

تحلیل عددی کاویتاسیون لایه‌ای روی پروانه DTMB4119 با استفاده

از روش المان مرزی بر پایه جریان پتانسیل

حسن قاسمی^۱ و احسان یاری^۲

دانشکده مهندسی دریا

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(تاریخ دریافت: ۸۹/۸۰/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۰/۱۲)

چکیده

هدف از مطالعه حاضر بررسی پدیده کاویتاسیون لایه‌ای روی پروانه DTMB4119 با استفاده از روش المان مرزی بر پایه پتانسیل می‌باشد. در الگوریتم طراحی پروانه پارامترهای هندسی و جریانی زیادی دخیل هستند. بنابراین، یک برنامه کامپیوتری مورد نیاز است که با در نظر گرفتن اثر تغییر کلیه پارامترها، به تحلیل جریان روی هندسه‌های متفاوت بپردازد. روش موجود در محدوده دقت قابل قبولی قابلیت تحلیل جریان خیس شده و کاویتاسیون لایه‌ای روی پروانه را در حالت‌های پایا و ناپایا با میدان جریان‌های ورودی یکنواخت و غیر یکنواخت، با صرف زمان و هزینه بسیار کمتری نسبت به سایر روش‌های عددی رایج داراست. علاوه بر تحلیل کاویتاسیون جزئی روی پروانه، در تحقیق حاضر اصلاح موقعیت و مقدار پتانسیل مربوط به نقطه جدایش جریان مورد بررسی قرار گرفته است. داده‌های عددی به دست آمده با داده‌های تجربی موجود مورد اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند و تطابق بسیار خوبی بین آنها وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: کاویتاسیون لایه‌ای، روش المان مرزی، پروانه DTMB4119، نقطه جدایش جریان

Numerical Investigation of Sheet Cavitation on DTMB4119 Marine Propeller, Using Boundary Element Method, Based on Potential Flow Assumption

H. Ghassemi and E. Yari

Sea Eng. Dep't.

Amirkabir Univ. of Tech.

(Received: 8 Nov., 2010; Accepted: 2 Jan., 2012)

ABSTRACT

In this work, a numerical study of sheet cavitation has been performed on DTMB4119 marine propellers, using boundary element method (based on potential flow assumption). In propeller design, various parameters of geometry and flow are incorporated. So, a computer program is needed to take all parameters into account and solve the flow. Capability of analyzing the wetted and cavitating flow around propellers in steady, unsteady, uniform, and non-uniform conditions, while decreasing of computational time, with acceptable precision, are the characteristic features of the present work. Moreover, modifying the position of the detachment point and its corresponding potential value have been considered. Numerical results have been validated with experimental data, showing satisfying agreements.

Keywords: Sheet Cavitation, Boundary Element Method, DTMB4119 Propeller, Detachment Point

۱- دانشیار(نویسنده پاسخگو): gasemi@aut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد: ehsanyari_mechanical@yahoo.com

		فهرست علائم	
سرعت متوسط سیال	V_m		
سرعت سطح فوقانی از المان ویک	V^+	ضریب فشار	C_p
سرعت سطح تحتانی از المان ویک	V^-	قطر پروانه	D
بردار سرعت در دستگاه مختصات منحنی شکل چسبیده به المان	$V = (V_{s1}, V_{s2}, V_{s3})$	ماتریس ضرایب تأثیر دو قطبی‌های روی جسم	D_{nij}
حجم کاویتی	V_C	نسبت سطح گسترش یافته در پروانه	EAR
سرعت ورودی	V_I	راندمان پروانه	ETA
ماتریس ضرایب تأثیر دو قطبی‌های روی ویک	W_{nij}	تابع گرین	$G(x, \tilde{x})$
تعداد پره‌ها	Z	ضریب پیشروی	$J = \frac{V_A}{n D}$
اندیس مربوط المان جدایش جریان	i_d	ضریب تراست	K_T
اندیس مربوط به شماره المانی در راستای طول کورد، که در آن المان سطح کاویتی بسته می‌شود	i_r	ضریب گشتاور	K_Q
اندازه دور پروانه	n	تعداد المان‌ها در راستای طول اسپن یا شعاعی	$M=N_j$
فشار مرجع سیال	p_{ref}	تعداد المان‌ها در راستای طول اسپن یا شعاعی	$N_i=N+NC$
فشار اتمسفر	p_{atm}	تعداد تقسیمات در راستای محوری ویک	$N_j=M$
فاصله بین المان چشمه و المان محاسباتی دامنه حل برای میدان جریان خارجی حول جسم	$r(x, \tilde{x})$	تعداد تقسیمات در راستای عرضی ویک	N_{wi}
عدد کاویتاسیون	σ	تعداد کل المان‌ها	N_{wj}
بعد سوم در دستگاه مختصات استوانه‌ای	θ	تعداد المان‌های تحت کاویتاسیون در هر طول کورد	N_{Total}
اندازه سرعت دورانی	ω	فشار بخار	N_{cavJ}
ضخامت کاویتی	η	فشار مطلق (فشار مرجع) در یک نقطه از میدان جریان	P_v
راندمان جریان آزاد	η_o	توزیع گام به قطر پروانه در هر مقطع شعاعی	P_∞
پتانسیل اغتشاشی	ϕ	سطح خیس شده جسم	P/D
بردار مربوط به سرعت دورانی پروانه	$\vec{\omega}$	سطح کاویتی	S_B
ضریب مربوط به تعیین موقعیت المان محاسباتی	$\epsilon(x)$	سطح ویک	S_C
تغییرات پتانسیل نسبت به بردار نرمال عمود بر پنل	$\frac{\partial \phi}{\partial n}$	سطح در بی‌نهایت	S_W
پتانسیل مربوط به نقطه جدایش جریان	ϕ_0	نقطه جدایش جریان	S_∞
		ماتریس ضرایب تأثیر چشمه‌های روی جسم	$S_{1_0} = S_0$
		سرعت مطلق (فشار مرجع) در یک نقطه از میدان جریان	S_{nij}
		سرعت مرجع برابر با سرعت جریان ورودی	V_∞
		سرعت سطح دنباله در جهت عمود	V_{ref}
			V_n

۱- مقدمه

اگر فشار استاتیکی در نقطه‌ای از جریان سیال از فشار بخار سیال در دمای مورد نظر کمتر شود، حباب‌های بخار در داخل جریان سیال تشکیل می‌شود که به این پدیده کاویتاسیون گفته می‌شود. حباب‌های تشکیل شده پس از رسیدن به

هم‌چنین کارهای مشابهی در این راستا توسط کیم^{۱۴} [۱۱] و لی [۱۲] صورت گرفته است.

سپس کار جدید فاین توسط کیناس و فاین پیگیری شد [۱۳] و یک سری توسعه‌ها و تکمیل کردن‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری مربوط به کاربرد المان مرزی برای جریان کاویتاسیونی روی پروانه‌ها توسط کیناس و همکاران انجام گرفت که از آن جمله می‌توان به تحلیل پروانه‌های نیمه مغروق^{۱۵} توسط یانگ^{۱۶} و همکاران [۱۴]، کاویتاسیون میانی-کورد^{۱۷} توسط مولر^{۱۸} [۱۵]، پروانه‌های داکت‌دار^{۱۹} توسط کیناس و همکاران [۱۶]، اثر متقابل کاویتاسیون پروانه و سکان^{۲۰} توسط لی [۱۷]، آنالیز هیدروالاستیک مربوط به کاویتاسیون پروانه توسط یانگ [۱۸] و مدل کردن کاویتاسیون ناشی از ورتکس نوک^{۲۱} پره توسط لی و کیناس [۱۹] اشاره کرد.

۱-۱- کاویتاسیون لایه‌ای^{۲۲}

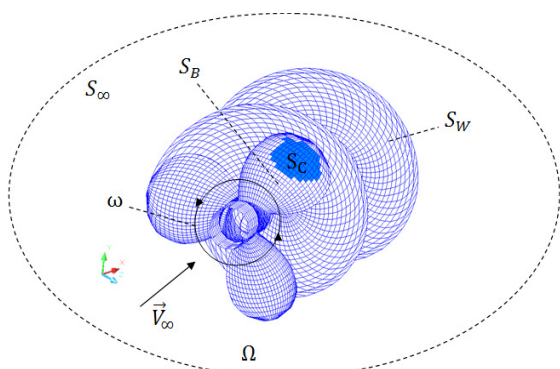
کاویتاسیون لایه‌ای روی سطح جسم در اثر کاهش فشار ناشی از جدایش لایه مرزی آرام در نزدیکی لبه حمله جسم اتفاق می‌افتد. این نوع کاویتاسیون در نزدیکی لبه حمله پره^{۲۳} پروانه بر روی سطح مکشی^{۲۴} شروع می‌شود و زمانی ظاهر می‌شود که پیک‌های مکشی بزرگ در نزدیکی لبه حمله پره‌ها ایجاد شود. اگر پروانه در زوایای حمله مثبت کار کند این کاویتاسیون در قسمت عقب یا صفحه مکش مشاهده می‌شود و اگر پروانه در زوایای حمله منفی کار کند، این نوع کاویتاسیون در قسمت جلو پره‌ها اتفاق می‌افتد [۲۰]. با افزایش زاویه برخورد و یا کاهش فشار محیط، اندازه کاویتی روی پره در جهت کورد و جهت اسپن^{۲۵} رشد می‌کند. این نوع کاویتاسیون معمولاً به صورت یک فیلم نازک و شفاف با

