

کاربرد یادگیری ماشین در افزایش کارایی آزمون‌های تجربی خاموشی آکوستیکی شعله

محمدعلی اختردانش^۱، انسیه علی پور^۲، سید محمدباقر ملائک^{۳*}

۱- دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، mohammadali.akhtardanesh@ae.sharif.edu

۲- دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، alipour.ensieh@ae.sharif.edu

۳- استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، malaek@sharif.edu

* نویسنده مسئول

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۱، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹)

چکیده: ناپایداری احتراق بر اثر امواج آکوستیکی، می‌تواند منجر به آثار مخربی همچون تنش حرارتی بر روی بدنه محفظه احتراق، نویز، خاموشی شعله، برگشت شعله، ارتعاشات و حتی پدیده‌ی انفجار شود. این مقاله با به کارگیری روش طراحی آزمون، به صورت سازمان‌یافته، اقدام به جمع‌آوری داده تجربی برای پیش‌بینی خاموشی شعله کرده است. دسترسی به مواد اولیه آزمایش، تجهیزات، هزینه‌های آزمون و امکان آسیب‌رسیدن به مولد آکوستیک در دامنه‌های فشاری بالا، دلایلی است که می‌بایست نقاط آزمون را هوشمندانه انتخاب کرد. پارامتری که برای شناسایی شرایط خاموشی در نظر گرفته شده، توان آکوستیکی امواج آکوستیک است. چهار عامل اثرگذار فرکانس امواج، نسبت هم‌ارزی، عدد رینولدز جریان واکنش‌دهنده‌ها و قطر دیواره محفظه به‌عنوان ورودی برای مدل یادگیری ماشین در نظر گرفته شده است. به کمک روش رگرسیون بردار پشتیبان، تابعیت توان آکوستیکی موردنیاز برای خاموشی شعله متان و پروپان از پارامترهای مذکور استخراج شده است. محاسبه خطای مدل ارائه شده نشان داد که مدل ارائه شده در گستره وسیعی از پارامترهای فرکانس، نسبت هم‌ارزی، قطر محفظه و عدد رینولدز، دقت مناسبی دارد.

کلیدواژه‌گان: ناپایداری احتراق، خاموشی، آکوستیک، یادگیری ماشین، رگرسیون بردار پشتیبان.

مقدمه

در سال ۱۷۷۷ تأثیرپذیری شعله از موسیقی توجه بایرون هیگینز^۱ را به خود جلب کرد و در سال ۱۸۶۷ تیندال^۲ از پدیده برهمکنش بین شعله و امواج صوتی پرده برداشت [۱]. خاموشی شعله به کمک امواج آکوستیکی یک روش نوین محسوب می‌شود که محققان حوزه اطفاء حریق را به دلیل سازگاری با محیط‌زیست، به خود علاقه‌مند کرده است. در حالی که محققان این حوزه، مشغول یافتن روش‌های بهینه برای خاموشی شعله هستند، متخصصان حوزه ناپایداری احتراق تلاش می‌کنند که مقاومت شعله در برابر امواج آکوستیکی (پایداری شعله) را با درک بهتر ارتباط بین امواج آکوستیک و شعله بهبود ببخشند. پدیده مخربی که با عنوان "ناپایداری احتراق" شناخته می‌شود، با نوسانات بزرگ دامنه فشاری یا حرارت همراه است. این پدیده ممکن است به آثار نامطلوبی مانند تنش حرارتی در محفظه احتراق، نویز، پس‌زنی شعله^۳، پریدن شعله^۴، ارتعاشات سازه و حتی انفجار محفظه احتراق منجر شود [۲]. پژوهشگران در حوزه ناپایداری احتراق در تلاش هستند با یافتن راه‌حل‌های

¹ Byron Higgins

² Tyndall

³ Flashback

⁴ Blow-off

بنیادین از ناپایداری شعله جلوگیری و محفظه احتراق را از پدیده‌های ناخواسته فوق، حفظ کنند. از این رو، درک نحوه خاموشی آکوستیکی شعله و شناخت عوامل اثرگذار بر این پدیده اهمیت می‌یابد. هدف اصلی این پژوهش، مطالعه پایداری شعله در برابر امواج آکوستیکی با رویکرد ناپایداری احتراق است. کاربرد اطفاء حریق با استفاده از امواج آکوستیک هنوز حوزه نوپا و نوظهوری است که هنوز به مرحله کاربرد عملیاتی نرسیده است و مقصود اصلی این پژوهش نیست. اما بررسی مطالعات انجام شده در این حوزه نیز می‌تواند سودمند باشد.

مطالعه خاموشی شعله آرام^۱ پیش‌آمیخته^۲ تحت اثر کشیدگی نشان داد عدد بی‌بعد کارلوویتز^۳ (نسبت مقیاس زمانی واکنش به مقیاس زمانی فیزیکی سیال)، در هنگام وقوع خاموشی باید از مرتبه بزرگی واحد باشد؛ اما در آزمون‌های تجربی چندین مرتبه بزرگی تغییرات دارد [۳]. مطالعه خاموشی محلی آکوستیکی شعله پیش‌آمیخته نشان داده است که برای فهم عمیق مکانیزم‌های حاکم بر فیزیک مسئله، اطلاعات موجود کافی نیست. پدیده خاموشی محلی شعله پیش‌آمیخته در مواجهه با امواج آکوستیکی رفتاری غیرخطی از خود نشان داده است که به کوپل غیرخطی برهمکنش امواج آکوستیکی و شعله بازمی‌گردد [۴-۵]. پدیده "باریک شدن"^۴ شعله بعد از رسیدن به یک فرکانس و دامنه موج مشخص، نشان می‌دهد بین پدیده‌های جریان چرخشی^۵ و بازگشتی^۶، ساختار شعله و میدان آکوستیکی ارتباط قوی وجود دارد. پارامتر دیگری که در مسئله خاموشی شعله پیش‌آمیخته تحت اثر امواج آکوستیکی لازم است مدنظر قرار گیرد، عدد لوویس^۷ (نسبت نفوذ حرارتی به نفوذ جرمی) است. خاموشی آکوستیکی شعله‌های متان-هوا و بوتان-هوا با تغییر فرکانس و دامنه امواج به صورت هدفمند مطالعه شده است و نقش دو عددی بی‌بعد کارلوویتز و لوویس در خاموشی شعله بررسی شده است [۶-۸]. حساسیت خاموشی آکوستیکی شعله به عدد کارلوویتز به مراتب بیشتر از عدد لوویس ارزیابی شده است.

در مرجع [۹] اطفاء حریق به کمک یک مولد آکوستیکی بر روی یک شعله آرام نفوذی^۸ پروپان آزمایش شده است. در این پژوهش نحوه تولید جریان القایی به کمک حرکت مولد آکوستیکی بحث شده است و نشان داده شده است پیش از رویداد خاموشی شعله و در نزدیکی محدوده خاموشی شعله، یک حرکت نوسانی با دامنه ثابت توسط شعله شکل می‌گیرد. نرخ کرنش^۹ خاموشی شعله تحت تأثیر جریان واکنش‌دهنده‌ها است و این عامل نقشی کلیدی در پدید آمدن شعله دارد. با کاهش فرکانس امواج آکوستیکی، می‌توان دامنه امواج آکوستیکی محرک را بزرگ‌تر کرد و امواج لازم برای خاموشی شعله را فراهم کرد.

مطالعات عددی پاسخ آکوستیکی شعله و خاموشی آن در شعله‌های نفوذی هیدروژن-هوا نشان داده است که ارتباط پیچیده‌ای بین فشار و سینتیک شیمیایی با خاموشی شعله برقرار است [۱۰]. مطالعه تجربی خاموشی آکوستیکی شعله تحت تأثیر فرکانس امواج، توان مشعل و فاصله منبع تولید موج تا شعله نیز بررسی شده است [۱۱]. تسپینار و همکاران [۱۲] با به کارگیری هوش مصنوعی، خاموشی آکوستیکی شعله را تحت اثر عوامل مختلف تجزیه و تحلیل کرده است. این پژوهش از یک پایگاه داده گسترده برای بررسی برهمکنش امواج آکوستیکی و شعله استفاده کرده است. هدف اصلی این بررسی تعیین نقش عوامل مؤثر بر خاموشی از جمله نوع سوخت، ابعاد شعله، شدت موج، فرکانس، دبی سوخت و فاصله منبع تا شعله به کمک یادگیری ماشین است. سه روش مختلف یادگیری ماشین شامل استنتاج فازی منطبق در شبکه تطبیقی^{۱۰}، الگوریتم CN2 و درخت تصمیم^{۱۱} به ترتیب ۹۴/۵ درصد، ۹۹/۹۱ درصد و ۹۷/۲۸ درصد موفقیت در پیش‌بینی خاموشی نشان داده است.

