



شبیه‌سازی عددی جریان دو بعدی سیال تراکم‌ناپذیر در کسکید توربوماشین‌ها با روش شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده

مهرداد یاری ساکنه^۱، بهزاد قدیری دهکردی^{۲*}، صالح فلاح^۳، فرزاد صفری^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشجوی دکترای مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴- کارشناس ارشد مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، ghadirib@modares.ac.ir

چکیده- پارامترهای مؤثر جریان تراکم‌ناپذیر، لزج و غیردائم داخل کسکید دو بعدی توربوماشین با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده تأخیری (DDES) بر پایه مدل RANS اسپالارت-آلماراس (SA) در اینجا بررسی می‌شود. مدل شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده که یک روش پیوندی RANS و LES می‌باشد به منظور کاهش هزینه محاسباتی روش LES ارائه شد. در این روش، نزدیک دیواره، داخل لایه مرزی از مدل آشفتگی RANS استفاده می‌شود و دور از دیواره روش به صورت خودکار به حالت LES می‌رود. DDES به منظور ارتقای مدل DES اصلی (DES97)، برای حل مشکل تخلیه تنش مدل شده پیشنهاد شد. برای مستقل کردن گذار از RANS به LES از اندازه سلول‌های شبکه، یک تابع جدید در مدل DDES تعریف شد. روش عددی به کار رفته برای گسسته‌سازی معادلات، حجم محدود در شبکه جابجا شده و شبکه مورد نظر برای میدان محاسباتی، متعامد است. همچنین از الگوی دیفرانسیلی پیوندی (الگوی ترکیبی متشکل از الگوی اختلاف مرکزی و بالادست) جهت گسسته‌سازی عبارات جابجایی در معادله ناویر-استوکس استفاده شده است. نتایج حاصل از این کار با نتایج مدل آشفتگی SA مقایسه شده است. **کلیدواژگان:** گردابه‌های جدا شده تأخیری، حجم محدود، جریان کسکید توربوماشین‌ها.

Numerical simulation of two-dimensional incompressible flow in turbomachinery cascades with detached-eddy simulation

M. Yari Sakene¹, B. Ghadiri Dehkordi^{2*}, S. Fallah³, F. Safari⁴

1- MSc Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

2- Assist. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

3- PhD Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

4- MSc, Mech. Eng., K.N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran. ghadirib@modares.ac.ir

Abstract- The aim of this research is to study effective parameters of incompressible, viscous and unsteady flow in turbomachinery cascades using the Spalart-Allmaras (SA) RANS-based delayed detached-eddy simulation method. Detached-eddy simulation is a hybrid RANS-LES method that was purposed in order to reduce LES computational cost. In this method, near wall, in boundary layer, RANS turbulence model is used and away from the wall, method automatically switches to LES. To develop original DES method (DES97), DDES was purposed to solve modeled stress depletion problem. A new function is introduced to the DDES model to make the transition from RANS to LES grid cell size independent. The numerical method that is used for discretization is staggered finite-volume and the grid is cartesian. Also hybrid differencing scheme (the scheme compound of central differencing scheme and upwind scheme) to discretization of convection terms in Navier-Stokes is used. The results of this study compared with the results of simulation with SA turbulence model.

Keywords: Delayed Detached-Eddy, Finite-Volume, Turbomachinery Cascade Flow

۱- مقدمه

روش شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده^۱، به عنوان یکی از روش‌های بسیار قوی و کارا جهت بررسی جریان جدایشی مغشوش نزدیک دیواره، در دینامیک سیالات محاسباتی کاربرد دارد. انگیزه ابتدایی استفاده از DES شبیه‌سازی جریان‌های با جدایش شدید در اعداد رینولدز بالا و استفاده از مزایای هر دو روش RANS و LES بود.

مدل‌های RANS در جریان‌های لایه مرزی ساده و پیوسته^۲، با استفاده از سلول‌های شبکه‌ای پهن شده^۳، می‌توانند با کمترین هزینه محاسباتی به کار روند و نتایج قابل قبولی ارائه دهند در صورتی که در جریان‌های با جدایش شدید نقائص اساسی از خود بروز می‌دهند. برعکس، LES در جریان‌های محدود به دیواره هزینه بالایی دارد و با افزایش عدد رینولدز این هزینه بیشتر می‌شود اما در جریان‌های جدایشی دور از تأثیر دیواره، هزینه کاربرد LES قابل کنترل و مستقل از عدد رینولدز است (منظور عدد رینولدز بر اساس اندازه بزرگترین طول مقیاس گردابه‌های جدا شده در پشت اجسام پخ^۴ مانند استوانه و غیره است) [۱].

روش DES اولین بار توسط اسپالارت و همکاران پیشنهاد شد [۲]. در سال ۲۰۰۰ در کاربرد DES برای یک نازل فرامنبسط شده^۵، ناحیه خاکستری^۶ مشکل‌ساز شد، گرچه در نخستین کاربرد صحیح روش، برای یک ایرفویل نازک، توسط شر و همکاران، چنین چیزی مشاهده نشده بود [۳]. مینتر و کونتز با استفاده از مدل انتقال تنش برشی^۷ با تغییر نسبتاً اساسی در صورت‌بندی مدل با عنوان DES حفاظت‌شده^۸ راه‌حلی قابل کاربرد پیشنهاد دادند که در آن محدودکننده DES که تعیین‌کننده مرز بین RANS و LES می‌باشد نه تنها به شبکه‌بندی، بلکه به حل نیز بستگی داشت [۲]. در ادامه اسپالارت و همکاران، حلی شبیه کار آن‌ها با عنوان DES تأخیری^۹ معرفی کردند که قابلیت کاربرد با بیشتر مدل‌های RANS را داراست [۴].

از دیگر مشکلات مورد بحث در DES فعال‌شدن ناخواسته عبارت اتلافی مدل RANS در وضعیت عملکرد DES در حالت LES بود که راه حل آن برای مدل اسپالارت-آلماراس، شامل یک تابع تصحیح، توسط اسپالارت و همکاران منتشر شد [۴].

تراوین و همکاران، در شبیه‌سازی جریان حول یک استوانه با جدایش آرام و آشفته، نشان دادند که مقادیر به دست آمده برای نیروی پسا، فرکانس ریزش، فشار و اصطکاک پوسته‌ای با نتایج تجربی نسبتاً موافقت دارد و عدم تطابق با تنش رینولدز تجربی در حدود ۳۰٪ و طول حباب بازچرخش در حدود دو برابر مقدار آزمایشگاهی است [۵].

در پیش‌بینی جریان حول استوانه در عدد رینولدز بالا توسط اسکویرز و همکاران متوسط ضریب نیروی به دست آمده با روش‌های DES و DDES توافق خوبی با نتایج تجربی داشت و ضرایب فشار حاصل از هر دو مدل در محدوده اندازه‌گیری‌های تجربی بود [۶].

