



# ISAV2022

## دوازدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات

۲۳ و ۲۴ آذر ماه ۱۴۰۱ تهران - ایران



### بررسی عملکرد میراکننده‌ها بر کاهش شدت سرج در کمپرسور گریزازمرکز

روژیار غلامی شوربلاغی<sup>آ</sup>، زهرا شاه‌حسینی<sup>ب</sup>، آرمان محسنی<sup>ج\*</sup>

ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، کد پستی ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱

<sup>آ</sup> کارشناس ارشد، <sup>ب</sup> دانشجوی دکتری، <sup>ج</sup> استادیار

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [ar\\_mohseni@sbu.ac.ir](mailto:ar_mohseni@sbu.ac.ir)

#### چکیده

واماندگی و سرج در کمپرسورهای دینامیک یک پدیده گذرا و مخرب است که بروز آن می‌تواند به توقف کارکرد و تولید منجر شود. این ناپایداری‌ها با تولید امواج فشاری و صوتی همراهند. بنابراین آگاهی از نحوه شکل‌گیری و انتشار امواج فشاری و صوتی در کمپرسور می‌تواند به شناخت و تشخیص عوامل ناپایداری کمپرسور کمک کند. بدنبال تشکیل واماندگی، مجرای پایین‌دست تحت تاثیر امواج فشاری ناشی از جدایش جریان بر پره قرار می‌گیرد. در اثر بازتاب و تداخل این امواج و ایجاد تشدید، دامنه آنها افزایش می‌یابند که می‌تواند منجر به شکل‌گیری سرج شود. در این مقاله با بررسی میدان‌های فشار و انتشار صوت متناظر با ناپایداری سرج، تاثیر سه میراکننده هلمهلتز با آرایش چهارتایی، محفظه انبساط و موج‌شکن بر کاهش شدت سرج بررسی می‌شود. این مطالعه نشان می‌دهد وجود میراکننده در مجرای پایین‌دست کمپرسور در کاهش شدت سرج موثر است و امواج فشاری و نویز ایجاد شده را تضعیف می‌کند. میراکننده هلمهلتز دارای بیشترین تاثیر است و پس از آن موج‌شکن و محفظه انبساط برای میراسازی مناسب هستند و به این ترتیب باعث به تاخیر افتادن شروع سرج می‌شوند.

**کلمات کلیدی:** کمپرسور گریزازمرکز؛ سرج؛ میراکننده؛ پلنم؛ میراکننده هلمهلتز.

## ۱- مقدمه

ناپایداری‌های واماندگی<sup>۱</sup> و سرج<sup>۲</sup> کمپرسورهای گریزازمرکز از خصوصیات بارز این دسته از ماشین‌های دوار است که دامنه عملکرد آن را در هر سرعت دورانی به یک کمینه دبی محدود می‌کند. بروز واماندگی کاهش عملکرد دستگاه را به دنبال دارد و می‌تواند منجر به سرج کمپرسور شود. تغییرات فشار و اندازه حرکت جریان سیال در هنگام بروز سرج باعث اعمال بار دینامیکی قابل توجه به اجزای ثابت و متحرک کمپرسور می‌شود و می‌تواند منجر به خرابی آنها و توقف تولید گردد.

واماندگی از دسته پدیده‌های دینامیکی و متغیر با زمانست که در اثر آن امواج فشاری در سیال رخ می‌دهد. بروز تشدید در طی برهمکنش این امواج می‌تواند منجر به ایجاد سرج شود. علاوه بر خصوصیات سیال و امواج (شامل دامنه و فرکانس)، بروز تشدید وابسته به شکل هندسی مجرای جریان سیال به خصوص در پایین دست کمپرسور است. به صورت معمول، مجرای پایین دست کمپرسور از یک مسیر مستقیم لوله با نام پلنم<sup>۳</sup> تشکیل می‌شود که شیر و دیگر تجهیزات خروجی کمپرسور بر آن نصب می‌شود. در هنگام کارکرد معمول کمپرسور، بسته شدن شیر خروجی کاهش دبی جرمی سیال و تغییر هندسی مجرای جریان را باعث می‌شود. البته تغییر شرایط جریان و شکل هندسی مجرا، به شکل‌های دیگر نیز امکانپذیر است. به ازای بروز این تغییرات، میدان امواج فشاری در پلنم دستخوش تغییر شده که می‌تواند منجر به بروز تشدید در امواج فشاری و تشکیل سرج شود.

تغییر میدان امواج فشاری در محدوده یا در هنگام بروز واماندگی و سرج، تغییر میدان آکوستیکی پایین دست کمپرسور را به همراه دارد. بنابراین، بررسی همزمان دینامیک سیال و میدان صوت پایین دست کمپرسور می‌تواند به تشخیص واماندگی و سرج و همچنین شناخت آنها کمک کند. این تغییر باعث ایجاد صدای ناخواسته یا نویز در کمپرسور می‌شود، که بخصوص در توربوشارژر<sup>۴</sup> خودرو دارای اهمیت است.

