



اعتبارسنجی مدل آشفتگی LES و روش نسبت حجمی سیال در تحلیل کاویتاسیون روی هیدروفویل Clark-Y

امیر پویان ظهیری^۱، احسان روحی^۲، محمود پسندیده فرد^۳

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

چکیده

در مقاله حاضر مدل سازی جریان کاویتاسیونی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بر روی هیدروفویل استاندارد Clark-Y که داده های آزمایشگاهی آن نیز موجود است گزارش شده است. این مدل سازی با استفاده از مدل آشفتگی شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) انجام شده است. در این تحقیق از مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ تراکم ناپذیر که بر اساس یک روش ضمنی برای ترم های زیر شبکه ای بنا شده استفاده شده و برای اعمال مدل کاویتاسیونی جریان را به صورت یک سیال واحد و همگن در حالت مخلوط دوفازی در نظر گرفته شده است. یک معادله انتقال برای ناحیه محلی بخار همراه با معادلات LES حل می گردد و یک مدل نرخ انتقال جرم محدود برای تبخیر و میعان به کار برده می شود. مدل نسبت حجمی سیال (VOF) نیز اعمال گردیده است. نتایج این مدل برای شکل ناحیه کاویتاسیون، ضرایب برا و پسا، و پروفیل سرعت در ناحیه لایه مرزی با نتایج آزمایشگاهی موجود در مراجع معتبر مقایسه گردیده و کارایی و دقت روش عددی حاضر بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که ترکیب روش نسبت حجمی سیال با مدل آشفتگی شبیه سازی گردابه های بزرگ و الگوریتم مناسب برای انتقال جرم بین دو فاز (مدل ساور) به خوبی ویژگیهای دینامیکی کاویتاسیون ابری و ناپایا از جمله کنده شدن کاویتی توسط جت های بازگشتی را مدل می نماید. همچنین دقت محاسبه ضرایب نیروی برا و پسا در مقایسه با نتایج تجربی بسیار مناسب است. شبیه سازی های ارایه شده در این تحقیق با استفاده از توابع موجود در نرم افزار این فم (Open - Open FOAM) (Field Operation and Manipulation) و با استفاده از حلگر دو فازی interPhaseChangeFoam انجام شده است.

واژه های کلیدی: هیدروفویل Clark-Y-کاویتاسیون- مدل آشفتگی- مدل انتقال جرمی- مدل نسبت حجمی سیال

مقدمه

تشکیل حباب های بخار در داخل یک مایع در اثر کاهش فشار به مقداری کمتر از فشار بخار اشباع آن مایع، کاویتاسیون نامیده می شود. پدیده کاویتاسیون در مواردی همچون اژدرها و تیغه های جلوبرنده های دریایی رخ می دهد. کاهش آثار نامطلوب ناشی از کاویتاسیون یک موضوع مهم در طراحی جلوبرنده های دریایی می باشد. به منظور افزایش بازدهی، پره های جلوبرنده معمولاً باید در شرایط کاویتاسیون کار کنند اما باید از اثراتی همچون ارتعاش و فرسایش جلوگیری نمود. مشاهدات آزمایشگاهی تنها توانایی نشان دادن قسمت های محدودی از جواب ها را دارند که این به دلیل محدودیت های تکنیک های اندازه گیری می باشد. دسترسی داشتن به کل حوزه ی جریان از طریق دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یک مزیت دیگر نسبت به روش های آزمایشگاهی در زمینه گسترش و بهبود دستورالعمل های طراحی خواهد بود. بدین منظور، در این تحقیق از توابع

دینامیک سیالات محاسباتی موجود در نرم افزار این فم استفاده شده است. این فم از یک کتابخانه بزرگ نرم افزاری تشکیل شده است که توانایی های اصلی زیر را در اختیار کاربر قرار می دهد:
تولید تانسورها و میدان ها- گسسته سازی معادلات دیفرانسیل جزئی با استفاده از یک نگارش زبانی قابل خواندن برای انسان- حل معادلات دیفرانسیل عادی- موازی سازی خودکار محاسبات سنگین- مش دینامیکی- مدلسازی فیزیکی عمومی- مدل های رئولوژیکی- مدل های ترمودینامیکی- مدل های جریان آشفته- واکنش های شیمیایی و مدل های جنبشی- روش های اویلری ردیابی ذرات- انتقال حرارت تشعشعی و غیره می باشد. این قابلیت ها که توسط کتابخانه نرم افزاری این فم تولید می- گردند برای توسعه ی کاربری های مختلف استفاده می شوند. این کاربری ها به دو دسته تقسیم می شوند:
حلگراها: محاسبات اصلی را به منظور حل یک مسئله مکانیکی انجام می- دهند.

