

ISME2018

## بررسی جریان کاویتاسیون حول یک هیدروفویل با استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف

ابوالفضل موحدیان<sup>1</sup>، محمود پسندیده فرد<sup>2</sup>، احسان روحی<sup>3</sup>

<sup>1</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، [abolfazl.movahedian@mail.um.ac.ir](mailto:abolfazl.movahedian@mail.um.ac.ir)

<sup>2</sup>استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، [fard\\_m@um.ac.ir](mailto:fard_m@um.ac.ir)

<sup>3</sup>دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، [e.roohi@um.ac.ir](mailto:e.roohi@um.ac.ir)

### چکیده

است. یک نکته کلیدی در این نوع مدل چگونگی تعریف دانسیته مخلوط است. دنانوی و کائنی [2] یک معادله حالت باروتروپیک<sup>5</sup> که چگالی را به مخلوط فشار استاتیک مرتبط می‌کند را استفاده کردند. کاتیر-دلگشا و همکاران [3] یک معادله حالت باروتروپیک مشابه با لزجت آشفتگی اصلاح شده را استفاده کردند که به طور موفقیت آمیزی کنده شدن ابر کاویتا را در یک ونتوری شبیه سازی کردند. مدل دیگر یک مدل مخلوط چند فاز کاویتاسیون مبتنی بر معادله انتقال به منظور تغییر فاز بود. مرکل و همکاران [4] یک معادله اضافی برای کسر حجمی بخار (یا مایع) شامل ترم‌های تبخیر و تقطیر (بعنوان مثال رشد حباب و فروپاشی) معرفی کردند. کانز و همکاران [5]، ساویر و سوئر [6] و سینگهال و همکاران [7] روش‌های مشابهی با ترم‌های مذکور استفاده کردند.

در شبیه سازی جریان کاویتاسیون، مدل آشفتگی بسیار حائز اهمیت است و همچنین تعامل قوی بین سطح کاویتا و لایه مرزی در طی گسترش کاویتا لازمست. اگرچه روش متوسط گیری معادلات ناویر استوکس RANS، معادله رینولدز کنونی به طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی جریان‌های آشفته در صنعت استفاده شده است، مدل‌های RANS با مدل‌های آشفتگی لزجت-گردابه‌ای دارای قابلیت محدودی برای شبیه‌سازی جریان‌های کاویتاسیون هستند و نیاز به اصلاحات دارند [8-12]. بنابراین تلاش‌هایی برای ناپایداری‌های جریان کاویتاسیون با استفاده از LES پیش بینی شده است. انتظار می‌رود که مدل LES برای جریان‌های کاویتاسیون پیش‌بینی‌های بهتری از گردابه‌های آشفته در مقیاس بزرگ را با دقت بهتری از برخی نتایج، که قبلاً به دست آمده می‌دهد [13, 14] به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی، نتایج حاصل با داده‌های مرجع [15] مقایسه گردید. هدف از تحقیق حاضر مقایسه دینامیک کنده شدن کاویتا بین مدل‌های آشفتگی LES(WALE) و  $k - \varepsilon(RNG)$  به همراه یک مدل انتقال جرم زوارت گربر بلامیری حول هیدروفویل در رژیم کاویتاسیون ابری است.

### 2-مدل ریاضی

#### 2-1-معادلات حاکم

در این مقاله شبیه سازی جریان همراه با کاویتاسیون حول هیدروفویل NACA16012 با استفاده از مدل‌های آشفتگی  $k - \varepsilon(RNG)$  و  $k - \varepsilon(RNG)$  انجام شده است. در رهیافت LES از مدل زیر شبکه-ای تنظیم لزجت گردابه‌ای متناسب با دیواره<sup>2</sup> به منظور تعیین تنش-های مقیاس زیر شبکه ای<sup>3</sup> بهره گرفته شده است. معادله انتقال جرم زوارت گربر بلامیری<sup>4</sup> مورد استفاده و همچنین مدل‌سازی نرخ انتقال جرم که به صورت فرآیندهای تبخیر و تقطیر انجام می‌گردد ارائه شده است. برای اعمال مدل کاویتاسیون، جریان به شکل سیال واحد و همگن در حالت مخلوط دو فازی در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی برای رژیم کاویتاسیون ابری  $\sigma = 0.87$  در زاویه حمله 4 درجه انجام شده است. در این تحقیق با مقایسه کانتور کسر حجمی بخار و سایر نتایج شبیه‌سازی معین گردید که مدل LES نسبت به مدل  $k - \varepsilon(RNG)$  در رهگیری جزئیات جریان، نتایج بهتر و دقیق‌تری از دینامیک کنده شدن حباب را نشان می‌دهد.

