حدود استفاده از روش یک بعدی حرکت سیال در محاسبه ارتفاع مانومتریک پمپهای سانتریفوژ

دکتر احمد نوربخش
دانشکده فنی ــ دانشگاه تهران

چکیده

ضریب ناهماهنگی به منظور تصحیح روابط منتج از روش یک بعدی حرکت سیال در یک چرخ سانتریفوژ تعریف شده‌است . به کمک روش دو بعدی تقسیم سرعت عمودی در بیرون پنج چرخ سانتریفوژ با سرعتهای مخصوص حدود $N_S = ۵۰$ با فرض حرکت پتانسیل و بدون در نظر گرفتن آثار لزجت و لایه مرزی سیال برای نقطه طراحی ، محاسبه و رسم گردیده است . از طرف دیگر با استفاده از سوندهای مثلثی ، اندازه گیری تقسیم سرعت عمودی در طول پهنای چرخ برای هر پنج پمپ و در نقطه طراحی به‌عمل آمده است . نتیجه این آزمایشها و مطالعات نشان می‌دهد که در نقطه طراحی می‌توان با استفاده از ضریب ناهماهنگی با تقریب بسیارخوب (در حدود پنج درصد)از روش یک بعدی حرکت سیال ،ارتفاع مانومتریک و فشارتولیدی یک چرخ سانتریفوژ رامحاسبه کرد .همچنین نحوه تقسیم سرعت عمودی در طول پهنای چرخ با فرضیاتی که بعضی از نویسندگان و طراحان پمپ کرده‌اندکاملا " متفاوت است .

در ادامه این کارلازم است ضریب ناهماهنگی برای دبیهای غیراز نقطه طراحی و همچنین پمپهائی باسرعتهای‌مخصوص متفاوت ، محاسبه شود .

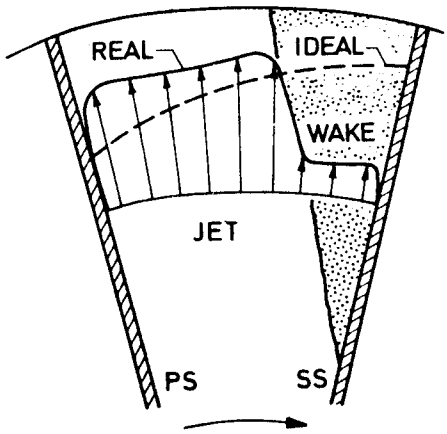
علائم اختصاری

A	: سطح	" مترمربع "
b	: پهنای چرخ	"متر"
c	: سرعت مطلق سیال	" متر بر ثانیه "
D	: قطر چرخ	" متر"
g	: شتاب ثقل	" متر بر مجذور ثانیه "
H	: ارتفاع مانومتریک پمپ	"متر"
CH یا K	: ضریب ناهماهنگی	" بدون بعد "
Q	: دبی پمپ	" متر مکعب در ثانیه "
R	: شعاع چرخ	" متر"
W	: سرعت نسبی سیال	" متر بر ثانیه "
U	: سرعت محیطی سیال	"متر بر ثانیه "
CM	: سرعت عمودی	" متر بر ثانیه "
CU	: سرعت مماسی	" متر بر ثانیه "
α	: زاویه مطلق سیال	" درجه "
β	: زاویه نسبی سیال	" درجه "
1	: ورود به چرخ	
2	: خروج از چرخ	
N_S	: سرعت مخصوص:	" دور در دقیقه "

