

# آزمایش واحد پمپ و توربین جریان محوری<sup>۱</sup>

تهیه و تنظیم: محمد حسین افشاری پور

## هدف آزمایش

مشاهده عملکرد پمپ و توربین به وسیله اعمال جریان بر تیغه های ثابت (استاتور) و متحرک (روتور)

## مقدمه [1]

توربوماشین ها<sup>۲</sup>، دستگاه هایی هستند که در آن ها انتقال انرژی بین محیط پیوسته ای از یک سیال و یک یا چند ردیف از تیغه های متحرک صورت می گیرد. لغت «توربو»<sup>۳</sup> ریشه لاتین داشته و به معنی جسمی است که دور خودش می چرخد. هنگامی که تیغه های چرخان در دستگاه توربوماشین سیال را از بین خود عبور می دهند، باعث تغییر آنتالپی آن شده و بر روی سیال کار (مثبت یا منفی) انجام می دهند. این تغییرات آنتالپی، به صورت تغییر در فشار در سیال قابل مشاهده و اندازه گیری است. دو نوع عمده از توربوماشین ها وجود دارند: نوع اول، دستگاه هایی هستند که نیرو را جذب کرده و فشار سیال را افزایش می دهند (کمپرسورها و پمپ ها) و نوع دوم، آن هایی که با کاهش فشار سیال نیرو تولید می کنند (توربین ها).

## تئوری آزمایش [2]

مشخصه بارز یک واحد جریان، پیوستگی محیط سیال جاری در آن است. در واحدهای جریانی، انتقال انرژی از سیال به واحد و برعکس از طریق نیروهای جریانی رخ می دهد؛ که در این آزمایش تأثیر این نیروها را بر تیغه های متحرک بررسی خواهیم کرد. به این منظور تیغه ها به چرخ های متحرکی (روتورها)<sup>۴</sup> متصل شده اند و از برخورد جریان سیال با آن ها گشتاوری مکانیکی پدید می آید. در این فرآیند، سیال می تواند انرژی هیدرولیکی را در سیستم آزاد و یا آن را از سیستم دریافت نماید. در حالت اول، عملکرد «توربین» و در حالت دوم، عمل کرد «پمپ» را بررسی خواهیم کرد.

سیال مورد بررسی در سیستم می تواند مایع یا گاز باشد. برخلاف مایعات، از تراکم پذیری گازها نمی توان صرف نظر کرد و در هر واحد تغییر فشار، لازم است تا تراکم پذیری را مدنظر قرار داد. دستگاه حاضر در آزمایشگاه با توانایی معکوس کردن جهت جریان، قابلیت آزمایش به عنوان هر دو دستگاه پمپ و توربین را داشته و هر واحد جریانی می تواند به عنوان یک پمپ/کمپرسور یا توربین استفاده شود. برای این کار، تنها لازم است تا جهت جریان و نیز جهت چرخش روتور معکوس گردد (شکل ۱).

واحدهای جریانی همچنین می توانند محوری<sup>۵</sup> یا شعاعی<sup>۶</sup> باشند. در واحد جریان شعاعی، سیال به صورت شعاعی از قسمت روتور عبور می کند اما در واحد جریان محوری جهت حرکت جریان در جهت محور مرکزی روتور است.