### واژه‌های کلیدی

کاویتاسیون ابری، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، مدل انتقال جرم

### 1-مقدمه

رفتار کنده شدن کاویتا در رژیم کاویتاسیون جزئی، توجه محققین زیادی را به خود جلب کرده است، زیرا به طور جدی بر عملکرد هیدرودینامیکی تیغه‌ها و پروانه‌ها تاثیر می‌گذارد. انتظار می‌رود که با کنترل آن، عملکرد و قابلیت اطمینان سیستم‌های هیدرولیکی بهبود یابد. در دهه‌های گذشته، تحقیقات زیادی، از جمله آزمایشات و شبیه‌سازی‌هایی، برای شناخت مکانیزم کنده شدن کاویتا‌های ناپایدار انجام شده است. محدودیت‌های مختلف روش‌های اندازه گیری منجر به تلاش‌های قابل توجه در استفاده از شبیه سازی جریان همراه با کاویتاسیون در سال‌های اخیر شده است. بسیاری از مدل‌های کاویتاسیون براساس فرض تعادلی همگن پیشنهاد شده توسط کابوتا و همکاران [1] که در این فرض لغزش بین فازهای مایع و بخار نادیده گرفته شده، و مخلوط مایع/بخار به صورت سیال تک فاز فرض شده

<sup>4</sup> Zwart-Gerber-Belamri  
<sup>5</sup> Barotropic

<sup>1</sup> Large Eddy Simulation  
<sup>2</sup> Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity  
<sup>3</sup> Sub-Grid Scale

در معادلات بالا،  $P_\theta$  فشار بخار و  $r_{nuc}$  کسر حجمی مرکز هسته و مقدار آن  $5 \times 10^{-4}$  است.  $R_b$  شعاع حباب و مقدار آن  $10^{-6}$ ،  $F_e$  و  $F_c$  برای فرآیند تبخیر و چگالش ضرائب تجربی هستند که مقادیر آنها به ترتیب 50 و 0.01 است و البته بسته به نوع مدل امکان دارد تغییر کند.

### 2-3- مدل آشفتگی $k - \varepsilon(RNG)$

مدل آشفتگی  $k - \varepsilon(RNG)$  با روابط بهبود رفتار در نزدیک دیواره<sup>6</sup> انتخاب شده است، انرژی جنبشی  $k$  مطابق با معادله (7) تعریف می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial}{\partial x_j} k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (7)$$

و اتلاف  $\varepsilon$ ، معادله (8) به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial}{\partial x_j} \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon}(G_k + G_{3\varepsilon}G_b) - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (8)$$

در این معادلات،  $G_k$  نمایانگر تولید انرژی جنبشی توربولانسی به دلیل گرادیان سرعت متوسط،  $G_b$  نمایانگر تولید انرژی جنبشی آشفتگی به دلیل اثرات گرانش،  $Y_M$  نشان دهنده سهم نوسانات در جریان اغتشاشی تراکم پذیر نسبت به اتلافات کلی،  $\alpha_k$  و  $\alpha_\varepsilon$  معکوس اعداد پرانتل اغتشاشی برای  $k$  و  $\varepsilon$  و نهایتاً  $S_k$  و  $S_\varepsilon$  ترم های چشمه می باشند.

### 2-4- مدل آشفتگی LES(WALE)

معادلات حاکم شامل معادلات بقاء جرم و مومنتوم به شرح زیر است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (10)$$

که در آن  $u_i$  مولفه سرعت در جهت  $i$  و  $P$  فشار مخلوط است.  $\mu$  لزجت جریان،  $\rho$  دانسیته مخلوط که در بخش معادلات (4) و (5) تعریف شده است، اعمال یک فیلترینگ<sup>8</sup> بر روی روابط ذکر شده معادلات LES را به صورت زیر می دهد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (11)$$