وینزل [۱] تولید نویز صوتی در کمپرسور توربوشارژر را به‌ویژه در شرایط عملیاتی طراحی کمپرسور در مقادیر کم جریان جرمی یک چالش مهم می‌داند. در چنین شرایطی، صدای موتور کاهش می‌یابد و صدای توربوشارژر به‌طور مشخص قابل شنیدن است. بر این اساس مطالعه روندهای تولید نویز صوتی در کمپرسورهای گریزازمرکز با هدف بهینه‌سازی و یافتن راهکار جدید جهت کاهش نویز دارای اهمیت است.

سرج یک پدیده ناپایداری آیرودینامیکی نامطلوب برای کمپرسورهای دینامیک مانند کمپرسورهای گریزازمرکز است. از آنجا که این ناپایداری از نوسان‌های فشاری تشکیل شده، همراه با صوت در پایین دست و بالادست کمپرسور نشر می‌یابد. تولید نوسانات فشاری و صدای ناشی از آن از روی پرها آغاز می‌شود و در پایین دست با تشدید صوتی همراه می‌شود. مشخصه‌های آیرودینامیکی و آیروآکوستیکی یک کمپرسور گریزازمرکز در مطالعات تجربی و عددی گویلو، سانداشترام و زمیلیش [۲، ۳، ۴] مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی ارتباط توزیع فشار و موج منتشر شده گویای آن است که در هنگام بروز ناپایداری‌های واماندگی و سرج، نوسانات موج فشار مشخصه‌های صوتی را شکل می‌دهد. سانداشترام نشان می‌دهد که سرج ناشی از یک موج ایستاده<sup>۵</sup> در مجرای خروجی کمپرسور است که ناشی از نوسان‌های فشاری منتشر شده از واماندگی دورانی و تشدید آن در پایین دست کمپرسور است [۵].

اثرات مخرب سرج بر عملکرد ماشین، مطالعه روش‌های جلوگیری و کم کردن شدت آن مانند استفاده از میرایی و ایجاد تاخیر در بروز سرج را ضروری می‌سازد. در مطالعات بسیاری، انتشار موج با استفاده از تغییر هندسی مجرای جریان کاهش یافته و از شدت آن کاسته می‌شود. مطالعه موج ایستاده در داخل لوله توسط مکید [۶] نشان می‌دهد استفاده از میراکننده هلمهلتز<sup>۶</sup> در چیدمان‌های تک، دوتایی و چهارتایی تاثیر قابل توجهی در استهلاک موج فشاری دارد. این بررسی نشان می‌دهد که بهترین آرایش و هندسه میراکننده هلمهلتز، آرایش چهارتایی با شکل استوانه‌ای است که بیشترین تاثیر در میراسازی موج را به همراه دارد. افزایش تعداد میراکننده از یک به چهار، افزایش میزان استهلاک انرژی موج را به همراه دارد. علاوه بر میراکننده هلمهلتز، تغییرات هندسی مجرای خروجی کمپرسور به شکل‌های مختلف می‌تواند در کنترل و به تاخیر انداختن سرج نقش داشته باشد.

