



بررسی پدیده کاویتاسیون بر روی اژدر

ولی اله علیزاده^۱، ایرج حسینی^۲

Email: irmig@isiran.com³

چکیده

در این مقاله تحلیل جریان کاویتاسیونی یک اژدر با استفاده از روشهای عددی و نرم افزار فلونت^۴ انجام خواهد شد. جریان اطراف اژدر دو بعدی می باشد و چگونگی تغییر ضرایب هیدرودینامیکی لیفت، درگ و عدد اویلر می بایست بررسی گردد. کاویتاسیون یک پدیده دو فازی بسیار پیچیده بین آب و بخار آب می باشد، که شامل تغییرات فاز و اثرات ویسکوز می باشد. علی رغم تحقیقات خوبی که در این زمینه صورت گرفته است، هنوز ساختار واقعی کاویتاسیون به طور کامل شناخته شده نیست. فشارهای پایین در جریان سیال در سرعتهای بالای اتفاق می افتد، بنابراین اگر فشار جریان به اندازه کافی افت کند پدیده کاویتاسیون با ایجاد حبابهای بخار آب تحقق می یابد. این حالت دو فازی با افزایش فشار ناپدید می شود و حبابها خیلی سریع رشد کرده و منهدم می شوند. در این رابطه فیزیکدانان زیادی به تحقیق پرداخته اند که در این مقاله نیز تا اندازه ای این موضوع مطرح شده است تا بتوان محل وقوع کاویتاسیون را در یک اژدر مورد بررسی قرار داد.

کلمات کلیدی: عدد کاویتاسیون، ضریب فشار، فشار موضعی، انرژی جنبشی آشفته، نرخ استهلاک چسبندگی

¹ محقق ارشد مرکز طراحی و پژوهشهای دریایی

² محقق ارشد مرکز طراحی و پژوهشهای دریایی

³ مرکز طراحی و پژوهشهای دریایی ساصد

⁴ Fluent



مقدمه

کاویتاسیون پدیده مربوط به مایعات بوده و بررسی مکانیزم آن شامل فازهای شروع، توسعه و انهدام می باشد. برای بررسی این پدیده علاوه بر خواص فیزیکی مایع، اغتشاشات جریان آزاد و مقیاس جسم، باید از عدد بدون بعد اویلر نیز استفاده شود:

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho_0 u_0^2}$$

P_0 ، ρ_0 و u_0 بترتیب فشار، چگالی و سرعت جریان آزاد بالا دست می باشند و همچنین، P فشار موضعی سیال وارد بر جداره جسم خواهد بود. حال اگر P به مقدار P_v برسد (مشخص نیست که در چه نقطه ای در اطراف جسم به مقدار P_v می رسد) در آن صورت احتمال بروز حباب های بخار وجود خواهد داشت، بنابراین:

$$C_{P_{\min}} = \frac{P_v - P_0}{\frac{1}{2} \rho_0 u_0^2} = -\frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2} \rho_0 u_0^2} = -\sigma$$

