

# محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر یک هیدروفویل تحت شرایط کاویتاسیون از نوع گسترده

کیوان صادقی\*

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مهرداد رجبی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۰/۳/۶، تاریخ تصویب ۸۰/۱۱/۶)

## چکیده

در این مقاله، روشی ساده و سریع برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی (لیفت و درگ) وارده بر یک هیدروفویل، هنگامی که تحت شرایط کاویتاسیون از نوع گسترده قرار دارد، معرفی میگردد. ایده اصلی در این روش ساده، تقسیم بندی جریان حول چنین هیدروفویلی به یک ناحیه غیر ویسکوز و یک ناحیه ویسکوز است. اولین گام در این روش، بدست آوردن توزیع فشار بر روی سطح خیس شده هیدروفویل است که برای این منظور حل پتانسیل با استفاده از روش Panel صورت پذیرفته است. در مرحله بعد لازم است توزیع تنش برشی بر روی سطح هیدروفویل تعیین شود و برای این منظور از روشهای انتگرالی، هم برای حل معادلات لایه مرزی آرام و هم درهم، استفاده شده است. برای حل لایه مرزی آرام از روش Thwaites و برای حل لایه مرزی درهم از روش Head استفاده بعمل آمده است. برای تعیین نقطه شروع درهمی جریان از معیار Mitchel و برای محاسبه ضریب اصطکاک پوسته ای  $C_f$  از رابطه Ludwig استفاده میگردد. محاسبه ضرایب لیفت و درگ بر حسب عدد کاویتاسیون در مورد یک هیدروفویل خاص، حاکی از موفقیت نسبی این روش ساده در برآورد اثر پدیده کاویتاسیون بر نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر یک هیدروفویل می باشد.

**واژه های کلیدی:** عدد کاویتاسیون، لایه مرزی، هیدروفویل، ضریب لیفت، ضریب درگ، روش پنل

## مقدمه ای بر کاویتاسیون:

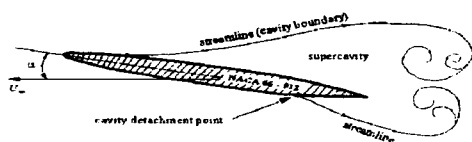
روشهای تئوریک و تحلیلی چندان موفقیت آمیز نبوده است و در اغلب موارد طراح مجبور است یا از روشهای پرخرج آزمایشگاهی و یا از روشهای عددی برای نیل به این هدف استفاده نماید.

مشکل عمده در دستیابی به یک تئوری جامع در مورد پدیده کاویتاسیون را میتوان به ماهیت غیر دائم جریان لزج، دو فازه و پیچیده ای نسبت داد که بطور همزمان شامل تغییر فاز از مایع به بخار نیز می باشد. اگرچه باید اذعان نمود که در سالهای اخیر پیشرفتهای قابل ملاحظه ای در شبیه سازی و آنالیز این دسته از جریانات غیر دائم حاصل شده است [۳] اما متأسفانه روشهای مزبور عموماً بسیار پیچیده، وقتگیر و پرهزینه می باشند و نمیتوان بعنوان ابزاری مهندسی روی آنها حساب نمود. از نقطه نظر مهندسی، طراح معمولاً ترجیح میدهد (حداقل در مراحل اولیه طراحی) با ابزاری مجهز گردد که

استفاده از مقاطع بال<sup>۱</sup> در قایقهای هیدروفویل امکان دستیابی به سرعتهایی بالاتر از قایقهای معمولی را فراهم کرده است. با اینوصف کاربرد قایقهای مزبور در سرعتهایی بیش از ۱۰۰ کیلومتر در ساعت بعلت وقوع اجتناب ناپذیر پدیده کاویتاسیون و تأثیر مخرب آن بر نیروی لیفت وارده بر قایق با محدودیتهای جدی روبرو می باشد [۱]. امروزه تلاش گسترده ای در جریان است تا بتوان سرعت ماکزیمم این شناورها را تا مرز ۱۵۰ کیلومتر در ساعت و بالاتر از آن افزایش داد [۲]. بدیهی است لازمه چنین امری، طراحی مقاطع بالی است که بتواند نیروی لیفت مورد نیاز قایق را حتی تحت شرایط کاویتاسیون نیز فراهم سازد. متأسفانه، بعلت پیچیدگی ذاتی پدیده کاویتاسیون، طراحی چنین مقاطع بالی با استفاده از

\* sadeghy@chamran.ut.ac.ir

اینجا نیز بعلت پیچیدگی ذاتی پدیده در اغلب موارد لازم شده است که از فرضیات ساده کننده ای همچون فرض غیر لزج بودن سیال استفاده شود. بر اساس چنین فرضیاتی، مسئله تبدیل به مسئله ای از نوع پیدا کردن میدان فشار حول یک جسم غوطه ور (با خطوط جریانی از نوع باز) میشود و برای این منظور نیز روشهای متعددی مورد استفاده قرار گرفته اند. بعنوان مثال، Helmholtz [۴] از روش هیدروگراف<sup>۲</sup> برای این منظور استفاده نمود. در همین رابطه، Wu از تکنیک نگاهشتهای همدیس<sup>۳</sup> برای پیدا کردن میدان فشار حول یک ایرفویل استفاده نمود و این تکنیک را علاوه بر حالت "کاویتاسیون گسترده" به حالتیایی نیز که در آن کاویتاسیون از نوع "جزیی" بود تعمیم داد [۵]. از طرف دیگر، Tulin از تئوری اغتشاشات جزیی برای پیدا کردن میدان فشار حول جسم سود جست [۶].



