

# شبیه‌سازی عددی جریان در راستای کاربرد جداری بهبوددهنده با پره‌های به عقب کشیده شده به منظور افزایش حاشیه‌ی امن واماندگی در کمپرسورهای جریان محوری

محمد اخلاقی\* (استادیار)

مجتبی جانی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۳)  
دوره‌ی ۲ - ۳، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۵۷-۶۵

در این نوشتار، شبیه‌سازی جریان عبوری از کمپرسور جریان محوری با استفاده از جداری بهبوددهنده با پره‌های به عقب کشیده شده<sup>۱</sup> هدایت جریان بررسی می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی به دست آمده از آزمایشات تجربی مورد مقایسه قرار می‌گیرند. فرایند شبیه‌سازی مبتنی بر حالت پایدار بوده و از منظر اعتبارسنجی با داده‌های تجربی سازگاری مناسبی را نشان می‌دهد. نتایج مبین آن است که با کاربرد جداری بهبوددهنده به عقب کشیده شده، پایداری سیستم به میزان مطابقی بهبود یافته و حاشیه‌ی امن واماندگی افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده از کاربرد ساختارهای گوناگون عدم پوشش وتر محوری جزء دوار نشان می‌دهند که جداری بهبوددهنده با عدم پوشش ۳۳/۳۳٪ دارای بهترین بهبود در حاشیه‌ی امن واماندگی و بهترین عملکرد در راندمان کلی مبتنی به نسبت فشار سکون به سکون و نسبت فشار سکون به استاتیک، و با عدم پوشش ۶۳/۶۳٪ دارای بهترین مقدار ضریب بیشینه‌ی افزایش فشار کلی مبتنی به نسبت فشار سکون به سکون است.

**واژگان کلیدی:** کمپرسور جریان محوری، جداری بهبوددهنده با تیغه‌های به عقب کشیده شده، واماندگی دورانی، حاشیه‌ی واماندگی، خفقان و حاشیه امن خفقان.

mohammad.akhlaghi@iust.ac.ir  
mojtaba.jani@gmail.com

## ۱. مقدمه

دست‌یابی به بیشترین فشار کمپرسور و نیز افزایش بار طبقه یکی از معیارهای طراحی در کمپرسورهای جریان محوری است. بیشینه فشار قابل دسترس با کاهش گذر جرمی جریان هوای عبوری از کمپرسور محدود می‌شود. هرگاه جریان عبوری از کمپرسور، به هر دلیلی، با کاهش هرچند اندک در سطح مقطع حلقوی کمپرسور به مقادیری کم‌تر از میزان طراحی تغییر کند، عملاً الگوی جریان پایدار در مسیر خط جریان و الگوی متقارن سیال در سطح حلقوی، دست‌خوش ناپایداری می‌شود. پدیده‌های منتج از ناپایداری‌ها به دو شکل، تحت عنوان «واماندگی دورانی»<sup>۲</sup> و «خفقان»<sup>۳</sup> ظاهر می‌شوند.<sup>[۱]</sup> برای به‌وقوع پیوستن این دو پدیده حاصل از ناپایداری جریان سیال، بروز پدیده‌ی واماندگی (سکته) دورانی امری ضروری است.<sup>[۸]</sup>

پدیده‌ی واماندگی (سکته) به علت جدایش جریان سیال از سطح تیغه و باممکن است بدلیل تنش برشی منتج از نواحی دیواره بروز نماید و منجر به ناحیه‌ی بی‌جریان بازگشتی در درون کمپرسور می‌شود. برخی از محققان معتقدند که واماندگی دورانی یک پدیده‌ی ناپایداری موضعی جریان سیال<sup>۴</sup> است. وقوع این پدیده توأم با شکل‌گیری نواحی متشکل از سلول‌های واماندگی است. سلول‌های مستقر در این نواحی

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۲/۳/۱۲، پذیرش ۱۳۹۲/۳/۲۱.

بزرگ در دبی جرمی عبوری از سطح حلقوی و افزایش فشار سیستم همراه است. دو نوع اصلی از پدیده‌ی خفقان وجود دارد که تحت عناوین خفقان بر اثر واماندگی تدریجی و خفقان به دلیل واماندگی ناگهانی دسته‌بندی می‌شود. بروز خفقان ناشی از واماندگی تدریجی در کمپرسورهای چندطبقه، معمولاً ملایم و غیر مسموم است. تحقیقات تجربی نشان می‌دهد که این نوع خفقان هنگامی به وقوع می‌پیوندد که تغییر ناگهانی در نسبت فشار به علت رخداد واماندگی وجود نداشته باشد. خفقان به علت واماندگی ناگهانی معمولاً شدید، و صدای ناهنجار آن به سادگی قابل شنیدن است، و در واقع حاصل وقوع واماندگی ناگهانی است. بنابراین هرگاه تمهیدی برای رفع اختلال ایجاد شده بر اثر واماندگی‌های دورانی تدریجی و ناگهانی نشود یا دست کم این اختلالات به نحوی مناسب خنثی نشود، دشواری‌های مترتب بر شرایط عملکردی کمپرسور حادث خواهد شد و نتیجتاً کمپرسور با «خفقان متناسب با نوع واماندگی دورانی» مواجه خواهد شد.

پدیده‌ی خفقان اگر به شرایط واماندگی بازنگردد، باعث توقف کامل عملکرد کمپرسور در مراحل اولیه می‌شود، و در ادامه، به علت ارتعاشات حاصل از بارهای مکانیکی ایجاد شده، منجر به ویرانی کامل و شکستن تیغه‌های کمپرسور خواهد شد. بنابراین بهبود عملکرد آژوردینامیکی کمپرسورهای جریان محوری، به خصوص در حوالی نقطه‌ی سکنه همواره مورد توجه طراحان و سازندگان بوده است تا از این رهگذر علاوه بر حفظ یا افزایش فشار استاتیکی، از عملکرد پایدار کمپرسور نیز بهره‌مند شوند.

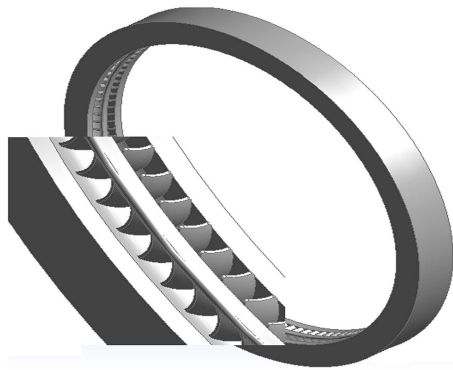
به منظور بهبود محدودی عملکردی پایدار کمپرسور، تحقیقات تجربی و عددی گسترده‌یی از جانب محققین مختلف به منظور تعیین عواملی که منجر به شروع ناپایداری‌های می‌شوند صورت گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که پدیده‌ی واماندگی را می‌توان در زیرمجموعه‌یی از دو گروه اصلی مورد توجه قرار داد. یکی از ناپایداری‌های جریان سیال بر اثر وقوع شرایط بغرنج و پیچیده‌ی حاکم بر نوک تیغه‌ی جزء دوار<sup>۶</sup> به وجود می‌آید، و دیگری منتج از کاهش قابل ملاحظه‌ی گذر جرمی جریان سیال عبوری درون کمپرسور است.<sup>[۱]</sup>