¹ Laminar

² Premixed

³ Karlovitz Number

⁴ Pinch-off

⁵ Vortex Flow

⁶ Reverse Flow

⁷ Lewis Number

⁸ Diffusion

⁹ Strain rate

¹⁰ Adaptive-Network Based Fuzzy Inference Systems (ANFIS)

¹¹ Decision tree (DT)

بیشتر مطالعات ارائه شده بر روی بررسی پدیده خاموشی آکوستیکی شعله با شرایط خاصی تمرکز دارد [۱۳-۱۶]. تاکنون، یک مدل جامع و مناسب برای پیش‌بینی خاموشی آکوستیکی شعله به وجود نیامده است. مدل‌های پیشنهادی، از جمله مرجع [۱۲]، اغلب وابسته به هندسه شعله، شرایط مرزی، نسبت هم‌ارزی^۱ یا نحوه اختلاط هستند. بیشتر پژوهش‌های انجام شده شعله بدون حضور محفظه را آزمایش کرده‌اند و از تأثیرات دیواره صرف‌نظر کرده‌اند. در این پژوهش سعی شده است با در نظر گرفتن اثرات محصور شدن شعله و اثراتی از قبیل فرکانس امواج، نوع سوخت، عدد رینولدز جریان واکنش‌دهنده‌ها، نسبت هم‌ارزی و قطر محفظه، یک مدل کامل‌تر با به‌کارگیری روش یادگیری ماشین ارائه شود. بدین منظور کاربرد روش رگرسیون بردار پشتیبان^۲، یکی از روش‌های مرسوم یادگیری ماشین [۱۷]، در پیش‌بینی خاموشی آکوستیک شعله تحلیل شده است. اثرات عواملی همچون نوع سوخت، نسبت هم‌ارزی، عدد رینولدز، قطر دیواره محفظه و فرکانس امواج بر خاموشی آکوستیکی شعله در نظر گرفته شده است. برای آموزش مدل از بیش از ۵۰۰ نقطه آزمون تجربی استفاده شده است و ۲۰ درصد داده‌های آزمون برای سنجش اعتبار مدل به کار گرفته شده‌اند. اهمیت استفاده از یادگیری ماشین برای بررسی پدیده خاموشی آکوستیکی شعله این است که، برای پوشش تمامی پارامترهای اثرگذار در مسئله نیاز به آزمون بیش از ۱۰۰۰۰ نقطه آزمون است و در هر نقطه آزمون، مولد آکوستیک باید تا نزدیکی توان ماکزیمم، تولید موج آکوستیکی انجام دهد. در چنین شرایطی هزینه آزمایش و امکان آسیب رسیدن به مولد آکوستیک سبب می‌شود که نیاز به انتخاب هوشمندانه و بهینه نقاط آزمون باشد. به کمک این روش، نقاط آزمون به حدود ۵۰۰ نقطه (۵ درصد تمامی نقاط آزمون) کاهش یافت.

آزمونگر تجربی

شکل ۱، طرح‌واره آزمونگر تحریک آکوستیکی شعله مخروطی و نمونه‌ای از یک تصویر لحظه‌ای شعله تحریک شده را نمایش می‌دهد. برای تولید امواج آکوستیکی از یک محرک (مدل Black Air 12، توان ۵۰۰ وات و قطر ۱۲ اینچ) که در کف محفظه اختلاط^۳، وظیفه تولید امواج تخت را دارد، استفاده شده است. یک مولد سیگنال به یک آمپلی‌فایر (مدل Hertz HCP 1DK) متصل شده است و وظیفه تنظیم فرکانس و شدت امواج آکوستیکی را بر عهده دارد. دامنه امواج آکوستیکی توسط یک شدت سنج صوتی^۴ (مدل B&K 2250) با دقت گسسته‌سازی ۱٫۵ ± دسی‌بل اندازه‌گیری شده است. شدت صوت، SPL، از طریق معادله (۱) با، P' ، دامنه فشاری امواج آکوستیکی مرتبط است که در آن $P_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$ است [۱۸]. برای جلوگیری از برگشت امواج آکوستیکی از پشت محرک آکوستیک، یک جاذب امواج آکوستیکی از جنس کائوچو در قسمت بیرونی آن وسیله نصب شده است. نقشه مشخصه عملکردی بلوک تغذیه شعله (شدت صوت تولیدی محرک تابعی از فرکانس و جریان الکتریکی ورودی) در گستره وسیعی از توان ورودی و فرکانس تحریک، به کمک شدت‌سنجی صوتی اندازه‌گیری شده است. نتایج اندازه‌گیری شدت صوت موج در خروجی نازل سوخت و هوا، در محدوده فرکانسی ۱۰ الی ۲۰۰ هرتز در شکل ۱ ارائه شده است. فرکانس مشخصه تشدید (هلمهوتز^۵) محفظه اختلاط با به‌کارگیری رابطه (۲) محاسبه شده است که در آن c سرعت صوت واکنش‌دهنده‌ها، S سطح مقطع خروجی لوله نازل، V حجم محفظه اختلاط و L_e طول موثر نازل است [۲]. حاصل به کارگیری معادله (۲) فرکانس ۴۵ هرتز است و شکل ۱ نشان می‌دهد که بیشترین دامنه تولید امواج آکوستیکی در محدوده فرکانسی ۴۰ تا ۵۰ هرتز رخ می‌دهد.

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P'}{P_{ref}} \right) \quad (1)$$

$$\omega_0 = \sqrt{c^2 S / V L_e} \quad (2)$$

¹ Equivalence ratio

² Support Vector Regression (SVR)

³ Plenum

⁴ Sound Pressure Level (SPL)

⁵ Helmholtz

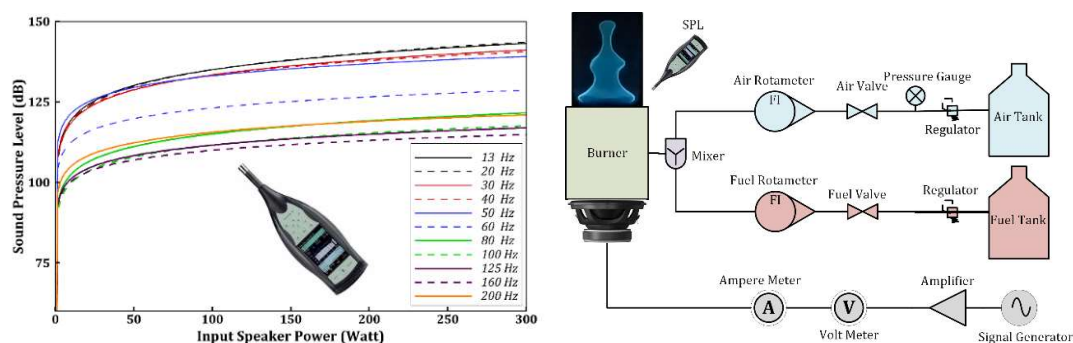


Figure 1- Schematic of the experimental setup (right) and measured SPL as a function of input power and frequency (left)
 شکل ۱- طرحواره آزمونگر تجربی (راست) و شدت صوت امواج آکوستیکی محفظه تابع توان ورودی و فرکانس (چپ)

همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد، هر گاز در مخزن جداگانه ذخیره شده است و به کمک یک رگلاتور به فشار مناسب برای آزمون می‌رسد. در تمامی آزمایش‌ها فشار مخزن هوا ثابت و برابر $3/2$ بار تنظیم شده است. دبی هوا به کمک روتامتر گازی (مدل Dwyer RMB) با گسسته‌سازی دبی ۵ لیتر بر دقیقه و دبی گاز سوخت با روتامتر گازی (مدل Nippon SPO4) با گسسته‌سازی دبی ۱۰۰ لیتر بر ساعت اندازه‌گیری شده است. در شکل ۱ مدار هیدرولیک و الکتریکی آزمونگر تحریک آکوستیکی شعله مشاهده می‌شود. شکل ۲ جزئیات مشعل بنسون با قابلیت تحریک آکوستیکی را نمایش می‌دهد. جریان پیش‌آمیخته هوا و سوخت از طریق سه ورودی وارد محفظه‌ای استوانه‌ای شکل، به قطر $35/3$ سانتی‌متر و طول $28/5$ سانتی‌متر می‌شود. زیر محفظه، محرک آکوستیکی قرار گرفته است و بالای محفظه با یک شبکه لانه‌زنبوری پر شده است. شبکه لانه‌زنبوری جریان را به‌صورت محوری و یکسو به سمت نازل همگرا هدایت می‌کند. نازل همگرا محفظه را به لوله نازل خروجی واکنش‌دهنده‌ها به قطر $2/5$ سانتی‌متر و طول $47/5$ سانتی‌متر متصل می‌کند. برای افزایش ایمنی مشعل در برابر بازگشت شعله به داخل محفظه، از یک محافظ بازگشت شعله استفاده شده است. پس از این محافظ بازگشت شعله، چند ردیف پارچه فلزی متراکم برای از بین بردن اغتشاشات چرخشی ناشی از محافظ بازگشت شعله تعبیه شده است.