<sup>1</sup> Axial Flow Pump/Turbine Unit

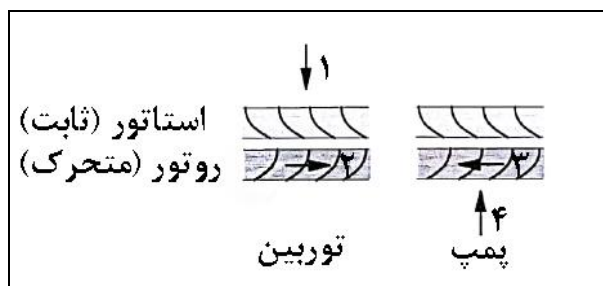
<sup>2</sup> Turbomachines

<sup>3</sup> Turbo or Turbinis

<sup>4</sup> Rotor

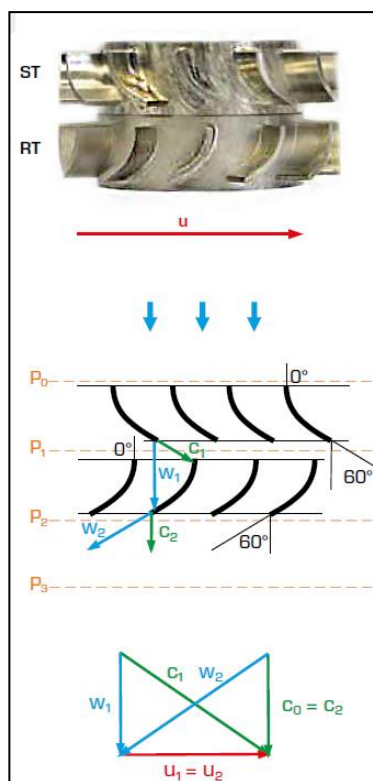
<sup>5</sup> Axial

<sup>6</sup> Radial



شکل ۱: در این شکل می‌توانید چینش شماتیک روتور و استاتور را مشاهده کنید. استاتور، گروهی از تیغه‌های ثابت و روتور، گروهی از تیغه‌های متحرک است. نشان‌گرهای ۱ و ۴ جهت حرکت جریان سیال را نشان می‌دهند و نشان‌گرهای ۲ و ۳، جهت چرخش روتور را مشخص می‌کنند. برای تبدیل سیستم از پمپ به توربین لازم است تا جهت چرخش تیغه‌ها و نیز جهت جریان سیال معکوس گردد. [2]

استاتور<sup>۷</sup> نیز در سیستم نقش مهمی دارد. این قطعه جریان سیال را به گونه‌ای هدایت می‌کند که تبدیل انرژی در روتور بهینه گردد. در این فرآیند، انرژی فشار سیال می‌تواند به انرژی جریانی تبدیل شود (توربین) و بالعکس (پمپ).



می‌خواهیم محاسبات توربین را برای حالت شکل ۲ انجام دهیم. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌کنید، در استاتور (قطعه بالایی) زاویه ورودی جریان صفر و زاویه خروج آن ۶۰ درجه است. در روتور (قطعه پایینی) نیز زاویه ورود جریان صفر و زاویه خروج ۶۰ درجه و تعداد تیغه‌های روتور و استاتور ۱۲ عدد است. قطر خارجی روتور و استاتور ( $D_o$ ) برابر ۹۰ میلی‌متر، قطر داخلی آن‌ها ( $D_i$ ) برابر ۶۶ میلی‌متر و پارامتر قطر میانه روتور ( $D_m$ ) برابر ۷۸ میلی‌متر است.

اگر بخواهیم عملکرد سیستم را برای ظرفیت جریانی ۸۵۰ لیتر بر دقیقه محاسبه نماییم، داریم:

$$\dot{V} = 850 \frac{l}{min} = 0.0142 \frac{m^3}{s} \quad \text{معادله (۱)}$$

با توجه به دانسیته آب (۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) داریم:

$$\dot{V} * \rho = \dot{m} = 14.2 \frac{kg}{s} \quad \text{معادله (۲)}$$

سطح مقطع جریان به این صورت محاسبه می‌شود:

$$A = \frac{D_o^2 - D_i^2}{4} \pi = 0.00294 m^2 \quad \text{معادله (۳)}$$

شکل ۲: تصویر واقعی، شماتیک و بردارهای نظیر جریان جهت محاسبات تیغه‌ها [3]

