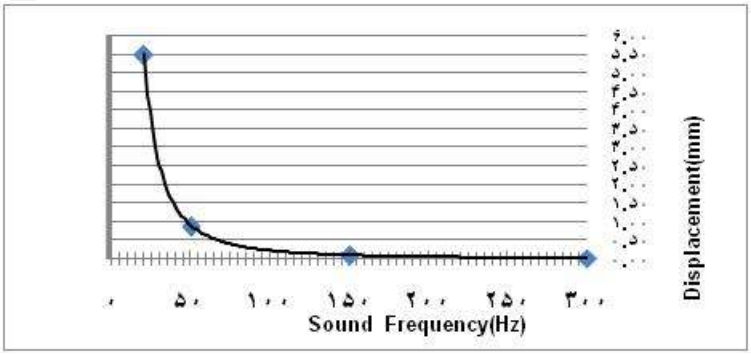
د- جابجایی ذرات بر اثر امواج صوتی

میزان جابجایی ذرات با توان دوم فرکانس صوت نسبت عکس داشته و بنابر این سیستم پاک کننده صوتی با فرکانس پایین تر سبب جابجایی بیشتر ذرات شده و در نتیجه قدرت تمیزکنندگی آن افزایش می یابد.

به عنوان مثال در صورتیکه شدت صوت چند منبع صوتی با فرکانس های مختلف 140dB باشد، مقدار جابجایی ذرات ناشی از این منابع صوتی در جدول ۴ و شکل ۵ ارائه شده است.

جدول ۴. میزان جابجایی ذرات با فرکانس صوت

Sound Frequency (Hz)	Wave Length (m)	Sound Pressure(dB)	Particle velocity (m/s)	Displacement (mm)
20	17.00	140	0.70	5.50
50	6.80	140	0.70	0.88
150	2.27	140	0.70	0.10
300	1.13	140	0.70	0.02



شکل ۵. کاهش جابجایی ذرات در صورت افزایش فرکانس صوت

ه-جهت انتشار امواج

با افزایش فرکانس، حرکت امواج صوتی همسو شده و این در صورتی است که امواج با فرکانس پایین در تمامی جهات حرکت می کنند. این امر سبب می گردد که سیستم پاک کننده صوتی با فرکانس پایین تر، توانایی تمیزکاری فضای بیشتری را داشته باشد و همچنین توانایی تمیزکاری مکان هایی که حتی در معرض برخورد امواج صوتی نیستند را نیز داشته باشد.

۵- مشخصات فنی محصول و طراحی

در طراحی و استفاده این تجهیزات در بویلر ها شرایط هندسی بویلر و لوله ها، نوع سوخت، دبی گاز عبوری، دما و پارامتر های دیگر مد نظر قرار می گیرند. توان آکوستیکی ، شدت صوت ، فرکانس و غیره از جمله مشخصات فنی پاک کننده های صوتی می باشد که در ذیل شرح داده می شود.

توان آکوستیکی سیستم پاک کننده صوتی و فرکانس صوت

از جمله پارامتر های اساسی پاک کننده های صوتی شامل بازده، توان خروجی و متعاقب آن فرکانس امواج صوتی تولیدی می باشد. بر اساس آزمایشات و تجربیات، امواج صوتی با توان بالاتر و فرکانس پایین تر توانایی بالاتری در عملکرد پاک کنندگی را دارا می باشند. حداقل سطح فشار صوت جهت پاک کنندگی موثر ۱۳۰ دسی بل می باشد که دامنه ۱۳۵-۱۴۵ دسی بل در محدوده فرکانس ۲۰-۱۵۰ هرتز جهت تجهیزات بویلر نیروگاه از جمله ژانگستروم پیشنهاد می گردد.

محل نصب سیستم پاک کننده صوتی

ایجاد یک موج صوتی ایستا که آنتی نود[1] خود را در ناحیه مورد نظر برای تمیزکاری دارا باشد، علاوه بر وابستگی به فرکانس صوت، به محل نصب سیستم پاک کننده صوتی نیز وابسته می باشد. تعیین محل بهینه نصب سیستم پاک کننده صوتی، بر اساس مدلسازی و شبیه سازی سه بعدی آکوستیکی بویلر صورت می گیرد.