دیباچه

طراحان توربوماشینهاهمواره سعی دارند به‌کمک‌روش یک بعدی‌و همچنین قواعد تشابه و تجربیات موجود ، ماشین‌را طراحی و سپس به کمک روشهای دو بعدی و یا سه بعدی آن را به‌اصطلاح آنالیز نمایند . یعنی‌بابه دست‌آوردن‌مقادیرفشار ، سرعت و زاویهٔ سیال در هرنقطه ماشین ، کیفیت کار طراحی‌را سنجیده و ارزیابی کنند و در صورت لزوم ، تغییرات لازم را بر روی طرح انجام دهند . برنامه های دو بعدی و سه بعدی موجود درتوربوماشینهای سانتریفوژ درشرایط حاضر نمی‌تواند آثار لایه مرزی و بخصوص شرایطی را که بعد از جدائی آن در ماشین اتفاق می‌افتد محاسبه کند . زیرا در این صورت ، وضعیت سیال در داخل ماشین بسیار پیچیده است و حل معادلات حاکم برچنین جریانی که در حقیقت همان معادلات ناویر استوک میباشد در شرایط حاضر ممکن نیست . در حدود سال ۱۹۶۰ میلادی برای اولین بار اندازه گیریهای انجام شده درکمپرسورهای شعاعی [۱] نشان داد که بخصوص دردبیهای کم ، پروفیل سرعت حاصل از نظریهٔ دو بعدی (بدون در نظر گرفتن آثار لایه مرزی) با آنچه آزمایش نشان می‌دهد به کلی متفاوت است و لایه مرزی از روی قسمت فشارکم پره جدا می‌شود . آزمایشهای بعدی نیز این موضوع را تائیدکرد [۲] و [۳] .به طوری که امروزه برای هرطراح کمپرسورشعاعی ، این موضوع به عنوان یک اصل پذیرفته شده است ونام این پدیده را JET AND WAKE گذاشته اند . لذا طراحی ماشین وآنالیزآن با توجه به این پدیده و شدت آن انجام می‌گیرد شکل (۱) .

آزمایشهای‌انجام‌شده درحدودسالهای ۱۹۷۰ میلادی به بعد [۴ و ۵ و ۶] نیزوجودپدیده JET AND WAKE ، را در پمپهای سانتریفوژ تائید کرد . لیکن تعریف پدیده و شدت آن به روشنی کمپرسور شعاعی امکان پذیر نیست (منظور از شدت پدیده سطحی است که WAKE نسبت به JET در بیرون چرخ اشغال می‌کند) . زیرا در کمپرسورهای شعاعی ، شکل و پروفیل پره همواره در جهت شعاع و زاویه خروجی پره برابر ۹۰ درجه است . در حالی که در موردپمپها طول ، شکل و همچنین زاویهٔ خروجی پره از پمپی به پمپ دیگر تغییر می‌کند . لذا سطحی که WAKE در بیرون چرخ اشغال کرده در شرایط مختلف متفاوت بوده و فاصله نقطه جدائی‌لایه مرزی‌نسبت‌به لبه ورودی چرخ‌از پمپی‌به پمپ‌دیگر



شکل (۱) ـ پدیده JET AND WAKE در کمپرسورشعاعی

و از طرحی به طرح دیگر فرق می‌کند . بدیهی است مکان هندسی‌این نقطه باتغییر دبی ماشین نیزثابت نخواهدماند .

لذادرمورد طراحی پمپهای‌سانتریفوژ روابط منتج‌از نظریهٔ یک یا دوبعدی را نمی‌توان به روش‌فوق تصحیح کرد . از این رو طراحان پمپهاضریبی به نام " ضریب ناهماهنگی " را تعریف نموده و می‌کوشند به کمک آن ، آثار جدائی لایه مرزی که باعث تغییر ارتفاع‌و فشار تولیدی ماشین در نقطه طراحی ودبیهای مختلف می‌شود را در نظر بگیرند .

تعریف ضریب ناهماهنگی

نحوه تغییرات سرعت سیال یا به اصطلاح پروفیل سرعت سیال در بیرون چرخ توربوماشین سانتریفوژ ، تاثیر زیادی بر فشار و ارتفاع تولیدی چرخ دارد .برای بررسی‌این موضوع فرض می‌شود حرکت سیال دو بعدی است . یعنی فقط تقسیم سرعت عمودی را در طول پهنای پره در بیرون چرخ مطابق شکل (۲) در نظر گرفته و فرض می‌کنیم زاویه نسبی سیال β_2 برای کلیه خطوط جریان یکسان باشد . یا به‌عبارت دیگر تاثیر پدیده لغزش و ضریب لغزش را در این بررسی نادیده می‌گیریم .