نواحی پرفشار یا در نزدیکی دیواره‌های جامد متلاشی می‌شوند [۱]. کاربرد روش المان مرزی (که به آن روش انتگرال مرزی و روش پنل نیز گفته می‌شود) اولین بار توسط هولمن^۱ [۲] برای جریان کاویتاسیون بر روی هیدروفیل دو بعدی در سال ۱۹۸۷ انجام گرفت، که در آن روش المان مرزی بر پایه سرعت به همراه مدل انتهایی دیواره مورد استفاده قرار گرفت و سطح کاویتی در یک فرآیند حل تکراری تا ارضای کامل شرایط مرزی دینامیکی و سینماتیکی، با فرض مجهول بودن عدد کاویتاسیون، ادامه داشت. مدتی بعد روش المان مرزی بر پایه پتانسیل برای موارد دو بعدی توسط کیناس^۲، فاین^۳ [۳] و لی^۴ [۴] انجام گرفت. هم‌زمان، پلون^۵ و روو^۶ [۵] جریان سوپر کاویتاسیون روی هیدروفویل سه بعدی را با استفاده از روش المان مرزی بر پایه سرعت محاسبه کردند. شبیه‌سازی عددی کاویتاسیون جزئی^۷ دوبعدی با روش المان مرزی توسط پسندیده فرد و همکارانش [۶] و هم‌چنین توسط پلون و پلت^۸ [۷] مورد تحلیل قرار گرفت. اولین کاربرد روش المان مرزی برای تحلیل جریان خیس^۹ حول پروانه توسط هس^{۱۰} و والارزو^{۱۱} [۸] با استفاده از روش المان مرزی بر پایه سرعت و توسط لی با استفاده از روش المان مرزی بر پایه پتانسیل صورت گرفته است. بررسی‌های پیشرفته‌ای در دهه ۹۰ جهت کاربرد روش المان مرزی برای جریان روی پروانه توسط دانشگاه ام - آی - تی^{۱۲} صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به بررسی جریان خیس بر روی پروانه در حالت پایا توسط لی، بررسی جریان خیس بر روی پروانه در حالت ناپایا توسط هسین^{۱۳} [۹] و بررسی جریان کاویتاسیونی ناپایا بر روی پروانه توسط فاین [۱۰] اشاره کرد.

14- Kim
15- Surface Piercing Propellers
16- Young
17- Mid Chord Cavitation
18- Mueller
19- Ducted Propellers
20- Rudder
21- Tip Vortex
22- Sheet Cavitation
23- Leading Edge
24- Suction Surface
25- Spanwise

1- Uhlman
2- Kinnas
3- Fine
4- Lee
5- Pellone
6- Rowe
7- Partial Cavitation
8- Pellat
9- Wet Flow
10- Hess
11- Valarezo
12- MIT
13- Hsin

سرعت زاویه‌ای پروانه ثابت بوده و با $\vec{\omega}$ نمایش داده شده است. در حالت کلی برای تحلیل کاویتاسیون حول جسم، مرز جسم به سه ناحیه سطح خیس جسم S_B ، سطح کاویتیتی S_C و سطح دنباله S_W تقسیم‌بندی می‌شود.



شکل (۱): شماتیک دستگاه مختصات سه بعدی کلی حول پروانه و جهت چرخش.

۳- معادلات حاکم بر جریان حل

با فرض اینکه جریان در میدان حل خارجی حول جسم و سطح کاویتیتی به اندازه کافی و مؤثر غیر ویسکوز^۷، تراکم ناپذیر و غیر چرخشی^۸ باشد، در حالت جریان پایا سرعت اغتشاشی^۹ در کلیه میدان حل به استثنای سطوح ناپیوسته میدان سرعت، که تشکیل دنباله سطح بالابر از جسم را می‌دهند، غیر چرخشی است. به عبارت دیگر برای استفاده از معادله لاپلاس جهت مدل کردن جریان سیال حول پروانه باید جریان در کلیه نقاط میدان به جز یک سری نقاط ناپیوستگی، که دنباله پروانه جایگزین آنها می‌شود، غیر چرخشی باشد. در حالت جریان ورودی غیر یکنواخت مانند حالت لزج یا جریان ویک پشت شناور، فرض بر این است که قسمت چرخشی سرعت اغتشاشی به همراه ورتیسیتته اغتشاشی^{۱۰} مربوط به سیال در میدان سرعت V_∞ ، که در متون هیدرودینامیک شناور به عنوان دنباله مؤثر^{۱۱} کشتی شناخته شده است، در نظر گرفته

طولی برابر با طولی که جریان آرام ایجاد می‌کند، ظاهر می‌شود. پایان کاویتاسیون لایه‌ای معمولاً غیر پایا است. این کاویتیتی‌ها یا به حباب‌های کوچک‌تر شکسته می‌شوند که این حباب‌ها محلی و غیر پریودیک هستند و یا تشکیل کاویتیتی‌های بزرگ و پریودیک می‌دهند. در هر دو حالت مذکور کاویتاسیون ابری^۱ تشکیل می‌شود. اگر جریانی که دوباره می‌آید آرام باشد، کاویتاسیون هم‌چنان شفاف باقی می‌ماند و اگر مغشوش باشد، سطح کاویتیتی غیر شفاف می‌شود.

۲- شرح مسئله

روش المان مرزی بر پایه پتانسیل قادر به بررسی جریان بر روی اجسام با سطح بالابر^۲ و یا غیر بالابر، با جریان ورودی یکنواخت یا غیر یکنواخت در حالت پایا و ناپایا است. این اجسام می‌توانند حرکتی به صورت جابه‌جایی خطی یا دورانی داشته و به عنوان مثال پروانه، هیدروفویل، هاب^۳، سکان، نگهدارنده‌ها^۴ و... باشند. مطابق شکل ۱ Ω به عنوان میدان حل، میدان جریان خارجی حول جسم و $S = \partial\Omega$ به عنوان مرز جسم در نظر گرفته شده است. یک دستگاه مختصات کلی، دستگاه مختصات کارتزین اینرسی، ثابت در فضا تعریف و با $X=(X, Y, Z)$ نشان داده شده است. دستگاه مختصات محلی متصل به جسم، در حالت کارتزین به صورت $x=(x, y, z)$ و در حالت استوانه‌ای به صورت (x, r, θ) ، مطابق با دستگاه مختصات نیرویی استاندارد ITTC [۲۱] تعریف می‌شود. در دستگاه مختصات محلی x محور مثبت به سمت قسمت پایین دست پروانه، y محور مثبت به سمت درگاه^۵ و z محور عمود بر صفحه شامل x و y است. در دستگاه مختصات استوانه‌ای محلی $r = \sqrt{y^2 + z^2}$ و $\theta = \tan^{-1}(\frac{-y}{z})$ است، که می‌توانند به همراه جسم جابه‌جا شوند یا بچرخند. معادلات با توجه به دستگاه مختصات متصل به جسم به دست آمده است. برای پروانه دستگاه مختصات راستگرد، و جهت چرخش در جهت عقربه‌های ساعت فرض شده است.

6- Wake Surface

7- Inviscid

8- Irrotational

9- Perturbation Velocity

10- Perturbation Vorticity

11- Effective Wake

1- Cloud Cavitation

2- Lifting surface

3- Hub

4- Struts

5- Port

نظر گرفته می‌شود. D معرف قطر پروانه و n اندازه دور پروانه یا سرعت دورانی در هر دور بر ثانیه بوده و برابر است با:

$$n = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (۶)$$

معادله دینامیکی (۳) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{2}{V_{ref}^2} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{|V|^2 - |V_0|^2}{V_{ref}^2} + \frac{2gz}{V_{ref}^2} = -C_p. \quad (۷)$$

۳-۱- شرایط مرزی

برای حل معادله لاپلاس، مطابق با معادله (۱)، در جریان خارجی حول پروانه یا هیدروفویل بایستی شرایط مرزی در هر یک از المان‌های سطحی تعریف شوند. با توجه به شرایط مرزی، المان‌های سطحی^۴ به چهار ناحیه تقسیم‌بندی می‌شوند:

- سطح جسم (S_B): سطح خیس جسم بدون کاویتاسیون است،
- سطح کاویتا (S_C): سطحی از جسم که کاویتاسیون رخ داده است،
- سطح دنباله (S_W): دنباله لایه‌ای پشت اجسام بالابر است و
- سطح در بی‌نهایت (S_∞): معرف سطح در بی‌نهایت است.

۳-۲- سطح جسم

در قسمت سطح خیس جسم برای ارضا شدن شرط مرزی، صفر بودن مؤلفه سرعت عمود بر المان، می‌توان از شرط مرزی نیومن^۵ استفاده کرد. در نواحی خیس مقدار پتانسیل کل، جمع پتانسیل اغتشاشی و پتانسیل ناشی از جریان ورودی، برابر صفر بوده است و شرط نیومن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -V_0 \cdot n. \quad (۸)$$

n بردار نرمال هر المان به سمت بیرون است.