شکل ۱: کاویتاسیون گسترده حول یک هیدروفویل بطور شماتیک.

مشکل عمده روشهای تحلیلی فوق در این است که تنها برای مقاطع نازک و آنهم در زوایای حمله کوچک قابل استفاده می باشند. متأسفانه حتی با وجود در نظر گرفتن تمامی این نکات نیز، میدان فشار در نزدیکیهای دماغه ایرفویل از دقت کافی برخوردار نبود که علت این امر قرار گرفتن نقاط منفرد این تئوریهها در این ناحیه است. Furuya با در نظر گرفتن ترمهای غیر خطی توانست دقت این تئوریهها را تا حد زیادی بهبود بخشد [۷] اما بعلت ماهیت غیر خطی این ترمها، تئوریههای اصلاح شده فقط در مورد برخی از سطوح ساده قابل استفاده بودند و امکان استفاده از آنها برای بدست آوردن میدان فشار حول اجسامی با شکلهای دلخواه هندسی وجود نداشت [۷ و ۸]. بعلت محدودیت روشهای تحلیلی در بدست آوردن میدان فشار حول یک ایرفویل، در طی سالیان گذشته روشهای عددی متعددی برای نیل به این هدف ابداع شده اند.

به وی امکان دهد تا بتواند بطور سریع عملکرد ایرفویلها را موجود را تحت شرایط کاویتاسیون (حداقل از نظر کیفی) با یکدیگر مقایسه نماید و احیاناً از میان آنها ایرفویل مناسبی را برای استفاده در قایق مورد نظر انتخاب نماید (بدیهی است در مراحل بعد، بویژه در مواقعیکه لازم گردد در پروفیل یک ایرفویل اصلاحاتی صورت پذیرد و یا اینکه ایرفویل خاصی منحصرراً برای استفاده در قایقهای هیدروفویل طراحی گردد میتوان از روشهای پیچیده تر و نرم افزارهای کارآمدتری همچون Fluent برای این منظور استفاده نمود). خوشبختانه دستیابی به چنین ابزاری با توجه به وضعیت خاصی که پدیده کاویتاسیون در اغلب موارد به خود میگیرد امکان پذیر می باشد.

واقعیت امر این است که خوشبختانه در اغلب موارد (بویژه در سرعتهای بسیار بالا) پدیده کاویتاسیون در قایقهای هیدروفویل معمولاً از نوع گسترده است که اصطلاحاً به آن "سوپر کاویتاسیون" نیز اطلاق میگردد. ویژگی بارز این نوع خاص از کاویتاسیون در اندازه حبابهای تشکیل شده در اطراف جسم است که معمولاً بسیار بزرگ و متصل به سطح هیدروفویل می باشند (شکل ۱). بعبارت دیگر، در این نوع خاص از کاویتاسیون، وسعت فضایی در اطراف جسم که تحت تاثیر پدیده کاویتاسیون قرار میگیرد براحتی قابل مقایسه با ابعاد هندسی خود جسم است. امتیاز بزرگ این نوع از کاویتاسیون در این است که اگرچه در مقیاس مولکولی همچون سایر انواع کاویتاسیون، در اینجا نیز جریان اساساً از نوع غیر دائم می باشد اما میتوان در مقیاس ماکروسکوپی چنین کاویتاسیونی را جریانی از نوع دائم تلقی نمود (شکل ۱). بی تردید تحلیل چنین جریانات کاویتاسیونی بمراتب ساده تر از حالتیهای دیگر کاویتاسیون است و این احتمالاً دلیل اصلی برای این امر است که اکثر فعالیتهاییکه از زمان پیدایش قایقهای هیدروفویل بر روی پدیده کاویتاسیون شده است مختص به این نوع خاص از کاویتاسیون بوده است.

با توجه به سادگی ظاهری پدیده سوپر کاویتاسیون نسبت به سایر انواع کاویتاسیون، از بدو پیدایش قایقهای هیدروفویل تلاشهای بسیاری صورت پذیرفته است تا بتوان با استفاده از روشهای تئوریک عملکرد این قایقها را تحت چنین شرایطی از کاویتاسیون پیش بینی نمود. اما در

شده برای این منظور، برای بدست آوردن حل لایه مرزی آرام از روش Thwaites و برای حل لایه مرزی درهم از روش Head استفاده بعمل آمده است. در ضمن برای تعیین شروع درهمی جریان از معیار ناپایداری Michel و برای محاسبه ضریب اصطکاک پوسته ای از رابطه Ludwig استفاده بعمل است. لازم بذکر است که روش ترکیبی مزبور قبلا در جریانات کاویتاسیون بکار برده نشده است [۱۵-۱۷].

