

## پیشگفتار

با توجه به پیشرفت روز افزون علم مکانیک و توجه محققین و دانشمندان به بحث آیرودینامیک و هیدروآیرودینامیک در بهبود وضعیت وسایلی مانند خودروها ، پرتابه ها، کشتی ها ،زیر دریایی ها ،پمپها و ... ضرورت انجام چنین تحقیقی احساس می شود.

یکی از ابزارهای کار آمد در بررسی مسئله آیرودینامیک و هیدروآیرودینامیک ، تونل آب می باشد که علاوه بر آن قابلیت بررسی پدیده کاویتاسیون را نیز دارد ، اولین نمونه تونل آب در سال ۱۹۰۴ میلادی توسط لودویک پرانتل ساخته شده است و از آن زمان تاکنون پیشرفتهای زیادی داشته است.

در فصل اول این تحقیق دلایل انتخاب تونل آب ،دلایل ارجحیت آن بر رقیب دیرینه خود یعنی تونل باد و انواع تونل آب با مشخصات فنی آنها ارائه شده اند. در فصل دوم درباره اجزا تشکیل دهنده تونل آب توضیح داده شده است ،همچنین به اختصار در باره وسایل جانبی و ابزار های کنترلی در تونل آب صحبت شده است . در فصل سوم یک تونل آب نمونه طراحی شده است. در پیوست ها نیز دو نمونه مختلف از کاتالوگهای مربوط به تونل آب ترجمه و ارائه شده است.

# فصل اول

کلیاتی در مورد تونل آب و انواع آن

## چرا تونل آب؟

همانطور که میدانیم برای بررسی تجربی پدیده های آبرو دینامیکی دو ابزار قدرتمند موجود است:

۱- تونل باد

۲- تونل آب

در زیر ضمن مقایسه جزئی این دو وسیله دلایل ارجحیت تونل آب را به اختصار ذکر می کنیم:

به طور کلی در اکثر مواقع ما نمی توانیم به طور مستقیم جسم را در داخل تونل قرار داده و آن را بررسی کنیم لذا نا گذیر هستیم تا از وسیله خود نمونه ای با حفظ خصوصیات هندسی آن تهیه کنیم و سپس نمونه را در داخل تونل قرار دهیم و خصوصیات آن را بررسی کنیم و سپس با استفاده از بحث تشابه نتایج را برای نمونه اصلی تعمیم دهیم.

همانطور که می دانیم برای برقراری تشابه باید تشابه هندسی و تشابه دینامیکی همزمان برقرار باشند بر همین اساس و بوسیله تحلیل ابعادی و روشهای تحلیلی مانند قضیه پای-بوکینگهام گروه های بی بعدی حاصل می شوند که در زیر به برخی از آنها اشاره کرده و مفهوم فیزیکی آن را به اختصار توضیح می دهیم:

۱- عدد رینولدز: نسبت نیروی لختی به نیروی اصطکاک می باشد.

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

که در آن  $L$  طول مشخصه نمونه،  $V$  سرعت جریان سیال و  $\nu$  لزجت سینماتیکی سیال می باشد.

۲- عدد ماخ : نسبت جذر نیروی لختی به جذر نیروی ناشی از تراکم پذیری سیال می باشد. این عدد در جریان با سرعت زیاد که در آن تغییرات چگالی ناشی از فشار مهم است اهمیت زیادی پیدا می کند.

$$M = \frac{V}{c}$$

که در آن  $V$  سرعت جریان سیال و  $c$  سرعت صوت در سیال مورد نظر می باشد.

۳- عدد فرود: نسبت نیروی لختی به نیروی گرانش می باشد و بیشتر در جریانات روی سطح سیال اهمیت می یابد.

$$Fr = \frac{V^2}{Lg}$$

۴- عدد وبر : نسبت نیروی لختی به کشش سطحی می باشد. این عدد نیز وجود یک سطح آزاد را ایجاد می کند اما در جا یی که اشیای بزرگ مانند کشتیها در سیالی مانند آب در کار باشند این اثر خیلی ضعیف است.

$$We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$$

که در آن  $L$  طول مشخصه نمونه،  $V$  سرعت جریان سیال و  $\rho$  چگالی سیال مورد نظر و  $\sigma$  چسبندگی سطحی سیال می باشد.

۵- عدد اویلر : نسبت نیروی فشاری به نیروی لختی است.

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho V^2}$$

در تشابه پمپ ها نیز اعداد بی بعد زیر مطرح هستند:

$$\frac{gH}{N^2 D^2}$$

۱- ضریب ارتفاع:

۲- ضریب جریان :  $\frac{Q}{ND^3}$

۳- عکس عدد رینولدز :  $\frac{\mu}{\rho ND^2}$

۴- عدد زبری :  $\frac{\varepsilon}{D}$

که در آنها  $Q$  دبی،  $H$  ارتفاع،  $N$  سرعت دورانی،  $D$  مشخصه هندسی قطر پروانه،  $\mu$  لزجت و  $\varepsilon$  زبری سطح می باشد.

با توجه به شکل جسم، کار برد آن و موقعیت جسم در سیال یک یا گروهی از پارامترهای بی بعد فوق اهمیت می یابند.

همانطور که می دانیم یک از پارامترهای مهم در تشابه ابعادی عدد رینولدز می باشد که در تونل های آب و باد نیز بسیار اهمیت دارد. بر این اساس می توان مقایساتی را بین تونل آب و باد انجام داد :

۱- با توجه به عدد رینولدز داریم :

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

$$\nu(\text{water}) = 8.58 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

$$\nu(\text{air}) = 15.89 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

همانطور که مشاهده می کنید لزجت سینماتیکی هوا ۱۸,۵ برابر بیشتر از آب می باشد پس برای نمونه یکسان در تونل به منظور حصول عدد رینولدز یکسان از هر دو تونل باید سرعت هوا در تونل باد ۱۸,۵ برابر بیشتر از سرعت آب در تونل آب باشد .

یعنی در تونل آب می توانیم با سرعتهای کمتر، پمپ کوچکتر و هزینه کمتر همان شرایط را برقرار کنیم.

۲- مورد اول را می توان به گونه ای دیگر نیز بررسی کرد یعنی در سرعت سیال یکسان در هر دو تونل و به منظور حصول عدد رینولدز یکسان باید در تونل هوا نمونه ای ۱۸,۵ برابر بزرگتر از نمونه ای که در تونل آب به کار می رود استفاده کنیم

یعنی تونل آب کوچکتری می توان انتخاب نمود.

۳- آب سیال تراکم ناپذیری می باشد و به راحتی می توانیم سرعت آن را افزایش دهیم در حالیکه هوا سیال تراکم پذیر می باشد و در سرعتهای بالا نتایج آزمایشات در آن دارای انحرافات زیادی می باشد.

۴- در تونل آب علاوه بر بررسی ابزارهایی که در تونل هوا بررسی می شوند مانند : اتموبیل ها ، هواپیماها و پرتابه های هوایی می توانیم موارد دیگری مانند زیر دریایی ها ، کشتی ها ، پمپ ها و پرتابه های آبی رانیز بررسی کنیم.

۵- در تونل آب امکان بررسی پدیده بسیار مهم کاویتاسیون که در پمپ ها از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد نیز فراهم است.

البته محدودیتهایی نیز در مورد تونل آب می باشد که باعث می شود تا از تونل آب استفاده کنیم ک

۱- در تونل آب نیاز به آب به عنوان سیال می باشد که مانند هوا در همه جا در دسترس نمی باشد و ممکن است نیاز به منابعی برای ذخیره آن باشد.

۲- تجهیزات مورد استفاده در تونل آب پیچیده تر و پرهزینه تر از تونل آب می باشد.

۳- در تونل هوا امکان آن را داریم که حتی بتوانیم جسم را در اندازه واقعی خود در تونل قرار دهیم مثلا یک اتومبیل را به طور کامل وارد آن کنیم در صورتیکه در تونل آب این امکان فراهم نمی باشد.

اما با تمام این موارد امروزه ترجیح داده می شود تا به علت کاربرد گسترده تر تونل آب از این تونل استفاده شود.

### انواع تونل آب :

تونل های آب را می توان از جهات گونا گونی مورد بررسی قرار داد و آنها را دسته بندی نمود که در زیر به چند سری از این دسته بندی ها اشاره می کنیم :

\*دسته بندی از نظر سرعت :

تونلهای آب را می توان از نظر سرعت آب در آنها به دو گروه عمده تقسیم نمود :

#### ۱- سرعت بالا (High Speed) :

که معمولا سرعت آب در آنها بالای ۱۵ متر بر ثانیه می باشد و همین عامل باعث ایجاد تغییراتی در ساختار آنها می شود از جمله اینکه لوله ها و مقطع آزمایش ( Test Section) حتما باید دارای مقطع گرد باشند تا از ایجاد جریانات برگشتی و همچنین اتلافات زیاد جلوگیری شود، همچنین در این نوع تونلهای آب به علت حجم زیاد سیال جابه جا شده معمولا از پمپ های محوری استفاده می شود. این گروه تونلهای آب کاربرد گسترده تری در صنعت از جمله صنایع دفاعی دارند. همچنین این تونلها به علت سرعت بالایی که دارند به راحتی می توانند پدیده حفره زایی (Cavitation) را بررسی کنند.

از این گروه می توانیم به تونلهای آبی گارفیلد ، **Tom Fink Tunnel** ،  
**Emerson water tunnel** ، **24-inch water tunnel** ، **24-inch water**  
**tunnel** ، و انواع تونلهای آب با نام **Cavitation Tunnel** اشاره کرد.

۲- سرعت پایین (**Low Speed**) :

که معمولا دارای سرعتهایی زیر ۱۵ متر بر ثانیه می باشند و به همین دلیل به راحتی می توان در آنها از مقاطع مربعی استفاده نمود همچنین در آنها می توان از پمپ سانتریفوژ نیز برای انتقال سیال استفاده نمود . این دسته از تونلهای آب بیشتر جنبه آموزشی و آزمایشگاهی داشته و کمتر در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند .

یکی از معایب مهم این گروه این است که در آنها نمی توان پدیده کاویتاسیون را مورد بررسی قرار داد .

در این گروه می توان به تونلهای آبی **Rolling Hills** ، **Pilot water tunnel** اشاره نمود.

\* دسته بندی از نظر فشار کاری :

از این نظر نیز می توان تونلهای آب را به دو گروه عمده تقسیم بندی نمود :

۱- تونلهای آب رو باز :

که این تونلهای آب معمولا تحت فشار جو عمل می کنند و در آنها نمی توان فشار متغییر ایجاد نمود . از جمله معایب این تونلها این است که به علت تماس مستقیم هوا با آب میزان هوای بیشتری به صورت محلول در آب در می آیند و این عامل باعث ایجاد هوا گرفتگی و کاهش راندمان در بعضی نقاط تونل که فشار افت می کند می شود . همچنین در این تونلها معمولا به علت ثابت بودن مقدار فشار پایه نمی توان سرعتهای



بالایی را ایجاد نمود زیرا یکی از راه های افزایش سرعت استفاده از نازل ها و دیفیوزر ها به منظور تبدیل فشار به سرعت و بلعکس می باشد و در غیر این صورت برای افزایش سرعت نیاز به پمپ های قویتر و بزرگتری می باشد.

از این گروه می توان به تونلهای آبی **Pilot water tunnel ، Rolling Hills** اشاره نمود.

۲- تونل های آب رو بسته :

در این تونلها به علت عدم ارتباط با محیط بیرون به راحتی می توان فشار متغییر در حین کار داشت و ضمن کاهش انحلال گاز ها از جمله هوا در آب به راحتی می توان سرعتهای بالایی را ایجاد نمود و در ضمن با وجود فشار متغییر بررسی پدیده کاویتاسیون بسیار ساده تر می باشد.

اکثر تونلهای آبی همانطور که در قسمت مشخصات فنی تونل ها مشاهده خواهید نمود از این دسته می باشند.

\*دسته بندی از نظر مقدار عدد رینولدز:

۱- تونل های آبی **Laminar** :

در این دسته از تونلهای آب جریان آرام می باشد و مقدار عدد رینولدز کمتر از ۲۵۰۰ می باشد لذا این تونلهای آب دارای مقاطع آزمایش بزرگتر و سرعتهای کمتر می باشند .

این دسته از تونلهای آب کاربرد محدودی دارند.

از این دسته می توان به تونل آب **LWK** اشاره نمود.

۲- تونل های آب **Turbulent** :

در این تونل های آب جریان از نوع متلاطم می باشد و لذا دارای سرعت های خیلی بزرگتری می باشند این دسته از تونل های آب کاربرد وسیعتر و صنعتی تری دارند. اکثر تونل های آبی همانطور که در قسمت مشخصات فنی تونل ها مشاهده خواهید نمود از این دسته می باشند.

\* دسته بندی تونل های آب از نظر ساختاری :

#### ۱- تونل های آب Closed Circuit :

این دسته از تونل های آب دارای ساختاری سیرکوله شونده هستند یعنی یک مقدار مشخص آب وارد آنها شده و این مقدار آب دائما در حال گردش در تونل آب بوسیله پمپ موجود در تونل جهت انجام آزمایشات می باشد . از جمله مزایای این ساختار صرفه جویی در میزان آب مصرفی بوسیله تونل آب می باشد زیرا معمولا حجم آب مورد استفاده در تونل های آب زیاد می باشد و نمی توان آن را بصورت یکسره ( از یکطرف آب وارد تونل شده و از طرف دیگر خارج شود ) مورد استفاده قرار داد ،البته بعد از مدتی از استفاده باید آب داخل تونل را به علت وجود موادی که در حین آزمایش مورد استفاده قرار گرفته اند و وارد آب شده است ، تعویض نمود برای اطلاعات بیشتر در این مورد به پیوست ۲ مراجعه کنید. همچنین در این دسته از تونل های آب به علت وجود پمپ به راحتی می توان سرعت های بالا را ایجاد نمود.

اکثر تونل های آبی همانطور که در قسمت مشخصات فنی تونل ها مشاهده خواهید نمود از این دسته می باشند.

#### ۲- تونل های آب Open Circuit :

در این دسته از تونل های آبی ، آب از یک طرف وارد و از طرف دیگر خارج می شود .  
این تونل های آب معمولا در محل هایی مانند کنار رودخانه ها و دریاچه های آب شیرین  
که آب فراوانی در دسترس است ساخته می شوند. از معایب این دسته از تونل های آب  
می توان به موارد زیر اشاره کرد :

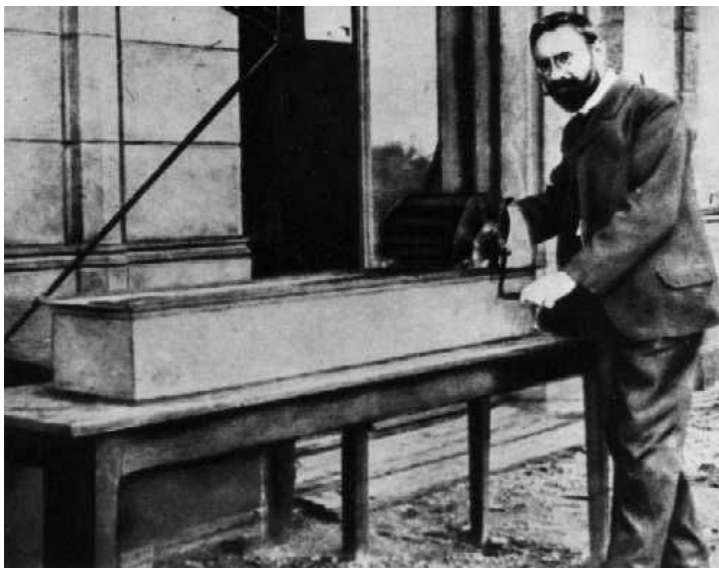
میزان زیاد آب مصرفی و ساختاری باز آنها که باعث می شود این دسته از تونل های  
آب بصورت فشار ثابت و تحت فشار محیط عمل کنند.

این دسته از تونل های آب معمولا کار برد محدودی داشته و بیشتر برای بررسی پدیده  
های سطحی آب مانند : کشتی ها مورد استفاده قرار می گیرند.

نمونه هایی از تونل های آب :

در این قسمت چند مدل تونل آب به همراه جدول مشخصات فنی آنها ارائه می شود :

## The First WaterTunnel:

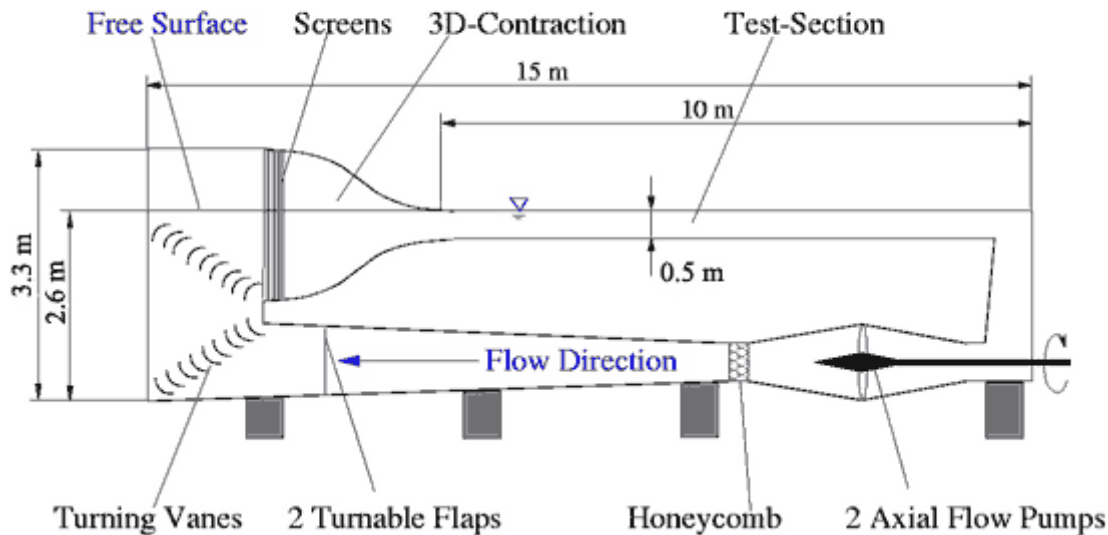


Ludwig Prandtl besides his water-tunnel  
at the TU Hannover 1904

# Diagram of the Laminar Water Tunnel

## Schematic of the Laminar Water Channel (LWK)

at the Institute of Aerodynamics and Gasdynamics, University of Stuttgart



## Technical data

Type of channel: circulation channel

construction: fibreglass-sandwich construction

flow medium: water

inertia type drive (400 kg)

RPM-regulated motor (2.3 kW)

transmission via belts

contraction ratio 7.7:1

Meßstrecke: 1.2 \* 0.5 \* 10 m, horizontal, an 3 Seiten verglast

freie Wasseroberfläche

10 textile screens

temperature stability: less than 0.05 K/day (water)

velocity range: 5 - 20 cm/s

turbulence level (15 cm/s): 0.15% (0.01-10 Hz)      0.05% (0.10-10 Hz)

## Instrumentation :

visualization of flows: hydrogen bubble instrumentation

colour probe, laser light sheet instrumentation

measurement technique: hot-film-anemometry (DISA 55M10)

Laser-Doppler-Anemometry (2 components)

# QUIET WATER TUNNEL

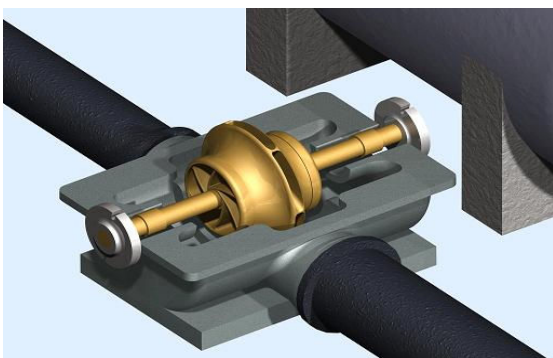
Naval Undersea Warfare Center Division Newport