از دیگر کارهای انجام شده با DES، حل جریان حول چرخ اربابه فرود ساده شده توسط هدجز و همکاران، کنترل فعال جریان توسط مکش/دمش در کارهای اسپالارت و همکاران و کریشنان و همکاران، جریان حول پرتاب‌گرهای^{۱۰} فضایی توسط فورسیت و همکاران و دِک و تریگوری، استوانه‌های مرتعش همراه شکاف توسط کُنستانتینیدیس و آکلی^{۱۱}، خلازایی^{۱۲} در جت‌ها توسط ادج و همکاران، جریان حول ساختمان‌ها توسط ویلسون و همکاران، وسایل با نیروی برای زیاد توسط کیومینگز و همکاران، نوسانات نامنظم^{۱۳} دم جت جنگنده توسط مروتون و همکاران، اتصالات دیواره-بال توسط فیو و همکاران و اندرکنش سیال-سازه توسط بی. وانگ و همکاران را می‌توان نام برد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها رضایت‌بخش بوده‌اند [۲].

زمینه دیگر مورد مطالعه با DES صدای آیرودینامیکی است که در این مورد می‌توان به کارهای مکیت و همکاران و گِرشیر و همکاران اشاره کرد. گِرشیر و همکاران جریان عبوری روی استوانه و ایرفویل متأثر از دنباله‌های برخوردی ناشی از جریان استوانه در عقب آن را، از نظر صوتی بررسی کردند [۲].

1. Detached Eddy Simulation
2. Attached
3. Flattened
4. Bluff Body
5. Over-expanded
6. Grey area
7. Shear Stress Transport (SST)
8. Shielded
9. Delayed Detached Eddy Simulation (DDES)

10. Launcher
11. Oakley
12. Cavitation
13. Buffet

معکوس و هنگام وقوع جدایش، کاربردهای توربوماشین و نیز هنگامی که عدد رینولدز پایین باشد (در کار حاضر عدد رینولدز، مربوط به ابتدای حالت آشفته جریان می‌باشد) مناسب است [۹]. دور از دیواره که گردابه‌های جریان جدایشی وجود دارند و قابلیت SA-RANS کاهش می‌یابد از LES استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که از روش DDES نیز برای جریان سه بعدی و ناپایا داخل کسکید کمپرسور استفاده شده است [۱۰].

هدف از کار حاضر که در آن از کدنویسی برای حل معادلات جریان استفاده شده صرفاً بکارگیری روش DDES در جریان توربوماشین و صحت‌سنجی آن در این نوع از جریانات و به دست آوردن ضرایب پسا و برآ و توزیع فشار روی سطوح مکش و فشار پره میانی کسکید و مقایسه با نتایج حاصل از مدل آشفتگی SA است که برای شبیه‌سازی جریان‌های با جدایش شدید مناسب می‌باشد.

۲- صورت‌بندی مدل DDES

به منظور تأکید بر جداکردن عملگرهای RANS و LES بین جریان‌های پیوسته و جدایشی، اولین بار مدل‌های RANS که فاصله عمودی از دیواره d_w را در خود جای می‌دهند به عنوان یک گزینه طبیعی برای فرمول‌بندی DES97، به عنوان طول مقیاس در نظر گرفته شدند. بنابراین مدل SA به عنوان یکی از گزینه‌ها انتخاب شد. طول مقیاس DES برای جایگزینی d_w در تمام عبارات معادله مدل SA به صورت رابطه (۱) انتخاب شد [۴].

$$L_{DES97} = \min(d_w, L_{LES}), \quad (1)$$

$$L_{LES} = C_{DES} \Delta \quad (2)$$

$$\Delta = \max(\Delta_i, \Delta_j, \Delta_k) \quad (3)$$

نزدیک دیواره جایی که $d_w < L_{LES}$ ، طول مقیاس DES معادل طول مقیاس مدل RANS است و صورت‌بندی مدل با مدل SA یکسان می‌باشد. دور از دیوار در جایی که $d_w > L_{LES}$ ، طول مقیاس L_{LES} در نظر گرفته می‌شود.

روش DES برای لایه مرزی ضخیم و نواحی با جدایش سطحی^۲ در شبکه‌بندی شامل سلول شبکه‌ای موازی نزدیک دیوار^۳ ($\Delta_{||}$) با اندازه‌ای کمتر از ضخامت لایه مرزی، می‌تواند

شُر و همکاران در بررسی جریان حول ایرفویل در زاویه حمله بالا مشاهده کردند که تفاوتی که محاسبات DES با URANS دارد این است که URANS گردابه‌های کوچک‌تر سطح مکش را فرو می‌نشاند و گردابه‌های صاف و بزرگ (گردابه‌های صاف و بزرگ یعنی گردابه‌هایی که مقادیر جریان به صورت طیفی و پیوسته از هسته به سمت بیرون گردابه تغییر می‌کند و گردابه‌های کوچک داخل خود را نشان نمی‌دهند که البته نواحی وسیعی را نیز در بر می‌گیرند) را رها^۱ رها می‌کند [۳].

در شبیه‌سازی دو بعدی جریان تراکم‌ناپذیر حول پروفیل بیضی شکل با استفاده از روش حجم کنترل برای عدد رینولدز مبتنی بر وتر پره $10^6 \times 7/21$ و عدد ماخ 0.7 با مدل آشفتگی SA-DES و SA که ضرایب برآ و پسا تا زوایای بالای نقطه واماندگی بررسی شدند مقادیر C_D و C_L تطابق خوبی با نتایج تجربی داشتند. البته دقت مدل DES نسبت به SA بیشتر بود ولی این مدل DES دو بعدی، در پیش‌بینی صحیح واماندگی برای این ساختار از جریان ناموفق بود [۷].

طراحی و پیش‌بینی عملکرد توربین‌ها و کمپرسورهای جریان محوری در اصل بر پایه اندازه‌گیری‌های جریان عبوری از پره‌های کسکیدهای دو بعدی بنا شده است در صورتی که جریان داخل یک توربوماشین در حالت کلی، غیرپایا و سه بعدی است. برای تحلیل کسکید، جریان بین ردیف پره‌های انفرادی در حالت دو بعدی بررسی می‌شود. این روش برای بسیاری از طراحی‌های کمپرسور و توربین مناسب است و مشخصات استخراجی که از تست عملی یا شبیه‌سازی آن به دست می‌آید معمولاً رضایت‌بخش اند [۸].

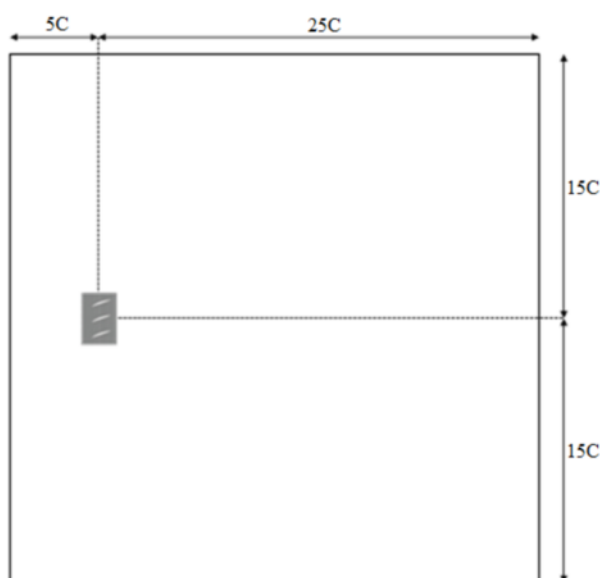
مقاله حاضر شبیه‌سازی جریان دچار جدایش شدید در حالت دو بعدی است. جدایش باعث افت فشار کل و تشکیل گردابه در خروجی از کسکید می‌شود که این گردابه‌ها بر روی جریان ردیف پره‌های پایین‌دست از لحاظ آشفتگی و اثرات آیرودینامیکی مؤثرند. همچنین بررسی نیروهای برآ و پسا در زوایای حمله بالا که توربوماشین دچار واماندگی می‌شود از اهمیت خاصی برخوردار است.