### معادلات حاکمه و روش حل آنها

اولین گام در محاسبه نیروهای لیفت و درگ وارده بر هیدروفویلی که تحت شرایط کاویتاسیون قرار دارد، تعیین میدان فشار در اطراف جسم است که این امر با استفاده از روش پنل<sup>۴</sup> صورت می پذیرد. برای این امر از توزیع تعدادی چشمه بر روی سطح هیدروفویل و نیز یک گرداب در انتهای جسم (برای برقراری شرط کوتا) استفاده میگردد. در مورد این چشمه ها میتوان گفت که روی هر یک از پنلها قدرت چشمه ها ثابت است ولی این قدرت از یک پنل به پنل دیگر فرق میکند. تعداد چشمه ها و گرداب انتهایی نیز در واقع تعیین کننده تعداد معادلاتی است که باید حل شوند.

اولین حل پتانسیل با این فرض اساسی که کاویتاسیونی در جریان رخ نداده است انجام میشود. با استفاده از توزیع فشاری که از این حل بدست می آید و با فرض این که حتی در هنگام کاویتاسیون نیز بتوان از این میدان فشار برای تعیین توزیع فشار بر روی بخش خیس شده هیدروفویل استفاده نمود مسئله تبدیل به تعیین نقطه شروع کاویتاسیون و مرز کاویتاسیون<sup>۵</sup> میگردد. برای نیل به این امر، مکان هندسی نقاطی در اطراف جسم که در آنها فشار سیال برابر با فشار بخار است تعیین شده و بتوسط یک خط منحنی بیکدیگر وصل میشوند. با این فرض که این خط را بتوان بعنوان یک خط جریان در نظر گرفت، محل برخورد این خط با سطح هیدروفویل بعنوان نقطه شروع کاویتاسیون<sup>۶</sup> در نظر گرفته میشود. در حل بعدی پتانسیل، بر روی این خط جریان تعدادی نقاط کنترل قرار داده میشوند و حل آنقدر تکرار میگردد تا همگرایی حاصل گردد (معیار همگرایی در این مورد

Golden و [۱۰] Yamaguchi و [۹] Nishiyama [۱۱] برای این منظور از توزیع توابع منفرد (چاه، چشمه، دابلت و گرداب) استفاده نمودند که روش آنها بعدها بوسیله Lemmonier [۱۲] از نظر دقت وضعیت بهتری پیدا نمود. لازم بذکر است که در روشهای عددی فوق، از خطی نمودن شرایط مرزی استفاده شده بود. Pellone [۱۳] بدون اینکه از چنین فرضیات ساده کننده ای در مورد شرایط مرزی استفاده کند توانست که توزیع فشار حول یک هیدروفویل را تحت شرایط "کاویتاسیون گسترده" بدست آورد.

متأسفانه هیچیک از روشهای فوق الذکر در مقام مقایسه با نتایج تجربی از دقت قابل قبولی برخوردار نمی باشند و بنظر میرسد که اشکال عمده در این زمینه در رابطه با نادیده انگاشتن اثرات ویسکوز (چه بطور مستقیم و چه غیر مستقیم) باشد. همانطوریکه قبلا اشاره شد، در تمامی روشهای فوق، اثرات ویسکوز بطور کامل نادیده گرفته شدند. بنظر میرسد که Michel و Franc [۱۴] اولین کسانی باشند که این اثرات را در بررسی پدیده "کاویتاسیون گسترده" مورد لحاظ قرار داده باشند. با اینوصف هدف اصلی از تحقیقات آنها پیدا کردن معیاری برای تعیین نقطه شروع کاویتاسیون بر روی سطح یک هیدروفویل بوده است از اینرو تعجبی ندارد که در مرجع [۱۴] ضریب لیفت و یا درگ هیچ هیدروفویلی تحت شرایط "کاویتاسیون گسترده" گزارش نشده است (اگرچه باید اذعان نمود که در مقاله مزبور اطلاعات تجربی در مورد ضرایب لیفت و درگ جسمی دو بعدی با مقطع بیضوی در زوایای حمله مختلف ارائه شده است).

هدف اصلی از انجام این پروژه، ارائه روشی ساده و کاربردی بر مبنای استفاده از تئوریهای رایج علم مکانیک سیالات برای پیش بینی ضرایب لیفت و درگ هیدروفویلها با شکل دلخواه و در زوایای حمله مختلف تحت شرایط کاویتاسیون از نوع گسترده است. در این روش، هم از توزیع فشار و هم توزیع تنش برشی بر روی سطح هیدروفویل برای محاسبه ضرایب مزبور استفاده میشود. همچنین با اضافه نمودن ضخامت جابجایی<sup>\*</sup>  $\delta^*$  به ضخامت فیزیکی هیدروفویل، حل پتانسیل مستقیما به حل ویسکوز مربوط میشود. در برنامه کامپیوتری تهیه

میشود [۱۹]. معیار Michel بر اساس نتایج آزمایشگاهی بر روی ایروفویل‌های صاف در جریان زیر صوت بدست آمده است و بنظر میرسد که معیار مناسبی برای هیدروفویلها (یعنی در جاییکه سیال بوضوح غیر قابل تراکم است) باشد (مشروط بر اینکه سطح هیدروفویل به اندازه کافی صاف باشد).

$$(Re)_{\theta_{tr}} = 1.174 \left[ 1 + \frac{22400}{(Re)_{s_{tr}}} \right] (Re)_{s_{tr}}^{0.46} \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $Re$  عدد رینولدز و زیر نویس  $tr$  معرف نقطه شروع درهمی جریان  $Y$  است. برای استفاده از این معادله، لازم است که در اثنای حل معادلات مربوط به لایه مرزی آرام، اعداد رینولدز  $Re_s$  و  $Re_{\theta}$  بر روی نقاط واقع بر روی سطح جسم بطور پیوسته محاسبه گردند و به محض اینکه در معادله فوق صدق نمودند، حل معادلات مربوط به لایه مرزی درهم از آن نقطه شروع شود.