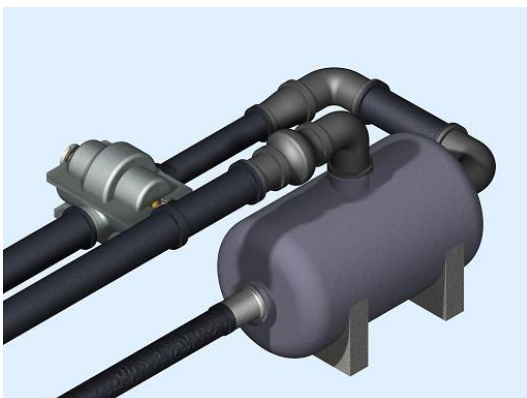
Submarine Sonar Department

## Quiet Water Tunnel Pump

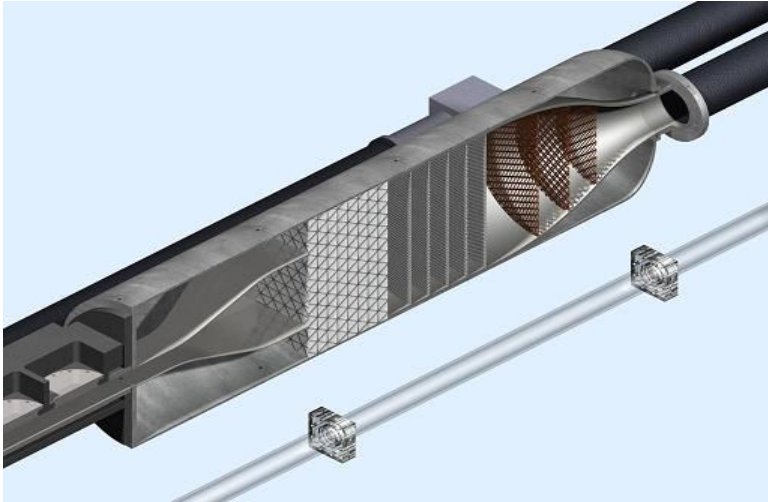
Table of Specifications for the Quiet Water Tunnel	
Attribute	Attribute Value
Maximum centerline velocity	20 ft/s (rectangular test section) 80 ft/s (small circular test section)
Pump	Double suction centrifugal pump 300-1786 RPM
Motor	125 hp, 1786 RPM, ball-bearing, 480V 3-phase motor
Clutch	None (Direct Drive)
Speed control	+/- 0.25% of free stream velocity via close-loop feedback system
Maximum Reynolds number	16,700 in rectangular test section ( $R_\theta = U_o\theta/\nu$ ) 68,000 in circular test section ( $R_d = U_o d/\nu$ )
Boundary layer thickness (typical)	1.2-inches (rectangular test section) Fully developed 1.75 in. (circular test section)
System Water Volume	2,000 gal
Test Section Dimensions (inner)	12-inch (width-constant) by 4-inch (inlet) to 4.4-inch (outlet) by 72-inch (length) (rectangular test section) 3.5-inch diameter by 324-inches in length (circular test section)



Quiet Water Tunnel Pump



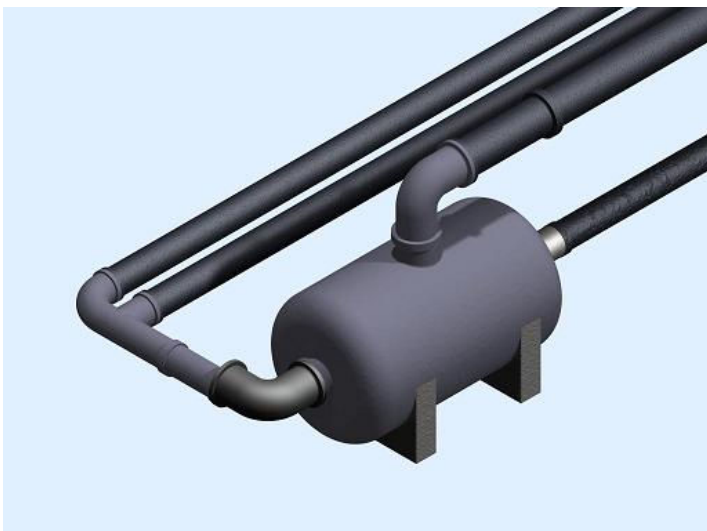
Upper Plenum and pump (from front to back)



**Middle Plenum Chamber**

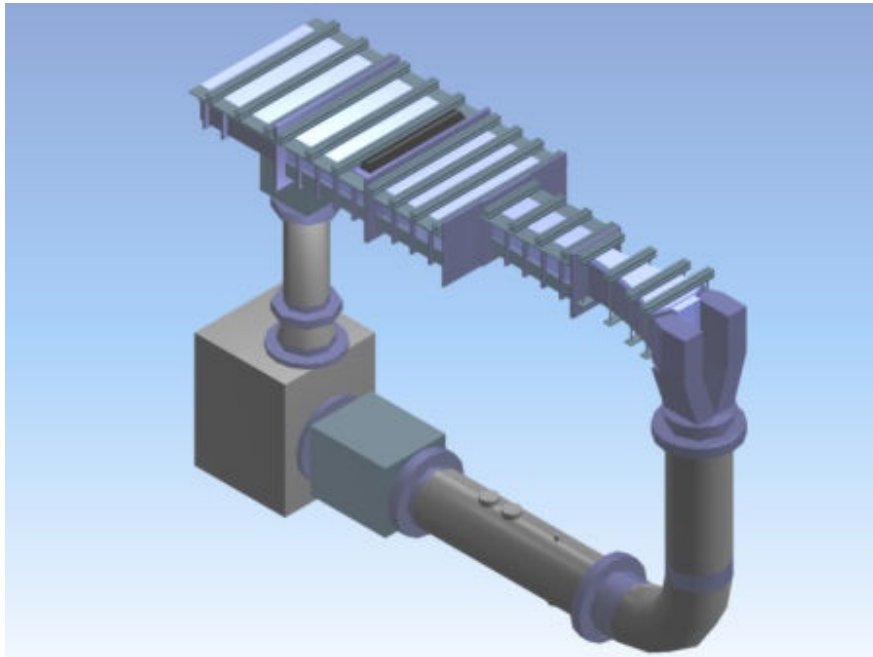


**Rectangular test section (flow is right to left)**

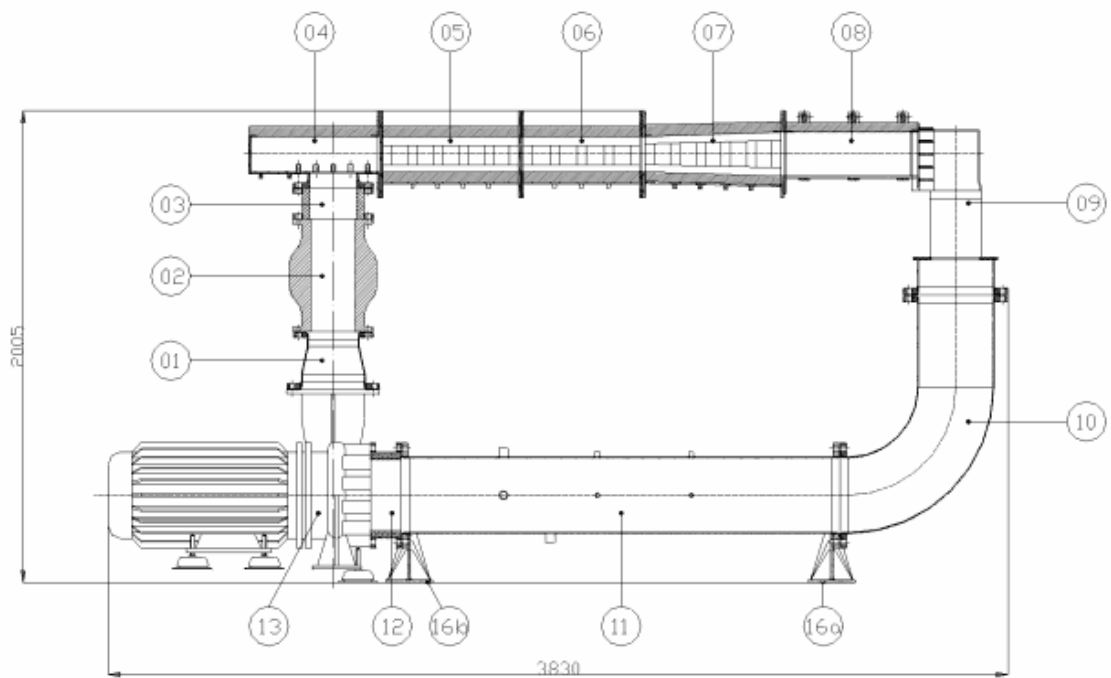


**Lower Plenum Chamber**

# Pilot Water Tunnel | Aerodynamics



# Detailed Description | Aerodynamics





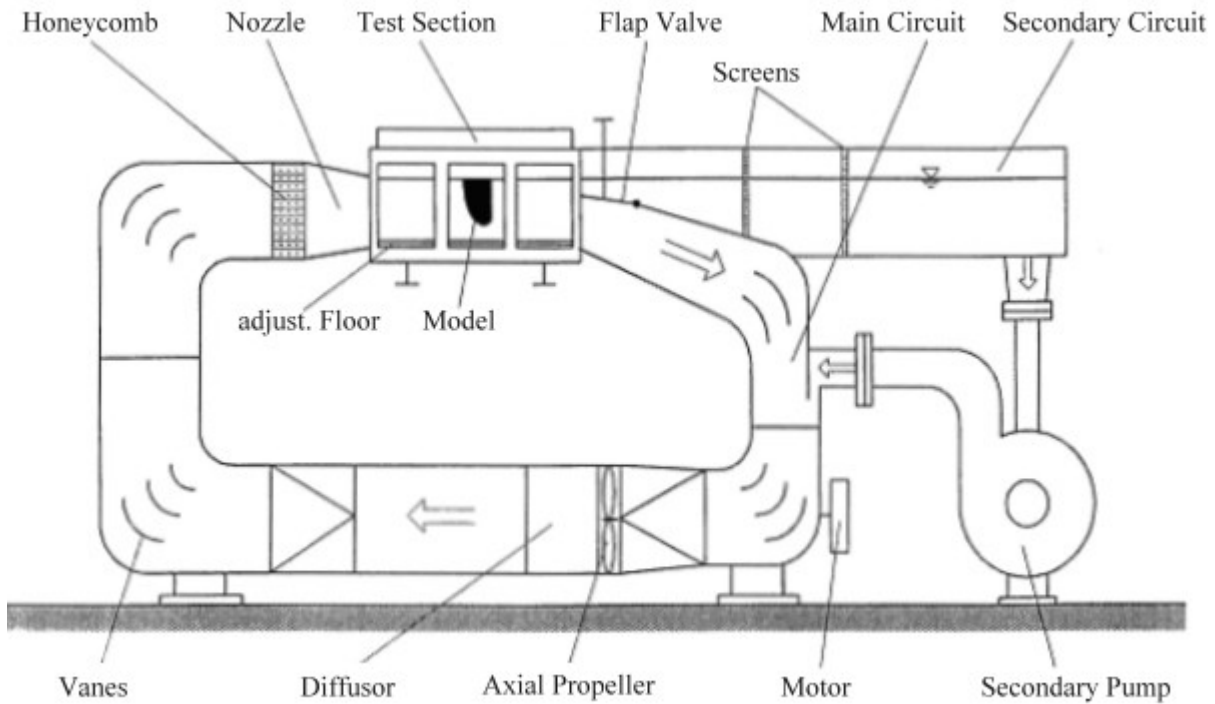
*The following table contains the main technical data:*

<b>Geometric dimensions</b>
Length: 3.0m, Height: 2.5m, Width: 0.8m Volume: 350l
<b>Dimension of test section</b>
Length: 0.6m, Height: 0.15m, Width: 0.1m PMMA windows Closed, at different pressure levels (p = 6bar)
<b>Main flow data</b>
Velocity: $u = 0.05- 15\text{m/s}$ with $u = \pm 0.5\%$ Temperature: $T = 20- 80^\circ\text{C}$ with $T = \pm 0.25\%$ Pressure: $p = \text{ambient}- 6\text{bar}$ with $p = \pm 0.5\%$ Turbulence: $Tu < 0.5\%$ RMS Reynolds number: $Re_{20^\circ\text{C}} = 1.5 \cdot 10^3 - 1.7 \cdot 10^5$ $Re_{80^\circ\text{C}} = 3.8 \cdot 10^3 - 5.4 \cdot 10^5$
<b>Pump system</b>
Centrifugal pump- 40kW AC drive motor with variable frequency converter
<b>Heater</b>
Electrical flow heater- 20kW

## Circulating Water Tunnel | Aerodynamics



## Detailed Description | Aerodynamics



*The following table contains the main technical data:*

<b>Main Dimensions</b>
Length: 7.5 m, Height: 3.0 m, Width: 0.8 m Volume: 6000 l
<b>Test Section</b>
Cross-section: 400 x 400 mm <sup>2</sup> , Adjustable floor up to a height of 20 mm Length: 1900 mm PMMA windows on each side
<b>Working Modes</b>
Open with free surface Closed, at different pressure levels
<b>Main Data</b>
Velocity: $v = 0.1 \dots 15$ m/s Reynolds number: $Re = 4 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^6$

# 24-Inch Variable Pressure Cavitation Tunnel (1940)

## ***Description of Facility:***

Vertical plane, closed recirculating, variable-speed, variable-pressure, open jet test section, closed jet test section, and semi-rectangular test section.

## ***Type of Drive System:***

1.22 m (48 in.) diameter three-bladed axial flow impeller with direct drive 6-pulse solid state variable speed DC drive system with digital closed loop control.

## ***Total Impeller Motor Power:***

559 kW (750 hp), 340 rpm

## ***Working Section Max. Velocity:***

17 m/s (55.8 ft/s, 33 knots)

## ***Max. & Min. Abs. Pressures:***

241 kPa (35 psia), 14 kPa (2 psia)

## ***Min. Cavitation Number:***

Sigma = 0.08 (at 2 psia & 33 knots)

## ***Instrumentation:***

Dynamometers for measuring steady & unsteady propeller forces on up and downstream shafts, 2-component force balance, hydrophones, pressure sensors, strobe lights, high speed photographic system.

## ***Type & Location of Torque & Thrust Dynamometers:***

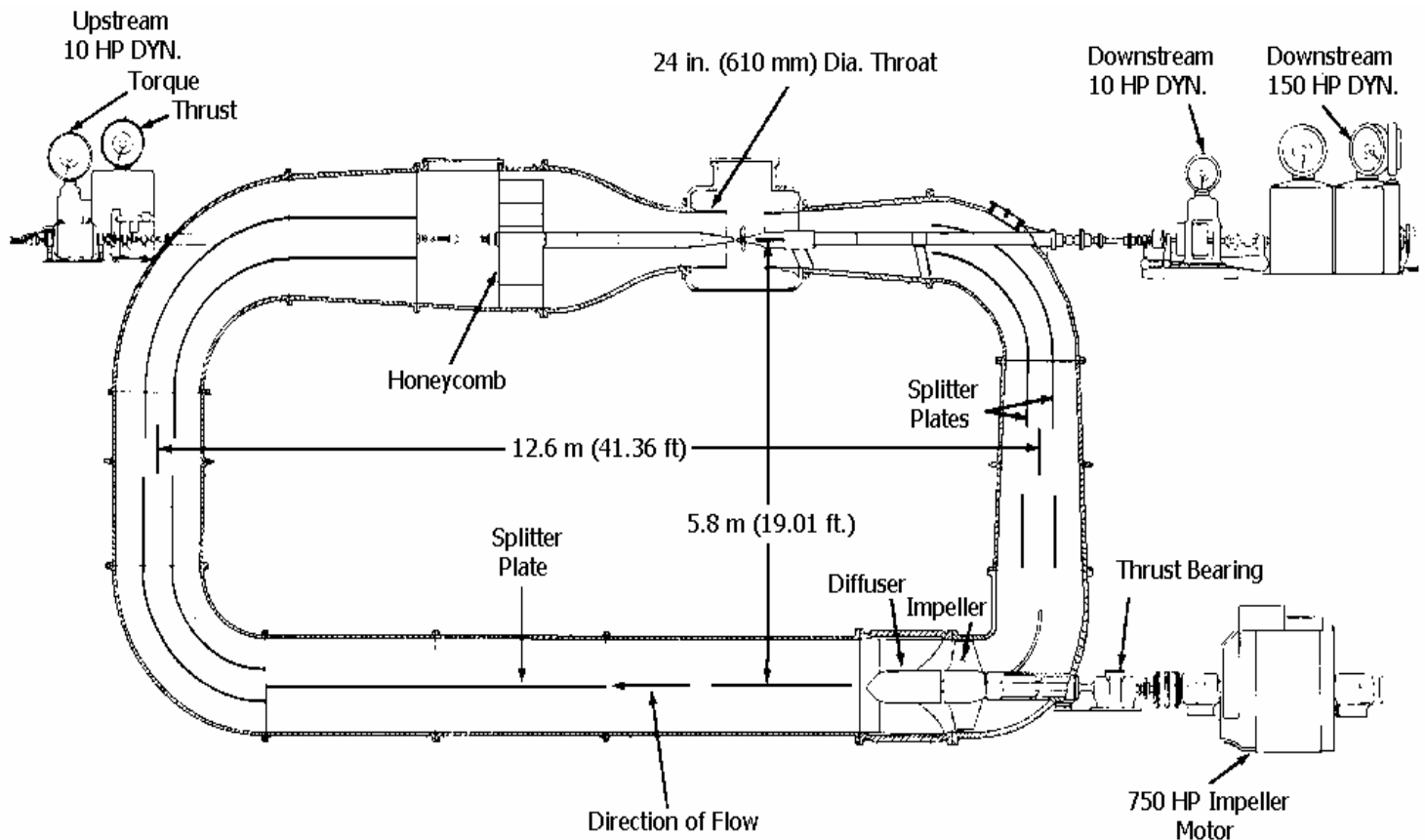
1. Electric-cradle dynamometer located downstream outside the tunnel
  - Drive motor rating = 112 kW (150 hp) at 3600 rpm max.
  - Thrust range = 13,344 N ( 3000 lbs)
  - Torque range = 415 Nm ( 306 lb-ft) at 3600 rpm and 1424 Nm ( 1050 lb-ft) at 1050 rpm
2. Electric-cradle dynamometers located upstream & downstream outside the tunnel
  - Drive motor rating = 7.5 kW (10 hp) at 3600 rpm max.
  - Thrust range = 1334 N ( 300 lbs)
  - Torque range = 24 N m ( 18 lb-ft) at 3600 rpm
3. Unsteady propeller force transmission dynamometer, 6-component waterproof strain gaged sting-balance located either upstream or downstream in the tail shaft housing approx. 76 mm (3.0 in.) from the propeller hub.
  - Drive motor rating = 7.5 kW (10 hp), 1800 rpm max. with this dynamometer
  - Steady Load Range
    - Thrust 0-1334 N (0-300 lbs)

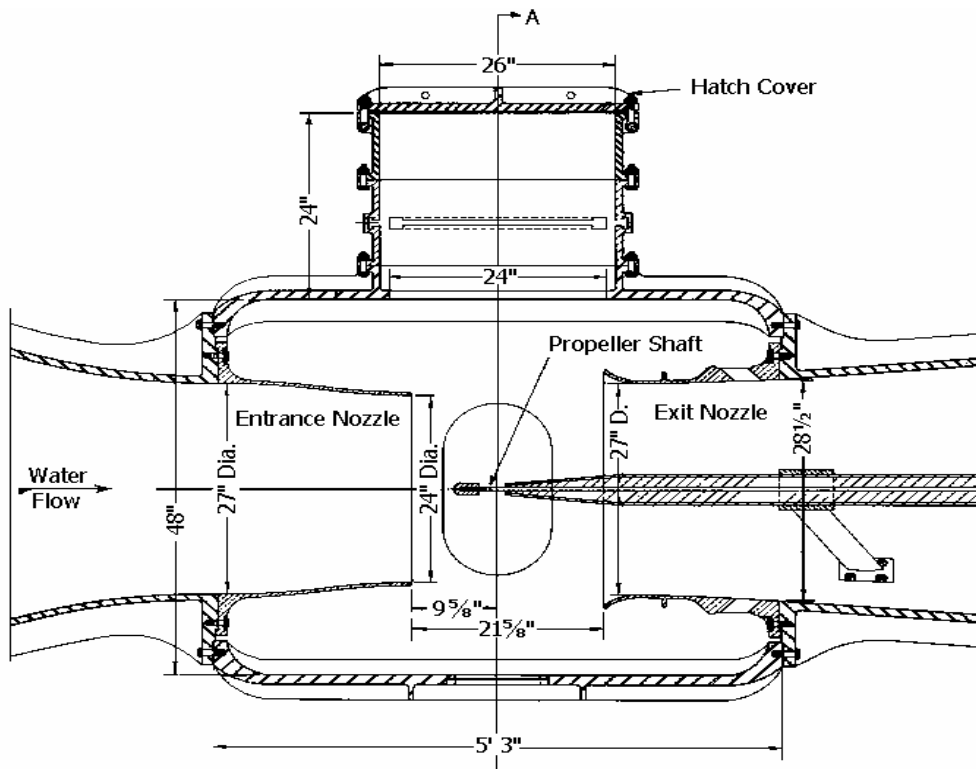
- Torque 0-47 Nm (0-35 lb-ft)
- Side Forces (vert. & horz.) 0-67 N (0-15 lbs)
- Moments (vert. & horz.) 0-17 Nm (0-12.5 lb-ft)
- Unsteady Load Range\* (double amplitude)
  - Thrust 133 N (30 lbs)
  - Torque 4.7 Nm (3.5 lb-ft)
  - Side Forces (vert. & horz.) 13 N (3 lbs)
  - Moments (vert. & horz.) 1.7 Nm (1.25 lb-ft)

\*Blade frequency limitation of the sting-balance: 12 hz min., 200 hz max. Optimum propeller size range: Diameter = 250-300 mm (10-12 in.); Weight = 9-44 N (2-10 lbs)