ناپایداری‌های جریان سیال، که حاصل تأثیرات بغرنج نوک تیغه‌اند، بیشتر در کمپرسورهایی که بارگذاری تیغه‌ها<sup>۷</sup> مقادیر بالا دارند حادث می‌شوند. عامل مهم وقوع پدیده‌ی واماندگی در این نوع کمپرسورها متأثر از فیزیک پیچیده‌ی جریان سیال مرتبط با جریان‌های انتهایی دیواره<sup>۸</sup>، مخصوصاً جریان عبوری از فاصله‌ی لثی نوک پره<sup>۹</sup> است. بدیهی است مورد یاد شده با جریان سیال نشستی از نوک پره<sup>۱۰</sup> در ارتباط است. برخی از محققین بر این امر تأکید کرده‌اند که شروع پدیده‌ی ناپایداری جریان سیال<sup>۱۱</sup> و نیز وقوع سلول یا ناحیه‌ی سکنه ناشی از نشستی سیال در نوک تیغه است.<sup>[۲]</sup> یکی از تحقیقات شاخص مصحح می‌کند که تغییر جهت بیش از حد مسیر عبوری جریان سیال که در نتیجه افزایش بار آژوردینامیکی تیغه‌های کمپرسور به وقوع می‌پیوندد، باعث رخداد پدیده سکنه شده و در واقع تغییر جهت نامناسب شرایط وقوع سکنه را اجتناب ناپذیر می‌کند. این بارگذاری اضافه باعث شروع جدایش جریان از قسمت مکشی تیغه شده و در نتیجه بخش قابل ملاحظه‌یی از گذرگاه تیغه مسدود می‌شود.<sup>[۱]</sup> نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی مبین آن است که ترکیب دو حالت یاد شده زمینه‌ی مساعد برای بروز عامل ناپایداری و آغاز پدیده‌ی واماندگی در کمپرسورها را فراهم می‌کند. این تحقیق همچنین تأکید می‌کند که در کمپرسورهای کم‌سرعت و با بارگذاری نسبتاً کم، جریان نشستی نوک تیغه تأثیر قابل ملاحظه‌یی در وقوع پدیده‌ی ناپایداری جریان سیال نخواهد داشت.<sup>[۲]</sup>

پاسخ‌گویی به این سؤال که «شیوه‌های مطلوب ممانعت از رخداد، از بین بردن یا به تأخیر انداختن وقوع پدیده‌های ناپایدارکننده‌ی مذکور کدام‌اند؟» موضوعی است

که اکثر طراحان کمپرسور با آن مواجه بوده و هستند. از میان روش‌های کنترلی مقابله با این ناپایداری‌ها، دو شیوه‌ی اساسی «کنترل فعال واماندگی» و «کنترل غیر فعال واماندگی» بسیار معمول‌اند. بسیاری از تحقیقات اخیر بر شیوه‌ی دوم که عملکرد بسیار مطلوبی دارد و با کنترل غیرفعال جریان‌های ناپایدار<sup>۱۲</sup> مرتبط است، متمرکز شده‌اند. نتایج بسیار قابل ملاحظه و امیدوارکننده‌یی از به‌کارگیری شیوه‌ی یاد شده گزارش شده است.<sup>[۳]</sup>

استفاده از جداری بهبوددهنده<sup>۱۳</sup> به عنوان روش کنترلی غیرفعال، ابتدا توسط ناسا (NASA) و در اواخر ۱۹۶۰ پیشنهاد شد. طی پنج دهه‌ی اخیر کاربرد جداری‌های بهبوددهنده، بخش قابل ملاحظه‌یی از تحقیقات را چه از جانب پژوهش‌گران و چه از سوی سازندگان صنایع مرتبط با توربین‌های گازی هوایی و صنعتی، به خود اختصاص داده‌اند. از انواع جداری‌های بهبوددهنده می‌توان به جداری‌های شیارمحیطی<sup>۱۴</sup>، شکاف محوری<sup>۱۵</sup>، حفره‌ی بازچرخش<sup>۱۶</sup>، حلقه‌ی منحصر به فرد<sup>۱۷</sup>، تیغه‌های به عقب کشیده شده<sup>۱۸</sup> و... اشاره کرد.<sup>[۴]</sup> مطالعات منتشره نشان می‌دهد که تلاش محققین برای ارائه‌ی نظریه‌های مرتبط با اصول عملکرد جداری‌های بهبوددهنده چندان مطلوب نبوده است. با این حال، نقطه‌نظرات ارائه شده مبین آن است که جریان هوا با سرعت چرخشی نسبتاً بالا در ناحیه‌ی نوک جزء دوار به درون جداری‌های بهبوددهنده راهی می‌شود. سپس جداری‌های مزبور به‌گونه‌یی عمل می‌کنند که انرژی نامطلوب حاصل از چرخش اجزاء سیال دست‌خوش واماندگی را از آن زدوده و متعاقباً سیال را توأم با انرژی مناسب‌تری به سطح حلقوی و در مسیر نزدیک به لبه‌ی هدایت تیغه‌های جزء دوار بازگردانند. مسلماً در چنین وضعیتی جریان خروجی از جداری‌های بهبوددهنده در مسیرهای خطوط جریان با جریان اصلی سیال<sup>۱۹</sup> متفقاً به جانب پایین دست هدایت می‌شود. از مکتوبات و نوشتارهای متعدد چنین برمی‌آید که این عمل باعث ایجاد زمینه‌ی مساعد برای ممانعت از پیدایش سلول‌های واماندگی دورانی در ضریب جریان کم‌تر از مقدار طراحی می‌شود. همچنین برخی از تحقیقات انجام شده گویای آن است که جریان‌های سیال عبوری متأثر از ناحیه‌ی انتهایی دیواره در حوالی نوک تیغه و در جوار ناحیه‌ی ورودی جداری‌های بهبوددهنده تجمع می‌کنند. تحقیقات مزبور سعی بر آن داشته که اغتشاشات متأثر از جریان‌های سیال چرخشی مجتمع در نوک تیغه را به‌گونه‌یی مضمحل کند که از این رهگذر ضمن تحصیل جریان‌ی پایدار، افزایش بارگذاری آژوردینامیکی توأم با راندمان مناسب نیز حاصل آید.<sup>[۴]</sup> نتایج بررسی‌های محققین نشان‌دهنده‌ی آن است که نصب صحیح جداری‌های بهبوددهنده روی کمپرسور به کاهش مؤلفه‌ی مماسی سرعت در راستای محیطی ( $V_{\theta}$ ) و نیز افزایش سرعت در راستای محوری ( $V_{axial}$ ) کمپرسور منجر شده، و در نتیجه انسداد جریان در ناحیه‌ی نوک تیغه‌ی جزء دوار را از بین می‌برد.<sup>[۶]</sup> همچنین گزارش شده است که جداری‌های بهبوددهنده با تضعیف مرکز دوران گردابه، باعث جلوگیری از نشست زود هنگام جریان سیال توأم با اندازه‌ی حرکت کم به درون گذرگاه تیغه‌ی همجوار شده و از این رهگذر شروع ناپایداری جریان به تأخیر می‌افتد.<sup>[۷]</sup> جداری‌های بهبوددهنده، به‌ویژه در مواقعی که نوک تیغه‌ی جزء دوار مستعد واماندگی باشد، در امر به تأخیر انداختن واماندگی دورانی و وقوع خفقان بسیار مفید واقع می‌شوند.<sup>[۹]</sup> تمامی محققین بر این نکته اتفاق نظر دارند که غالباً جداری‌های بهبوددهنده توانسته‌اند حاشیه‌ی واماندگی<sup>۲۰</sup> عملکرد کمپرسورها را افزایش دهند، اگرچه این امر در بیشترین مورد به‌کارگیری آنها، با کاهش راندمان همراه بوده است.<sup>[۸]</sup> در این تحقیق نیز از روش کنترلی غیر فعال به منظور مقابله با پدیده‌های ناپایداری جریان سیال استفاده شده است. چنان که نشان داده خواهد شد، جداری‌های بهبوددهنده‌ی مورد استفاده توانسته است علاوه بر افزایش حاشیه‌ی امن واماندگی، بیشترین نسبت فشار قابل دسترس در طبقه‌ی کمپرسور را نیز افزایش دهد.



شکل ۱. جداره‌ی بهبوددهنده با تیغه‌های به عقب کشیده شده با پره‌های هدایت جریان.

محفظه به عقب برده شده و همچنین به منظور تقسیم طول محفظه به عقب برده شده به دو قسمت ورودی و خروجی تا از این رهگذر بتوان جریان سیال را در خطوط اصلی جریان هدایت کرد.<sup>[۹]</sup> شمایی از جداره‌ی بهبوددهنده در شکل ۱ نشان داده شده است.

