

بررسی عددی شروع حاشیه پایداری ابر سوپرکاویتاسیون حول دیسک

محمود پسندیده فرد

استاد، دانشگاه فردوسی مشهد
fard_m@um.ac.ir

حسینعلی کمالی

دانشجو دکتری آیرودینامیک، دانشگاه فردوسی مشهد
Ali1kamali@yahoo.com

چکیده

در مقاله حاضر پدیده‌ی سوپرکاویتاسیون مصنوعی بر روی یک دیسک مورد مطالعه قرار گرفته است. از کاربردهای سوپرکاویتاسیون مصنوعی استفاده از آن در کاهش درگ اجسام زیرسطحی می‌باشد؛ اما در این کاربرد ابر باید نسبت به نوسانات دمشی ثابت بماند تا پایداری سیستم حفظ شود. در این مقاله بر روی یک دیسک دمشی‌های مختلف گاز صورت و ابر کاویتیتی در دمشی‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش دمشی گاز، ابر کاویتیتی به حالتی می‌رسد که از آن به بعد افزایش دمشی تغییری در طول و مشخصات ابر کاویتیتی ایجاد نمی‌کند و حاشیه پایداری برای ابر ایجاد می‌شود که نسبت به نوسانات دمشی دچار تغییر نمی‌شود. همچنین مکانیزم بسته شدن ابر بعد از شروع حاشیه پایداری مورد مطالعه قرار گرفته شد که نشان می‌دهد بعد از شروع حاشیه پایداری مکانیزم ثابتی بر انتهای ابر حاکم است.

کلمات کلیدی: سوپرکاویتاسیون مصنوعی، دیسک؛ ابر کاویتیتی، مکانیزم، حاشیه پایداری.

1- مقدمه

کاویتاسیون هنگامی رخ می‌دهد که در بعضی از نواحی فشار از فشار بخار کمتر شده و این نواحی را بخار مایع و گاز غیرقابل میعان پر می‌کند [1]. پدیده کاویتاسیون در اکثر سیستم‌های پیشراننده پروانه کشتی، پمپ، نازل‌ها قابل مشاهده است. یکی از کاربردهای مهم کاویتاسیون کاهش نیروی پسا در اجسام غوطه‌ور است. لذا از این خصوصیت در طراحی اجسامی که در زیر آب حرکت می‌کنند استفاده می‌شود. این مساله سبب شده است که فعالیت‌های گسترده‌ای به لحاظ آزمایشگاهی و عددی صورت گیرد. در تحلیل کاویتاسیون از عدد بی بعد کاویتاسیون σ استفاده می‌شود. [1]

$$\sigma = \frac{2(P_{\infty} - P_v)}{\rho V_{\infty}^2} \quad (1)$$

که در آن P_v فشار بخار، V_{∞} و P_{∞} به ترتیب سرعت و فشار ورودی و ρ چگالی آب می‌باشد. [1] اگر ابعاد کاویتاسیون به قدری بزرگ باشد که کل جسم را دربرگیرد اصطلاحاً سوپرکاویتاسیون گفته می‌شود. در سوپرکاویتاسیون درگ گاهی تا حدود 90% کاهش می‌یابد [2]. سوپرکاویتاسیون به دو دسته‌ی سوپرکاویتاسیون طبیعی (بخار) و سوپرکاویتاسیون مصنوعی (دمشی) تقسیم می‌شود [2]. در سوپرکاویتاسیون مصنوعی می‌توان در سرعت‌های پایین بوسیله تزریق گاز، یک کاویتیتی بزرگ ایجاد کرد. همچنین سوپرکاویتاسیون مصنوعی می‌تواند شکل کاویتیتی را در مانور وسیله‌ی زیرسطحی حفظ کند در حالی که در حالت سوپرکاویتاسیون طبیعی هنگام مانور وسیله، شکل کاویتیتی عوض می‌شود [3]. در این مقاله عدد کاویتاسیون به صورت فشار داخل ابر نسبت به فشار دینامیکی که نشان دهنده فشار بی بعد می‌باشد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma(pcd) = \frac{2(P_c)}{\rho V_\infty^2} \quad (2)$$

که P_c فشار داخل ابر کاویتی است. همچنین در سوپرکاویتاسیون مصنوعی عدد فرود

$$Fr = \frac{U_\infty}{\sqrt{gd_c}} \quad (3)$$

و ضریب دمش را بصورت مقابل داریم.