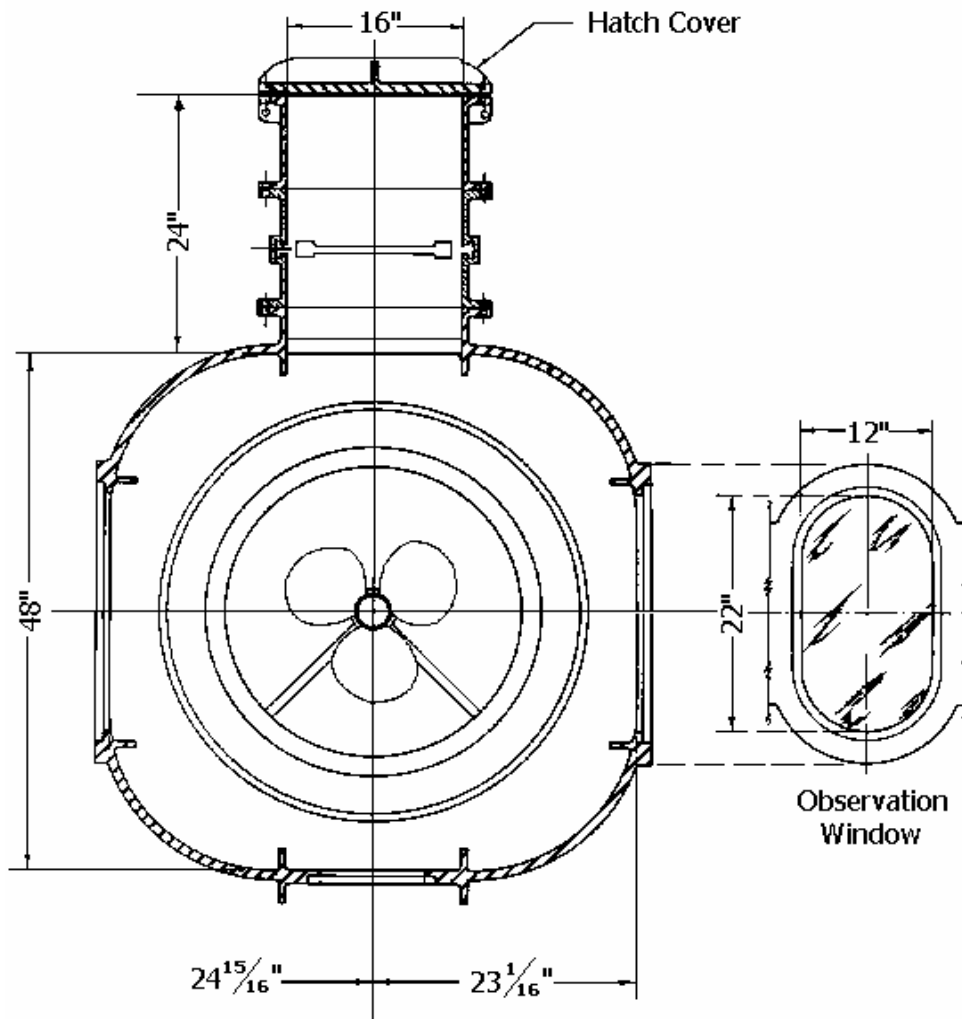
**Propeller Size Range:**

Diameter = 450 mm (18 in.) max.



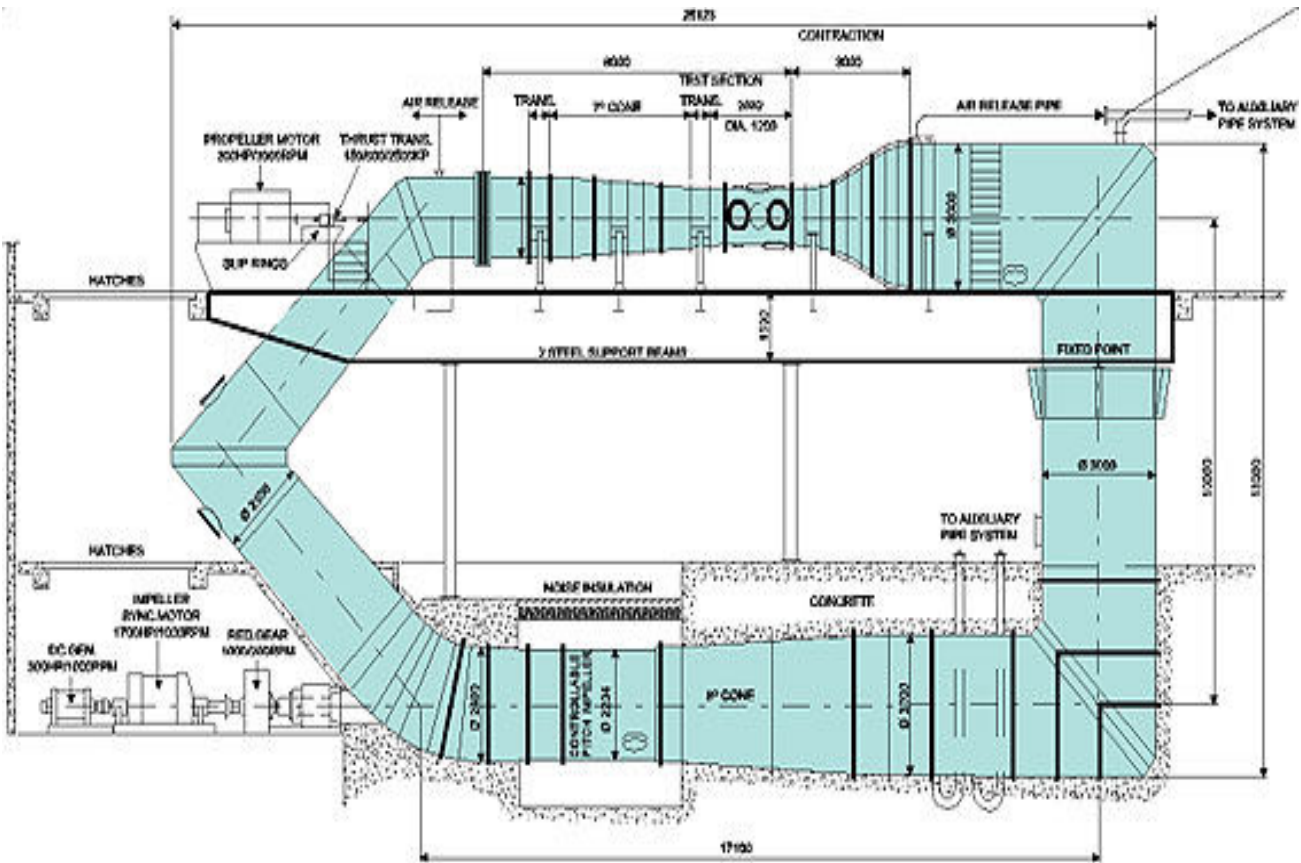


**Detail View of 24-Inch VPWT Test Section**



**Section View A-A of Test Section  
(Looking Downstream)**

# The Cavitation Laboratory



## Cavitation tunnel data:

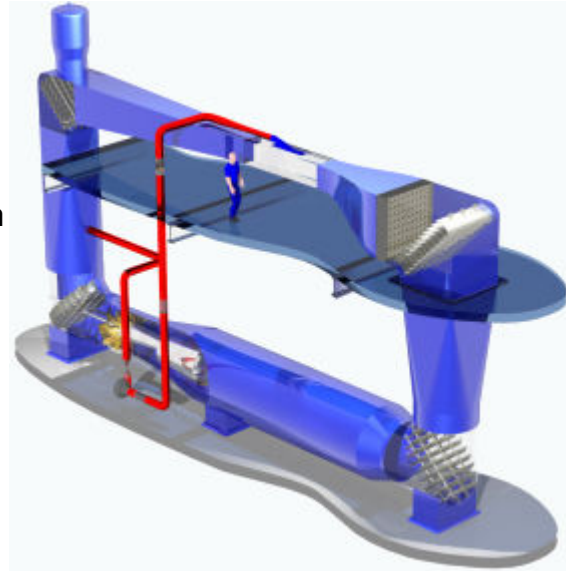
- Height between center lines: 10 metres**
- Width between center lines: 22.22 metres**
- Contraction area ratio: 6.25**
- Diameter of working section: 1.20 metre**
- Length of working section: 2.08 metres**
- Type of working section: Closed throat**
- Maximum water velocity: 18 m/sec.**
- Maximum propeller RPM: 3000**
- Propeller motor power: 50 KW**
- Maximum working pressure: 6.0 atm.abs.**
- Minimum working pressure: 0.1 atm.abs./sv~0.2**
- Impeller motor power: 1150 KW**
- Honeycomb for flow straightening.**



# Tom Fink Cavitation Tunnel

## Introduction

**The Tom Fink Cavitation Tunnel is located on the Newnham Campus of the Australian Maritime College (AMC), Launceston. The facility is a closed, variable pressure, recirculating water tunnel used for the study of flow about such bodies as ship hulls and under water vehicles and general flow applications. Investigations may involve the study of cavitation and other two-phase flows, steady and unsteady flows, turbulence and hydro-acoustics.**



**Cavitation is the change of phase, from liquid to vapour, that occurs when static pressures in the liquid on or about a body are reduced below the vapour pressure. It is a complex phenomenon and places limitations on the performance of submerged machinery. It may cause thrust breakdown in propulsors, loss of efficiency, metal erosion, noise, vibration and ultimately destruction of machinery.**

**The cavitation tunnel is being developed to serve both national and international markets in the high speed craft and defence sectors. To date capabilities for investigating the performance of a range of under water bodies, propulsion devices and appendages have been developed including;**

- **Marine propellers;**
- **Remotely operated under water vehicles;**
- **Sonar tow fish;**
- **Active and passive control surfaces such as stabilisers, rudders and motion control devices for both surface and undersea vehicles; and,**
- **Waterjet propulsion devices.**

## Specifications

### General

<b>Manufacturer</b>	<b>GEC Alsthom</b>
<b>Height between centre lines</b>	<b>6 metres</b>
<b>Width between centre lines</b>	<b>14 metres</b>
<b>Honeycomb</b>	<b>0.15 metres thick x 6.35 mm hex mesh</b>
<b>Contraction Ratio</b>	<b>7.11</b>

### Test Section

<b>Dimensions</b>	<b>0.6 metres x 0.6 metres x 2.6 metres</b>
<b>Maximum velocity</b>	<b>12 metres/second</b>
<b>Velocity spatial non-uniformity</b>	<b>&lt; <math>\pm 2\%</math> mean velocity</b>
<b>Velocity temporal variation</b>	<b>&lt; 1% mean velocity</b>
<b>Max/min pressure</b>	<b>4.0/0.1 atmosphere absolute</b>
<b>Pressure temporal variation</b>	<b>&lt; <math>\pm 0.004</math> atmosphere absolute</b>
<b>Max/min cavitation number</b>	<b>5.5/0.2</b>

### Pump

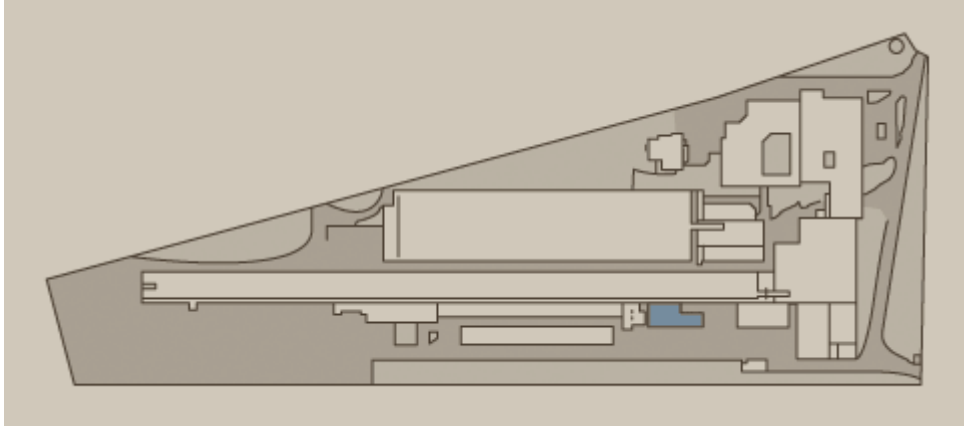
<b>6 bladed impeller and 14 bladed stator</b>	
<b>Power</b>	<b>164kW</b>
<b>Max rpm</b>	<b>1750</b>

### Control

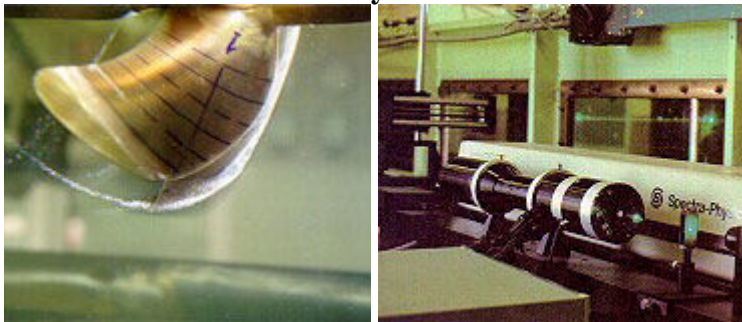
**Automatic or manual control of pressure and velocity**



## ***Cavitation Tunnel***

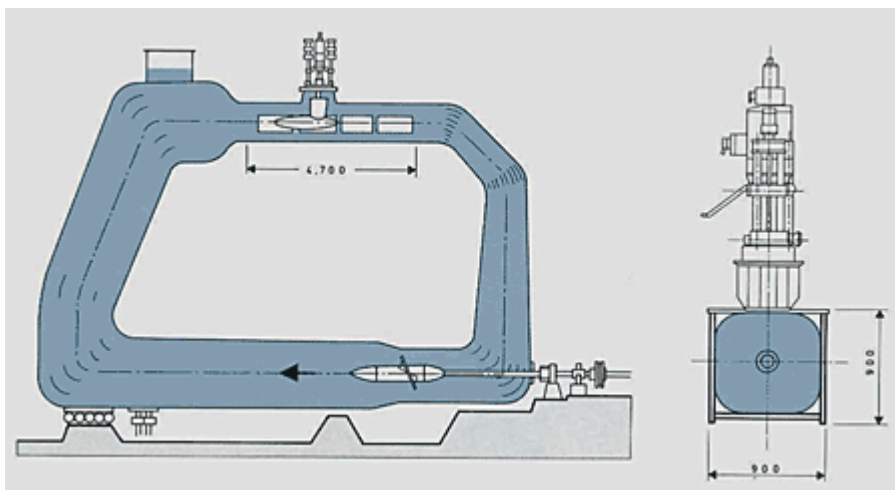


The Cavitation Tunnel of CEHIPAR, is used to check and optimize propeller design by observing the cavitation inception and development, erosion risk, pressure fluctuations and noise generation. The tests can be performed with the propeller in free-stream, behind a screen simulating the ship wake, or introducing a dummy body (partial model of the ship hull). Non-conventional propulsors are also tested. The measurement system includes a Laser-Doppler anemometer for non-intrusive measurement of the velocity of the water.

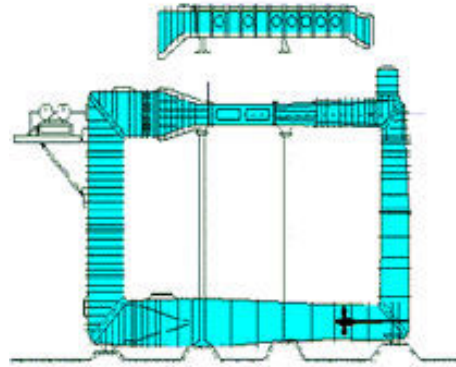


### **Specifications**

- Working section maximum flow speed: 11 m/s.
- Variable static pressure: 1.22 - 0.22 atm.
- Cavitation number range: 0.32 - 130.
- Propeller models diameter range: 150 to 450 mm.
- Wake flow simulation using wake screens and dummy models.



# Cavitation Tunnel



**Type K 15 B , Kempf & Remmers, Germany (vertical set-up), closed circulation, closed working section.**

**Dimensions:**

Length (between vertical axes) - 12m

**Other parameters:**

Min. cavitation number - 0.2

Absolute pressure, max. - 200kPa

**Instrumentation:**

**Propeller dynamometer No. 1**

Type J25, Kempf & Remmers, Germany, intended for tests of propeller models.

**Specifications:**

Thrust	$\pm 3000$ N
Torque	$\pm 150$ Nm
Rate of rotation	up to 60 rps
Accuracy	$\pm 0,15\%$

**Propeller dynamometer No. 2**

Type H41, Kempf & Remmers, Germany, intended for tests of propeller models (including ducted propellers) in axial and oblique flow. When operating jointly with dynamometer J25, coaxial (counter-rotating or tandem) propellers can be tested.

**Specifications:**

Thrust	$\pm 2000$ N
Torque	$\pm 100$ Nm
Rate of rotation	up to 50 rps
Propeller shaft inclination towards the flow	$\pm 12^\circ$
Accuracy	$\pm 0,15\%$

**Propeller dynamometer No. 3**

Type R46, Kempf & Remmers, Germany, watertight, intended for tests of propeller models behind ship

models in Measuring <a href="#">section No.2</a>	
<b>Specifications:</b>	
Thrust	$\pm 400$ N
Torque	$\pm 15$ Nm
Rate of rotation	up to 50 rps
Propeller shaft inclination towards the flow	$\pm 18^\circ$
Accuracy	$\pm$ 0,15%

<b>Six-component balance</b>	
Type H36, Kempf & Remmers, Germany intended for tests of ducted propellers, rudders, hydrofoils and various axisymmetric bodies.	
<b>Specifications:</b>	
Measuring range along axes	
forces:	$F_x = \pm 2000$ N; $F_y = \pm 500$ N; $F_z = \pm 2000$ N;
moments:	$M_x = \pm 100$ Nm; $M_y = \pm 800$ Nm; $M_z = \pm 200$ Nm;
Accuracy	$\pm 0,15\%$

- **Wake rake - fourteen Pitot-static tubes for measurement of axial flow distribution**
- **3-D Wake rake - six 5-hole Pitot tubes for measurement of 3-D flow distribution**
- **Pressure transducers**
- **Measuring amplifiers and filters**
- **Electronic counters**
- **Digital voltmeters**
- **Digital frequency meters**
- **High precision digital manometers**
- **Laser Doppler anemometer**
- **Strobe and video system**



### Measuring section No. 1 (square, rounded corners)

Dimensions:	Other parameters:
Lenght - 2.6m Width - 0.6m Depth - 0.6m	Max. flow velocity - 14m/s Max. propeller diameter - 0.3m

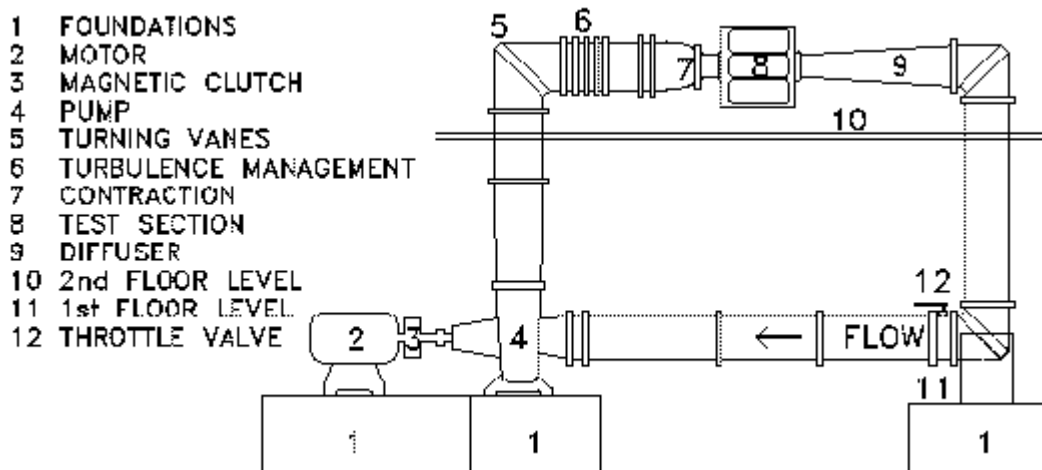


### Measuring section No. 2 (rectangular)

Dimensions:	Other parameters:
Lenght - 6m Width - 1.4m Depth - 0.7m	Max. flow velocity - 4.5m/s Max. propeller diameter - 5m



# SSC-SD High Speed, Low Turbulence Water Tunnel



## Specifications

- Flow is produced by a mixed flow pump driven by a 100Hp (75kw) electric motor through an eddy current variable speed clutch. Speed regulation is better than 0.1% and can be directly computer controlled.
- Maximum flow velocity is 15m/sec (30knots). The flow can be throttled by a butterfly valve so that flows as low as 0.075m/sec (0.15knots) can be produced.
- A combination of flow straighteners, honeycomb, screens and a contraction ratio of 6.25, create a low turbulence level in the jet of 0.16%, suitable for laminar flow studies.
- Absolute pressure in the test section can be varied from 10 to 210kPa (1.5 to 30psia).
- Models can be mounted on an [axisymmetric sting](#) , a [flat plate](#) or from the [side of the jet](#).