جداره‌ی بهبود دهنده‌ی مورد نظر دارای شش ساختار مختلف با نسبت عدم پوشش‌های محوری جزء دوار است. مقادیر مزبور به ترتیب برابر با ۲۳٪، ۳۳٪، ۴۳٪، ۵۳٪، ۶۳٪ و ۷۳٪ هستند. کمپرسور مورد نظر بدون استفاده از جداره‌ی بهبوددهنده، و نیز با هفت مورد متفاوت جداره‌ی بهبوددهنده با عدم پوشش محوری وتر تیغه در ناحیه‌ی نوک آن مورد آزمایش قرار گرفته است. در مطالعه‌ی حاضر سعی شده که عدم پوشش ۸۳٪ در شرایط دیگری در کل مطالعات شبیه‌سازی لحاظ شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی به عمل آمده به منظور اعتبارسنجی با نتایج تجربی به کار گرفته شده‌اند.

شایان ذکر است که جزئیات بیشتر در خصوص ساختار هندسی کمپرسور و همچنین نحوه‌ی طراحی و ساخت جداره‌ی بهبوددهنده قابل دسترسی است.<sup>[۹،۸]</sup>

### ۳. مدل عددی و شرایط مرزی

روش معمول برای پیش‌بینی جریان‌های آشفته، استفاده از معادلات ناویر-استوکس مبتنی بر شیوه‌ی متوسط‌گیری شده‌ی رینولدز (RANS) است. این روش به حل کمیت‌های مورد نظر با استفاده از متوسط‌گیری زمانی می‌پردازد. در شبیه‌سازی به عمل آمده از نرم‌افزار ANSYS-CFX که از روش حل عددی حجم محدود<sup>۲۴</sup> بهره می‌گیرد، برای حل معادلات سه‌بعدی دائمی جریان آشفته استفاده شده است. نتایج براساس شبیه‌سازی عددی در حالت پایدار<sup>۲۵</sup> انجام شده است. برای حل با حالت پایدار عموماً از روش شبیه‌سازی روتور بی‌حرکت<sup>۲۶</sup> استفاده شده است. با توجه به این که مرحله‌ی زمانی، پارامتری بسیار مهم در هر شبیه‌سازی پایدار و ناپایدار است، در این تحقیق مرحله‌ی زمانی مورد استفاده در حالت پایدار با در نظر گرفتن سرعت زاویه‌ی کمپرسور ( $\omega$ )، برابر با  $1/\omega$  در نظر گرفته شده است. دو شرط فرایند بدون انتقال حرارت<sup>۲۷</sup> و فرایند بدون لغزش<sup>۲۸</sup> جریان سیال در دیواره‌های جامد اعمال شده است. همچنین با به‌کارگیری شرط مرزی تناوبی، شرایط مدل شدن منحصرأ یک تیغه از هر ردیف پره‌های هادی، دوار و ثابت فراهم شده است. در ارتباط با شرایط مرزی ورودی و خروجی، دبی جرمی به‌عنوان ورودی به پره‌های هادی جریان و فشار استاتیک به‌عنوان خروجی از جزء ثابت در نظر گرفته شده است. مدل توربولانسی

## ۲. کمپرسور و جداره‌ی بهبوددهنده‌ی مورد آزمایش

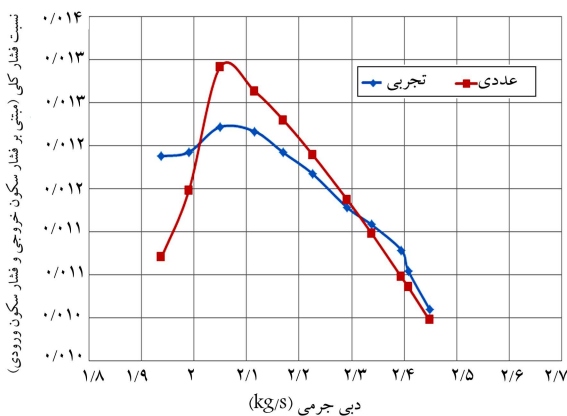
کمپرسور مورد تحقیق، یک کمپرسور سه‌طبقه جریان محوری مادون صوت، با نسبت فشار کم و نسبت اقطار ثابت برابر ۰٫۷ در تمامی ردیف پره‌ها بوده که مرکب از یک ردیف تیغه‌ی هادی جریان، و یک طبقه شامل ردیف پره‌های دوار و ثابت است. برخی از مشخصات هندسی و عملکردی کمپرسور مزبور در جدول ۱ ارائه شده است.

با توجه به ضرورت انجام آزمایشات جداره‌ی بهبوددهنده، فارغ از حضور طبقات دیگر، کمپرسور مورد نظر منحصراً با حضور یک طبقه و پره‌های هدایت جریان مورد آزمایش قرار گرفته است. محل استقرار طبقات دوم و سوم به‌عنوان بخشی از مجرای خروجی در نظر گرفته شده، که محل اندازه‌گیری فشارهای کلی و ایستایی در همین ناحیه قرار داشته است. با توجه به موارد مطرح شده، جداره‌ی بهبوددهنده‌ی مورد استفاده در این شبیه‌سازی، به تعبیری برای یک طبقه طراحی و مورد مطالعه قرار گرفته است. جداره‌ی بهبوددهنده از نوع محفظه‌ی بازپرخش<sup>۲۱</sup> بوده است. جداره‌ی مزبور که اصطلاحاً به «جداره‌ی بهبوددهنده‌ی با تیغه‌های هدایت جریان به عقب کشیده شده» موسوم است، جایگزین بخشی از جداره‌ی خارجی کمپرسور شده است. هدف اصلی به‌کارگیری جداره‌ی مزبور در راستای اعمال تأخیر در بروز پدیده واما‌اندگی و ممانعت از وقوع خفکان بوده است.

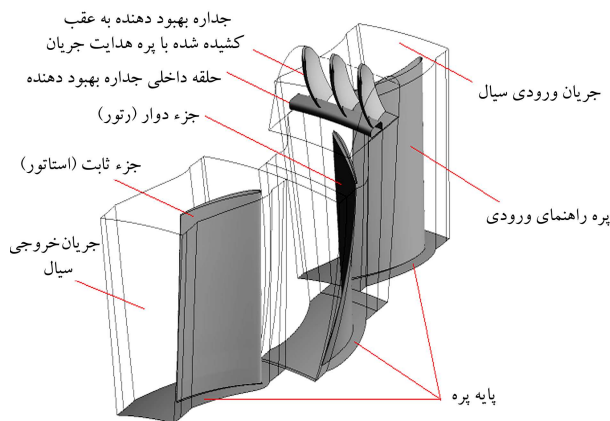
مشابه آنچه که بعدها «جداره‌ی به عقب کشیده شده» نامیده شد، برای نخستین بار در سال ۱۹۸۴ روی یک فن صنعتی جریان محوری دوطبقه به‌عنوان ثبت اختراع به‌کار گرفته شد.<sup>[۹]</sup> یکی از پارامترهای بسیار مهم در راستای عملکرد مطلوب جداره‌ی بهبوددهنده‌ی مذکور، نسبت عدم پوشش وتر محوری در نوک تیغه‌ی دوار<sup>۲۲</sup> است. عدم پوشش محوری یادشده که به‌صورت درصدی از نسبت وتر تیغه‌ی دوار بیان می‌شود، با تقسیم طول محوری وتر جزء دوار در نوک تیغه، که در معرض محفظه‌ی به عقب کشیده شده قرار دارد، به طول محوری وتر جزء دوار در نوک تیغه به دست می‌آید.<sup>[۹]</sup> جداره‌ی بهبوددهنده شامل سه قسمت اصلی است: حلقه‌ی جداره‌ی بیرونی با گذرگاه لوله‌ی در داخل خود، مجموعه‌ی بی از ۱۲۰ تیغه‌ی منحنی‌وار که به‌طور مساوی حول حلقه‌ی کمپرسور قرار گرفته‌اند، و حلقه‌ی داخلی یا لفافه<sup>۲۳</sup> که تماماً بالای سر روتور جا داده شده‌اند. دو دلیل متفاوت برای به‌کارگیری حلقه‌ی داخلی در این جداره‌ی بهبوددهنده وجود دارد: ۱. برای جدا کردن گذرگاه جریان اصلی از

جدول ۱. مشخصات کمپرسور مورد شبیه‌سازی.