<sup>7</sup> Stator

حالا می توان سرعت جریان هنگام ورود به استاتور ( $C_0$ ) را محاسبه کرد:

$$C_0 = \dot{V}/A = 4.83 \frac{m}{s} \quad \text{معادله (۴)}$$

تجربه نشان داده است که با سطح مقطع و پیچش کنونی تیغه ها، تا ۹۰٪ می توانیم زاویه جریان ورودی را تغییر دهیم. این امر به این معناست که زاویه بین بردارهای  $C_1$  و  $W_1$  (زاویه  $\alpha$ ) و نیز بردارهای  $C_2$  و  $W_2$  (زاویه  $\beta$ ) از ۶۰ به ۵۲ درجه در محاسباتمان تغییر خواهند کرد. بنابراین با توجه به بردارهای شکل ۲ داریم:

$$C_1 = \frac{C_0}{\cos \alpha} = 8.21 \frac{m}{s} \quad \text{معادله (۵)}$$

$$u = C_0 \tan \alpha = 6.65 \frac{m}{s} \quad \text{معادله (۶)}$$

بردار  $u$  را بردار سرعت پیرامونی (جنبی) می نامیم. پارامتر سرعت گردشی را این گونه تعریف می کنیم:

$$n = \frac{60}{\pi} * \frac{u}{D_m} = 1628 \frac{1}{min} \quad \text{معادله (۷)}$$

در نهایت، کار مخصوص تیغه را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$Y = u * (C_{1u} - C_{2u}) = u^2 = 44.22 \frac{m^2}{s^2} \quad \text{معادله (۸)}$$

عبارات  $C_{1u}$  و  $C_{2u}$  به ترتیب مقدار سرعت های  $C_1$  و  $C_2$  در جهت بردار  $u$  هستند که اولی برابر با  $u$  و دومی برابر با صفر است. توان را این گونه محاسبه می کنیم:

$$P = \dot{m} Y = 628 W \quad \text{معادله (۹)}$$

خروجی واقعی توربین کمتر از این مقدار خواهد بود. با فرض بازده حجمی ۰,۸۵ و بازده مکانیکی ۰,۹ توان مؤثر خروجی این گونه تغییر می کند:

$$P_{eff} = \eta_{volumetric} \eta_{mechanical} P = 480 w \quad \text{معادله (۱۰)}$$