$$\therefore \sigma = -C_{P_{\min}}$$

در نتیجه عدد کاویتاسیون برای تمام نقاط روی جسم یکسان خواهد بود. به بیانی هندسه جسم در تعریف عدد کاویتاسیون ظاهر نشده است. اما، این بدین معنا نیست که هندسه جسم در شروع و مراحل بعدی پدیده فوق دخالت ندارد. براستی تا بحال پارامتر بدون بعدی که اثر هندسه جسم را برای آغاز و توسعه کاویتاسیون نشان دهد، بدست نیامده است. اگر عدد کاویتاسیون از σ_i^5 کمتر گردد، در آن صورت ناحیه سفید رنگ گسترش یافته و در نهایت با ادامه کاهش عدد مربوطه سیال به مرحله سوپرکاویتاسیون خواهد رسید. عدد σ_i خود تابعی از اغتشاش جریان آزاد، مقدار گازهای حل شده موجود در مایع، زبری سطح و خواص ترمودینامیکی مایع می باشد. هدف از تعریف عدد کاویتاسیون این است که با تغییر شرایط جریان بالادست جسم، بتوان شروع و توسعه این پدیده را مشاهده و بررسی کرد. در تعریف این عدد، اندازه جسم، خواص فیزیکی مایع و چگونگی سطح از نظر زبری دخالتی ندارند. متغیرهای اصلی که بر شروع و مراحل بعدی کاویتاسیون یک مایع جریان یابنده مؤثرند، شامل هندسه جسم، فشار مطلق و سرعت جریان، فشار بحرانی که در آن حباب بتواند تشکیل شود خواهند بود. متغیرهای دیگری مثل لزجت، کشش سطحی، مشخصات تبخیر شدن مایع، نوع سطح از نظر زبری، تمیزی یا پنهان سازی ذرات گازی یا جامد باید در بررسی فرآیند کاویتاسیون منظور گردند. همچنین گرادیان فشار ناشی از ثقل برای حفره های بزرگ نیز مهم خواهد بود.

معادلات حاکم

در این حالت جریان سیال به صورت تراکم ناپذیر در نظر گرفته می شود و با توجه به بررسی عدد رینولدز جریان که در حدود 10^7 می باشد، بنابراین جریان سیال مغشوش است. برای مدل کردن مؤلفه های ناشی از اغتشاشات در معادله ممنتوم از مدل (K, ε) استفاده می شود. دستگاه مختصات را متصل به شناور در نظر گرفته و فرض می شود که شناور ثابت و سیال بسمت شناور حرکت می کند. بنابراین معادلات دارای بعد زمان نمی باشند و دائمی هستند.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{معادله پیوستگی:}$$

$$\rho \nabla \cdot (\bar{v} \cdot \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) \quad \text{معادله اندازه حرکت:}$$

در معادلات فوق (u, v, w) به ترتیب مؤلفه های سرعت در جهت های (X, Y, Z) و (τ_{ij}) نیز مؤلفه های مربوط به تانسور تنش می باشند:

$$\bar{\tau} = \mu (\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T)$$

\bar{v} بردار سرعت کلی، μ لزجت مولکولی می باشد.

معادله حاکم بر مدل

در مدل (K, ε) میدان آشفته توسط دو متغیر بیان می گردد.

- انرژی جنبشی آشفتگی (K)
- نرخ پراکنش ویسکوز انرژی جنبشی آشفتگی (ε)

$$K = \frac{1}{2} U_i' U_i'$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) U_{i,j}' U_{i,j}'$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

در رابطه فوق C_μ یک ضریب تجربی است که مقدار آن برابر 0.09 می باشد. معادلات انتقال زیر که برای

معادلات (K, ε) بکار می روند عبارتند از:

⁶ Turbulent kinetic energy

⁷ Viscous dissipation rate of turbulent kinetic energy

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

ثابت‌های این مدل که در گستره وسیعی از جریان‌های آشفته وارد می‌شوند عبارتند از:

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

مشخصات هندسی و شبکه بندی

بعد از بدست آمدن هندسه مورد نظر می‌بایست شبکه‌بندی بر روی مدل هندسی انجام شود. برای ایجاد

شبکه روش‌های مختلفی وجود دارد ولی برای تولید یک شبکه خوب باید به نکات زیر توجه نمود:

- هموار بودن توزیع نقاط شبکه
- عمود یا نزدیک به عمود بودن خطوط شبکه
- تراکم یا انبساط نقاط شبکه در نقاط حساس