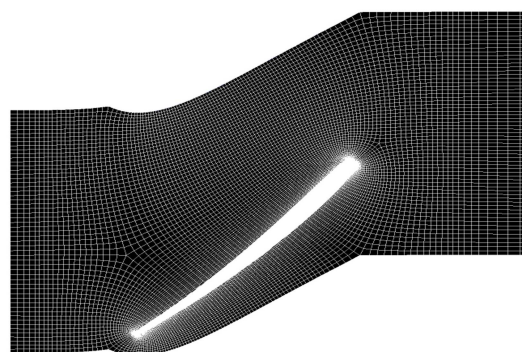
| مقدار  | کمیت   |
|--------|--|
| ۲٫۳۲   | دبی جرمی اصلاح شده (کیلوگرم بر ثانیه)                      |
| ۱٫۰۱۱۳ | نسبت فشار کلی (مبتنی بر فشار سکون خروجی و فشار سکون ورودی) |
| ۳۴     | تعداد تیغه‌های هادی جریان                                  |
| ۳۸     | تعداد تیغه‌های جزء دوار                                    |
| ۳۷     | تعداد تیغه‌های جزء ثابت                                    |
| ۲۸۴٫۴  | قطر داخلی حلقه‌ی کمپرسور (میلی‌متر)                        |
| ۴۰۶٫۴  | قطر خارجی حلقه‌ی کمپرسور (میلی‌متر)                        |
| ۰٫۶    | لغنی نوک تیغه‌ها (میلی‌متر)                                |
| ۳۰۰۰   | سرعت دورانی محور (دور بر دقیقه)                            |



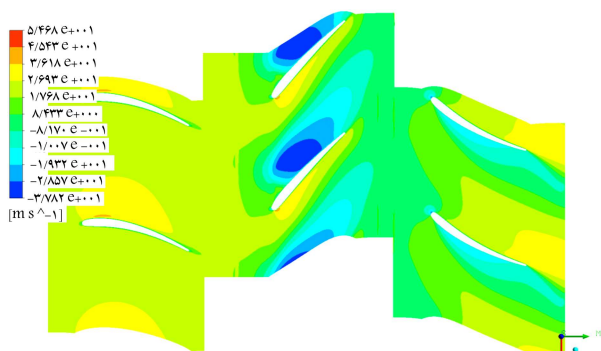
شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی برای کمپرسور تحت آزمایش بدون به‌کارگیری جداره‌ی بهبوددهنده.



شکل ۲. قلمرو محاسباتی.



شکل ۳. نمایی از شبکه‌ی ایجاد شده روی تیغه‌ی جزء دوار.



الف) نقطه نزدیک وقوع سکنه با ضریب جریان  $(\varphi = 0.396)$ ؛



ب) نقطه عملکرد معمول (نرمال) با ضریب جریان  $(\varphi = 0.421)$ .

شکل ۵. میدان جریان سرعت محور در ارتفاع  $\text{Height Span} = 0.98$  بدون کاربرد جداره‌ی بهبوددهنده.

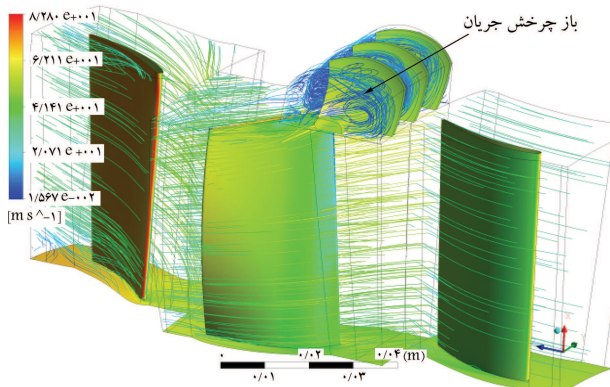
چنان که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نقطه‌ی خفقان در شرایط آزمایشگاهی متناظر با گذر جرمی  $\dot{m} = 1.938 \text{ kg/s}$  و ضریب جریان  $\varphi = 0.457$  به وقوع پیوسته است. شایان ذکر است که در گذر جرمی یادشده مقدار ضریب جریان  $(\varphi)$  به دست آمده از مطالعات شبیه‌سازی برابر  $0.385$  است که نشان‌گر سازگاری چندان مطلوبی نیست. دلیل این ناسازگاری آن است که در آزمایشات تجربی نقطه‌ی آغازین واماندگی مشخص نیست و فقط شرایط بروز پدیده‌ی خفقان -- که با وضعیت ممکن نبودن تداوم عملکرد کمپرسور متناظر است -- مورد نظر قرار گرفته است. در شکل ۵ که مرکب از دو وضعیت متفاوت است نتیجه‌ی شبیه‌سازی مؤلفه‌ی سرعت محوری

$\omega - k$  برای این شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. به‌منظور دست‌یابی به حل عددی مطلوب، همگرایی برای حداکثر باقی‌مانده در هر مرحله‌ی زمانی برابر با  $10^{-4}$  در نظر گرفته شده است. با توجه به تعداد تیغه‌های روتور (۳۸ عدد)، و نیز با توجه به تعداد تیغه‌های هادی درون جداره‌ی بهبوددهنده (۱۲۰ عدد)، با یک تقریب مطلوب هر تیغه‌ی روتور با سه تیغه‌ی هادی جریان پوشانیده می‌شود. قلمرو محاسباتی کمپرسور و جداره‌ی بهبوددهنده‌ی به عقب کشیده شده با تیغه‌های هادی جریان در شکل ۲ نشان داده شده است.

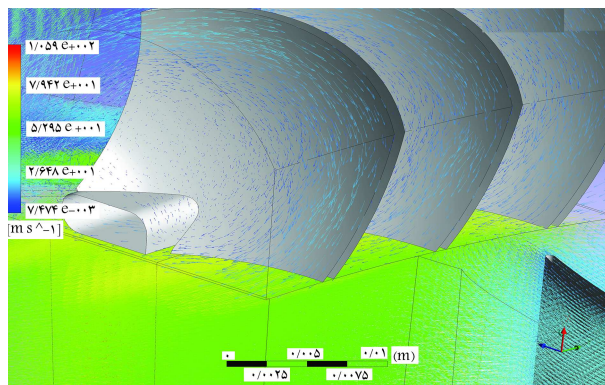
شبکه‌بندی تیغه‌های دوار و ثابت با استفاده از شبکه‌بندی سازمان‌یافته<sup>۲۹</sup> انجام شده است. در اطراف تیغه‌ها از روش شبکه‌بندی O و در قسمت‌های دیگر پره‌ها از روش شبکه‌بندی H استفاده شده است. شبکه‌بندی جداره‌ی بهبوددهنده نیز مبتنی بر بهره‌گیری از شیوه‌ی چهاروجهی است. مقدار  $y^+$  محاسبه شده که از دیدگاه تابع دیواره<sup>۳۰</sup> یکی از پارامترهای مهم به‌شمار می‌آید، کم‌تر از  $3^0$  است. نمایی از شبکه‌بندی ایجاد شده روی جزء دوار در شکل ۳ نشان داده شده است.

#### ۴. نتایج حاصل از محاسبات عددی

در آغاز به‌منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با نتایج تجربی، پارامتر نسبت فشار کلی (مبتنی بر فشار سکون خروجی و فشار سکون ورودی) در دبی‌های جرمی مختلف عبوری از کمپرسور مقایسه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مقایسه با نتایج تجربی کمپرسور تحت آزمایش بدون حضور جداره‌ی بهبوددهنده تا حدود قابل ملاحظه‌ی نزدیک به هم هستند (شکل ۴) و بیشینه اختلاف آنها حدود  $0.7\%$  درصد است.



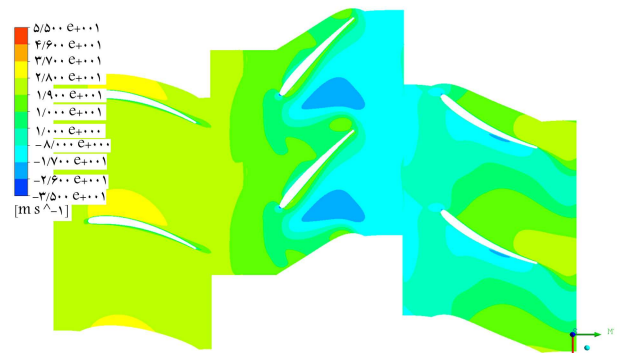
شکل ۷. بازچرخش سیال درون پره‌های هادی جریان جداری بهبوددهنده.