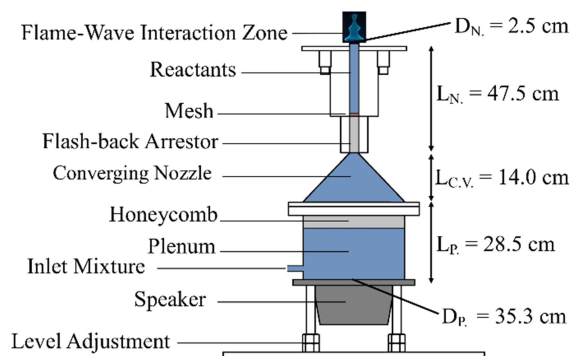


Figure 2- Details of the Bunsen burner with the acoustic exciter
 شکل ۲- جزئیات مشعل بنسن با قابلیت تحریک آکوستیک

از دو نوع گاز مختلف متان و پروپان به‌عنوان سوخت و هوای فشرده شده توسط کمپرسور به‌عنوان اکسنده در تمامی آزمایش‌ها استفاده شده است. متان و گاز طبیعی (که عمده ترکیب آن از متان تشکیل شده است) پرکاربردترین هیدروکربن گازی در صنایع گوناگون، به‌عنوان سوخت آزمایش انتخاب شده است. برای در نظر گرفتن تأثیر نوع سوخت نیز یک

هیدروکربن سنگین تر که دسترسی و ذخیره سازی آن آسان است و در فاز گازی در محیط اتمسفر وجود دارد (پروپان)، در نظر گرفته شده است. جدول ۱ شرایط آزمون‌های تجربی را نمایش می‌دهد. نسبت هم‌ارزی برای سوخت متان در گستره ۰/۶ تا ۱/۲ و برای سوخت پروپان در گستره ۰/۶ تا ۱/۴ و عدد رینولدز در محدوده ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ در نظر گرفته شده است. از مقادیر دیگر نسبت هم‌ارزی، به دلیل ناپایداری ذاتی شعله پیش از برخورد با امواج آکوستیکی صرف نظر شده است. از افزایش عدد رینولدز نیز به دلیل کشیده شدن شعله و افزایش طول بیش از حد صرف نظر شده است. امواج تحریک شعله در محدوده فرکانسی ۲۰ تا ۱۲۰ هرتز انتخاب شده است. فرکانس کمتر از ۲۰ هرتز سبب آسیب به سیستم تحریک خواهد شد و فرکانس بیش از ۱۲۰ هرتز توانی بیش از توان نامی سیستم برای خاموشی آکوستیکی نیاز دارد. علاوه بر نوع سوخت، نسبت هم‌ارزی، عدد رینولدز جریان واکنش دهنده‌ها و فرکانس امواج به‌عنوان ورودی، قطر محفظه نیز به‌عنوان یک عامل مؤثر بر آزمایش لحاظ شده است. طبق جدول ۲، از سه جداره پیرکس استوانه‌ای به قطرهای ۶/۵، ۸/۵ و ۱۰/۵ سانتی‌متر به‌عنوان محفظه شعله استفاده شده است. پارامتری که به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شده است، توان آکوستیکی امواج جهت خاموشی شعله است که طبق جدول ۱ در بازه صفر تا ۳۰۰ وات قرار دارد و به کمک اندازه‌گیری شدت جریان الکتریکی و ولتاژ دو سر سیم محرک آکوستیکی محاسبه می‌شود.

جدول ۱- شرایط آزمون

Table 1- Experimental Conditions

Parameter	Condition
Fuel	CH ₄ – C ₃ H ₈
Oxidizer	Air
Equivalence Ratio Range	0.6-1.4
Mixture Renold's Number	3000-4000
Forcing Frequency	20-120 Hz
Acoustic Power Amplitude	0 – 300 W

جدول ۲- قطر محفظه و نسبت قطر محفظه به نازل آزمون‌های تجربی

Table 2- Chamber wall diameters and contraction ratios for the experiments

Test	1	2	3	4
D_{wall} (cm)	6.5	8.5	10.5	Unconfined
$C_r = D_{burner}/D_{wall}$	0.4	0.3	0.2	0

طراحی آزمایش‌ها

برای بررسی عوامل تأثیرگذار بر خاموشی شعله، از نظریه‌ی طراحی آزمایش‌ها^۱ استفاده شده است. این شاخه از آمار، در برنامه‌ریزی، اجرا، تحلیل و تفسیر آزمایش‌های کنترل‌شده برای ارزیابی عواملی که ارزش یک پارامتر یا گروهی از پارامترها را کنترل می‌کنند، کاربرد دارد. این روش اجازه می‌دهد که چندین عامل ورودی به‌طور همزمان تغییر کنند و تأثیر آن‌ها بر یک خروجی مطلوب (پاسخ) اندازه‌گیری شود. با این فرض، طراحی آزمایش‌ها می‌تواند تعاملات مهمی را که ممکن است در آزمایش با یک عامل در یک زمان نادیده گرفته شوند را شناسایی کند.

¹ Design of Experiments (DoE)

با در نظر گرفتن این عوامل و با استفاده از روش یادگیری ماشین رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)، شرایط وقوع خاموشی شعله پیش‌بینی شده است. در تحقیق حاضر، هدف از طراحی آماری آزمایش‌ها، انجام یک مطالعه برای جمع‌آوری داده‌های مناسب و تجزیه و تحلیل آن برای به دست آوردن نتایج صحیح است. در نهایت بهینه‌سازی فرآیند آزمایش با استفاده از کنترل کردن متغیرها به منظور کمینه کردن تغییرپذیری عوامل و بیشینه کردن اطلاعات به دست آمده از داده‌ها مدنظر است. برای این مطالعه‌ی تجربی دو جنبه وجود دارد: (۱) طراحی آزمایش و (۲) تجزیه و تحلیل داده. در ادامه مروری بر مراحل طراحی آزمایش‌ها انجام شده است [۱۹]:

۱. درک و بیان مسئله: در این مرحله، یک لیست از مسائل موردنظر، بر پایه نظریه طراحی آزمایش‌ها، آماده شد. بر اساس این مسائل، سؤالاتی مانند نوآوری یا شناخت سیستم مورد مطالعه و هدف کلی آزمایش که شامل اعتبارسنجی و شناسایی سیستم و پایداری آن در برابر عوامل مختلف است، مورد بحث قرار گرفت و در نهایت، هدف از طراحی این آزمایش، بررسی تأثیر عوامل مختلف بر خاموشی شعله در نظر گرفته شد.

۲. انتخاب متغیر پاسخ: در این گام، اطمینان حاصل کردن از این‌که متغیر انتخاب شده اطلاعات مفیدی در مورد فرآیند مورد مطالعه ارائه می‌دهد، اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق، توان محرک آکوستیکی در لحظه خاموش شدن شعله به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شده است.

۳. انتخاب عوامل، سطوح و دامنه‌ها: از آنجایی‌که در طراحی آزمایش‌ها، عوامل بالقوه‌ی زیادی وجود دارند، دسته‌بندی آن‌ها به سه گروه صورت گرفته است: عوامل طراحی (آن‌هایی که برای مطالعه و تحقیق انتخاب شده‌اند، مانند توان آکوستیکی در این پژوهش)، عوامل مزاحم (متغیرهایی که ممکن است بر متغیر پاسخ تأثیر بگذارند؛ اما در مطالعه فعلی مورد علاقه نیستند، مانند شدت آشفستگی جریان و فشار محفظه، که در این مطالعه ثابت در نظر گرفته شده‌اند) و عوامل قابل کنترل (متغیرهایی که در این تحقیق مورد مطالعه هستند، شامل نسبت هم‌ارزی، فرکانس، عدد رینولدز جریان واکنش‌دهنده‌ها و قطر دیواره‌ی محفظه). پس از انتخاب این عوامل، تصمیم در مورد دامنه‌ها (سطوح) و چگونگی کنترل آن‌ها گرفته شد که در بخش قبلی و در بخش نتایج به آن‌ها پرداخته شده است.

۴. طراحی آزمایش: در این مرحله، اندازه نمونه (تعداد تکرارها)، توالی آزمایش‌ها و تعیین محدودیت‌های بلوک‌بندی یا تصادفی‌سازی مشخص شده است. با توجه به اهداف نهایی آزمایش، حداقل سه بار تکرار، در استخراج هر نقطه آزمون صورت گرفته است. آزمایش‌ها به صورت سیستماتیک انجام شدند و برای افزایش دقت و کاهش تغییرات ناشی از عوامل مزاحم، تکنیک‌های بلوک‌بندی نیز اجرا شدند تا شرایط آزمایشی یکنواختی فراهم شود.

۵. اجرای آزمایش: در طول آزمایش، نظارت دقیق بر روند آزمایش‌ها انجام شده است تا اطمینان حاصل شود که تمامی مراحل طبق برنامه پیش رفته و نتایج آزمایش به اندازه کافی قابل اعتماد هستند.

