

## بررسی تجربی یک ایندیوسر صفحه صاف

دکتر سید احمد نوربخش

عضو هیئت علمی دانشکده فنی دانشگاه تهران

مهندس وحید مهجوری

دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

### چکیده

کاویتاسیون بعنوان یکی از عوامل محدودکننده دور و ارتفاع مکش توربوپمپها، میتواند باعث افت فشار، خوردگی مکانیکی و ناپایداری در سیستم اینگونه از ماشینها شود.

ایندیوسر که خود یک نوع توربو ماشین است در جلوی چرخ اصلی پمپ مورد استفاده قرار گرفته و یکی از راههای عملی جهت کاهش و یا رفع این اثرات می باشد. این ماشین بخصوص در سیستمهای تغذیه سوخت موتور هواپیماها و نیز راکتهای سوخت مایع به جهت لزوم بالا بردن دور و افزایش نسبت قدرت به وزن، بکار رفته است. بررسی پارامترهای ایندیوسر در جهت بهبود مشخصه های آن، چه از لحاظ کاویتاسیون (کاهش ارتفاع مکش مورد نیاز) و چه هیدرولیکی (بهبود بازده) منجر به انجام تحقیقات در جهت شناخت میدان جریان سیال در این نوع ماشین شده است.

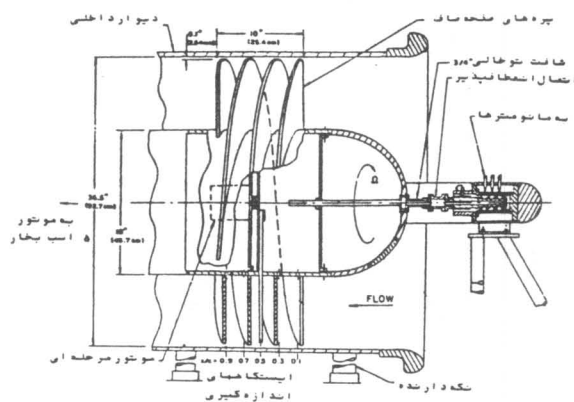
جهت بررسی بهتر این پارامترها بر خلاف اغلب محققان که از سیال هوا استفاده کرده اند، سیال آب انتخاب شد تا اثرات لزجت بهتر بتواند مورد بررسی قرار گیرند. با کمک مدار آزمایشی که توسط نگارنده طراحی و ساخته شد، نتایج تجربی بدست آمد. این نتایج شامل منحنیهای مشخصه Q-H و نیز توزیع فشار متوسط استاتیک روی دیواره داخلی ایندیوسر بود که اثر آبدهی را بطور مستقیم بر ارتفاع و بطور ضمنی بر مشخصه کاویتاسیون این توربو ماشین نشان می دهند.

توضیح و تفسیر نتایج این دو منحنی با توجه به آزمایشات و نتایج تئوری محققان پیشین انجام پذیرفت و با استفاده از پارامترهای بی بعد معمول، اثر تعداد پره بر مشخصه کاویتاسیون این ایندیوسر بدست آمده است. در این میان به اثر نشستی لبه ای نیز پرداخته شد.

### مقدمه

استفاده از پمپهای با سرعت مخصوص مکش بالا در صنایع مختلفی همچون هوا فضا، نیروگاهها و نیز در کاربردهای خاصی همچون آتش نشانی، بشدت مورد توجه است. [6]

بخش اعظم تحقیقات را در این زمینه دانشگاه پنسیلوانیا طی سالهای ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۸ با همکاری سازمان هوا فضای ملی آمریکا (ناسا) انجام داد. این تحقیقات زیر نظر لاکشمیناریانا<sup>(۴)</sup> در سالهای بعد و با کمک محققان دیگر دنبال شد و به توسعه و اصلاح روشهای تحلیلی و تجربی بررسی روی توربو ماشینها منجر گشت. [4]، [5]، [6]