شکل ۸. نمایش بردارهای سرعت در پره‌های هادی جداری بهبوددهنده.

خط خفقتان حرکت می‌کند، بعضی از سلول‌های نامتعادل جریان سیال در راستای شعاعی یا در موارد شدیدتر، مقداری از جریان برگشتی نامتعادل شعاعی به سمت نوک تیغه‌های جزء دوار حرکت می‌کند. جداری بهبوددهنده به دلیل فراهم کردن محفظه‌ی بالادستی در جزء دوار زمینه‌ی را فراهم می‌کند تا سلول‌های وامانده به درون آن منتقل شود. سپس جریان ناپایدار و کم‌انرژی وارد پره‌های هادی جداری بهبوددهنده می‌شود. در جداری بهبوددهنده، پره‌ها چرخش را از جریان مبتلا به واماندگی، تقریباً در جهت محوری به جریان اصلی در بالادست تیغه‌های روتور هدایت می‌کنند. بدین صورت مؤلفه‌ی جریان شعاعی ( $V_\theta$ ) از جریان زدوده شده و تیغه‌های جزء دوار در ناحیه‌ی نوک، جریان را با سرعت محوری بالایی دریافت می‌کنند. این سازوکار باعث افزایش انرژی سیالی می‌شود که قبلاً دست‌خوش ناپایداری و کاهش اندازه حرکت لازم شده بود. در واقع جداری بهبوددهنده با پره‌های هادی جریان باعث بازچرخش<sup>۳۱</sup> جریان از قسمت عقبی محفظه که در منطقه‌ی پرفشار قرار گرفته، به داخل پره‌های هادی جریان و سپس هدایت جریان سیال عاری از واماندگی به بالادست جزء دوار می‌شود (شکل ۷). بدیهی است با افزایش انرژی سیال و متعاقب آن سرعت محوری، جریان در ورودی کمپرسور نیز دست‌خوش پیش‌چرخش مناسب شده و نتیجتاً راستای بردار سرعت مطلق در ناحیه‌ی ورود به جزء دوار با میزان طراحی به‌گونه‌ی مناسب متقارب می‌شود. در شکل ۸ نمای بهتری از پره‌های هدایت‌کننده و نیز بردارهای سرعت جریان سیال، که پس از خروج از جداری بهبوددهنده به جریان اصلی عبوری در ناحیه بالادست تیغه‌های جزء دوار می‌پیوندند، نشان داده شده است.

با توجه به عملکرد این نوع جداری بهبوددهنده دور از انتظار نخواهد بود که



شکل ۶. وقوع واماندگی دورانی در گذرگاه بین تیغه‌های ثابت و دوار.

جریان سیال در نسبت ۹۸ درصدی از ارتفاع تیغه‌ها، در نقطه‌ی شروع واماندگی و نیز در نقطه‌ی عملکردی پایدار نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود در نقطه‌ی شروع واماندگی، جریان سیال دست‌خوش کاهش سرعت محوری قابل ملاحظه‌ی شده و در نتیجه باعث جدایش جریان سیال از قسمت مکشی تیغه‌های جزء دوار شده است. با این حال، در حالت عملکردی پایدار کمپرسور، هیچ ناحیه‌ی از جدایش یا انسداد جریان سیال در گذرگاه بین تیغه‌های همجوار مشاهده نمی‌شود. براساس رابطه‌ی گذر جرمی ( $\dot{m} = \rho AVx$ ) و ناچیز بودن تغییرات چگالی سیال، و نیز با توجه به این که سطح مقطع حلقوی در تمامی ردیف پره‌ها ثابت است، با کاهش دبی جرمی عبوری از کمپرسور به مقادیری کم‌تر از مقدار طراحی، سرعت محوری جریان سیال عبوری از کمپرسور کاهش می‌یابد. کاهش سرعت محوری جریان سیال به افزایش زاویه‌ی نسبی جریان ورودی به تیغه‌ی جزء دوار ( $\alpha_1$ ) می‌انجامد و براساس رابطه‌ی  $i = \alpha_1 - \beta_1$ ، زاویه‌ی برخورد افزایش می‌یابد. افزایش مثبت زاویه‌ی برخورد برای مقادیر بیشتر از مقدار طراحی، موجب جدایش جریان از قسمت مکشی تیغه‌ی جزء دوار منجر به جریان برگشتی و در نتیجه ایجاد گردابه‌هایی در نوک تیغه‌ی جزء دوار می‌شود. نکته‌ی دیگری که می‌توان از شکل ۵ استنباط کرد، تأثیر گردابه‌های نوک تیغه‌ی جزء دوار بر پایین‌دست جریان است. گردابه‌ها در نوک جزء دوار به‌وسیله‌ی جریان اصلی در امتداد کمپرسور انتقال یافته و منجر به افزایش زاویه‌ی جریان سیال در لابه‌ی حمله‌ی جزء ثابت می‌شود. پدیده‌ی افزایش زوایای حمله منجر به وقوع پدیده‌ی جدایش لایه‌ی مرزی روی قسمت مکشی تیغه‌های جزء ثابت نیز می‌شود. جدایش جریان از قسمت مکشی تیغه‌های جزء دوار و ثابت موجب افزایش ناگهانی اتلاف انرژی و کاهش قابل ملاحظه‌ی فشار کلی شده و بدین‌گونه کمپرسور دست‌خوش واماندگی می‌شود. با کاهش بیشتر گذر جرمی، ناحیه‌ی جریان برگشتی آنقدر رشد می‌کند تا تمام گذرگاه و قسمتی از ارتفاع اجزاء دوار و ثابت را مسدود کند. سپس ناحیه‌ی واماندگی با سرعت دورانی کم‌تر از سرعت جزء دوار حول سطح حلقوی دوران می‌کند و منجر به رخداد واماندگی دورانی می‌شود. ناحیه‌ی مبتلا به واماندگی در بین دو تیغه‌ی همجوار اجزاء دوار و ثابت در شکل ۶ ارائه شده است.

## ۵. شبیه‌سازی با جداری بهبوددهنده

در تداوم امر شبیه‌سازی و به منظور افزایش پایداری آن‌رودینامیکی، جداری بهبوددهنده جایگزین بخشی از پوسته‌ی اصلی کمپرسور شد. اصول عملکرد جداری بهبوددهنده با پره‌های به عقب کشیده شده چنین است: هنگامی که عملکرد کمپرسور به سمت

بهیوددهنده در نسبت فشارکلی به کلی، و در نسبت‌های مختلف از عدم پوشش وتر محوری جزء دوار را نشان می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود استفاده از جداری بهیوددهنده توانسته است به‌طور قابل ملاحظه‌ی حاشیه‌ی واماندگی کمپرسور و نیز در بیشتر نسبت‌های مختلف از عدم پوشش وتر محوری روتور حداکثر نسبت فشار کلی به کلی قابل حصول را افزایش دهد.