## Available Instrumentation

- Two component [Laser Doppler Velocimeter](#) (LDV) mounted on a computer controlled three axis traverse
- Various pressure transducers, load cells and hot film transducers.
- The LDV Argon-Ion laser can be reconfigured to make a laser sheet for flow visualization using fluorescent dye
- Video cameras and tape recorders (SVHS and Umatic)
- Nicolet 4094A digital oscilloscope
- Hewlett-Packard 35665A Spectrum Analyzer
- Strobe lights
- General purpose data acquisition computer (16 A/D, 4 D/A, RS-232, GPIB) with direct network connection

# The Emerson Cavitation Tunnel

## Tunnel Capabilities

- Propeller tests in uniform and non-uniform streams.
- Wake simulation using a wake screen including, if required, flat plate impulse measurements.
- Wake simulation using dummy hull model including, if required, hull surface impulse measurements.
- Tests with ducted propellers in uniform stream or with wake screens including measurements of duct thrust.
- Controllable pitch propeller tests
- Propeller model noise measurements.
- Drag forces on submerged bodies.
- Recording of nature and extent of cavitation, using still and video cameras.
- Flow measurement using LDA/PDA.



## Specification

<b>Description</b>	<b>Vertical plane, closed circulating</b>
<b>Test section size(LxBxH)</b>	<b>3.10 x 1.22 x 0.81m</b>
<b>Contraction ratio</b>	<b>4.271</b>
<b>Type of drive system</b>	<b>4 Bladed axial flow impeller with thruster control</b>
<b>Main pump power</b>	<b>300 Kw</b>

<b>Main pump rotational speed</b>	<b>242 rpm</b>
<b>Impeller diameter</b>	<b>1.4 m</b>
<b>Maximum velocity</b>	<b>15.5 knots (8 m/s)</b>
<b>Absolute pressure range</b>	<b>7.6 kN/m<sup>2</sup> (min) to 106 kN/m<sup>2</sup> (max)</b>
<b>Cavitation number range</b>	<b>0.5 (min) to 23 (max)</b>

### **Dynamometer Specifications**

**Type 1 Kempf & Remmers H33 propeller dynamometer**

**Max thrust ± 2943 N**

**Max torque ± 147 Nm**

**Max rpm 4000 rpm**

**Type 2 Kempf & Remmers R45 with vertical adjustable drive system and suitable for placement inside of hull models**

**Max thrust ± 687 N**

**Max torque 39 Nm**

**Max rpm 4000 rpm**

### **Acoustic Specifications**

**Type Bruel & Kjaer 8103 miniature hydrophone and associated instruments.**

**Location In a water filled, thick walled steel cylinder placed on a 30mm Perspex window above propeller**

# GARFIELD THOMAS WATER TUNNEL

Description	Closed Circuit, Closed Jet
Drive System	4-Blade Adjustable Pitch Impeller
Motor Power	2,000-hp Variable Speed (1,491 kW)
Working Section Maximum Velocity	18.29 m/s
Maximum and Minimum Absolute Pressures	413.7 to 20.7 kPa
Cavitation Number Range	>0.1 dependent on velocity and/or J-range
Instrumentation	Propeller dynamometers, 5-hole probes, pitot probes, lasers, pressure sensors, hydrophones, planar motion mechanism, force balances, accelerometers, acoustics arrays
Torque and Thrust Dynamometers	Model internally mounted, 150-hp limit (111.85 kW)
Propeller or Model Size Range	Model size from 76.2-mm to 635.0-mm inner diameter
Tests Performed	Forces, flowfield, and pressure distributions on bodies of revolution, hydrofoils, propeller, etc.; cavitation performance and noise measurements of propellers, foils, hydrodynamic shapes, etc.; steady state and time-dependent force and torque measurements on powered models; flow visualization, body acceleration levels, shaft/body unsteady forces, and radiated noise
Other Remarks	The tunnel turbulence level is 0.1 percent in test section. Air content can be controlled as low as 1 ppm per mole. Measurement can be made of hydrodynamic functions for stability and control of submerged vehicles. A directional hydrophone system is used for relative acoustic measurements.
Published Description	<p>Lehman, ARL Penn State Report No. NORD 16597-56, Fluid Dynamics Department, Applied Research Laboratory, The Pennsylvania State University, 1959.</p> <p>Marboe, R. C., et. al., "Hydroacoustic Research capabilities in the Large Water Tunnel at ARL-Penn State," <i>Proceedings of Symposium on Flow Noise Modeling, Measurement, and Control</i>, NCA-VOL 15/FED-VOL 168, pp. 125-135, ASME Winter Annual Meeting, 28 Nov-3 Dec., 1993.</p>



# 12-INCH WATER TUNNEL

<b>Description</b>	<b>Closed Circuit, Closed Jet</b>
<b>Test Sections</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Circular 304.8 mm dia. x 762.0 mm long</li> <li>2. Rectangular 508.0 mm x 114.3 mm x 762.0 mm long</li> </ol>
<b>Drive System</b>	<b>Mixed Flow Peerless Pump</b>
<b>Motor Power</b>	<b>150 hp (111.8 kW)</b>
<b>Working Section Maximum Velocity</b>	<b>24.38 m/s</b>
<b>Maximum and Minimum Absolute Pressures</b>	<b>413.7 to 20.7 kPa</b>
<b>Cavitation Number Range</b>	<b>&gt;0.1 dependent on velocity</b>
<b>Instrumentation</b>	<b>Lasers, pressure sensors, hydrophones</b>
<b>Model Size Range</b>	<b>50.8-mm maximum diameter</b>
<b>Tests Performed</b>	<b>Steady state and time-dependent force and pressure measurements on unpowered models; noise measurements on cavitating models; three-dimensional flow problems (circular section); two-dimensional flow problems (rectangular section); axial-flow pump tests</b>
<b>Other Remarks</b>	<b>Independent gas control of air content; water filtration with 25-micrometer filters; intermittent operation with drag-reducing additive injection; partial neutralization of additive downstream of test section</b>
<b>Published Description</b>	<b>Lehman, ARL Penn State Report No. NORD 16597-56, 1959.</b>

## 6-INCH WATER TUNNEL

<b>Description</b>	<b>Closed Circuit, Closed Jet</b>
<b>Drive System</b>	<b>Axial-Flow Pump</b>
<b>Motor Power</b>	<b>25 hp (18.64 kW)</b>
<b>Working Section Maximum Velocity</b>	<b>21.34 m/s</b>
<b>Maximum and Minimum Absolute Pressures</b>	<b>861.9 to 20.7 kPa</b>
<b>Cavitation Number Range</b>	<b>&gt;0.1 dependent on velocity and pressure</b>
<b>Instrumentation</b>	<b>Pressure transducers, lasers</b>
<b>Temperature</b>	<b>Ambient</b>
<b>Tests Performed</b>	<b>Effect of polymers on axial-flow pumps; surface roughness effects on cavitation; probe calibration</b>
<b>Other Remarks</b>	<b>Air content by vacuum pump; water filtered through 25-micron filters as tunnel is filled</b>
<b>Published Description</b>	<b>Kaku, M.S. Thesis, ARL Penn State, 1962.</b>

## 1.5-INCH ULTRA-HIGH SPEED CAVITATION TUNNEL

<b>Description</b>	<b>Closed Circuit, Closed Jet</b>
<b>Drive System</b>	<b>Centrifugal Variable Speed Drive</b>
<b>Motor Power</b>	<b>75 hp (55.9 kW)</b>
<b>Working Section Maximum Velocity</b>	<b>83.8 m/s</b>
<b>Maximum and Minimum Absolute Pressures</b>	<b>8,274.0 to 41.4 kPa</b>
<b>Cavitation Number Range</b>	<b>&gt;0.01 dependent on tunnel velocity</b>
<b>Instrumentation</b>	<b>Pressure and temperature sensors, lasers.</b>
<b>Temperature</b>	<b>16°C to +176°C</b>
<b>Model Size Range</b>	<b>12.7-mm maximum diameter</b>
<b>Tests Performed</b>	<b>Incipient and dissonant cavitation studies; development cavitation studies; cavitation damage</b>
<b>Other Remarks</b>	<b>Stainless steel tunnel; bronze pump; three filter banks for removal of water, acids, solid particles (10 micrometers) depending on fluid media</b>
<b>Published Description</b>	<b>Weir, Billet, and Holl, ARL Penn State TM 75-188, 1975.</b>

# فصل دوم

معرفی اجزاء مختلف تونل آب

پس از معرفی انواع مختلف تونل آب و ارائه چند نمونه از تونل آب در فصل قبل ، در این فصل در نظر داریم تا اجزاء تشکیل دهنده تونل آب اعم از اجزاء اصلی و اجزاء کنترلی را معرفی کنیم .

## اجزاء اصلی تونل آب :

هر تونل آب از پنج قسمت اصلی زیر تشکیل شده است :

۱- پمپ (محرک) :

این قسمت آب موجود در تونل آب را به حرکت در می آورد و سرعت و فشار مورد نظر را حدودا تامین می کند ، معمولا در تونل آب از دو نوع پمپ سانتریفیوژ یا پمپ محوری استفاده می کنند که البته نوع محوری پر کاربرد تر است .

۲- مقطع آزمایش (Test Section) :

در این ناحیه مدل مورد آزمایش و تجهیزات اندازه گیری مثل فشار سنج ها و ... و همچنین ابزار های کنترلی مانند سیستم پشتیبان مدل دینامیک قرار می گیرد.

۳- خطی ساز (Honeycomb) :

پروفیل سرعت جریان آب در مقطع آزمایش باید دارای توزیع یکنواخت بوده و جریان در آن کمترین آشفتگی را داشته باشد . هوای ایجاد شده توسط پمپ به تنهایی یکنواخت نیست و این جریان برای استفاده در تونل آب مناسب نمی باشد . لذا به کمک توری ها و شبکه لانه زنبوری از غیر یکنواختی و آشفتگی جریان آب کاسته می شود .

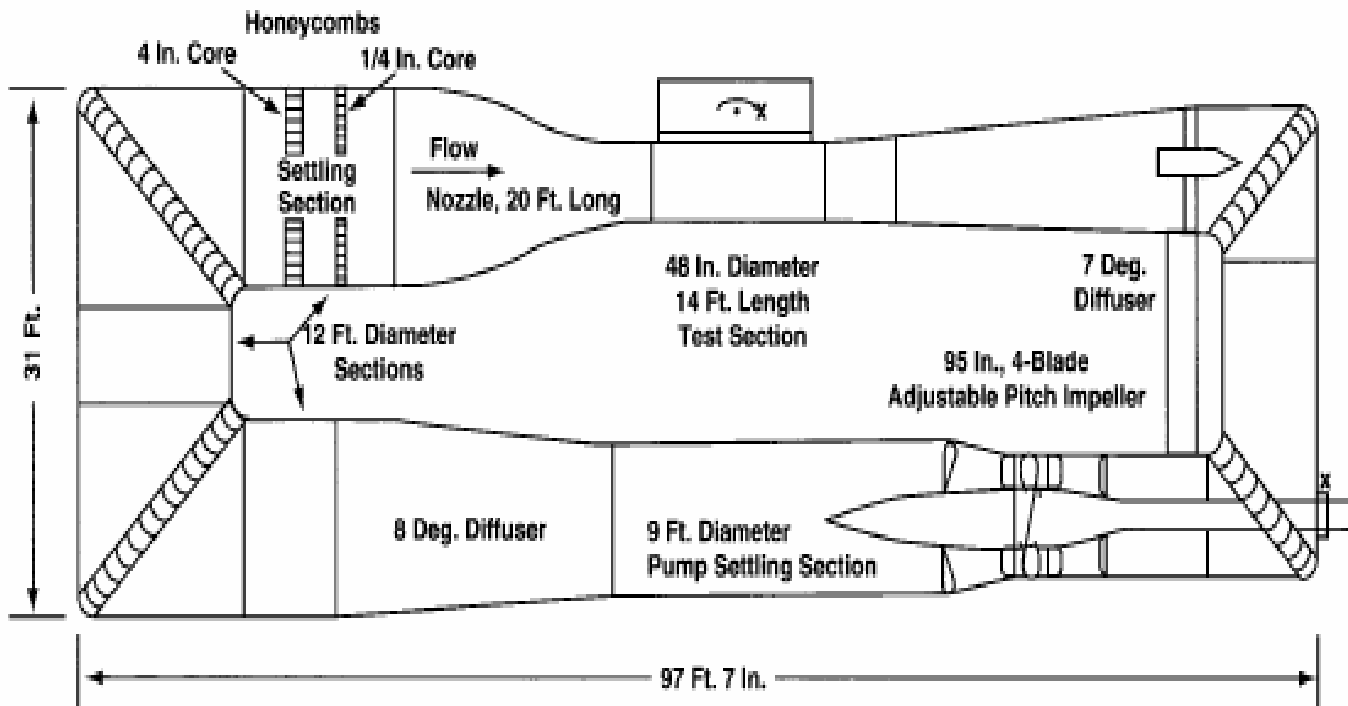
۴- نازل (Nozzle) :

نازل جریان آب را با حجم زیاد و سرعت پایین از ناحیه خطی ساز دریافت می کند و آن را با سرعت بالا و حجم پایین بدون آشفتگی در جریان به مقطع آزمایش می دهد .

۵- پخش کننده (Diffuser) :

این ناحیه معمولا بعد از مقطع آزمایش قرار می گیرد و وظیفه آن کاهش سرعت جریان آب می باشد.

در شکل زیر تمامی این قسمتها در یک تونل آب نمایش داده شده است .



شکل ۲-۱) نمایی از یک تونل آب مدار بسته

## مقطع آزمایش :

مهمترین قسمت در یک تونل آب مقطع آزمایش می باشد که در آن نمونه مورد نظر به منظور انجام آزمایشات لازم قرار می گیرد. برای مقطع آزمایش رعایت چند نکته ضروری است :

- اولاً در مقطع آزمایش باید قطعه به گونه ای قرار گیری تا فاصله کافی را از دیواره های تونل آب داشته باشد در غیر این صورت در مجاورت دیواره جریان با آشفتگی زیادی همراه خواهد بود و اندازه گیری ها دقت کافی را نخواهند داشت .
  - ثانیاً جریان در هنگام ورود به داخل مقطع آزمایش باید کاملاً یکنواخت باشد تا جریان در هنگام عبور از روی نمونه دچار آشفتگی نشود.
  - مقطع آزمایش باید دارای فضای کافی به منظور قرار گرفتن ابزار های کنترلی در آن باشد ، مانند : فشارسنجها ، دبیسنجها ، سیستم پشتیبان مدل دینامیک و ...
  - در صورت امکان باید سطحی از مقطع آزمایش پوشش شفاف و شیشه ای داشته باشد تا آزمایشگر بتواند مدل آزمایش را رویت و تغییرات آن را بررسی کند.
- مقاطع آزمایش در انواع مختلفی ساخته شده و مورد استفاده قرار می گیرند :

### ۱- مقطع آزمایش چهارگوش :

در این نوع مقاطع با مشکلاتی مواجه هستیم از جمله اینکه بعلاوه وجود سیال آب ، جریان در زاویه ها آشفتگی خواهد بود و عملاً این قسمت به عنوان فضای مرده در نظر گرفته می شود همچنین با افزایش سرعت در مقطع آزمایش این آشفتگی ها به سمت مرکز متمایل شده و بخش بزرگتری از مقطع آزمایش را فرا می گیرند.

با وجود تمام این مشکلات تونل های آب زیادی از این نوع مقطع آزمایش استفاده می کنند و کار برد زیادی دارد.

۲- مقطع آزمایش گرد :

این نوع مقاطع نیز کاربرد ی بوده و در سرعت های بالا به راحتی قابل استفاده هستند. میزان تلفات در این نوع مقاطع نیز کمتر می باشد .



شکل ۲-۲) نمونه ای از مقاطع آزمایش مربعی



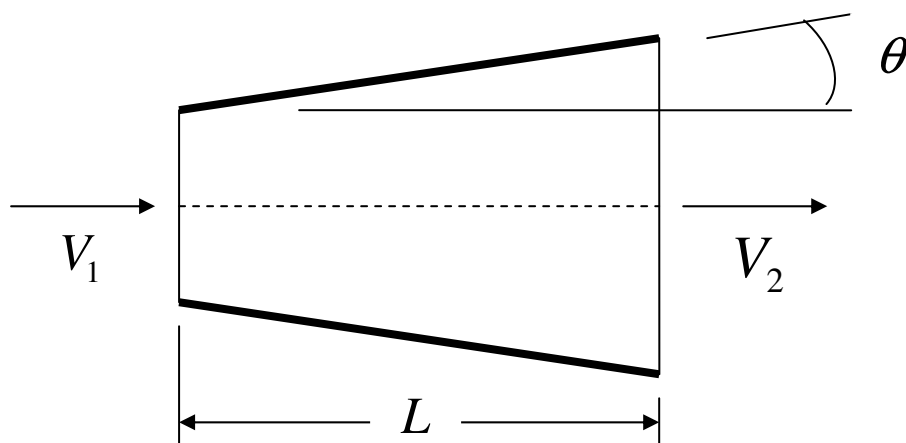
شکل ۲-۳) نمونه ای از مقاطع آزمایش گرد



## پخش کننده :

همانطور که می دانیم وظیفه پخش کننده ، کاهش سرعت و افزایش فشار در خروج می باشد . در تونل های آب بر حسب نوع تونل و بزرگی آن ممکن است از یک یا دو پخش کننده استفاده شود. یک پخش کننده همواره بعد از مقطع آزمایش قرار می گیرد تا سرعت زیادی را که جریان در مقطع آزمایش به منظور انجام آزمایشات مورد نظر داشته است را کاهش داده و تلفات در سایر قسمتهای تونل آب را کاهش دهد ، همچنین این کاهش سرعت به منظور جلوگیری از آسیب رسیدن به پمپ نیز صورت می گیرد زیرا فشار در ورودی پمپ باید در محدوده مشخصی قرار داشته باشد و اگر فشار خیلی پایین باشد احتمال کاویتاسیون در پمپ و خوردگی در پره ها وجود دارد .

در شکل زیر یک پخش کننده با مشخصات آن نمایش داده شده است که در آن زاویه انحراف دیواره در پخش کننده ( $\theta$ ) و طول پخش کننده ( $L$ ) می باشد.



شکل ۲-۴) نمایی از یک پخش کننده و مشخصات آن

پخش کننده دوم در تونل های آب پر سرعت و بزرگ به کار رفته و معمولاً بعد از پمپ قرار می گیرد زیرا در تونلهای آب بزرگ ، پمپ های قوی به کار می روند و سرعت در خروجی آنها بالا است لذا به منظور کاهش سرعت و تلفات در حین حرکت سیال از یک دیفیوزر بعد از پمپ استفاده می شود .

در پخش کننده ها یک پارامتر مهم وجود دارد و آن هم زاویه انحراف دیواره در پخش کننده ( $\theta$ ) می باشد و باید به حدی باشد که پدیده جدایش لایه مرزی روی دیواره اتفاق نیفتد طی تحقیقات انجام شده زاویه مخروط معادل ( $2\theta$ ) در پخش کننده تونل آب ۶ تا ۸ درجه در نظر گرفته می شود ، این زاویه باعث تغییرات کم سرعت نسبت به مقاطع مختلف پخش کننده می شود.

با توجه به قانون پیوستگی ، می توان سرعت جریان را در هر مقطعی از پخش کننده بر حسب سرعت در مقطع آزمایش به صورت زیر بدست آورد :

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

در این رابطه  $V_1, V_2$  به ترتیب سرعت جریان در هر مقطعی از پخش کننده و سرعت جریان در مقطع آزمایش می باشند ،  $A_1, A_2$  نیز به ترتیب سطوح مقاطع در مقطع مورد نظر در پخش کننده و مقطع آزمایش می باشند.



شکل ۲-۵) یک نمونه پخش کننده هوا

## نازل :

تمامی تونل های آب دارای نازلی قبل از مقطع آزمایش و بعد از قسمت خطی ساز هستند. نازل جریان آب را از خطی ساز دریافت نموده و آن را به مقطع آزمایش تحویل می دهد. از نازل در تونل آب به چند دلیل استفاده می شود :

الف- کاهش میزان غیر یکنواختی جریان ، با ایجاد یک پروفیل نسبتاً یکنواخت در قسمت ورودی مقطع آزمایش .

ب- کاهش میزان آشفتگی جریان .

ج- افزایش سرعت جریان و کاهش بارهای دینامیکی و تلفات در توری ها و شبکه لانه زنبوری .