<sup>1</sup> stall

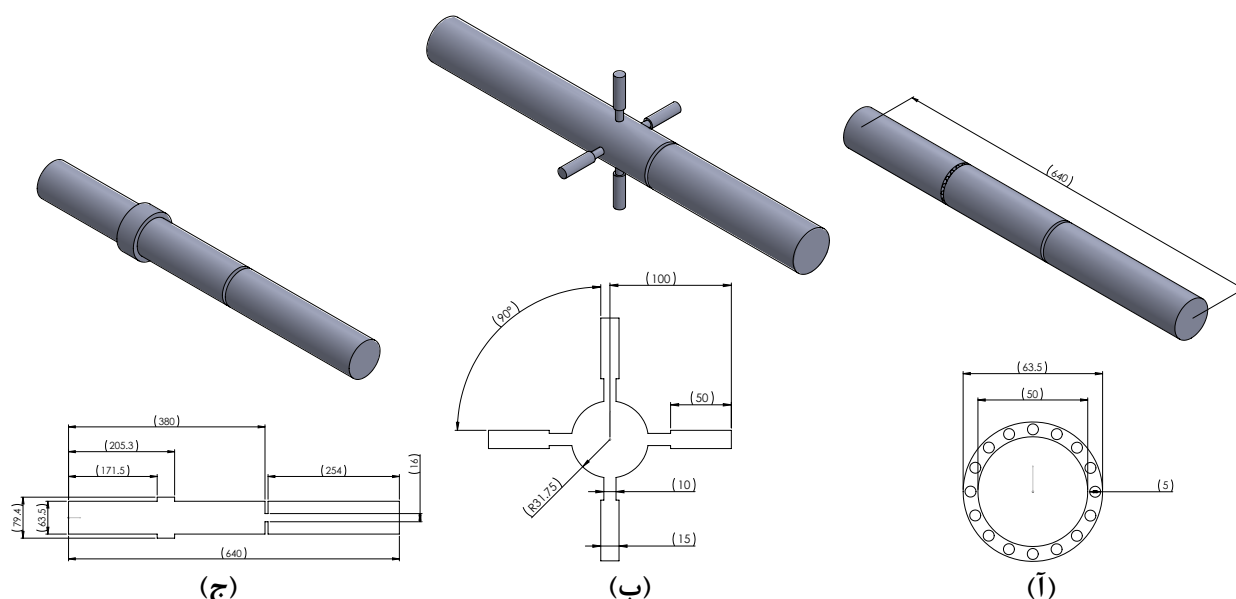
<sup>2</sup> surge

<sup>3</sup> plenum

<sup>4</sup> turbocharger

<sup>5</sup> standing wave

<sup>6</sup> Helmholtz



شکل ۱: شکل هندسی و ابعاد میراسازی ناپایداری سرچ. (آ) موج شکن، (ب) هلمهلتز و (ج) محفظه انبساط.

آنچه که در تحقیقات گذشته کمتر دیده می شود، روش های کاهش یا رفع سرچ با تمرکز بر دینامیک امواج فشاری و صوتی در مجرای خروجی کمپرسور گریز مرکز است. هدف پژوهش حاضر، بررسی عددی تاثیر نصب سه میراکننده امواج در مجرای خروجی کمپرسور شامل میراکننده هلمهلتز، محفظه انبساط و موج شکن بر کاهش شدت سرچ در مجرای پایین دست کمپرسور است.

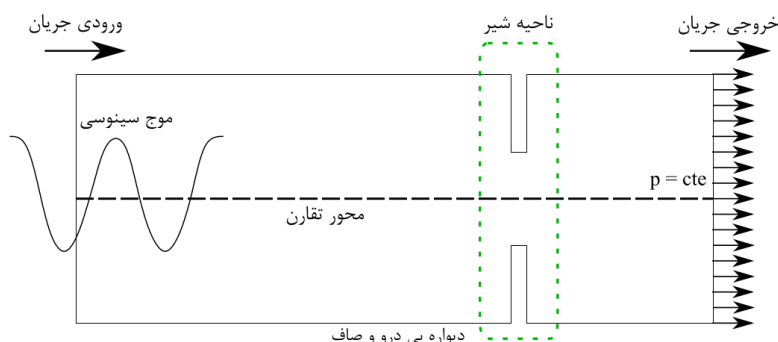
## ۲- میراکننده ها و بررسی ساختاری آنها

به منظور انجام مقایسه، شکل هندسی مجرای پایین دست کمپرسور در تحقیق حاضر مشابه با مجرای مورد استفاده در تحقیقات گذشته اختیار شده است [۲، ۷، ۸]. برای شکل گیری سرچ، یک شیر در مجرای خروجی قرار دارد که با بسته شدن آن کاهش دبی، بازتابش موج فشار و تشکیل سرچ صورت می پذیرد. این شیر در همه کمپرسوهای صنعتی در پایین دست کمپرسور نصب می شود و در هنگام کار کمپرسور کاملا باز است. طول مجرای پس از شیر، چهار برابر قطر لوله خروجی است. جهت بررسی میراسازی اثر سرچ، سه مدل میراکننده شامل میراکننده هلمهلتز، محفظه انبساط و موج شکن مطابق شکل (۱) مورد بررسی قرار می گیرند.

میراکننده موج شکن از یک صفحه فلزی گرد با سوراخ های یکسان در نزدیکی محیط آن تشکیل شده است. امواج فشار در بخش داخلی جریان با برخورد به صفحه مرکزی میراکننده متوقف و بازتابش می شوند و تنها بخشی از آن از سوراخ های محیطی عبور کرده که ضمن تضعیف شدت موج بازتابیده از صفحه مرکزی میراکننده، امواج تضعیف شده را از خود عبور می دهد.

طراحی میراکننده هلمهلتز با استفاده از پارامترهای اصلی و روند طراحی ارائه شده توسط بایکوف [۹] انجام شده و بر اساس مطالعه های بایکوف [۹] و بورکاد [۱۰] از نوع استوانه ای انتخاب شده است. جهت تعیین مکان نصب آن در طول لوله خروجی، پس از شبیه سازی سرچ بدون میراکننده، محل بیشینه چگالی توان طیفی به عنوان محل نصب میراکننده هلمهلتز در طول لوله خروجی تعیین شده است و برای افزایش کارایی آن چهار میراکننده در این محل نصب شده است.

محفظه انبساط بر اساس مطالعات دیویس [۱۱] طراحی شده است و دارای ساختاری ساده و کم هزینه است. این میراکننده با افزایش حجمی فضایی که از یک تغییر قطر یکباره بدست می آید تضعیف و میرایی نسبی امواج فشار را باعث می شود.