پیاده‌سازی مدل رگرسیون بردار پشتیبان

طراحی آزمایش‌ها (DoE) منبع غنی‌ای از داده‌ها فراهم می‌کند که می‌تواند برای ساختن مدل‌های کارآمد، برای پیش‌بینی پدیده‌های فیزیکی، با استفاده از یادگیری ماشین به کار گرفته شوند. به‌طور خاص، مدل رگرسیون بردار پشتیبان یک رویکرد مبتنی بر داده است که به‌عنوان روشی برای پیش‌بینی داده‌های سری زمانی استفاده می‌شود. از ویژگی‌های این مدل، قابلیت تنظیم پارامترهای رگرسیون است. مدل SVR توسط یک مرز رگرسیون^۱، بردارهای پشتیبان^۲ و ابرصفحه^۳ تعریف می‌شود که مجموعه‌ی این پارامترها با یکدیگر، تعیین‌کننده‌ی مدل پیش‌بینی برای ویژگی موردنظر هستند (شکل ۳). پارامترهای مدل از

¹ Decision Boundary

² Support Vector

³ Hyperplane

طریق الگوریتمی بهینه‌سازی می‌شوند که هدف آن، کمینه کردن خطاهای پیش‌بینی و بیشینه کردن حداکثر حاشیه تحمل است. در حالت کلی غیرخطی بودن پاسخ، می‌تواند منجر به افزایش هزینه محاسباتی شود، برای رفع این موضوع می‌توان از روش‌های کرنل که عملیات درجات بالاتر را در فضای ویژگی کرنل انجام می‌دهد، استفاده کرد [۲۰].

برای پیش‌بینی توان موردنیاز برای خاموشی آکوستیکی شعله، از مدل SVR با کرنل تابع پایه شعاعی^۱ (RBF) استفاده شده است. برای استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی، این داده‌ها برای هر فرکانس با استفاده از روش چندجمله‌ای هرमित مکعبی^۲ (PCHIP) درونیابی شده‌اند. این روش به دلیل توانایی دقیق در ثبت رفتار یک تابع بین دو نقطه در تجزیه و تحلیل عددی در این تحقیق به کار برده شده است.

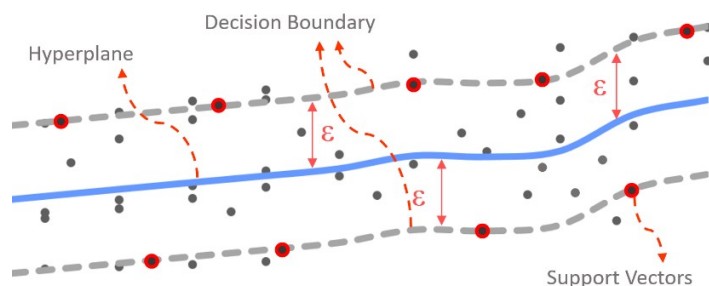


Figure 3- Schematic of the SVR model parameters

شکل ۳- پارامترهای اصلی تنظیم شده در مدل SVR به صورت طرح‌واره

بر اساس شکل ۴، داده‌های آزمایشی به‌دست‌آمده از DoE به دو بخش تقسیم شده‌اند. برای ساخت و ارزیابی مدل رگرسیون بردار پشتیبان از ۸۰ درصد از کل داده‌ها برای آموزش مدل استفاده شده است. از سوی دیگر، داده‌های آزمون که ۲۰ درصد باقی‌مانده از کل داده‌ها را تشکیل می‌دهند، برای آزمون و ارزیابی نتایج پیش‌بینی مدل استفاده شده‌اند.

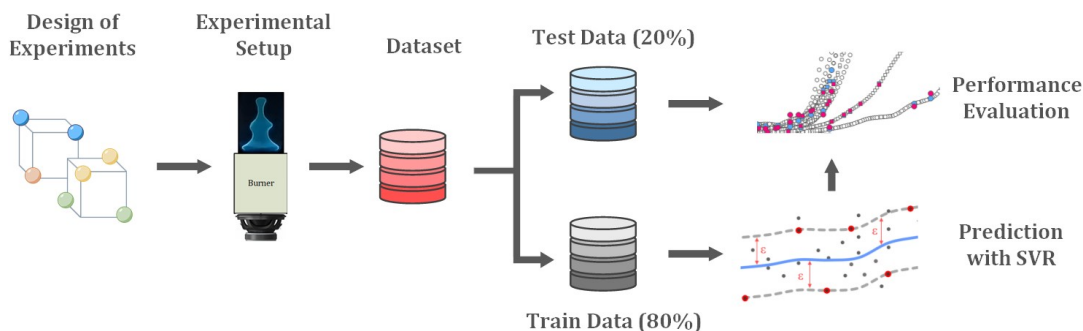


Figure 4- Schematic framework for flame extinction prediction

شکل ۴- ساختار پیشنهادی برای پیش‌بینی خاموشی شعله

نتایج آزمایش‌ها و بحث

در این بخش، نتایج پژوهش در دو قسمت ارائه شده است. قسمت نخست به نتایج آزمون‌های تجربی خاموشی آکوستیکی شعله و اثر عوامل نسبت هم‌ارزی، نوع سوخت، عدد رینولدز و قطر محفظه می‌پردازد. در قسمت دوم پیاده‌سازی روش رگرسیون بردار

¹ Radial Basis Function (RBF)

² Cubic Hermite Interpolating Polynomial (PCHIP)

پشتیبان بر روی آزمایش‌های مذکور و عوامل ذکر شده، تجزیه و تحلیل شده است. برای سنجش اعتبار مدل، ۲۰ درصد از داده‌های تجربی به عنوان نقطه آزمون به مدل داده شده و در مورد میزان خطای پیش‌بینی بحث و بررسی انجام شده است.

نتایج آزمون‌های تجربی بر اساس روش طراحی آزمون

در این بخش نتایج آزمون‌های تجربی خاموشی آکوستیک شعله مخروطی برای دو نوع سوخت متان و پروپان و اکسند هوا، در گستره وسیعی از نسبت هم‌ارزی، عدد رینولدز و قطر محفظه به صورت جداگانه ارائه شده است. نتیجه این بخش به صورت ۵۰۰ نقطه آزمون تجربی، برای آموزش به مدل یادگیری ماشین داده شده است.

نسبت هم‌ارزی

برای بررسی اثر نسبت هم‌ارزی بر خاموشی آکوستیکی شعله، دو نوع سوخت متان و پروپان به ترتیب در گستره نسبت هم‌ارزی ۰/۶ تا ۱/۲ و ۰/۶ تا ۱/۴ در معرض امواج آکوستیکی قرار داده شده است. برای وقوع خاموشی آکوستیکی، دامنه امواج به صورت تدریجی افزایش یافته است تا در هر فرکانس خاص، در یک دامنه فشاری مشخص، شعله به طور کلی خاموش شود که بازه‌ی فرکانسی ۱۰ تا ۱۴۰ هرتز بررسی شده است. در فرکانس‌های بالاتر از این بازه، توان آکوستیکی خاموشی شعله بیش از توان بیشینه محرک آکوستیکی است و نمی‌توان توان لازم برای خاموشی شعله را فراهم کرد. انرژی آکوستیکی موج به کمک معادله (۳) قابل محاسبه است که در آن \bar{p} چگالی جریان و u' سرعت آکوستیکی جریان پیش‌آمیخته سوخت و هوا است.

$$E = \frac{1}{2} \bar{\rho} u'^2 + \frac{1}{2} \frac{p'^2}{\bar{\rho} c^2} \quad (3)$$

هر نماد روی شکل ۵ نشانگر توان آکوستیکی لازم متناظر برای خاموشی کلی یا پریدن شعله است. همانند شعله‌های نفوذی، با افزایش فرکانس، توان آکوستیکی لازم برای خاموشی شعله مخروطی پیش‌آمیخته نیز افزایش می‌یابد [۱۱]. در شعله‌های غیرپیش‌آمیخته متان-هوا، مقیاس زمانی اختلاط نسبتاً بزرگ‌تر از مقیاس زمانی واکنش شیمیایی است و امواج آکوستیکی بیشتر بر فرایند اختلاط سوخت و هوا اثر می‌گذارد؛ اما در شعله پیش‌آمیخته فرایند اختلاط سوخت و هوا کامل است و لازم است سرعت محلی جریان از سرعت شعله بیشتر شود تا خاموشی آکوستیکی رخ دهد. با افزایش فرکانس، مقیاس زمانی تأثیرگذاری موج آکوستیکی بر روی شعله پیش‌آمیخته کاهش می‌یابد؛ لذا نیاز است دامنه امواج آکوستیکی افزایش یابد تا شعله دچار خاموشی کلی شود.