تسهیلاتی ها: برای تولید شبکه، تنظیم نمونه شبیه سازی شونده، بررسی نتایج و تشکیل محاسبات جبری استفاده می شوند
برتری مدل LES در مقایسه با مدل های میانگین رینولدز برای معادلات ناویراستوکس (RANS) که بر اساس میانگین گیری از اثر کلی مقیاس- های مختلف موجود در جریان بنا شده اند این است که مدل LES به صورت طبیعی و مداوم مقیاس های مختلف ساختار جریان گذرا از مقیاس- های متوسط تا مقیاس های کوچک را در نظر می گیرد. برای مدل سازی جریان کاویتاسیونی که در بسیاری از موارد کاملاً گذرا و ناپایا می باشد این ویژگی روش LES به دلیل داشتن توانایی در در نظر گرفتن مکانیزم های موجود در دینامیک شکل گیری و کنده شدن کاویتاسیون بسیار مهم و موثر می باشد [۱]. البته روش های میانگین گیری جزئی از معادلات ناویر- استوکس (PANS) نیز وجود دارد که یک ارتباط و سازش را میان مدل LES و RANS برقرار می نمایند [۲].

در این تحقیق از مدل LES تراکم ناپذیر که بر اساس یک روش ضمنی برای ترم های زیر شبکه ای و در نظر گرفتن جریان به صورت یک سیال واحد و همگن در حالت مخلوط دوفازی بنا گردیده استفاده می شود [۳]. یک معادله انتقال برای بخش محلی بخار همراه با معادلات LES حل می گردد و یک مدل نرخ انتقال جرم محدود برای تبخیر و میعان به کار برده می شود. مدل های انتقال جرم که در حلگر این فم استفاده شده است شامل مدل انتقال جرم مرکب و کانز و ساویر می باشند [۴-۵]. با توجه به بررسی منابع علمی موجود، شبیه سازی LES بر روی هیدروفویل Clark-Y تاکنون گزارش نشده است و شبیه سازی های گزارش شده مبتنی بر روش PANS می باشد [۲]. بنابراین تمرکز اصلی مقاله حاضر شبیه سازی کاویتاسیون روی هیدروفویل Clark-Y با روش LES و مقایسه با داده- های آزمایشگاهی می باشد [۶]. توانایی مدل عددی حاضر در شبیه سازی مکانیزم های مختلف جریان کاویتاسیونی نیز بررسی می گردد.

مدل سازی محاسباتی جریان

جریان حاوی کاویتاسیون ویژگی‌های مختلفی را در بر دارد که باید در نظر گرفته شوند. اصلی ترین آن‌ها حضور دو فاز در جریان و انتقال جرم بین فاز بخار و مایع می‌باشد. همچنین اثراتی نیز در نتیجه تراکم پذیری و گازهای غیر قابل تراکم بوجود می‌آیند. تراکم پذیری اساساً در فاز گازی حضور دارد و در تولید پالس‌های ناشی از فروریختن حباب‌های گاز و انعکاس‌ها مهم می‌باشد، اما همانند میدان فشار ناپایا درگسترش جریان نیز نقش ایفا می‌کند که به تقابل بین ذرات کاویتاسیون مربوط می‌شود. گاز-های غیرقابل چگالش و محلول در مایع که در حین فرایند تبخیر به حالت گازی در آمده‌اند و تا مدتی در همین حالت باقی می‌مانند باعث می‌شوند که یک اثر مشخص توسط کاویتاسیون در دنباله‌ی جریان به وجود آید. این پدیده در صورتی که جریان دوباره از یک حوزة کم فشار عبور کند بر دینامیک کاویتاسیون‌هایی که بوجود می‌آیند اثر می‌گذارد.

در این مقاله از یک مدل LES ضمنی و تراکم‌ناپذیر به همراه فرض جریان دو فازی استفاده می‌شود. این فرض به وسیله معرفی کسر حجمی بخار و حل یک معادله انتقال اضافی و ترکیب آن با یک مدل تبادل جرمی برای فرایند تبخیر و میعان اعمال می‌شود. فرایند حل نیز براساس الگوریتم PISO می‌باشد اما از آنجایی که مدل انتقال جرم بر روی میدان فشار-سرعت اثر می‌گذارد، معادله فشار به توجه خاصی برای پایداری عددی نیاز دارد. در این مقاله نشان داده می‌شود که روش شبیه سازی انجام گرفته توانایی پیش بینی بخش زیادی از مکانیزم‌های مهم کاویتاسیون که در تحلیل کاویتاسیون خورنده ضروری می‌باشد را دارد.