در این صورت ارتفاع تولیدی چرخ بنابرمعادله لنگر مقدار حرکت زاویه‌ای و باندیده‌گرفتن گشتاور زاویه‌ای ورودی سیال برابر است با :

$$H = \frac{1}{g} \cdot \frac{1}{Q} \int_{A_2} U_2 . C_2 . \cos \alpha_2 . dQ \qquad (۱)$$

با صرف نظر کردن از انسداد پره ها :

$$dQ = 2\pi R_2 CM_2 db$$

با استفاده از مثلث سرعتها :

$$C_2 \cos \alpha_2 = U_2 - CM_2 . Ctg\ \beta_2$$

از گذاردن مقادیر فوق در رابطه (۱) نتیجه می‌شود :

$$H = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} . \frac{\int_o^{b_2} CM_2^2 . Ctg\ \beta_2 . db}{\int_o^{b_2} CM_2 . db} \qquad (۲)$$

چون زاویه نسبی‌سیال برای همهٔ خطوط جریان یکسان فرض شده است ، می‌توان نوشت :

$$H = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} . ctg\beta_2 . \frac{\int_o^{b_2} CM_2^2 . db}{\int_o^{b_2} CM_2 . db} \qquad (۳)$$

با استفاده از نابرابری SCHWARZ اگر دو تابع f و g به طور خطی مستقل باشند خواهیم داشت :

$$(\int f.gdx)^2 \leqslant \int f^2 dx \int g^2 dx \qquad (۴)$$

اگر فرض شود $f = CM_2$ و $g = 1$ ، داریم :

$$(\int_o^{b_2} CM_2 db)^2 \leqslant \int_o^{b_2} CM_2^2 . db . b_2 \qquad (۵)$$

با در نظر گرفتن ضریب K نابرابری بالا را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$\frac{\int_o^{b_2} CM_2^2 . db}{\int_o^{b_2} CM_2 . db} = K \frac{\int_o^{b_2} CM_2 . db}{b_2} \qquad (۶)$$

ضریب K همواره بزرگتر از یک است . تنها هنگامی این ضریب برابر یک می‌شودکه تغییرات سرعت CM_2 در طول پهنای چرخ ثابت باشد .یعنی از نظریه یک بعدی برای محاسبه ارتفاع تولیدی استفاده شود .

از گذاردن رابطه (۶) در رابطه (۲) خواهیم داشت :

$$H = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} . Ctg\ \beta_2 \overline{CM}_2 . K \qquad (۷)$$

که درآن

$$\overline{CM}_2 = \frac{\int_o^{b_2} CM_2 . db}{b_2}$$

به فرض نظریه یک بعدی حرکت سیال در چرخ (یعنی یکسان بودن سرعت CM_2 در بیرون چرخ برای همه خطوط جریان) ارتفاع تولیدی چرخ برابر است با :

$$H = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2}{g} . Ctg\ \beta_2 . \overline{CM}_2 \qquad (۸)$$

از مقایسه دو رابطه (۷) و (۸) و با توجه به اینکه $K > 1$ ، می‌توان نتیجه گرفت که عدم‌تقسیم یکنواخت سرعت سیال‌درخارج از چرخ باعث کاهش‌ارتفاع‌تولیدی‌پمپ‌می‌شود . یا به‌عبارت دیگر روابط منتج از نظریهٔ یک بعدی ، تقریب دارند و لازم است تصحیح شوند .

ضریب " K " را " ضریب ناهماهنگی " می‌نامند .