در این کار تحقیقاتی برای حل لایه مرزی درهم از روش Head استفاده میشود [۶]. در این روش لازم است دو معادله دیفرانسیل زیر (که معادله اول در واقع همان معادله انتگرال ممنوم فون کارمن است) بطور همزمان حل گردند:

$$\frac{d\theta}{dx} + \frac{\theta}{U} \frac{dU}{dx} (H+2) = \frac{C_f}{2} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx} (U\theta H_1) = 0.0306U(H_1-3.0)^{-0.6169} \quad (4)$$

در روابط فوق، مقدار  $H_1$  بستگی به مقدار  $H$  دارد بنحویکه به ازای  $H > 1.6$  از معادله (۵) و به ازای مقادیر  $H < 1.6$  از معادله (۶) حساب میشود.

$$H_1 = 0.8234(H-1.1)^{-1.287} + 3.3 \quad (5)$$

$$H_1 = 0.5501(H-0.6778)^{-3.064} + 3.3 \quad (6)$$

برای حل معادلات (۳) و (۴)، ضخامت ممنوم در نقطه

کوچکتر شدن تغییر در موقعیت نقاط کنترل از مقداری معین می باشد).

پس از نهای شدن حل پتانسیل، در مرحله بعد، جریان در لایه مرزی حل میگردد. در اینجا فرض میشود که در هر نقطه روی سطح هیدروفویل، ضخامت لایه مرزی همواره از شعاع انحنای جسم کمتر باشد. همچنین فرض میشود که هم لایه مرزی آرام و هم لایه مرزی درهم ممکن است بطور همزمان بر روی سطح هیدروفویل وجود داشته باشند. برای حل لایه مرزی آرام از روش انتگرالی Thwaite's استفاده میشود. بر طبق این روش ضخامت ممنوم  $\theta$  از رابطه زیر بدست می آید [۱۸]:

$$\theta^2 = \frac{0.45\nu}{U^6} \int U^5 ds \quad (1)$$

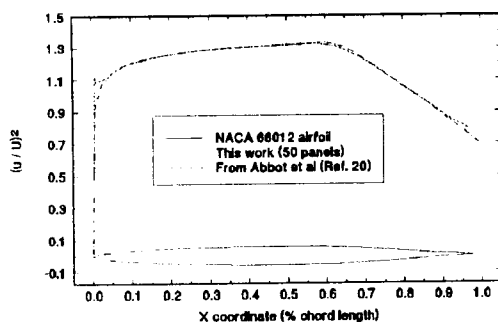
در رابطه فوق  $U$  سرعت در خارج از لایه مرزی است که از حل پتانسیل بدست می آید.  $s$  نیز فاصله هر نقطه از سطح هیدروفویل تا نقطه سکون آن در دماغه هیدروفویل است.

پس از تعیین ضخامت ممنوم، ضریب اصطکاک  $C_f$  و ضریب شکل  $H (= \delta^*/\theta)$  را میتوان بصورت تابعی از پارامتری موسوم به پارامتر گرادیان فشار  $\lambda = (\theta^2/\nu)dU/ds$  (برای این منظور

می توان از مراجع ۱۸ و ۱۹ استفاده کرد). بر اساس روش Thwaite's معیار جدایی لایه مرزی آرام عبارت است از  $H = 3$ ,  $\lambda = -0.09$ . در هنگام حل لایه مرزی آرام، این معیار همواره چک میشود تا محل نقطه جدایی بر روی سطح هیدروفویل تعیین گردد. این نقطه، در مرحله بعد، با نقطه شروع کاویتاسیون مقایسه میگردد تا مشخص شود کدامیک نزدیکتر به دماغه هیدروفویل می باشند. بر طبق معیار پیشنهاد شده بتوسط Franc و Michel [۱۴] اگر نقطه جدایی بعد از نقطه کاویتاسیون قرار گیرد، در اینصورت ناحیه جدایی در داخل فضای کاویتاسیون قرار میگیرد و میتوان از جدایی صرف نظر نمود. اما اگر نقطه جدایی بالا دست نقطه کاویتاسیون باشد، در اینصورت میتوان این نقطه را همان نقطه شروع کاویتاسیون فرض نمود.

در گام بعد، لازم است نقطه عبور (از جریان آرام به درهم) تعیین گردد. در این کار تحقیقاتی برای این منظور از معیار Michel بعنوان شرط ناپایداری جریان آرام استفاده

است که میتوان وضعیت را در نوک هیدروفویل بهبود بخشید مشروط بر اینکه از تعداد پنل بیشتری برای مدل نمودن شکل ایرفویل استفاده شود که این امر لازمه اش موجود بودن مختصات نقاط بیشتری از سطح این هیدروفویل می باشد که چنین اطلاعاتی متاسفانه در دسترس نمی باشد.