روش شبیه سازی گردابه‌های بزرگ برای مدل کردن جریان آشفته مدل LES بر اساس محاسبه‌ی ساختارهای بزرگ حاوی انرژی که در شبکه‌ی محاسباتی حل می‌شوند بنا شده است و بعلاوه ساختارهای کوچکتر زیرشبکه‌ای در آن مدل می‌شوند. این جدا سازی مقیاس با استفاده از یک روش فیلتر کننده‌ی پایین گذر که بر روی معادلات ناویر-استوکس اعمال می‌گردد انجام می‌گیرد. در مقایسه با مدل‌های RANS که بر اساس میانگین گیری از اثر کلی مقیاس‌های مختلف موجود در جریان بنا شده اند، روش LES به صورت طبیعی و مداوم مقیاس‌های مختلف ساختار جریان گذرا، از مقیاس‌های متوسط تا مقیاس‌های کوچک را در نظر می‌گیرد و برای مدل سازی جریان کاویتاسیونی که در بسیاری از موارد کاملاً گذرا و ناپایا می‌باشد این ویژگی روش LES به دلیل داشتن توانایی در در نظر گرفتن مکانیزم‌های موجود در دینامیک شکل‌گیری و کنده شدن کاویتاسیون بسیار مهم و موثر می‌باشد و در نتیجه توانایی بالاتری نسبت به روش‌های RANS دارا می‌باشد [7].

با توجه به معادلات تراکم ناپذیر ناویر-استوکس، معادلات بقای ممنتوم و جرم را در نظر می‌گیریم:

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

$$(2)$$

در معادلات فوق، (V) نشان دهنده‌ی سرعت، (p) نشان دهنده‌ی فشار و (S) نشان دهنده‌ی تانسور تنش لزجی می‌باشد:

$$S = 2\mu D \quad (3)$$

$$D = 0.5 (\nabla v + \nabla v^T) \quad (4)$$

عملیات فیلتر کردن یک متغیر مانند ϕ توسط یک تابع پیش تعریف شده فیلتر کننده ($G = G(X, \Delta)$) انجام می‌شود. تابع G دارای یک مقیاس

طول قطع (Δ) و یک مقیاس زمان قطع (τ) می‌باشد که مقیاس‌های کوچکتر از این مقیاس‌ها در $\bar{\phi}$ ظاهر نمی‌شوند به عبارت دیگر مقیاس‌های کمتر از (Δ) و (τ) بوسیله‌ی رابطه‌ی زیر از متغیر ϕ فیلتر می‌شوند:

$$\bar{\phi}(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(r, t') G(x - r, t - t') dt' dr \quad (5)$$

(Δ) و (τ) را مقیاس‌های زیر شبکه‌ای می‌نامیم و ϕ' را که دربر گیرنده‌ی مقیاس‌های زیر شبکه‌ای است را ترم زیر شبکه‌ای می‌نامیم و داریم:

$$\phi = \bar{\phi} - \phi' \quad (6)$$

پس از فیلتر کردن که عملیات آن در بالا نشان داده شد داریم:

$$\partial_t(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \times \bar{v}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\bar{S} - B) \quad (7)$$

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (8)$$

در روابط بالا متغیرهای دارای علامت بار ($-$) نشان دهنده‌ی خواص فیلتر شده می‌باشند. نکته‌ی اصلی در معادلات بالا در ترم $\nabla \cdot B$ می‌باشد که مجهول است و به معادلات ناویر-استوکس افزوده شده است. در معادله‌ی بالا ترم جدید حل نشده‌ی انتقال $\nabla \cdot B$ تانسور تنش زیر شبکه‌ای می‌باشد. با پیروی از مرجع [8] می‌توان B را بصورت زیر نوشت:

$$B = \rho \cdot (\bar{V} \times \bar{V} - \bar{V} \times \bar{V} + \bar{B}) \quad (9)$$

بنابراین اکنون تنها باید \bar{B} را مدل نماییم. بردار \bar{B} را تانسور تنش‌های زیر شبکه‌ای می‌نامیم در واقع \bar{B} مشابه همان تنش‌های رینولدز در روش-های RANS می‌باشد و برای بدست آوردن آن معمول‌ترین روش این است که از یک لزجت زیر شبکه‌ای (vsgs) که نقش مشابه لزجت توربولانس در روش‌های RANS را دارد استفاده می‌نماییم.