۳-۳- سطح کاویتا

سطح کاویتا، S_C ، شرط مرزی سینماتیکی به صورت زیر تعریف می‌شود:

شده است. بنابراین با در نظر گرفتن این حالت کلیه سه فرض بالا برقرار شده و می‌توان از معادله لاپلاس استفاده کرد.

با در نظر گرفتن فرض غیر چرخشی بودن سیال می‌توان گفت سرعت اغتشاشی برابر با گرادیان پتانسیل اغتشاشی است. برای جریان سیال تراکم ناپذیر، معادله پیوستگی $\nabla \cdot V(x,t) = 0$ به صورت معادله لاپلاس در می‌آید:

$$\nabla^2 \phi(x,t) = 0. \quad (۱)$$

سرعت کل در هر نقطه از میدان سیال، Ω ، برابر با جمع سرعت اغتشاشی و سرعت غیر اغتشاشی است.

$$V(x,t) = V_0(x,t) + \nabla \phi(x,t). \quad (۲)$$

برای جریان سیال تراکم ناپذیر، غیرلزج و غیر چرخشی معادلات ممنتوم نویر-استوکس به صورت معادله برنولی خلاصه می‌شود. در دستگاه مختصات متصل به جسم معادله برنولی به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{|V|^2}{2} + gz = \frac{p_{ref}}{\rho} + \frac{|V_0|^2}{2}. \quad (۳)$$

در معادله (۳)، p فشار، ρ چگالی سیال و p_{ref} فشار مرجع سیال است. برای پروانه فشار مرجع فشار ناحیه بسیار دور از بالادست^۱ پروانه در راستای شفت پروانه است و با استفاده از قانون هیدرواستاتیک $p_{ref} = p_{atm} + \rho g z_{atm}$ به دست می‌آید (p_{atm} فشار اتمسفر در ارتفاع Z است). در ادامه دو پارامتر مهم و بی‌بعد یعنی ضریب فشار^۲ و عدد کاویتاسیون^۳ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2}, \quad (۴)$$

$$\sigma = \frac{p_{ref} - p_v}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2}. \quad (۵)$$

در روابط (۴-۵)، p_v فشار بخار و V_{ref} سرعت مرجع بوده و معمولاً برابر با $|V_0|$ سرعت جریان ورودی است. برای پروانه سرعت مرجع معمولاً میزان سرعت ورودی یا مقدار nD در

4- Surface Element
5- Newman

1- Upstream
2- Pressure Coefficient
3- Cavitation Number

$$\mathbf{V}^+ \cdot \mathbf{n} = \mathbf{V}^- \cdot \mathbf{n} = \mathbf{V}_m \cdot \mathbf{n} = V_n. \quad (13)$$

معادله (۱۳) همانند معادله (۱۲) روی سطح کاویتی می‌باشد.

۴- کاویتاسیون جزئی

واضح است مهمترین نوع کاویتاسیون در هیدروفویل و پروانه از نوع کاویتاسیون لایه ای است که می‌تواند بصورت کاویتاسیون لایه ای جزئی و یا سوپر کاویتاسیونی باشد. در کاویتاسیون جزئی بخشی از ناحیه پشت فویل کاویتاسیون ایجاد می‌شود که در اینجا شرایط مرزی را تعریف می‌کنیم.

۴-۱- شرط مرزی سینماتیکی

در کاویتاسیون جزئی شرط مرزی سینماتیکی با استفاده از مفهوم مشتق مادی^۱ در دستگاه مختصات غیر محلی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$A \frac{\partial \phi}{\partial S_1} + B \frac{\partial \phi}{\partial S_2} = C \left(V_{S_3} - \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) \text{ on } S_C. \quad (14)$$

معادله (۱۴) یک معادله دیفرانسیل جزئی خطی برای η است. حاصل این معادله مقادیر مربوط به ضخامت کاویتی یا ارتفاع کاویتی است.

۴-۲- شرط مرزی دینامیکی

شرط مرزی دینامیکی با توجه به معادله (۷) و (۱۱) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$|V|^2 = V_{ref}^2 \sigma + |V_0|^2 - 2gz - 2 \frac{\partial \phi}{\partial t} \text{ on } S_C. \quad (15)$$

این معادله در دستگاه مختصات غیر متعامد به صورت زیر در می‌آید:

$$\left[\frac{1}{|t_1 \times t_2|} (V_{S_1} - (t_1 \cdot t_2) V_{S_2}) \right]^2 + V_{S_2}^2 + V_{S_3}^2 = \quad (16)$$

$$V_{ref}^2 \sigma + |V_0|^2 - 2gz - 2 \frac{\partial \phi}{\partial t}.$$

شرط مرزی دینامیکی روی ϕ ، به دلیل وجود ترم‌های مرتبه دوم در مشتقات سه بعدی پتانسیل اغتشاشی خطی نیست. شرط مرزی دینامیکی را می‌توان به شرط مرزی دیریکله روی ϕ تغییر داد. بنابراین، برای V_{S_1} رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_3 = \eta(S_1, S_2, t), \quad (9)$$

که در آن η ضخامت کاویتی در دستگاه مختصات غیر متعامد محلی و S_3 نشان دهنده سطح کاویتی است. سطح کاویتی مجهول بوده و اصلاح آن با توجه به معادله (۹) در جهت عمود بر سطح المان انجام می‌پذیرد. برای تعیین سطح کاویتی مجهول باید بررسی دو شرط مرزی سینماتیکی و دینامیکی انجام شود. با فرض اینکه تابع $F(S_1, S_2, S_3, t) = S_3 - \eta(S_1, S_2, t)$ معادله سطح کاویتی باشد، شرط مرزی سینماتیکی مطابق زیر است:

$$\frac{D}{Dt} [F(S_1, S_2, S_3, t)] = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \right) [S_3 - \eta(S_1, S_2, t)] = 0. \quad (10)$$

شرط مرزی دینامیکی یکسان بودن فشار روی سطح کاویتی با فشار بخار را به صورت زیر بیان می‌کند:

$$P = P_v \quad \text{or} \quad -C_p = \sigma. \quad (11)$$

۳-۴- سطح دنباله

سطح دنباله یک لایه ورتکس با ضخامت صفر، چسبیده به جسم و دربرگیرنده تمامی گردابه‌های جاری شده توسط جسم است. سطح فوقانی و سطح تحتانی دنباله به ترتیب با علامت + و - مشخص شده‌اند. سطح دنباله باید شرایط مرزی سینماتیکی و دینامیکی را ارضا کند. برای ارضای شرط مرزی سینماتیکی دنباله ورتکس S_w باید به صورت یک سطح از بخار سیال باشد. اگر V_n نشان‌دهنده سرعت سطح دنباله در جهت عمود باشد، شرط مرزی سینماتیکی برای جریان پایا و ناپایا به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mathbf{V}^+ \cdot \mathbf{n} = \mathbf{V}^- \cdot \mathbf{n} = \mathbf{V}_m \cdot \mathbf{n} = V_n, \quad (12)$$

$$\mathbf{V}_m = \frac{1}{2} (\mathbf{V}^+ + \mathbf{V}^-).$$

سرعت متوسط سیال است. بر اساس شرط مرزی دینامیکی اختلاف فشار در دو طرف سطح دنباله S_w برابر صفر است.

۳-۵- سطح در بی‌نهایت

در سطح مرز در بی‌نهایت، k_∞ آشفتگی ناشی از سطوح جسم و کاویتی باید به سمت صفر میل کند.

۴-۴- گسسته‌سازی معادلات

در حالت کاویتاسیون جزئی تعداد کل المان‌ها با تعداد المان‌های جسم برابر است. فرم گسسته شده معادلات انتگرالی (۱۹) برای حل جریان کاویتاسیون بر روی سطح پروانه مطابق زیر است:

$$\sum_{i_{surf}=1}^{N_{surf}} \left[\sum_{j=1}^{N_j} \left(\sum_{i=1}^{i_d-1} D_{nij} \varphi_{ij} + \sum_{i=i_d}^{i_r} D_{nij} \varphi_{ij} \right) + \sum_{i=i_r+1}^{N_i} D_{nij} \varphi_{ij} + \sum_{i=i_r+1}^{N_i} (W_{nj} \Delta \varphi_j) \right] = \sum_{i_{surf}=1}^{N_{surf}} \sum_{j=1}^{N_j} \left(\sum_{i=1}^{i_d-1} S_{nij} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_{ij} + \sum_{i=i_d}^{i_r} S_{nij} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_{ij} + \sum_{i=i_r+1}^{N_i} S_{nij} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_{ij} \right), \quad (20)$$

$$n = 1, \dots, N_{total}.$$

i_{surf} تعداد سطح‌های مورد تحلیل، N_i تعداد تقسیمات در راستای طول کورد پره، N_j تعداد تقسیمات در راستای شعاعی پره، i_d اندیس مربوط به شماره المانی در راستای طول کورد که در آن المان جدایش^۳ جریان رخ داده است، i_r اندیس مربوط به شماره المانی در راستای طول کورد که در آن المان سطح کاویتا بسته^۴ می‌شود، N_{cavj} تعداد المان‌های تحت کاویتاسیون در هر ردیف شعاعی که برابر است با $N_{cavj} = i_r - i_d + 1$ ماتریس مربوط به دو قطبی-^۵ها و S ماتریس مربوط به چشمه^۶ها است. با توجه به فرم گسسته شده، معادله (۲۰)، دستگاه جبری معادلات خطی تشکیل شده و با استفاده از روش حل تکراری گوس^۷ ماتریس مقادیر مجهول استخراج می‌شود.