مهمترین پارامتری که نحوه تاثیر نازل بر این موارد را تعیین می کند ، ضریب انقباض سطح ،  $CR$  ، (نسبت سطح مقطع ورودی نازل به سطح مقطع خروجی آن ) است. بعد از تعیین مقدار  $CR$  دو پارامتر دیگری که اهمیت دارند ، شکل پروفیل نازل و نیز طول آن است که روی یکنواختی پروفیل سرعت و نیز توسعه لایه مرزی موثرند . برای طراحی نازل از دو روش محاسباتی و طراحی به کمک چشم استفاده کرده اند. در روش طراحی به کمک چشم ماکتی از نازل را می سازند و آن را در تونل آب قرار می دهند ، با بررسی وضعیت جریان در نازل شبکه بهینه نازل را تعیین می کنند.

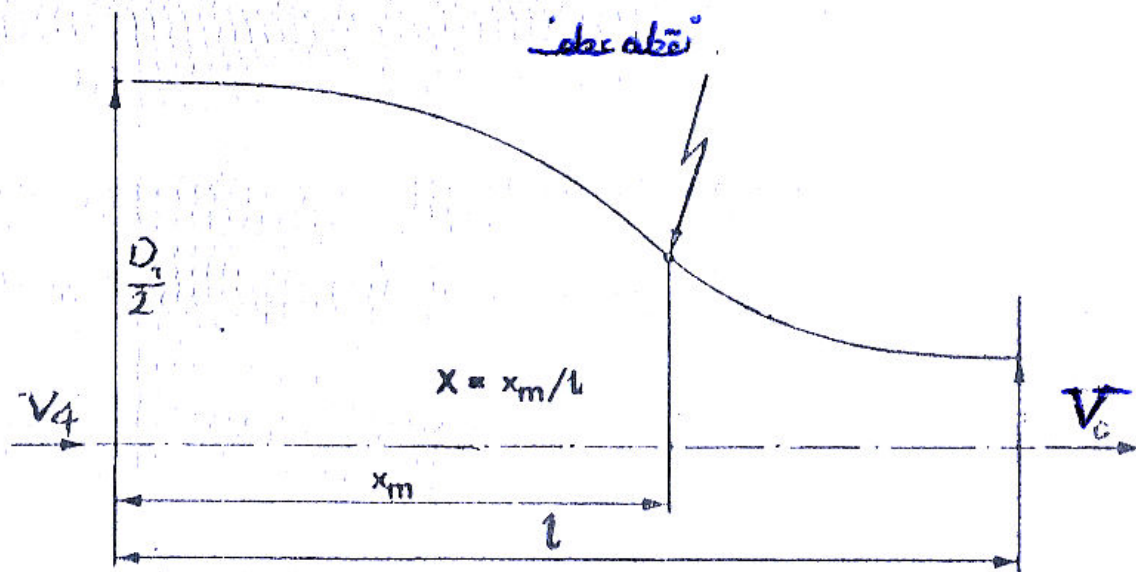
در ادامه بطور خلاصه یکی از روشهای طراحی نازل را مطرح و آن را مطالعه می کنیم.

مورل ( Morel , 1975 ) روشی را برای طراحی بهینه نازلها با تقارن محوری ارائه کرده است .

شکل نازل را بصورت دو قسمت محدب و مقعر و معادله پروفیل آن را به صورت تابع توانی در نظر گرفت. بنابراین دو عامل مشخص کننده شکل نازل محل قطع عطف این پروفیل - محلی که تحدب به تقعر تبدیل می شود که آنرا با  $X = \frac{x_m}{l}$  نشان داد - و نیز توان تابع است. مورل با محاسبات خود نشان داد که تابع توانی درجه سه نتایج مطلوبی می دهد. وی معادله شکل پروفیل نازل را به صورت زیر بیان کرد (شکل ۲-۶):

$$f = 1 - \frac{1}{X^2} \left(\frac{x}{l}\right)^3 \quad \& \quad \frac{x}{l} \leq X \quad (1-2)$$

$$f = \frac{1}{(1-X)^2} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^3 \quad \& \quad X < \frac{x}{l} \quad (2-2)$$



شکل ۲-۶) پروفیل نازل حاصل از دو منحنی درجه سه متصل به هم

در این روابط،  $X$ ، نسبت فاصله نقطه عطف پروفیل تا ورودی نازل ( $x_m$ ) به طول نازل  $l$ ،

طول نازل  $x$ ، طول نقاط واقع بر پروفیل  $f$ ، تابع بدون بعد که مقدار آن وابسته به نسبت  $\frac{x}{l}$

است . با معلوم بودن  $X$  ، و داشتن قطر ورودی ( $D_1$ ) و طول نازل این معادلات مشابه شکل ۲-۶ رسم می شوند . لازم به ذکر است که این روش برای طراحی نازل هایی با مقطع دایره ای است ، اما مورل اشاره می کند که این روش برای طراحی نازل هایی با مقطع مربعی نیز می توان استفاده کرد . اما باید توجه داشت روش سعی و خطا بر اساس مقطع دایره ای انجام شود .

اولین مرحله در طراحی نازل به روش مورل انتخاب و تعیین ضریب انقباض نازل است . مطابق تعریف ، ضریب انقباض نازل عبارتست از نسبت سطح مقطع ورودی نازل به سطح مقطع خروجی آن است . با توجه به اینکه خروجی نازل به ورودی مقطع آزمایش متصل می شود ، بنابراین مقطع خروجی نازل ابعادی مساوی با مقطع آزمایش دارد ولی ابعاد مقطع ورودی نازل مشخص نیست . و می توان آن را از ابعاد محل قرار گیری پمپ و لوله خروجی از آن که معمولاً متصل به ورودی نازل است بدست آورد.

مورل بعد از انتخاب ضریب انقباض ، معیار طراحی نازل را یکنواختی جریان خروجی از نازل ، جدایش جریان ، ضخامت لایه مرزی خروجی از نازل ، هزینه ها و فضا معرفی می کند و پارامتر های طراحی نازل را طول نازل و پروفیل آن بیان می کند . مورل از چهار معیار طراحی که در بالا بیان شد توجه خود را به دو معیار یکنواختی و جدایش آن متمرکز کرده و آنها را به عنوان مهمترین معیارها در طراحی نازل معرفی می کند.

میزان غیر یکنواختی پروفیل سرعت در خروجی نازل ( $\ddot{u}_2$ ) بصورت رابطه زیر تعریف می شود :

$$\ddot{u}_2 = \frac{(V - U_c)_2}{U_{2,\infty}} \quad (۲-۳)$$

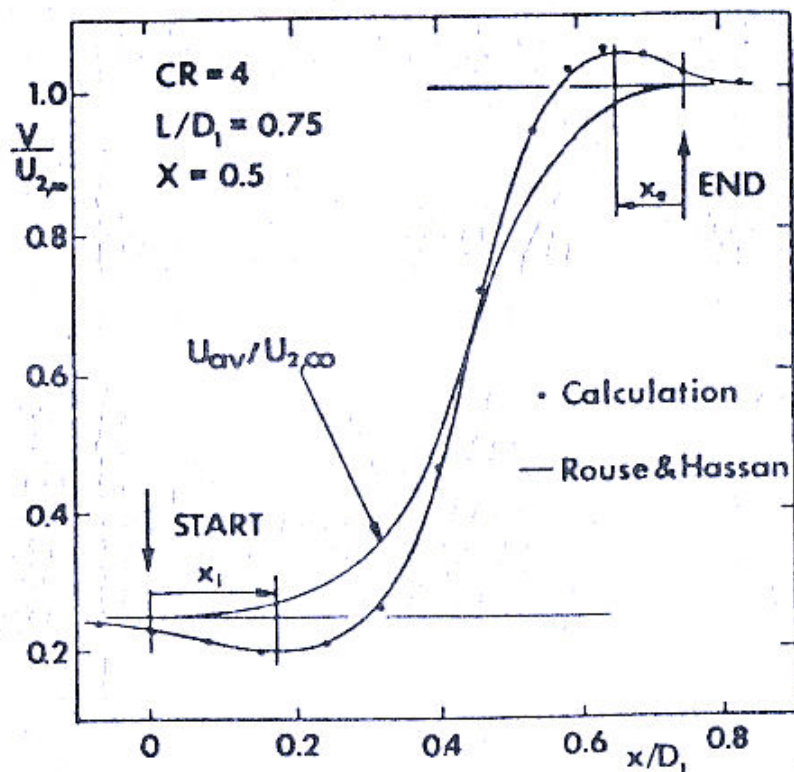
که  $V$  ، سرعت در دیواره نازل ( $m/s$ ) ،  $U_c$  ، سرعت در مرکز جریان ( $m/s$ ) و  $U_{2,\infty}$  ، اشاره به سرعت جریان در پایین دست قسمت خروجی نازل دارد ( زیر نویس ۲ اشاره به قسمت خروجی نازل دارد ).

محاسبات عددی مورل نشان داد که برای توابع درجه سه ای که بیان کننده شکل نازل هستند ، طراح تنها نیاز به دانستن دو ضریب فشار در دیواره دارد که به صورت زیر تعریف می شود :

$$C_{pe} = 1 - \left(\frac{V_e}{U_{2,\infty}}\right)^2 \quad (1-4-2)$$

$$C_{pi} = 1 - \left(\frac{V_i}{U_{1,\infty}}\right)^2 \quad (2-4-2)$$

زیر نویس های  $i$  و  $e$  در این دو معادله اشاره به نقاطی دارد که سرعت در کنار دیواره نازل به ترتیب حداقل و حداکثر است . در شکل ۲-۷ توزیع سرعت جریان در یک نازل با ضریب انقباض  $CR=4$  و نسبت طول به قطر ورودی نازل ،  $\frac{l}{D_1} = 0.75$  ، رسم شده است ، این مقادیر هم از طریق محاسبه - نسبت سرعت متوسط در مقطع نازل به سرعت در پایین دست خروجی نازل  $\left(\frac{U_{av}}{U_{2,\infty}}\right)$  در نظر گرفته شده است - و هم از طریق آزمایش بدست آمده اند. با توجه به این شکل نقاطی که در آن سرعت حداکثر و حداقل است به ترتیب با  $x_e$  و  $x_i$  نشان داده شده اند.



شکل ۲-۷) توزیع سرعت روی دیواره نازل

مقدار  $C_{pi}$  ، با استفاده از معیار جدایی استراتفورد انتخاب می شود . معیار استراتفورد برای جدایی لایه مرزی از روی یک دیواره به صورت زیر است :

$$C_p \left( x \frac{dC_p}{dx} \right)^{1/2} = 0.35 (10^{-6} Re_x)^{0.1} \quad (5-2)$$

که در این رابطه  $C_p$  ، ضریب فشار روی دیواره و به صورت زیر تعریف می شود :

$$C_p = 1 - \left( \frac{U}{U_m} \right)^2 \quad (6-2)$$

که  $U$  ، سرعت در دیواره و  $U_m$  سرعت در بالا دست این مقطع است .

عدد رینولدز در این حالت به صورت زیر تعریف می شود :

$$\text{Re}_x = \frac{U_m x}{\nu} \quad (7-2)$$

$x$  ، فاصله موضعی از شروع لایه مرزی مغشوش ( $m$ ) و  $\nu$  ، لزجت سینماتیکی آب است.

مورل برای طراحی نازل تقریب های زیر را در نظر گرفت :

۱- جدایش جریان در نزدیک نقطه ای است که ، فشار حداکثر اتفاق می افتد ، یعنی

جائیکه ضریب فشار  $0.95C_{pi}$  است .

۲- گرادیان فشار توسط متوسط گرادیان فشار بین نقاط  $C_{p1} = 0.4C_{pi}$  و  $C_{p2} = 0.8C_{pi}$

تخمین زده می شود ( شکل ۷-۲ ) یعنی :

$$\frac{dC_p}{dx} \approx 0.4 \frac{C_{pi}}{s} \quad (8-2)$$

$s$  ، فاصله بین نقاط  $C_{p1}, C_{p2}$  بر حسب متر می باشد .

۳- فاصله  $x$  از دو قسمت تشکیل شده است . یکی فاصله نقطه شروع نازل تا نقطه جدایش

، که این طول کمی کوچکتر از  $x_i$  ( فاصله شروع نازل تا محلی که فشار دیواره حداکثر

است ) می باشد ( شکل ۹-۲ ) و برابر  $0.9x_i$  در نظر گرفته می شود و دیگری  $x_0$  ، فاصله

موضعی لایه مرزی تا شروع نازل است . شروع لایه مرزی را می توان از محل آخرین لانه

زنبوری در نظر گرفت . بنابراین :

$$x = x_0 + 0.9x_i \quad (9-2)$$

لذا ،  $C_{pi}$  ، به صورت زیر تعریف می شود :

با قرار دادن روابط ۸-۲ و ۹-۲ در معادله ۵-۲ طرف اول این معادله به صورت زیر در

خواهد آمد :

$$\begin{aligned} C_p \left( x \frac{dC_p}{dx} \right)^{1/2} &= C_{pi} \left( \frac{x_0 + 0.9x_i}{s} \times 0.4C_{pi} \right)^{1/2} \\ &= 0.6C_{pi}^{3/2} \left( \frac{x_0 + 0.9x_i}{s} \right)^{1/2} \end{aligned}$$



با قرار دادن این معادله ، بجای طرف اول معادله ۴-۵ ، به صورت زیر بدست می آید :

$$C_{pi} = 0.7 \left( \frac{x_0 + 0.9x_i}{s} \right)^{-1/2} (10^{-6} Re_x)^{1/15} \quad (۱۰-۲)$$

مورل برای ضرایب انقباض مختلف تغییرات  $\frac{s}{D_1}$  را برحسب  $C_{pi}$  بدست آورد ( شکل ۲-۸)

. نتیجه دیگری که مورل از محاسبات خود بدست آورد ، وابستگی  $\ddot{u}_2$  به  $C_{pe}$  توسط یک

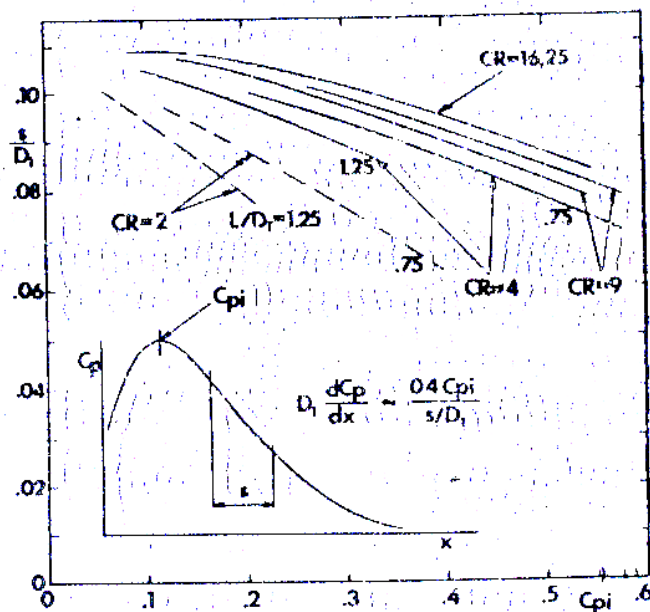
رابطه خطی ساده است که حاکی از حساسیت کم آن به هندسه نازل است در تمام حالات

که  $C_{pe} \leq 0.2$  است ،  $\ddot{u}_2 = (0.35 - 0.4)C_{pe}$  است . لذا اگر حداکثر غیر یکنواختی سرعت ،

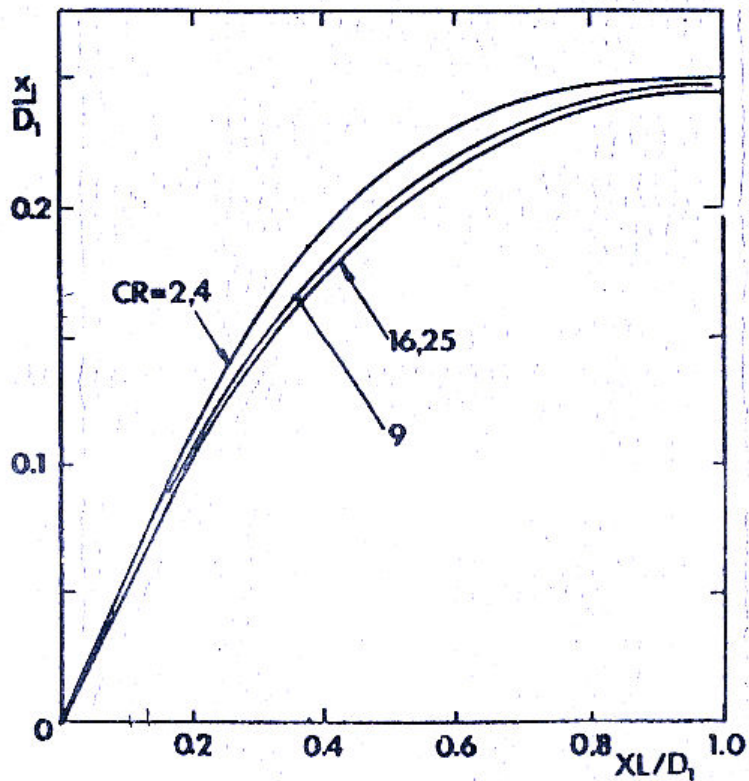
$\ddot{u}_2 = 0.2$  ، در مقطع آزمایش مدنظر باشد باید  $C_{pe} \leq 0.06$  انتخاب شود . همچنین مورل

نسبت قابل قبول  $\frac{l}{D_1}$  برای نازل های مختلف ۰٫۷۵ و ۰٫۸۵ و ۱ و ۱٫۲۵ بیان می کند که

معمولا  $\frac{l}{D_1} = 1$  توصیه می شود .



شکل ۲-۸) گرادیان فشار در دیواره نازل



شکل ۲-۹) فاصله از شروع نازل تا فشار حداکثر برحسب فاصله از شروع نازل تا نقطه عطف

با توجه به مطالبی که در بالا به آنها اشاره شد ، مراحل طراحی نازل به صورت سعی و

خطای زیر است :

$$۱- \text{ حدس } \frac{x_i}{D_1}$$

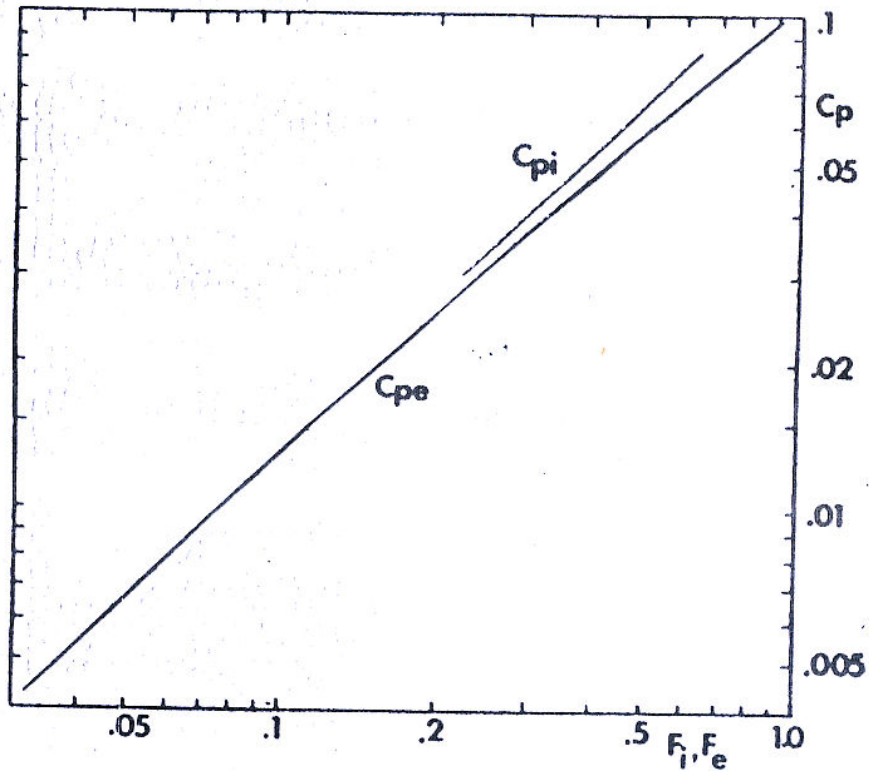
۲- محاسبه  $C_{pi}$  از رابطه ۲-۱۰ .