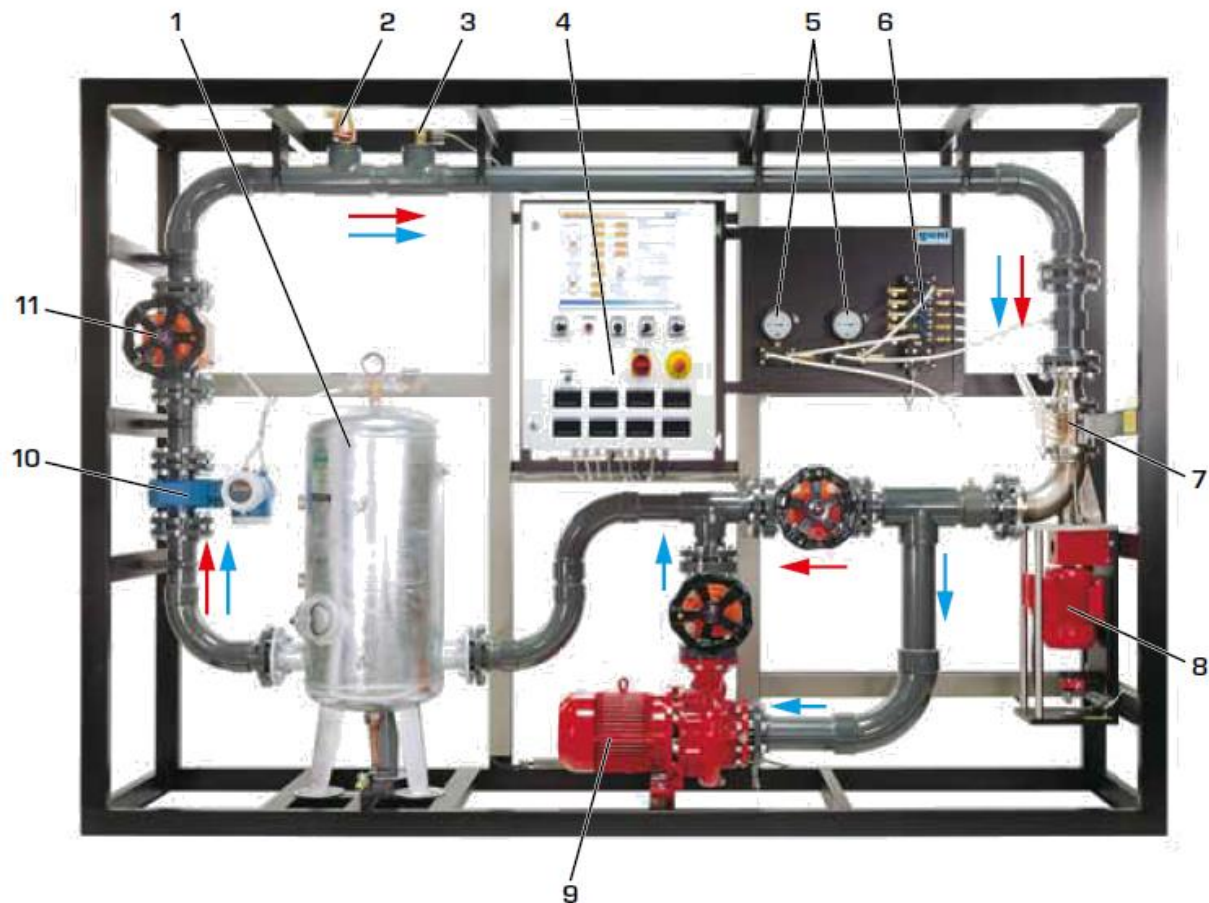
در هنگام آزمایش، مقدار  $P_{eff}$  و  $P_{hyd}$  را این گونه محاسبه کنید:

$$P_{eff} = \frac{Mn\pi}{30} \quad \text{معادله (۱۱)}$$

$$P_{hyd} = \frac{10}{6} \dot{V}(p_d - p_s) \quad \text{معادله (۱۲)}$$

M گشتاور بر حسب N.m، n سرعت بر حسب RPM و V دبی بر حسب لیتر بر دقیقه است و مقادیر فشار ورودی و خروجی بر حسب bar جایگذاری می‌شود. حاصل کسر  $P_{eff}/P_{hyd}$  برای توربین برابر  $\eta$  یا همان efficiency خواهد بود. در آزمایش پمپ، مقدار  $\eta$  برابر معکوس کسر مذکور است.

شکل دستگاه [3]



شکل ۳: اجزای دستگاه عبارت‌اند از: ۱- تانک آب؛ ۲- bleed valve؛ ۳- solenoid valve برای venting؛ ۴- صفحه سوئیچ‌ها، صفحه‌های نمایش و کنترل‌ها؛ ۵- مانومترهای فشار ورودی و خروجی؛ ۶- سنسور فشار دیفرانسیلی؛ ۷- توربوماشین محوری؛ ۸- موتور/ژنراتور به همراه اندازه‌گیری گشتاور؛ ۹- پمپ سانتریفیوژ برای عملیات توربین؛ ۱۰- دبی‌سنج الکترومغناطیسی و ۱۱- شیر کنترل جریان

## روش انجام آزمایش

با دستگاه موجود در آزمایشگاه سیالات، می‌توانید اثر توربین و پمپ را بررسی کنید. برای آزمایش توربین، دو سری تیغه وجود دارد: سری ST 00 70 – RT 33 37 و نیز ST 00 60 – RT 00 60. عبارات ST و RT به ترتیب معرف استاتور و روتور هستند و اعداد مقابل‌شان زوایای ورود سیال به تیغه و خروج از آن را مشخص می‌کنند. برای آزمایش پمپ، چهار سری تیغه وجود دارد:

RP 70 20 – SP 65 05

RP 70 20 – SP 65 15

RP 80 30 – SP 65 05

RP 80 30 – SP 65 15

هنگامی که دستگاه به تیغه‌های مناسب مجهز شد، می‌توانید آزمایش را آغاز کنید. برای تعویض تیغه‌ها از مسئول آزمایشگاه کمک بخواهید و از تعویض آن‌ها بدون حضور مسئول اکیداً خودداری کنید.

## الف- آزمایش حالت توربین

۱. سویچ EMERGENCY-OFF را بگردانید.
۲. دستگاه را توسط سوویچ اصلی روشن کنید. تمام نمایشگرهای دیجیتالی باید روشن شوند.
۳. نمایشگرهای فشار دیفرانسیلی باید مقدار صفر یا مقادیر نزدیک صفر را نشان دهند. اگر مقدار نشان داده شده صفر نیست، آنرا یادداشت کنید تا در محاسبات بعنوان خطا قرار دهید.
۴. تنظیم کننده سرعت را روی صفر قرار دهید.
۵. کلید Components را روشن کنید.
۶. سوویچ Motor/Generator را روی Generator قرار دهید.
۷. شیر بای‌پس و تنظیم جریان را ببندید و شیر تنظیم پمپ را باز کنید؛ سپس پمپ را روشن کنید. برای این کار ابتدا سوویچ آنرا روی علامت ستاره قرار دهید. وقتی پمپ سرعت گرفت، روی علامت مثلث سوویچ کنید.
۸. به آهستگی با استفاده از شیر کنترل جریان، دبی را افزایش دهید. نمایشگر جریان باید افزایش آنرا به شما گزارش کند. در این هنگام، واحد جریان شروع به گردش می‌کند. جریان را روی 850L/min تنظیم کنید.
۹. با تنظیم سرعت و با شروع از حالت no-load، توربین را به تدریج کند کنید. در هر سرعت میزان گشتاور، فشار ورودی و خروجی و فشارهای دیفرانسیلی را در جدول داده‌های خود وارد کنید. از جدول ۱ استفاده کنید.

## ب- آزمایش حالت پمپ

۱. سویچ EMERGENCY-OFF را بگردانید.
۲. دستگاه را توسط سوویچ اصلی روشن کنید. تمام نمایشگرهای دیجیتالی باید روشن شوند.
۳. نمایشگرهای فشار دیفرانسیلی باید مقدار صفر یا مقادیر نزدیک صفر را نشان دهند. اگر مقدار نشان داده شده صفر نیست، آنرا یادداشت کنید تا در محاسبات به عنوان خطا قرار دهید.

۴. تنظیم کننده سرعت را روی صفر قرار دهید.
۵. کلید Components را روشن کنید.
۶. سوئیچ Motor/Generator را روی Motor قرار دهید.
۷. شیر تنظیم پمپ و تنظیم جریان را ببندید و شیر بای پس را باز کنید؛ سپس واحد جریان را به وسیله تنظیم کننده سرعت فعال کنید و روی سرعت گردشی دلخواه قرار دهید.
۸. با استفاده از شیر کنترل جریان، دبی را افزایش دهید. نمایشگر جریان باید افزایش آن را به شما گزارش کند.
۹. در هر سرعت میزان گشتاور، فشار ورودی و خروجی و فشارهای دیفرانسیلی را در جدول داده‌های خود وارد کنید. برای وارد کردن داده‌ها از جدول ۲ استفاده کنید.