در مدل DES در نزدیکی دیواره از SA-RANS استفاده می‌شود. مدل SA برای لایه‌های مرزی در معرض گردان فشار

2. Shallow

3. Grid Spacing Parallel to the Wall

1. Shedding



شکل ۱ اندازه‌های میدان حل محاسباتی

در کار حاضر جریان سیال داخل کسکید توربوماشین جریان محوری با پره‌های تقریب زده شده، به صورت دو بعدی و تراکم‌ناپذیر بررسی می‌شود. عدد ماخ جریان ۰/۱۴ و بنابراین تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود. هندسه مورد بررسی شامل سه پره است که با زاویه کجی نصب پره ۲۵° درجه نسبت به خط مرجع افقی و صلبیت ۱ قرار گرفته‌اند.

شبکه میدان محاسباتی، به صورت متعامد جابجاشده^۴ غیر یکنواخت می‌باشد که در ناحیه‌ای که پره‌ها واقع شده‌اند، ریزتر شده است. فشار، نرخ تغییر لزجت آشفتگی و مقادیر اسکالر روی نقاط شبکه اصلی و مؤلفه‌های سرعت روی وجوه حجم کنترل اصلی یا همان شبکه جابجا شده محاسبه می‌شوند.

عدد رینولدز بر اساس طول وتر و اندازه سرعت جریان آزاد، 2×10^5 است و جریان آشفتنه فرض می‌شود. چگالی سیال $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ و لزجت $\mu = 0.0154872 \text{ kg/(m.s)}$ در نظر گرفته شده است. مطالعه در سه زاویه حمله ۴۵°، ۳۰° و ۲۰° درجه با الگوی گسسته‌سازی پیوندی با روش انفصال حجم محدود و روند حل تکرار سیمپل انجام می‌پذیرد.

در اینجا فرض می‌شود که جریان در ابتدای برخورد به لبه حمله پره‌ها به حالت آشفتنه می‌رسد و بنابراین از عبارات مرتبط با حالت انتقال از آرام به آشفتنه در معادله انتقال SA صرف‌نظر

رفتاری ناصحیح نشان دهد. این امر باعث می‌شود محل تلاقی^۱ دو حلگر (جایی که $d_w = C_{DES}$)، خارج لایه مرزی قرار گیرد. بنابراین محدودکننده DES، لزجت گردابه‌ای و متعاقب آن تنش رینولدزی مدل‌شده را بدون هیچ تنش حل‌شده قابل ملاحظه‌ای برای حفظ تعادل آن، کاهش می‌دهد که به آن با عنوان تخلیه تنش مدل‌شده اشاره می‌شود.

روش DDES، که توسط اسپالارت برای حل مشکل تخلیه تنش مدل شده بیان شد، مادامی که مدل RANS شامل لزجت گردابه‌ای باشد به کار می‌رود. طول مقیاس DDES، $\tilde{d}$ طبق رابطه (۴) تعریف می‌شود [۴].

$$\tilde{d} = d - f_d \max(0; d - C_{DES} \Delta) \quad (4)$$

$$f_d = 1 - \tanh([8r_d]^3) \quad (5)$$

$$r_d = \frac{\nu_t + \nu}{\sqrt{U_{ij} U_{ij}} k^2 d^2} \quad (6)$$

در رابطه (۶) ν_t لزجت گردابه‌ای سینماتیک، ν لزجت مولکولی، U_{ij} گرادیان سرعت، k ثابت کارمن و d فاصله تا دیوار است. تابع سنسور r_d مبتنی بر تابع r از مدل SA است. تابع تانژانت هاینربولیک در f_d طوری تنظیم شده است که نقطه شروع حالت LES درست بیرون لایه مرزی قرار می‌گیرد. این تابع مقدار $f_d = 0$ درون لایه مرزی آشفتنه و رشد تدریجی به سمت $f_d = 1$ در لبه لایه مرزی را نتیجه می‌دهد. همچنین این تابع، تعویض به حالت LES را، تا خارج لایه مرزی آشفتنه به تأخیر می‌اندازد که به همین دلیل این روش، DES تأخیری نامیده می‌شود.

۳- تعریف هندسه و شبکه میدان محاسباتی و

بیان مشخصات جریان و سیال

هندسه میدان محاسباتی جریان بر اساس پارامترهای هندسی جسم طرح شده است. فاصله مجموعه کسکید تا انتهای میدان محاسباتی باید به اندازه‌ای باشد که گردابه‌های پشت پره‌ها، ابعاد مناسب جهت تولید، ریزش و اتلاف در میدان سیال را داشته باشند و بر میدان جریان بالادست نیز تأثیر نگذارند. علاوه بر آن فاصله ورودی میدان تا لبه حمله پره‌ها باید به اندازه‌ای باشد که از تأثیرات ورودی کانال جریان در امان بماند. لازم به ذکر است که اندازه‌های داده شده در شکل ۱ بر اساس طول وتر پره می‌باشد.

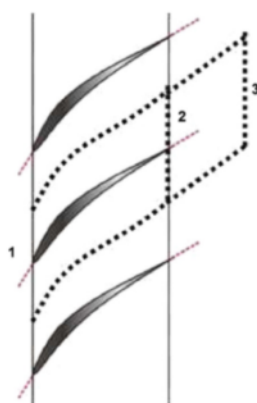
۴- اعتبارسنجی

در کار حاضر به منظور تأیید صحت شبیه‌سازی، نتایج حاصل با نتایج تجربی مقایسه شده است [۱۲]. در این مرجع، برای پره میانی واقع در کسکید، نتایج افت فشار کل برحسب زاویه حمله آورده شده است. طبق تعریف این مرجع افت فشار کل از طریق رابطه (۱۰) برآورد می‌شود.

$$\omega_3 = \left(\int_0^S (P_{t1} - P_{t3}) dy \right) / \left(\frac{1}{2} \rho S V_1^2 \right) \quad (10)$$

برای محاسبه انتگرال در رابطه (۱۰) از یک تقریب استفاده شده بدین صورت که فرض می‌شود فشار کل در ورودی و خروجی مقداری ثابت است. این مقدار ثابت برای جریان ورودی برابر با میانگین حسابی فشارهای کل در دو گوشه سطح ۱ و برای خروجی مساوی با میانگین حسابی فشارهای کل در سطح ۳ (مطابق شکل ۴) می‌باشد.

در شکل ۵ نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روش DDES با نتایج تجربی مقایسه شده است. مقایسه نشان می‌دهد که نتایج به مقدار تجربی نزدیک و تطابق خوبی با آن دارند. در کار حاضر چون از مدل اسپالارت-آلماراس استفاده می‌شود و این مدل جریان را تا لبه زیرلایه لزج حل می‌کند استفاده از تابع دیواره مجاز نمی‌باشد. در این حالت بایستی اولین گره در $y^+ = 1$ قرار گیرد. اما نتایج به دست آمده توسط دیگران نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی روی صفحه تخت توسط مدل SA، در محدوده $10 < y^+ < 20$ خطای پارامترهای جریان قابل اغماض است [۱۳].