۵- نتایج و بحث

در این بخش نتیجه‌های تحلیل عددی جریان خیس شده و کاویتاسیونی حول پروانه استاندارد DTMB4119 و اعتبارسنجی نتیجه‌های عددی با داده‌های تجربی موجود ارائه

$$V_{S_1} = V_{S_2} \cos \theta +$$

$$\sin \theta \sqrt{V_{ref}^2 \sigma + |V_0|^2 - 2gz - 2 \frac{\partial \varphi}{\partial t} - V_{S_2}^2 - V_{S_3}^2}. \quad (17)$$

با انتگرال‌گیری در راستای S_1 از نقطه جدایش جریان، $S_{10} = S_0$ ، و با توجه به مقدار پتانسیل ϕ_0 رابطه زیر برای ϕ به دست می‌آید:

$$\varphi = \phi_0 + \int_{S_0}^{S_1} [V_{S_2} \cos \theta + \sin \theta \sqrt{V_{ref}^2 \sigma + |V_0|^2 - 2gz - 2 \frac{\partial \varphi}{\partial t} - V_{S_2}^2 - V_{S_3}^2}] ds_1 \quad \text{on } S_C. \quad (18)$$

۴-۳- معادلات انتگرالی

پتانسیل سرعت ϕ در هر نقطه x در دامنه سیال Ω با استفاده از انتگرال کلاسیک نشان داده شده در زیر بر اساس معادله مشخصه سوم گرین^۱ به دست می‌آید، که با استفاده از فرمولاسیون پتانسیل مربوط به مورینو^۲ [۲۳] می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(x) \varphi(x, t) = & \int_{S_B + S_C} [\varphi(\tilde{x}, t) \frac{\partial G(x, \tilde{x})}{\partial n_{\tilde{x}}} - G(x, \tilde{x}) \frac{\partial \varphi(\tilde{x}, t)}{\partial n_{\tilde{x}}}] ds \\ & + \int_{S_W} [\Delta \varphi(\tilde{x}, t) \frac{\partial G(x, \tilde{x})}{\partial n_{\tilde{x}}} - G(x, \tilde{x}) \Delta \left(\frac{\partial \varphi(\tilde{x}, t)}{\partial n_{\tilde{x}}} \right)] ds. \end{aligned} \quad (19)$$

x نقطه‌ای در دامنه سیال Ω ، \tilde{x} نقطه‌ای در دامنه سیال و روی سطح مرز $S = \partial \Omega$ تابع گرین مناسب برای حالت سه بعدی تحلیل جریان سیال، $n_{\tilde{x}}$ بردار نرمال خارجی در \tilde{x} و $\mathcal{E}(x)$ مقدار ثابتی وابسته به موقعیت نقطه میدانی x است.

3- Detachment Point

4- Reattachment Point

5- Doublet

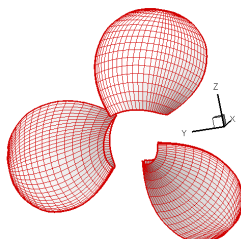
6- Source

7- Iterative Gauss Solution Method

1- Green Third Identity

2- Morino

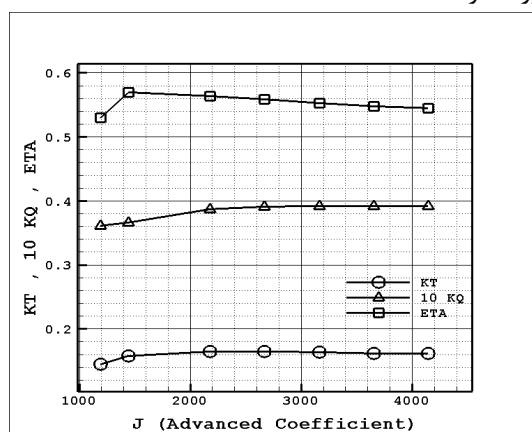
استفاده از المان‌های چهار ضلعی سعی شده است در راستای طول کورد و راستای شعاعی از مش‌های کسینوسی استفاده شود. شکل ۲ در نواحی مرزی مش‌ها با تراکم بیشتری تولید شده و تغییرات رفتار جریان را می‌توان به خوبی مشاهده کرد.



شکل (۲): هندسه سه بعدی و شبکه تولید شده پروانه DTMB4119.

۵-۱- بررسی استقلال حل از شبکه

جهت تحلیل جریان حول پروانه ابتدا نیاز به تولید شبکه مناسب است. زیرا نوع شبکه به کار برده شده، نوع المان‌ها و تعداد المان‌ها تأثیر به سزایی در صحت جواب‌ها دارند. پس از تولید هندسه، یکی از مهم‌ترین موارد، بررسی شرط استقلال حل از شبکه^۳ است. شرط استقلال شبکه یعنی دستیابی به شبکه‌ای مناسب که با ریز شدن شبکه و افزایش المان‌ها، نتیجه‌های ما دچار تغییرات محسوسی نشوند. در تحقیق حاضر تغییر تعداد المان‌ها در راستای کورد پروانه و در راستای شعاعی جهت دستیابی به تعداد المان‌های مناسب صورت گرفته است.



شکل (۳): نمودار ضرایب تراست، گشتاور و راندمان بر حسب ضریب پیشروی جهت بررسی شرط استقلال شبکه پروانه DTMB4119

شده است. ابتدا برای بررسی شرط استقلال حل از شبکه جهت تحلیل پروانه سه پره‌ای DTMB4119، تغییرات تعداد المان‌ها در دو راستای طول کورد و راستای شعاعی مورد بررسی قرار گرفته است. حداقل تعداد المان‌های مورد نیاز در راستای طول کورد و راستای شعاعی بایستی به گونه‌ای مشخص شوند که نتیجه‌ها با تغییر تعداد المان دچار تغییرات نشوند. بررسی استقلال شبکه در تحلیل پروانه در حالت خیس و کاویتاسیونی بسیار مؤثر است. در ادامه استخراج نتیجه‌های مربوط به تحلیل جریان خیس و کاویتاسیونی بر روی پروانه DTMB4119 انجام شده است. داده‌های مربوط به ضریب فشار در مقاطع مختلف پروانه در راستای شعاعی در دو حالت خیس و کاویتاسیونی به دست آمده و با داده‌های تجربی و کارهای عددی انجام گرفته موجود در بیستمین کمیته کارگاه پیش برنده‌ها همایش ITTC [۲۴] مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار گرفته است. از فاکتورهای بسیار مهم در مدل کردن پروانه داشتن اطلاعات هندسی کافی از پروانه مورد نظر است. در جدول ۱ داده‌های هندسی مربوط به پروانه DTMB4119 ذکر شده است.

جدول (۱): اطلاعات هندسی پروانه DTMB4119.

DTMB4119		
سری پروانه		
تعداد پره	(Z)	3
قطر (متر)	(D)	0.3048
نسبت سطح گسترش یافته	(EAR)	0.607
نسبت هاب	(Hub Ratio)	0.2
نسبت گام	(P/D)	1.08390
مقطع پره	NACA 66 modified a=0.8	

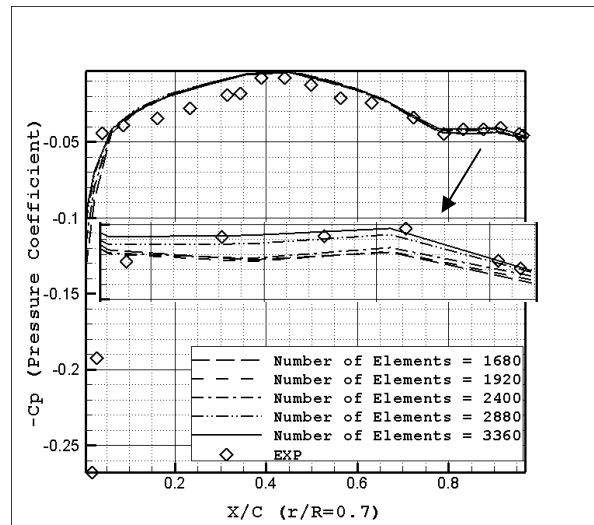
نحوه تولید شبکه و دنباله از جمله پارامترهای مؤثر بر روی نتیجه‌های حاصل از تحلیل پروانه است. با توجه به اینکه گرادیان فشار در لبه‌های مرزی پره یعنی لبه ورودی پره به آب، لبه انتهایی پره و مقاطع ریشه^۱ و نوک^۲ پره بسیار شدید هستند. بنابراین برای بهتر مدل کردن جریان حول پروانه با

1- Root
2- Tip

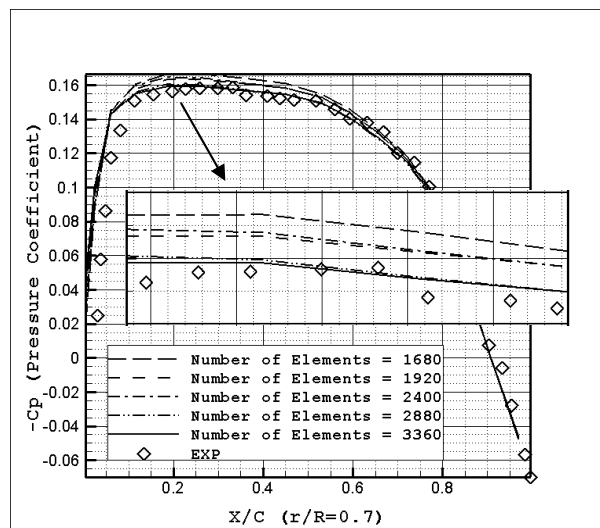
افزایش تعداد المان‌ها بر روی داده‌های محلی فشار، ضریب فشار مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۴ ضریب فشار در مقطع شعاعی $r/R=0.7$ در تعداد المان‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد المان‌ها نتیجه‌های تحلیل عددی بر روی سطح جلویی پره به داده‌های تجربی نزدیک شده‌اند. در شکل ۵ نیز کار مشابهی بر روی سطح پشت پره صورت گرفته است.