تمام ساختارهای جداری بهیوددهنده با کاهش دبی جرمی و افزایش فشار خروجی تا جایی که حل عددی و اگر شود، مورد شبیه‌سازی قرار گرفتند. در واقع این نقطه، به‌عنوان نقطه‌ی شروع استال برای کمپرسور در نظر گرفته شده است. به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد جداری بهیوددهنده بر روی کمپرسور، محاسبه‌ی میزان بهیود حاشیه‌ی واماندگی، مبتنی بر پارامترهای مختلف و دخیل ضروری است. برای انجام این امر می‌توان از رابطه‌ی ۱ که منحصراً مبتنی بر مقدار گذر جرمی جریان است، استفاده کرد:

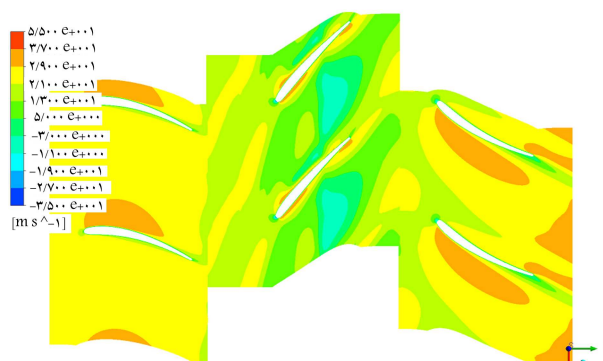
$$\Delta(SM) = 1 - \frac{\varphi_{SP-CT}}{\varphi_{SP-SC}} \quad (1)$$

که در آن  $\varphi_{SP-CT}$  ضریب جریان در شرایط وقوع واماندگی با کاربرد جداری بهیوددهنده، و  $\varphi_{SP-SC}$  ضریب جریان در شرایط وقوع واماندگی بدون کاربرد جداری بهیوددهنده است. عملکرد کمپرسور با جداری‌های بهیوددهنده را می‌توان با استفاده از چندین مشخصه‌ی متفاوت نیز مورد ارزیابی قرار داد. حداکثر ضریب افزایش فشار قابل حصول در کمپرسور یکی از پارامترهای دخیل و مورد توجه در ارزیابی عملکرد جداری بهیوددهنده است. به‌منظور محاسبه‌ی ضریب حداکثر فشار قابل حصول می‌توان از رابطه‌ی ۲ استفاده کرد:

$$\Delta\psi_{PPRC} = \frac{(\psi_{Peak})_{CT}}{(\psi_{Peak})_{SC}} - 1 \quad (2)$$

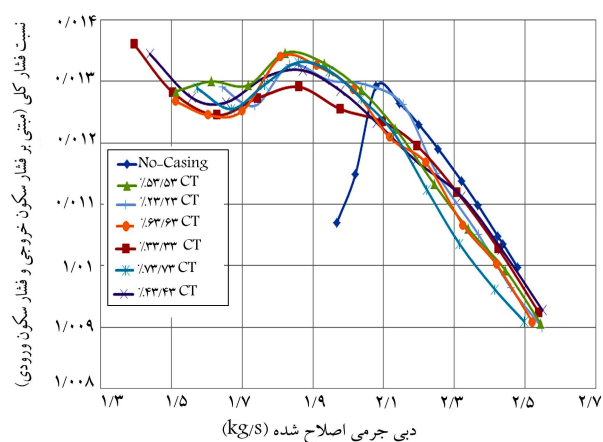
که در آن  $(\psi_{Peak})_{SC}$  و  $(\psi_{Peak})_{CT}$  به‌ترتیب بیشینه ضریب فشار قابل حصول در کمپرسور برای دو حالت با و بدون کاربرد جداری بهیوددهنده است. بهیود یا افت در حاشیه‌ی واماندگی و همچنین بیشینه ضریب افزایش فشار قابل حصول در کمپرسور در حالات بهره‌گیری از جداری بهیوددهنده در نسبت‌های مختلف عدم پوشش جزء دوار، در دو حالت تجربی و عددی در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. داده‌های جداول ۲ و ۳ مبین آن است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی ارائه شده سازگاری مطلوبی دارد. اگرچه ضریب جریان و بیشینه ضریب افزایش فشار محاسبه شده در حالت تجربی و عددی با هم متفاوت‌اند، مقدار بهیود در حاشیه‌ی واماندگی و همچنین بیشینه ضریب افزایش فشار نسبتاً نزدیک‌اند. این امر نشان‌دهنده‌ی شیوه‌ی مطلوب عمل و همچنین دقت اعمالی در شبیه‌سازی عددی است. در جداول فوق نشان داده شده است که بیشترین بهیود حاشیه‌ی واماندگی به‌دست آمده از نتایج تجربی و عددی متناظر با نسبت عدم پوشش محوری برابر ۳۳/۳۳٪، به‌ترتیب برابر ۲۸/۵۶ درصد و ۲۸/۹۸ درصد حاصل شده است. همچنین بالاترین میزان بهیود در مقدار ضریب افزایش فشار در نسبت عدم پوشش محوری جزء دوار متناظر با ۶۳/۶۳ درصد به دست آمده، که این مقدار برای حالت تجربی و عددی به‌ترتیب برابر ۲/۶ و ۴/۱ درصد است.

عملکرد جداری بهیوددهنده بر روی راندمان نیز جالب توجه است. شکل ۱۱ راندمان کلی به کلی مبتنی بر نتایج به دست آمده از آزمایشات تجربی را برای حالتی که کمپرسور فاقد جداری بهیوددهنده است، و همچنین شش حالت به‌کارگیری جداری بهیوددهنده با عدم پوشش مختلف وتر در راستای محوری را نشان می‌دهد. چنان که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، جداری بهیوددهنده در تمامی عدم پوشش‌های محوری قابلیت آن را دارد که نسبت به پایداری عملکرد کمپرسور در



نقطه نزدیک وقوع واماندگی با ضریب جریان (۰/۳۹۵)  $\varphi$

شکل ۹. میدان جریان سرعت محوری در ارتفاع (Height Span = ۰/۹۸) و کاربرد جداری بهیوددهنده متناظر با عدم پوشش ۶۳/۶۳ درصد.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نقشه‌ی عملکردی کمپرسور در عدم پوشش‌های مختلف با استفاده از جداری بهیوددهنده‌ی به عقب کشیده شده با پره‌های هادی.

الگوی جریان در نوک جزء دوار بهیود یابد. در شکل ۹ نمایی از میدان جریان سرعت محوری در ۰/۹۸ ارتفاع تیغه‌ها، با به‌کارگیری جداری بهیوددهنده و عدم پوشش ۶۳/۶۳٪ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، در ضریب جریان متناظر با  $\varphi = ۰/۳۹۵$  جداری بهیوددهنده به‌طور قابل ملاحظه‌ی انسداد جریان در حوالی نوک تیغه‌ی جزء دوار را از بین برده است. از مقایسه‌ی این مطلب با نتایج حاصل از شکل ۹ می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که جداری بهیوددهنده با عدم پوشش محوری ۶۳/۶۳ درصدی قابلیت آن را دارد که وقوع جدایش جریان و تشکیل سلول‌های ناپایدار واماندگی را به میزان قابل ملاحظه‌ی به تأخیر بیندازد. شکل ۹ همچنین مبین یک بهیود عملکردی مطلوب‌تر در ناحیه‌ی پره‌های ثابت است، به‌طوری که بهیود در مشخصه‌ی جریان در نوک جزء دوار بر شرایط جریان پایین‌دست نیز تأثیر مثبت می‌گذارد و از این رهگذر الگوی جریان سیال در ناحیه‌ی ۹۸ درصدی ارتفاع جزء ثابت از محل قطر داخلی کمپرسور<sup>۳۲</sup> دست‌خوش جدایش جریان نمی‌شود.

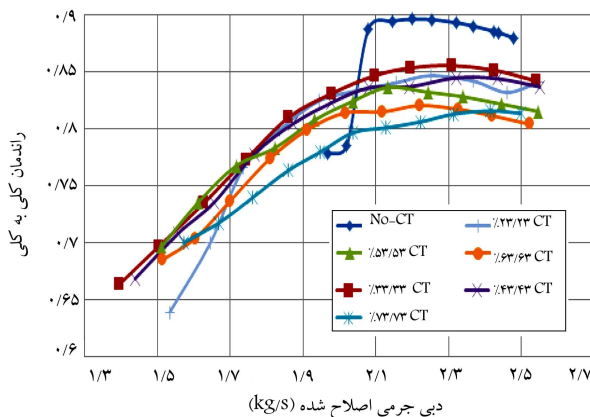
چنان که پیش‌تر نیز عنوان شد فلسفه‌ی استفاده از جداری بهیوددهنده، افزایش حاشیه‌ی امن واماندگی بوده است. در این قسمت تأثیر جداری بهیوددهنده‌ی مورد نظر را بر پارامترهای جریان سیال مورد بررسی و تحلیل قرار می‌دهیم. در شکل ۱۰ نتایج شبیه‌سازی با جداری

جدول ۲. افزایش حاشیه‌ی واماندگی و بیشینه ضریب افزایش فشار به دست آمده حاصل از نتایج تجربی. [۹]