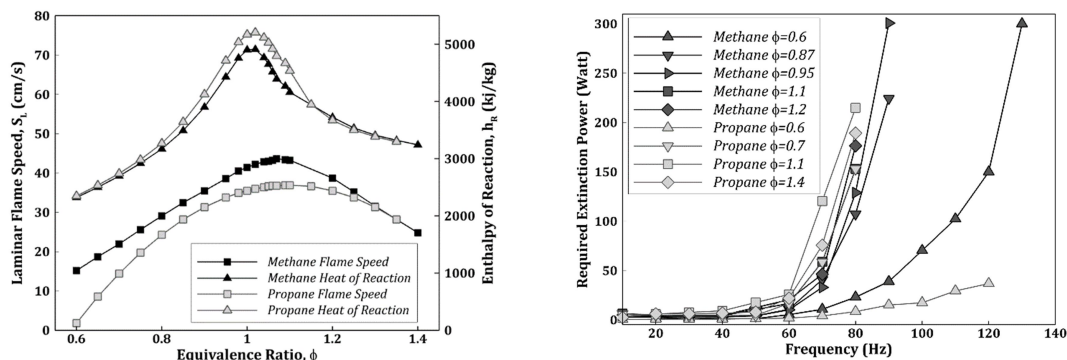


Figure 5- Effect of Equivalence ratio on the required acoustic extinction power (right) and Laminar Flame Speed and Heat of Reaction vs. Equivalence Ratio (left) for methane and propane

شکل ۵- اثر نسبت هم‌ارزی بر سرعت انتشار شعله و ظرفیت گرمایی ویژه فرآورده شعله (چپ) توان آکوستیکی لازم جهت خاموشی شعله (راست)

سرعت شعله متان و پروپان به صورت تابعی از نسبت هم‌ارزی در شکل ۵ دیده می‌شود. برای هر دو نوع سوخت متان و پروپان رفتار کلی سرعت شعله با نسبت هم‌ارزی، مشابه یکدیگر است؛ در رژیم رقیق از سوخت ($\phi < 1$)، با افزایش نسبت هم‌ارزی سرعت شعله افزایش و در رژیم غنی از سوخت ($\phi > 1$) با افزایش نسبت هم‌ارزی سرعت شعله کاهش می‌یابد. بیشینه سرعت انتشار شعله هر دو سوخت در نزدیکی نسبت هم‌ارزی ۱٫۱ است؛ انتظار می‌رود این نسبت هم‌ارزی بیشترین پایداری را در برابر امواج آکوستیکی از خود نشان دهد. \dot{Q} ، نرخ آزادسازی حرارت شعله پیش‌آمیخته را می‌توان به کمک معادله (۴) بیان کرد که در آن S_L سرعت شعله، h_R آنتالپی فرآورده‌های واکنش شیمیایی و A سطح شعله است. هر دو کمیت سرعت شعله و آنتالپی فرآورده‌های تابعی از نسبت هم‌ارزی هستند [۲۱].

$$\dot{Q} = \int \rho S_L h_R dA \quad (4)$$

شکل ۵ علاوه بر سرعت شعله، آنتالپی فرآورده‌های واکنش شیمیایی را نمایش می‌دهد. در ناحیه $1.0 < \phi < 1.1$ ، کمترین حساسیت سرعت شعله و آنتالپی فرآورده به نسبت هم‌ارزی دیده می‌شود. این ناحیه بیانگر نسبت هم‌ارزی بیشینه پایداری شعله در برابر نوسانات آکوستیکی است که در شکل ۵ مشهود است. کمترین پایداری در برابر امواج آکوستیکی برای هر دو نوع سوخت متان و هوا متعلق به نسبت هم‌ارزی ۰٫۶ است. در ناحیه رژیم رقیق از سوخت، حساسیت سرعت شعله و آنتالپی واکنش‌دهنده‌ها به نسبت هم‌ارزی بیشینه است.

سوخت

در شکل ۶ خاموشی آکوستیکی شعله پیش‌آمیخته متان-هوا و پروپان هوا، در نسبت هم‌ارزی ثابت ۱٫۱، مشاهده می‌شود. توان آکوستیکی لازم جهت خاموشی شعله برای هر دو نوع سوخت با افزایش فرکانس امواج، افزایش می‌یابد؛ اگرچه در مقایسه با شعله پیش‌آمیخته متان، شعله پیش‌آمیخته پروپان پایداری بیشتری از خود در برابر امواج آکوستیک نشان داده است. هرچند در نسبت هم‌ارزی ۱٫۱، سرعت شعله متان ۴۳ سانتی‌متر در ثانیه و سرعت شعله پروپان ۳۷ سانتی‌متر در ثانیه است، اما مشاهده می‌شود که پایداری شعله پروپان در برابر امواج آکوستیکی بیشتر است؛ زیرا در این نسبت هم‌ارزی سطح شعله پروپان-هوا بیشتر از سطح شعله متان-هوا است و بر طبق انتگرال معادله (۴) نرخ آزادسازی حرارت شعله پروپان-هوا بیشتر است. لذا سرعت محلی و انرژی آکوستیکی بیشتری برای خاموشی شعله پروپان لازم است.

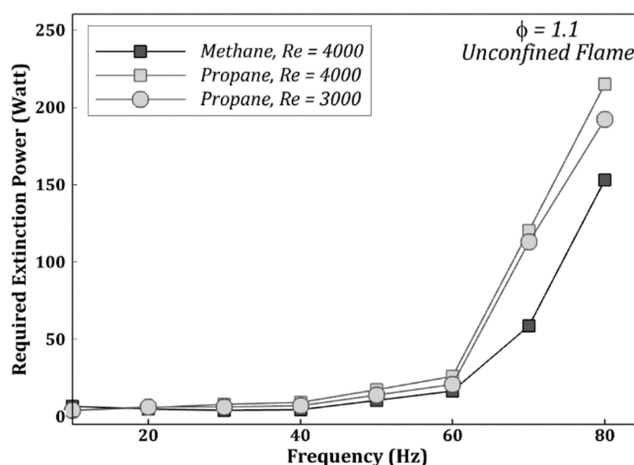


Figure 6- Effect of fuel type and Reynold's number on the required acoustic extinction power in $\phi = 1.1$

شکل ۶- اثر نوع سوخت و عدد رینولدز بر توان آکوستیکی لازم برای خاموشی شعله پیش‌آمیخته در نسبت هم‌ارزی ۱٫۱

عدد رینولدز

در این پژوهش، اثرات تغییر دبی جرمی واکنش‌دهنده‌ها یا سرعت خروجی گازهای واکنشی، از طریق تغییرات عدد رینولدز بررسی شده است. افزایش عدد رینولدز عامل مهمی است که در صورتی که رژیم جریان را از آرام به آشفته تغییر دهد، می‌تواند سبب افزایش سطح شعله و نرخ آزادسازی حرارت شود [۲۲]. افزایش شدت آشفتگی می‌تواند نوسانات سطح شعله و نرخ آزادسازی حرارت را چند برابر افزایش دهد. با این حال، تمام آزمون‌های خاموشی آکوستیکی شعله به نوعی طراحی شده است که رژیم جریان از ناحیه آرام به آشفته تغییر پیدا نکند تا پیچیدگی مسئله افزایش پیدا نکند. شکل ۶ اثر تغییر عدد رینولدز را بر توان آکوستیکی لازم جهت خاموشی شعله پیش‌آمیخته پروپان-هوا در نسبت هم‌ارزی ثابت ۱/۱ نمایش می‌دهد. توجه شود که افزایش عدد رینولدز به‌گونه‌ای است که شعله به ناحیه پریدن و خاموشی کلی (قبل از اعمال امواج آکوستیکی) نزدیک نباشد. با افزایش عدد رینولدز در نسبت هم‌ارزی ثابت، طول و سطح شعله افزایش می‌یابد و طبق معادله (۴) نرخ آزادسازی حرارت افزایش خواهد یافت. لذا امواج آکوستیکی با دامنه بیشتری جهت خاموشی شعله نیاز است. همین رفتار در شعله نفوذی نیز مشاهده شده است [۱۱].

اثرات محصور شدگی

برای بحث در مورد اثرات دیواره بر پایداری آکوستیکی، شعله پیش‌آمیخته متان-هوا در نسبت هم‌ارزی ثابت ۰٫۹ مدنظر قرار گرفته شد. چهار آزمون مختلف با سه محفظه از جنس پیرکس مطابق جدول ۲، انجام شد که در آن قطر محفظه تغییر پیدا کند. نتایج آزمون پایداری آکوستیکی شعله، در شکل ۷ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش قطر محفظه، پایداری شعله در برابر امواج آکوستیکی افزایش چشمگیری دارد. یافته‌های پیشین تجربی نیز تأیید کننده این مطلب است که با کاهش قطر محفظه، لبه‌های خارجی شعله با دیواره تبادل حرارت و تکانه انجام می‌دهد؛ این مسئله سبب کاهش حساسیت شعله به نوسانات آکوستیکی شده و باعث افزایش پایداری شعله می‌شود [۲۳].

