Archive of SID

ارائه روشی جهت طراحی و تحلیل کانال ورودی سیستم رانش جت‌آب

مهدی یوسفی فرد[1] ، منوچهر راد[2] ، علی حاجیلوی[3]

تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۳۶۵

yousefifard@mehr.sharif.edu

چکیده:

جریان سیال در کانال ورودی سیستم رانش جت آب از عواملی همچون سرعت شناور و هندسه کانال تأثیر می‌پذیرد. پارامترهای اصلی نظیر مساحت ورودی و خروجی، توان پمپ و قطر ایمپلر با استفاده از روش‌های تحلیلی قابل محاسبه است. با وجود این، هندسه ورودی از رابطه خاصی پیروی نکرده و در معرض شرایط مختلف کاری نیز قرار می‌گیرد. این امر سبب شده، طراحی سیستم ورودی تا حد زیادی تابع نظر طراح باشد. یکی از روش‌های طراحی سیستم رانش جت‌آب و به تبع آن ورودی سیستم، تبدیل فاکتورهای تأثیرگذار در عملکرد مجموعه به پارامترهای قابل اندازه‌گیری است. با تغییر این پارامترها و بررسی عملکرد سیستم می‌توان به هندسه با بازده بالا دست یافت. در این مطالعه ابتدا با استفاده از روش‌های تحلیلی پارامترهای اصلی سیستم محاسبه می‌شود. همچنین روابط تجربی جهت تعیین فاکتور ویک ارائه شده و سایر پارامترها با استفاده از حل عددی جریان و تصحیح هندسه ارائه می‌گردد. نتایج بدست آمده از این روش‌ها و داده‌های آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه و دامنه اعتبار روش‌ها تعیین می‌شود.

کلمات کلیدی: سیستم رانش جت‌آب، کانال ورودی، حل عددی ، کاویتاسیون.

---

[1] دانشجوی کارشناسی ارشد معماری کشتی، دانشگاه صنعتی شریف

[2] استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

[3] دانشیار دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

www.SID.ir

Archvie of SID

۱- مقدمه

استفاده از سیستم رانش جت‌آب از سال ۱۶۶۱ آغاز شد [۱].در آن زمان استفاده از این سیستم به‌جای پروانه‌های معمولی بسیار جالب توجه بود. اما طراحی ضعیف و با کارائی پایین پمپ‌ها باعث شد این سیستم نتواند رقیب جدی برای پروانه‌های معمولی به‌شمار آید. با پیشرفت طراحی مهندسی و افزایش توانائی پمپ‌ها، علاوه بر تولید جت‌آب کاراتر، این سیستم توانست پارامترهای مؤثرتری را نسبت به سیستم‌های معمول نشان دهد.

مدل‌های پیشین جهت توصیف رفتار سیستم جت‌آب بر اساس تشریح مشخصات توانی سیستم جت در شرایط جریان آزاد است. اما این نکته توسط ون‌ترویسگا ثابت شد که اثرات متقابل بدنه و سیستم رانش جت‌آب می‌تواند تا ۲۰ درصد بر بازده کل تأثیر گذار باشد.[۲] بنابراین مدل‌های اخیر دربرگیرنده کلیه پارامترهای سیستم به‌طور همزمان است. در این مدل‌ها ضرایب افت ناشی از اثرات متقابل بدنه و سیستم جت با استفاده از نتایج تجربی لحاظ می‌گردد.