معادلات حاکم اندازه حرکت و پیوستگی برای جریان مخلوط چند فاز به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\partial_t(\rho \vartheta) + \nabla \cdot (\rho \vartheta \times \vartheta) = -\nabla p + \nabla \cdot s, \quad (1)$$

$$\partial_t + \nabla \cdot (\rho \vartheta) = 0.$$

همچنین نرخ تانسور تنش به صورت زیر بیان می شود:

$$D = \frac{1}{2}(\nabla \vartheta + \nabla \vartheta^T) \quad (2)$$

تغییر فاز از مایع به بخار تحت کاویتاسیون اتفاق می افتد، بنابراین مدل سازی مخلوط چند فاز برای توصیف جریان باید به کار گرفته شود. در این مطالعه روش مخلوط دوفاز در نظر گرفته شده، که از یک معادله انتقال کسر حجمی بخار و ترم های تبخیر و تقطیر، که برای محاسبه نرخ انتقال جرم، که در طی آن کاویتاسیون رخ می دهد، به صورت معادله زیر بیان می شود:

$$\partial_t \gamma_\theta + \nabla \cdot (\gamma_\theta \bar{v}) = \dot{m} \quad (3)$$

که در آن  $\dot{m}$  نرخ انتقال جرم بین فازها است.

دانسیته مخلوط  $\rho$  و لزجت  $\mu$  به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\mu = \gamma_l \mu_l + (1 - \gamma_l) \mu_\theta$$

$$\rho = \rho_l \gamma_l + (1 - \gamma_l) \rho_\theta \quad (4)$$

که در آن زیر نویس  $l$  و  $\theta$  به ترتیب نمایانگر فازهای مایع و بخار هستند.

### 2-2- مدل انتقال جرم

مدل مورد استفاده در این مطالعه توسط وزارت گربر بلامیری ارائه شده است [16]. فرآیند کاویتاسیون توسط معادله انتقال جرم زیر کنترل می گردد.

$$\partial_t \gamma_\theta + \nabla \cdot (\gamma_\theta \bar{v}) = \dot{m}^+ + \dot{m}^- \quad (5)$$

که در آن  $\gamma_\theta$  کسر حجمی بخار است، ترم های  $\dot{m}^+$  و  $\dot{m}^-$  اثرات تبخیر و چگالش را در طی فرآیند تغییر فاز نشان می دهند. و از معادله دینامیکی رایلی-پلاست<sup>9</sup> استخراج شده است.

$$\dot{m} = \begin{cases} \frac{-F_e 3 r_{nuc} (1 - \gamma_\theta) \rho_\theta}{R_b} \sqrt{\frac{2(P_\theta - P)}{3 \rho_l}} & \text{if } P < P_\theta \\ \frac{F_c 3 \gamma_\theta \rho_\theta}{R_b} \sqrt{\frac{2(P - P_\theta)}{3 \rho_l}} & \text{if } P > P_\theta \end{cases} \quad (6)$$

<sup>8</sup> Dissipation  
<sup>9</sup> Filtering

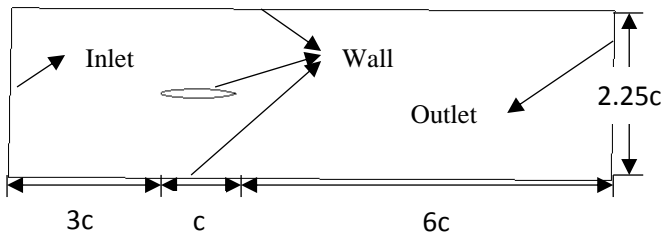
<sup>6</sup> Rayleigh-Plesset  
<sup>7</sup> Enhanced wall treatment

QUICK استفاده شده است. ترم زمانی با استفاده از طرح ضمنی مرتبه دوم گسسته شده است. روش عددی مورد استفاده در این تحلیل براساس الگوریتم فشار مبنا و بر پایه الگوریتم سیمپل بوده و برای حل معادلات ناویر استوکس از نرم افزار آنسیس فلونت 15 استفاده شده است. شبیه سازی جریان کاویتاسیون ناپایا از یک حل اولیه که به صورت جریان بدون کاویتاسیون و پایا آغاز شده. سپس به منظور شبیه سازی جریان همراه با کاویتاسیون حل گر ناپایا و مدل کاویتاسیونی روشن شدند. همچنین دوعدد بدون بعد مهم استفاده شده اعداد رینولدز و کاویتاسیون است که بصورت زیر تعریف می شود:

$$Re = \frac{U_{\infty} \cdot c}{\nu}, \quad \sigma = \frac{P - P_{\infty}}{\rho \cdot U_{\infty}^2} \quad (19)$$

که در آن  $P$  فشار،  $P_{\infty}$  فشار بخار جریان آزاد، و سرعت جریان آزاد معادل با 8 متر برثانیه است. عدد کاویتاسیون 0.87، و گام زمانی  $10^{-5}$  ثانیه در نظر گرفته شده است.