مدل چندفازی

برای شبیه‌سازی جریان کاویتاسیونی، دو فاز، مایع و بخار، باید به همراه مکانیزم انتقال بین دو فاز اعمال گردند. ما در اینجا یک سیال واحد دارای دو فاز را در نظر می‌گیریم که به وسیله‌ی کسر بخار محلی و تغییرات آن معرفی می‌گردد. تغییرات کسر بخار توسط یک معادله‌ی انتقال که شامل ترم‌های انتقال جرم میان دو فاز می‌باشد انجام می‌گیرد. با اضافه نمودن این معادله‌ی انتقال به معادلات فیلتر شده‌ی پیوستگی و ممنتوم داریم:

$$\partial_t(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \times \bar{v}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\bar{S} - B), \quad (10)$$

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0, \quad (11)$$

$$\partial_t \alpha + \nabla \cdot (\alpha \bar{v}) = \dot{m} / \rho_v. \quad (12)$$

فرض می‌کنیم که چگالی و ویسکوزیته در معادله‌ی زیر بصورت خطی میان فاز بخار و مایع تغییر نماید:

$$\rho = \rho_v + (1 - \alpha)\rho_l \quad (13)$$

$$\mu = \mu_v + (1 - \alpha)\mu_l. \quad (14)$$

با استفاده از این روابط برای چگالی در معادله بقای جرم داریم:

$$(15)$$

مدل‌های انتقال جرم

معادله انتقال برای نسبت حجمی سیال به همراه جمله چشمه انتقال جرم دو فاز را در قسمت قبل بیان کردیم. ترم \dot{m} در معادله‌ی (12) از معادلات انتقال جرمی بدست می‌آید. در این شبیه سازی از مدل انتقال جرم ساویر استفاده شده که این روش کسر بخار (α) را به صورت تابعی از تعداد حباب‌ها بر واحد حجم و قطر آنها (R_b) (که فرض می‌شود برای همه یکسان است) در نظر می‌گیرد و فرض می‌شود تغییرات کسر حجمی بخار

α نه تنها با اندازه‌ی حباب‌ها، بلکه با تعداد آن‌ها نیز مرتبط است. پس داریم:

$$\alpha = \frac{V_v}{V_v + V_l} = \frac{\frac{4}{3}\pi R_b^3 n_0}{1 + \frac{4}{3}\pi R_b^3 n_0} \quad (16)$$

اگر کسر بخار را تابعی از اندازه‌ی حباب‌ها و همچنین تعداد آنها در نظر بگیریم داریم:

$$\frac{D\alpha}{Dt} = (1 - \alpha) \frac{4\pi R_b^2 n_0}{1 + \frac{4}{3}\pi R_b^3 n_0} \frac{DR_b}{Dt} \quad (17)$$

با صرفنظر از مشتقات مرتبه‌ی ۲ می‌توان به روابط زیر دست یافت:

$$\frac{DR_b}{Dt} = -\text{sign}(\bar{p} - p_v) \sqrt{\frac{2|\bar{p} - p_v|}{3\rho_l}} \quad (18)$$

$$\dot{m} = -\rho_v(1 - \alpha) \frac{3\alpha}{R_b} \text{sign}(\bar{p} - p_v) \sqrt{\frac{2|\bar{p} - p_v|}{3\rho_l}} \quad (19)$$

در رابطه‌ی بالا p_v فشار بخار و \bar{p} فشار مایع فیلتر شده می‌باشد. البته لازم است که پارامترهایی نظیر تعداد اولیه‌ی حباب‌ها بر واحد حجم (n_0) و قطر اولیه‌ی آنها d_{Nuc} داده شود. R_b با توجه به معادله‌ی (۱۶) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_b = \left(\frac{1}{\frac{4}{3}\pi n_0} \frac{\alpha}{1 - \alpha}\right)^{1/3} \quad (20)$$

البته لازم است که پارامترهایی نظیر تعداد اولیه‌ی حباب‌ها بر واحد حجم (n_0) و قطر اولیه‌ی آنها d_{Nuc} داده شود.