۲- تئوری و روابط اساسی سیستم جت آب:

شکل ۱ نشان‌دهنده طرحواره یک سیستم رانش جت آب است که با ساده‌سازی‌هایی به صورت کاملاً ایده آل در نظر گرفته شده است. سیال با سرعت V_{in} وارد در جهت X وارد شده و با سرعت V_{jet} از سطح مقطع A_{jet} از سیستم خارج می‌گردد. در این صورت جریان جرم گذرنده از سیستم برابر خواهد بود با:

$$\dot{m} = \rho A_{jet} V_{jet} \qquad (۱)$$

تراست ایجاد شده از این جریان جرم نتیجه تغییر مومنتم جریان در ورودی و خروجی است:

$$T = \rho Q\left(V_{jet} - V_{in}\right) \qquad (۲)$$

راندمان سیستم جت به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_j = \frac{\text{کار مفید انجام شده روی کشتی}}{\text{کار مفید روی کشتی + انرژی تلف شده در جت}} \qquad (۳)$$

با استفاده از رابطه انرژی و تعریف جزئیات بیشتر برای توصیف افت‌های سیستم می‌توان بازده کل را به‌صورت زیر بیان کرد:

www.SID.ir

Archvie of SID

$$\eta_{jet} = \frac{2\mu(1-\mu)}{IVR \times \left[1+\psi-(1-\xi)\mu^2+\frac{2gh_i}{V_j^2}\right]} \quad (۴)$$

که در آن:

$$IVR = \frac{V_{in}}{V_{Ship}}، \quad \mu = \frac{V_{in}}{V_{Jet}}، \quad \psi = \eta_n - 1، \quad \eta_n = \text{بازده نازل}، \quad \xi = \frac{\text{کل انرژی تلف شده در ورودی}}{\text{انرژی ورودی ایده‌آل}}$$

با رسم نمودار بازده بر حسب نسبت سرعت μ می‌توان نقطه با بازده بیشینه را انتخاب کرد و سپس با در دست داشتن مقدار μ می‌توان توان پمپ را بدست آورد.

از آنجا که تراست مورد نیاز براساس مقاومت بدست آمده از تست مدل شناور به‌دست می‌آید، می‌توان دبی حجمی سیستم را بر اساس تراست با استفاده از رابطه ۲ محاسبه کرد.

$$T = \frac{R}{1-t} \quad (۵)$$

با داشتن دبی حجمی سیستم و سرعت ورودی می‌توان قطر ورودی را محاسبه کرد.

در برنامه‌ای که به همین منظور تهیه شده است می‌توان مساحت ورودی و قطر پمپ را در نقطه طراحی (نقطه‌ای که در آن بازده ماکزیمم است) بدست آورد. در شکل ۲ می‌توان نمونه نتایج محاسبات برنامه برای راندمان کل سیستم و همچنین دبی را مشاهده نمود.

۳- بررسی جزئیات بیشتر رفتار جریان در ورودی:

همان‌طور که اشاره شد بازده کل سیستم از رابطه ۴ بدست می‌آید. پارامترهای مورد استفاده در این رابطه نیازمند بررسی بیشتر و محاسبه بر اساس شرایط عملکرد سیستم است.

اولین پارامتر سرعت ورودی است که معمولاً در عمل کمتر از سرعت شناور می‌باشد. عوامل مؤثر در سرعت متوسط ورودی، سرعت مورد نظر در خروجی،نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی و فشار مکش در مدخل ورودی (که به‌وسیله پمپ ایجاد می‌شود) می‌باشد. یکی از عوامل مؤثر در کمتر شدن این سرعت، رشد لایه مرزی در کف شناور است. با استفاده از تئوری لایه مرزی برای نسبت قطر ورودی به خروجی و فرض فشار مکشی که در آن کاویتاسیون ایجاد نشود می‌توان سرعت متوسط ورودی را مشخص کرد. سرعت سیال در هر نقطه از محدوده جریان تابعی است از فاصله آن نقطه از بدنه شناور، سرعت سیال در نقطه‌ای بسیار دور و فاصله آن نقطه تا ابتدای شناور. در تحقیقی که

www.SID.ir

Archvie of SID

توسط اسونسون و همکارانش [۴] انجام شد، مقدار ضخامت لایه مرزی در هر طولی از ابتدای شناور به‌شکل زیر بدست آمد:

$$\delta = 0.27 \times L_x \times Re_x^{-1/6} \quad (۶)$$

که عدد رینولدز Re_X در این حالت بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\mathrm{Re}_x = \frac{U_\infty \times L_x}{\upsilon} \quad (۷)$$

همچنین سرعت در هر نقطه از لایه مرزی توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{U}{U_\infty} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/n} \quad (۸)$$

که $n = log_{10}^{Re_x}$ است.

