

مکا نیکی مدر سی دد ۱۴۹۲، دوره ۱۳ شماره ۱۳ می ۱۴۱-۱۳۱

مقاله پژوهشی کامل تاریخ دریافت ۹۱/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش ۹۲/۳/۱۱ ارائه در سایت ۹۲/۱۰/۳۰

# شبیه سازی عددی جریان دو بعدی سیال تراکم ناپذیر در کسکید توربوماشین ها با روش شبیه سازی گردابه های جداشده

مهرداد یاری ساکنه'، بهزاد قدیری دهکردی'\*، صالح فلاح'، فرزاد صفری'

مجله علمى يژوهش

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 \* تهران، صندوق پستی ۱۴۳۲– 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 که یک شدهٔ تأخیری (DDES) بر پایهٔ مدل RANS اسپالارت-آلماراس (SA) در اینجا بررسی میشود. مدل شبیهسازی گردابههای جدا شده که یک روش پیوندی RANS و ESL میباشد به منظور کاهش هزینهٔ محاسباتی روش IES ارائه شد. در این روش، نزدیک دیواره، داخل لایهٔ مرزی از مدل آشفتگی RANS استفاده میشود و دور از دیواره روش به صورت خودکار به حالت IES میرود. SDD ابه منظور ارتقای مدل ES اصلی مدل آشفتگی RANS استفاده میشود و دور از دیواره روش به صورت خودکار به حالت IES میرود. BDES به منظور ارتقای مدل ESS اصلی مدل آشفتگی RANS به SDD استفاده میشود و دور از دیواره روش به صورت خودکار به حالت RANS میرود. SDD به منظور ارتقای مدل ESS اصلی (DES97)، برای حل مشکل تخلیهٔ تنش مدل شده پیشنهاد شد. برای مستقل کردن گذار از RANS به IES از اندازهٔ سلولهای شبکه، یک تابع جدید در مدل SDD تعریف شد. روش عدی به کار رفته برای گسسته سازی معادلات، حجم محدود در شبکهٔ جابجا شده و شبکهٔ مورد نظر برای میدان میدان معادلات، حجم محدود در شبکهٔ جابجا شده و شبکهٔ مورد نظر برای میدان محاست می میدان می از الگوی از تقای مدل SDD تعلی میدان برای مید برای گسسته ازی معادلات، حجم محدود در شبکهٔ جابجا شده و شبکهٔ مورد نظر برای میدان میدان میدان میدان یو الگوی در کیبی متشکل از الگوی اختلاف مرکزی و بالادست) جهت میدان میدان یو بالادست) جهت گسسته سازی عبارات جابجایی در معادلهٔ ناویر استوکس استفاده شده است. نتایج حاصل از این کار با نتایج مدل آشفتگی AS مقایسه شده است. **کلیدواژگان:** گردابههای جدانهٔ تأخیری، حجم محدود، جریان کسکید توربوماشینها.

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

M. Yari Sakene<sup>1</sup>, B. Ghadiri Dehkordi<sup>2\*</sup>, S. Fallah<sup>3</sup>, F. Safari<sup>4</sup>

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 شبیه سازی گردابه های جداشده<sup>۱</sup>، به عنوان یکی از روش شبیه سازی گردابه های جداشده<sup>۱</sup> به عنوان یکی از موشهای بسیار قوی و کارا جهت بررسی جریان جدایشی مغشوش نزدیک دیواره، در دینامیک سیالات محاسباتی کاربرد دارد. انگیزهٔ ابتدایی استفاده از SAS شبیه سازی جریان های با جدایش شدید در اعداد رینولدز بالا و استفاده از مزایای هر دو روش RANS و RASS بود.