$$CQ = \frac{\dot{Q}}{U_\infty d_c^2} \quad (4)$$

تحقیقات اولیه روی جریان‌های سوپرکاویتاسیون توسط ریچاردت به صورت آزمایشگاهی صورت گرفت [5]. لی‌پینگ و همکاران، به بررسی اثر هوادهی بر ابر کاویتاسیون روی یک مدل تقارن محوری پرداختند [6]. جی‌بین و همکاران نیز ابر کاویتی را در اعداد کاویتاسیون مختلف روی یک جسم زیرسطحی با استفاده از مدل توربولانسی k-w sst بررسی کردند. [7] در سال 1999 کنز و همکاران با استفاده از کد UNCLE جریان تقارن محوری همراه با کاویتاسیون مصنوعی و طبیعی حول چندین جسم را بررسی کردند [8]. اسکار در سال 2003 نتایج آزمایشگاهی برای میزان تزریق گاز بر روی یک بدنه با کاویتاتور دیسکی را ارائه و نحوه خروج گاز از انتهای کاویتی را بررسی نمودند [9]. ژانگ و همکاران در سال 2006 با بررسی آزمایشگاهی بر روی خصوصیات ظاهری سوپرکاویتاسیون طبیعی و مصنوعی اثر جاذبه را بررسی کردند [10]. کیم و آهن در سال 2015 مدل ویسکوز پتانسیل را به منظور شبیه سازی سه بعدی سوپرکاویتاسیون متقارن محوری توسعه دادند [11]. کارن و همکاران نیز در سال 2016 نحوه بسته شدن سوپرکاویتاسیون مصنوعی را در حالت‌های پایا و ناپایا بررسی نمودند [12].

امروزه به دلایل کاربردی و مخصوصاً کاهش درگ پدیده سوپرکاویتاسیون مصنوعی به شدت در حال تحقیق و بررسی به صورت عددی و آزمایشگاهی می‌باشد. به دلیل اینکه دیسک به عنوان کاویتاتور استفاده می‌شود، تحقیقات بسیاری بر روی دیسک در حال انجام می‌باشد. اما در شبیه سازی های عددی و متقارن محوری و بدون لحاظ اثر جاذبه بر روی دیسک، با افزایش تزریق طول ابر کاویتی نیز افزایش می‌یابد؛ یعنی با افزایش دمش گاز طول و سایر پارامترهای ابر کاویتی بزرگ و در حال تغییر می‌باشد اما در واقعیت اینچنین نمی‌باشد. به این دلیل شبیه سازی سه بعدی با لحاظ اثر جاذبه بر روی دیسک صورت گرفته تا به این سوال که با افزایش دبی گاز، طول و قطر و فشار ابرکاویتی به چه میزان تغییر خواهد کرد و حاشیه پایداری ابر کاویتی چگونه است یا به عبارتی آیا با افزایش گاز تزریقی می‌توان به نقطه ای رسید که بعد از آن مشخصات ابر کاویتی از جمله طول و قطر و فشار داخل ابر ثابت بماند و همنچنین نحوه خروج گاز در این حالت بررسی می‌شود.

2-2- معادلات حاکم

برای مدل سازی جریان سیال معادلات متوسط گیری شده ناویراستوکس حل شده است. همچنین برای مدل سازی کاویتاسیون دمشی و تعامل فازی از مدل VOF استفاده شده است. در این شبیه سازی از ترم هایی با دقت مرتبه دوم برای گسسته سازی معادلات فشار و سرعت و کسر حجمی استفاده شده است. جریان آب به صورت تراکم ناپذیر با چگالی 998 kg/m³ و از هوا با چگالی ثابت 1 kg/m³ برای تزریق استفاده شده است. همچنین شتاب جاذبه فعال و از مدل توربولانسی k-e استفاده شده است.

معادله پیوستگی برای جریان غیرقابل تراکم مخلوط به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m u_i) = 0 \quad (5)$$

معادله مومنتوم برای جریان غیرقابل تراکم مخلوط نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_m + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho_m g_i$$

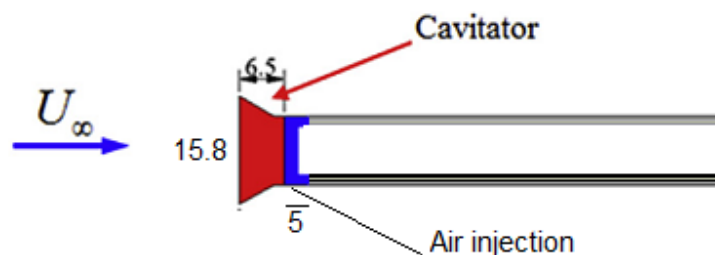
همچنین معادله پیوستگی برای فاز گازی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \alpha_g) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_g \alpha_g u_i) = 0 \quad (7)$$

که U_i و X_i به ترتیب مولفه‌های سرعت و جهت محتصات، t زمان، P فشار محلی، ρ_m چگالی مخلوط و μ_m نیز ویسکوزیته مخلوط است؛ g نیز شتاب جاذبه می‌باشد.