۵-۲- نتیجه‌های تحلیل خیس شده بر روی پروانه DTMB4119

در شکل ۶ ضریب تراست^۱ و ضریب گشتاور^۲ حاصل از تحلیل عددی پروانه DTMB4119 با داده‌های تجربی و عددی موجود مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند که در اکثر موارد خطا زیر ۵ درصد است و تطابق خوبی بین داده‌های عددی به دست آمده با داده‌های تجربی و به ویژه داده‌های عددی ام-آی-تی وجود دارد. در بعضی موارد که میزان خطا زیاد است، این‌گونه می‌توان تحلیل کرد که در ضرایب پیشروی^۳ خیلی پایین به علت اینکه عدد رینولدز پایین می‌باشد، تأثیر پارامتر ویسکوزیته افزایش یافته، بنابراین با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده میزان خطا افزایش می‌یابد. برای جلوگیری از این میزان خطا ترم‌های ویسکوز اصلاحی به معادله اضافه شده‌اند که تا حدودی خطا را بهبود بخشیده است. البته با اضافه کردن ترم‌های ویسکوز به معادلات حل نیز، با توجه به داده‌های موجود از حل ویسکوز بر روی پروانه DTMB4119، میزان تغییرات کمتر از ۱ تا ۴ درصد است. زیرا در پروانه به علت غالب بودن درگ فشاری میزان تأثیرات ویسکوز کمتر از ۱۰ درصد است و با توجه به اصلاحات انجام شده بر روی داده‌های نهایی جهت اعمال ویسکوزیته، این خطای ۱۰ درصد به کمتر از ۵ درصد کاهش می‌یابد.



شکل (۴): نمودار بررسی شرط استقلال شبکه با توجه به ضریب فشار با افزایش المان‌ها بر روی سطح جلویی پره در مقطع شعاعی $r/R=0.7$.



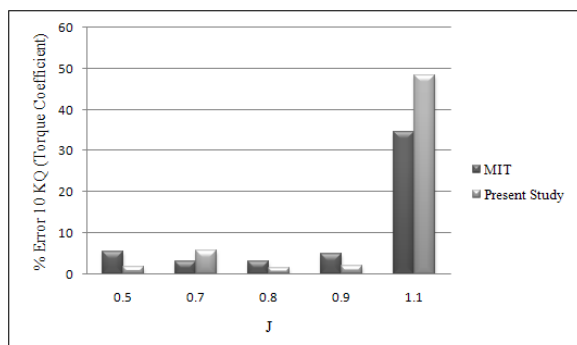
شکل (۵): نمودار بررسی شرط استقلال شبکه با توجه به ضریب فشار با افزایش المان‌ها بر روی سطح پشت پره در مقطع شعاعی $r/R=0.7$.

در شکل ۳ استقلال شبکه با توجه به عدم تغییر نتیجه‌های انتگرالی با افزایش تعداد المان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود از ۳۵۰۰ المان به بعد تغییر محسوسی در ضرایب تراست، گشتاور و راندمان مشاهده نمی‌شود. در ادامه در شکل‌های ۴-۵ شرط استقلال شبکه با

1- Thrust Coefficient (Kt)

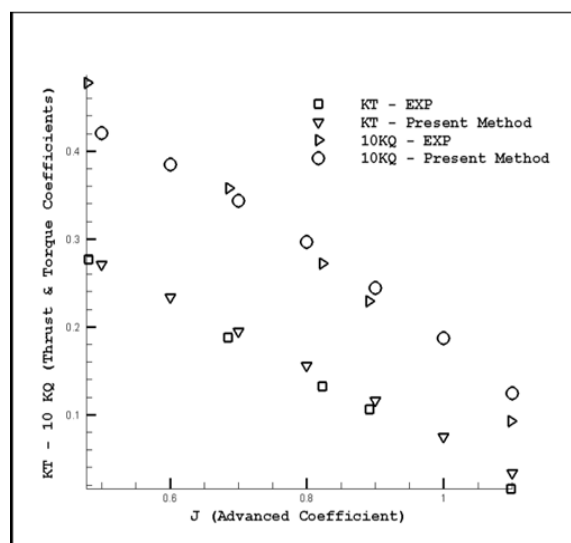
2- Torque Coefficient (KQ)

3- Advanced Coefficient ($J=V/nD$)



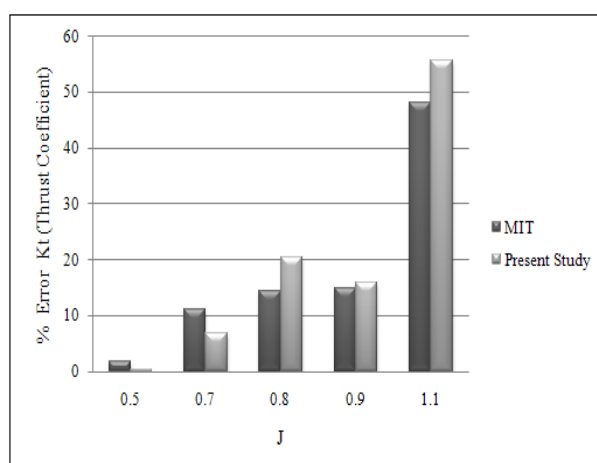
شکل (۸): نمودار درصد خطا ضریب گشتاور بر حسب ضریب پیشروی.

در شکل‌های ۹-۱۱ تغییرات ضریب فشار در راستای طول کورد، در سه مقطع شعاعی r/R ، $0/3$ ، $0/7$ و $0/9$ در مقایسه با داده‌های تجربی [۲۴] موجود آورده شده است. ضریب فشار تابعی از سرعت‌های مماسی بی‌بعد در راستای شعاعی و طول کورد است؛ که برای بی‌بعدسازی، طبق استاندارد *ITTC* از جمع سرعت محوری و چرخشی ورودی استفاده شده است. نتیجه‌های تجربی و عددی انطباق خوبی با هم دارند. با مقایسه شکل‌های ۹-۱۱ اثر ضخامت در اختلاف فشار، برای پروانه‌ای که برای شرایط جریانی خاص طراحی شده، آشکار می‌شود. از آنجا که تابع ضخامت در راستای شعاعی، همواره نزولی است، اختلاف فشار نیز با افزایش شعاع، کاهش می‌یابد. در حل هیدرودینامیکی یک پروانه، مؤلفه عمود بر سطح از جریان ورودی، برای هر المان، به عنوان شرط مرزی ورودی تعریف می‌شود. خروجی‌ها، سرعت‌های القایی هستند که البته بر مبنای شرط سرعت صفر در راستای عمود بر سطح، فقط نیاز به محاسبه مؤلفه مماسی سرعت‌های القایی داریم. آنچه که گفته شد برای پیدا کردن علت خطای ایجاد شده در نزدیکی ریشه پره و نوک پره است. در نزدیک ریشه پره به علت اختلاف فشار زیاد بین سطح پرفشار یک پره و سطح کم‌فشار پره مجاور و در نوک پره به دلیل برگشت جریان از سطح پرفشار به سمت کم‌فشار (ورتکس نوک)، اثر مؤلفه القایی سرعت افزایش می‌یابد و در نتیجه خطای موجود در محاسبه عددی انتگرال‌ها نمود بیشتری پیدا می‌کند. این خطاها را می‌توان با مدل‌سازی کاویتاسیون در ریشه پره و نوک آن به حداقل رساند.



شکل (۶): نمودار ضریب تراست و گشتاور بر حسب ضریب پیشروی جهت مقایسه داده‌های به دست آمده از تحقیق حاضر با داده‌های تجربی برای پروانه *DTMB4119*.

در شکل‌های ۷-۸ درصد خطای مربوط به ضرایب تراست و گشتاور به دست آمده از تحقیق حاضر و نتیجه‌های مربوط به ام-آی-تی با داده‌های تجربی موجود مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود درصد خطاها در اکثر موارد کمتر از ۵ درصد بوده و در برخی موارد داده‌های به دست آمده از تحقیق حاضر خطای کمتری نسبت به داده‌های ام-آی-تی - تی با داده‌های تجربی دارند.