شکل ۴ سطوح مورد استفاده برای محاسبه افت فشار کل [۱۲]

در اعتبارسنجی نتایج حل عددی ذکر این نکته لازم است

می‌شود. مدل آشفتگی مورد استفاده در اینجا روش SA-DDES می‌باشد.

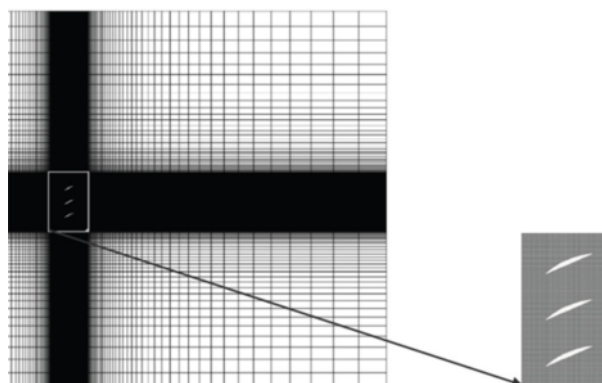
در ورودی میدان در جهت افقی و نیز از پایین، مطابق رابطه (۷)، شرط مرزی دیریکله^۱ و در بالای میدان محاسباتی، مطابق رابطه (۸)، شرط مرزی دیوار با لغزش و در خروجی میدان، مطابق رابطه (۹)، شرط مرزی نیومان در نظر گرفته می‌شود.

$$u = u_{in}, \quad v = v_{in} \quad (7)$$

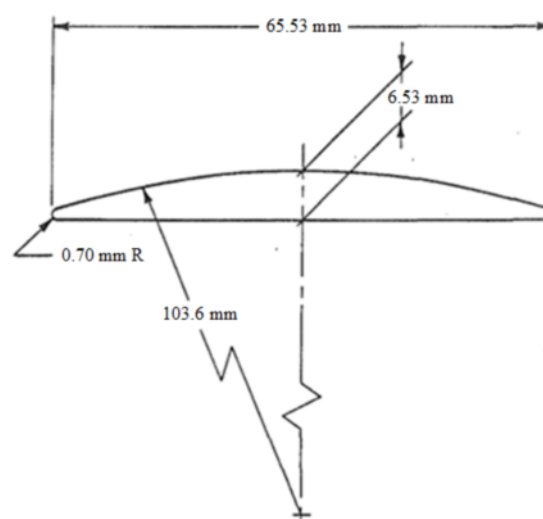
$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad v = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

جزئیات کامل شبکه و هندسه پره در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. نکته لازم به ذکر این که سطح مکش در هندسه پره، از یک کمان دایروی تشکیل یافته است.



شکل ۲ شبکه‌بندی میدان حل جریان سیال



شکل ۳ اندازه‌های پره مورد استفاده در کسکید برای حل جریان [۱۱]

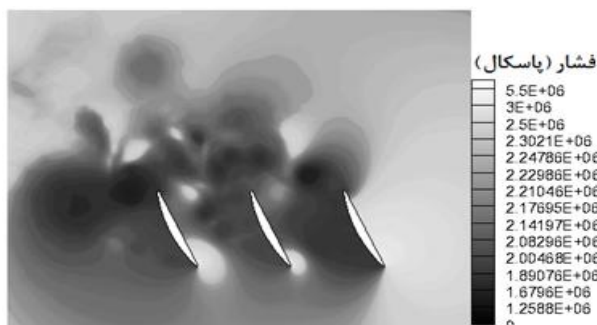
1. Dirichlet

۵- تحلیل نتایج

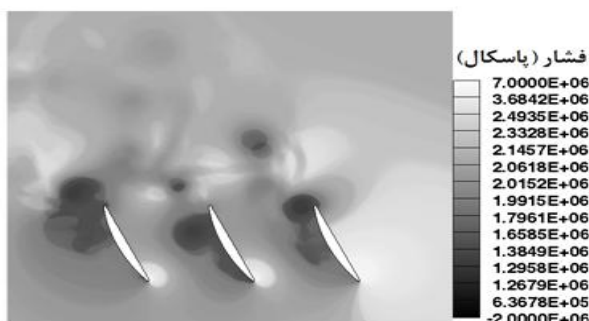
۵-۱- بررسی فشار

کانتور فشار به دست آمده با روش DDES در زاویه ۴۵ درجه در شکل ۶ جدا شدن جریان و تشکیل گردابه در سطح مکش و خروجی کسکید را به خوبی نشان می‌دهد. گردان‌های فشار در سطوح فشار و مکش هر کدام از پره‌های کسکید بیان می‌کنند که در پره‌های ابتدایی و انتهایی بلافاصله بعد از برخورد جریان به لبه حمله کاهش فشار بیشتری نسبت به پره میانی وجود دارد. همچنین مشاهده می‌شود که پس از یک کاهش فشار ناشی از جدایش جریان و اتلافات در خروجی، یک بازیابی فشار وجود دارد که در فاصله‌ای نسبتاً زیاد از خروجی کسکید روی می‌دهد.

مطابق شکل ۷ نواحی دایره‌ای و یا بعضاً بیضی شکل با گردان فشار بالا در زاویه حمله ۳۰ درجه نسبت به زاویه حمله ۴۵ درجه به مراتب کمتر است. در زاویه حمله ۲۰ درجه سطوح فشار بسیار یکنواخت‌تری نسبت به دو زاویه ۳۰ و ۴۵ درجه مشاهده می‌شود.



شکل ۶ کانتور فشار در زاویه ۴۵ درجه با روش DDES

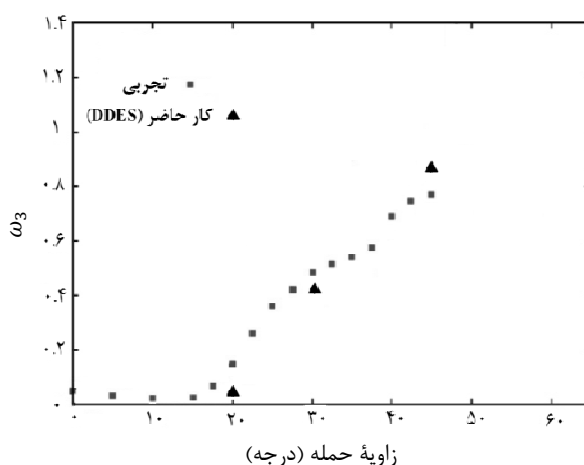


شکل ۷ کانتور فشار در زاویه ۳۰ درجه با روش DDES

کانتور فشار به دست آمده با روش SA در زاویه حمله ۴۵

که در ناحیه جریان مورد بررسی توسط LES (در اینجا چون ثابت مدل DES مشابه ثابت مدل مقیاس زیرشبکه اسمگورینسکی عمل می‌کند) هر چه که شبکه ریزتر باشد دقت حل بالاتر خواهد بود و حل به سمت DNS پیش می‌رود و به عبارتی استقلال از مش در این روش وجود ندارد ولی در حوزه مورد بررسی توسط RANS در نزدیکی دیواره اگر شبکه آنقدر ریز باشد که اولین گره در سطوح فشار و مکش روی هر سه پره در محدوده $10 < y^+ < 20$ قرار گیرد کافی است.