۳- محاسبه  $X$  با استفاده از رابطه زیر :

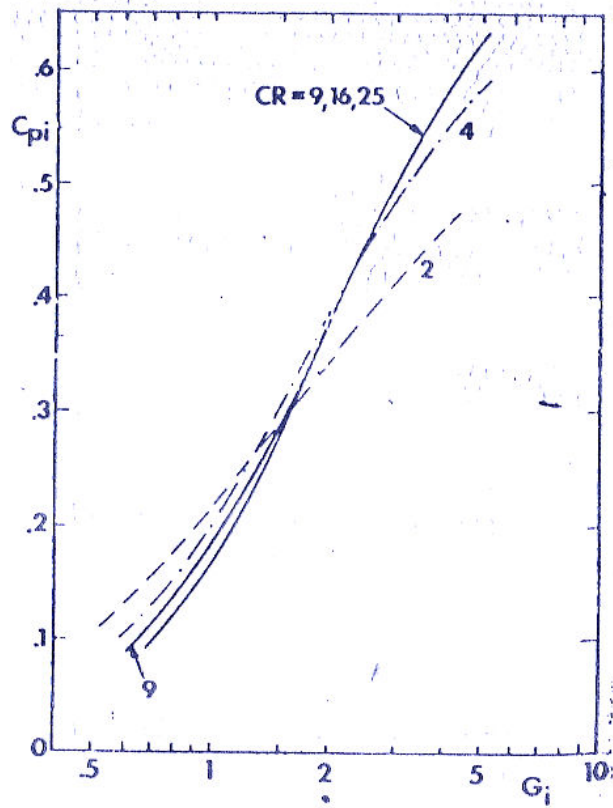
$$X^{1/2}(1-X)^{-2/3} = F_e^{1/3} G_i^{-1/2} m^{1/2} (m-1)^{1/6} \quad (۱۱-۲)$$

$m$  در این رابطه نسبت قطر ورودی نازل به قطر خروجی نازل ،  $G_i, F_i, F_e$  کمیت های بدون

بعدی هستند که با استفاده از شکل های ۲-۱۰ و ۲-۱۱ تعیین می شوند.



شکل ۲-۱۰) وابستگی ضرایب فشار  $C_{pe}, C_{pi}$  به پارامترهای بی بعد  $F_i, F_e$

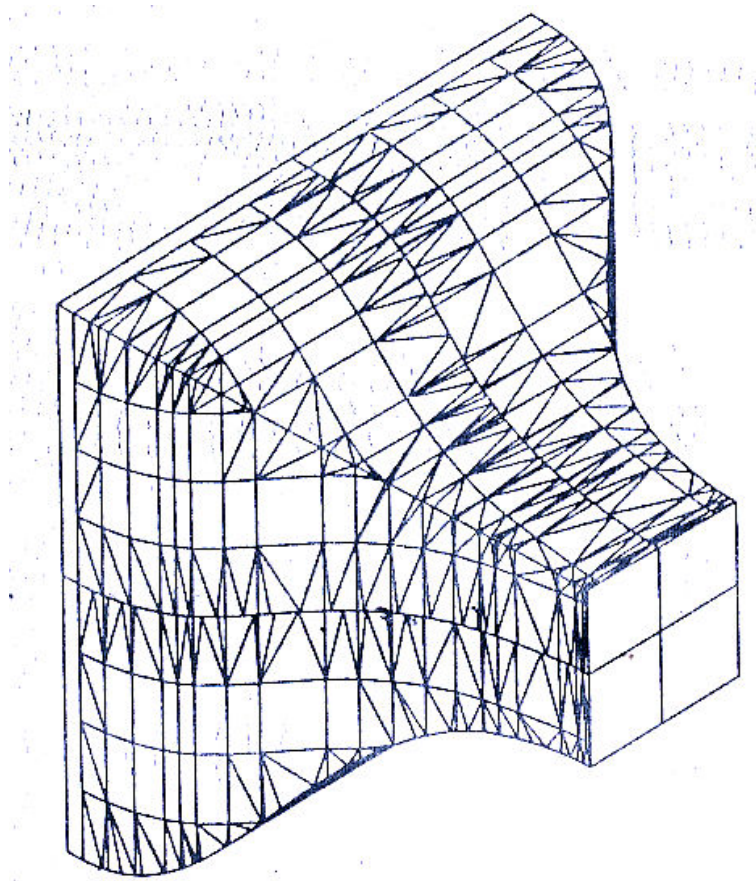


شکل ۲-۱۱) وابستگی ضریب فشار  $C_{pi}$  به پارامتر بی بعد  $G_i$

۴- تعیین  $\frac{x_i}{D_1}$  از شکل ۲-۸

۵- اگر جواب همگرا نشد ، مراحل ۱ تا ۴ تا موقعی تکرار شوند که جواب برای  $X$  همگرا شود .

مورل  $\frac{x_0}{D_1}$  را برابر ۰,۲ تا ۰,۳ پیشنهاد کرده است و بیان می کند این طول به اندازه ای است که نازل باعث غیر یکنواختی جریان در آخرین لانه زنبوری نمی شود . همچنین توصیه می کند که به انتهای نازل یک کانال با مقطع ثابت اضافه شود تا باعث کاهش بیشتر در غیر یکنواختی جریان شود .



شکل ۲-۱۲) نمایی سه بعدی از یک نمونه نازل ساخته شده

## کاهش آشفته‌گی جریان توسط شبکه لانه زنبوری و توری ها :

پروفیل سرعت جریان در مقطع آزمایش باید دارای توزیع یکنواخت و خطوط جریان در آن به صورت خط مستقیم باشند . آبی که توسط پمپ برای تونل آب فراهم می شود یکنواخت نیست و این جریان برای استفاده در تونل آب مناسب نمی باشد . از این رو به کمک توری ها و شبکه لانه زنبوری که قبل از مقطع جریان و نازل قرار می گیرند علاوه بر کاهش غیر یکنواختی جریان ، خطوط جریان نیز در امتداد خطی راست حرکت می کنند . توری ها آشفته‌گی محوری را بیش از آشفته‌گی جانبی کاهش می دهند و باعث ایجاد افت فشار نسبتا بزرگی در جهت جریان می شوند ، که سرعتهای بزرگتر را بیشتر از سرعت های کوچکتر کاهش می دهد ، لذا سرعت محوری یکنواختی را ایجاد می کنند.

توری ها با تخلخل کمتر باعث ایجاد ناپایداری در مقطع آزمایش می شوند.

شبکه لانه زنبوری افت فشار کمی را ایجاد می کند (قطر روزه ها در شبکه لانه زنبوری نسبت به توری ها خیلی بزرگتر است ) ، بنابراین تاثیر کمی روی سرعت محوری دارد ، اما به علت طول شبکه ها ، سرعت های جانبی را کاهش می دهند .

معمولا شبکه های لانه زنبوری بعد از توری ها قرار می گیرند تا افت فشار کمتر و آشفته‌گی کمتری را در حین عبور جریان داشته باشیم .

در تونل های آب مخصوصا در سرعت های بالا فقط از شبکه لانه زنبوری استفاده می شود و توری به کار نمی رود زیرا اولاً در سرعت های بالا و با توجه به اینکه سیال آب می باشد افت فشار های خیلی بزرگی خواهیم داشت و ثانياً با توجه به وجود سیال آب آشفته‌گی ها در جهت محوری کوچک هستند و غالبا می توان آنها را با همان شبکه لانه زنبوری رفع نمود.

## Settling Chamber

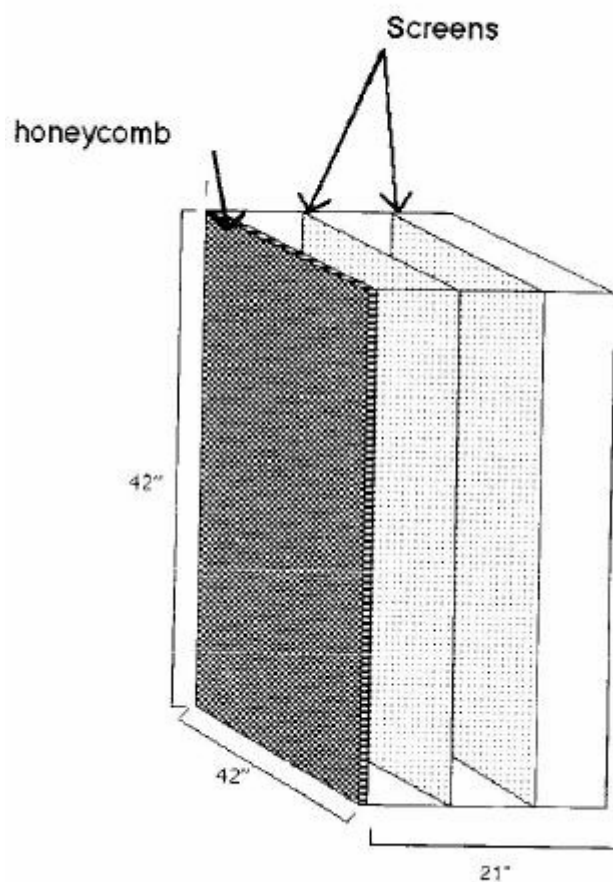


Figure 3

شکل ۲-۱۳) موقعیت قرار گرفتن توری و شبکه لانه زنبوری نسبت به هم

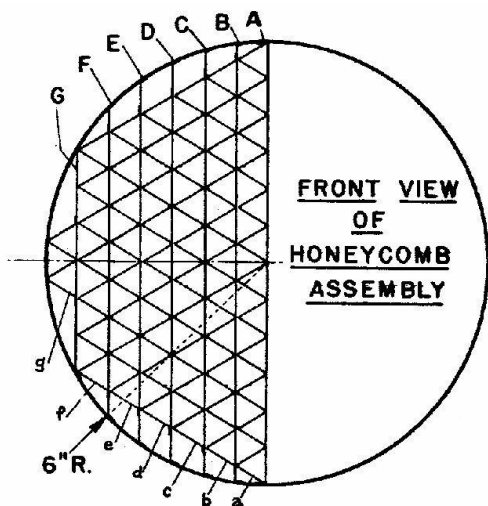
معمولاً در تونل های آب از چند شبکه لانه زنبوری استفاده می شود که با قطر های مختلف ( در راستای جریان قطر کم می شود ) در یک امتداد قرار گرفته اند مزیت این کار ، کاهش میزان افت فشار و همچنین جلوگیری از ایجاد آشفتگی بخصوص در دهانه ورودی شبکه لانه زنبوری می باشد .



شکل ۲-۱۴) کاربرد فقط شبکه لانه زنبوری در تونل آب رو باز

در محاسبه تلفات مربوط به شبکه لانه زنبوری نیز باید هر دو تلفات مربوط به ورودی شبکه لانه زنبوری که به علت تغییر اندازه سطح مقطع می باشد و نیز تلفات مربوط به حرکت سیال در طول شبکه لانه زنبوری را حساب کنیم ، در این باره در فصل سوم بیشتر صحبت شده است.

سطح مقطع روزنه های شبکه لانه زنبوری ممکن است به اشکال مختلفی باشد مانند دایره ، مربع و مثلث که بهترین شکل دایره می باشد که دارای کمترین میزان افت فشار می باشد . گاهی اوقات به علت محدودیت هایی که موجود است مانند هزینه ساخت و تجهیزات لازم برای ساخت شبکه لانه زنبوری با مقطع دایره ای مجبور می شویم تا از اشکال دیگری برای این منظور استفاده کنیم .



شکل ۲-۱۵) شبکه لانه زنبوری با مقطع مثلثی

شبكة های لانه زنبوری ممکن است از جنس های مختلفی مانند آلومینیم ، فولاد و یا مواد مرکب ساخته شود.



شکل ۲-۱۶) شبکه لانه زنبوری از جنس کربن

شبكة لانه زنبوری از جنس فولاد

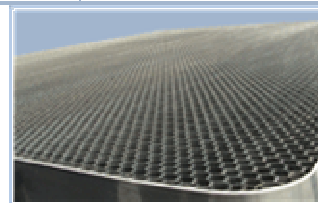
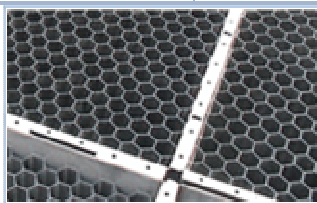




در زیر چند نمونه از جداول مشخصات فنی مربوط به شبکه های لانه زنبوری ارائه شده است:

## Specifications

Cell Size,mm	Depth,mm	Layout	Material
Cell sizes from 3.2mm to 30mm A/F	Depths up to 1250mm	Homogenous or framed panel layout	SUS304 stainless steel foil with thickness of 0.127-0.20mm



شکل ۲-۱۷) جدول مشخصات شبکه لانه زنبوری فولادی از شرکت ANDER

Module Dimensions			Aluminum Components (Thickness)			Available colors	Joinery
Width	Length	Thickness	Core	Face	Liner	Std. PVDF colors and custom colors	Custom extrusion
48"	Up to 20'	1/4", 1/2" (custom thickness available)	1/4" and 1/2" cell honey-comb	.040" and .060"	.020" and .040"		

شکل ۲-۱۸) جدول مشخصات شبکه لانه زنبوری آلومینیومی از شرکت PORTAFAB

## Honeycomb Specifications and General information

Mid-States Packaging, Inc. uses Kraft Paper, grade 99, equals 33# core, sanded in continuous form.

The size specifications and other tolerances are as follows:

<b>Cell Sizes available</b>	1/2", 5/8", 3/4", 1", 1.2", and 2"
<b>Facings - One side or both sides:</b>	26#, 35# High Performance, 42#, 69# and 90#
<b>Standard Thickness:</b>	1/2" (Min.) to 4" in one piece We can laminate and slit score pieces to form greater thickness if desired.
<b>Standard Length:</b>	5" (Min.) and 144 (Max). without further process
<b>Tolerances</b>	Width $\pm$ 1/8" Length $\pm$ 1/4" Thickness $\pm$ .025 (25 thousands of an inch)

*Honeycomb is a very dependable product with very few end use problems. honeycomb has been used successfully as an alternative to foam, wood and plastics. Call our Sales Department if you have questions about the specific characteristics of our paper honeycomb.*

شکل ۲-۱۹) جدول مشخصات شبکه لانه زنبوری از شرکت Mid-States Packaging, Inc

## پمپ :

در تونل های آب برای به حرکت در آوردن از پمپ استفاده می کنند . وظیفه پمپ در تونل آب سیرکوله کردن سیال در داخل تونل آب می باشد .

در تونل آب بر حسب نوع تونل و کاربرد آن و میزان دبی سیال در حال گردش ممکن است از یکی از دو نوع پمپ سانتریفیوژ یا جریان محوری استفاده کنند:

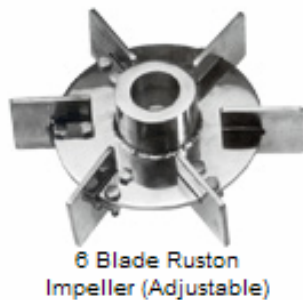
۱- در تونل های آب بزرگ و حجیم که در آنها دبی آب زیادی جا به جا می شود معمولا از پمپ های جریان محوری استفاده می کنند . این نوع تونل ها کاربرد صنعتی دارند.

۲- در تونل های آب کوچکتر و رو باز که هم سیال کمتری در حال گردش است و هم فشار کمتری برقرار است ( فشار محیط ) معمولا از پمپ های سانتریفیوژ استفاده می شود . این نوع از تونل های آب معمولا کاربرد آموزشی و آزمایشگاهی دارند.

در تونل های آب بزرگ که از پمپ های محوری استفاده می شود چون میزان آشفتگی جریان در خروجی پمپ زیاد است از یک مقطع آرام کننده جریان (Settling Section) استفاده می کنند تا جریان یکنواخت تری را در خروجی از پمپ ایجاد نمایند ( به شکل ۲-۱ نگاه کنید ).

در تونل های آب بزرگ که دارای سرعت زیادی نیز می باشند معمولا از دو پخش کننده در تونل آب استفاده می شود ، یکی از آنها بعد از پمپ و مقطع آرام کننده جریان قرار می گیرد و دیگری بعد از مقطع آزمایش نصب می شود ( به شکل ۲-۱ توجه کنید ).

یکی از قسمت های مهم و قابل توجه در پمپ ها ، پره (Impeller) در آن می باشد .  
 تعداد پره های به کار رفته ، طول پره ها و زاویه آنها از عوامل موثر بر راندمان و کارایی  
 پمپ و همچنین میزان تلفات ایجاد شده در پره ها می باشد.



شکل ۲-۲۰) چند مدل پره پمپ ساخت شرکت propRmix

پس به طور کلی انتخاب پمپ دو مرحله دارد :

۱- انتخاب نوع پمپ ( سانتریفیوژ یا محوری ) که با توجه به ابعاد تونل آب ، کاربرد آن

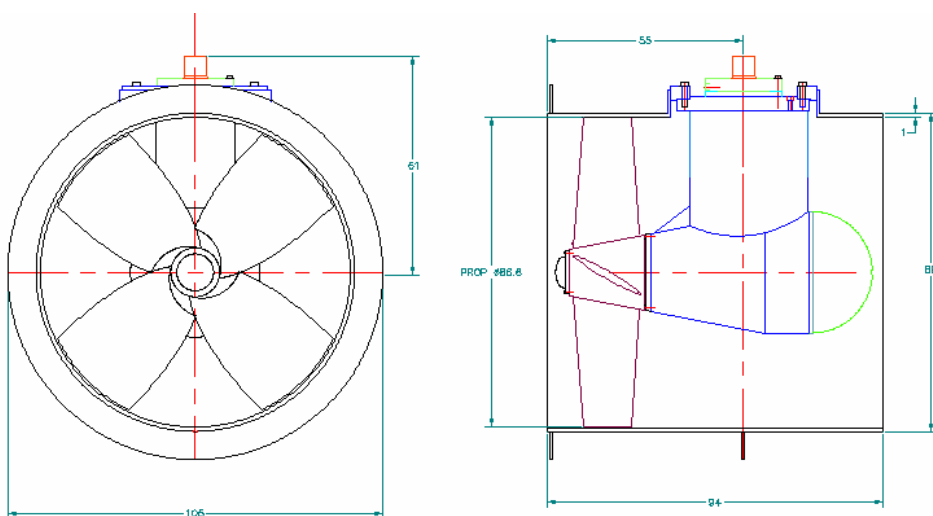
و میزان آب در گردش تعیین می شود.

۲- انتخاب مدل پمپ از کاتالوگ های مربوطه که معمولا بر اساس سرعت آب در مقطع پمپ ، قطر تونل آب در محل قرار گیری پمپ و همچنین میزان قدرت پمپ که بعد از محاسبه میزان تلفات در تونل آب ، محاسبه می گردد ، انجام می شود . ( نحوه محاسبه تلفات و قدرت پمپ به تفصیل در فصل سوم توضیح داده شده است.)

Tunnel Diameter	HP-Range	Drawing No.
42 inch	250-500	<a href="#">C108401</a>
47 inch	400-600	<a href="#">D107054</a> <a href="#">B105299</a>
52 inch	500-700	
56 inch	600-800	<a href="#">C105459</a>
62 inch	700-900	
66 inch	800-1100	<a href="#">D106057</a> <a href="#">D107657</a> <a href="#">D107898</a>
71 inch	900-1250	<a href="#">C105506</a>
77 inch	1100-1500	<a href="#">D108104</a>
86 inch	1400-1800	
90 inch	1700-2100	<a href="#">C107206</a> <a href="#">C108412</a>
96 inch	2000-2500	
107 inch	2250-2750	
117 inch	2750-3300	



شکل ۲-۲۱) یک نمونه پمپ محوری به همراه نقشه و جدول مشخصات آن



90TT1500L  
TUNNEL THRUSTER L-DRIVE  
107206CD

## تجهیزات اندازه گیری و جانبی تونل آب :

در این قسمت به معرفی تجهیزات جانبی می پردازیم که در افزایش کارایی و راحتی کار با تونل آب موثر هستند.

### فضای تخلیه

وضعیت فضای تخلیه مقطع آزمایش، خصوصیت منحصر به فردی از تونل آب است. این فضا شامل یک پنجره نمای جریان است که اجازه مشاهده مستقیم مدل را از عقب داده و نیاز به وجود آینه را حذف می کند. وضعیت فضای تخلیه به گونه ای طراحی شده که اطمینان دهد هیچ زاویه جریان یا تلاطمی وجود ندارد تا بتواند جریان را به درون مقطع آزمایش گسترش دهد. استوانه های سوراخ دار و پوشش داری از جنس فولاد زنگ نزن مشابه استوانه های سوراخ دار قسمت انتقال در حفرات خروجی مقطع آزمایش قرار داده شده اند تا از ورود هوا در مدار برگشتی در اثر گرداب های بزرگ ورودی به لوله های تخلیه جلوگیری کنند. این صفحات استوانه ای از ورود اشیای خارجی به لوله کشی برگشتی در این پمپ نیز جلوگیری می کنند.

### سیستم منبع رنگ

از این سیستم به منظور نمایان کردن تغییرات جریان روی نمونه تحت آزمایش استفاده می شود.

یک سیستم شش رنگ فشرده با استفاده از رنگ های غذایی محلول در آب برای هر مسیری از قوطی های رنگ تا سیستم پشتیبان مدل ساخته شده است. این سیستم اجازه کنترل دقیق نرخ نشر رنگ را داده و وسیله ای را برای دمش هوا به بیرون از خطوط رنگ که به مدل می رود، فراهم می کند. قوطی های رنگ را می توان با سیستم هوای کارگاه تحت فشار قرارداد که سطح فشار به وسیله یک رگولاتور فشار کنترل می شود. کمیت رنگ برای هر قوطی به وسیله حباب های منفردی اصلاح می شود که بروی پنلی در نزدیکی مقطع آزمایش قرارداد.