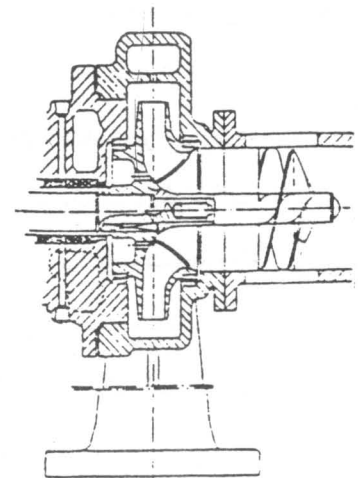


شکل ۲- ایندیوسر مورد آزمایش در دانشگاه پنسیلوانیا [5]

### بررسی شکل جریان و آزمایشهای مربوطه:

شکل جریان در این ماشین متأثر از پارامترهای مختلفی می باشد از جمله زاویه پره ها، صلیبیت (نسبت طول به فاصله عرضی پره ها)، تعداد و ضخامت پره ها و ... که پارامترهای هندسی ایندیوسر هستند و همچنین دور، میزان آبدهی، اختلاف فشار، شکل ورودی و ... که پارامترهای جریانی اند. زاویه خروجی پره ها و دور مستقیماً روی ارتفاع ایندیوسر اثر می گذارند و ارتفاع با توجه به افت هیدرولیکی و شکل گذرگاههای ورود و خروج جریان بر آبدهی مؤثر است. افت هیدرولیکی به میزان اغتشاش و اصطکاک دیواره ایندیوسر بستگی دارد که بخصوص از افزایش طول و تعداد

کوچک نمودن پمپهایی با آبدهی و ارتفاع زیاد، بدون بوجود آوردن شرایط کاویتاسیون، از اهداف مهم طراحان توربو ماشینها در دهه های اخیر بوده که منجر به ارائه طرحهای مختلفی از سوی ایشان شده است. [3] یکی از مؤثرترین روشها، نصب یک پمپ کمکی است که با داشتن فشار مکش خالص مثبت<sup>(۱)</sup> کمتر، فشار کافی را برای ورود به پمپ اصلی فراهم آورد. ایندیوسر که خود یک نوع پمپ کمکی است، در شکلهای مختلف و عموماً هم دور با چرخ اصلی پمپ، مطابق شکل ۱ در جلوی آن نصب می گردد.



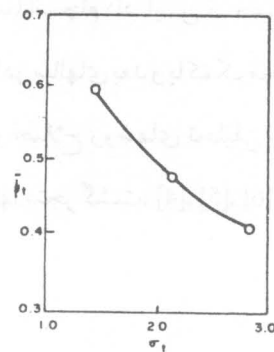
شکل ۱: محل نصب ایندیوسر روی پمپهای گریز از مرکز [1]

اولین بررسی تحلیلی روی جریان سیال داخل ایندیوسر در سال ۱۹۵۶ توسط رز<sup>(۲)</sup> و بنزین<sup>(۳)</sup> انجام شد. بعداً تحقیقات بصورت تحلیلی و تجربی در دو زمینه کاویتاسیون و ناپایداری بصورت تخصصی از دینامیک سیالات ایندیوسر جدا گردید. منتها بحث بر روی شکل جریان، جهت درک بهتر پدیده هایی که در این توربو ماشین اتفاق می افتد با صرف زمان و هزینه های زیاد توسط محققان و سازمانهای مربوط ادامه پیدا کرد.