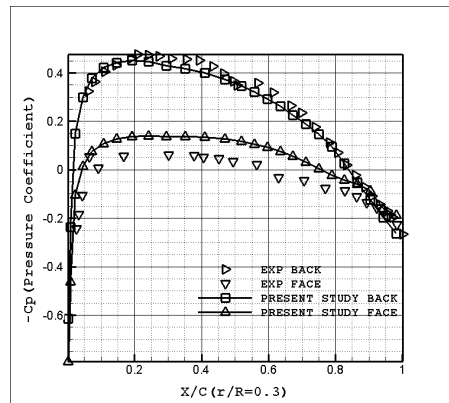


شکل (۷): نمودار درصد خطا ضریب تراست بر حسب ضریب پیشروی.

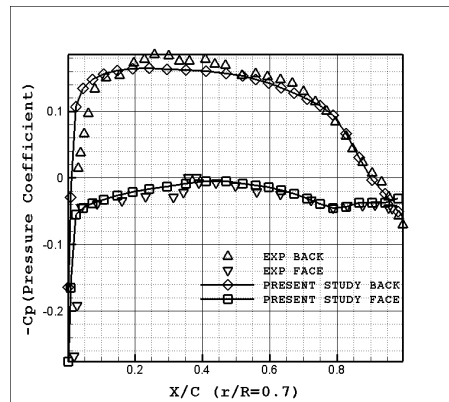
۵-۳- نتیجه‌های تحلیل کاویتاسیون بر روی پروانه DTMB4119

در این بخش به بررسی تحلیل کاویتاسیون بر روی پروانه DTMB4119 پرداخته شده است. پارامترها و داده‌های هندسی مربوط به تحلیل جریان کاویتاسیون بر روی پروانه همان داده‌های هندسی هستند که در حل جریان خیس شده بر روی پروانه به آنها اشاره شد. در تحقیق حاضر کاویتاسیون لایه‌ای بر روی پروانه DTMB4119 در شرایط جریانی با ضریب پیشروی $J=0.833$ و عدد کاویتاسیون $\sigma=1.02$ در شرایط جریانی آب آزاد مورد تحلیل قرار گرفته است. چگالی آب دریا $\rho=1025$ کیلوگرم بر متر مکعب، فشار اتمسفر در بالادست جریان پروانه در نواحی دور از پروانه $P_{atm}=101.325$ Kpa کیلوپاسکال، فشار بخار $P_{vapor}=4.25$ Kpa و ویسکوزیته آب $\mu=0.001003$ کیلوگرم بر متر در ثانیه در نظر گرفته شده است.

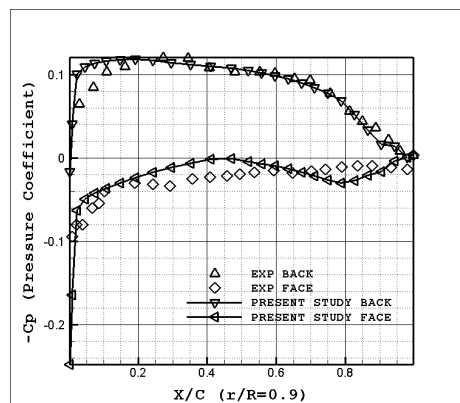
در ادامه ابتدا مقایسه بین داده‌های مربوط به ضریب فشار در مقاطع شعاعی مختلف به دست آمده از تحلیل کاویتاسیون بر روی پروانه DTMB4119 با داده‌های به دست آمده از هونگ سان [۲۵] بررسی شده است؛ سپس به اعتبارسنجی داده‌ها و سایر پارامترهای به دست آمده در تحلیل جریان کاویتاسیون بر روی پروانه DTMB4119 پرداخته می‌شود. در شکل‌های ۱۲-۱۳ نمودار ضریب فشار در مقاطع شعاعی $r/R=0.24$ و $r/R=0.427$ در تحلیل کاویتاسیونی پروانه در مقایسه با داده‌های هونگ سان نشان داده شده است. با توجه به اینکه فرض اولیه برای سطح کاویتی کل سطح پشت پره بوده است، همان‌گونه که مشاهده می‌شود پس از چند بار حل و همگرا شدن نتیجه‌ها با اینکه در فرض اولیه این دو مقطع تحت کاویتاسیون فرض شده بود، اما پس از همگرایی نتیجه‌ها این دو مقطع تحت تأثیر کاویتاسیون قرار نگرفته‌اند و ضرایب فشار در نقاط مختلف زیر خط $-C_p = \sigma$ قرار دارند. در شکل‌های ۱۴-۱۶ نمودار ضریب فشار در مقاطع شعاعی $r/R=0.13$ ، $r/R=0.1747$ و $r/R=0.19$ در تحلیل کاویتاسیونی پروانه در مقایسه با داده‌های هونگ سان نشان داده شده است. مطابق نتیجه‌های به دست آمده این سه مقطع از پروانه تحت تأثیر کاویتاسیون جزئی قرار گرفته و



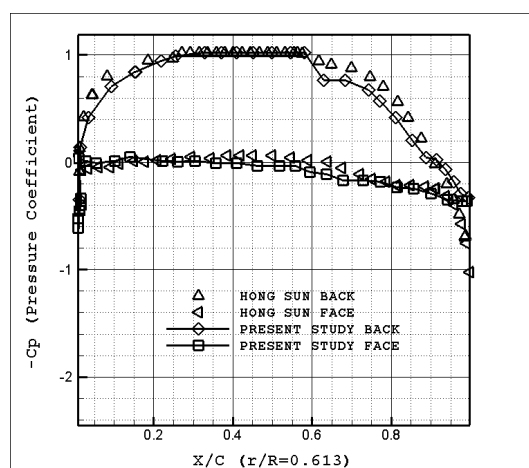
شکل (۹): نمودار ضریب فشار بر حسب تغییرات X (بی‌بعد شده با طول کورد مقطع) در راستای کورد، مقطع شعاعی $0.3R$



شکل (۱۰): نمودار ضریب فشار بر حسب تغییرات X (بی‌بعد شده با طول کورد مقطع) در راستای کورد، مقطع شعاعی $0.7R$



شکل (۱۱): نمودار ضریب فشار بر حسب تغییرات X (بی‌بعد شده با طول کورد مقطع) در راستای کورد، مقطع شعاعی $0.7R$

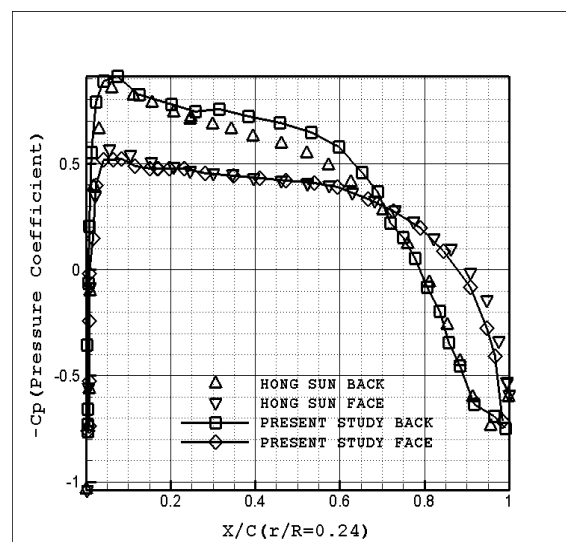


شکل (۱۴): نمودار ضریب فشار بر حسب تغییرات X (بی‌بعد) شده با طول کورد مقطع) در راستای کورد، قسمت پشت پره، $r/R = 0.7$ و عدد کایتاسیون $\sigma = 1.02$.

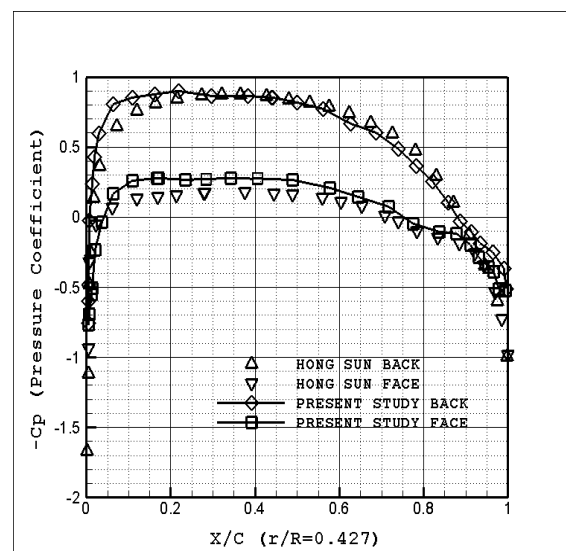
در تحلیل کایتاسیون نقطه فشار کمینه به عنوان نقطه شروع کایتاسیون در نظر گرفته شده است که با توجه به نرخ رشد حباب کایتاسیون از فرم ساده شده معادله رایلی - پلست^۱ با توجه به اینکه مدت زمان رشد حباب از مرتبه میلیونم ثانیه بوده و با توجه به اینکه سرعت افزایش شعاع حباب کایتاسیون در شرایط معمول محیطی ۸ متر بر ثانیه محاسبه می‌شود، افزایش قطر یک حباب کایتاسیون تا محدوده قابل قبولی از قطر پروانه‌ها ناچیز بوده و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد [۲۶].

جهت بررسی شاخص‌های همگرایی در تحلیل کایتاسیون لایه‌ای بر روی پروانه‌های دریایی علاوه بر اینکه شاخص‌های همگرایی در تحلیل جریان خیس شده که حلقه اول در تحلیل کایتاسیون لایه‌ای است مورد بررسی قرار می‌گیرد، پارامترهای حجم کایتاسیون و تغییر نقطه شروع کایتاسیون لایه‌ای در هر مقطع شعاعی در راستای طول کورد به عنوان دو شاخص مهم همگرایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در قسمتی از طول کورد مقطع شرط $-C_p = \sigma$ برقرار است.