شکل ۲: توزیع سرعت بر روی سطح هیدروفویل NACA 66012

در بخشهای بعد، ضریب لیفت این هیدروفویل بصورت تابعی از عدد کاویتاسیون (که جزو اعداد بدون بعد است) عرضه میگردد. بر طبق مشاهدات تجربی، این عدد بدون بعد از اهمیت خاصی در انواع مختلف پدیده کاویتاسیون برخوردار است [۲۲]. عدد کاویتاسیون تعریفهای مختلفی دارد که متداولترین آن بصورت زیر است [۲۲].

$$\sigma = (P_e - P_c) / \left( \frac{1}{2} \rho_\infty U^2 \right) \quad (8)$$

در رابطه فوق  $P_c$  فشار در داخل حفره (حباب) کاویتاسیون است که برابر با فشار بخار فرض میشود. شکل (۳) ضریب لیفت این هیدروفویل را در چندین عدد کاویتاسیون و بصورت تابعی از زاویه حمله نشان میدهد. همانطوریکه میدانیم در صورتیکه زاویه حمله کوچک باشد، ضریب لیفت اجسام نازک متناسب با زاویه حمله است. شکل (۳) بخوبی نشان میدهد که در هنگام وقوع پدیده کاویتاسیون این قاعده کلی الزاما برقرار نیست. در حقیقت، نتایج بدست آمده در این پروژه حاکی از این است که تنها در صورتیکه عدد کاویتاسیون بالا باشد

عبور (که در موقع حل لایه مرزی آرام قبلا بدست آمده است) و مقدار  $H = 1.4$  (که مربوط به جریان در بالای یک صفحه تخت است) بعنوان شرایط اولیه در معادلات فوق قرار داده میشوند. همچنین، در معادله (۳) به جای  $C_f$  از رابطه زیر که بتوسط Ludwig پیشنهاد شده است استفاده میشود [۱۹ و ۲۰].

$$C_f = 0.246 \times 10^{-0.678H} (\text{Re})^{-0.268} \quad (7)$$

لازم بذکر است که پس از بدست آوردن اولین حل لایه های مرزی آرام و درهم، ضخامت جابجایی  $\delta^*$  محاسبه شده و قبل از انجام حل بعدی، به ابعاد فیزیکی جسم اضافه میگردد. با اینکار، شکل جسم الزاما عوض میشود، از اینرو لازم است که حل پتانسیل مجدداً تکرار گردد. با این شیوه، حل ویسکوز و غیر ویسکوز بیکدیگر کوپل میگردند و این عمل آنقدر تکرار میگردد تا همگرایی حاصل گردد.

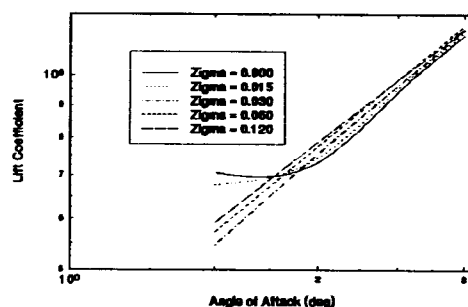
## نتایج بدست آمده و تحلیل آنها

کارایی روش فوق را با تعیین ضریب لیفت هیدروفویل شناخته شده NACA 66-012 تحت شرایط کاویتاسیون مورد ارزیابی قرار می دهیم. این هیدروفویل بدلیل اینکه نقطه فشار مینیمم آن از دماغه جسم خیلی فاصله دارد (حدوداً به اندازه ۶۰ درصد وتر) از اینرو از نقطه نظر مقاومت در مقابل اثرات مخرب کاویتاسیون، هیدروفویل مناسبی محسوب میگردد. ارزش دیگر این ایرفویل در این است که در مورد چگونگی تغییر ضریب لیفت آن در اثر وقوع کاویتاسیون اطلاعات تجربی موجود می باشد [۲۱]. شکل (۲) توزیع سرعت بر روی سطح این ایرفویل را در زاویه حمله صفر نشان میدهد. برای رسیدن به این توزیع سرعت، حل پتانسیل با ۵۰ پنل انجام شده است. در این شکل، همچنین نتایج بدست آمده توسط مرجع کلاسیک Abbot نیز برای مقایسه آورده شده است [۲۲]. همانطوریکه در این شکل مشاهده میشود، دو منحنی مزبور (غیر از نزدیکهای دماغه ایرفویل) بسیار بیکدیگر نزدیک هستند که این امر بخوبی نشان دهنده این امر است که بخش پتانسیل از برنامه کامپیوتری (نوشته شده بزبان فرترن) بخوبی کار میکند. لازم بذکر