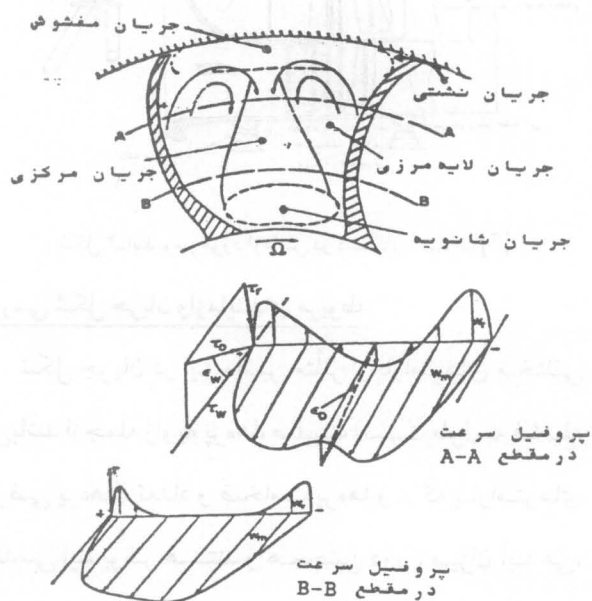
تشکیل گردابه‌ای بزرگ در وسط سطح مقطع کانال عبور جریان میکند که جریان اصلی و غالب در مقطع کانال ایندیوسر است. بدلیل آنکه نیروی برشی روی دیواره به لزجت سیال وابسته است نقش لزجت در شکل جریان به نحو چشمگیری مشهود است. (شکل ۴) دلیل والی<sup>(۵)</sup> نشان داد که عدم یکنواختی جریان در ورود و خروج ایندیوسر (بخصوص ورود) می‌تواند تا ۵ درصد خطا در محاسبه ارتفاع ایندیوسر بوجود آورند. [1]

کارهای تجربی انجام شده در این زمینه اکثراً با هوا بوده است که سیالی غیر لزج محسوب می‌شود. جهت برآورد هر چه بهتر اثر لزجت که عملاً موجب کاهش بازده هیدرودینامیکی ایندیوسر می‌شود، نویسنده بر آن شد تا آزمایشاتی را با یک سیال لزج (آب) انجام دهد و مدل آزمایشی را هر چه بیشتر به شرایط واقعی نزدیک کند. بدین خاطر یک ایندیوسر صفحه صاف با مشخصات  $r_1 = 33\text{mm}$  و  $r_H = 10\text{mm}$  و  $\beta = 120^\circ$  انتخاب گردید. پیش‌بینی ساخت این مدار برای آزمایشهای زیادی صورت گرفت از جمله تعیین مشخصه ارتفاع این توربوماشین، بازده و مشخصه کاویتاسیون آن، رسم منحنی فشار در طول ایندیوسر (که می‌تواند نحوه اثر لبه ورودی را بر حداقل فشار ایجاد شده در ورود ایندیوسر نشان دهد) و اندازه‌گیری فرکانس ایجاد حبابهای بخار سیال در رژیم کاویتاسیون سیال را می‌توان ذکر کرد.

پره و نیز صلیب ناشی می‌شود. به عنوان نمونه اثر صلیب را بر ضریب ارتفاع متوسط در شکل ۳ مشاهده می‌کنید.



شکل ۳- اثر صلیب بر ضریب ارتفاع [4]



شکل ۴- پروفیل سرعتها در میدان جریان [5]

شکل جریان متأثر از نیروهای دینامیکی، نیروهای اصطکاکی و نیروی برشی دیواره است. نشی لبه‌ای ایجاد گردابه‌های موضعی در لبه انتهایی پره‌ها نموده و نیروهای اصطکاکی در پایه پره‌ها، ایجاد جریانهای برگشتی طولی می‌کند. این نیروها به‌مراه نیروی برشی دیواره موجب

ایجاد خطا نماید. مقایسه این منحنی با نتایج تحلیلی دومی<sup>(۶)</sup> در شکل ۷ انجام گرفته است.

دومو ارتفاع مانومتریک ایندیوسر را به شکل رابطه زیر

محاسبه نموده است:

$$H_{th} = \left(\frac{\omega^2}{g}\right) \left[ \left(\frac{\omega h}{2\pi C_{m2}}\right) - 1 \right] \left[ \phi_1 + \left(1 - \left(\frac{2\pi C_{m2}}{\omega h}\right)\right) \phi_2 \right]$$

که در آن  $\phi_1$  و  $\phi_2$  توابعی از  $r_1$  و  $r_h$  می باشند.