قابلیت اندازه گیری توان آکوستیکی

هر سیستم پاک کننده صوتی باید مجهز به ادوات اندازه گیری توان آکوستیکی باشد. این امر سبب پایش و در نتیجه کنترل توان آکوستیکی سیستم در زمان راه اندازی و همچنین در طول زمان بهره برداری می گردد. پاک کننده صوتی شامل میکرو کنترلری است که زمان موثر عملکرد پاک کننده های صوتی را کنترل می کند. این زمان بایستی به اندازه کافی کوتاه اختیار شود تا ذرات رسوب شده فرصت چسبیدن به سطح را پیدا نکند. تنظیم زمان عملکرد به مدت ۱۰ تا ۱۵ ثانیه هر ۱۰ تا ۲۰ دقیقه معمولا مناسب می باشد. البته با توجه به شرایط ، ظرفیت و محل نصب این زمان تغییر می کند.

تعداد دستگاه های پاک کننده صوتی در هر ناحیه

[1] . Anti-node

در هر ناحیه مورد نظر برای تمیزکاری تنها یک دستگاه پاک کننده صوتی باید نصب گردد. در صورت استفاده از چند دستگاه پاک کننده صوتی در یک ناحیه، امواج صوتی تولیدی توسط دستگاه های پاک کننده صوتی با یکدیگر تداخل کرده و اثر یکدیگر را خنثی می کنند. لازم بذکر است تنها یک و یا دو فرکانس وجود دارد که در آن یک موج صوتی ایستا در مسیر محفظه احتراق تا دودکش ایجاد شود و آنتی نود(Anti-node) خود را در ناحیه مورد نظر برای تمیزکاری دارا باشد.

هوای فشرده

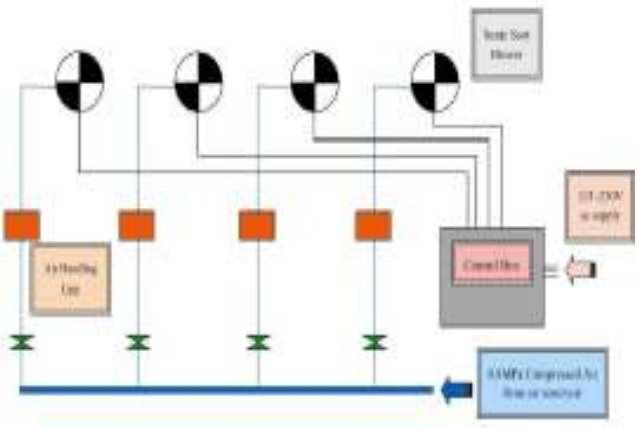
انرژی مورد نیاز جهت تولید امواج صوتی در سیستم پاک کننده صوتی باید توسط هوای فشرده با فشار ۵-۸ bar تامین گردد.

۶- نصب سیستم Sonic Soot Blower

برای استقرار سیستم Sonic Soot Blower مواردی باید مد نظر قرار گیرد(شکل ۶) که شامل:

- مدل و اندازه مورد نیاز بر حسب کاربرد تعیین می شود.
- سیستم هوای فشرده: برای استفاده از Sonic Soot Blower ها به منبع هوای 0.8 MPa نیاز می باشد.
- Control panel: PLC با اتصال DCS یا استفاده از کنترلر های زمانی رایج.

اطلاعات فنی دو نمونه از Sonic Soot Blower ها ی شرکت Sound Blast انگلستان در جدول ۵ آمده است.