بعضی ازنویسندگان تعریف دیگری برای این ضریب به کار می‌برند :

$$CH = \frac{H_n}{H_u}$$

که H_n و H_u به ترتیب ارتفاع تولیدی پمپ به فرض نایکنواخت‌بودن سرعت‌دربیرون چرخ (به فرض‌حرکت‌واقعی) و یکنواخت بودن جریان (به فرض حرکت یک بعدی)است . یادآوری می‌شودکه "ضریب ناهماهنگی"ارتباطی به بازدهی هیدرولیکی پمپ و یاضریب لغزش‌ندارد .بلکه‌درحقیقت‌فرض غلطی درمحاسبه ارتفاع‌تولیدی پمپ (فرض یک بعدی‌بودن حرکت سیال) به کار رفته است که باید تصحیح شود .

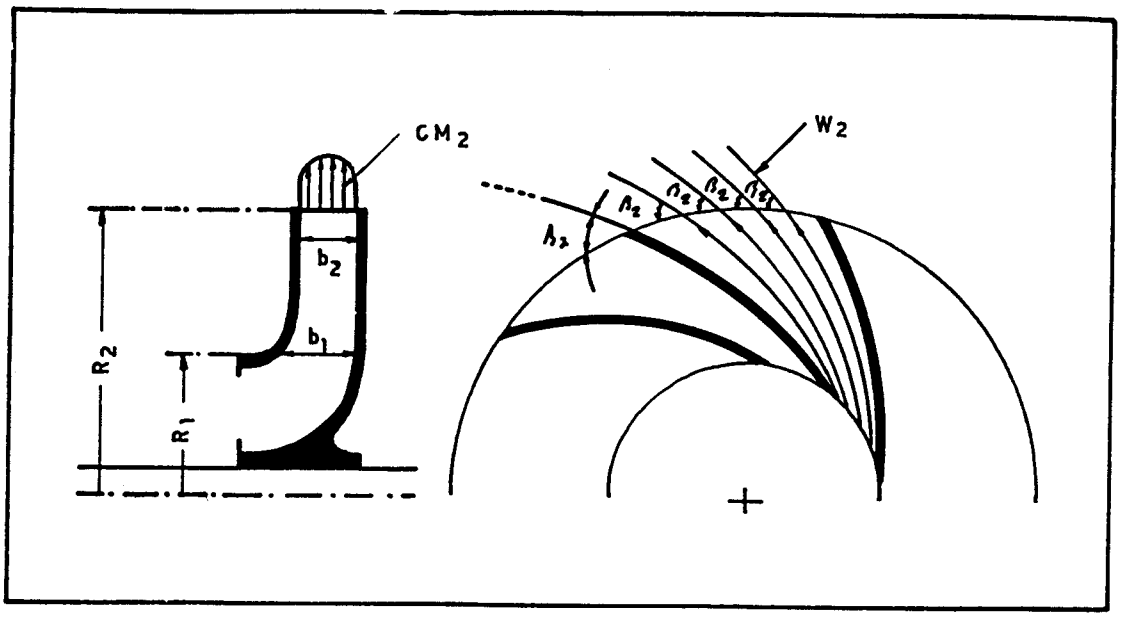
محاسبه ضریب ناهماهنگی

از نظر طراحان روشن شدن درصد خطای استفاده از روش یک بعدی مهم است . یعنی باید دید در صورتی که در رابطه اصلی اولر :

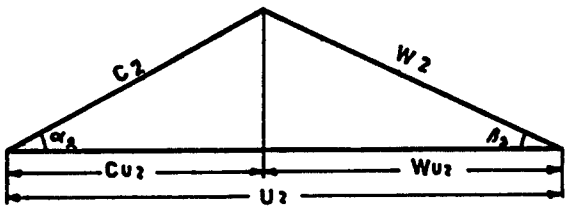
$$H_n = \frac{1}{g} . \frac{1}{Q} . \int_{A_2} U_2 . C_2 . \cos \alpha_2 . dQ$$

مقادیر زیر انتگرال را بیرون آورده و رابطه را به صورت ساده زیر به‌نویسیم .

$$H_u = \frac{U_2 . C_2 . \cos \alpha_2}{g}$$



شکل (۲) ــ نحوه تغییرات سرعت سیال در بیرون چرخ یک پمپ سانتریفوژ



شکل (۳) ــ مثلث سرعتها در بیرون چرخ پمپ سانتریفوژ.