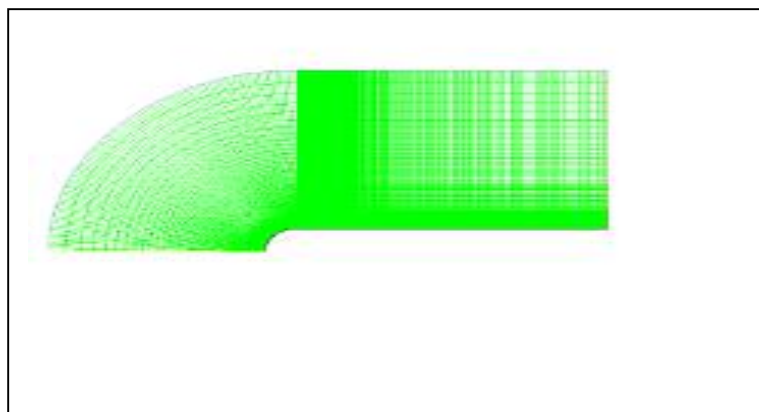
برای شبکه‌بندی می‌توان از دو روش استفاده کرد. اول این که مستقیماً صفحه یا حجم مورد نظر را

شبکه‌بندی نمود. این روش شبکه‌بندی آسان و راحت است ولی شبکه تولید شده ممکن است خوب نباشد و موارد فوق

در مورد آن صادق نباشد. در روش دوم که در این پروژه نیز استفاده شده است برای شبکه‌بندی می‌توان ابتدا خطوط را

به تعداد و اندازه‌های مورد نظر تقسیم‌بندی کرد و سپس صفحه را با توجه به تقسیم‌بندی‌های خطوط آن شبکه‌بندی

نمود. که در شکل (۱) این شبکه بندی مشاهده می‌شود.



شکل (۱): شبکه بندی نهایی برای اژدر در زاویه صفر درجه و سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه



انتخاب نوع حل کننده

برای انتخاب نوع حل کننده دو روش وجود دارد.

- روش حل تفکیکی
- روش حل پیوسته

در روش حل تفکیکی هر یک از معادلات بقاء، جرم، مومنتوم و انرژی به طور جداگانه حل میشوند. لذا در هنگام حل نیاز به حافظه کمتری نسبت به روش پیوسته که در آن کلیه معادلات بطور همزمان حل می‌شوند، دارد. از اینرو بدلیل محدودیت های سخت افزاری روش حل تفکیکی به عنوان حل کننده استفاده شده است.

انتخاب روش خطی سازی

جهت خطی سازی معادلات دو روش وجود دارد :

- روش ضمنی
- روش صریح

با توجه به اینکه از روش حل تفکیکی به عنوان حل کننده استفاده شده است و تنها روش خطی سازی در این الگوریتم روش ضمنی می‌باشد. از روش ضمنی برای خطی سازی معادلات استفاده شده است. همچنین انتخاب روش صریح فقط با حل کننده پیوسته قابل استفاده است.

انتخاب روش گسسته سازی معادلات

جهت گسسته سازی معادلات حاکم بر میدان محاسباتی روشهای متفاوتی وجود دارد که انتخاب هر یک از این روشها بسته به نوع مسئله و دقت مورد نیاز متفاوت می باشد. این روشها عبارتند از :

- آپویند مرتبه ۱
- آپویند مرتبه ۲
- قاعده توانی
- روش مرتبه ۳ کوئیک

لذا برای گسسته سازی معادله مومنتم از روش مرتبه ۳ کوئیک که دارای دقت بالاتری نسبت به دیگر روشها است استفاده می شود. برای گسسته سازی دیگر معادلات از روش آپویند مرتبه ۲ که دارای دقت کافی برای محاسبات می‌باشد، استفاده می شود.



انتخاب روش میان‌یابی فشار

روشهای میان‌یابی فشار متفاوتی در زمان استفاده از حل‌کننده تفکیکی در دسترس می‌باشد، نظیر:

- روش استاندارد
- روش خطی
- روش مرتبه ۲
- روش نیروهای حجمی

به دلیل اینکه در بیشتر روشها، روش استاندارد دارای جوابهای قابل قبولی می‌باشد. در این جا نیز از روش استاندارد برای میان‌یابی فشار استفاده می‌شود.