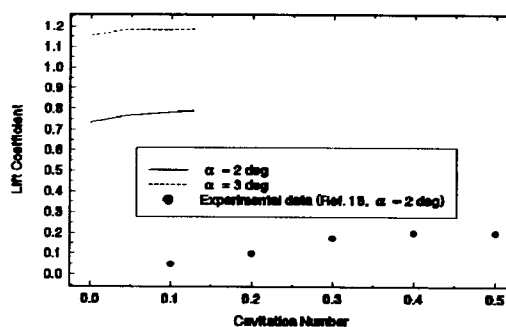
در ضریب لیفت نیز هر چقدر که عدد کاویتاسیون کمتر باشد بیشتر می‌گردد که این رفتار را میتوان به تشکیل حبابهای بزرگ کاویتاسیون در اعداد کاویتاسیون کوچک نسبت داد. نتایج آزمایشگاهی، این رفتار را بطور کیفی مورد تایید قرار میدهد اما از نظر کمی اختلاف محسوسی بین نتایج تئوریک و نتایج تجربی مشاهده میشود (به شکل ۴ مراجعه شود). دلایل این اختلاف را میتوان به عوامل زیر ارتباط داد:

- روش ارائه شده در اینکار تحقیقاتی صرفاً برای ایروفویل‌های صاف صادق است در حالیکه در عمل ممکن است آزمایش بر روی ایرفویلی با زبری معین انجام شده باشد.
- برای سادگی حل، در این پروژه فرض شده است که حباب کاویتاسیون در اطراف جسم از نوع باز است (شکل ۱) در حالیکه در عمل ممکن است حباب بصورت بسته باشد.
- در بدست آوردن نتایج عددی، فرض شده است که هیدروفویل مزبور در سیالی نامتناهی قرار گرفته است در حالیکه در عمل آزمایش بر روی هیدروفویلی که در عمق معینی داخل آب قرار داده شده بود انجام گرفته است (تحت چنین شرایطی لازم است انحنای سطح آب و اثر امواج ایجاد شده در آن نیز در محاسبات لحاظ گردد).
- در این پروژه فرض شده است که فشار داخل حباب کاویتاسیون دقیقاً برابر با فشار بخار است که این امر بعلت وجود گازهای محلول در آب الزاماً درست نیست.
- در این پروژه فرض شده است که توزیع فشار در ناحیه خیس شده هیدروفویل دقیقاً برابر با مقدار متناظر آن از تئوری پتانسیل باشد در حالیکه در عمل ممکن است پس از وقوع کاویتاسیون، میدان فشار با آنچه که تئوری پتانسیل نشان میدهد فاصله داشته باشد.
- در این کار تحقیقاتی، برای سادگی آنالیز، اثر گازهای محلول در آب نادیده انگاشته شده است در حالیکه ممکن است در عمل این گازها بر روی نتایج اندازه گیری اثر گذارده باشند. تحت چنین شرایطی، این

(بعبارت دیگر در هنگامیکه کاویتاسیون از نوع جزئی است) چنین رابطه ای بین ضریب لیفت و زاویه حمله قابل تحقق می باشد. هر چقدر وضعیت کاری هیدروفویل از نظر شدت کاویتاسیون حادثر میشود (که این امر متناظر با کاهش عدد کاویتاسیون است) بنحویکه کاویتاسیون گسترده حاکم بر جریان گردد در اینصورت انحراف از رابطه خطی مورد اشاره در فوق بیشتر می‌گردد.



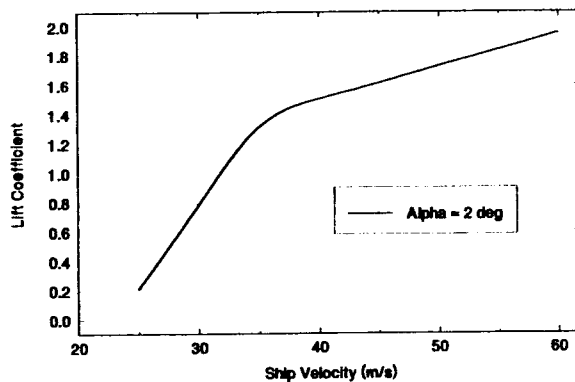
شکل ۳: اثر عدد کاویتاسیون ( $\sigma$ ) بر ضریب لیفت هیدروفویل



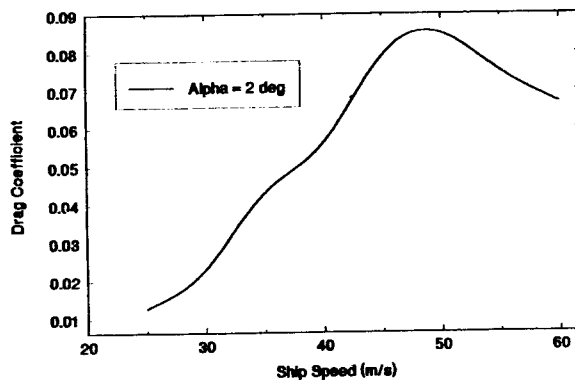
شکل ۴: مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج تئوریک در مورد ضریب لیفت هیدروفویل NACA 66012.