دامنه محاسباتی در شکل 1 نشان داده شده است. هیدروفویل NACA16012 با زاویه حمله 4 درجه و طول وتر  $c=1m$  است. لبه ی حمله از ابتدای دامنه 3m و از انتهای دامنه 6m فاصله دارد. ارتفاع دامنه 2.25m در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی سرعت و فشار استاتیکی به ترتیب در ورودی و خروجی دامنه و شرط دیواره (غیر لغزشی) در دیواره های بالا، پایین و هیدروفویل تعیین گردید.



شکل 1: دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

### 3-2- بررسی استقلال از دامنه و اعتبارسنجی

در این شبیه سازی از شبکه ساختار یافته حول هیدروفویل NACA16012 استفاده شده است. اندازه مش در مجاورت دیواره تاثیر بسزایی روی دینامیک کاویتاسیون دارد. با توجه به هندسه حل برای عدم وابستگی حل به شبکه عددی، از 2 شبکه مختلف که تعداد سلول-های به کار رفته در آن ها به ترتیب 124000 و 142000 سلول می-باشند، استفاده گردید. با توجه به مدل های آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق، شبکه لایه مرزی مقدار  $y^+$  حدود یک انتخاب شده است، شبکه در نزدیک هیدروفویل مطابق با شکل 2 از تراکم بیشتری برخوردار است.

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (12)$$

که در آن علامت بار کمیت فیلتر شده است. معادله (12) یک ترم غیر-خطی دارد که در معادله (10) رخ نمی دهد.

$$\tau_{ij} = \rho (\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (13)$$

که تنش زیر شبکه ای نامیده می شود و باید مدل سازی گردد. یکی از مدل های زیر شبکه ای که معمولاً استفاده می شود، مدل لزجت-گردابه ای است، که فرض بر این است که تنش زیر شبکه ای متناسب با نرخ تانسور کرنش،  $\bar{S}_{ij}$ ، که از مقیاس بزرگ جریان فیلتر شده است.

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (14)$$

که در آن  $\bar{S}_{ij}$  نرخ تانسور کرنش برای مقیاس حل بوده و لزجت آشفتگی زیر شبکه  $\mu_t$ ، توسط مدل زیر شبکه ای (تنظیم لزجت گردابه ای متناسب با دیواره) بسته شده است. لزجت آشفتگی زیر شبکه  $\mu_t$  و نرخ تانسور کرنش برای مقیاس حل شده،  $\bar{S}_{ij}$ ، به صورت زیر در مدل WALE تعریف شده است:

$$\mu_t = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{\frac{3}{2}}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{\frac{5}{2}} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{\frac{5}{4}}} \quad (15)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} (\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2 \quad (16)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (17)$$

$$\bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, \quad L_s = \min \left( kd, C_s V^{\frac{1}{3}} \right) \quad (18)$$

که در آن  $L_s$  طول اختلاط برای مقیاس زیر شبکه،  $k$  ثابت ون-کارمن،  $d$  فاصله نزدیکترین دیواره،  $V$  حجم سلول محاسباتی و ضریب  $C_s$  در این مدل، با استفاده از جریان اغتشاشی همگن همسانی که آزادانه در حال اضمحلال می باشد، کالیبره شده است. مقدار پیش فرض 0.5 می-باشد.

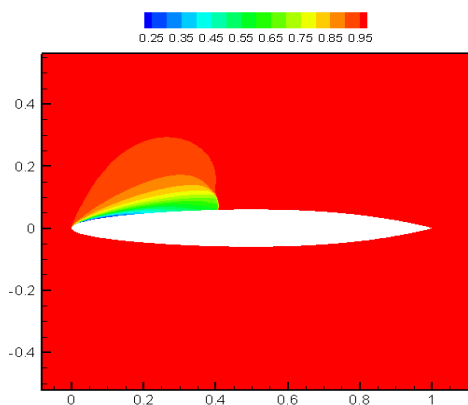
### 3- نتایج

#### 3-1- روش شبیه سازی

معادلات وابسته به زمان در هر دو حوزه مکان و زمان گسسته شده اند. ترم های جابه جایی و پخشی به ترتیب با طرح های بالادست مرتبه دوم و تفاضل مرکزی مرتبه دوم گسسته شده اند. همچنین گسسته سازی ترم های فشار و کسر حجمی بخار از طرح PRESTO و