با انتگرال‌گیری سرعت در داخل لایه مرزی می‌توان سرعت متوسط جریان ورودی را بدست آورد. اگر این سرعت را U_m بنامیم پارامتر ویک بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$w = \left(1 - \frac{U_m}{U_\infty}\right) \quad (۹)$$

جهت محاسبه فاکتور ویک زیربرنامه‌ای تهیه شده است که به‌ازای سرعت‌های مختلف شناور مقادیر فاکتور ویک را محاسبه می‌کند.

۴- انتخاب پارامترهای طراحی و بررسی آنها:

با استفاده از حل معادله مومنتم، مساحت ورودی سیستم و قطر پمپ محاسبه می‌شوند. طراحی جزئیات بیشتر سیستم نیازمند استفاده از نتایج تجربی و همچنین حل عددی جریان است. معمولاً ورودی سیستم به‌شکل بیضوی ساخته می‌شود. البته در مواردی هم بنابه محدودیت‌های ساخت از طرح‌های مستطیلی استفاده می‌شود. تجربه نشان می‌دهد بهترین طرح یک بیضی است که قطر کوچک آن تا ۳۰ درصد از قطر پمپ بزرگتر است. [۴]

حال با داشتن طرح دوبعدی دو مقطع از کانال ورودی می‌توان طرح مقطع طولی آن را بدست آورد. اولین قدم در این راه، انتخاب پارامترهای بیان کننده هندسه ورودی است. در شکل ۳ می‌توان نمونه این پارامترها را مشاهده کرد. اولین اصل حاکم بر روش طراحی پروفیل طولی، برای اینکه جدایی نداشته باشیم و افت انرژی حداقل باشد، هموار بودن خطوط و پرهیز از تغییر مسیر ناگهانی در تمام جهات است. انتخاب این پارامترها بر اساس نتایج آزمایش و یا

www.SID.ir

Archvie of SID

حل عددی می‌باشد که درستی آن بر اساس نتایج آزمایشگاهی به اثبات رسیده است. می‌توان تأثیر هر یک از پارامترهای تعیین شده را بر عملکرد سیستم، افت انرژی و یا وقوع کاویتاسیون توسط نمودارهایی نمایش داد تا طراح بتواند با توجه به آنها هر یک از پارامترها را انتخاب کند. جدول ۱ نشان‌دهنده سیکل انتخاب پارامترهای سیستم می‌باشد.

جدول ۱) نحوه محاسبه پارامترهای مؤثر سیستم

۱	حل معادله مومنتم و انتخاب نقطه با بازده بیشینه
۲	محاسبه مساحت ورودی و قطر پمپ
۳	محاسبه فاکتور ویک با استفاده از تئوری لایه مرزی
۴	حل عددی جریان و بررسی پدیده کاویتاسیون
۵	انتخاب مقدار مناسب پارامترهای مؤثر

۵- حل عددی جریان و بررسی پدیده کاویتاسیون:

همانطور که اشاره شد یکی از روش‌های بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر در عملکرد سیستم استفاده از روش‌های عددی است. در این راه توجه به چند نکته ضروری است. فرایند طراحی و تحلیل کانال ورودی یک پروسه با تکرار زیاد است و روش مورد استفاده باید این قابلیت را داشته باشد تا مدل‌سازی و تحلیل در آن به آسانی امکان پذیر باشد. با در نظر داشتن این نکته ویرایش ۱۰ نرم افزار CFX ANSYS برای این کار انتخاب شد. این نرم افزار امکان طراحی مدل در نرم افزارهای طراحی به کمک کامپیوتر (CAD) را داده و مدل ساخته شده را به آسانی شبکه‌بندی می‌کند.