وی سپس با ۵ درصد خطا، آن را به رابطه ای کاربردی و

ساده تر تقریب زده است:

$$H_{th} = 0.45 \left(\frac{\omega^2 R_2^2}{g}\right) \left[ 1 - \left(\frac{2\pi C_{m2}}{\omega h}\right) \right]$$

که در آن  $\omega$  سرعت زاویه ای،  $h$  گام پره و  $C_{m2}$  سرعت قائم

خروجی از ایندیوسر است. منحنی بدست آمده از این رابطه با

اعداد حاصله از آزمایش در شکل ۷ مقایسه شده است. منحنی

ارتفاع با توجه به وجود خطای ناشی از اغتشاش زیاد (و عدم

یکنواختی جریان) در ورود و خروج از محوطه آزمایش،

توافق خوبی در محدوده کارکردی و بطور تقریبی در ۴۰

درصد حداکثر دبی) دارد. منتها در دبیهای بیشتر، این توافق

کمتر شده که اغتشاش ناشی از نشتی لبه ای (نشتی داخلی در

قسمت لبه پرها) می تواند عامل آن باشد. بسط محدوده عمل

این اغتشاشات به میدان اصلی جریان، افت فشار شدیدی

بوجود آورده و خطا را تا حد ۵۰ درصد رسانده است. این

آزمایش با کاهش نشتی لبه ای (از ۳ به ۲/۵ میلیمتر) نیز انجام

شد و حدود ۱۰ درصد کاهش خطا بدنبال داشت.

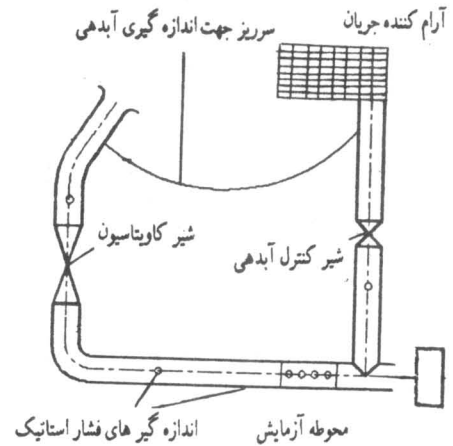
در آزمایش بعدی سعی شد تا با استفاده از سیال بالزجت

زیاد (آب) اثر لزجت بر نتایج آزمایشاتی که قبلاً بصورت

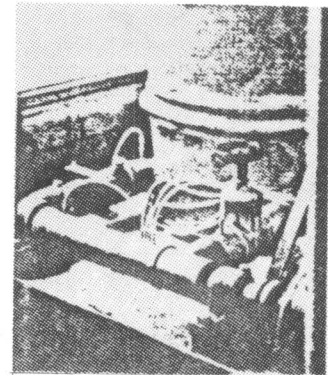
مشابه با سیالات کم لزجت (هوا) انجام شده بود معلوم شود.

این بدین خاطر بود که لزجت از جنبه عمومی، پارامتر مؤثری

در تشدید پدیده کاویتاسیون محسوب می شود. [7]



شکل ۵- شمای مدار آزمایش



شکل ۶- نمای کلی دستگاه

در این مطالعه که جهت رسم منحنیهای مشخصه ارتفاع و

فشار در طول ایندیوسر بود، از دور ۱۴۵۰ RPM استفاده شد و

باتغییر آبدی، فشار در ایستگاههای مختلف اندازه گیری

گردید.