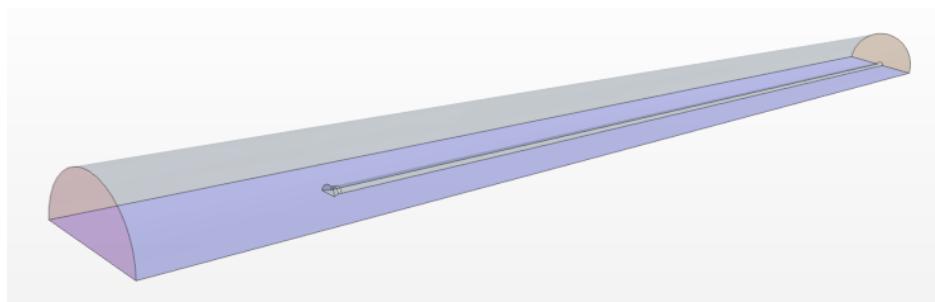
2- شبیه سازی

در این مقاله به منظور شبیه سازی، و افزایش دقت و تحلیل از نرم افزار قدرتمند CD Adapco STAR-CCM+ استفاده شده است. این نرم افزار در تحلیل سوپرکاویتاسیون از نرم افزارهای تجاری نظیر فلوئنت قدرتمندتر می‌باشد. شبیه سازی بر روی دیسک با قطر 15.8mm که نتایج تجربی آن موجود است صورت گرفته است. دیسک به لوله ای با قطر 10 mm متصل می‌باشد. شکل 1 هندسه دیسک و ابعاد آن را نشان می‌دهد. دامنه اطراف، سیلندری به قطر 112.8 mm می‌باشد. در شبیه سازی به علت تقارن نصف هندسه مدل سازی شده است.



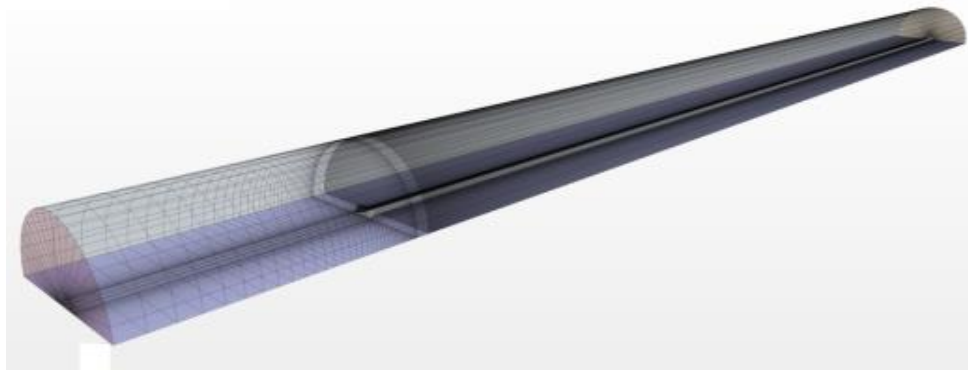
شکل 1- هندسه دیسک

شکل 2 نیز دامنه اطراف دیسک را نشان می‌دهد.



شکل 2- دامنه اطراف دیسک

به منظور شبکه بندی از شبکه سازمان یافته استفاده شده است تا با حجم محدود شبکه دقت شبیه سازی در CD- Adapco STAR-CCM+ افزایش یابد. شبکه توسط نرم افزار Ansys Meshing ایجاد شده و توسط نرم افزار تحلیل جریان فراخوانی شده است. شبکه زده شده در شکل زیر مشاهده می‌شود:



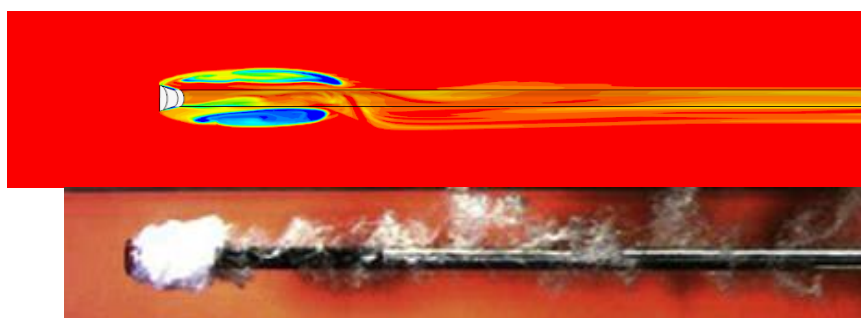
شکل 3- شبکه

3- نتایج:

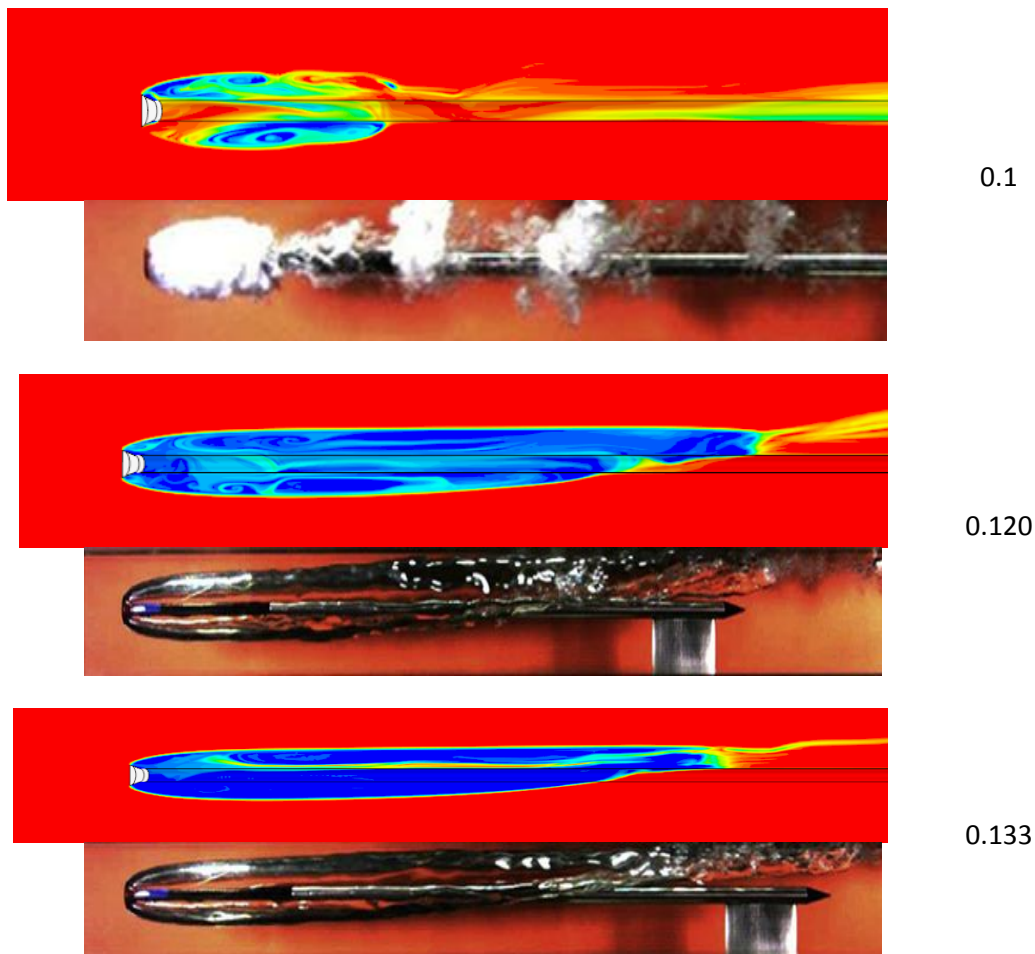
به منظور یافتن شروع حاشیه پایداری ابر سوپرکاویتاسیون از مقادیر کم شروع به تزریق گاز نموده و به تدریج میزان گاز دمشی افزایش می‌یابد. جدول 1 مقادیر مختلف گاز تزریقی را نشان می‌دهد.