شکل ۲-۲۳) سیستم رنگ

## سیستم مکش به داخل

در برخی از آزمایش ها شبیه سازی جریان جرم در ورودی های موتور برای مدل های هواپیمای واقعی اهمیت دارد. سیستم مکشی شامل یک پمپ کوچک و حباب های مناسب و چند دبی سنج برای تغییر جریان از طریق ورودی های موتور جداگانه برای شبیه سازی جریان ورودی از صفر تا ماکزیمم برای برخی از هواپیماها اهمیت دارد.

## سیستم آگزوز جت

سیستمی برای شبیه سازی جریان خروجی از آگزوز جت را نیز می توان فراهم کرد. یک پمپ کوچک شبیه به پمپ سیستم مکش ورودی و حباب های مناسب و یک دبی سنج برای شبیه سازی و اصلاح جریان فراهم می شود.

## سیستم فیلتراسیون:

تغییر رنگ تدریجی آب در اثر استفاده مداوم از رنگ به وجود می آید. این تغییر رنگ را می توان با افزودن متناوب مقادیر کمی از کلر به آب از بین برد. یک سیستم فیلتراسیون نیز برای تمیز کردن آب فراهم شده که از موتور/ پمپ با یک صافی و یک واحد فیلتر به کار می رود. سیستم فیلتراسیون معمولاً در هنگام عدم استفاده از تونل - معمولاً شب هنگام - کار می کند. بعد از کار مداوم باید آب را جایگزین کرد. زهکشی و اتصالات پرکننده تونل برای این هدف فراهم شده اند.

## کنترل سرعت تونل

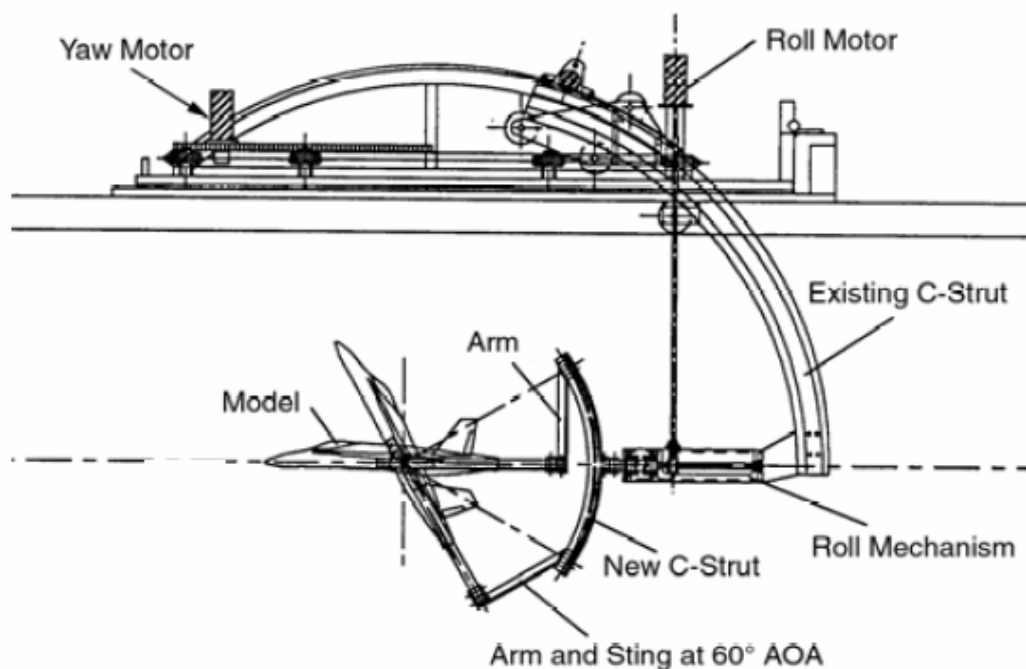
کنترلگر سرعت تونل می تواند یک معکوس کننده کم نویز تمام دیجیتالی باشد. اجزای سرعت برای انتخاب سرعت به وسیله کاربر قابل تنظیم بوده و سرعت به وسیله یک دستگاه خواندنی دیجیتال نمایش داده می شود. کنترلگر سرعت تونل به سیستم پشتیبان مدل کنترل شده کامپیوتری و سیستم بالانس ۵ حزئی تبدیل می شود تا امکان کنترل کامپیوتری سرعت تونل را فراهم کرده و اجازه عملکرد تمام اتوماتیک آن را بدهد.



از سرعت سنج های لیزری داپلر نیز در این مورد می توان استفاده کرد.

## سیستم پشتیبان مدل دینامیک

آخرین پیشرفت در تونل های آب یک سیستم پشتیبان مدل کنترل کامپیوتری است که برای فراهم کردن حرکات بسیار مسطح و دقیق طراحی شده است. هنگامی که از این تجهیزات به همراه بالانس گیج کرنش نیمه هادی ۵ جزئی استفاده می شود، این سیستم قادر به انجام آزمایش هایی است که قبلا تنها با تونل های آبی تخصصی و گران قیمت عملی بود. در حال حاضر آزمایش هایی همچون نوسان های نیرو و حرکات چرخشی متعادل را می توان در تونل آبی با بهره گیری از رؤیت عالی جریان های پیچیده انجام داد.



شکل ۲-۲۲) اجزاء یک سیستم پشتیبان دینامیکی

از نظر تاریخی، آزمایش های دینامیکی همچون اسیلاسیون نیرو و تعادل چرخشی اخیرا در برنامه طراحی هواپیما انجام شده اند. در زمانی که این نوع تست انجام می شود، معمولا تغییر شدید وضعیت آن از نظر مالی و سیاسی قابل قبول نیست. با این حال اگر دینامیک

وضعیت د راوایل برنامه بررسی شود، می توان تغییراتی را با حداقل اثرگذاری انجام داده و از مسائل سیاسی پرهیز نمود. هزینه پایین مدل ها و آزمایش های تونل آبی، آن ها را در نگاه اول به گزینه های بسیار خوبی تبدیل می کند.

تکنیک های پذیرفته شده کنونی در تونل بادی برای اندازه گیری دینامیک وسایل نقلیه معمولاً در سرعت های بسیار پایین انجام می شود. دلیل آن عمدتاً این است که حرکات چرخشی هواپیما با سرعت تونل هماهنگ است. حتی در این سرعت های پایین، بارهای روی سیستم پشتیبان تونل بادی می تواند بسیار بزرگ بوده و نرخ چرخش مدل را به شدت محدود کند. علاوه بر آن، بارهای داخلی مدل می تواند بسیار بزرگتر از ایرودینامیکی باشد که محققان برای اندازه گیری آن تلاش می کنند.

تونل های آبی سطح آزاد معمولاً در سرعت های کمتر از  $1 \text{ ft/sec}$  کار می کنند تا رؤیت جریان با کیفیت بالا و تلاطم پایین به دست بیاید. در این سرعت های تونل، فرکانس های پایین تولید شده به وسیله مانور مقیاس کامل، واکنش کندی را به وجود آورده و بارهای اینرسی چرخشی قابل چشمپوشی است. این بدین معنی است که بسیاری از دشواری هایی که معمولاً در تست های دینامیک بروزمی کند، در تونل آبی وجود ندارد. لازم نیست پشتیبان مدل برای تونل آبی به همان قدرت بوده و تنها موردی که باید حذف شود، جاذبه است. این فاکتورها محیطی آزمایشی را خلق می کنند که در آن می توان داده های با کیفیت بالایی را با هزینه نسبتاً پایین به دست آورد.



Model Support System

شکل ۲-۲۴) سیستم پشتیبان مدل دینامیکی نصب شده روی تونل آب

## سیستم کنترل PID

سیستم پشتیبان از سیستم فلکس موشن وسایل ملی برای فراهم کردن بازخورد نسبی- مجتمع- دیفرانسیلی مقدماتی و سیستم کنترل استفاده می کند. این سیستم از یک ذخیره قدرت موتور فرمان و یک آمپلی فایر و یک برد کامپیوتری مبتنی بر PCI تشکیل شده که سیگنال های رمزگذار نوری را خوانده و پردازش می کند. سوئیچ های محدود کننده برق در داخل سیستم قرارداد تا در صورت برقراری یک فرمان ناخواسته از سخت افزار پشتیبان مدل محافظت کند. زمانی که از یک سوئیچ محدود کننده استفاده می شود، قدرت وارد به سروموتور فوراً قطع می شود.

## استفاده از پره های راهنما در زانویی ها

همانطور که می دانیم در سرعتهای بالای آب معمولاً در زانویی ها برگشت جریان و در نتیجه افزایش تلفات را داریم لذا برای جلوگیری از این مورد و هدایت جریان در مسیر صحیح از این پره های راهنما در زانویی ها استفاده می کنند .

## مخزن تنظیم فشار

کاربرد محدودی دارد و معمولاً در بالای قسمت مقطع آزمایش یا کمی قبل از آن قرار داده می شود تا زمانی که فشار از حد مجاز در داخل مقطع آزمایش پایین تر آمد و احتمال بروز کاویتاسیون وجود دارد با تزریق مقداری آب به سیستم فشار را افزایش دهد . البته این عمل باعث ایجاد آشفستگی هایی در جریان می شود.

## ابزارهای اندازه گیری

ابزارهای اندازه گیری مانند فشار سنج ها ، نیرو سنج ها ، دبی سنجها و سرعت سنج ها نیز در تونل های آب و بخصوص در قسمت مقطع آزمایش کاربرد فراوانی دارند.

# فصل سوم

طراحی یک تونل آب نمونه

## مقدمه برای پمپهای محوری

– کاربرد برای انتقال مایع با حجم زیاد و هد نسبتاً کم تا 10m (مثل انتقال فاضلاب ، رانش قایقهاو...)

– پروانه آنها باز است و معمولاً محور آنها به طور مستقیم با الکتروموتور کوپل می شود.

– سرعت دورانی آنها نیز نسبتاً کم است (1800~200rpm)

– بازده ی پایین ، قدرت شروع به حرکت زیاد و در برابر کاویتاسیون نامطلوب می باشند.

– به علت پایین هر افت اصطحکاکی در این پمپها اهمیت زیادی دارد.

برای کاهش افت اصطحکاکی و سطوح پره ها صیقلی باشد  
حصول حداکثر بازده خطوط جریان بر روی پره ها پروانه کاملاً مناسب

یعنی پروفیل پره ها به شکل ایروفویل ساخته می شود

– خصوصیات ایروفول:

۱- نسبت  $\tan \lambda_1 = \frac{C_{DP}}{C_L}$  (زاویه سر خوردن) باید مقدار کوچکی باشد تا افت در اثر  $C_D$  کم باشد.

۲- دارای  $\lambda_1$  کوچک در ضریب  $C_L$  های کوچک باشد تا افت در اثر جریان های ثانویه که تابع درجه دومی از ضریب  $C_L$  است کم بوده و در عین حال پروانه در برابر کاویتاسیون ایمن باشد.

۳-  $C_L$  ماکزیمم باید عدد بزرگی باشد تا بازده پمپ در حوالی نقطه طرح مناسب باشد (ایروفویلهای سری 44 این خصوصیات را دارند)

## مراحل طراحی :

- ۱- حداقل داده های مورد نیاز برای طراحی هد و دبی پمپ.
- ۲- اگر دوره محور داده نشده باشد می توان با انتخاب یک سرعت مخصوص بین 10000~15000 دور پمپ را محاسبه کرد (برای پمپهایی که با موتور AC کار می کنند

$$\text{دور محور باید با دور موتور یکی باشد} \left( N = \frac{60f^{50}}{P} \right)$$

در اکثر مسائل دور محور به عنوان داده مشخص است.

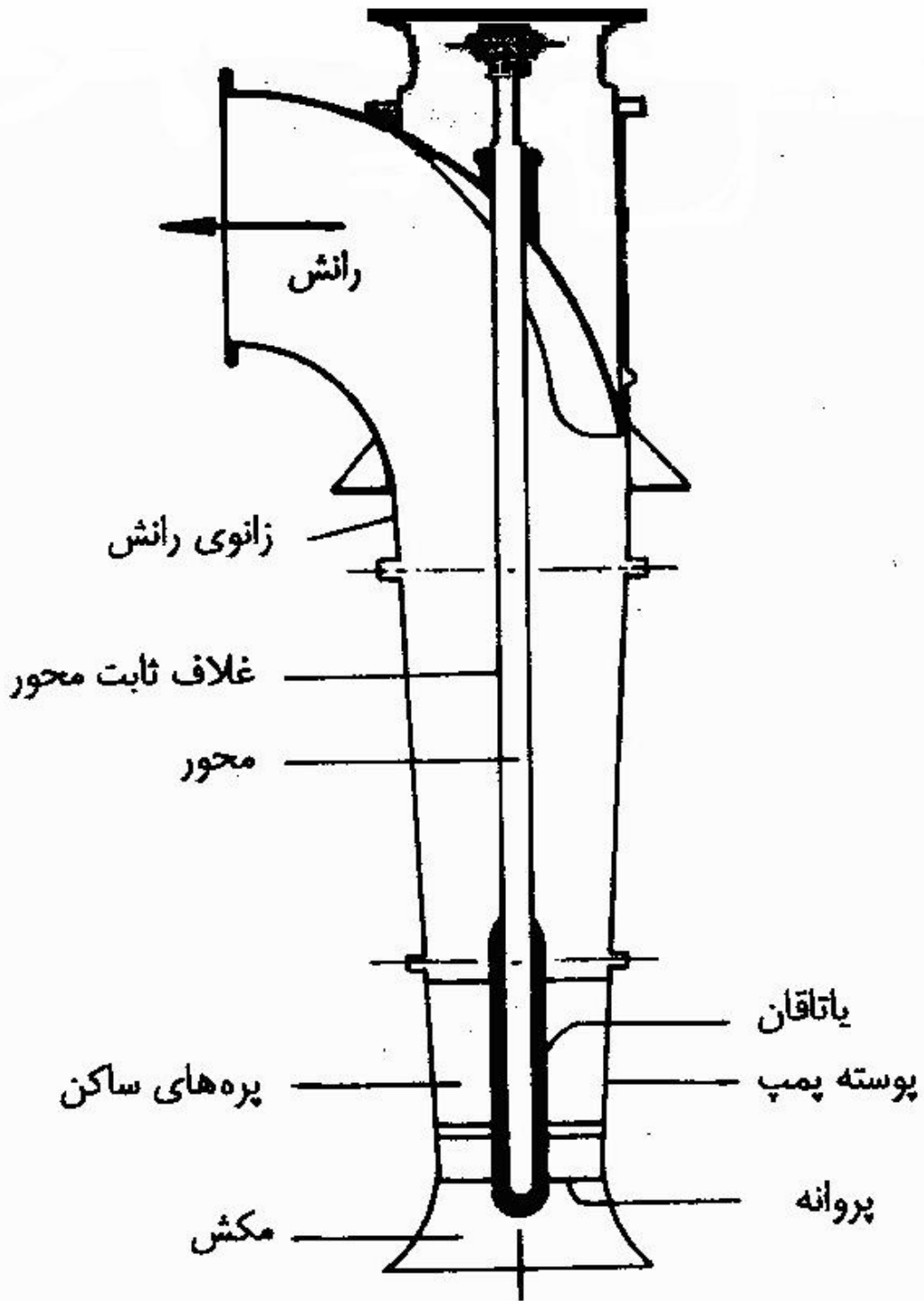
برای محاسبه ابعاد پمپ قدمهای زیر برداشته می شود :

۱- محاسبه سرعت مخصوص با داشتن هد، دبی و دور محور

۲- تعیین تعداد پره های روتور (بین 2 تا 5 عدد است)

۳- محاسبه قطر و تور  $D_2$  با استفاده از نمودار کردیر شکل (۹-۶)

۴- محاسبه قطر ریشه پره های متحرک  $D_2$  به کمک شکل (۹-۸)



شکل ۱-۱۰ یک نوع پمپ محوری

شکل ۱-۳ یک نمونه پمپ محوری



۵- محاسبه سرعت سیال در زانویی رانش ( $V_B$ ): سرعت را طوری انتخاب کنید که سرعت از 50% هر پمپ تجاوز نکند. لذا:

$$V_B = \sqrt{0.052gH}$$

۶- محاسبه قطر رانش ( $D_B$ ): (با استفاده از دبی و سرعت سیال در زانویی رانش)

۷- محاسبه شعاع انحنای زانویه رانش (مقدار بهینه آن برابر است با  $1.25D_B$ )

۸- محاسبه افت در زانویی رانش : افت در دیفیوزر پمپ و افت ورودی به پمپ

(زاویه واگر این دیفیوزر به منظور جلوگیری از جدایش  $8^\circ$  در نظر گرفته می شود)

۹- انتخاب پره‌ها کوتاه (پره‌های ساکن).

۱۰- افت در پره‌ها کوتاه  $\leftarrow h_{ts} = C_D \frac{C_s V^2}{S_C 2g}$  (اندیس 5 معرف پره‌ها ساکن  $c_s \cong 0.2$  قطر

روتور)

۱۱- افت در پره‌های ساکن راهنما را می توان حدود 2% هر پمپ حدس زد و پس از

انجام طراحی آن را از روش سعی و خطا تصحیح کرد.

۱۲- هر کل پمپ ( $H_d$ ) شامل جمع هد واقعی پمپ به علاوه افت در دیفیوزر، افت

در ورودی پمپ، افت در زانویی و افت در پره‌های ساکن راهنما است.

۱۳- تعیین پروفیل پره متحرک : از طریق سعی و خطا محاسبه می شود. پروفیل

طوری انتخاب می شود که کاویتاسیون و جدایش روی پره ایجاد نشود.

(ابتدا یک ایروفیل چهار شماره‌ای از سری 44 برای پروفیل نوک پره انتخاب می

کنیم و ضریب برای آن را 0.7 ضریب برای حداکثر این ایروفیل در نظر می گیریم

سپس  $C_L, \lambda_1, \alpha$  را می خوانیم و  $C_{DP} = C_L \tan \lambda_1$  را بدست می آوریم.  $C_{DS}$  نیز برابر

$$C_{DS} = \lambda \frac{C_L^2}{S/C} \text{ است با } C_{Da} \text{ سپس } C_{Da} \text{ را بدست می آوریم.}$$

$$C_D = C_{Da} + C_{DP} + C_{DS} \quad C_{Da} = f/2 \frac{s}{h}$$

ضریب درگ جریان ثانویه (گردابه):  $C_{DS}$  و ضریب درگ پروفیل مقطع پره:  $C_{DP}$  و

ضریب دیوارها برای این منظور داریم:

هد در نقطه طرح  $\eta_p$  را تخمین زده و  $V_{t2}$  را محاسبه می کنیم.

$$H_d = \frac{uV_{t2}}{g} \eta_p \rightarrow$$

$$V_n = \frac{Q}{\pi/4(D_9^2 - D_1^2)}$$

–  $V_n, V_t$  داریم پس سرعت مطلق خروجی مشخص است

$$\text{Re} = \frac{VD}{\gamma} \Rightarrow f = \frac{0.184}{\text{Re}^{0.2}}$$

$$C_{Da}, C_{DP}, C_{DS} \Rightarrow C_D \Rightarrow \tan \lambda = \frac{C_D}{C_L} \rightarrow \lambda$$

$$\tan \beta_m = \frac{v_n}{u - \frac{v+2}{2}} \rightarrow \beta_m$$

$$\Rightarrow \eta_p = 1 - \frac{v_n}{u} \frac{\sin \lambda}{\sin \beta_m \sin}$$

در صورتیکه اخلاف بین  $\eta_p$  حاصله و  $\eta_p$  تخمین زده شده محاسبات را دوباره تکرار می

کنیم.

\* حال پروفیل مقطع پره را از نظر کاویتاسیون بررسی می کنیم:

برای این منظور لازم است ضریب کاهش فشار حداکثر بر روی دیواره‌ها ( $C_K$ ) را بررسی کنیم.

$$C_K = \frac{P_{\max} / \rho g}{\left( \frac{v_r^2}{2g} \right)} \rightarrow \text{شکل (۱۰-۸)، } C_K \text{ بر حسب } C_L \text{ را دارد.}$$

$$V_{rm} = \left[ v_n^2 + \left( u - \frac{v+2}{2} \right) \right]^{1/2} \text{ حال باید ضریب کاویتاسیون } (\sigma) \text{ را حساب کنیم:}$$

$$\sigma = \frac{(v_n^2 + c_k v_{r1}^2) / 2g}{H} = \frac{NPSH}{H} \Rightarrow C_K$$

$C_K$  محاسبه شده را با  $C_K$  مقایسه می کنیم در صورت بزرگتر بودن با انتخاب  $C_L$  کوچکتر محاسبات را تکرار می کنیم.

$$\frac{C}{t} = \frac{2V_{t2}}{C_L V_n} * \frac{\cos \lambda \sin^2 \beta_m}{\sin(\beta_m + \lambda)}$$

از رابطه بالا صلبیت را محاسبه می کنیم. با داشتن تعداد پره ها، فاصله هر دوپره متوالی ( $t$ ) و سپس با استفاده از  $\lambda$ ، طول وتر  $C$  بدست می آید.

$$\beta_n = \beta_m + \alpha \text{ زاویه پروفیل پره}$$

۱۴- تعیین مشخصات پره های ساکن راهنما: ابتدا پروفیل یک پره ساکن را در قطر بزرگ روتو را انتخاب می کنیم و بر اساس آن حداکثر  $C_L, \alpha, \lambda, C_L$  را از شکل (۱۰-۴) می خوانیم و از آنجا  $C_{Ds}, C_{Dp}$  را محاسبه می کنیم. با تعیین تعداد پره ها،  $S$  را مشخص کرده و از (۸-۲۲)  $C_{Da}$  را بدست می آوریم و سپس  $C_{Dtotal}$  و مقدار  $\lambda$  را محاسبه می کنیم.