شکل ۲: شکل ساده شده پلنم، شیر خروجی و شرطهای مرزی

### ۳- بررسی تشکیل و میراسازی سرج با شبیه‌سازی عددی جریان

برای شبیه‌سازی عددی، از روش حجم محدود با تقریب متوسط رینولدز URANS<sup>۷</sup> و مدل آشفتگی SST  $k-\omega$  برای سیال تراکم‌پذیر استفاده شده است. شدت و مقیاس طول آشفتگی با استفاده از تحقیق سانداسترام [۵] تعیین گردیده است. شکل (۲) شکل ساده شده پلنم (مجرای پایین‌دست کمپرسور)، شیر خروجی به همراه شرطهای مرزی را ارائه می‌کند. با اعمال شرط مرزی مناسب در ورودی پلنم، شبیه‌سازی جریان مستقل از کمپرسور امکانپذیر شده و محدود به مجرای خروجی شده است. همچنین شرط مرزی خروجی به گونه‌ای است که بازتابش امواج به بالادست آن صورت نگیرد. شرط مرزی دیواره داخلی مجرای جریان، شرط دیواره صاف و بی‌درو است که برخلاف مرز ورودی و خروجی، بازتاب‌کننده امواج فشاری نیز است. با توجه به تقارن محوری متوسط جریان، با صرف نظر از ساختارهای گردابی جریان مغشوش، شبیه‌سازی جریان به منظور کاهش هزینه محاسباتی در یک قطاع انجام شده است. همچنین، شیر خروجی به صورت یک آرپیس<sup>۸</sup> هم‌مرکز مدل شده است. در مرز ورودی یک موج فشار سینوسی برگرفته از نوسانات فشار در خروجی کمپرسور که در زمان واماندگی دورانی رخ می‌دهد، میدان ارتعاشی فشار ورودی به پلنم را شبیه‌سازی می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$p = \bar{p} + a \sin(\omega t) \quad (۱)$$

در این معادله که رفتار واماندگی دورانی کمپرسور در خروجی آن را تقریب می‌کند،  $a$  دامنه‌ی نوسان،  $\omega$  فرکانس گذر پره پروانه و  $\bar{p}$  فشار استاتیک متوسط جریان است.

### ۴- نتایج

دو دسته شبیه‌سازی عددی ناپایداری سرج در مجرای پایین‌دست کمپرسور گریزازمرکز انجام شده است. در دسته اول با تغییر میزان بسته بودن شیر، تاثیر دبی بر ناپایداری کمپرسور مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از اطلاعات بدست آمده در این مرحله، دسته دوم شبیه‌سازی به مطالعه تاثیر میراکننده‌ها اختصاص یافته است.

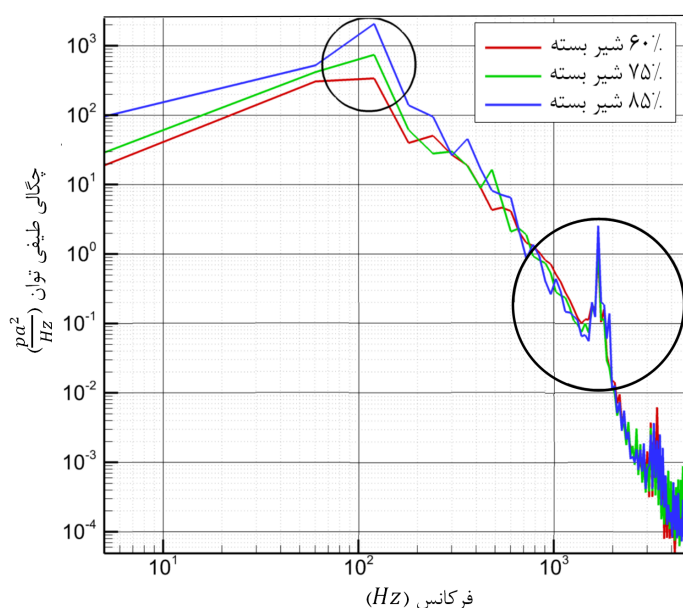
نوساناتی که در زمان واماندگی رخ می‌دهند، در اثر ایجاد تشدید در مجرای پایین‌دست کمپرسور باعث افزایش دامنه موج فشار می‌شوند و پدیده سرج را شکل می‌دهند. این پدیده پس از شکل‌گیری، به صورت یک موج ایستا<sup>۹</sup> و با الگوی خاص توزیع فشار در طول لوله دیده می‌شود. وقوع این پدیده به موقعیت شیر و میزان دبی خروجی وابسته است. بررسی اثر میزان بسته بودن شیر بر موج فشاری تولید شده در سه وضعیت شیر در ۶۰، ۷۵ و ۸۰ درصد بسته بودن، مطالعه شده است و چگالی طیفی توان نوسانات فشار متناظر با آن در شکل (۳) نمایش داده شده است. مطابق این نمودار، برای وقوع سرج باید شیر دست‌کم به اندازه ۷۵٪ بسته شده باشد و با بسته شدن بیش از این مقدار، ناپایداری کمپرسور تبدیل به سرج عمیق<sup>۱۰</sup> می‌شود.