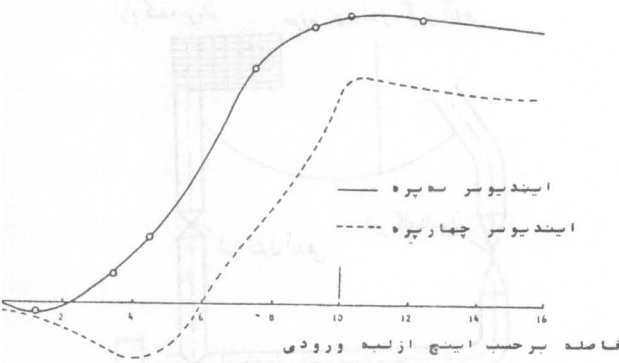
منحنی مشخصه H-Q توسط ۲ مانومتر که یکی قبل از

ایندیوسر و دیگری بعد از آن نصب شده و با تغییر دادن دبی

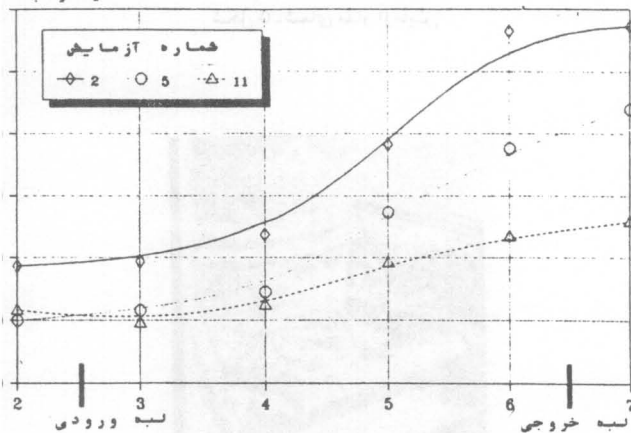
توسط شیر کنترل آبدی انجام گرفته است. این در حالی است

که بنا بر مرجع ۱ اغتشاش ورودی و خروجی می تواند تا ۵

درصد در مقادیر خوانده شده از دستگاههای اندازه گیری



شکل ۸- توزیع فشار استاتیک روی دیواره داخلی ایندیوسرهای ۳ و ۴ پره [4] ساخته‌شده در ۲ سانتیمتر آب



شکل ۹- توزیع فشار استاتیک روی دیواره داخلی ایندیوسر ۲ پره مورد آزمایش

**نتایج**

۱- کاهش تعداد پره، باعث کاهش خطر کاویتاسیون می‌گردد.  
 ۲- افزایش لزجت به تنهایی نمی‌تواند تعیین‌کننده مشخصه کاویتاسیون ایندیوسر باشد بلکه همانند جریانهای خارجی، عدد رینولدز که اثر چگالی و سرعت رانیز در بر دارد تعیین‌کننده می‌باشد.

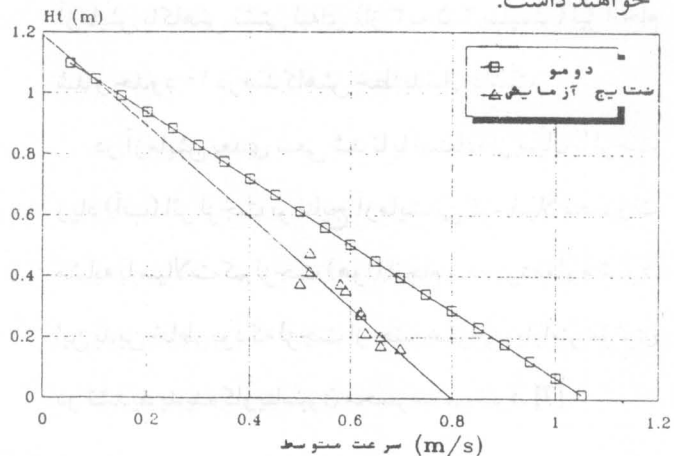
۳- استفاده از رینگ خارجی در ایندیوسر می‌تواند عامل مؤثری در کاهش تلفات ناشی بکار آید.