مدلهای RANS در جریانهای لایه مرزی ساده و پیوسته<sup>۲</sup>، با استفاده از سلولهای شبکهای پهن شده <sup>۲</sup>، می توانند با کمترین هزینهٔ 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 هزینهٔ بالایی دارد و با افزایش عدد رینولدز این هزینه بیشتر می شود اما در جریانهای جدایشی دور از تأثیر دیواره، هزینهٔ کاربرد LES قابل کنترل و مستقل از عدد رینولدز است (منظور عدد رینولدز بر اساس اندازهٔ بزرگترین طول مقیاس گردابههای جدا شده در پشت اجسام پخ<sup>۲</sup> 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<sup>۵</sup>، ناحیهٔ خاکستری<sup>2</sup> مشکلساز شد، گرچه در نخستین کاربرد صحیح روش، برای یک ایرفویل نازک، توسط شر و همکاران، چنین چیزی مشاهده نشده بود [۳]. منتر و شر و همکاران، چنین چیزی مشاهده نشده بود [۳]. منتر و کُونتز با استفاده از مدل انتقال تنش برشی<sup>۷</sup> با تغییر نسبتاً اساسی در صورتبندی مدل با عنوان ZES حفاظت-شده<sup>۸</sup> راه حلی قابل کاربرد پیشنهاد دادند که در آن محدودکنندهٔ راه حلی قابل کاربرد پیشنهاد دادند که در آن محدودکنندهٔ DES می باشد نه تنها به شبکهبندی، بلکه به حل نیز بستگی داشت [۲]. در ادامه DES تا می باکه به حل نیز بستگی داشت [۲]. در ادامه میالارت و همکاران، حلی شبیه کار آنها با عنوان ZES ماریاده ای رادام ای معرفی کردند که قابلیت کاربرد با بیشتر مدلهای RANS را داراست [۴].

1. Detached Eddy Simulation

- 4. Bluff Body
- 5. Over-expanded 6. Grey area
- 7. Shear Stress Transport (SST)

9. Delayed Detached Eddy Simulation (DDES)

از دیگر مشکلات مورد بحث در DES فعال شدن ناخواستهٔ 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 محدودهٔ اندازه گیری های تجربی بود [۶].

از دیگر کارهای انجام شده با DES، حل جریان حول چرخ ارابهٔ 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<sup>۱۰</sup> فضایی توسط فورسیت و همکاران و دِک و تُریگوری، استوانههای مرتعش همراه شکاف توسط گنستانتینیدِس و اَکلِی<sup>۱۱</sup>، خلازایی<sup>۱۲</sup> در جتها توسط ادج و همکاران، جریان حول ساختمانها توسط ویلسون و همکاران، وسایل با نیروی برآی زیاد توسط کیومینگز و همکاران، نوسانات نامنظم<sup>۱۳</sup> دُم جت جنگنده توسط مُرتون 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 رضایت بخش بودهاند [۲].

زمینهٔ دیگر مورد مطالعه با DES صدای آیرودینامیکی است که در این مورد میتوان به کارهای مُکِت و همکاران و گِرِشنِر و همکاران اشاره کرد. گِرِشنِر 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].

<sup>2.</sup> Attached

<sup>3.</sup> Flattened

<sup>8.</sup> Shielded

<sup>10.</sup> Launcher

<sup>11.</sup> Oakley

<sup>12.</sup> Cavitation

<sup>13.</sup> Buffet

شُر و همکاران در بررسی جریان حول ایرفویل در زاویهٔ حملهٔ 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<sup>۱</sup> رها<sup>۱</sup> میکند [۳].

در شبیه سازی دو بعدی جریان تراکم ناپذیر حول پروفیل بیضی شکل با استفاده از روش حجم کنترل برای عدد رینولدز مبتنی بر وتر پره ۲۰<sup>۶</sup> ×۱/۲۱ و عدد ماخ ۲۰/۰ با مدل آشفتگی SA-DES و SA که ضرایب برآ و پسا تا زوایای بالای نقطهٔ واماندگی بررسی شدند مقادیر C<sub>L</sub> و C<sub>D</sub> تطابق خوبی با نتایج تجربی داشتند. البته دقت مدل DES نسبت به SA بیشتر بود ولی این مدل DES دو بعدی، در پیش بینی صحیح واماندگی برای این ساختار از جریان ناموفق بود [۲].

طراحی و پیش بینی عملکرد توربین ها و کمپر سورهای جریان محوری در اصل بر پایهٔ اندازه گیری های 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 می شود. این روش برای بسیاری از طراحی های کمپر سور و توربین مناسب است و مشخصات استخراجی که از تست عملی یا شبیه سازی آن به دست می آید معمولاً رضایت بخش اند [۸].