عملیات اعتباردهی حل عددی با استفاده از حل مسأله نمونه که پاسخ تحلیلی آن در دست بوده انجام شده است. این مسأله شامل یک نازل است که ورودی آن عمود بر جریان یکنواخت با سرعت U_m قرار دارد. جریان از سمت مقطع بزرگتر نازل وارد می‌شود. نتیجه حل به این صورت است که در صورت عدم وجود پمپ، سرعت سیال در خروجی نازل باید با سرعت جریان یکنواخت (سرعت نسبی قایق با آب) برابر باشد. در این حالت سرعت ورودی با استفاده از قانون پیوستگی به‌دست می‌آید. این مسأله بصورت دوبعدی در یک محدوده با اندازه چندین برابر طول نازل مدل شده است. ورودی و خروجی جریان با سرعت ثابت و عمود بر سطح مدل شده است. سطوح پایینی و بالایی بصورت دیواره‌های بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است.

پس از چندین تکرار این نتایج حاصل شد:

www.SID.ir

Archvie of SID

الف- با توجه به فرض بدون اصطکاک (غیر چرخشی) بودن جریان، محدوده نسبت قطر ورودی به خروجی باید به حدی باشد که رشد لایه مرزی در خروجی ناچیز باشد.

ب- وجود دنباله‌های موازی در ورودی و بخصوص خروجی کمک مؤثری در همگرایی جواب‌ها داشته و گاهاً بدون آنها حل مسأله با خطای زیادی همراه خواهد بود.

در شکل ۵ نمودار سرعت جریان در طول نازل رسم شده است که می‌توان مشاهده کرد در انتهای نازل سرعت در جهت محور X جریان با سرعت جریان یکنواخت در خارج از نازل برابر شده است.

حال با توجه به این نکته که نسبت قطر ورودی به خروجی کانال کمتر از مقدار تست شده است و از طرفی هدایت جریان ورودی و خروجی توسط بدنه صورت می‌پذیرد می‌توان انتظار داشت حل عددی در این مورد نتایج نسبتاً قابل قبولی بدهد.

جهت حل جریان در کانال ورودی و بررسی پدیده کاویتاسیون نیز از یک محدوده جریان بزرگتر از نازل ورودی استفاده شده است. ورودی یک جریان سرعت ثابت و خروجی یک سطح با فشار استاتیک معلوم است. دبی مقطع خروجی کانال برابر دبی پمپ است. سطح بالایی که در معرض بدنه شناور قرار دارد با یک دیواره هموار شبیه‌سازی شده و مرز بعدی همان سطح پایینی است که باید نقش دریا با عمق نامحدود را داشته باشد. این مرز توسط یک جداره هموار پوشانده شده است. در جدول ۲ می‌توان داده‌های ورودی برای حل مسأله را مشاهده نمود. این داده‌ها نتیجه حل تحلیلی و تست مدل یک نمونه شناور بوده که جهت حل عددی و بررسی کاویتاسیون در ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴].

جدول ۲) داده‌های ورودی برای حل مسأله

پارامتر	مقدار	واحد
قطر پمپ (خروجی نازل)	۲/۲۸۶	متر
دبی پمپ	۳۷/۹۴۷۶	متر مکعب بر ثانیه
سرعت شناور (سیال ورودی به محدوده حل)	۲۵/۲	متر بر ثانیه
فشار بخار سیال	۳۲۳۶	پاسکال

با چند تکرار می‌توان مقادیر مناسب هر یک از پارامترهای تعیین شده را بدست آورد. هدف اصلی از حل عددی و محدود کردن پارامترهای طراحی بررسی پدیده کاویتاسیون و رفع نواقص هندسی عامل آن می‌باشد. برای این مسأله محدوده‌ای که احتمال وقوع کاویتاسیون در آن وجود دارد محلی است که منحنی بدنه در قسمت ورودی از خط

www.SID.ir

Archvie of SID

مبنا[1] جدا می‌شود. پارامترهایی که می‌توان بوسیله آنها از وقوع کاویتاسیون جلوگیری کرد زاویه جدا شدن ورودی و شعاع منحنی پروفیل ورودی در این محدوده است.