<sup>۷</sup>URANS: Unsteady Reynolds Averaged Navier–Stokes

<sup>۸</sup>Orifice

<sup>۹</sup>Standing Wave

<sup>۱۰</sup>Deep Surge



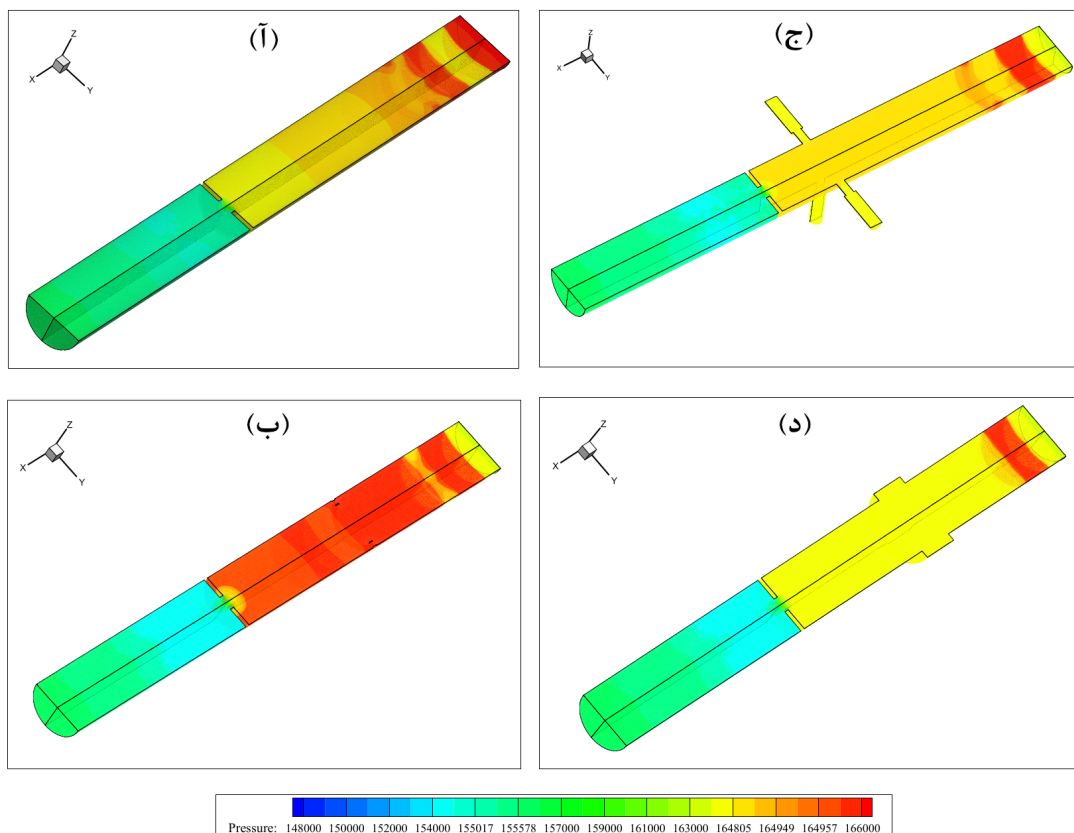
شکل ۳: تاثیر موقعیت شیر بر نوسانات فشاری ناپایداری کمپرسور گریزازمرکز

شکل (۴) خطهای تراز فشار در حالت پایه بدون میراکننده، شکل (آ)، و با سه میراکننده موج‌شکن، هلمهلتز و محفظه انبساط مورد بررسی را نشان می‌دهد. در شکل (ب) مشاهده می‌گردد که موج فشار در مواجه شدن با موج‌شکن دچار کاهش انرژی گشته و بخشی از آن به بالادست بازمی‌تابد. بنابراین نسبت به حالت (آ) میزان بازتابش موج به بالادست میراکننده بیشتر است. مطالعه میراکننده هلمهلتز نشان می‌دهد که موج به داخل محفظه میراکننده وارد شده و انرژی آن مستهلک می‌شود. بخش (د) شکل (۴) نشان می‌دهد فشار در عبور از محفظه انبساط دچار کاهش قدرت شده و از اثر موج ناشی از ناپایداری سرچ کاسته می‌شود. این تغییر در دامنه و فرکانس موج فشار منتشر شده نیز آشکار است.