مقالهٔ حاضر شبیه سازی جریان دچار جدایش شدید در حالت دو بعدی است. جدایش باعث افت فشار کل و تشکیل گردابه در خروجی از کسکید می شود که این گردابه ها بر روی جریان ردیف پره های پایین دست از لحاظ آشفتگی و اثرات آیروالاستیکی مؤثرند. همچنین بررسی نیروهای برآ و پسا در زوایای حملهٔ بالا که توربوماشین دچار واماندگی می شود از اهمیت خاصی برخوردار است.

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

(۲)

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 پرهٔ میانی کسکید و مقایسه با نتایج حاصل از مدل آشفتگی SA است که برای شبیهسازی جریانهای با جدایش شدید مناسب میباشد.

### **DDES** -۲ صورتبندی مدل

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

$L_{\text{DES97}} = \min(d_{\text{w}}, L_{\text{LES}}), \qquad (1)$
---

 $L_{\rm LES} = C_{\rm DES} \Delta$ 

 $\Delta = \max(\Delta_i, \Delta_j, \Delta_k)$  (°)

DES نزدیک دیواره جایی که  $d_w < L_{LES}$  مول مقیاس DES معادل طول مقیاس مدل RANS است و صورتبندی مدل با مدل SA یکسان میباشد. دور از دیوار در جایی که مدل  $d_w > L_{LES}$  یکسان میباشد. دور از دیوار در جایی که  $d_w > L_{LES}$  روش DES برای لایهٔ مرزی ضخیم و نواحی با جدایش سطحی<sup>7</sup> در شبکهبندی شامل سلول شبکهای موازی نزدیک دیوار<sup>7</sup> ( $||\Delta|$ ) با اندازهای کمتر از ضخامت لایهٔ مرزی، میتواند

<sup>1.</sup> Shedding

ىچىنىدىسى مىكائىيىك ھەرىس فوقالعادە اسفند ١٣٩٢. دورة ١٣ شمارة ١٣ www.SID.ir

<sup>2.</sup> Shallow

<sup>3.</sup> Grid Spacing Parallel to the Wall

مهرداد یاری ساکنه و همکاران

رفتاری ناصحیح نشان دهد. این امر باعث می شود محل تلاقی <sup>۱</sup> دو حلگر (جایی که  $C_{DES} = c_w$ )، خارج لایهٔ مرزی قرار گیرد. بنابراین محدودکنندهٔ DES، لزجت گردابهای و متعاقب آن تنش رینولدزی مدل شده را بدون هیچ تنش حل شدهٔ قابل ملاحظهای برای حفظ تعادل آن، کاهش می دهد که به آن با عنوان تخلیهٔ تنش مدل شده اشاره می شود.

 $\tilde{d} = d - f_{\rm d}\max(0; d - C_{\rm DES}\Delta) \tag{(f)}$ 

$$f_{\rm d} = 1 - \tanh([8r_{\rm d}]^3) \tag{(a)}$$

$$r_{\rm d} = \frac{1}{\sqrt{U_{ij}U_{ij}\kappa^2 d^2}} \tag{8}$$

در رابطهٔ (۶)  $v_t$  لزجت گردابهای سینماتیک، v لزجت مولکولی،  $U_{ij}$  گرادیان سرعت،  $\kappa$  ثابت کارمن و b فاصله تا دیوار است. تابع سنسور  $r_a$  مبتنی بر تابع r از مدل SA است. تابع تانژانت هایپربولیک در  $f_a$  طوری تنظیم شده است که نقطهٔ شروع حالت LES درست بیرون لایهٔ مرزی قرار می گیرد. این تابع مقدار  $0 = f_a$  درون لایهٔ مرزی آشفته و رشد تدریجی به سمت  $1 = f_a$  در لبهٔ لایهٔ مرزی را نتیجه میدهد. همچنین این تابع، تعویض به حالت LES را، تا خارج لایهٔ مرزی آشفته به تأخیر می اندازد که به همین دلیل این روش، ZES تأخیری نامیده می شود.