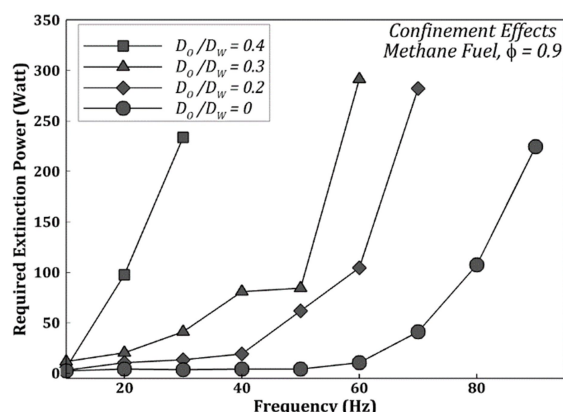


Figure 7- Effect of chamber diameter on the required acoustic extinction power for methane fuel

شکل ۷- اثر قطر محفظه بر توان آکوستیکی لازم جهت خاموشی شعله پیش‌آمیخته متان-هوا در نسبت هم‌ارزی ۰٫۹

به همین دلیل با کاهش قطر محفظه، انرژی آکوستیکی لازم برای خاموشی شعله افزایش قابل توجهی دارد. کاهش قطر محفظه سبب افزایش طول شعله و شتاب گرفتن فرآورده‌های داغ منبسط شده می‌شود [۲۴]. این اثر در شعله‌های پیچشی نیز به‌طور مشابهی پدیدار شده است. در شعله پیچشی به‌جای طول شعله، مرکز آزادسازی حرارت شعله تغییر پیدا می‌کند [۲۵].

به منظور بررسی همبستگی^۱ متغیرهای مورد مطالعه در این پژوهش، از روش اسپیرمن^۲ برای آنالیز همبستگی یکنواخت^۳ میان کمیت‌ها، استفاده شده است که نتایج آن در شکل ۸ نمایش داده شده است. اعداد موجود در هر خانه همبستگی بین دو پارامتر متقاطع را نشان می‌دهند که عدد آن بین ۱- (همبستگی معکوس) تا ۱ (همبستگی کامل) متغیر است. بیشترین ضریب همبستگی بین کمیت‌های آزمون، مربوط به وابستگی توان آکوستیکی خاموشی شعله به فرکانس امواج آکوستیکی تحریک شعله است. در تمامی نتایج مشاهده شد (مانند نمودار شکل ۷) که با افزایش فرکانس امواج آکوستیکی، توان آکوستیکی لازم برای خاموشی شعله به طور غیرخطی افزایش می‌یابد. نتیجه مهم دیگر نقشه حرارتی شکل ۸، همبستگی بین قطر محفظه و توان آکوستیکی لازم برای خاموشی شعله است. نمودار شکل ۷ نشان داد که اثر کاهش قطر محفظه بر افزایش توان آکوستیکی لازم برای خاموشی شعله به صورت غیرخطی است. عامل سومی که با توان آکوستیکی خاموشی همبستگی غیرخطی قابل توجه دارد، نسبت هم‌ارزی است. نمودار شکل ۵ اثر تغییرات نسبت هم‌ارزی بر توان آکوستیکی لازم جهت خاموشی شعله را نشان می‌دهد.

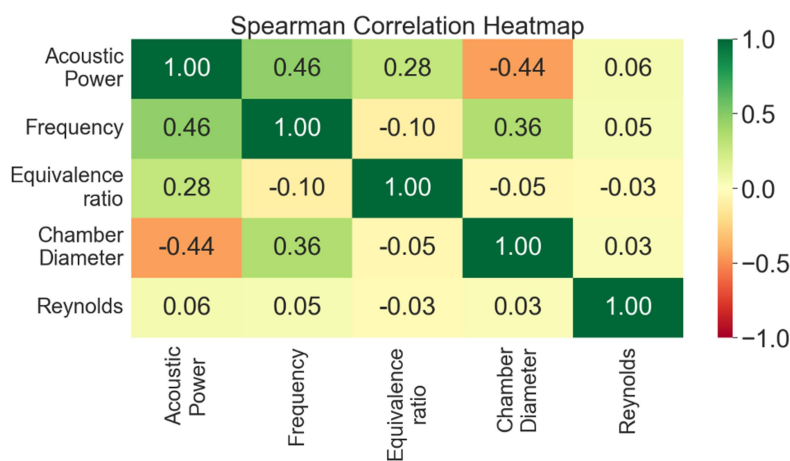


Figure 8- Spearman Correlation Heatmap
شکل ۸- نقشه حرارتی همبستگی اسپیرمن

توجه به این نکته ضروری است که بالا بودن ضریب همبستگی، در تمام موارد، به معنی ارتباط معنی‌دار بین دو کمیت فیزیکی در آزمون تجربی نیست. به طور مثال، هرچند ضریب همبستگی بین دو کمیت فرکانس امواج آکوستیکی و قطر محفظه احتراق نسبتاً زیاد است، اما این دو عامل از یکدیگر کاملاً مستقل هستند. بدین معنا که هر قطر دلخواهی از محفظه احتراق را می‌توان در هر محدوده دلخواهی از فرکانس امواج آزمون و نتایج تجربی توان آکوستیکی لازم جهت خاموشی شعله را به دست آورد.

۲. پیش‌بینی خاموشی شعله بر اساس روش SVR

در این بخش، با استفاده داده‌های تجربی که در بخش قبل به صورت سیستماتیک به دست آمده بودند، از روش رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) برای ساختن مدل پیش‌بینی خاموشی شعله استفاده شده است. ۲۰ درصد از داده‌های تجربی، بدون شرکت در فرآیند یادگیری، برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل مورد استفاده قرار گرفتند که انتخاب این داده‌ها به صورت تصادفی انجام

¹ Correlation
² Spearman
³ Monotonic

شده است. تمام داده‌ها در یک بازه‌ی فرکانسی از ۱۰ تا ۱۳۰ هرتز، نسبت هم‌ارزی بین ۰/۶ تا ۱/۲ و نسبت قطر نازل به دیواره بین ۰ تا ۰/۴ برای دو نوع سوخت، متان و پروپان، قرار دارند. در این آزمون، عدد رینولدز در محدوده ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ تغییر کرده است. اعداد رینولدز بالاتر به دلیل محدودیت‌های محرک آکوستیکی برای تولید موج‌های فشار بالا قابل آزمایش نبودند. در مدل SVR پیشنهادی، همان‌طور که گفته شد از کرنل RBF استفاده شده است. با توجه به معیارهای دقت که در جدول ۳ ارائه شده‌اند، پارامتر تنظیم^۱ در این مدل، معادل ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین با همین تحلیل، پارامتر ϵ معادل ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. این پارامتر، حاشیه‌ای از ابرصفحه است که در آن حاشیه جریماه‌ای اعمال نمی‌شود. درنهایت، دقت پیش‌بینی مدل در جدول ۳ ارائه شده است.

۱،۲ پیش‌بینی اثرات نسبت هم‌ارزی و نوع سوخت

شکل ۹ برای مقایسه‌ی عملکرد روش یادگیری برای دو نوع سوخت، متان و پروپان، در حضور دیواره‌ها و در محدوده نسبت هم‌ارزی ۰/۶ تا ۱/۲ ارائه شده است. سوخت متان، با نماد "□" (مربع) و سوخت پروپان با نماد "○" (دایره) نشان داده شده است. مجموعه آموزشی بدون رنگ است؛ در حالی که داده‌های پیش‌بینی به رنگ قرمز نشان داده شده‌اند و داده‌های آزمون، برای ارزیابی دقت، به رنگ آبی هستند. اگر محور توان آکوستیکی به دو منطقه تقسیم شود: در منطقه کمتر از ۲۵ وات، شیب نمودار برای هر دو نوع سوخت و همه نسبت‌های هم‌ارزی ثابت می‌ماند، که نشان‌دهنده رابطه خطی بین توان آکوستیکی و فرکانس است. با افزایش فرکانس و نزدیک شدن به نسبت هم‌ارزی ۱/۱، رفتار نمودار زمانی که توان آکوستیکی موردنیاز برای خاموشی شعله بیش از ۲۵ وات می‌شود، غیرخطی می‌شود. مشاهده می‌شود که دقت پیش‌بینی مدل در منطقه خطی مذکور قابل قبول است. در منطقه غیرخطی و در نزدیکی نسبت‌های هم‌ارزی به ۱/۱ (همان‌طور که در بخش ۱/۱ به‌عنوان بیشینه پایداری شعله در برابر امواج آکوستیکی ذکر شده است)، خطا در پیش‌بینی افزایش می‌یابد.