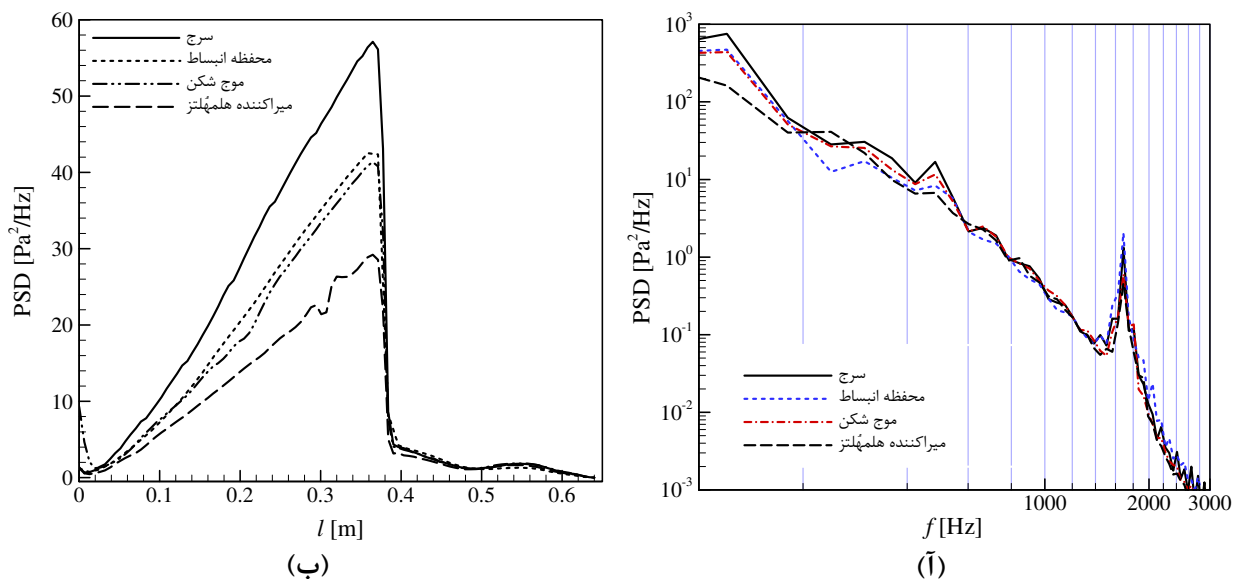
چگالی طیفی توان سیگنال آکوستیکی یک ابزار مناسب برای نشان دادن ناپایداری سرچ است، چراکه سرچ حاصل از برهمکنش فرکانس‌های مختلف است. در مطالعات گویلو و سانداشترام [۲، ۳] مشخص شد که از نظر آکوستیکی، سرچ با تشدید در رفتار صوتی تشکیل می‌شود. بنابراین تشخیص ناپایداری سرچ و تغییرات آن به خوبی در نمودار چگالی طیفی توان و همچنین سطح فشار صوت<sup>۱۱</sup> قابل ردیابی و مطالعه است. شکل (۵) قسمت (آ) و (ب) به ترتیب چگالی طیفی توان نوسانات فشار را برحسب فرکانس و موقعیت مکانی نشان می‌دهند. نتایج مطالعه چگالی طیفی توان چنین نشان می‌دهد که اولین تشدید که قوی‌ترین تشدید و شکل‌دهنده‌ی سرچ است در فرکانس ۱۲۰ هرتز اتفاق می‌افتد. سپس سه هارمونیک این فرکانس در فرکانس‌های بالاتر رخ می‌دهد. شکل (۵) ب) نشان‌دهنده موقعیت تشدید موج فشاری است. مشاهده می‌شود که تشدید در نزدیکی شیر رخ می‌دهد که علت آن بازتاب موج و رشد دامنه است. این موضوع را می‌توان به خوبی در شکل (۶) مشاهده کرد. در همه حالاتها بیشترین مقدار شدت نوسانات صوتی در نزدیکی شیر اتفاق می‌افتد. این شکل علاوه بر این که نشان‌دهنده موقعیت بیشترین شدت است، تاثیر هر یک از میراکننده‌ها نسبت به حالت پایه (بدون میراکننده) را نشان می‌دهد. کمترین شدت فشار در اثر میراسازی هلمهلتز رخ داده است. پس از آن به ترتیب بیشترین اثر میرایی به موج‌شکن و محفظه انبساط تعلق دارد.

صدای همراه با ناپایداری کمپرسور گریزازمرکز می‌تواند جهت تشخیص نوع ناپایداری به کار رود. بر این اساس شکل‌های (۷) و (۸) تغییرات سطح فشار صوت در هنگام سرچ در حالت‌های پایه و با میراکننده‌ها را نشان می‌دهد. در شکل (۷) در محل قرارگیری میراکننده‌ها نوساناتی وجود دارد که نشان‌دهنده تغییر رفتار فرکانسی جریان در هنگام سرچ است. شکل (۸) نشان‌دهنده مقایسه کاهش سطح فشار صوت حاصل از اثر میراکننده‌ها با حالت پایه (آ) است. بیشترین میرایی توسط میراکننده هلمهلتز برابر با ۵ دسی‌بل حاصل شده است.