# ۳- تعریف هندسه و شبکهٔ میدان محاسباتی و بیان مشخصات جریان و سیال

هندسهٔ میدان محاسباتی جریان بر اساس پارامترهای هندسی جسم طرح شده است. فاصلهٔ مجموعهٔ 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 فاصلهٔ ورودی میدان تا لبهٔ حملهٔ 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.



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 تراکماناپذیر بررسی میشود. عدد ماخ جریان ۱۰/۴ و بنابراین تراکماناپذیر در نظر گرفته میشود. هندسهٔ مورد بررسی شامل سه پره است که با زاویهٔ کجی نصب پره<sup>۲</sup> ۲۵ درجه نسبت به خط مرجع افقی و صلبیت<sup>۳</sup> ۱ قرار گرفتهاند.

شبکهٔ میدان محاسباتی، به صورت متعامد جابجاشده<sup><sup>†</sup> غیر یکنواخت میباشد که در ناحیهای که پرهها واقع شدهاند، ریزتر شده است. فشار، نرخ تغییر لزجت آشفتگی و مقادیر اسکالر روی نقاط شبکهٔ اصلی و مؤلفههای سرعت روی وجوه حجم کنترل اصلی یا همان شبکهٔ جابجا شده محاسبه می شوند.</sup>

عدد رینولدز بر اساس طول وتر و اندازهٔ سرعت جریان آزاد، عدد رینولدز بر اساس طول وتر و اندازهٔ سرعت جریان آزاد،  $\mu = 0.0154872 \text{ kg/(m.s)}$  و لزجت  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ در نظر گرفته شده است. مطالعه در سه زاویهٔ حمله ۴۵ درجه، ۳۰ درجه 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 لبهٔ حملهٔ پرهها به حالت آشفته میرسد و بنابراین از عبارات مرتبط با حالت انتقال از آرام به آشفته در معادلهٔ انتقال SA صرفنظر

<sup>1.</sup> Interface

<sup>2.</sup> Stagger

<sup>3.</sup> Solidity

<sup>4.</sup> Staggered

شبیهسازی عددی جریان دو بعدی سیال تراکمناپذیر در ...

می شود. مدل آشفتگی مورد استفاده در اینجا روش -SA می اشد. DDES می اشد.

در ورودی میدان در جهت افقی و نیز از پایین، مطابق رابطهٔ (۷)، شرط مرزی دیریکله <sup>۱</sup> و در بالای میدان محاسباتی، مطابق رابطهٔ (۸)، شرط مرزی دیوار با لغزش و در خروجی میدان، مطابق رابطهٔ (۹)، شرط مرزی نیومان در نظر گرفته می شود.

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

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \qquad v = 0 \tag{(A)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \qquad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \qquad \frac{\partial 1}{\partial x} = 0$$
 (9)

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



شکل ۲ شبکهبندی میدان حل جریان سیال



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

۴- اعتبارسنجی

در کار حاضر به منظور تأیید صحت شبیه سازی، نتایج حاصل با نتایج تجربی مقایسه شده است [۱۲]. در این مرجع، برای پرهٔ میانی واقع در کسکید، نتایج افت فشار کل بر حسب زاویهٔ حمله آورده شده است. طبق تعریف این مرجع افت فشار کل از طریق رابطهٔ (۱۰) برآورد می شود.

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

برای محاسبهٔ انتگرال در رابطهٔ (۱۰) از یک تقریب استفاده شده بدین صورت که فرض می شود فشار کل در ورودی و خروجی مقداری ثابت است. این مقدار ثابت برای جریان ورودی برابر با میانگین حسابی فشارهای کل در دو گوشهٔ سطح ۱ و برای خروجی مساوی با میانگین حسابی فشارهای کل در سطح ۳ (مطابق شکل ۴) می باشد.

در شکل ۵ نتایج حاصل از شبیه سازی با روش DDES با نتایج تجربی مقایسه شده است. مقایسه نشان می دهد که نتایج به مقدار تجربی نزدیک و تطابق خوبی با آن دارند. در کار حاضر چون از مدل اسپالارت-آلماراس استفاده می شود و این مدل جریان را تا لبهٔ زیرلایهٔ لزج حل می کند استفاده از تابع دیواره محاز نمی باشد. در این حالت بایستی اولین گره در 1 = +yقرار گیرد. اما نتایج به دست آمده توسط دیگران نشان می دهد که در شبیه سازی روی صفحهٔ تخت توسط مدل SA، در محدودهٔ 20 > +y > 10 خطای پارامترهای جریان قابل اغماض است [10].