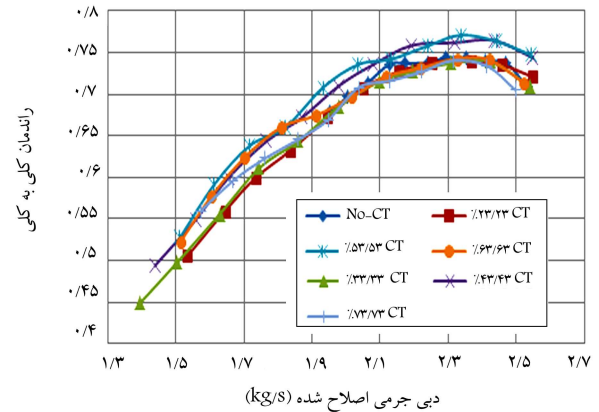
| ساختر (%) | $\dot{m}_{C-SP}$ (kg/s) | $\varphi_{SP}$ | $\psi_{Peck}$ | $\Delta(SM)$ (%) | $\Delta\psi_{PPRC}$ (%) |
|-----------|-------------------------|----------------|---------------|------------------|-------------------------|
| No-CT     | ۱,۹۵۱۹۷                 | ۰,۴۵۷۲۹        | ۰,۷۲۰۲۶       | -                | -                       |
| ۲۳,۲۳     | ۱,۵۳۴۱                  | ۰,۳۵۷۶۳        | ۰,۷۱۷۸        | ۲۱,۴             | -۰,۳۴                   |
| ۳۳,۳۳     | ۱,۳۹۴۳                  | ۰,۳۲۵۱۸        | ۰,۷۱۹۰۴       | ۲۸,۵۶            | -۰,۱۷                   |
| ۴۳,۴۳     | ۱,۴۳۸۹۲                 | ۰,۳۳۴۰۶        | ۰,۷۲۷۹۲       | ۲۶,۲۸            | ۱,۰۶                    |
| ۵۳,۵۳     | ۱,۵۱۱۸۹                 | ۰,۳۵۰۹۶        | ۰,۷۳۷۰۲       | ۲۲,۵۴            | ۲,۳۲                    |
| ۶۳,۶۳     | ۱,۵۱۲۹۸                 | ۰,۳۵۴۵۹        | ۰,۷۳۹۳۶       | ۲۲,۴۹            | ۲,۶                     |
| ۷۳,۷۳     | ۱,۵۷۲۵۱                 | ۰,۳۶۶۳۸        | ۰,۷۳۲۳۶       | ۱۹,۴۴            | ۱,۶۸                    |

جدول ۳. افزایش حاشیه‌ی واماندگی و بیشینه ضریب افزایش فشار به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی عددی.

| ساختر (%) | $\dot{m}_{C-SP}$ (kg/s) | $\varphi_{SP}$ | $\psi_{Peck}$ | $\Delta(SM)$ (%) | $\Delta\psi_{PPRC}$ (%) |
|-----------|-------------------------|----------------|---------------|------------------|-------------------------|
| No-CT     | ۱,۹۵۱۹۷                 | ۰,۳۸۵۴۱۷       | ۰,۷۶۹۲۷۶      | -                | -                       |
| ۲۳,۲۳     | ۱,۵۳۴۱                  | ۰,۳۰۰۵۸۸       | ۰,۷۷۰۶۶       | ۲۲               | ۰,۱۷                    |
| ۳۳,۳۳     | ۱,۳۹۴۳                  | ۰,۲۷۳۶۸۶       | ۰,۷۶۷۹۰۵      | ۲۸,۹۸            | -۳,۸                    |
| ۴۳,۴۳     | ۱,۴۳۸۹۲                 | ۰,۲۸۰۹۲۵       | ۰,۷۷۵۵۲۵      | ۲۷,۱۱            | ۰,۸                     |
| ۵۳,۵۳     | ۱,۵۱۱۸۹                 | ۰,۲۹۵۱۱۵       | ۰,۷۹۱۷۹۴      | ۲۳,۴۲            | ۲,۹                     |
| ۶۳,۶۳     | ۱,۵۱۲۹۸                 | ۰,۲۹۷۲۱        | ۰,۸۰۱۱۶۸      | ۲۲,۸۸            | ۴,۱                     |
| ۷۳,۷۳     | ۱,۵۷۲۵۱                 | ۰,۳۰۷۸۳۹       | ۰,۷۸۸۱۳       | ۲۰,۱             | ۲,۴                     |



شکل ۱۰. راندمان کلی به کلی مبتنی بر نتایج شبیه‌سازی عددی در حالات بدون استفاده و با کاربرد جداری بهبوددهنده به عقب کشیده شده.



شکل ۱۱. راندمان کلی به کلی مبتنی بر نتایج تجربی در حالات بدون/با کاربرد جداری بهبوددهنده به عقب کشیده شده.

انتظار نخواهد بود که در این شرایط عملکرد مطلوب کمپرسور متناظر با راندمان‌های کم‌تر نیز افزایش یابد. از این شکل مستفاد می‌شود که در تمامی حالات به‌کارگیری جداری بهبوددهنده با عدم پوشش‌های مختلف، در شرایط گذر جرمی عبوری قبل از آغاز وقوع پدیده‌ی واماندگی، راندمان کمپرسور کم‌تر از حالتی است که از جداری بهبوددهنده استفاده نشده است. شکل مزبور همچنین نشان می‌دهد که به‌کارگیری جداری بهبوددهنده این قابلیت را نیز داشته است که بروز پدیده‌ی خفقان را به میزان قابل ملاحظه‌ی و تا مقادیر گذرهای جرمی کم‌تر و متناظر با گذرهای جرمی عبوری، در شرایط مشابه آزمایشات تجربی مبتنی بر کاربرد جداری بهبوددهنده، به تأخیر بیندازد.

گذرهای جرمی پایین‌تر به‌گونه‌ی بسیار مطلوب عمل کند. همچنین در برخی از عدم پوشش‌ها امکان آن فراهم شده است تا افزایش راندمان کلی به کلی در مقایسه با شرایطی که جداری بهبوددهنده به‌کار نرفته است نیز حاصل آید. با این وجود، نتایج شبیه‌سازی عددی در این زمینه با نتایج تجربی اندکی ناسازگاری نشان می‌دهند. در شکل ۱۲ راندمان کلی به کلی کمپرسور در شرایط بدون استفاده از جداری بهبوددهنده و همچنین در وضعیت به‌کارگیری جداری بهبوددهنده با شش مورد مختلف عدم پوشش محوری و تر در حالت شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است. با توجه به این که جداری بهبوددهنده قادر به بهبود الگوی جریان در شرایط بحرانی متناظر با وقوع خفقان -- در مقایسه با شرایط بدون استفاده از جداری -- است، دور از

نکته‌ی دیگری که در ارتباط با شکل ۱۲ مطرح می‌شود این است که در کمپرسور بدون جداره‌ی بهبوددهنده، به‌هنگام رخداد ناپایداری راندمان به‌طور ناگهانی و شدید کاهش می‌یابد. این افت شدید راندمان نشان از بروز پدیده‌ی واماندگی ناگهانی در کمپرسور دارد، حال آن‌که با به‌کارگیری جداره‌ی بهبوددهنده این الگوی ناپایداری نیز از بین رفته است. استفاده از جداره‌ی بهبوددهنده باعث شده تا اولاً ناپایداری جریان در نتیجه‌ی واماندگی ناگهانی از بین برود و ثانیاً در دبی‌های جرمی پایین‌تر وقوع واماندگی ناگهانی به واماندگی تدریجی تغییر یابد. موارد مطرح‌شده درخصوص تغییر رفتار کمپرسور با جداره‌ی بهبوددهنده و تبدیل وضعیت رخداد واماندگی ناگهانی به واماندگی تدریجی با آنچه که پیش از این توسط نتایج تجربی تصریح شده<sup>[۲۴]، [۲۵]</sup> نیز سازگاری بسیار قابل ملاحظه‌ی دارد.