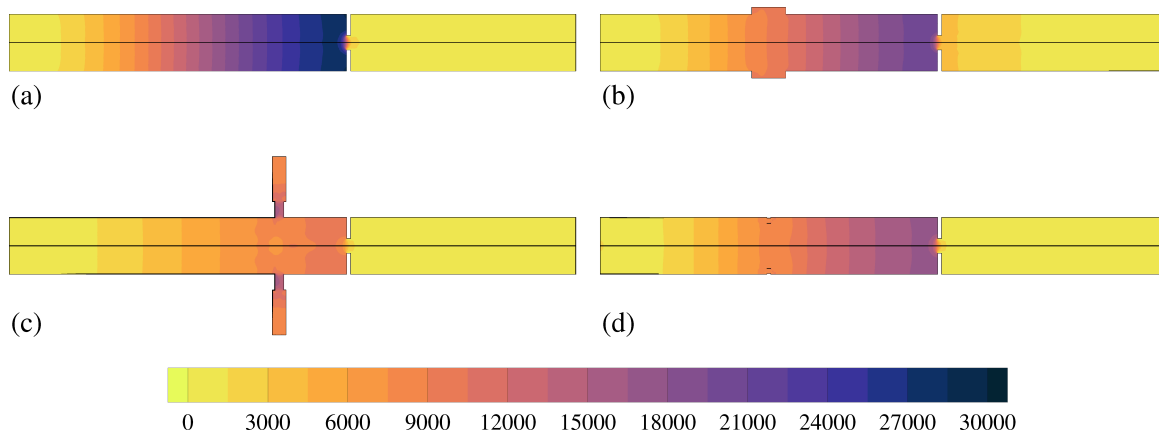
<sup>11</sup> Sound Pressure Level (SPL)



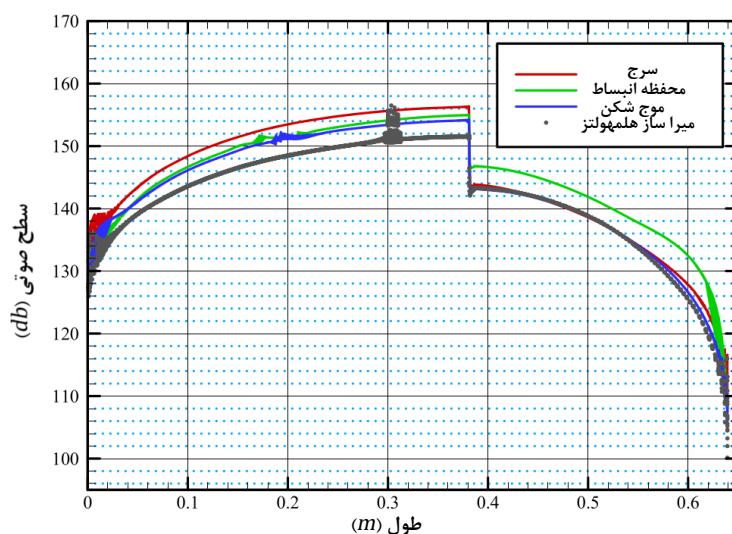
شکل ۴: خطوط تراز فشار استاتیک پس از گذشت دو سیکل از تشکیل سرج. (آ) حالت پایه بدون میراکننده، (ب) میراکننده موج‌شکن، (ج) میراکننده هلمهلتز و (د) میراکننده محفظه انبساط.



شکل ۵: چگالی طیفی توان سیگنال فشار برای حالت‌های مختلف میراشوندگی سرج؛ (آ) چگالی طیفی توان به ازای فرکانس و (ب) چگالی طیفی توان به ازای موقعیت مکانی.



شکل ۶: منحنی توزیع چگالی طیفی توان سیگنال فشار در فرکانس  $12^\circ$  هرتز متناظر با وقوع سرچ. (آ) حالت پایه (بدون میراکننده)، (ب) میراکننده هلمهلتز، (ج) محفظه انبساط و (د) موج‌شکن.