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

در اعتبارسنجی نتایج حل عددی ذکر این نکته لازم است

<sup>1.</sup> Dirichlet

مهندسی مکانیک مدرس فوقالعاده اسفند ۱۳۹۲، دورهٔ ۱۳ شمارهٔ ۱۳ www.SID.ir

که در ناحیهٔ جریان مورد بررسی توسط LES (در اینجا چون ثابت مدل DES مشابه ثابت مدل مقياس زيرشبكهٔ اسماگورینسکی عمل میکند) هر چه که شبکه ریزتر باشد دقت حل بالاتر خواهد بود و حل به سمت DNS پیش می رود و به عبارتی استقلال از مش در این روش وجود ندارد ولی در حوزهٔ مورد بررسی توسط RANS در نزدیکی دیواره اگر شبکه آنقدر ریز باشد که اولین گره در سطوح فشار و مکش روی هر سه يره در محدودهٔ  $20 < y^+ < 10$  قرار گيرد كافی است.

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



شکل ۵ اعتبارسنجی کار حاضر با نتایج تجربی و کار دیگران

**جدول ۱** محاسبه فاصلهٔ بیبعد با تعداد سلولهای مختلف در زاویهٔ حملهٔ ۴۵ در حه

$y_{ave.}^+$	$y_{\rm max.}^+$	$y_{\min}^+$	تعداد سلولها	
۶٩	۴	۶۳	1471.	١
۴۷	787	٣٩	36976	۲
٣٢	174	۲۵	1.227	٣
18	١٠٢	17	317762	۴

 $y^+$  در اینجا اندازهٔ سلولهای شبکه طوری انتخاب شده که برای DDES در حدود ۱۰ و برای مدل SA در حدود ۱ قرار مي گيرد.

۵- تحليل نتايج ۵-۱- بررسی فشار

> ار (باسكال) 5.5E+06 3E+06 2 5E+DE

کانتور فشار به دست آمده با روش DDES در زاویهٔ ۴۵ درجه در شکل ۶ جدا شدن جریان و تشکیل گردابه در سطح مکش و خروجی کسکید را به خوبی نشان میدهد. گرادیانهای فشار در سطوح فشار و مکش هر کدام از یرههای کسکید بیان میکنند که در پرههای ابتدایی و انتهایی بلافاصله بعد از برخورد جریان به لبهٔ حمله کاهش فشار بیشتری نسبت به پرهٔ میانی وجود دارد. همچنین مشاهده می شود 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 گرادیان فشار بالا در زاویهٔ حملهٔ ۳۰ درجه نسبت به زاویهٔ حملهٔ ۴۵ درجه به مراتب کمتر است. در زاویهٔ حملهٔ ۲۰ درجه سطوح فشار بسیار یکنواخت تری نسبت به دو زاویهٔ ۳۰ و ۴۵ درجه مشاهده می شود.







درجه نشان داده شده در شکل ۸ سطوح فشار بسیار یکنواختتری نسبت به مدل DDES در این زاویهٔ حمله به نمایش می گذارد. همچنین بازیابی فشار بسیار سریعتر انجام می پذیرد و حتی به داخل کسکید نیز نفوذ می کند.

مقایسهٔ کانتورهای فشار روی سطح فشار پرهٔ اول و دوم در شکلهای ۶ تا ۸ عدم تقارن را نشان میدهد که نتیجه گیری 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 ۱۰۰۰۰۰- پاسکال برابر با ۱۳۲۵ پاسکال فشار مطلق میباشد.

نکتهٔ دیگر اینکه فشار در حبابهای کاویتاسیون برابر فشار بخار سیال در دمای موردنظر در نظر گرفته می شود. 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 (m.s)/kg (m.s می باشد که حدود ۱۰ برابر کوچکتر از مقدار مفروض در مسأله می باشد و با توجه به این که لزجت مستقل از فشار و وابسته به دما است چنین ماده ای نمی تواند آب باشد.