انتخاب روش ارتباط فشار- سرعت

سه روش برای کوپل کردن سرعت-فشار در حل تفکیکی وجود دارد:

- سیمپل
- سیمپل سی
- پیزو

به دلیل اینکه الگوریتم پیزو در جریانهای گذرا و الگوریتمهای سیمپل و سیمپل سی در جریانهای پایدار قابل اعمال هستند. در این مسأله از روش الگوریتم سیمپل^۸ جهت بیان ارتباط بین سرعت و فشار استفاده شده است.

انتخاب روش چند شبکه ای

در نرم افزار فلونتت از دو نوع الگوریتم برای سرعت بخشی به حل استفاده می‌شود:

- الگوریتم چند شبکه ای AMG
- الگوریتم چند شبکه ای FAS

به دلیل اینکه از حل‌کننده تفکیکی استفاده شده است. تنها حق انتخاب برای الگوریتم چند شبکه ای روش

AMG میباشد.

مدل‌سازی جریان آشفته

روشهای متعددی جهت مدل‌سازی جریان آشفته وجود دارد که هدف نهایی این روشها تعیین اندازه تنشهای

رینولدز می‌باشد. این مدلها به سه دسته اساسی زیر تقسیم می‌شود:

⁸ Simple



- صفر معادله‌ای

- یک معادله‌ای

- دو معادله‌ای

مدلهای صفر معادله‌ای، تنها از روابط و معادلات جبری جهت توصیف μ_t و خواص قابل اندازه‌گیری استفاده می‌کنند. مدل‌های یک معادله‌ای، از یک معادله انتقال PDE اضافی نیز در این بین استفاده می‌کنند و مدل‌های دو معادله‌ای شامل دو عدد PDE اضافی هستند. واضح است که هیچ مدل آشفتگی وجود ندارد که برای تمامی مسائل مهندسی جوابگو باشد. با توجه به موارد ذکر شده، جهت مدل‌سازی جریان آشفته، انواع روش‌های مدل‌سازی جریان آشفته مورد بررسی و مدل‌سازی قرار گرفته‌اند تا در نهایت بتوان از بین مدل‌های فوق بهترین مدل را برای مدل‌سازی جریان حول اژدر انتخاب کرد. مدل‌های بررسی شده عبارتند از :

- Inviscid Model
- Spalart-Allmaras Model
- Standard K-epsilon Model
- RNG K-epsilon Model
- Realizable K-epsilon Model
- Standard K-omega Model
- SST K-omega Model

مدل‌سازی جریان حول دیواره

جریان‌ات آشفته به شدت متأثر از حضور دیواره‌های جامد می‌باشند. واضح است که سرعت متوسط جریان به واسطه شرط عدم لغزش متأثر از حضور دیواره خواهد شد. بنابراین برای مدل‌سازی جریان در نزدیک دیواره از دو روش استفاده می‌گردد :

- استفاده از توابع دیواره

- استفاده از مدل‌های دو معادله‌ای رینولدز پائین

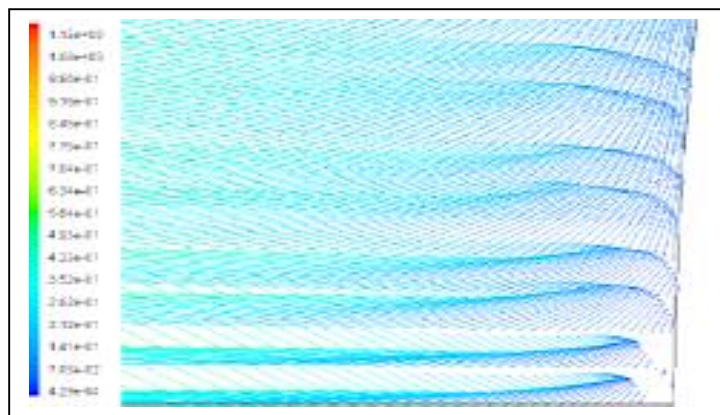
استفاده از توابع دیواره، نیاز به اصلاح مدل‌های آشفتگی را برطرف می‌سازد. لیکن مشکل اصلی این توابع محدودیت استفاده از آنها در جریان‌ات مختلف می‌باشد. اما در جریان‌اتی که غالب میدان جریان دارای عدد رینولدز بالا می‌باشد، استفاده از توابع دیواره صرفه‌جویی قابل توجهی را در منابع محاسباتی (زمان، حجم محاسبات، حافظه و ...) باعث می‌گردد. چرا که برای نواحی نزدیک دیواره (متغیرهای فیزیکی با تغییرات شدیدی مواجه هستند) نیازی به دوباره حل نمودن متغیرهای فیزیکی و حل CFD ندارند. روش استفاده از توابع دیواره، انتخابی معمول و رایج در عمده