مدل نسبت حجمی سیال

با معادله‌ی زیر اثر تنش بین دوفاز اعمال می‌شود:

$$\partial_t(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) - \nabla \cdot \mu \nabla u - \rho g = -\nabla p - F_s \quad (21)$$

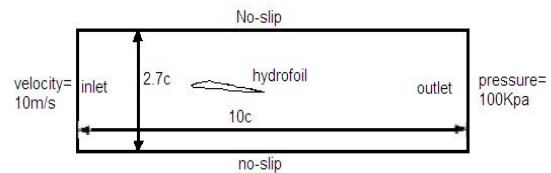
که در رابطه‌ی بالا F_s نشان دهنده‌ی نیروی سطحی است که فقط بر سطوح مشترک بین مایع و بخار وارد می‌گردد. کسر حجمی نیز با حل معادله‌ی زیر بدست می‌آید و در این معادله یک جمله‌ی برای اعمال تراکم مورد نیاز به سطوح مشترک اضافه شده است [۵].

$$\partial_t + \nabla \cdot (u) - \nabla \cdot ((1 - \alpha)u) = \frac{\dot{m}^+ - \dot{m}^-}{\rho_l} \quad (22)$$

ملاحظات شبیه‌سازی

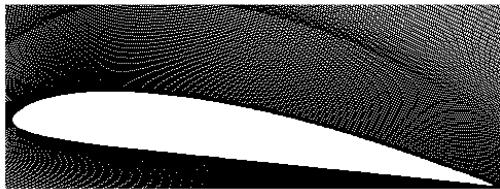
دامنه‌ی محاسباتی جریان و شرایط مرزی با توجه به شرایط آزمایشگاهی مرجع [۶] تنظیم گردیده است. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، هیدروفویل Clark-Y در مرکز تونل آب و با زاویه‌ی حمله‌ی ۸ درجه قرار گرفته است. دو عدد بدون بعد اصلی که در اینجا استفاده می‌شود عدد رینولدز و عدد کاویتاسیون می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$(23)$$



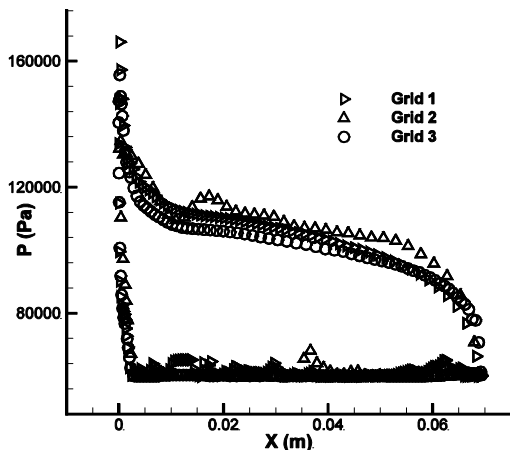
شکل ۱- حوزه‌ی محاسباتی و شرایط مرزی

که p فشار می‌باشد و p_v فشار بخار جریان آزاد می‌باشد که در این شبیه‌سازی به منظور ایجاد عدد کاویتاسیون مناسب برابر ۶۰۰۰۰ pa در نظر گرفته شده است و U نیز که سرعت جریان آزاد می‌باشد برابر ۱۰ m/s در نظر گرفته شده است. طول وتر هیدروفویل برابر ۷ cm می‌باشد و در نتیجه $\sigma=0.8$ و $Re=7 \times 10^5$ می‌باشد. همانطور که اشاره شد این شبیه‌سازی توسط کدهای CFD موجود در بسته‌ی نرم‌افزاری OpenFOAM انجام گرفته و حلگر جریان به روش حجم محدود بنا شده است و با توجه به اینکه هندسه‌ی هیدروفویل Clark-Y پیچیده نمی‌باشد شبکه‌ی محاسباتی بصورت مربعی و سازمان‌یافته تهیه گردیده است و در دو جهت بر روی دیواره‌ی هیدروفویل تصحیح شده است [۹]. با توجه به مرجع [۱۰] می‌دانیم که اندازه‌ی شبکه بر روی دیواره می‌تواند بر روی فرکانس جریان اثر بگذارد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود شبکه در راستای عمود بر دیواره آنقدر کوچک شده که مقدار Δy^+ روی سطح حدود ۲ می‌باشد. در جهت دیواره نیز یک تراکم ملایم داده شده است. تعداد سلول‌ها برابر ۱۲۰۰۰۰ می‌باشد که ۲۹۰ سلول بر روی دیواره هیدروفویل زده شده. این شبکه کل تونل آب را شامل می‌گردد تا اثرات دیواره تونل نیز اعمال شود.