### خواسته‌های آزمایش

۱. نمودارهای  $P_{eff}$  بر حسب  $n$  را برای تمام تیغه‌ها در حالت توربین در یک صفحه به صورت مقایسه‌ای ترسیم کنید.
۲. نمودارهای efficiency بر حسب  $n$  را برای تمام تیغه‌ها در حالت توربین در یک صفحه به صورت مقایسه‌ای ترسیم کنید.
۳. نمودارهای efficiency بر حسب  $\dot{V}$  را برای تمام تیغه‌ها در حالت پمپ در یک صفحه به صورت مقایسه‌ای رسم کنید.
۴. نمودارهای اختلاف فشار (بر حسب mbar) بر حسب  $\dot{V}$  را برای تمام تیغه‌ها در حالت پمپ در یک صفحه به صورت مقایسه‌ای رسم کنید. آیا ابتدا در روند فشار، کاهشی مشاهده می‌کنید؟ به نظر شما این کاهش نتیجه چیست؟
۵. محاسبات قسمت تئوری دستور کار برای تیغه‌های توربین انجام شده اند. این محاسبات را برای حالت پمپ با فرضیات زیر انجام دهید و توان را بیابید:

روتور: زاویه ورود جریان ۸۰ و زاویه خروج ۳۰ درجه

استاتور: زاویه ورود جریان ۶۵ و زاویه خروج ۱۵ درجه

قطرهای داخلی، خارجی و میانه مشابه دستور کار

سرعت گردشی ( $n$ ) برابر ۳۰۰۰ (واحد: معکوس دقیقه)

مساحت مؤثر عبور جریان ۸۵٪ کل سطح مقطع و تاثیر تیغه‌ها بر زاویه انحراف جریان ۹۰٪

| Measurement | Speed<br>n<br>(1/min) | Flow V<br>(1/min) | Torque<br>M (N.m) | P inlet<br>(bar) | P outlet<br>(bar) | Diff<br>pres.<br>(mbar) | P<br>eff | P<br>hyd | $\eta$ |
|-------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------------|----------|----------|--------|
| 1           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |          |          |        |
| 2           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |          |          |        |
| 3           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |          |          |        |
| 4           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |          |          |        |
| 5           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |          |          |        |
| 6           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |          |          |        |
| 7           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |          |          |        |
| 8           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |          |          |        |
| 9           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |          |          |        |
| 10          |                       |                   |                   |                  |                   |                         |          |          |        |

جدول ۱: جدول دیتای آزمایش توربین

| Measurement | Speed<br>n<br>(1/min) | Flow V<br>(1/min) | Torque<br>M (N.m) | P inlet<br>(bar) | P outlet<br>(bar) | Diff<br>pres.<br>(mbar) | P<br>mech <sup>8</sup> | P<br>hyd | $\eta$ |
|-------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|----------|--------|
| 1           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |                        |          |        |
| 2           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |                        |          |        |
| 3           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |                        |          |        |
| 4           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |                        |          |        |
| 5           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |                        |          |        |
| 6           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |                        |          |        |
| 7           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |                        |          |        |
| 8           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |                        |          |        |
| 9           |                       |                   |                   |                  |                   |                         |                        |          |        |
| 10          |                       |                   |                   |                  |                   |                         |                        |          |        |

جدول ۲: جدول دیتای آزمایش پمپ

<sup>8</sup> P<sub>mech</sub> for pumps can be calculated the same way as P<sub>eff</sub> for turbines and efficiency is P<sub>hyd</sub>/P<sub>mech</sub>.

- 1- S. L. Dixon, C. A. H. (2014). Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery. (Introduction): page 1.
- 2- Gunt, "Operation Manual: HM405 Axial Flow Pump/Turbine Unit." pages 1 to 42.
- 3- Gunt HM405 Axial Flow Turbomachines Catalogue, <https://www.gunt.de/en/products/fluid-machinery/turbomachines/axial-flow-pumps/axial-flow-turbomachines/070.40500/hm405/glct-1:pa-148:ca-759:pr-883>