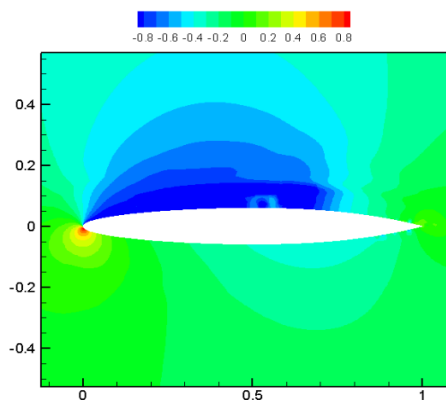
شکل 4: کانتور کسر حجمی بخار با مدل LES(WALE)

همچنین شکل 5 دینامیک جریان کاویتاسیون را که با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon(RNG)$  بدست آمده را نشان می‌دهد، که مکانیزم ناپایداری و جدایش کاویتی را نشان نمی‌دهد. بنابراین مکانیزم کننده شدن کاویتاسیون رهگیری نمی‌شود و دارای نقص‌های اساسی می‌باشد، که در تناقض با رژیم کاویتاسیون ابری است.

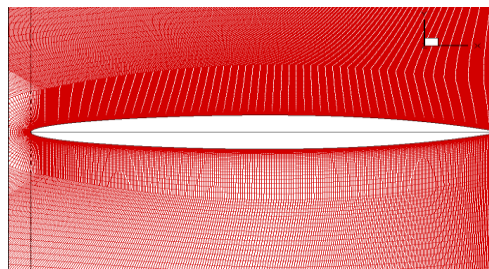
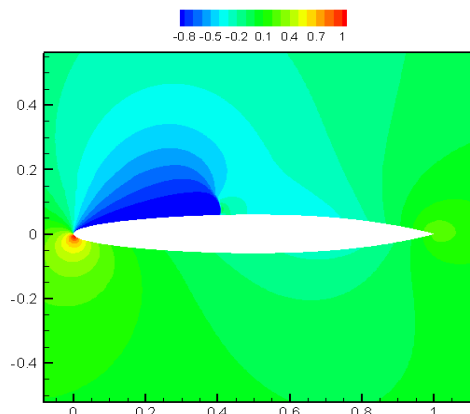


شکل 5: کانتور کسر حجمی بخار با  $k-\varepsilon(RNG)$

کانتور ضریب فشار در شکل‌های 6 و 7 آورده شده است. منطقه فشار منفی در مدل LES(WALE) گسترده‌تر از مدل  $k-\varepsilon(RNG)$  می‌باشد، که دلیل آن جدا شدن ابر کاویتی است.

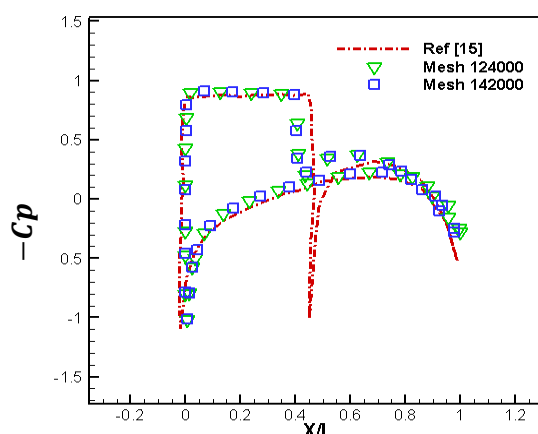


شکل 6: کانتور ضریب فشار با مدل LES(WALE)



شکل 2: شبکه سازمان یافته در اطراف هیدروفویل

باتوجه به شکل 3 نتایج حاصل از دو شبکه اختلاف کمی با داده‌های مرجع [15] دارند، بنابراین شبکه 124000 برای ادامه شبیه‌سازی مناسب است.