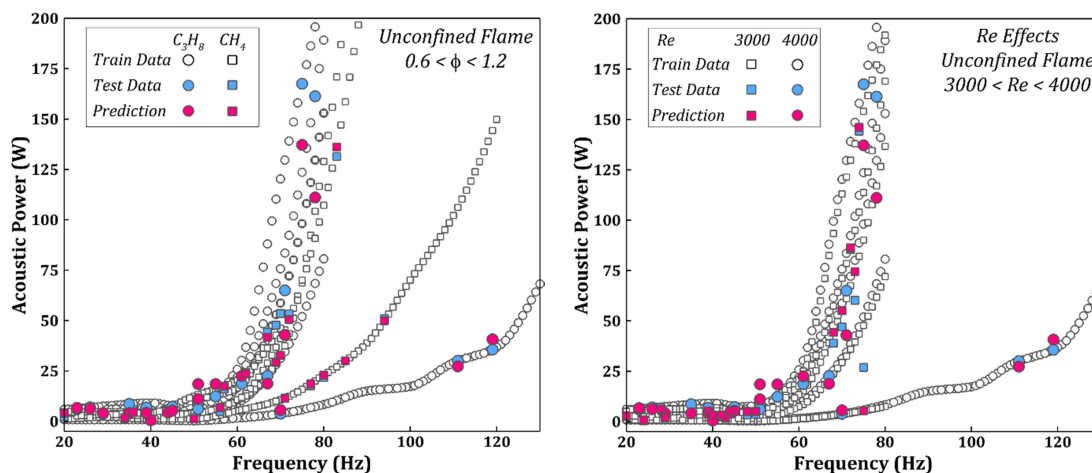


Figure 9- Train, Prediction and validation data for various Equivalence ratios (left) and Reynolds number (right)
 شکل ۹- نمایش داده‌های آموزش، آزمون و پیش‌بینی با نسبت هم‌ارزی مختلف (چپ) و اعداد رینولدز متفاوت (راست)

پیش‌بینی اثرات عدد رینولدز

پس از مدل‌سازی اثرات نسبت هم‌ارزی و نوع سوخت، تأثیر افزایش دبی واکنش‌دهنده‌ها از طریق عدد بی‌بعد رینولدز در مدل لحاظ شده است. برای دستیابی به این هدف، در مدل شعله بدون دیواره و در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ تا ۱/۲، در محدوده فرکانس

¹ Regularization Parameter

۲۰ تا ۱۳۰ هرتز، عدد رینولدز سوخت بین ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ متغیر بود. در بخش ۳/۱، مشاهده شد که توان موردنیاز برای خاموشی شعله با افزایش عدد رینولدز افزایش خواهد یافت. نتایج در شکل ۹ ارائه شده است. عدد رینولدز ۳۰۰۰ با نماد "□" (مربع) و ۴۰۰۰ با نماد "○" (دایره) نشان داده شده است. مجموعه آموزشی بدون رنگ است، در حالی که داده‌های پیش‌بینی به رنگ قرمز نشان داده شده‌اند و داده‌های آزمون، برای ارزیابی دقت، به رنگ آبی است. نسبت به سایر پارامترها، عدد رینولدز در این محدوده تأثیر کمتری بر توان آکوستیکی موردنیاز برای خاموشی شعله دارد. در این نمودار، مانند منطقه غیرخطی و در نزدیکی نسبت‌های هم‌ارزی ۱/۱، خطای پیش‌بینی افزایش یافته است. در بخش بعد نتایج تجزیه و تحلیل خطا به صورت کمی بررسی خواهد شد.

پیش‌بینی اثرات محدودیت دیواره

آخرین متغیر مورد بحث در مدل پیش‌بینی خاموشی شعله آکوستیکی، در نظر گرفتن محدودیت شعله با دیواره‌ی محفظه است. برای تعمیم‌پذیری نتایج و مستقل کردن آن نسبت به هندسه آزمون، قطر محفظه نسبت به قطر نازل سوخت بی‌بعد شده است. شکل ۱۰ نتایج نسبت‌های مختلف قطر دیواره را برای متان به عنوان سوخت نشان می‌دهد. بازه‌ی بی‌بعد در نظر گرفته شده برای تغییرات قطر دیواره از ۰ تا ۰/۴ متغیر است و تمام طیف نسبت‌های هم‌ارزی و فرکانس‌ها را پوشش می‌دهد. مطابق با بخش‌های قبلی، نمادها و رنگ‌ها برای نقاط آموزشی، پیش‌بینی و آزمون تعریف شده‌اند. باید توجه نمود که افزایش نقاط آموزشی با کاهش خطای پیش‌بینی مدل همراه است که در ناحیه خطی و غیرخطی توان آکوستیکی برای خاموشی شعله نشان داده شده است. باید در نظر گرفت که اثر دیواره‌ی محفظه، یک پارامتر اساسی در پیش‌بینی خاموشی شعله است و بدون در نظر گرفتن آن، امکان برقراری ارتباط بین مطالعات تجربی و کاربردهای صنعتی وجود ندارد. جدول ۳، بررسی کمی از دقت مدل تحت شرایط مختلف را ارائه کرده است. تفاوت بین مقادیر واقعی و پاسخ پیش‌بینی شده از مدل آموزش با استفاده از معیارهای R -Squared (R^2) و خطای میانگین مربعات ریشه (RMSE) اندازه‌گیری می‌شود.

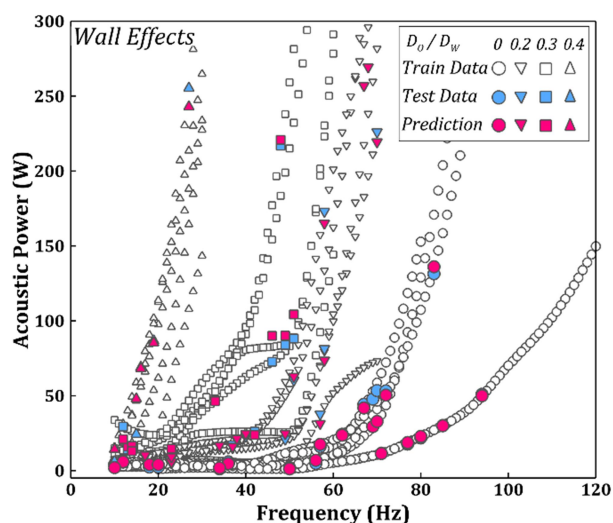


Figure 10- Train, Prediction and validation data for various chamber diameter
 شکل ۱۰- نمایش داده‌های آموزشی، آزمون و پیش‌بینی با قطر دیواره‌های مختلف

معمولاً مقدار پایین‌تر RMSE دقت پیش‌بینی بالاتری را نشان می‌دهد. با این حال، به دلیل مقیاس‌های متفاوت متغیرها، امکان مقایسه RMSE‌های آن‌ها وجود ندارد. به عبارت دیگر، ضریب تعیین (R^2) که مقادیر بین ۰ تا ۱ دارد، برای ارزیابی دقت

پیش‌بینی بین ویژگی‌های پیش‌بینی شده با مقیاس‌های مختلف، درک بهتری از دقت مدل را ارائه می‌دهد. مقدار نزدیک به ۱ در معیار R^2 نشان‌دهنده عملکرد بهتر در این مورد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر این معیار در مسئله‌ی حاضر، نشان‌دهنده‌ی دقت بالای روش رگرسیون بردار پشتیبان است.

جدول ۳- مقایسه دقت مدل آموزش داده شده تحت شرایط مختلف

Table 3- Comparison of the trained model performance under different conditions

Test Details	RMSE	R^2
Methane, $D_{wall} = 6.5$ cm	20.101	0.911
Methane, $D_{wall} = 8.5$ cm	19.272	0.950
Methane, $D_{wall} = 10.5$ cm	12.226	0.968
Methane, Unconfined	14.746	0.938
Propane, $Re = 3000$	11.373	0.877
Propane, $Re = 4000$	19.953	0.830

از مزایای روش رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) می‌توان به مواردی اشاره کرد که شامل مقاومت در برابر داده‌های نویزی، به‌روزرسانی آسان مدل تصمیم و دقت پیش‌بینی بالا است. علاوه بر این، پیاده‌سازی آن ساده است. با این حال، استفاده از این روش معایبی نیز دارد، از جمله عملکرد ضعیف زمانی که تعداد ویژگی‌ها بیشتر از تعداد نمونه‌های داده‌ی آموزشی باشد و عملکرد نامناسب در مواجهه با مجموعه داده‌های نویزی و دسته داده‌های خروجی که دارای همپوشانی هستند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از روش کلاسیک طراحی آزمایش‌ها، از یک رویکرد سیستماتیک برای به دست آوردن مقادیر توان آکوستیکی در خاموشی شعله با استفاده از پارامترهای آزمایشی مختلف مانند فرکانس، قطر دیواره، عدد رینولدز، نوع سوخت و نسبت هم‌ارزی استفاده شد. نتایج تجربی با سوخت متان و پروپان نشان داد که در نزدیکی نسبت هم‌ارزی ۱/۱، سرعت شعله و آنتالپی فرآورده‌ها کمترین حساسیت را به تغییرات نسبت هم‌ارزی نشان می‌دهد و در نتیجه، شعله بیشترین پایداری را در برابر امواج آکوستیکی دارد. قطر دیواره محفظه عامل بسیار مهمی در میرایی و جذب اغتشاشات آکوستیکی سطح شعله دارد و می‌تواند پایداری شعله در برابر امواج آکوستیکی را افزایش چشمگیری دهد. مجموعه نتایج آزمایش به‌صورت دسته‌بندی شده به یک مدل یادگیری ماشین داده شد، تا ابزاری جهت پیش‌بینی خاموشی آکوستیکی شعله به‌وجود آید. برای این منظور، مقادیر ورودی از آزمایش‌های تجربی برای آموزش مدل یادگیری ماشین رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) استفاده شد. ۸۰٪ از این داده به‌عنوان داده آموزشی و بقیه برای ارزشیابی دقت مدل استفاده شدند. در صورتی که منحنی توان آکوستیکی موردنیاز برای خاموشی شعله برحسب فرکانس به دو ناحیه خطی (کمتر از ۲۵ وات) و غیرخطی (بیش از ۲۵ وات) تقسیم شود، دقت مد در ناحیه خطی بسیار بالاست. اما با افزایش میزان غیرخطی بودن عوامل اثرگذار، به‌خصوص نسبت هم‌ارزی و قطر دیواره محفظه، خطای پیش‌بینی مدل افزایش می‌یابد.