چه اندازه در محاسبات دچار خطا می‌شویم.

برای پیداکردن این خطا باید تقسیم سرعت‌عمودی در بیرون چرخ را بدانیم. واضح است که این تقسیم سرعت، خود با تغییر دبی ماشین تغییر خواهد کرد. دراین مرحله تنها به دبی خاص طراحی ماشین اکتفا می‌شود.

بسیاری ازکارشناسان نحوه تغییرات سرعت‌عمودی‌را در طول پهنای پره به صورت توابع مشخصی مانند سهمی یا سینوسی فرض می‌کنند وبا معلوم بودن تابع $CM_2=f(b_2)$ ضریب CH را به دست می‌آورند.

آقای F.WISLICENUS [۷] با فرض اینکه تابع $CM_2= f(b_2)$ سینوسی باشد مقدار CH را محاسبه و رابطه زیر را پیشنهاد کرده است:

$$CH = 1- \left(\frac{\pi^2}{8} - 1\right)\left(\frac{U_2}{CU_2} - 1\right)$$

در مورد چرخهای سانتریفوژ با پره رو به عقب (BACKWARD-BLADE) مقدار $\frac{U_2}{CU_2} \approx 2$ می‌باشد دراین صورت $CH = ۰/۷۷$ است. لیکن نامبرده اقرار می‌کند که چنین عددی بسیارکوچک است و تقسیم سرعت عمودی باید یکنواخت تر از یک منحنی سینوسی باشد و استفاده از روش یک بعدی درمحاسبه ارتفاع‌تولیدی چرخ‌سانتریفوژ نمی‌توانند ۲۳٪ خطا داشته باشد.

نویسنده بـه‌کمـک یک برنامه کامپیوتری [۸] که با استفاده از روش دو بعدی در یک چرخ سانتریفوژوفرض حرکت پتانسیل، بدون در نظر گرفتن لایه مرزی و آثار آن تنظیم شده تقسیم سرعت عمودی در طول پره یعنی تابع $CM_2= f(b_2)$ را برای پنج چرخ پمپ با سرعتهای مخصوص حداقل ۴۵ $N_s=$ و حداکثر ۵۰ $N_s=$ محاسبه کرده است. نتیجه این محاسبات به صورت منحنیهای مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. سرعت مخصوص حـــدود

N_S = ۵۰ بدین علت انتخاب شده که ماشین نه حالت بسیار سانتریفوژ و نه مختلط MIXED را داشته باشد .

همان طوری که در این شکلها دیده می‌شود تغییرات سرعت عمودی در طول پهنای بیرون چرخ تقریبا "به صورت خطی است که می‌نیمم آن درپای چرخ نقطه P و ماکزیمم آن در سر چرخ نقطه T است .

واضح است که این تقسیم سرعت را نمی‌توان باآنچه آقای WISLICENUS یا دیگران بادرنظر گرفتن لایه مرزی و آثار آن پیشنهاد کرده‌اند مقایسه کرد . لیکن منظور از این محاسبه این است که بتوان میان تقسیم سرعت عمودی با استفاده از روش یک بعدی و یا دو بعدی مقایسه ای انجام داد .