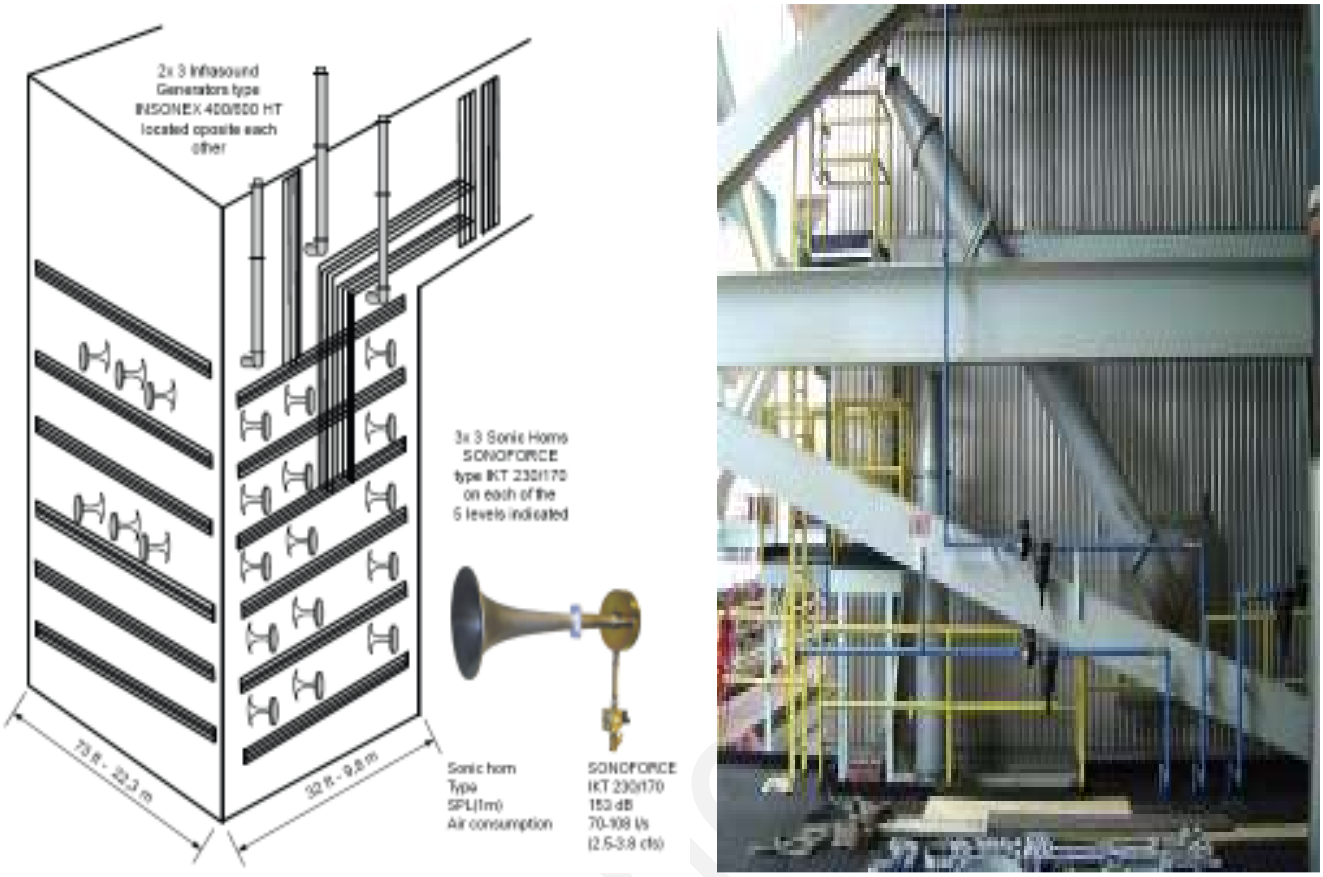
شکل ۶. تجهیزات مورد نیاز برای نصب Sonic soot blower

همچنین در شکل ۷ سیستم Sonic Soot Blower نصب شده در یک نیروگاه نمایش داده شده است.

جدول ۵. اطلاعات فنی دو نمونه از Sonic Soot Blower ها ی شرکت Sound Blast

Sonic Soot Blowers (Audible)			
Model		SB38	SB23
Frequency, Hz (20°C, 68°F)		220 Hz	220 Hz
Sound pressure level, dB (1M, 3.3ft)		~ 145	~ 143
Feeding pressure during signal,		0.4 ~ 0.6 MPa (4~6 bar) (58~87 psi)	0.4 ~ 0.6 MPa (4~6 bar) (58~87 psi)
Air consumption during signal, STP		20 ~ 40 l/s (0.7~1.4 cfs)	20 ~ 40 l/s (0.7~1.4 cfs)
Max. Temp	Horn	1300°C (2372°F)	1300°C (2372°F)
	Diaphragm Housing	500°C (932°F)	500°C (932°F)
	Solenoid Valve	80°C (176°F)	80°C (176°F)
Weight		~35 kg (77 lb)	~30 kg (66 lb)

Low Frequency Sonic Horns (Inaudible)			
Model		SBx40	SBx20
Frequency, Hz (20°C, 68°F)		10~25	10~25
Feeding pressure during signal		0.4 ~ 0.7 MPa (4~7 bar) (58~101.5 psi)	0.4 ~ 0.7 MPa (4~7 bar) (58~101.5 psi)
Air consumption during signal, STP		180 ~ 240 l/s (6.3~8.4 cfs)	180 ~ 240 l/s (6.3~8.4 cfs)
Sound pressure level, dB (1M, 3.3ft)		~138	~133
Max. Temp Range	End Piece	~800°C (1472°F)	~800°C (1472°F)
	Valve Unit	0~60°C (32~140°F)	0~60°C (32~140°F)
Materials	Resonance Tube	Galvanized Steel	Galvanized Steel
	End Piece	Galvanized Steel	Galvanized Steel
Weight		~100 kg (220 lb)	~60 kg (132 lb)



شکل ۷. Sonic Soot Blower های نصب شده در یک واحد نیروگاهی ۶۵۰ MW