**نمادگذاری**

- $\phi$ : ضریب آدهی  $(\frac{C_m}{\rho \omega})$
- $\omega$ : سرعت دوران  $[\frac{rad}{s}]$
- $\sigma$ : ضریب صلیبیت  $(\frac{C}{h})$

منحنیهای فشار استاتیک ایندیوسرهای ۳ و ۴ گزارش شده در مرجع ۴ که سیال هوا را به کار برده‌اند، جهت اظهار نظر در شکل تغییرات فشار بخصوص در پشت لبه ورودی پره ایندیوسر (که اساساً معرف  $NPSH_p$  ایندیوسر است) انتخاب گردیدند. برای تهیه منحنی فشار استاتیک در طول ایندیوسر در این آزمایش، از ۴ مانومتر در فاصله بین لبه ورودی و خروجی و نیز مانومترهای ابتدا و انتهای مدار، سود برده شده است. نتایج آزمایش در ضریب جریان  $\phi = 0.04$  بصورت گراف در شکل ۹ ثبت گردیده است.

در این آزمایش جریان گذرنده از ایندیوسر ۲ پره‌ای در محیط سیال بالزجت زیاد، همان رفتار گزارش شده ایندیوسر ۳ و ۴ پره را در محیط سیال کم لزجت ارائه داده است. (شکل کیفیت این منحنی شباهت بیشتری به منحنی ایندیوسر ۳ پره نسبت به ۴ پره دارد) با تغییر سیال عامل از هوا به آب، افزایش چگالی به عنوان عامل مثبتی در کاویتاسیون توانسته است اثر منفی لزجت را در شکل رفتار این توربوماشین از بین ببرد و از طرفی با توجه به شکلها می‌توان استدلال کرد که چون با کاهش تعداد پره، نقطه حداقل فشار (محل تشکیل حبابها) جلو می‌افتد، پس خطر صدمه کاویتاسیون کاهش می‌یابد زیرا حبابها فرصت بیشتری در داخل ایندیوسر برای ترکیدن خواهند داشت.



شکل ۷- منحنی مشخصه Q-H بر حسب سرعت جریان

فهرست منابع

- 1- Deal Valle, J. The Effects of Inlet Flow Modification on Cavitating Inducer Performance. Journal of Turbomachinery. Apr 1992. PP: 360 - 365
- 2- Dumov, V.I. Calculation of Pressure Head Characteristics of Axial Helical Impellers. Taploenergetika. Vol II. 1962. PP: 23-27.
- 3- Grohmann. M. Extend Pump Application with Inducers. Hydrocarbon Processing. Dec 1979
- 4- Lakshminarayana. B.& Poncet, A. Investigation 3 Dimensional Flow Characteristics in a 3 Bladed Rocket Pump Inducer NASA CR-2290 . Sep 1973.
- 5- Lakshmiarayana, B. Analytical and Experimental Study of Flow Phenomena in Noncavitating Rocket Pump Inducer. NASA CR- 3471. Oct 1981. P: 96.
- 6- Lakshminarayana. B. Fluid Dynamics of Inducers - A Review . Journal of Fluids Engineering. Dec 1982. PP: 411-427
- 7- Thiruvengadam , A.A. United Theory of Cavitation Damage. Journal of Basic Engineering . Sep 1963. PP: 365-376

$\psi$  : ضریب ارتفاع مانومتریک  $[\frac{2gH}{r^2\omega^2}]$

C : سرعت مطلق  $[\frac{m}{s}]$ ; طول و ترپره [m]

H : ارتفاع مانومتریک [m]

NPSH : ارتفاع مانومتریک مثبت مکش [m]

Q : آبدهی  $[\frac{m^3}{s}]$

W : سرعت نسبی

h : گام پره‌های ایندیوسر [m]

r : شعاع [m]

زیرنویسها:

h : پایه پره

m : نصف‌النهاری ; متوسط

r: شعاعی ; مورد نیاز

s: استاتیک

t: نوک پره ; مجموع

th: تئوری

1: ورودی

2: خروجی