برای اینکه از آوردن نمودار y^+ سطوح فشاری و مکشی هر یک از سه پره خودداری شود، فقط مقادیر بیشینه و کمینه و مقدار متوسط y^+ در زاویه حمله مورد نظر آورده می‌شود. مشابه چنین کاری در مقالات دیگر صورت گرفته است [۱۴]. در جدول ۱، برای نمونه، در زاویه حمله ۴۵ درجه این مقادیر آورده شده است.



شکل ۸ اعتبارسنجی کار حاضر با نتایج تجربی و کار دیگران

جدول ۱ محاسبه فاصله بی‌بعد با تعداد سلول‌های مختلف در زاویه

حمله ۴۵ درجه

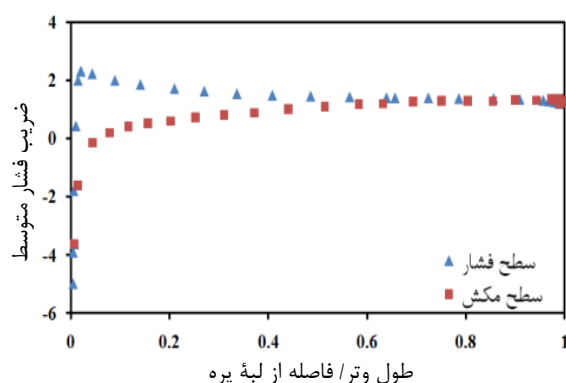
تعداد سلول‌ها	$y^+_{min.}$	$y^+_{max.}$	$y^+_{ave.}$
۱۴۷۲۰	۶۳	۴۰۰	۶۹
۳۶۹۸۴	۳۹	۲۶۷	۴۷
۱۰۲۳۸۴	۲۵	۱۷۴	۳۲
۳۱۲۸۹۶	۱۲	۱۰۲	۱۶

در اینجا اندازه سلول‌های شبکه طوری انتخاب شده که y^+ برای DDES در حدود ۱۰ و برای مدل SA در حدود ۱ قرار می‌گیرد.

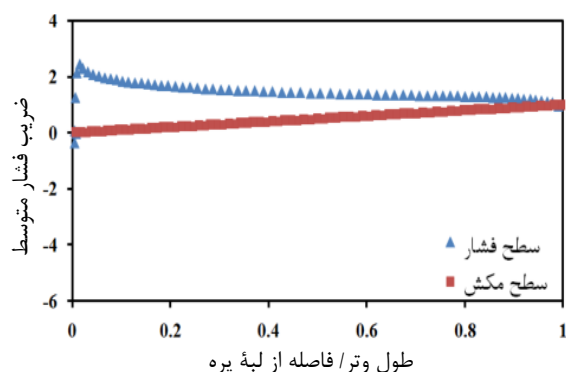
دارای لزجت دینامیکی بالا و به تبع آن نیروهای بین مولکولی بسیار قوی نسبت به آب خالص می‌باشد بنابراین از بین رفتن نیروهای بین مولکولی مایع و تبدیل به بخار و وقوع کاویتاسیون در این فشار بسیار بعید است. بنابراین در نظر گرفتن جریان به صورت تک فاز و عدم وارد کردن معادلات مربوط به حالت دوفازی فرضی منطقی به شمار می‌آید.

مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰ در زاویه حمله ۲۰ درجه، روی سطح مکش اختلاف فاحشی در توزیع فشار بین مدل DDES با مدل SA مشاهده می‌شود و مدل DDES توزیع یکنواخت‌تری از خود نشان می‌دهد.

در زاویه حمله ۳۰ درجه روند توزیع فشار روی سطوح مکش و فشار، به دست آمده با هر دو مدل DDES و SA تطابق خوبی با یکدیگر دارند ضمن این که در هر دو مدل نسبت به زاویه حمله ۲۰ درجه اختلاف بیشتری بین سطوح فشاری و مکش وجود دارد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهند که در زاویه حمله ۴۵ درجه تطابق نمودارهای DDES و SA روی هر دو سطح مکش و فشاری بسیار خوب است.



شکل ۹ توزیع ضریب فشار روی پره در زاویه ۲۰ درجه با روش DDES



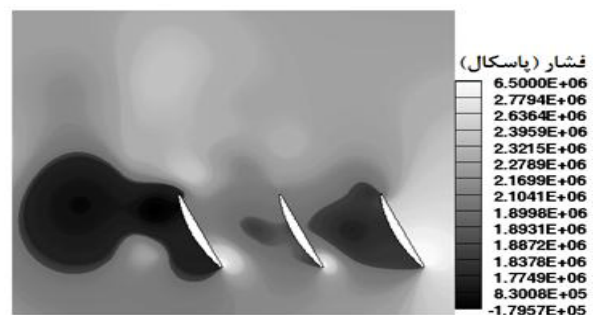
شکل ۱۰ توزیع ضریب فشار روی پره در زاویه ۲۰ درجه با روش SA

درجه نشان داده شده در شکل ۸ سطوح فشار بسیار یکنواخت‌تری نسبت به مدل DDES در این زاویه حمله به نمایش می‌گذارد. همچنین بازیابی فشار بسیار سریع‌تر انجام می‌پذیرد و حتی به داخل کسکید نیز نفوذ می‌کند. مقایسه کانتورهای فشار روی سطح فشار پره اول و دوم در شکل‌های ۶ تا ۸ عدم تقارن را نشان می‌دهد که نتیجه‌گیری می‌شود به علت این که تعداد پره‌های کسکید کم گرفته شده است اثر مرزها بر توزیع فشار وجود دارد.

چون روش DDES پیش‌تر در مورد جریان‌های مرتبط با اجسام واقع در فضای آزاد همانند اکثر جریان‌های مربوط به کاربردهای هوافضایی بررسی شده بود قصد اصلی در اینجا، بررسی این روش در جریان‌های محدود به دیواره همانند چنین جریانی و صحت‌سنجی آن در چنین شرایطی بود.

در مورد فشارهای منفی مشاهده شده در کنار کانتورهای فشار و وقوع کاویتاسیون باید گفت که این فشارها، نسبی می‌باشند پس فشار ۱۰۰۰۰- پاسکال برابر با ۱۳۲۵ پاسکال فشار مطلق می‌باشد.

نکته دیگر اینکه فشار در حباب‌های کاویتاسیون برابر فشار بخار سیال در دمای موردنظر در نظر گرفته می‌شود. اگر سیال با توجه به چگالی داده شده، آب در نظر گرفته شود فشار بخاری تقریباً معادل ۱۰۰۰ پاسکال در دمای صفر درجه سانتی‌گراد برای آن متصور است. اما در این دما لزجت آب حدوداً $\mu = 0.0017 \text{ kg/(m.s)}$ می‌باشد که حدود ۱۰ برابر کوچک‌تر از مقدار مفروض در مسأله می‌باشد و با توجه به این که لزجت مستقل از فشار و وابسته به دما است چنین ماده‌ای نمی‌تواند آب باشد.