مدلسازی های صنعتی می باشد. در این مسئله نیز با توجه به اینکه عمده $50 < y^+ < 500$ قرار دارد. و عمده جریان در رینولدز بالا می باشد. لذا ناحیه لزج کنار دیواره بسیار باریک می باشد. از اینرو جهت مدل سازی رفتار جریان در کنار دیواره از توابع دیواره استفاده شده است.

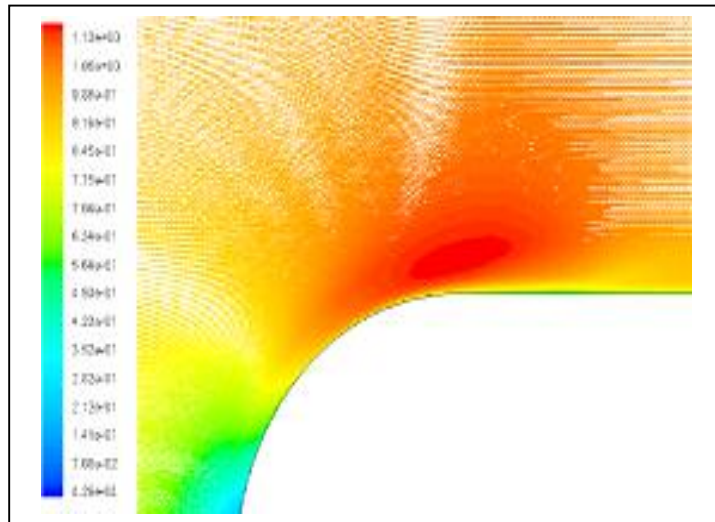
نتایج

در این مقاله نتایج شبیه سازی برای اژدر در زاویه حمله صفر درجه با سرعت $1/5$ متر بر ثانیه تشریح شده است و در ابتدای حل حالت دائمی برای نشان دادن شکل گیری حبابها صورت می گیرد و در نهایت یک حل غیردائمی برای شبیه سازی فرایند سیکلی غیرمنظم شکل گیری حباب ها صورت می گیرد. از آنجائیکه فلوئنت قادر به تحلیل بیشتر از دو فاز در مدل کاویتاسیون خود نمی باشد از دو فاز آب مایع و بخار آب در حل عددی استفاده می شود.

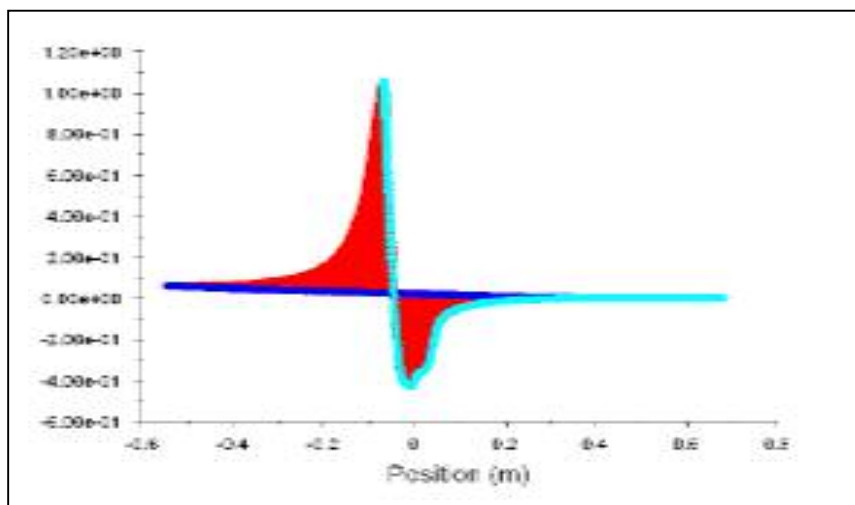
شکل (۳) بردار سرعت را در اطراف بدنه اژدر نشان می دهد که حداکثر سرعت در جلوی اژدر اتفاق می افتد که با کاهش فشار در این ناحیه تا فشار تبخیر آب، حبابهای بخار آب بوجود می آیند و پدیده کاویتاسیون شکل می گیرد. در شکل (۴) نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار فلوئنت ارائه شده است که توزیع فشار میانگین زمانی را روی بدنه اژدر نشان می دهد. در شکل (۵) نیز می توان یک پیک فشار منفی کوچک را که در جلوی دماغه ایجاد شده است مشاهده نمود.