هرچند مدل پیشنهادی توانایی پیش‌بینی خاموشی آکوستیکی شعله‌های مقیاس آزمایشگاهی در شرایط ساکن را نشان می‌دهد، اما هنوز در مسائل مربوط به شعله‌های آشفته‌ی صنعتی در توربین‌های گازی و موتورهای توربینی، ناکارآمد است. برای افزایش پایداری مدل، تحقیقات آینده باید عواملی مانند آشفته‌گی در جریان‌های با عدد رینولدز بالا، تبخیر قطرات در مشعل‌های سوخت مایع و شرایط فشار بالا در محفظه‌های صنعتی را در نظر بگیرند. پرداختن به این جنبه‌ها در آموزش مدل توسعه یافته، به درک جامع‌تر و قابلیت اجرای بیشتر در پیش‌بینی خاموشی آکوستیکی در مشعل‌های صنعتی، کمک خواهد کرد.

مشارکت نویسندگان

- اختردانش: ایده پردازی، جمع آوری داده، آنالیز، تأمین تجهیزات آزمون، آشکارسازی نتایج، آزمایشگاه تجربی، نگارش
- پیش نویس اصلی، بازنگری و ویرایش؛ علی پور: ایده پردازی، آنالیز، آشکارسازی نتایج، پیاده سازی یادگیری ماشین، نگارش
- پیش نویس اصلی، بازنگری و ویرایش؛ ملائک: ایده پردازی، آنالیز، نظارت و راهنمایی، نگارش - بازنگری و ویرایش.

تضاد منافع

نویسندگان این مقاله هرگونه تضاد مالی یا ارتباطات شخصی که بر نتایج این پژوهش تأثیر بگذارد را رد می کنند.

منابع

- [1] R. Zong, R. Kang, C. Liu, Z. Zhang, and Y. Zhi, "Analysis of Flame Extinguishment and Height in Low Frequency Acoustically Excited Methane Jet Diffusion Flame," *Microgravity Sci. Technol.*, vol. 30, no. 3, pp. 237–242, 2018.
- [2] T. C. Lieuwen and F. K. Lu, *Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling*, Edited by. Atlanta, Georgia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [3] S. H. Chung, D. H. Chung, C. Fu, and P. Cho, "Local extinction Karlovitz number for premixed flames," *Combust. Flame*, vol. 106, no. 4, pp. 515–520, 1996.
- [4] M. Ahn, D. Lim, T. Kim, and Y. Yoon, "Pinch-off process of Burke–Schumann flame under acoustic excitation," *Combust. Flame*, vol. 231, p. 111478, 2021.
- [5] M. Ahn, Y. Yoon, and S. Joo, "Effects of acoustic excitation on pinch-off flame structure and NO_x emissions in H₂/CH₄ flame," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 26, pp. 13178–13190, 2022.
- [6] K. Takita, H. Yamazaki, T. Uchida, and G. Masuya, "Extinction Karlovitz numbers of premixed counterflow flames under various pressures," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 178, no. 9, pp. 1649–1668, 2006.
- [7] A. Potnis, V. R. Unni, H. G. Im, and A. Saha, "Extinction of non-equidiffusive premixed flames with oscillating strain rates," *Combust. Flame*, vol. 234, p. 111617, 2021.
- [8] H. G. Pearlman and S. H. Sohrab, "Extinction of Counterflow Premixed Flames Under Periodic Variation of the Rate of Stretch," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 105, no. 1–3, pp. 19–31, 1995.
- [9] C. Xiong, Y. Liu, H. Fan, X. Huang, and Y. Nakamura, "Fluctuation and extinction of laminar diffusion flame induced by external acoustic wave and source," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–12, 2021.
- [10] C. Sohn and S. Chung, "Effect of pressure on the extinction, acoustic pressure response, and NO formation in diluted hydrogen–air diffusion flames," *Combust. Flame*, vol. 121, no. 1–2, pp. 288–300, Apr 2000.
- [11] P. Niegodajew et al., "Application of acoustic oscillations in quenching of gas burner flame," *Combust. Flame*, vol. 194, pp. 245–249, 2018.
- [12] Y. S. Taspinar, M. Koklu, and M. Altin, "Classification of flame extinction based on acoustic oscillations using artificial intelligence methods," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 28, no. September, p. 101561, 2021.
- [13] M. A. Akhtardanesh, M. Khadem Alrezaeian, and M. Farshchi, "A Comparison between Methane and Propane Counterflow flame Acoustic Excitation in the Partially Premixed Regime," in *20th Fluid Dynamics Conference*, Tehran: the physics society of Iran, 2023.
- [14] M. A. Akhtardanesh, M. J. Hosseinkhani, and M. Farshchi, "Acoustic Extinction of Partially Premixed Counterflow flame," *J. Engine Res.*, vol. 70, no. 3, pp. 39–52, 2023.
- [15] M. A. Akhtardanesh, M. Khadem Alrezaeian, and M. Farshchi, "Interaction of acoustic waves with a laminar counterflow flame," in *9th National Conference of Acoustical Society of Iran*, Tehran: Acoustical Society of Iran, 2023.
- [16] M. A. Akhtardanesh, M. Khadem Alrezaeian, M. J. Hosseinkhani, and M. Farshchi, "An experimental study on Bunsen flame acoustic extinction," in *the 21st International Conference of Iranian Aerospace Association*, Tehran, 2022.
- [17] H. Drucker, C. J. C. Surges, L. Kaufman, A. Smola, and V. Vapnik, "Support vector regression machines," *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, no. January, pp. 155–161, 1997.
- [18] Y. Sun et al., "The local extinction and the nonlinear behaviors of a premixed methane/air flame under low-frequency acoustic excitation," *Mod. Phys. Lett. B*, vol. 34, no. 13, pp. 1–21, 2020.
- [19] D. Montgomery and C. St, *Design and Analysis of Experiments*, 9th Edition, Nineth. John Wiley & Sons, Inc, 2017.
- [20] H. Drucker, C. J. C. Surges, L. Kaufman, A. Smola, and V. Vapnik, "Support vector regression machines," *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, no. January, pp. 155–161, 1997.
- [21] Shreekrishna, S. Hemchandra, and T. Lieuwen, "Premixed flame response to equivalence ratio perturbations," *Combust. Theory Model.*, vol. 14, no. 5, pp. 681–714, 2010.
- [22] S. H. Preetham and T. C. Lieuwen, "Response of turbulent premixed flames to harmonic acoustic forcing," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 31, no. 1, pp. 1427–1434, Jan 2007.

- [23] A. L. Birbaud, D. Durox, S. Ducruix, and S. Candel, "Dynamics of confined premixed flames submitted to upstream acoustic modulations," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 31, no. 1, pp. 1257–1265, Jan 2007.
- [24] A. Cuquel, D. Durox, and T. Schuller, "Scaling the flame transfer function of confined premixed conical flames," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 34, no. 1, pp. 1007–1014, Jan 2013.
- [25] A. J. De Rosa, S. J. Peluso, B. D. Quay, and D. A. Santavicca, "The Effect of Confinement on the Structure and Dynamic Response of Lean-Premixed, Swirl-Stabilized Flames," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 138, no. 6, pp. 1–10, 2016.

English Abstract

Application of Machine Learning to Bring Efficiency to Costly Experiments: Case of Flame-Extinction

Mohammad Ali Akhtardnesh¹, Ensieh Alipour², Seyed Mohammad Bagher Malaek^{3*}

1- Aerospace Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, mohammadali.akhtardnesh@ae.sharif.edu

2- Aerospace Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, alipour.ensieh@ae.sharif.edu

3- Aerospace Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, malaek@sharif.edu

*Corresponding author

(Received: 2024/04/09, Received in revised form: 2024/08/15, Accepted: 2024/08/19)

Combustion instability induced by acoustic waves can lead to various undesired consequences, including thermal stress on the combustion chamber, noise, flame blow-off, flashback, vibrations, and even explosions. This paper employs the Design of Experiments approach to systematically gather reliable experimental data for predicting flame extinction. Considering the substantial cost of pure reaction gases and the potential damage to the acoustic driver under high-pressure conditions, it is imperative to intelligently select extinction test points. Machine learning methods are employed to determine optimal acoustic power levels for these values. The acoustic power required at the moment of extinction is a crucial metric in understanding this phenomenon. Four key features - frequency, equivalence ratio, wall diameter ratio, and Reynolds number - serve as inputs for a machine learning (ML) model. The collected data is utilized to train a selected supervised ML model, specifically the Support Vector Regression (SVR), to accurately predict the acoustic power level required for flame extinction in both methane and propane fuels. Evaluation using the R-squared metric demonstrates the model's accuracy and robust performance across diverse conditions.

Keywords: Combustion Instability; Extinction; Acoustic; Machine Learning; SVR.