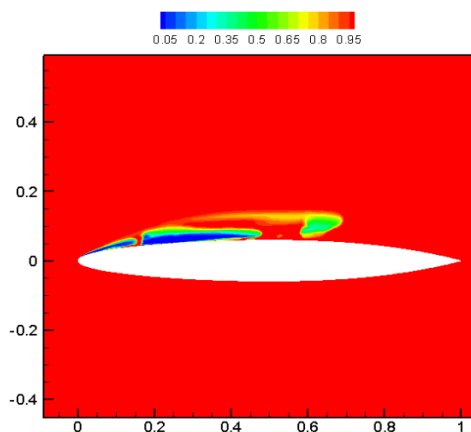


شکل 3: نمودار ضریب فشار برای دو شبکه محاسباتی و مقایسه با مرجع [15]

### 3-3- نتایج شبیه‌سازی در رژیم کاویتاسیون ابری

در این رژیم مکانیزم کننده شدن ابر بخار کاویتی اتفاق می‌افتد. بنابراین یک وظیفه‌ی اصلی مدل آشفتگی مناسب رهگیری و دینامیک کننده شدن کاویتی می‌باشد. تمام نتایج به دست آمده در این بخش در لحظه ای خاص ارائه شده و با یکدیگر مقایسه شده اند.

شکل 4 نشان دهنده‌ی شکل کاویتاسیون و کننده شدن ابر بخار کاویتی در عدد کاویتاسیون 0.87 می‌باشد که با استفاده از رهیافت LES(WALE) بدست آمده است. با توجه به مکانیزم کننده شدن کاویتی، جریان از یک ماهیت ناپایا برخوردار می‌باشد.



شکل 10: نمای نزدیک از کانتور سرعت بر روی سطح هیدروفویل با مدل LES(WALE)

#### 4- نتیجه گیری

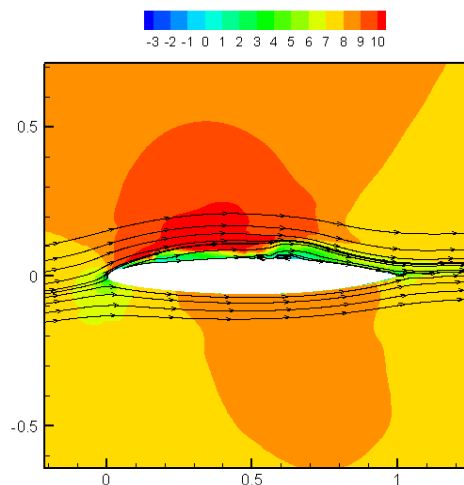
در این مقاله شبیه سازی حول هیدروفویل NACA16012 با مدل های آشفتگی LES(WALE) و  $k - \epsilon(RNG)$  به همراه معادله انتقال جرم زوارت گربر بلامیری بررسی گردید. مقایسه ی شکل های به دست آمده از دو مدل آشفتگی LES(WALE) و  $k - \epsilon(RNG)$  نشان می دهد که مدل  $k - \epsilon(RNG)$  بر خلاف مدل LES(WALE) نمی تواند مکانیزم کنده شدن کاویتاسیون را رهگیری کند و دارای نقص های اساسی و عمده ای می باشد. بنابراین انتخاب مدل آشفتگی در پیش بینی درست مکانیزم دینامیک کنده شدن کاویتاسیون ناپایا بسیار حائز اهمیت است.