جهت بررسی کاویتاسیون از پارامتر σ به‌شکل زیر استفاده می‌شود:

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^{\ 2}} \qquad (۱۰)$$

این پارامتر یک عدد بی‌بعد است که با منفی شدن آن می‌توان انتظار داشت پدیده کاویتاسیون پیش آید. در شکل ۶ می‌توان کانتور رسم شده جهت پارامتر σ را بررسی نمود. مشاهده می‌گردد در مناطق ذکر شده مقدار این پارامتر به عدد صفر نزدیک شده است. شکل ۷ نیز نشان‌دهنده بردارهای سرعت و خطوط جریان در محدوده مورد نظر است.

۶- بحث و نتیجه گیری:

طراحی سیستم رانش جت‌آب مستلزم به‌کارگیری یک فرایند با تکرار زیاد می‌باشد. پارامترهای طراحی کانال ورودی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت بر عملکرد سیستم و وزن سیال داخل آن تأثیرگذار است. همچنین کارائی هیدرودینامیکی شناور تابعی است از وزن سیال درون سیستم و تریم شناور. بنابراین دستیابی به طرح نهائی نیازمند سعی و خطای زیادی است. از آنجا که کانال ورودی در شرایط کاری و نسبت سرعت‌های مختلف عمل می‌کند تمامی مشخصات سیستم باید در این حالات مورد بررسی قرار گیرد. اگر در این قسمت طول مسیر کم و سطوح صاف و جریان متقارب باشد می‌توان در این مسیر با دقت بالایی جریان را غیر چرخشی فرض و مسأله را حل کرد.

استفاده از روش‌های عددی محدودیت‌هایی را به دنبال دارد. به‌دلیل اعتبار محدود این روش‌ها باید آنها را با احتیاط بیشتری به‌کار برد. لذا در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب و سعی و خطا جهت اعتبار دهی به پاسخ‌ها از ملزومات حل عددی جریان است. این روش‌ها در صورت معتبر بودن می‌تواند جهت تحلیل جریان در محدوده‌های خاص استفاده شود. همانطور که در این مطالعه نیز از روش‌های مذکور در بررسی وقوع پدیده کاویتاسیون در محدوده ورودی جریان جت‌آب استفاده شده است.