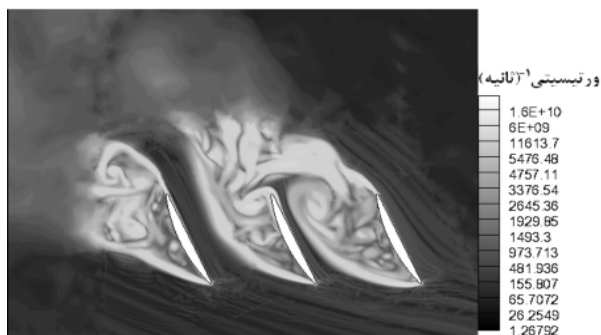
شکل ۸ کانتور فشار در زاویه ۴۵ درجه با روش SA

از طرف دیگر چون این ماده حتی اگر آب ناخالص باشد،

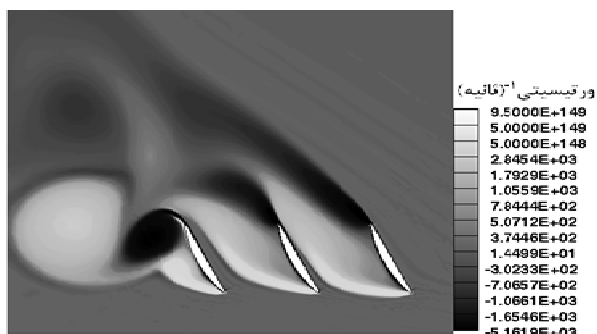
ساختاری کلی با نواحی یکنواخت از نظر مقداری نشان می‌دهد گرچه از این نظر که بیانگر مقادیر بیشتر ورتیسیتی داخل کسکید نسبت به خارج آن می‌باشد قابل قبول است. همان نتیجه‌گیری که در مورد عدم تقارن کانتورهای فشار گفته شد در مورد کانتورهای ورتیسیتی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ صادق است.

۵-۳- بررسی نمودارهای ضریب پسا برای پره میانی کسکید

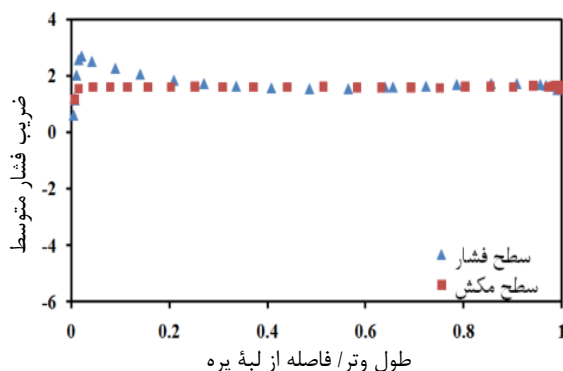
ضریب پسای متوسط پیش‌بینی شده برای زاویه حمله ۲۰ درجه در شکل ۱۶ توسط مدل SA در حدود چهار برابر ضریب پسای متوسط پیش‌بینی شده توسط DDES در شکل ۱۵ است. مطابق شکل ۱۷، مدل DDES در زاویه حمله ۳۰ درجه مقداری در حدود شش برابر کمتر از مقدار ضریب پسای پیش‌بینی شده توسط مدل SA در شکل ۱۸ ارائه می‌دهد. مدل DDES در زاویه حمله ۴۵ درجه، طبق شکل ۱۹، مقدار متوسط ضریب پسا را در حدود پنج برابر کمتر از مدل SA در شکل ۲۰ نشان می‌دهد.



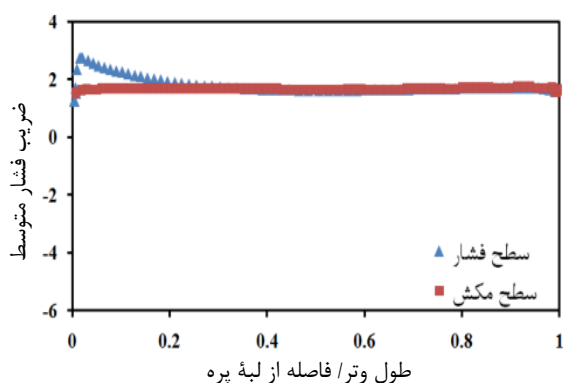
شکل ۱۳ توزیع ورتیسیتی روی پره در زاویه ۴۵ درجه با روش DDES



شکل ۱۴ توزیع ورتیسیتی روی پره در زاویه ۴۵ درجه با روش SA



شکل ۱۱ توزیع ضریب فشار روی پره در زاویه ۴۵ درجه با روش DDES



شکل ۱۲ توزیع ضریب فشار روی پره در زاویه ۴۵ درجه با روش SA

۵-۲- بررسی ورتیسیتی

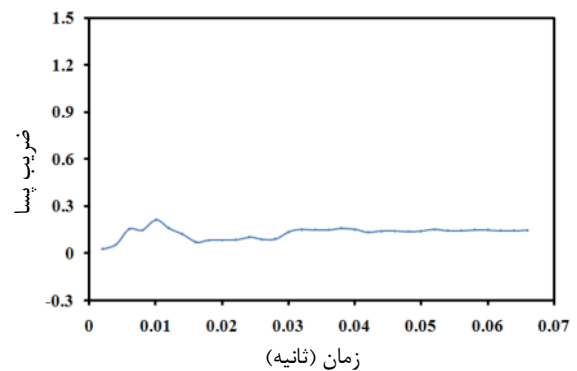
ورتیسیتی بیانگر میزان چرخش المان‌های جریان سیال است که از خواص یک جریان آشفته محسوب می‌شود. هنگام برخورد جریان به پره‌های کسکید که جدایش اتفاق می‌افتد در پشت حباب جدایش، حرکات نامنظم گردابی تشکیل می‌شود و به تدریج که از کسکید خارج می‌شوند رشد کرده و بزرگ و بزرگتر می‌شوند.

در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که با آغاز جدایش از لبه حمله، میزان ورتیسیتی به شدت افزایش می‌یابد و در طول یک ناحیه نواری به سمت خروجی ادامه می‌یابد ولی در نزدیکی سطوح مکش کاهش می‌یابد که ناشی از اثر لزجت در نزدیکی دیواره است. در خروجی کسکید، چون گردابه‌ها فضای بازتری را تجربه می‌کنند از شدت ورتیسیتی کاسته می‌شود اما از لحاظ اندازه بزرگتر می‌شوند.

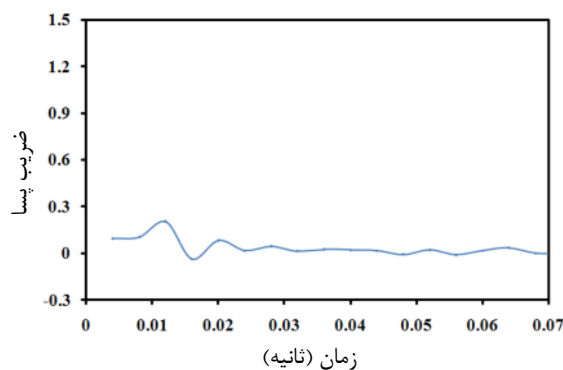
کانتور ورتیسیتی مربوط به روش SA در زاویه ۴۵ درجه نشان داده شده در شکل ۱۴ در مقایسه با روش DDES در شکل ۱۳، مقادیر کمتری برای ورتیسیتی داخل کسکید و