شکل (۴) اثر عدد کاویتاسیون را بر ضریب لیفت ایرفویل NACA 66-012 در دو زاویه حمله ۲ و ۳ درجه نشان میدهد (این محاسبات با این فرض که قایق با سرعت ۴۰ متر بر ثانیه در حال گشت زنی است انجام شده است). همانطوریکه در این شکل مشاهده میشود، با کاهش عدد کاویتاسیون ضریب لیفت نیز کاهش می یابد. نرخ کاهش

سرانجام در سرعت‌های بسیار بالا به یک ماکزیمم برسد. وجود چنین نقطه ماکزیممی قبلا از طرق تجربی تایید نشده است. نگاهی مجدد به شکل ۶ نشان می‌دهد که سرعت متناظر با این نقطه ماکزیمم بمراتب بالاتر از سرعتی است که در حال حاضر در قایق‌های هیدروفویل بکار برده می‌شود. کاهش ضریب درگ در سرعت‌های بسیار بالا برای هیدروفویل NACA-66012 پیش بینی بسیار مهمی است که در صورت صحت دارای نتایج کاربردی است. بدیهی است این پیش بینی محاسباتی تنها در سایه محک تجربه قابل پذیرش خواهد بود. اطلاعات تجربی در عین حال قادرند بخوبی محدودیتهای روش محاسباتی ارائه شده در این مقاله را برای برآورد اثر پدیده کاویتاسیون بر عملکرد یک هیدروفویل دلخواه مشخص نمایند. آنچه که باید بدان اذعان نمود این است که متاسفانه بر اساس اطلاعات فعلی نمیتوان در حال حاضر توجیه فیزیکی مناسبی برای وجود این نقطه ماکزیمم ارائه نمود.



شکل ۵: ضریب لیفت هیدروفویل NACA بر حسب سرعت قایق در زاویه حمله ۲ درجه.



شکل ۶: ضریب درگ هیدروفویل NACA 66-012 بر حسب سرعت قایق در زاویه حمله ۲ درجه.

فرض اساسی که نقطه شروع کاویتاسیون متناظر با نقطه فشار مینیمم در سیال است (فشار بخار) ممکن است الزاما درست نباشد (بعبارت دیگر سیال ممکن است تحت تاثیر فشاری کمتر از فشار بخار قرار گرفته باشد).

از بین عوامل فوق الذکر، بنظر میرسد که فشار داخل حفره بیش از بقیه پارامترها در ایجاد اختلاف بین نتایج تجربی و نتایج آزمایشگاهی دخیل باشد. در واقع با فرض اینکه فشار داخل حفره با فشار جزء بخار، در دمای معین، اختلاف داشته باشد (که این امر در عمل ممکن است براحتی بعلت رها شدن گازهای محلول در آب بوجود آید) میتوان در شکل (۴) نتایج تئوریک و نتایج تجربی را بطور دلخواه عملا بر یکدیگر منطبق ساخت. با توجه به اینکه در مرجع [۲۱] اطلاعات تجربی در مورد فشار واقعی سیال داخل حفره موجود نمی باشد و نیز با توجه به اینکه هدف از انجام این پروژه در واقع مقایسه عملکرد ایرفویل‌های مختلف تحت شرایط کاویتاسیون، آنهم بصورت کیفی، بوده است فلذا محاسبات انجام شده در این مقاله تنها بر اساس فشار جزء بخار در داخل حفره صورت پذیرفته است و نیاز به فشار واقعی در داخل حفره (که اطلاعاتی در مورد آن موجود نمی باشد) احساس نشده است.

شکل (۵) ضریب لیفت هیدروفویل فوق را بر حسب سرعت گشت زنی قایق نشان می‌دهد. همانطوریکه در این شکل مشاهده میشود با افزایش سرعت قایق، ضریب لیفت بطور پیوسته افزایش نشان میدهد ولی در سرعت‌های بالا این افزایش با شیب کمتری صورت می پذیرد که میتوان آن را به گسترده تر شدن حبابهای کاویتاسیون و تحت تاثیر قرار گرفتن بخش وسیعتری از سطح هیدروفویل با اثرات پدیده کاویتاسیون نسبت داد.

شکل (۶) ضریب درگ هیدروفویل فوق را بر حسب سرعت گشت زنی قایق نشان می‌دهد. همانطوریکه در این شکل مشاهده میشود علیرغم اینکه با افزایش سرعت قایق، سطح تر شده هیدروفویل<sup>۸</sup> بطور پیوسته در اثر رشد حبابهای کاویتاسیون کاهش می یابد اما بعلت تغییرات شدیدی که در اثر کاویتاسیون در میدان فشار اطراف هیدروفویل ایجاد میشود ضریب درگ این هیدروفویل بطور پیوسته با سرعت قایق افزایش می یابد تا اینکه

## نتیجه گیری کلی

چنین محاسباتی را با سرعت و دقت زیادی حتی بوسیله کامپیوترهای معمولی نیز انجام داد. لازم بذکر است که ارزش روش ارائه شده در این مقاله در حقیقت در سرعت عمل و دقت کیفی آن است. بعبارت دیگر دشوار است بتوان ادعا نمود که به تحلیلی جامع از پدیده کاویتاسیون دست یافته ایم اما میتوان براحتی ادعا نمود که با ابزاری ساده و نسبتاً دقیق مجهز شده ایم که میتواند براحتی به منظور طبقه بندی ایرفویل‌های مختلف از نظر قابلیت کاربرد در قایق‌های هیدروفویل مورد استفاده قرار گیرد.

## تشکر و قدردانی

انجام این پروژه در قالب طرح تحقیقاتی مصوب شورای پژوهشی دانشگاه تهران صورت گرفته است که بدینوسیله نگارندگان این مقاله از بودجه ای که توسط این دانشگاه در اختیار آنان قرار داده شده است صمیمانه تشکر می نمایند.