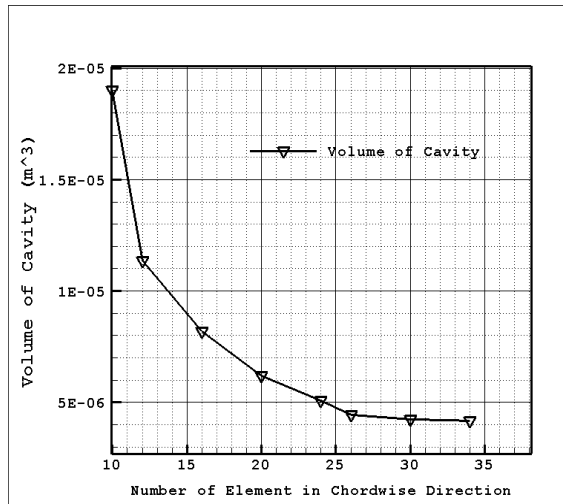


شکل (۱۲): نمودار ضریب فشار بر حسب تغییرات X (بی‌بعد) شده با طول کورد مقطع) در راستای کورد، قسمت پشت پره، $r/R = 0.24$ و عدد کایتاسیون $\sigma = 1.02$.



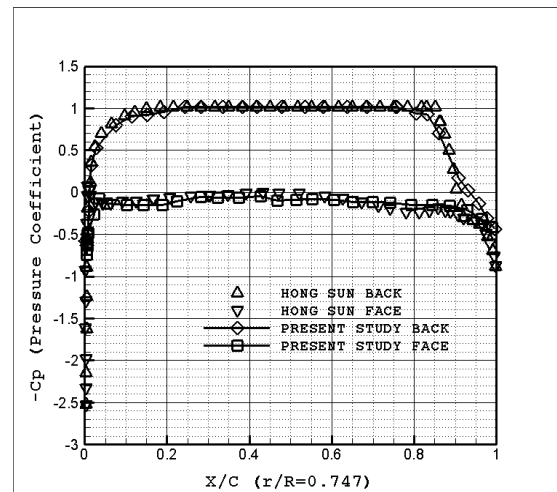
شکل (۱۳): نمودار ضریب فشار بر حسب تغییرات X (بی‌بعد) شده با طول کورد مقطع) در راستای کورد، قسمت جلوی پره، $r/R = 0.427$ و عدد کایتاسیون $\sigma = 1.02$.

مربوط به حجم کاویتی با توجه به تعداد المان‌ها مورد استفاده در تحلیل کاویتاسیون لایه‌ای بر روی سطح پروانه است.

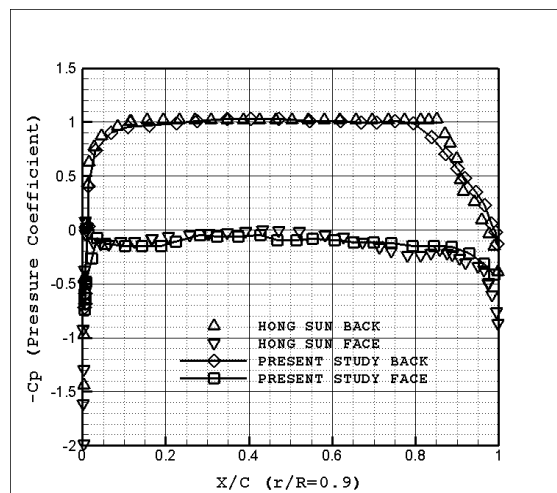


شکل (۱۷): نمودار تغییرات حجم کاویتی بر حسب تغییر تعداد المان‌ها در راستای طول کورد، در عدد کاویتاسیون $\sigma = 1.02$

در شکل ۱۸ نمودار تغییرات موقعیت نقطه شروع کاویتاسیون در راستای طول کورد در هر مقطع شعاعی و در تکرارهای مختلف حل جریان کاویتاسیون حول پروانه نشان داده شده است. مطابق نمودار پس از حل جریان خیس شده حول پروانه حدس اولیه از موقعیت نقطه شروع کاویتاسیون زده شده است؛ سپس با اعمال شرایط مرزی و حل دسته معادلات جبری کوپل جهت کاویتاسیون در چهار حل تکراری تغییرات موقعیت نقطه شروع و نقطه بسته شدن کاویتی که جزء نقاط بسیار مهم در تحلیل کاویتاسیون لایه‌ای و کاویتاسیون جزئی هستند، مورد بررسی قرار گرفته است؛ با توجه به اینکه شبکه تولید شده به اندازه کافی ریز بوده و تعداد تکرارهای کافی برای حل معادلات جبری لحاظ شده است، همگرایی در تغییر موقعیت این نقاط به خوبی قابل مشاهده است.

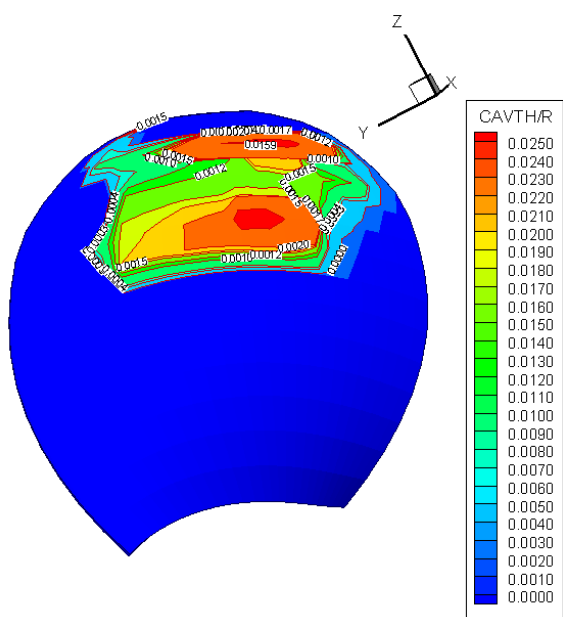


شکل (۱۵): نمودار ضریب فشار بر حسب تغییرات X (بی‌بعد شده با طول کورد مقطع) در راستای کورد، قسمت جلوی پره، $r/R = 0.7$ و عدد کاویتاسیون $\sigma = 1.02$



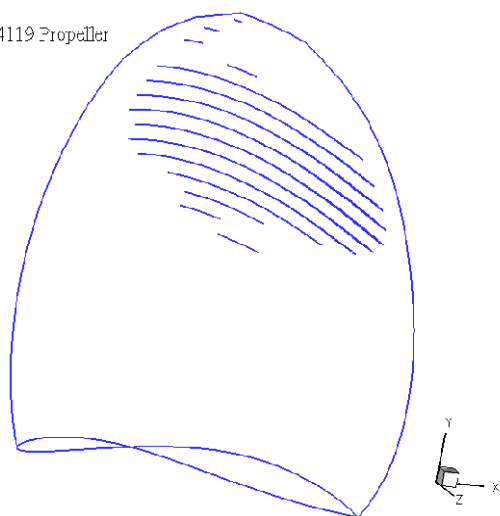
شکل (۱۶): نمودار ضریب فشار بر حسب تغییرات X (بی‌بعد شده با طول کورد مقطع) در راستای کورد، $r/R = 0.9$ و عدد کاویتاسیون $\sigma = 1.02$

مطابق شکل ۱۷ همگرایی در حباب کاویتی زمانی رخ می‌دهد که تغییرات حجم کاویتی با افزایش المان‌ها دچار تغییر چندانی نشود. مطابق شکل هنگامی که تعداد المان‌ها در راستای طول کورد نزدیک به ۳۰ المان می‌شود، میزان تغییرات حجم کاویتی با افزایش تعداد المان‌ها بعد از تحلیل به صفر نزدیک می‌شود که این نشان از همگرایی نتیجه‌های



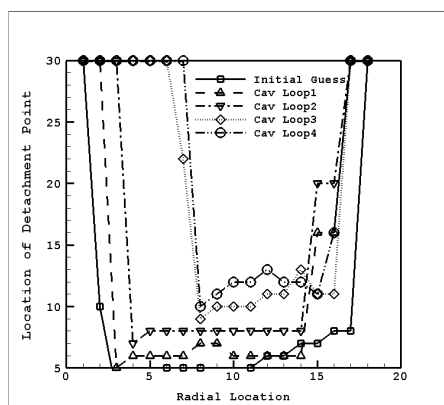
(الف)

DTRC 4119 Propeller



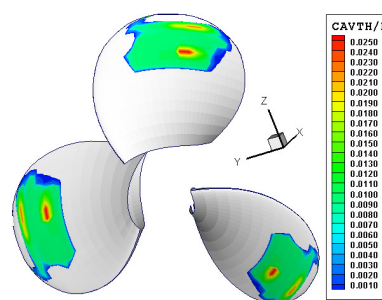
(ب)

شکل (۲۰): کانتور ضخامت کاویتی (بی بعد شده) با شعاع پروانه) در تحلیل کاویتاسیون لایه‌ای در $J=0.833$ و عدد کاویتاسیون $\sigma = 1.02$ در (ب) مقایسه با نتیجه‌های مربوط به هونگ سان [۲۴].