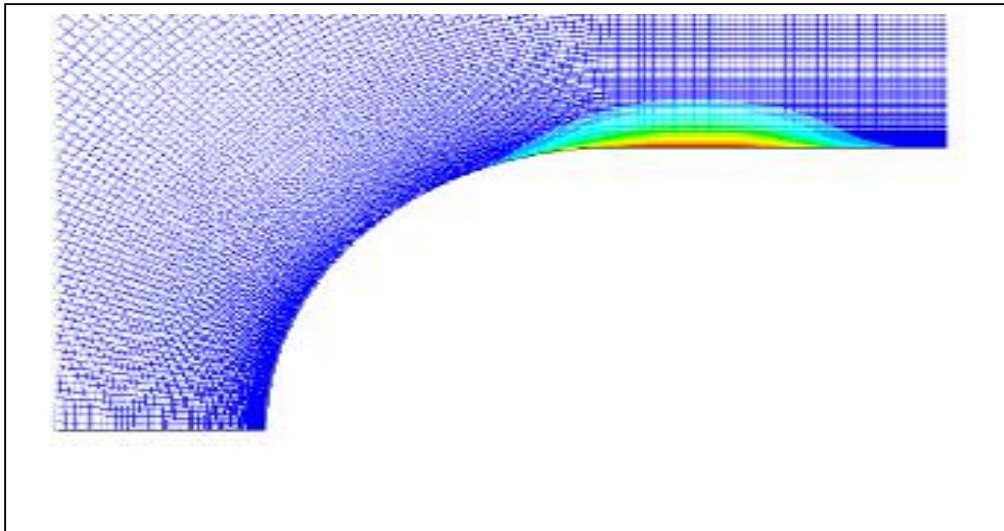
شکل (۲): تغییرات سرعت در لایه مرزی



شکل (۳): کانتور بردار سرعت برای اژدر در زاویه صفر درجه و سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه



نمودار (۴): توزیع ضریب فشار در اطراف اژدر در زاویه صفر درجه و سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه



شکل (۵): کسر حجم بخار اژدر در جریان کاویتاسیونی

منابع و مراجع

- Kunz, R.F., Boger, B.A., Chyczewski, T.S., Stineberg, D.R., Gibeling, H.J., and Govindan T.R., "Multiphase CFD of Natural Ventilated Cavitation about Submerged Bodies", in ASME paper FEDSM99-7364, Proceedings of 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, 1999.
- Kinnas, S.A., "5. Cavitation", 1996.
- Atlar, M., "A History of the Emerson Cavitation Tunnel".
- Fluent Manual, "Modeling Turbulence", Chapter 10.
- Kubota, A., Kato, H., Yamaguchi, H., "A New Modelling of Cavitating Flows: A Numerical Study of Unsteady Cavitation on a Hydrofoil Section", J. Fluid Mech. (1992), Vol. 240, PP. 59-96.

- مقدمه ای بر دینامیک سیالات محاسباتی ترجمه دکتر شجاعی فرد و مهندس هشترودی.