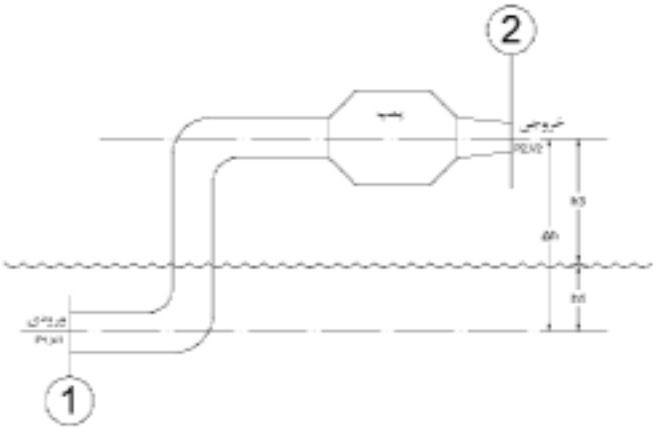
[1] Base Line

www.SID.ir

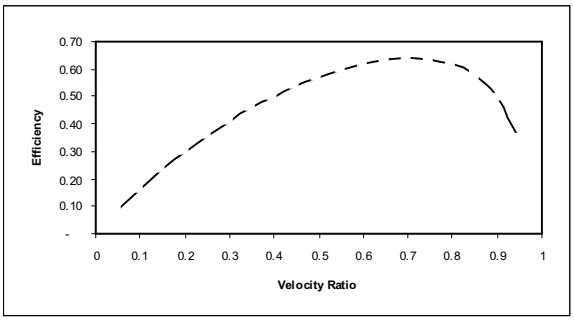
Archvie of SID

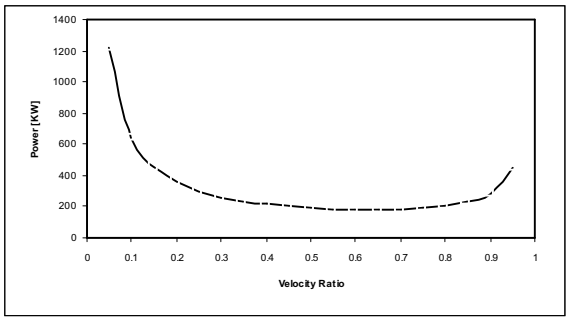
۷- فهرست علائم:

ρ	دانسیته	L_x	فاصله از ابتدای شناور
R	مقاومت بدنه شناور	U_∞	سرعت جریان یکنواخت
t	ضریب کاهش تراست	P	فشار سیال
h_j	اختلاف ارتفاع ورودی و نازل خروجی	P_v	فشار بخار سیال
υ	ضریب لزجت سینماتیکی		

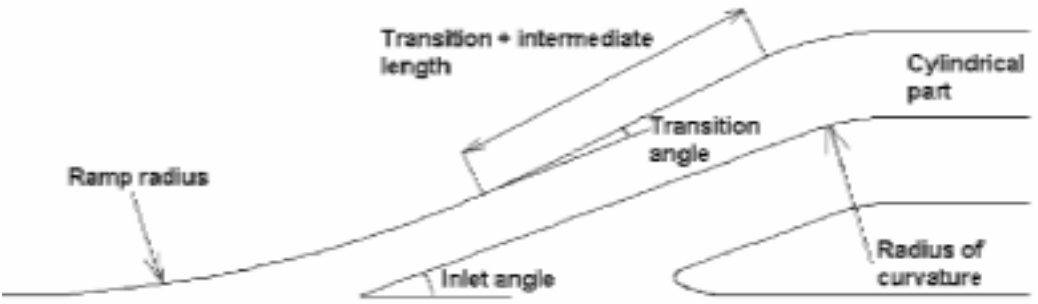


شکل ۱) مدل شماتیک سیستم جت‌آب [۱]





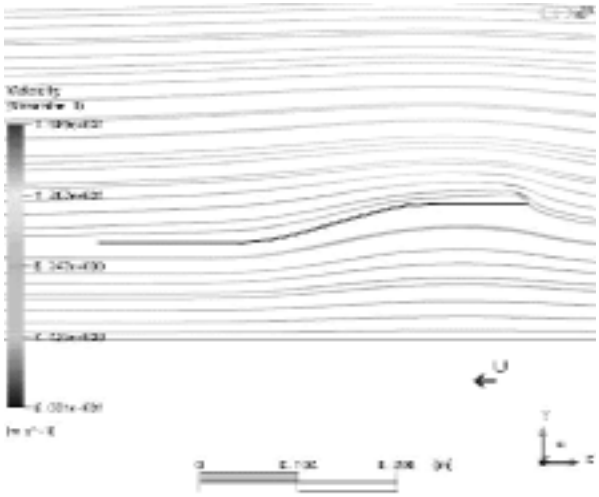
شکل ۲) الف- منحنی تغییرات بازده در مقابل نسبت سرعت ب- دبی جریان در نسبت سرعت‌های مختلف