شکل (۱۸): نمودار تغییرات موقعیت نقطه شروع و بسته شدن کاویتی در راستای طول کورد پره در هر مقطع شعاعی و در عدد کاویتاسیون $\sigma = 1.02$.

از جمله پارامترهایی بسیار مهمی که به عنوان نتیجه‌های تحلیل کاویتاسیون جزئی (لایه‌ای) بر روی پروانه‌های دریایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، ناحیه تحت کاویتاسیون بر روی سطح پره و ضخامت کاویتی است. در واقع در این تحلیل با توجه به اینکه تأثیر جریان عرضی^۱ مطابق معادله ۱۴ در تعیین ضخامت کاویتی در تحلیل جریان کاویتاسیون لایه‌ای حول پروانه مورد بررسی قرار گرفته است، کانتور ضخامت کاویتی و ناحیه تحت کاویتاسیون تطابق بسیار بالایی با داده‌های به دست آمده از هونگ سان داشته و در شکل‌های ۱۹-۲۰ به خوبی مشخص است.



شکل (۱۹): کانتور ضخامت کاویتی (بی بعد شده) با شعاع پروانه) برای تحلیل کاویتاسیون لایه‌ای در $J=0.833$ و عدد کاویتاسیون $\sigma = 1.02$

- Computational Mechanics Publications, pp. 233-278, 1996.
- Uhlman, J.S. "The Surface Singularity Method Applied to Partially Cavitating Hydrofoils", *J. Ship Research*, Vol. 31, No. 2, pp. 107-124, 1987.
 - Kinnas, S. and Fine, N.E. "Non-linear Analysis of the Flow around Partially or Super-Cavitating Hydrofoils by a Potential Based Panel Method", *IABEM90 Proceedings*, Rome, Italy, 1990.
 - Lee, C.S., Kim, Y.G., and Lee, J.T., "A Potential Based Panel Method for the Analysis of Two-dimensional Super or Partially Cavitating Hydrofoil", *J. Ship Research*, Vol. 36, No.2, pp.168-181, March 1992.
 - Pasandideh Fard, M., Rashidi-Toroghi, I., and Tolami, M. "Numerical Simulation of 2-D Supercavitation and Partial Cavitation, Using Boundary Element Method", *Aerospace Mech. J.*, Vol. 7, No. 4, 1387 (In Persian).
 - Pellone and Rowe "Supercavitating Hydrofoils in Non-linear Theory", *The 3rd Int. Conf. on Num. Ship Hydrodyn*, Paris, France, 1981.
 - Lemonnier, H. and Rowe, G. "Another Approach in Modeling Cavitating Flows", *J. Fluid Mech.*, Vol. 195, pp.557-580, April 1988.
 - Hess, J.L. and Valarezo, W.O., "Calculation of Steady Flow about Propeller, Using a Surface Panel Method", *AIAA J. Propulsion Power*, Vol. 1, pp. 470-476, 1985.
 - Hsin, C.-Y. "Development and Analysis of Panel Methods for Propellers in Unsteady Flow", *PhD Dissertation*, Massachusetts Inst. of Tech. MIT, September 1990.
 - Fine, N.E "Non-linear Analysis of Cavitating Propellers in Non-uniform Flow", *PhD Dissertation*, October 1992.
 - Kim, Y.G., Lee, C.S., Suh, J.C., "Surface Panel Method for Prediction of Flow around 3D Steady or Unsteady Cavitating Hydrofoil", *The 2nd Int. Symp. on Cavitation*, Tokyo, Japan, April 1994.
 - Kim, Y.G. and Lee, C.S., "Prediction of Unsteady Performance on Marine Propellers with Cavitation, Using a Surface Panel

۶- نتیجه‌گیری

کاویتاسیون برای سیستم‌های رانش دریایی، به ویژه سیستم‌های رانش پروانه، پدیده‌ای بسیار مخرب است؛ با استفاده از روش موجود می‌توان تحلیل کاویتاسیون لایه‌ای را با دقت نسبتاً خوبی بر روی هر هندسه دلخواهی از پروانه در شرایط جریانی مورد نظر انجام داد. در تحلیل حاضر از روش عددی المان مرزی بر پایه پتانسیل استفاده شده است. اثر ویسکوزیته بر روی نتیجه‌ها با استفاده از فرمول‌های تجربی اعمال شده است. باتوجه به اینکه در روش المان مرزی حل فقط بر روی مرز یعنی سطح پروانه انجام می‌شود، میزان محاسبات، با حفظ دقت مورد نظر، در مقایسه با روش‌های حجم محدود به شدت کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه تعداد داده‌های هندسی و جریانی در تحلیل کاویتاسیون لایه‌ای بر روی پروانه بسیار زیاد هستند. بنابراین استفاده از روش موجود از لحاظ زمان و هزینه بسیار مقرون به صرفه‌تر از روش‌های عددی حجم محدود است. از زیربرنامه‌های مربوط به تولید هندسه و حل کننده به صورت کوپل استفاده شده است و به سهولت می‌توان اثر تغییر پارامترهای هندسی بر نتیجه‌ها را بررسی کرد. در این روش اثر دنباله بر روی نتیجه‌ها را به اندازه دو دور چرخش پروانه و حتی بیشتر به راحتی می‌توان لحاظ کرد؛ در حالی که در روش‌های حجم محدود نرخ اضمحلال ورتکس‌ها در میدان جریان پایین دست پروانه بالا بوده و میدان ویک به درستی مدل نمی‌شود. در تحلیل حاضر اصلاح موقعیت نقطه جدایش جریان با توجه به نقطه فشار کمینه و همچنین اصلاح پتانسیل مربوط به نقطه جدایش جریان با استفاده از پتانسیل مربوط به نقاط قبل از شروع کاویتاسیون در ناحیه خیس شده پروانه انجام شده است و همان‌گونه که از حل جریان کاویتاسیون لایه‌ای بر روی پروانه *DTMB4119* مشخص است داده‌های به دست آمده تطابق بسیار خوبی با داده‌های موجود از نتیجه‌های مرجع [۲۴] دارند.

مراجع

- Kato, H. Cavitation, Chapter 5 of the *Textbook of Advances in Marine Hydrodynamics*, Edited by Ohkusu,

- Propellers, IABEM 2002 Proceedings, Austin Texas, USA, May 2002.
20. Guilherme, N., Vasconcelos, B. and Vaz, G. "Modeling of Sheet Cavitation on Hydrofoils and Marine Propellers", Universidade Técnica de Lisboa, November 2005.
 21. Uhlman, J.S. "On the Development of a Non-linear Axisymmetric Re-entrant Jet Cavitation Model", J. Ship Res., Vol. 50, No. 3, September 2006.
 22. Krishnaswamy, P. "Flow Modelling for Partially Cavitating Hydrofoils", PhD Dissertation, Dep't. of Naval Architecture and Offshore Eng., Technical Univ. of Denmark, October 2000.
 23. Morino, L. and Kuo, C.C. "Subsonic Potential Aerodynamics for Complex Configurations", A General Theory, AIAA J., Vol. 12, No. 2, pp.191-197, February 1974.
 24. Koichi, K. "Comparative Calculations of Propellers by Surface Panel Method-WorkShop Organized by the 20th ITTC Propulsor Committee", Tokyo, September 1993.
 25. Hung, S. "Performance Prediction of Cavitating Propulsors, Using a Viscous/Inviscid Interaction Method", PhD Dissertation, Ocean Engineering Group, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas at Austin, Austin, 2008.
 26. Knapp, R.T., Daily, J.W., and Hammitt, F.G. "Cavitation", McGraw-Hill, New York, 1970.
 - Method", The 21st Symp. on Naval Hydrodyn., June 1996.
 13. Kinnas, S. and Fine, N.E. "Non-linear Boundary Element Method for the Analysis of Unsteady Propeller Sheet Cavitation", The 19th Symp. on Naval Hydrodyn., Seoul, Korea, pp. 717-737, August 1992.
 14. Young, Y.L. and Kinnas, S. "BEM Technique for the Modeling of Supercavitating and Surface-Piercing Propeller Flows", The 24th Symp. on Naval Hydrodyn., Fukuoka, Japan, July 2002.
 15. Mueller, A.C. "Development of Face and Mid-Chord Cavitation Models for the Prediction of Unsteady Cavitation on a Propeller", M.sc. Thesis, Ocean Engineering Group, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, May 1998.
 16. Kinnas, S., Young, Y.L., Lee, H, Gu and Natarajan "Prediction of Cavitating Flow around a Single or Two-Component Propulsors", Ducted Propellers and Rudders CFD2003 Proceedings, London, UK, 2003.
 17. Lee, K., and Natarajan, S.G. "Numerical Modeling of Rudder Sheet Cavitation Including Propeller/Rudder Interaction and the Effects of a Tunnel", Cav2003 Proceedings, Osaka, Japan, November 2003.
 18. Young, Y.L. "Fluid and Structural Modeling of Cavitating Propeller Flows", Cav2003 Proceedings, Osaka, Japan, November 2003.
 19. Lee, H. and Kinnas, S. "Application of BEM in Unsteady Blade Sheet and Developed Tip Vortex Cavitation Prediction on Marine