جدول 1 مقادیر گاز تزریقی	
CQ	\dot{Q}
0.013353	0.00002
0.033381	0.00005
0.066763	0.0001
0.100144	0.00015
0.120173	0.00018
0.133526	0.0002
0.166907	0.00025
0.200288	0.0003
0.23367	0.00035
0.267051	0.0004

شکل 4 مقایسه ابرکاویتی و نتایج تجربی را برای چند حالت دمشی نشان می‌دهد:

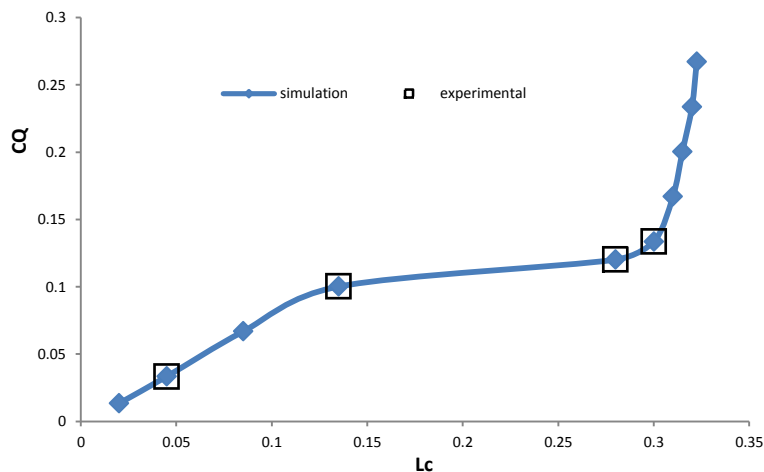


0.066



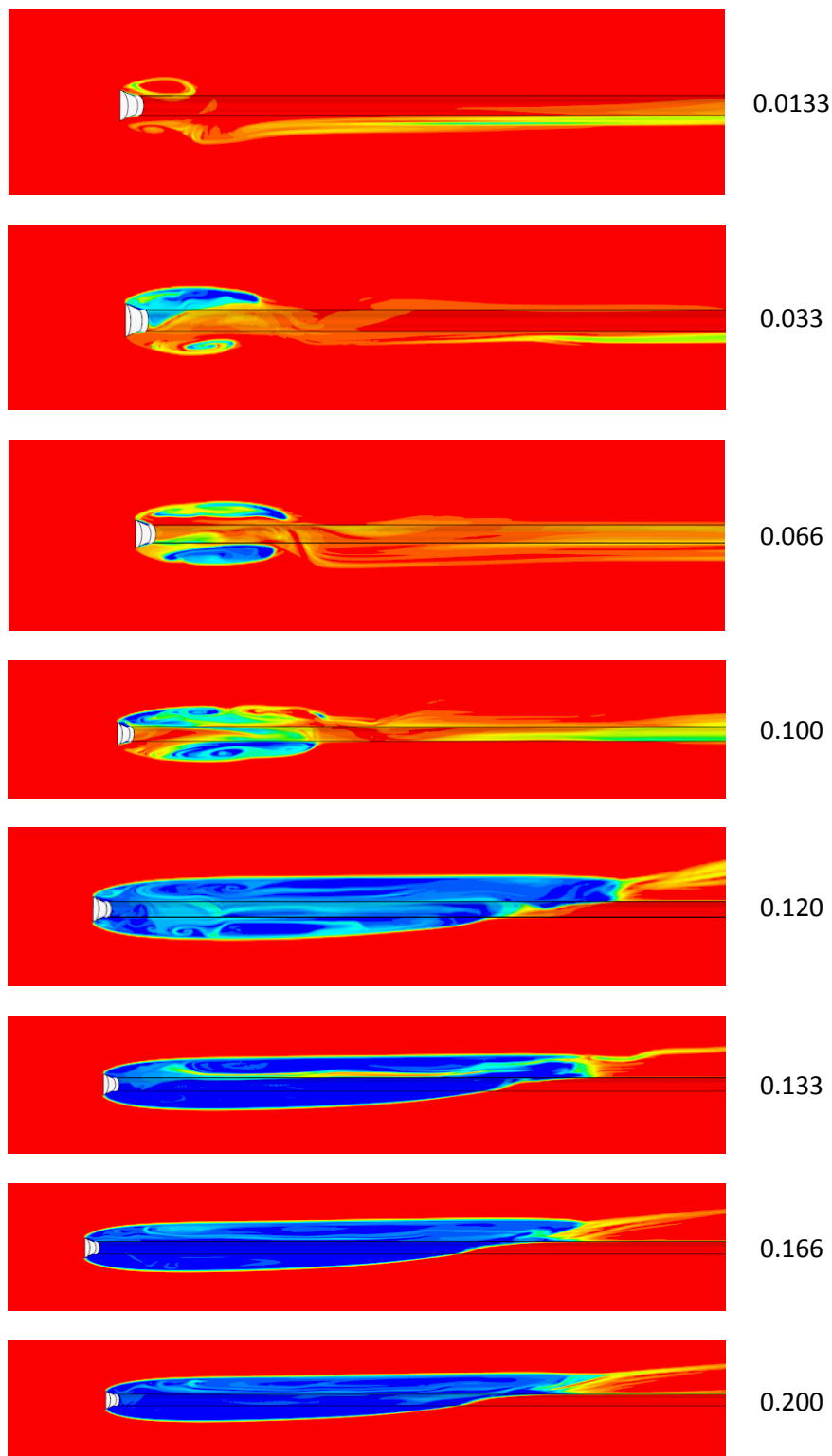
شکل 4- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی

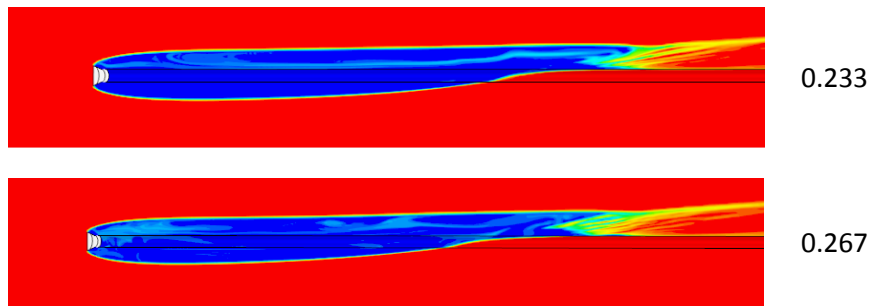
به منظور درک بهتر این پدیده شبیه‌سازی برای ضریب دمش 0.013 تا ضریب دمش 0.26 انجام شده است. شکل 5 نمودار طول کاویتی بر حسب ضرایب دمش مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش ضریب دمش طول ابر کاویتی افزایش می‌یابد تا به ضریب دمش 0.12 که می‌رسد از این نقطه به بعد طول ابر با افزایش ضریب دمش تقریباً ثابت می‌ماند یعنی دیگر ضریب دمش اثری بر طول ابر ندارد. همچنین نتایج شبیه‌سازی دارای دقت مناسب و با نتایج تجربی همخوانی دارد.



شکل 5- نمودار طول ابر کاویتی بر حسب ضرایب دمشی مختلف

شکل 6 نیز ابر کاویتی را در ضرایب دمشی مختلف نشان می‌دهد.

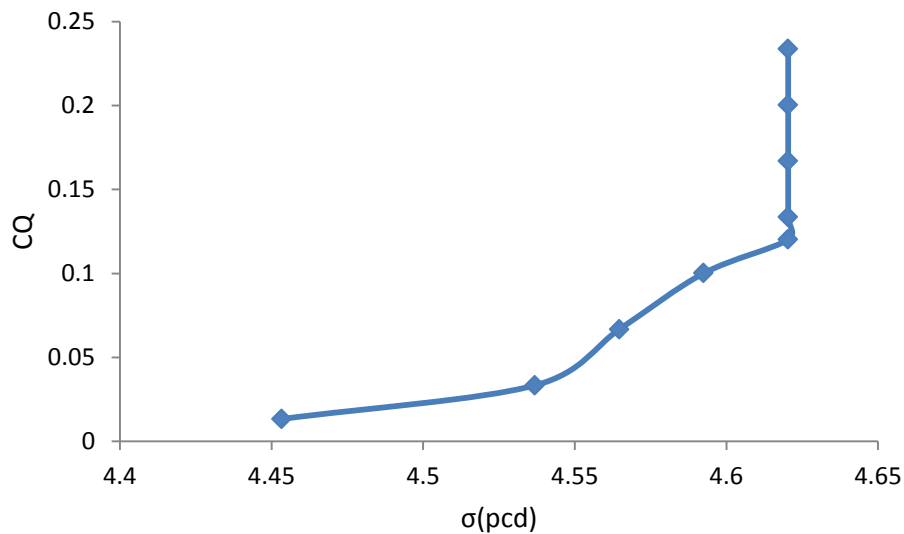




شکل 6- ابر کاویتی در ضرایب مختلف دمش

همانطور که از شکل 6 دیده می‌شود از ضریب دمش 0.12 به بالا ابر کاویتی ثابت و افزایش دمش تا دو برابر نیز تغییری در ابعاد و شکل ابر کاویتی ایجاد نمی‌کند. به عبارتی ضریب دمش 0.12 شروع حاشیه پایداری ابر کاویتی بوده و در طراحی اجسام زیرسطحی با کاویتاتور 15.8mm باید ضریب دمش بزرگتر از 0.12 باشد تا شکل ابر کاویتی در مانور و یا تغییرات و نوسان گاز تزریقی ثابت بماند.