شکل ۲- شبکه‌ی محاسباتی تولید شده در نرم‌افزار گمبیت

در شکل ۳ تاثیر استفاده از سه شبکه مختلف در توزیع فشار روی سطوح بالایی و پایینی هیدروفویل در زمان ۲۰۹ میلی ثانیه نشان داده شده است. سه شبکه استفاده شده به ترتیب شامل ۱۳۰ (شبکه اول)، ۲۹۰ (شبکه دوم) و ۳۶۰ (شبکه سوم) روی سطوح بالایی و پایینی می‌باشد. مشاهده می‌شود که جوابهای شبکه اول نوسانات زیادی داشته و فاقد دقت مناسب است ولی جوابهای دو شبکه بعدی برای توزیع فشار تقریباً بر یکدیگر منطبق است و لذا از شبکه دوم برای ارایه نتایج در این مقاله استفاده می‌شود.



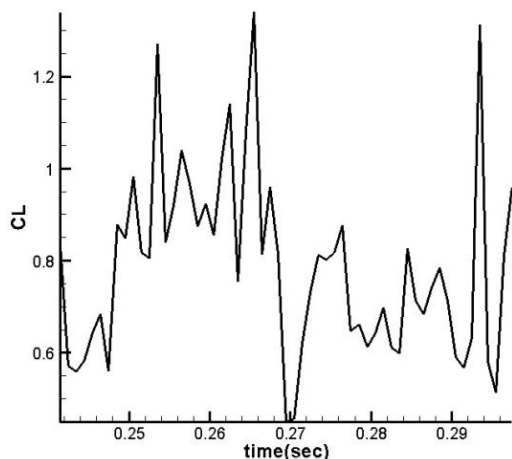
شکل ۳- بررسی تاثیر ابعاد شبکه بر توزیع فشار روی بدنه هیدروفویل در

زمان ۲۰۹ میلی ثانیه

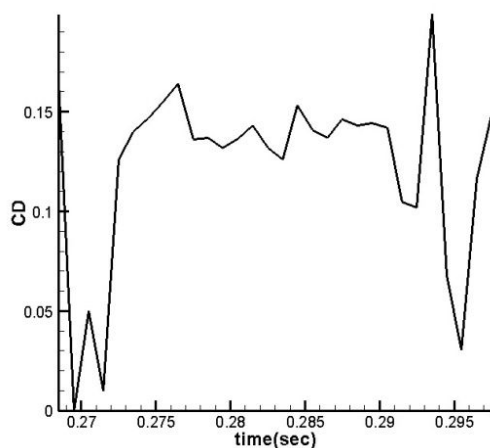
نتایج

در شکل ۴ تغییرات دینامیک کاویتاسیون با زمان نشان داده شده است. ستون سمت چپ کاویتاسیون شبیه‌سازی شده می‌باشد و ستون سمت راست کاویتاسیون نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد [۶]. نتایج برحسب زمان بی‌بعد شده (t/T) ارائه شده است که T دوره‌ی تناوب تکرار یک سیکل کاویتاسیون می‌باشد. در عدد کاویتاسیون برابر $0/8$ ، جریان در رژیم کاویتاسیون ابری قرار دارد که مشخصه آن کنده شدن متناوب نواحی بخار از روی سطح هیدروفویل می‌باشد. می‌توان مشاهده نمود که کاویتاسیون تقریباً تا نزدیک نیمه‌ی دوره‌ی تناوب به رشد خود ادامه می‌دهد، سپس جدایش گردابه‌ای رخ می‌دهد و بعد از آن کاویتاسیون ضعیف می‌شود. در نتیجه تأثیر جت‌های بازگشتی نواحی کاویتاسیون از دیواره جدا می‌شود و در داخل جریان سیال محو می‌شود. همانطور که شکل ۴ نشان می‌دهد تطابق خوبی میان حل عددی و مشاهدات آزمایشگاهی وجود دارد و این به دلیل انتخاب مدل دقیق LES و بعلاوه استفاده از مدل VOF برای ردیابی سطح مشترک دو فاز می‌باشد.