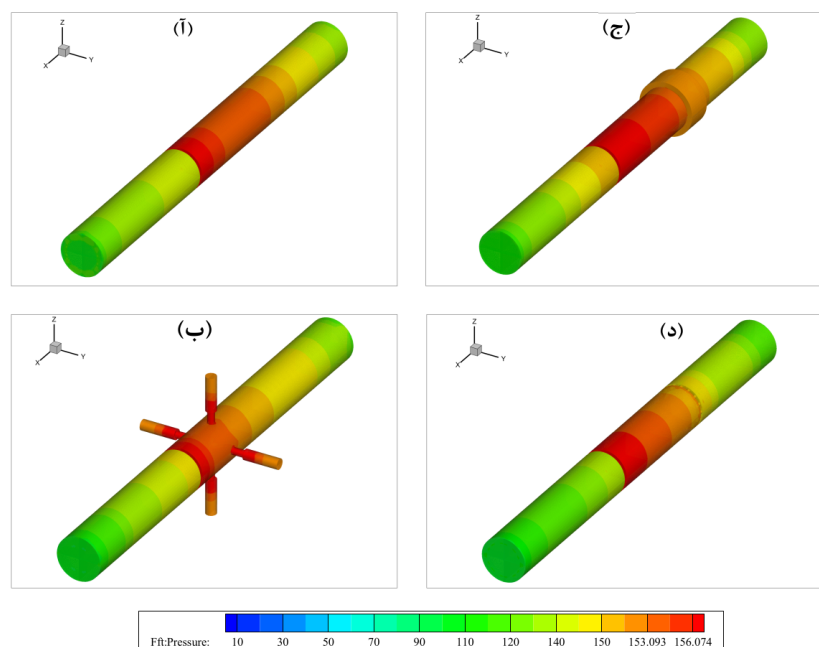
شکل ۷: سطح فشار صوت در فرکانس  $12^\circ$  هرتز (متناظر با وقوع سرچ) در راستای مجرای خروجی.

توانایی میراسازی موج‌شکن در مرتبه‌ی دوم بعد از هلمهلتز قرار دارد و پس از آن محفظه انبساط کمترین اثر بین سه میراکننده را داراست.

## ۵- جمع‌بندی

ناپایداری سرچ یک موج ایستاده است که در پایین دست کمپرسور گریزمرکز تشکیل می‌شود. این پدیده تحت تاثیر نوسانات فشار ناشی از واماندگی که به پایین دست پره‌ها انتقال می‌یابد در اثر تشدید و افزایش دامنه نوسانات، شکل می‌گیرد. یکی از روش‌های مناسب برای کاهش شدت و ایجاد تاخیر در بروز آن استفاده از میراکننده‌ها در مجرای خروجی کمپرسور است. در این تحقیق سه میراکننده هلمهلتز با آرایش چهارتایی، محفظه انبساط و موج‌شکن با استفاده از شبیه‌سازی عددی مطالعه شده‌اند.

تشدید و افزایش دامنه موج فشاری در نزدیکی شیر خروجی رخ می‌دهد. در این ناحیه موج فشاری بازتاب شده و به بالادست حرکت می‌کند و با امواج فشاری که به پایین دست حرکت می‌کنند ترکیب شده و تشدید صورت می‌پذیرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد بیشترین اثر میرایی متعلق است به میراکننده هلمهلتز و بعد از آن موج‌شکن و محفظه انبساط است.



شکل ۸: منحنی‌های توزیع شدت صوت انتشار بر روی دیواره مجرا در  $12^\circ$  هرتز. (آ) حالت پایه (بدون میراکننده)، (ب) میراکننده هلمهلتز، (ج) محفظه انبساط و (د) موج‌شکن.

## مراجع

1. W. Wenzel, "Acoustic design for charged engines," *MTZ Worldwide*, vol.67, pp.6–9, 2006.
2. E. Guillou, R. DiMicco, E. Gutmark, A. Mohamed, and M. Gancedo, "Characterization of a ported shroud compressor using PIV measurements," tech. rep., SAE International, 2010.
3. E. Sundström, B. Semlitsch, and M. Mihăescu, "Centrifugal compressor: The sound of surge," *21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf.*, 22–26 Jun. 2015, Dallas, TX, pp.1–17, 2015.
4. B. Semlitsch and M. Mihăescu, "Flow phenomena leading to surge in a centrifugal compressor," *Energy*, vol.103, pp.572–587, 2016.
5. Sundström, Elias and Semlitsch, Bernhard and Mihăescu, Mihai, "Acoustic signature of flow instabilities in radial compressors," *J. Sound Vib.*, vol.434, pp.221–236, 2018.
6. S. Mekid, M. Farooqui, and Z. Liu, "Geometry effects on the noise reduction of helmholtz resonators," *Can. Acoust.*, vol.42, no.2, pp.2–10, 2014.
7. M. Gancedo, E. Gutmark, and E. Guillou, "PIV measurements of the flow at the inlet of a turbocharger centrifugal compressor with recirculation casing treatment near the inducer," *Exp. Fluids*, vol.57, no.16, pp.1–19, 2016.
8. E. Guillou, M. Gancedo, and E. Gutmark, "Experimental investigation of flow instability in a turbocharger ported shroud compressor," *ASME J. Turbomach.*, vol.138, p.061002 (10 pages), 2016.
9. A. Bykov and A. Komkin, "Design of helmholtz resonator with required characteristics," *MATEC Web of Conf. ASO-2020*, vol.320, p.00012 (11 pages), 2020.
10. C. Bourquad and N. Noiray, "Stabilization of acoustic modes using Helmholtz and quarter-wave resonators tuned at exceptional points," *J. Sound Vib.*, vol.445, pp.288–307, 2019.
11. P. O. A. L. Davis, "Flow acoustic coupling in ducts.," *J. Sound Vib.*, vol.77, no.2, pp.191–209, 1981.