آنچه که از داده‌های آزمایشات تجربی نیز حاصل شده، نشان از افزایش بیشینه بازدهی کلی (مبتنی بر فشار سکون خروجی و فشار سکون ورودی) در برخی از عدم پوشش محوری جزء دوار دارد و این در حالی است که نتایج شبیه‌سازی عددی حاکی از آن است که بیشینه راندمان کلی (مبتنی بر فشار سکون خروجی و فشار سکون ورودی) با حضور جداره‌ی بهبوددهنده در تمامی عدم پوشش‌های جزء دوار، کم‌تر از حالتی است که جداره‌ی بهبوددهنده به‌کار برده نشده است.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق آرایش ساختار جریان کمپرسور زیرصوت، در شرایط واماندگی و خفقان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که هرگاه گذر جرمی جریان عبوری کاهش یابد، ناحیه‌ی از جریان برگشتی سیال ناپایدار در قسمت مکشی تیغه‌ی دوار و در حوالی نوک تیغه به‌وجود می‌آید. نتایج عددی تصریح می‌کند که جریان برگشتی سیال مبتلا به واماندگی، علاوه بر اعمال تأثیرات نامطلوب در حد فاصل تیغه‌های دوار همجوار، بر شرایط پائین‌دست جریان سیال عبوری و نیز بر جریان گذرنده از گذرگاه تیغه‌های جزء ثابت تأثیر می‌گذارد و منجر به جدایش جریان در گذرگاه بین تیغه‌های جزء ثابت می‌شود. جدایش جریان در گذرگاه تیغه‌ها منجر به وقوع انسداد مقطعی و بروز واماندگی دورانی می‌شود. شبیه‌سازی سه‌بعدی به‌منظور ارزیابی قابلیت جداره‌ی بهبوددهنده با تیغه‌های به عقب کشیده شده به‌منظور افزایش محدوده‌ی عملکردی کمپرسور انجام گرفته است. جداره‌ی بهبوددهنده با پره‌های به عقب کشیده شده باعث کاهش مؤلفه‌ی سرعت مماسی و افزایش مؤلفه‌ی سرعت محوری، و متعاقب آن افزایش انرژی کلی سیال در کمپرسور شده است. جداره‌ی بهبوددهنده مبتنی بر هندسه‌ی جداره مورد آزمایش قرار گرفته، در مطالعات عددی و با نسبت‌های مختلف از عدم پوشش و تر محوری جزء دوار مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی تصریح می‌کند که ساختارهای مورد مطالعه با موفقیت

انسداد جریان را در نزدیک نوک تیغه جزء دوار از بین برده‌اند. نتایج حاصله از کاربرد جداره‌ی بهبوددهنده با عدم پوشش‌های محوری وتر ۲۳/۲۳٪، ۳۳/۳۳٪، ۴۳/۴۳٪، ۵۳/۵۳٪، ۶۳/۶۳٪ و ۷۳/۷۳٪ روی جزء دوار در ناحیه‌ی همجوار با جداره‌ی بهبوددهنده نشان داده است:

- کاربرد جداره‌ی بهبوددهنده در تمامی موارد قادر بوده است تا نقطه‌ی آغازین وقوع واماندگی را به میزان قابل ملاحظه‌ی به تأخیر اندازد و کمپرسور را از خطر مواجهه با وقوع پدیده خفقان برهاند.
- جداره‌ی بهبوددهنده قابلیت آن را داشته است که در تمامی حالات، وقوع واماندگی ناگهانی را تغییر داده و رخداد ناپایداری جریان سیال را به یک واماندگی تدریجی تبدیل کند.
- جداره‌ی بهبوددهنده با عدم پوشش ۳۳/۳۳٪ باعث فراهم آوردن حداکثر بهبود از منظر افزایش حاشیه‌ی واماندگی به میزان ۲۸/۹۸٪ در حالت عددی شده است. شایان ذکر است که مقدار فوق در مطالعات آزمایشگاهی با نتایج عددی بسیار سازگار و برابر ۲۸/۵۶٪ بوده است.
- جداره‌ی بهبوددهنده با عدم پوشش وتر محوری ۶۳/۶۳٪ باعث تأمین بیشترین بهبود در میزان حداکثر ضریب افزایش فشار قابل حصول به میزان ۴/۱٪ شده است. با این وجود مقدار یادشده حاصل از آزمایشات تجربی مقداری کم‌تر و برابر ۲/۶٪ بوده است.

## فهرست علائم

- $m$ : دبی جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)  
 $\beta_1$ : زاویه‌ی تیغه‌ی دوار در ورود (درجه)  
 $\alpha_1$ : زاویه‌ی سیال در ورود به تیغه‌ی دوار (درجه)  
 $i$ : زاویه‌ی برخورد (درجه)  
 $\varphi$ : ضریب جریان  
 $\psi$ : ضریب فشار  
 $(SM)\Delta$ : بهبود حاشیه‌ی واماندگی (%)  
 $\psi_{PPRC}\Delta$ : بهبود حداکثر ضریب افزایش فشار (%)  
 $y^+$ : فاصله‌ی بدون بعد از دیواره

## زیرنویس

- $CT$ : جداره‌ی بهبوددهنده‌ی کمپرسور  
 $SC$ : جداره‌ی قدیمی کمپرسور  
 $SP$ : نقطه‌ی واماندگی

## پانویس‌ها

1. Vane-Recessed Casing Treatment
2. rotating stall

3. surge
4. flow local instability
5. flow global instability
6. rotor blade tip vortex
7. highly loaded blades



8. end-wall flow
9. tip clearance flow
10. tip leakage flow
11. stall initiation
12. stall passive control technique
13. casing treatment
14. circumferential groove
15. axial slot
16. recirculation cavity
17. unique ring
18. vane recessed
19. main flow stream
20. stall margin
21. recirculation cavity
22. axial cord rotor blade exposure
23. shroud
24. finite volume method
25. steady state
26. frozen rotor
27. no heat transfer
28. no slip
29. structured mesh
30. wall function
31. recirculation
32. hub diameter

### (References) منابع

1. Greitzer, E.M. "Surge and rotating stall in axial flow compressors, Part I: Theoretical compression system model", *Journal of Engineering for Power*, **98**(2), pp. 190-198 (1976).
2. Greitzer, E.M. Nikkanen, J.P. Haddad, D.E. Mazzawy, R.S. and Joslyn, H.D. "A fundamental criterion for the application of rotor casing treatment", *ASME Journal of Fluids Engineering*, **101**(2), pp. 237-243 (1979).
3. Adamczyk, J.J., Celestina, M.L. and Greitzer, E.M. "The role of tip clearance in high-speed fan stall", *ASME J. Turbomach.*, **115**, pp. 28-38 (1993).
4. Emmrich, R., Hönen, H. and Niehuis, R. "Time resolved investigation of an axial compressor with casing treatment part 1- experiment", ASME Paper, *Journal of Turbomachinery*, **131**(1), pp.11-18 (2008).
5. Ghila, A. and Tourlidakis, A. "Unsteady simulations of recess casing treatment in axial flow fans", ASME Paper, GT 2006-90388, pp.1745-1754 (2006).
6. Lu, X., Zhu, J., Nie, C. and Huang, W., "The stability-limiting flow mechanism in a subsonic axial-flow compressor and its passive control with casing treatment", ASME Paper, GT2008-50006, pp. 33-43 (2008).
7. Crook, A.J., Greitzer, E.M., Tan, C.S. and Adamczyk, J.J. "Numerical simulation of compressor endwall and casing treatment flow phenomena", *Journal of Turbomachinery*, **115**(3), pp.501-512 (1993).
8. Akhlaghi, M. "Application of a vane-recessed tubular passage casing treatment to a multistage axial flow compressor", PhD Dissertation, Department of Power, Propulsion & Aerospace Engineering, School of Engineering, Cranfield University, England, UK, November 2001, (2001).
9. Akhlaghi, M., Elder, R.L. and Ramsden, K.W. "Effects of a vane-recessed tubular-passage passive stall control technique on a multistage axial-flow compressor results of tests on the first stage with th rear stages removed " ASME Paper GT2003-38301, USA, 48th ASME IGTI Turbo/Expo, Atlanta, Georgia, pp.407-416 (16-19 June 2003,2003).