فشاری کمتر است که ناشی از نوسانات و نیروی شدید فشاری روی سطح بالایی هیدروفویل به دلیل کنده شدن نواحی بخار روی سطح هیدروفویل می‌باشد. با میان‌گیری از تغییرات ضرایب برا و پسا، می‌توان مقادیر میانگین C_D و C_L را محاسبه نمود. در جدول ۱ این مقادیر میانگین از نتایج آزمایشگاهی [۶] و شبیه‌سازی حاضر مقایسه شده است. نتایج حل عددی تطابق خوبی را با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد، به عبارتی خطای نتایج عددی حاضر برای ضریب برا حدود 7% و برای ضریب پسا حدود $2/5\%$ می‌باشد.



شکل ۵- تغییرات ضریب لیفت در اثر گذشت زمان

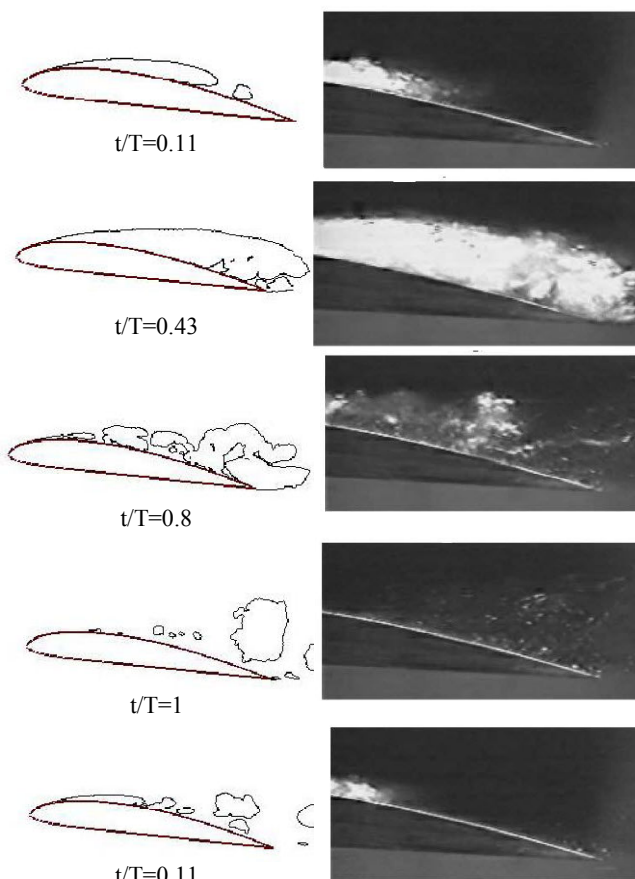


شکل ۶- تغییرات ضریب درگ در اثر گذشت زمان

جدول ۱- مقادیر میانگین C_D و C_L

| روش | $\overline{C_L}$ | $\overline{C_D}$ |
|----------------|------------------|------------------|
| شبیه‌سازی عددی | $0/71$ | $0/122$ |
| تجربی [۶] | $0/76$ | $0/119$ |

پروفیل سرعت لایه‌ی مرزی بر روی دیواره‌ی هیدروفویل در موقعیت مکانی $x/C = 0/2$ از شبیه‌سازی عددی حاضر و نتایج آزمایشگاهی مرجع [۶] در شکل ۷ نشان داده شده است. این پروفیل سرعت که بصورت میانگین گرفتن از سرعت جریان در گذر یک دوره‌ی تناوب از زمان بدست آمده است در طول عمود بر دیواره‌ی هیدروفویل رسم شده است. مانند

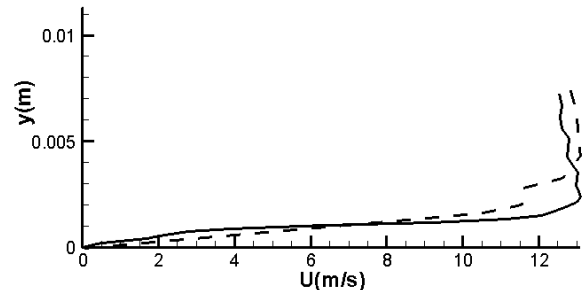


شکل ۴- شکل کاویتاسیون از شبیه‌سازی عددی حاضر (سمت چپ) و نتایج تجربی مرجع [۶] (سمت راست)

شکل‌های ۵ و ۶ تغییرات مقادیر ضرایب برا و پسا را با زمان در طول یک دوره پیروید کاویتاسیون نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نوسانات نیروی برا در مقایسه با نیروی پسا بیشتر است و این نوسانات برای این دو نیرو هم زمان روی نمی‌دهند. در محاسبه پسا، اثرات نیروی اصطکاکی نیز لحاظ شده است ولی پسای اصطکاکی در مقایسه با پسای