**شکل ۸** کانتور فشار در زاویهٔ ۴۵ درجه با روش SA

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

مهندیسی مکانیک هدرس فوق العاده اسفند ۱۳۹۲. دورهٔ ۱۳ شمارهٔ ۱۳ www.SID.ir

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 زاویهٔ حملهٔ 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 زاویهٔ حملهٔ 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 زاویهٔ حملهٔ ۲۰ درجه اختلاف بیشتری بین سطوح فشاری و مکش وجود دارد. شکلهای ۱۱و ۱۲ نشان میدهند که در زاویهٔ حملهٔ ۴۵ درجه تطابق نمودارهای DDES و SA روی هر دو سطح مکش و فشاری بسیار خوب است.



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

#### مهرداد یاری ساکنه و همکاران

شبیهسازی عددی جریان دو بعدی سیال تراکمناپذیر در ...



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

#### ۵-۲- بررسی ور تیسیتی

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 می شود که با آغاز جدایش از لبهٔ حمله، میزان ورتیسیتی به شدت افزایش می یابد و در طول یک ناحیهٔ نواری به سمت خروجی ادامه می یابد ولی در نزدیکی سطوح مکش کاهش می یابد که ناشی از اثر لزجت در نزدیکی دیواره است. در خروجی کسکید، چون گردابه ها فضای بازتری را تجربه می کنند از شدت ورتیسیتی کاسته می شود اما از لحاظ اندازه بزرگتر می شوند.

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

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 پرهٔ میانی کسکید

ضریب پسای متوسط پیش بینی شده برای زاویهٔ حملهٔ ۲۰ درجه در شکل ۱۶ توسط مدل SA در حدود چهار برابر ضریب پسای متوسط پیش بینی شده توسط DDES در شکل ۱۵ است.

مطابق شکل ۱۷، مدل DDES در زاویهٔ حملهٔ 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 زاویهٔ حملهٔ 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 زاویهٔ ۴۵ درجه با روش DDES





1.5



مهندسی مکانیک مدرس فوقالعاده اسفند ۱۳۹۲، دورهٔ ۱۳ شمارهٔ ۱۳ www.SID.ir



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

در زاویهٔ ۴۵ درجه نسبت به زاویهٔ ۳۰ درجه کاهش شدیدی در حدود ۳۰۰٪ برای مدل DDES و کاهشی در حدود ۲۰۰٪ برای مدل SA برای ضریب برآ مشاهده می شود.

#### 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 اندازهٔ به دست آمده با روش DDES پیش بینی می کند.

مدل SA برای پیش بینی ضریب پسای متوسط پرهٔ میانی در جریان داخل کسکید در هر دو زاویهٔ حمله، ضریب پسای خیلی بیشتری نسبت به DDES که از مدلسازی کمتری استفاده می کند ارائه می دهد که کاربرد آن را در چنین مواردی به دلیل خطای زیاد محدود می کند. کاهش شدید ضریب پسا در زاویهٔ ۴۵ درجه مربوط به حالت واماندگی است که هر دو روش در پیش بینی چنین رفتاری موفق اند. ضریب برآ نیز عیناً رفتاری همانند ضریب پسا از خود نشان می دهد.

DDES توزیع فشار روی سطوح پره در هر دو روش DDES و SA در هر دو زاویهٔ حمله تطابق خوبی با یکدیگر دارند و هر چه که زاویهٔ 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 هزینهٔ محاسباتی پایین ارجحیت دارد.

مهنداسی مکانیک مدرس فوق العاده اسفند ۱۳۹۲، دورهٔ ۱۳ شمارهٔ ۱۳



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



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



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



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

۱۳۰ www.SID.ir

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 1 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 جداشدهٔ 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 حملهٔ بالا میتواند ضرایب برآ و پسا را با خطای بسیار بالا پیشبینی کند.

### ۷- مراجع

- Mockett C., "A comprehensive study of detachededdy simulation", Von der Fakultät V – Verkehrsund Maschinen systemeder Technischen Universität Berlinzur 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