۴-۵- بررسی نمودارهای ضریب برآ برای پره میانی کسکید

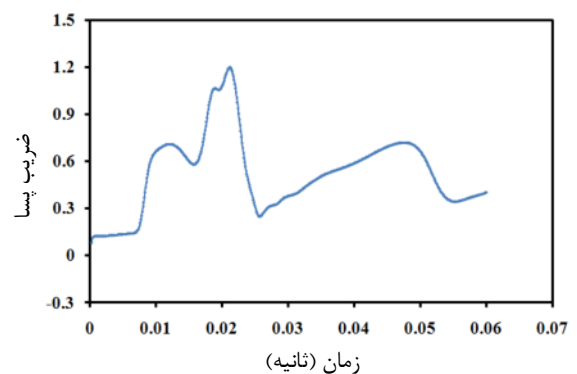
ضریب برآی به دست آمده در زوایای ۲۰ و ۳۰ درجه برای مدل‌های SA و DDES در شکل‌های ۲۱ تا ۲۴ نشان می‌دهد که مدل SA در حدود سه تا چهار برابر بیش‌تر از مدل DDES ضریب برآی متوسط را پیش‌بینی می‌کند. در زاویه ۴۵ درجه نیز مطابق شکل‌های ۲۵ و ۲۶ SA در حدود پنج برابر مدل DDES برای ضریب برآی متوسط در نظر می‌گیرد.



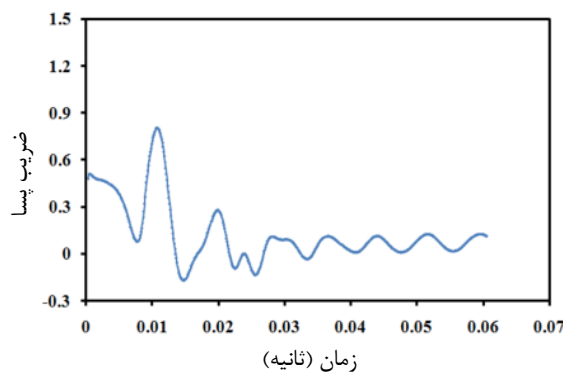
شکل ۱۵ ضریب پسا روی پره در زاویه ۲۰ درجه با روش DDES



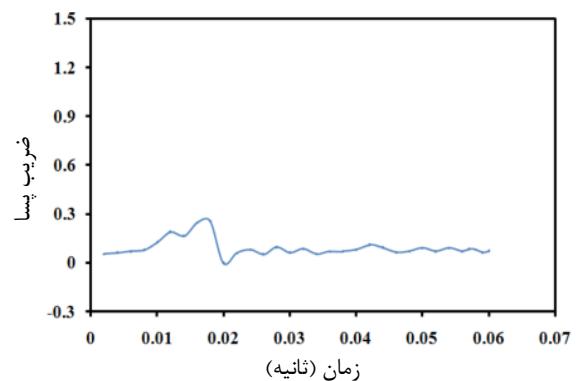
شکل ۱۹ ضریب پسا روی پره در زاویه ۴۵ درجه با روش DDES



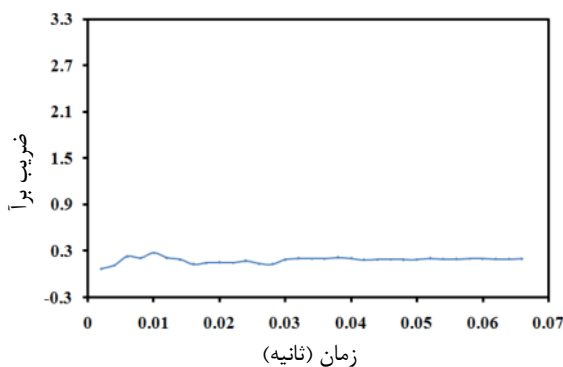
شکل ۱۶ ضریب پسا روی پره در زاویه ۲۰ درجه با روش SA



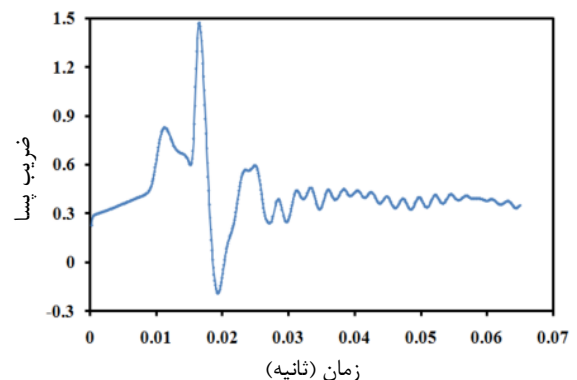
شکل ۲۰ ضریب پسا روی پره در زاویه ۴۵ درجه با روش SA



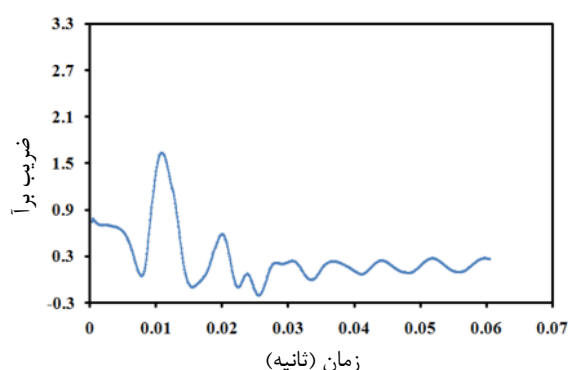
شکل ۱۷ ضریب پسا روی پره در زاویه ۳۰ درجه با روش DDES



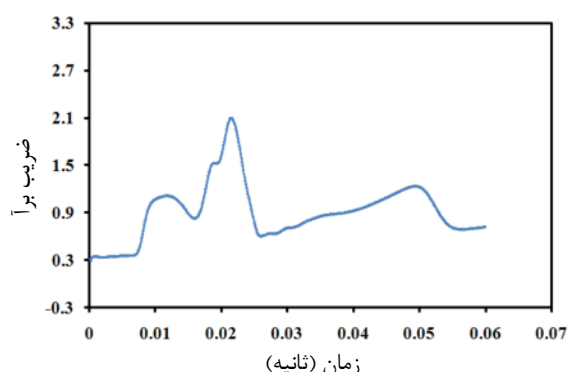
شکل ۲۱ ضریب برآ روی پره در زاویه ۲۰ درجه با روش DDES



شکل ۱۸ ضریب پسا روی پره در زاویه ۳۰ درجه با روش SA



شکل ۲۶ ضریب برآ روی پره در زاویه ۴۵ درجه با روش SA



شکل ۲۲ ضریب برآ روی پره در زاویه ۲۰ درجه با روش SA

در زاویه ۴۵ درجه نسبت به زاویه ۳۰ درجه کاهش شدیدی در حدود ۳۰٪ برای مدل DDES و کاهشی در حدود ۲۰٪ برای مدل SA برای ضریب برآ مشاهده می‌شود.