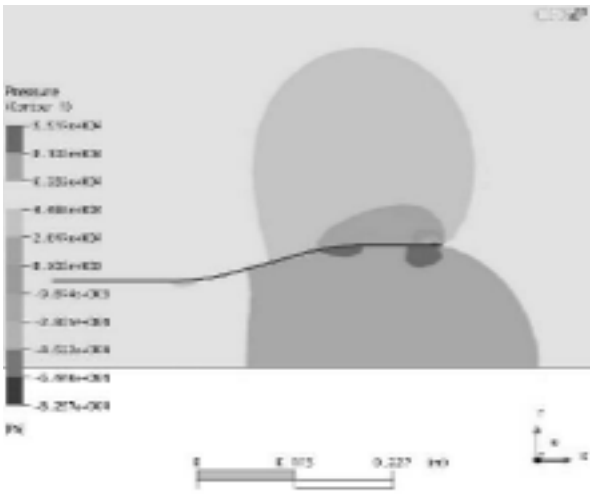


شکل ۳) پارامترهای بیان کننده هندسه سیستم [۳]

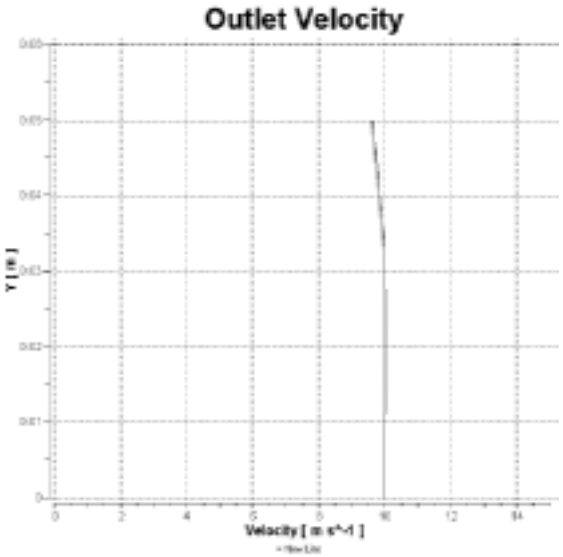
www.SID.ir

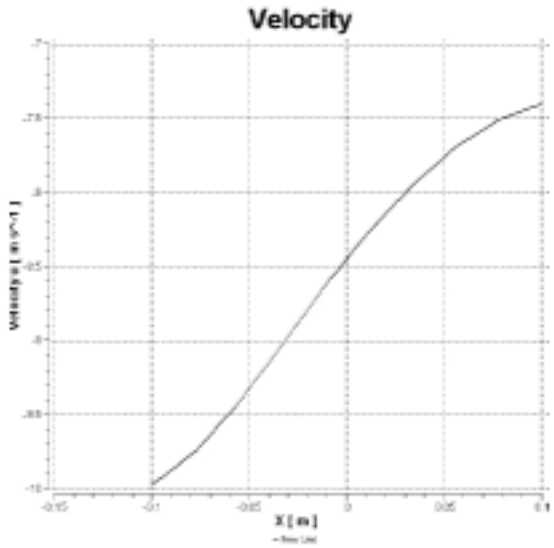
Archvie of SID



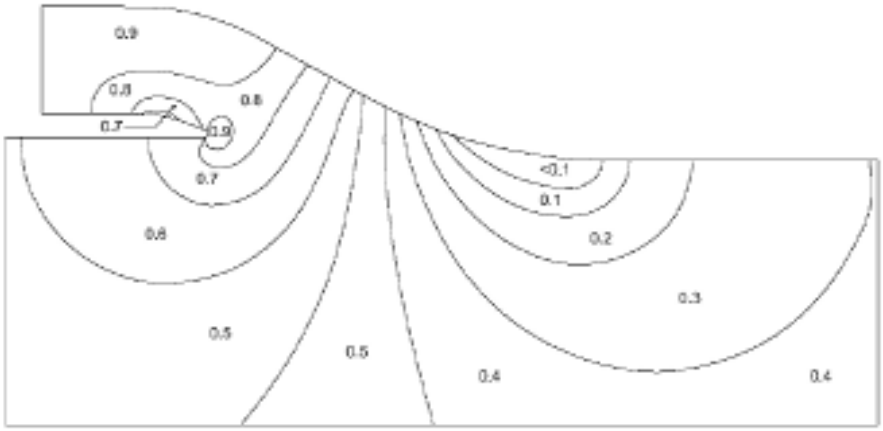


شکل ۴) **الف- خطوط جریان ($U_\infty = 10 m/s$) ب- کانتور فشار (مسأله جریان داخل نازل)**





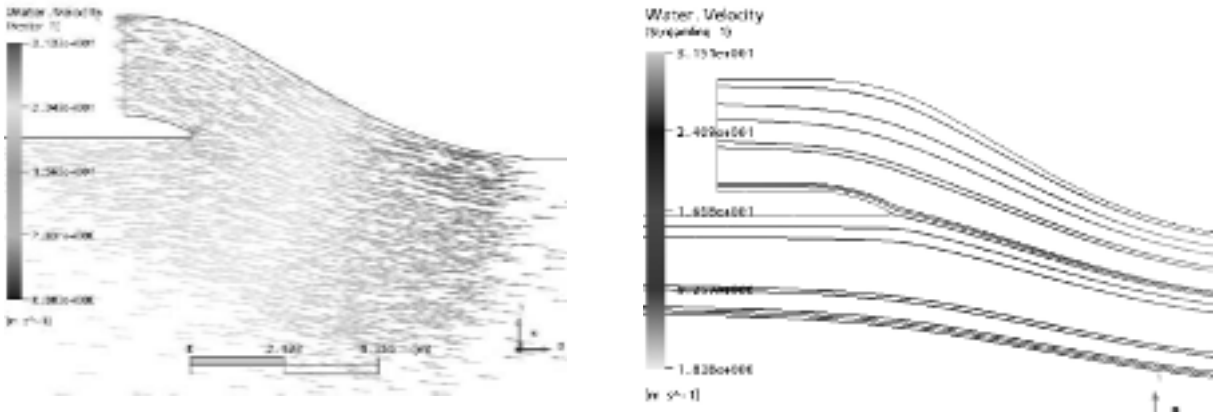
شکل ۵) الف- سرعت در ارتفاع‌های مختلف ب- سرعت در طول نازل ($U_\infty = 10 m/s$)



شکل ۶) کانتور پارامتر کاویتاسیون در محدوده ورودی سیستم σ

www.SID.ir

Archvie of SID



شکل ۷) الف- خطوط جریان ب- بردارهای سرعت سیال در محدوده ورودی جریان جت‌آب

۸- منابع و مراجع:

[1]. Carlton.J.S. (John S.), "Marine Propeller and Propulsion", Oxford, Butterworth -Heinemann, 1994.

[2]. Dr ir T.J.C. van Terwisga, "A Parametric Propulsion Predict ion Method For Waterjet Driven Craft", Fast'97 Conference, Abstract No. 151, 1997.

[3].John Crane-Lips, "On the development of a waterjet inlet flow analysis tool", Artikel Timmersprijs door N. Bulten, 2003.

[4]. Stanley Wheatley, "Development of a High -speed Sealift Waterjet Propulsion System", Final Report, Center for the Commercial Deployment of Transportation Technologies California State University, Long Beach Foundation, September 30, 2003.

[5]. Donald M. MacPherson, "Selection of Commercial Waterjet s: New Performance Coefficients Point The Way", SNAME New England Section, February 2000.

[6]. H.H.Chun, W.G. Park, J.G. Jun, "Experimental and CFD Analysis for Rotor -Stator Interaction of a Waterjet Pump", Pusan National University, Korea, 2001.

[7]. Techn. Gunnar Bay, "Waterjet – Hull Interaction", Project Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology, 8/12 -2003.

www.SID.ir