شکل 7 نیز فشار بی بعد داخل ابر بر حسب ضریب دمش را نشان می‌دهد. مشخص است که با افزایش دمش و شروع حاشیه پایداری ابر کاویتاسیون فشار داخل ابر نیز ثابت بوده و افزایش دمش حتی تا میزان دو برابر نیز تغییری در فشار داخل ابر ایجاد نمی‌کند.



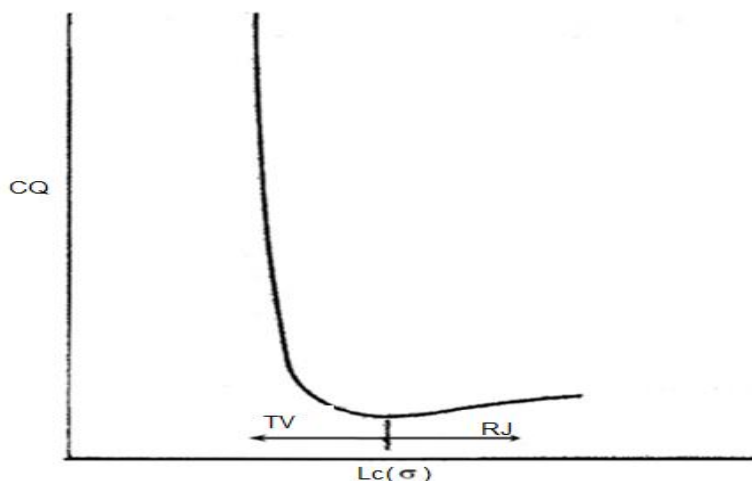
شکل 7- نمودار تغییرات فشار بی بعد به ضریب دمش

در آزمایش‌های تجربی مکانیزم‌های بسته شدن مختلفی گزارش شده است جدول 2 نام تعدادی از این مکانیزم‌ها را نشان می‌دهد.

جدول 2- نام برخی مکانیزم‌های بسته شدن کاویته	
RJ	Re-entrant jet
TV	Twin-vortex closure
QV	Quad vortex closure
FC	Foamy cavity
TVRJ	Hybrid TV&RJ
QVRJ	Hybrid QV&RJ
TVQV	Hybrid TV&QV

عموما چهار حالت پایدار برای سوپرکاویتاسیون دمشی وجود دارد که شامل FC، RJ، TV و QV می‌باشد. حالت FC یا کاویته کف آلود به حالتی از کاویته گفته می‌شود که به علت حباب‌های هوا مرز بین جریان گاز و آب نامشخص می‌باشد. حالت RJ حالتی از مکانیزم است که جریان آب به درون کاویته نفوذ می‌کند. بسته به شرایط گاهی این بازگشت جت به درون کاویته نیز می‌رسد و گاهی فقط در انتهای کاویته صورت می‌گیرد. مکانیزم جت بازگشتی از انتهای کاویته معمولا در حالتی از کاویته که ابر شفاف از سوپرکاویته ایجاد نشده بروز می‌کند. در شکل 6 دمش‌های 0.06 و 0.1 دارای مکانیزم جت بازگشتی می‌باشند.

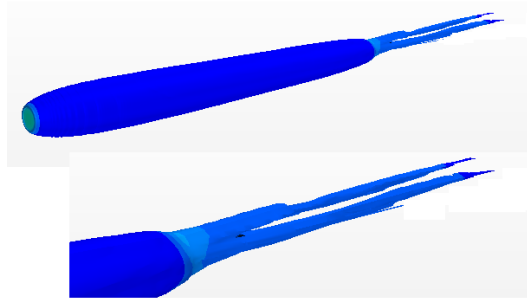
حالت TV به مکانیزمی از بسته شدن ابر کاویته گفته می‌شود که در انتها دو گردابه ایجاد می‌شود. در یک ضریب دمشی بحرانی ابر کاویته از مکانیزم RJ به مکانیزم TV وارد می‌شود. در این مکانیزم طول و قطر ابر کاویته به حالتی می‌رسد که در آن تغییر ضریب دمشی تغییر محسوس در ابر کاویته ایجاد نمی‌کند. شکل 8 محدوده رژیم TV و RJ را نشان می‌دهد.