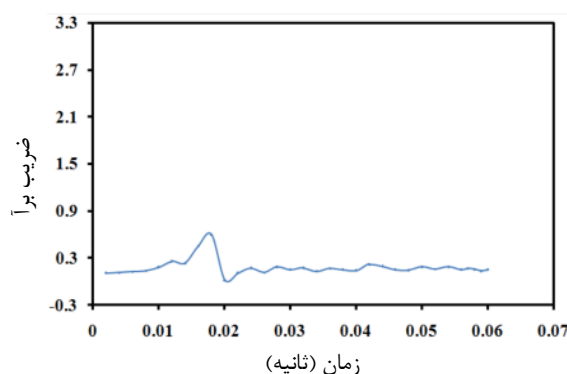
۶- نتیجه‌گیری

در جریان‌هایی نظیر جریان‌های جدایشی، شبیه‌سازی با روش DDES به علت بهره‌مندی از مزایای روش LES، ساختارهای گردابی را بهتر نمایش می‌دهد. روش SA جزئیات ساختارهای جدایشی جریان را نشان نمی‌دهد و حباب‌های جدایش را بزرگتر از اندازه به دست آمده با روش DDES پیش‌بینی می‌کند.

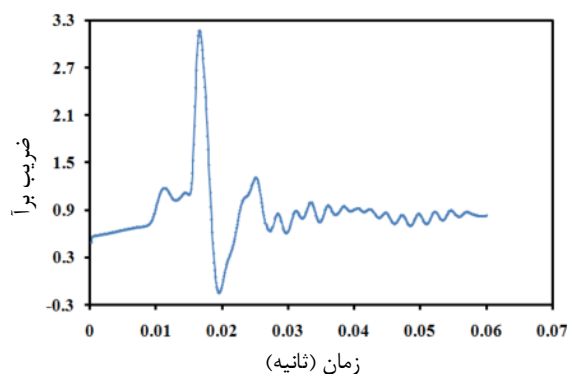
مدل SA برای پیش‌بینی ضریب پسای متوسط پره میانی در جریان داخل کسکید در هر دو زاویه حمله، ضریب پسای خیلی بیشتری نسبت به DDES که از مدل‌سازی کمتری استفاده می‌کند ارائه می‌دهد که کاربرد آن را در چنین مواردی به دلیل خطای زیاد محدود می‌کند. کاهش شدید ضریب پسا در زاویه ۴۵ درجه مربوط به حالت واماندگی است که هر دو روش در پیش‌بینی چنین رفتاری موفق‌اند. ضریب برآ نیز عیناً رفتاری همانند ضریب پسا از خود نشان می‌دهد.

نتایج توزیع فشار روی سطوح پره در هر دو روش DDES و SA در هر دو زاویه حمله تطابق خوبی با یکدیگر دارند و هر چه که زاویه حمله بالاتر می‌رود این تطابق بهتر می‌شود گرچه اختلافات اندکی مشاهده می‌شود. این امر با مشاهدات ای. تراوین و همکارانش که اثر DDES روی فشار را ناچیز به دست آورده بودند مطابقت دارد [۴]. بنابراین اگر هدف پیدا کردن توزیع فشار روی سطوح پره باشد استفاده از مدل SA بر DDES به دلیل هزینه محاسباتی پایین ارجحیت دارد.

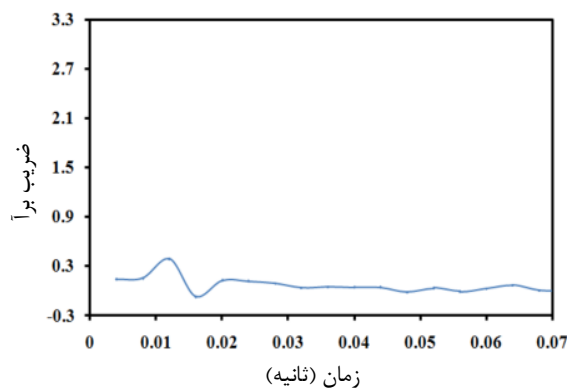
در خاتمه بایستی گفت که در این کار ابتدا صحت روش



شکل ۲۳ ضریب برآ روی پره در زاویه ۳۰ درجه با روش DDES



شکل ۲۴ ضریب برآ روی پره در زاویه ۳۰ درجه با روش SA



شکل ۲۵ ضریب برآ روی پره در زاویه ۴۵ درجه با روش DDES

- Simulation", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No. 10, 2008, pp. 1528-1536.
- [7] Benazza A., Blanco E., Abidat M., "2D Detached-Eddy Simulation Around Elliptic Airfoil at High Reynolds Number", *Journal of Applied Sciences*, Vol. 7, No. 4, 2007, pp. 547-552.
- [8] Shirani E., "Turbomachinery", *Publishing Center of Isfahan University of Technology*, 2nd Printing, Fall 2005. (In Persian).
- [9] Saniee-nejad M., *Fundamentals of Turbulent Flows and Their Modeling*, Daneshnegar Publication, 1st Edition, 2009 (In Persian).
- [10] Gu C., Chen M., Li Xu., Feng F., "Application Of Delayed Detached Eddy Simulation and RANS to Compressor Cascade Flow", *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air*, GT2008-50040, June 9-13, 2008, Berlin, Germany.
- [11] Yocum A. M., O'Brien W. F., "Separated Flow in A Low-Speed Two-Dimensional Cascade: Part I Flow Visualization and Time-Mean Velocity Measurements", *ASME J. Turbomach*, Vol. 115, No. 3, 1993, pp. 409 – 420.
- [12] Tauveron N., "Simulation of A Compressor Cascade With Stalled Flow Using Large Eddy Simulation With Two-layer Approximate Boundary Conditions", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240,
- [13] Nicholas R. H., "Turbulence Models and Their Application to Complex Flows", Ph.D. Thesis, University of Alabama at Birmingham., Revision 4.01, 2009.
- [14] H. Tabatabai, M. Boromand, M. Tayebi Rahni, "Comparing between 1D & 3D flow analysis in the on-engine small turbocharger experimentally and numerically", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 75-88, 2012. (In Persian)

گردابه‌های جداشده تأخیری با مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تأیید شده و چون تطابق تقریباً خوبی با نتایج تجربی داشتند صحت آن را تعمیم داده و در مقایسه با روش اسپالارت نتیجه گرفته شد که مدل آشفتگی اسپالارت-آلماراس در زوایای حمله بالا می‌تواند ضرایب برآ و پسا را با خطای بسیار بالا پیش‌بینی کند.

۷- مراجع

- [1] Mockett C., "A comprehensive study of detached-eddy simulation", *Von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinen systemeder Technischen Universität Berlin zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Ingenieur wissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation.*, 2009
- [2] Spalart P. R., "Detached-Eddy Simulation", *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, Vol 41, 2009, pp. 181 – 202.
- [3] Shur M., Spalart P., Strelets M., Travin A., "Detached-Eddy Simulation of An Airfoil at High Angle of Attack", *Proceedings of the 4th International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements*, W. Rodi and D. Laurence (Editors), 1999, pp. 669-678, Elsevier Science Ltd.
- [4] Spalart P., Deck S., Shur M., Squires K., Strelets M., Travin A., "A New Version of Detached-Eddy Simulation, Resistant to Ambiguous Grid Densities", *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 20, No. 3, 2006, pp. 181-195.
- [5] Travin A., Shur M., Strelets M., Spalart P. R., "Detached-Eddy Simulation Past A Circular Cylinder", *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 63, No. 1, 1999, pp. 293 – 313.
- [6] Squires K. D., Krishnan V., Forsythe J. R., "Prediction of the Flow Over A Circular Cylinder at High Reynolds Number Using Detached-Eddy