4. Sauer, J., "Instationären kaviterende Stromung Einneues Modell, basierend auf Front Capturing (VoF) and Blasendynamik". *PhD thesis*, Universitat, Karlsruhe, 2000.
5. Lu N., Solve Cavitating flow around a 2D hydrofoil using a user modified version of interPhaseChangeFoam, Tutorial, SE 412 96 Gothenburg, Sweden, 2009.
6. Wang G., Senocak I., Shyy W., Ikhagi T., Cao S., Dynamics of attached turbulent cavitating flows, *Progress in Aerospace Sciences* v. 37, pp. 551–581, 2001.
7. Gosset A., Diaz Casas V., Lopez Pena F., Evaluation of the CavitatingFoam Solver for Low Mach Number Flow Around a 2D Hydrofoil, *Fifth OpenFOAM Workshop*, Gothenburg, Sweden, 2010.
8. Fureby Ch., Grinstein F.F., Large Eddy Simulation of High-Reynolds-Number Free and Wall-Bounded Flows, *Journal of Computational Physics*, v. 181, 2002, pp. 68-97.
9. Lu, N. X., Large Eddy Simulation of CavitatingFlow on Hydrofoils, *licentiate of engineering thesis*, Department of Shipping and Marine Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2010.
10. Goncalves, G., and Decaix, J., Wall Model and Mesh Influence Study for Partial Cavities, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, v. 31, 2012, pp. 1-18.

نتایج قبل، پروفیل سرعت نیز تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. نکته قابل اهمیت در بررسی این شکل، وجود گردانیهای قابل توجه در فاصله کمی از سطح هیدروفویل، حدود ۱۲ متر بر ثانیه تغییرات سرعت در کمتر از ۲ میلی‌متر ارتفاع، می‌باشد که ضرورت استفاده از شبکه ریز در روی بدنه را نشان می‌دهد.



شکل ۷- پروفیل لایه‌ی مرزی در $x/c = 0.2$ ، خط کامل: نتایج شبیه‌سازی، خط چین: نتایج آزمایشگاهی مرجع [۶].

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر با استفاده از مدل اغتشاشی شبیه سازی گردابه‌های بزرگ (LES) و روش نسبت حجمی سیال، جریان ناپایای کاویتاسیونی روی هیدروفویل Clark-Y بررسی گردید. موجود بودن نتایج تجربی گسترده‌ای برای جریان کاویتاسیونی روی این هیدروفویل دلیل انتخاب هیدروفویل Clark-Y بود. پس از اطمینان از دقت شبکه انتخاب شده، نتایج حل عددی حاضر برای تغییرات دینامیک کاویتاسیون با نتایج تجربی مقایسه شد که مشاهده شد مدل استفاده شده قابلیت پیش‌بینی مناسب شکل بخارهای کاویتاسیون ابری هم در فاز رشد و هم در فاز کنده شدن را دارا می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل LES به دلیل داشتن توانایی بالا در رهگیری ساختارهای کوچک حجمی و زمانی، توانایی بالایی در شبیه سازی کاویتاسیون گذرا و دینامیک کنده شدن آن را دارا می‌باشد. همچنین ضرایب برا و پسا از حل عددی حاضر با دقت مناسبی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی بدست آمدند. بطور کلی می‌توانیم نتیجه‌گیری کرد که مدل اغتشاشی LES با همراهی روش نسبت حجمی سیال در سطح مشترک دو فاز، می‌تواند دینامیک کاویتاسیون روی هیدروفویل‌ها را مطابق با نتایج آزمایشگاهی شبیه‌سازی نماید. لازم به ذکر است که هزینه محاسباتی روش LES در مقایسه با مدل‌های ساده‌تر آشفتگی مانند مدل $k-\epsilon$ بیشتر است ولی این مدل‌های ساده آشفتگی توانمندی ارابه دقیق دینامیک کنده شدن کاویتاسیون را ندارند.

مراجع

1. Rodney O. F., Large-Eddy-Simulation Tools for Multiphase Flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 44 2012, pp. 47-76.
2. Biao H., Guo-yu W., Partially Averaged Aavier-Stokes Method for Time- dependent turbulent cavitating flows, *Journal of Hydrodynamics*, v. 23, 2011, pp. 26-33.
3. Bensow R.E., Bark G., simulating cavitating flows with LES in OpenFOAM, *European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD 2010*, J. C. F. Pereira and A. Sequeira (Eds), Portugal, 2010.