روش اندازه گیری

درحال حاضر تنها راه واقعی محاسبه ضریب ناهماهنگی ، استفاده از روشهای آزمایشگاهی است . سوندهای نوع مثلثی که قادرند فشار کامل P_T و فشار استاتیک P_S و جهت جریان سیال را اندازه بگیرند ، برای این آزمایش در نظر گرفته شده‌اند . با حرکت این سوندها در طول پهنای پره و بیرون از چرخ مطابق شکل (۵) مقدار سرعت واقعی سیال را از رابطه $P_{dy}=P_T-P_s=C_2^2/2g$ وجهت α_2 آن را اندازه‌می‌گیریم . این اندازه‌گیری درشش نقطه انجام شده است . با معلوم بودن مقدار و جهت سرعت C سرعت CM_2 از مثلث سرعتها به دست می‌آید .

نتیجه این آزمایش برای پنج پمپ برگزیده نیز در شکل (۴) آمده است .

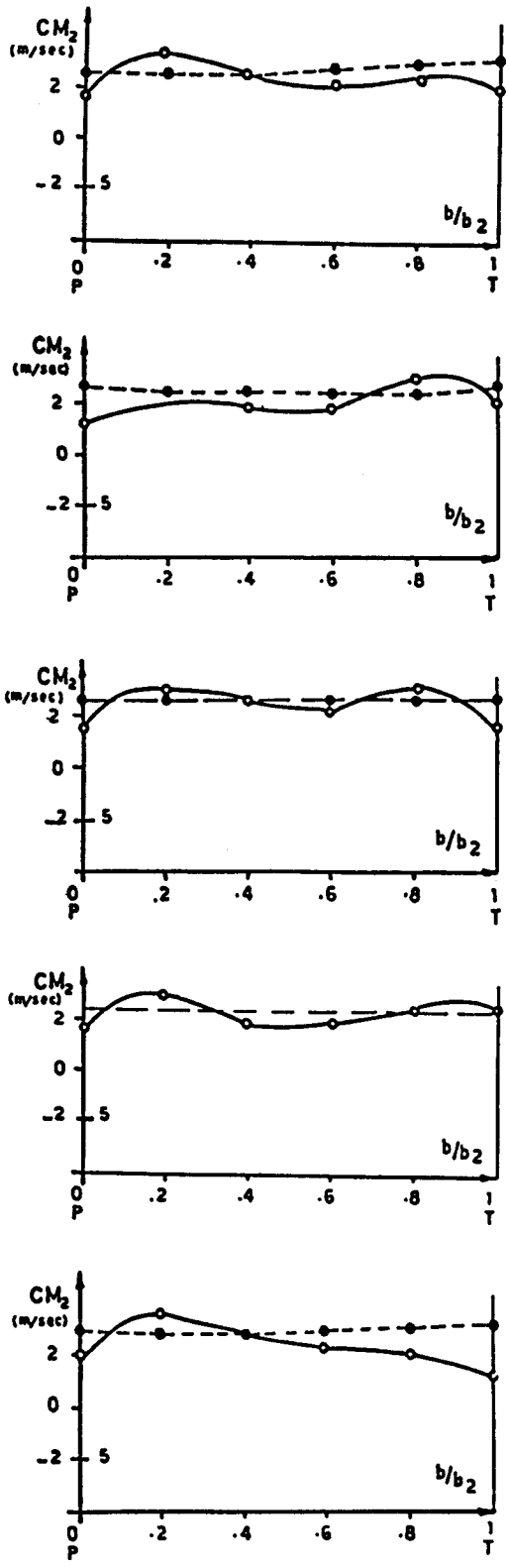
با داشتن تابع $CM_2= f(b_2)$، ضریب ناهماهنگی برای هرپنج پمپ محاسبه‌شده که حداقل آن CH=۰/۹۲۵ وحداکثر آن CH= ۰/۹۸۸ است . میانگین این مقدار تقریبا " برابر خواهد بود با : CH = ۰/۹۵ .