#### 5- منابع

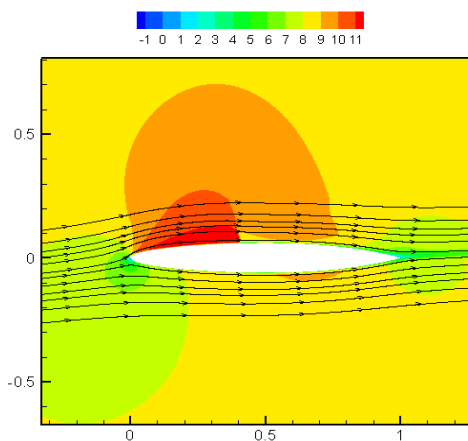
- [1] A. Kubota, H. Kato, and H. Yamaguchi, "A new modelling of cavitating flows: a numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section," *Journal of fluid Mechanics*, vol. 240, pp. 59-96, 1992.
- [2] Y. Delannoy, J. L. Kueny, "Two phase flow approach in unsteady cavitation modelling," in *Proc. of Cavitation and Multiphase Flow Forum, 1990*, 1990.
- [3] O. Coutier-Delgosha, J. Reboud, and Y. Delannoy, "Numerical simulation of the unsteady behaviour of cavitating flows," *International journal for numerical methods in fluids*, vol. 42, pp. 527-548, 2003.
- [4] C. L. Merkle, J. Feng, and P. E. Buelow, "Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation," in *3rd International symposium on cavitation, Grenoble, France, 1998*, pp. 47-54.
- [5] R. F. Kunz, D. A. Boger, D. R. Stinebring, T. S. Chyczewski, J. W. Lindau, H. J. Gibeling, et al., "A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction," *Computers & Fluids*, vol. 29, pp. 849-875, 2000.
- [6] G. H. Schnerr and J. Sauer, "Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics," in *Fourth international conference on multiphase flow, New Orleans, USA, 2001*.
- [7] A. K. Singhal, M. M. Athavale, H. Li, and Y. Jiang, "Mathematical basis and validation of the full cavitation model," *Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Fluids Engineering*, vol. 124, pp. 617-624, 2002.
- [8] H. Biao and W. Guo-Yu, "Evaluation of a filter-based model for computations of cavitating flows," *Chinese Physics Letters*, vol. 28, p. 026401, 2011.
- [9] J. Bin, L. Xian-Wu, W. Yu-Lin, and X. Hong-Yuan, "Unsteady cavitating flow around a hydrofoil simulated using the partially-averaged Navier-Stokes Model," *Chinese Physics Letters*, vol. 29, p. 076401, 2012.

شکل 7 کانتور ضریب فشار با  $k - \epsilon(RNG)$

در شکل های 8 و 9 کانتورهای سرعت و خطوط جریان، برای مدل LES(WALE) و مدل  $k - \epsilon(RNG)$  نمایش داده شده است.

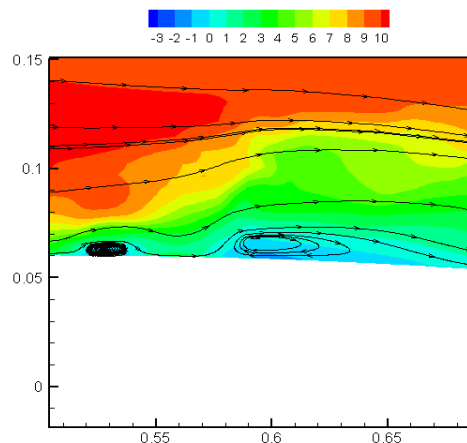


شکل 8: کانتور سرعت با ره یافت LES(WALE)



شکل 9: کانتور سرعت با مدل  $k - \epsilon(RNG)$

همچنین شکل 10 نمای نزدیکتری از شکل 8 را نشان میدهد که در آن گردابه ها شکل گرفته است، در حالیکه مدل  $k - \epsilon(RNG)$  آنها را نشان نمی دهد.



- [10] B. Huang and G.-Y. Wang, "Partially averaged Navier-Stokes method for time-dependent turbulent cavitating flows," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 23, pp. 26-33, 2011.
- [11] B. Ji, X. Luo, Y. Wu, X. Peng, and H. Xu, "Partially-Averaged Navier–Stokes method with modified k– $\epsilon$  model for cavitating flow around a marine propeller in a non-uniform wake," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 6582-6588, 2012.
- [12] B. Ji, X. Luo, Y. Wu, X. Peng, and Y. Duan, "Numerical analysis of unsteady cavitating turbulent flow and shedding horse-shoe vortex structure around a twisted hydrofoil," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 51, pp. 33-43, 2013.
- [13] G. Wang and M. Ostoja-Starzewski, "Large eddy simulation of a sheet/cloud cavitation on a NACA0 015hydrofoil," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 31, pp. 417-447, 2007.
- [14] X. Luo, B. Ji, X. Peng, H. Xu, and M. Nishi, "Numerical simulation of cavity shedding from a three-dimensional twisted hydrofoil and induced pressure fluctuation by large-eddy simulation," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 134, p. 041202, 2012.
- [15] F. Celik, Y. A. Ozden, and S. Bal, "Numerical simulation of flow around two-and three-dimensional partially cavitating hydrofoils," *Ocean Engineering*, vol. 78, pp. 22-34, 2014.
- [16] C. E. Brennen, *Fundamentals of multiphase flow*: Cambridge university press, 2005.