در یک نتیجه گیری کلی بنظر میرسد که در مورد آن دسته از هیدروفویل‌هاییکه دستخوش کاویتاسیون از نوع گسترده میشوند تقسیم بندی جریان حول هیدروفویل به یک ناحیه غیر ویسکوز و یک ناحیه ویسکوز بخوبی قادر است که اثر پدیده کاویتاسیون را بر روی نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر آن ارزیابی نماید مشروط بر آنکه برای حل پتانسیل از روش Panel، برای حل لایه مرزی آرام از روش Thwaites و برای حل لایه مرزی در هم از روش Head، استفاده شود. با توجه به اینکه در روش معرفی شده در این مقاله، برای تعیین نقطه شروع در همی جریان از معیار ساده Mitchel و برای محاسبه ضریب اصطکاک پوسته ای  $C_f$  از رابطه ساده Ludwig استفاده می شود، در عمل برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر یک هیدروفویل کافی است دستگاه معادلات دیفرانسیلی از نوع ODE حل شود که امروزه میتوان

## مراجع

- 1- Acosta, A. J. (1973). "Hydrofoils and hydrofoil craft." *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 5, P. 161.
- 2- Schetz, J. A. and Fuhs, A. E. (1996). *Handbook of fluid dynamics and fluid machinery*. John Wiley & Sons. New York.
- 3- Kubota, A., Kato, H. and Yamaguchi, H. (1992). "A new modelling of cavitating flow: A numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 240, P. 59.
- 4- Helmholtz, H. (1868). "On discontinuous movements of fluids." *Phil. Mag.* Vol. 36, No. 4, P. 337.
- 5- Wu, Y. T. and Wang, D. P. (1963). "A wake model for free-streamline flow theory: cavity flows past obstacles of Arbitrary Profile" *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 18, P. 65.
- 6- Tulin, M. P. (1964). "Supercavitating flows: small perturbation theory." *J. Ship Res.*, Vol. 7, No. 3, P. 16.
- 7- Furuya, O. (1975). "Nonlinear calculation of arbitrarily-shaped supercavitating hydrofoils near a free surface." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 68, Part 1, P. 21.
- 8- Furuya, O. (1975). "Three-dimensional theory on super cavitating hydrofoils near a free surface." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 71, Part 2, P. 339.
- 9- Nishiyama, T. and Miyamoto, M. (1969). "Lifting surface method For calculating the hydrodynamic characteristics of supercavitating hydrofoil operating near the free water surface." *Tech. Rep.*, Tohoku University, 34, P. 123.
- 10- Yamaguchi, H. and Kato, H. (1982). "A study on a supercavitating hydrofoil with rounded nose." *Naval Arch. Ocean Engng*, 20, P. 51.



- 11- Golden D. W. (1975). "A numerical method for two-dimensional cavitating lifting flow." *In MIT Department of Ocean Engineering*, RE P. 81512-1.
- 12- Lemonier, H. and Rowe, A. (). (1988). "Another Approach in modeling cavitating flows." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 195, PP. 557-580.
- 13- Pellone, C. and Rowe, A. (2000). "Supercavitating hydrofoil in non-linear theory." *In third Int. conf. on numerical ship Hydrodynamics*, Paris, Ed. J.C. Dern and H.J. Haussling), (1981). Supercavitating Hydrofoils, CFD-2K Conference, Montreal, Canada, June 10-13.
- 14- Franc, J. P. and Michel, J. M. (1985). "Attached cavitation and the boundary layer." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 154, P. 63.
- 15- Rajabi, M. and Sadeghy, K. (1988). "Numerical prediction of hydrodynamic forces for in modelling cavitating flows." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 195, PP. 557-580.
- 16- Sadeghy, K. and Rajabi, M. (2000). "Lift and drag prediction for supercavitating hydrofoils." *ISTP-12 Conference*, Istanbul, Turkey, July 14-18.
- 17- Sadeghy, K. and Rajabi, M. (2001). "The effects of cavitation on the lift coefficient of a hydrofoil." *ISME-2001 Conference*, Rasht, May 27-29.
- 18- Schlichting, H. (1968). *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill Inc., New York, 6th Ed.
- 19- Cebeci, T. and Bradshaw, P. (1984). *Physical and Computational Aspects of Convective Heat Transfer*, Springer-Verlag, New York.
- 20- Young, A. D. (1989). *Boundary Layers*, BSP Professional Books, Blackwell Scientific Publications Ltd..
- 21- Kermcen, R.W. (1956). "Water tunnel tests of NACA 66-012 hydrofoil in noncavitating and cavitating flows." *Calif. Inst. Tech. Hydrodyn. Lab. Rep.*, 47-7, Vol. 12.
- 22- Abbot, I. H. and Von Doenhoff, A. E. (1949). *Theory of Wing Sections*, McGraw Hill Co.
- 23- Johnson W. J. (1998). *The Handbook of Fluid Dynamics*, Chap. 20, CRC press.

واژه های کلیدی به ترتیب استفاده در متن

- 1 – Airfoil
- 2 – Hodograph Method
- 3 – Conformal Mapping
- 4 – Panel Method
- 5 – Cavity Boundary
- 6 – Cavitation Inception Point
- 7 – Transition
- 8 – Wetted Area