نتیجه گیری

از این بررسیها نتایج زیر به دست می‌آید :

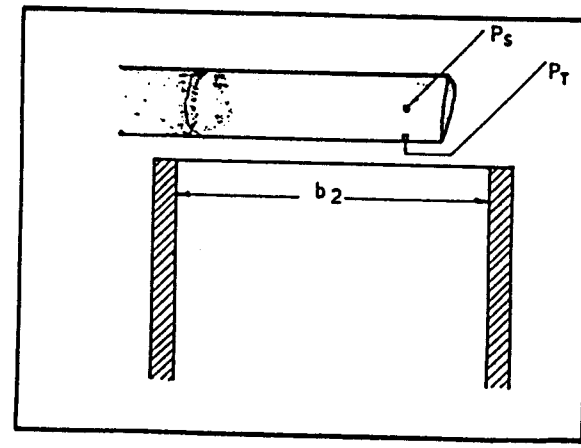
۱ــ فرض سهمی یا سینوسی بودن منحنی $CM_2=f(b_2)$ از طریق نظریه دو بعدی با فرض حرکت پتانسیل یا از طریق آزمایش تائید نمیشود . (یا لااقل برای پمپهای با سرعت مخصوص N_S = ۵۰ قابل قبول نیست) .

۲ــ با فرض نظریهٔ یک بعدی حرکت سیال درصد خطای محاسبه ارتفاع مانومتریک پمپ درحدود چند درصد است .



محاسبه از طریق روش دوبعدی
اندازه گیری با سوندهای مثلثی

شکل (۴) ــ نحوه تقسیم سرعت عمودی در پهنای خروجی چرخها



شکل (۵) ــ روش اندازه گیری سرعت سیال در بیرون چـــرخ سانتریفـــوژ

این نتیجه گیری ازنظر ساده کردن محاسبات ،اهمیت زیادی دارد .

یادآوری می‌شود که این نتایج فقط در نقطه‌طراحی ماشین پذیرفتنی است . ضریب ناهماهنگی CH = ۰/۷۷ ، بسیاراغراق آمیزاست و یا دست کم می‌توان گفت برای‌پمپهای با سرعت مخصوص حدود N_S = ۵۰، قابل قبول نیست .

دنباله بررسی

به دنبال این کار ،دو برنامهٔ پژوهشی زیر رامی‌توان انجام داد .

۱ــ به دست آوردن ضریب CH برای سرعتهـــــای مخصوص متفاوت و در صورت امکان رسم منحنی $CM_2=f(N_S)$

۲ــ به دست آوردن ضریبCH برای دبیهایی غیراز دبی طراحی ماشین .

هم اکنون مشخص است که در بیرون نقطه طراحـــی ، ضریب CH ممکن است تا ۵۰% کاهش یابد منتهی اطلاعات موجود در این زمینه بسیار اندک میباشد .

فهرست منابع

1- Dean, R.C.Jr., and Senoo,Y., "Rotating Wakes in Vaneless Diffusers, "Trans. ASME Journal of Basic Engineering, Sept. 1960, pp. 563-570.

2- Senoo, Y., et al.,"A Photografic Study of the Three-Dimensional Flow in a Radial Compressor, "Trans. ASME Journal of Engineering for Power,July 1965, pp. 237-244.

3- Eckardt, D., et al., "Three Dimensional Studies in a High-Speed Centrifugal Compressor," Worthington European Technical Award, Vol. IV, Hoepli,Italy, 1976.

4- Fowler, H.S., "The Distribution and Stability of Flow in a Rotating Channel, "Trans. ASME Journal of Engineering for Power, 1968.

5- Mizuki, S., et al., "A Study of the Flow Mechanism within Centrifugal Impeller Channels, "ASME Paper No. 75-GT-14.

6- Jaumotte, A., "Description et Construction des Machines Turbomachines. 2 eme Partie. Turbo Pompes Centrifuges," Presses Universitaires de Bruxelles, 1984 - 1985.

7- Wislicenus, G.F., "Fluid Mechanics of Turbomachinery," Vol. I, 1965.

8- Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-St-Genese, Belgium.