شکل 8- محدوده رژیم TV و RJ

در شبیه سازی حاضر نیز مکانیزم انتهای ابر بعد از شروع حاشیه پایداری بررسی شده است. شکل 9 مکانیزم انتهای ابر را بعد شروع حاشیه پایداری ابر نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است مکانیزم نشان داده شده یک مکانیزم TV است. این مکانیزم در دمش‌های مختلف بعد شروع حاشیه پایداری ثابت بوده و به مکانیزم دیگری تبدیل نشده است. این امر نشان می‌-

دهد با شروع حاشیه پایداری ابر کاویتی مکانیزم خروج گاز از انتهای ابر به مکانیزم TV تبدیل شده با افزایش دمش مکانیزم موجود ثابت بوده باعث می‌شود تا شکل ابر بدون تغییر بماند.



شکل 9- کانتور ابر کاویتی و مکانیزم بسته شدن انتهای ابر در حاشیه پایداری (ضریب دمش 0.12 و بزرگتر)

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله از ضرایب دمش کم تا ضرایب دمش بالا دمش بر روی کاویتاتور دیسک شکل دمش مصنوعی صورت گرفت. با افزایش ضریب دمش ابر کاویتی به حالتی می‌رسد که از آن به بعد با افزایش ضریب دمش تغییری در طول و فشار ابر ایجاد نمی‌شود و اصطلاحاً شروع حاشیه پایداری ابر کاویتی از این قسمت خواهد بود.

با افزایش ضریب دمش ابتدا ابر ناپایا ایجاد می‌شود و سپس ابر به حالتی می‌رسد که مشخصات ابر از جمله طول و فشار داخل ابر ثابت می‌ماند. در این حالت مکانیزم خروج گاز از انتهای ابر به صورت دو گردابه می‌باشد یا به عبارتی مکانیزم TV بر انتهای ابر حکمفرما می‌شود.

بعد از شروع حاشیه پایداری ابر افزایش دمش تغییری در مکانیزم بسته شدن ابر ایجاد نمی‌کند و مکانیزم ابر با افزایش دمش همچنان TV باقی می‌ماند و طول و فشار کاویتی ثابت می‌ماند.

مراجع

- 1- Senocak, Shyy, Computational methodology for the simulation of turbulent cavitating flows, The University of Florida 2001.
- 2- Reichardt H., The Laws of Cavitation Bubbles at Axially Symmetrical Bodies in a Flow, Ministry of Aircraft Production, MAP-VC Reports and Translations 766 ONR, 1946.
- 3- Lee, S.-J., Kawakami, E., and Arndt, R.E.A. Investigation of the Behavior of Ventilated Supercavities in a Periodic Gust Flow, ASME J. Fluids Eng., 135, 2013.
- 4- May, A., Water Entry and the Cavity - Running Behavior of Missiles, Naval Surface Weapons Center, Silver Spring, Maryland, Technical Report 75-2, 1975.
- 5- Reichardt H., The physical laws governing the cavitation bubbles produced behind solids of revolution in a fluid flow. Rep.UM6628.Gottingen: The Kaiser Wilhelm Institute for Hydrodynamic Research, 1945.
- 6- Li-ping J, Cong W, Ying-jie W, Wang HB, Zhang JZ, Kai-ping Y Numerical simulation of artificial simulation of artificial ventilated cavity. J Hydrodyn 18(3): 273-279, 2006.

- 7- Bin J, Xian-wu L, Peng X, Zhang Y, Wu Y, Xu H Numerical investigation of the ventilated cavitating flow around an underwater vehicle based on a three –component cavitation model. *JHydrodyn* 22(6): 753-759, 2010.
- 8- Kunz R.F., and Boger,D.A., and Chyczewski,T.S., and Stinebring,D R., and Gibeling,H J., and Govindan,T R., Multi-Phase CFD Analysis of Natural and Ventilated Cavitation about Submerged Bodies 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, San Francisco, California,USA, 1999.
- 9- Schauer T.J., an Experimental Study of a Ventilated Supercavitating Vehichle. Ms.c Thesis, University of Minnesota, 2003.
- 10- Zhang X.W., Wei Y.J., Zhang J.Z., Wang C., and Yu K.P., Experimental Research on the Shape Characters of Natural and Ventilated Supercavitation .*Journal of Hydrodynamics, Series B*,Vol .19, pp .564-571, 2006.
- 11- Kim,J.-H.,Ahn,B.-K., Numerical simulation of supercavitating flows using a viscous-potential method.In:Proceedings of the 9th International Symposium on Cavitation. EPFL, Lausanne, Switzerland, 2015.
- 12- Karn, A., Armdt, R.E.A., Hong, J., Anexperimental investigation into supercavity closure mechanisms. *J. Fluid Mech.*789, pp259e284, 2016.