مشابه پره های متحرک  $\frac{C_v}{t_v}, \beta_m, \beta_m$  را بدست می آوریم و با داشتن  $C_v, t_v$  را محاسبه می

کنیم و بلاخره افت در پره ساکن راهنما از رابطه:

$$h_{t_v} = \frac{DV_{r_m}}{\rho g \Delta r t_v v_n} = \frac{c_v}{t_v} \frac{v_n^2}{2g} \frac{C_d}{\sin^2 \beta_m}$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} C_v \Delta r \rho v_{r_m}^2} \text{ بدست می آید که در آن}$$

اگر  $h_{t_v}$  متوسط با  $R_{t_v}$  حدس زده شده در بند ۱۳ متفاوت بوده محاسبات را تکرار می کنیم.

$$W' = \frac{\rho Q g H}{\eta_p} \quad \text{۱۵- محاسبه توان پمپ:}$$

(توان محاسبه شده بدون در نظر گرفتن افت مکانیکی بدست آمده است.)

۱۶- عملکرد در خارج از نقطه طرح : برای بدست آوردن منحنیهای عملکرد پمپ، دیبهای متفاوت با دبی طرح انتخاب می کنیم و محاسبات را انجام داده ، هد، قدرت و بازده پمپ را محاسبه می کنیم. نحوه محاسبات در این بخش مشابه محاسبات در نقطه طرح است.

فرض ۱: جنس آهن گالوانیزه باشد  $\varepsilon = 0.15mm \leftarrow$

فرض ۲: سرعت در test section  $18.5 m/s \leftarrow$

## محاسبه سرعت در نقاط مختلف:

۱- در  $7^\circ$  diffuser:

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow 18.5 * \pi \frac{48^2}{4} = V_2 * \frac{\pi * 5^2}{4}$$
$$diffuser \Rightarrow V_2 = 4.72 m/s$$

۲- در Nozzle:

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow V_1 * \frac{\pi 12^2}{4} = 18.5 * \frac{\pi 4^2}{4}$$
$$nozzle \Rightarrow V_1 = 2.05 m/s$$

(از تأثیر اتلاف روی سرعت صرف نظر شده و فقط تأثیر پمپ، Nozzel, diffuser بر

سرعت هر منطقه لحاظگشته است.)

۳- در  $8^\circ$  diffuser:

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow V_1^{16} * \frac{\pi * 9^2}{4} = V_2 * \frac{\pi * 12^2}{4}$$
$$diffuser \Rightarrow V_2 = 9 m/s$$

۴- دبی در کل تونل آب:

$$Q = \pi * \frac{(48 * 2.54 * 10^{-2})^2}{4} * 18.5 = 21.6 m^3/s$$

۴- در پمپ:

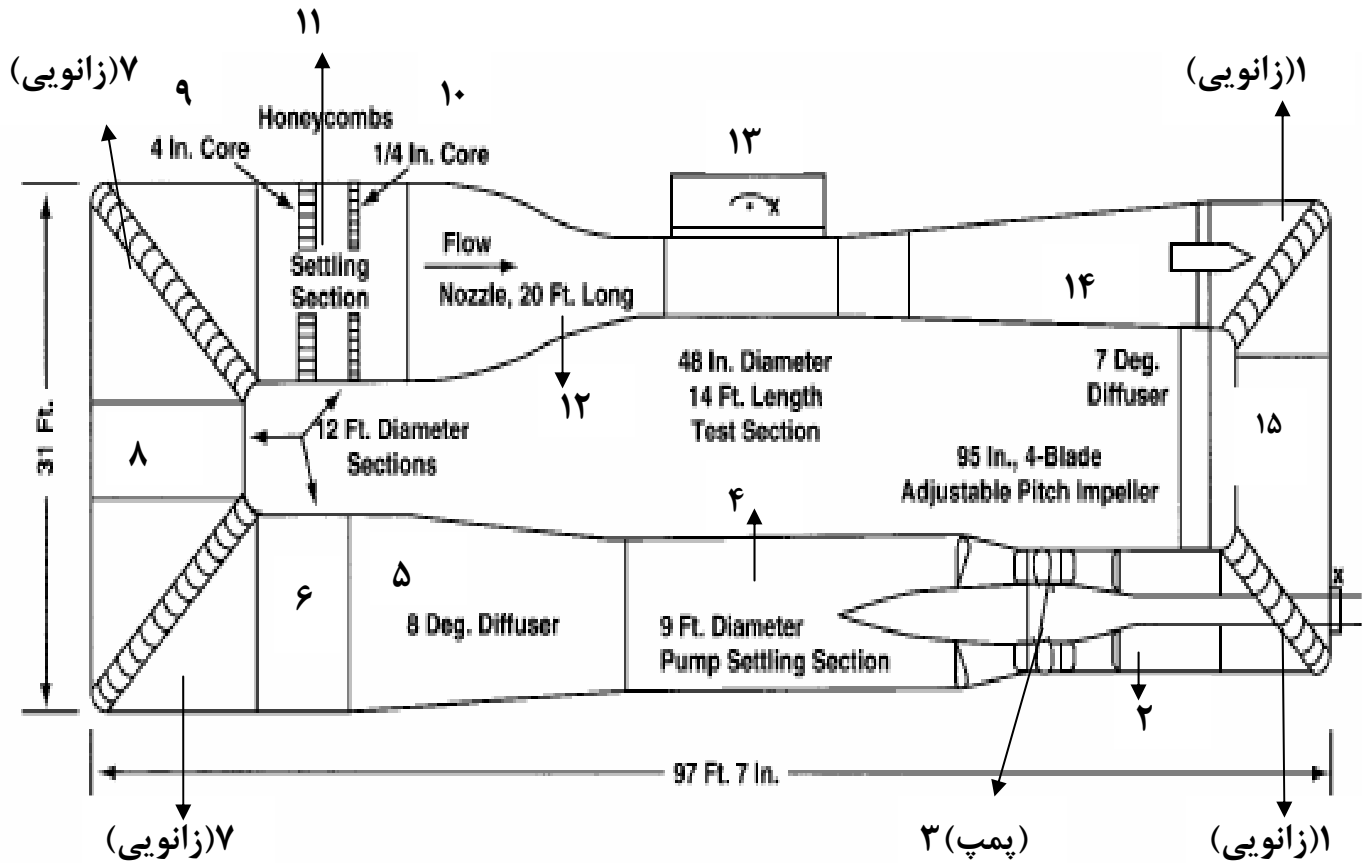
$$\{\eta_p \times W = FgQH \Rightarrow H = \frac{2000 * 745.8 * 0.8}{1000 * 9.81 * 21.6} = 5.64 m$$

هر پمپ:

$$\eta_p = 0.8$$

سرعت قبل از پمپ  $V = 4.72 \text{ m/s}$

$$V = V_N = \frac{UQ}{\pi(D_0^2 - D_1^2)} = \frac{4 * 21.6}{\pi(2.74^2 - 2.41^2)} = 16.18 \frac{m}{s}$$



شکل ۲-۳) نمای شماره گذاری شده تونل آب برای محاسبه تلفات بخشهای مختلف

بر حسب نام گذاری

## محاسبه تلفات :

۱۵:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\varepsilon}{D} &= \frac{0.15}{95 * 25.4} = 0.000062 \\ \text{Re} = \frac{VD}{\nu} &= \frac{4.72 * (95 * 2.54 * 10^{-2})}{10^{-6}} = 11.4 \times 10^6 \rightarrow f = 0.0113 \end{aligned} \right.$$

$$\left. \begin{aligned} h_f &= f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} \\ 27 - 2 * 8 &= L \Rightarrow L = 11 \text{ ft} \end{aligned} \right\}$$

$$\Rightarrow h_f = 0.0113 * \frac{(11 * 0.31)}{8 * 0.31} * \frac{4.72^2}{2 * 9.81} = 0.018 \text{ m}$$

محاسبه طول

$$f = 0.0113$$

۲: مشابه ۱۵ است ←

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} = 0.0113 * \left( \frac{25 * 0.31}{8 * 0.31} \right) * \frac{4.72^2}{2 * 9.81} = 0.04 \text{ m}$$

۴:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\varepsilon}{D} &= \frac{0.15}{9 * 12 * 25.4} = 0.000055 \\ \text{Re} = \frac{VD}{\nu} &= \frac{16.18 * (9 * 0.31)}{10^{-6}} = 4.7 \times 10^7 \rightarrow F = 0.011 \end{aligned} \right.$$

$$h_f = 0.011 * \frac{25}{9} * \frac{16.18^2}{2 * 9.81} = 0.41 \text{ m}$$

**Diffuser** 8°

۵:

$$k = \frac{2.6 \sin(8^\circ) \left[1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right]^2}{\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2} \quad \theta \leq 45$$

$$\Rightarrow K = \frac{2.6 * \sin(4^\circ) \left[1 - \frac{9^2}{12^2}\right]^2}{\left(\frac{9}{12}\right)^4} = 0.11$$

$$\Rightarrow h_\ell = k \frac{V_2^2}{2g} = 0.11 * \frac{9^2}{2 * 9.81} = 0.453m$$

:۶

$$h_f = 0.011 * \frac{6}{9} * \frac{9^2}{2 * 9.81} = 0.0303m$$

$$\begin{cases} \frac{\epsilon}{D} = \frac{0.15}{9 * 12 * 25.4} = 0.000055 \\ \text{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{9 * (9 * 0.31)}{10^{-6}} = 2.5 * 10^7 \end{cases} \rightarrow F = 0.011$$

۸: مشابه ۶ است

$$L = 31 - 24 = 7 \text{ ft} \quad f = 0.011 = 0.011 * \frac{7}{12} * \frac{9^2}{2 * 9.81} = 0.024m \leftarrow$$

۱۱: با لحاظ کردن افت سرعت در هانی کام اول داریم:

$$V \sim 6 \text{ m/s}$$

$$\begin{cases} \frac{\epsilon}{D} = 0.000055 \\ \text{Re} = \frac{6 * 12 * 0.31}{106} = 2.23 * 10^7 \end{cases} \rightarrow f = 0.011$$

$$h_f = 0.011 * \frac{9.75}{12} * \frac{6^2}{2 * 9.81} = 0.016m$$

۹: Honey comb (d=4in, l=1 ft)

داخل Honey cemb :



$$\begin{cases} \varepsilon/D = \frac{0.15}{4 \times 25.4} = 0.0015 \\ \text{Re} = \frac{7.5 * 4 * 2.54 * 10^{-2}}{10^{-6}} = 7.62 \times 10^5 \quad \left( \bar{V} = \frac{9+6}{2} = 7.5 \text{ m/s} \right) \end{cases}$$

$$\mathbf{f=0.0215}$$

$$h_f = 0.0215 * \frac{1 \times 12}{4} * \frac{7.5^2}{2 \times 9.81} = 0.185 \text{ m}$$

$$k = 0.09 \quad (\text{if : } r/d \approx 0.1) \text{ :Honey comb ورودی}$$

$$\rightarrow h_t = k V^2 / 2g = 0.09 * 7.5^2 / 2 * 9.81 = 0.258 \text{ m}$$

$$(d = 1/4 \text{ in}, L = 3 \text{ in}) \text{ :Honey comb :۱}$$

$$(\bar{V} = \frac{6+2}{2} = 4 \text{ m/s}) \text{ Honey cemb داخل}$$

$$\begin{cases} \varepsilon/D = \frac{0.15}{0.25 * 25.4} = 0.024 \\ \text{Re} = \frac{4 * 0.25 * 25.4}{10^6} = 2.54 * 10^5 \end{cases}$$

$$\mathbf{f=0.051}$$

$$h_f = 0.051 * \frac{3}{0.25} * \frac{4^2}{2 * 9.81} = 0.5 \text{ m}$$

$$(\text{if : } r/d \approx 0.6) \text{ :Honey comb ورودی}$$

$$\rightarrow k = 0.15$$

$$h_f = k V^2 / 2g = 0.15 * 4^2 / 2 * 9.81 = 0.122 \text{ m}$$

$$D_1 = 12 \text{ ft}, D_2 = 4 \text{ ft} (\theta/2 = 11.3^\circ, L = 20 \text{ ft}) \text{ Nozzel :۱۲}$$

$$\theta \leq 45 \rightarrow k = \frac{0.8 \sin(\theta/2) \left[ 1 - \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right]}{\left( \frac{D_2}{D_1} \right)^4} \Rightarrow K = \frac{0.8 \sin(11.3) \left[ 1 - \left( \frac{1}{3} \right)^2 \right]}{\left( \frac{1}{3} \right)^4} = 11.3$$

$$\Rightarrow h_R = K \frac{V_1^2}{2g} = 11.3 * \frac{2^2}{2 * 9.81} = 2.3m$$

:۱۳

$$\begin{cases} \varepsilon/D = \frac{0.15}{48 * 25.4} = 0.00012 \\ \text{Re} = \frac{18.5 * 48 * 2.54 * 10^7}{10^{-6}} = 2.25 * 10^7 \end{cases} \rightarrow f = 0.0122$$

$$h_f = 0.0122 * \frac{14}{4} * 18.5^2 / 2 * 9.81 = 0.745m$$

**:diffuser 7° : ۱۴**

$$k = \frac{2.6 \sin(\theta/2) \left[ 1 - \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]}{\left( \frac{D_1}{D_2} \right)^4} \quad \theta \leq 45^\circ$$

$$\Rightarrow K = \frac{2.6 \sin(3.5) \left[ 1 - \left( \frac{1}{2} \right)^2 \right]^2}{\left( \frac{1}{2} \right)^4} = 1.42$$

$$h_e = 1.42 * \frac{4.70^2}{2 * 9.81} = 1.6m$$

۱: زانویی 8ft (دو عدد): با استفاده از معادل سازی موجود در **Hand book** (پیوست ج)

:

$$\mathbf{d=8ft, () 90^\circ \text{ زانویی} \approx 210ft \rightarrow 8ft \text{ لوله}} \begin{cases} \varepsilon/D = \frac{0.15}{96 * 25.4} = 0.0006 \\ \text{Re} = \frac{4.76 * 96 * 2.54 * 10^{-2}}{10^{-6}} = 1.15 * 10^{-7} \end{cases}$$

$$\Rightarrow f = 0.011 \Rightarrow h_f = 0.011 * \frac{210}{8} * \frac{4.7^2}{2 * 9.81} = 0.32m$$

پس برای دو زانویی وبا وجود پره راهنما ( 40% کاهش در  $h_f$  ) داریم:  $h_f = 0.2$

۷: زانویی 12ft (دو عدد): (پیوست ج)

(لوله 12ft) = 360ft زانویی 90° (خم ساده) و  $d = 12ft$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon/D = \frac{0.15}{144 * 25.4} = 0.00004 \\ \text{Re} = \frac{9 * 144 * 2.54 \times 10^{-2}}{10^{-6}} = 3.3 \times 10^7 \rightarrow f = 0.01 \end{array} \right. \quad \text{با معادل سازی:}$$

$$h_f = 0.01 * \frac{350}{12} * \frac{9^2}{2 * 9.81} = 1.1$$

پس برای دو زانویی وبا وجود پره راهنما ( 40% کاهش در  $h_f$  ):  $h_f = 0.87m$

**جمع کل تلفات:**

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Sigma h_f &= 0.018 + 0.04 + 0.41 + 0.453 + 0.0303 + 0.027 + 0.016 + 0.185 + \\ &0.258 + 0.5 + 0.122 + 2.3 + 0.745 + 1.6 + 0.26 + 0.84 \\ \Rightarrow \Sigma h_f &= 7.834m \end{aligned}$$

## طراحی پمپ محوری مربوط به پروژه water tunnel

فرضیات :

۱- چون در مراحل طراحی اولیه مقدار هد دیفیوزر بعد از پمپ محاسبه می شوند از مقدار H حاصله مقدارای که مربوط به دیفیوزر تونل آب بعد از پمپ است خودمان حساب کرده ایم را کسر می کنیم .

۲- چون در طراحی مقدار تلفات زانویی محاسبه می شود و ما در پروژه به جای زانویی قسمت

«آرام سازی جریان» داریم لذا مقدار تلفات آن را که دستی حساب شده است را نیز از هد کسر می کنیم.

معلومات :

$$\begin{cases} H = 7.834 - 0.41 - 0.453 = 6.971M = 22.87FT \\ Q = 21.6m^3/5 = 342770g.p.m \\ A = 4 \end{cases}$$

A همان تعداد پره متحرک می باشد.

حل :

با توجه به تعداد پره ها و شکل ۱۰-۷ داریم :

$$N_s = 11000 \left( \frac{rpm \sqrt{gpm}}{ft^{3/4}} \right)$$

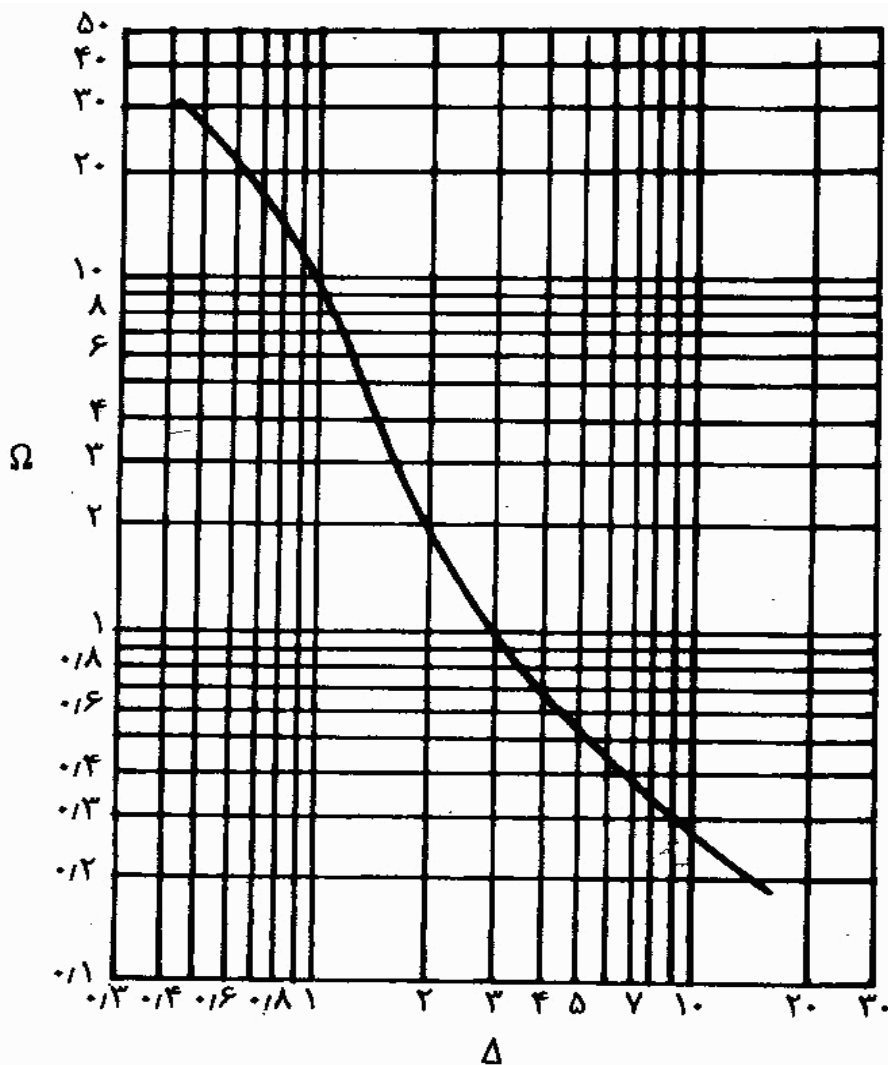
$$N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{0.75}} \Rightarrow N = \frac{N_s H^{0.75}}{\sqrt{Q}} = \frac{1000 * (22.87)^{0.75}}{\sqrt{342770}} = 197 \text{ rpm}$$

$$\Omega = \frac{N\sqrt{Q}}{(Hg)^{0.75}} = 3.6558 \times 10^{-6} N_s = 4.02$$

سرعت مخصوص بدون بعد:

$$\Delta = 1.5$$

از نمودار کردیر داریم:



شکل ۶-۹ نمودار کردیر، سرعت مخصوص بر حسب قطر مخصوص

$$\Rightarrow D_o = \frac{\Delta Q^{1/2}}{(gh)^{1/4}} = \frac{1.5 * (21.6)^{0.5}}{(9.81 * 6.97)^{0.25}} = 2.42 \text{ m}$$

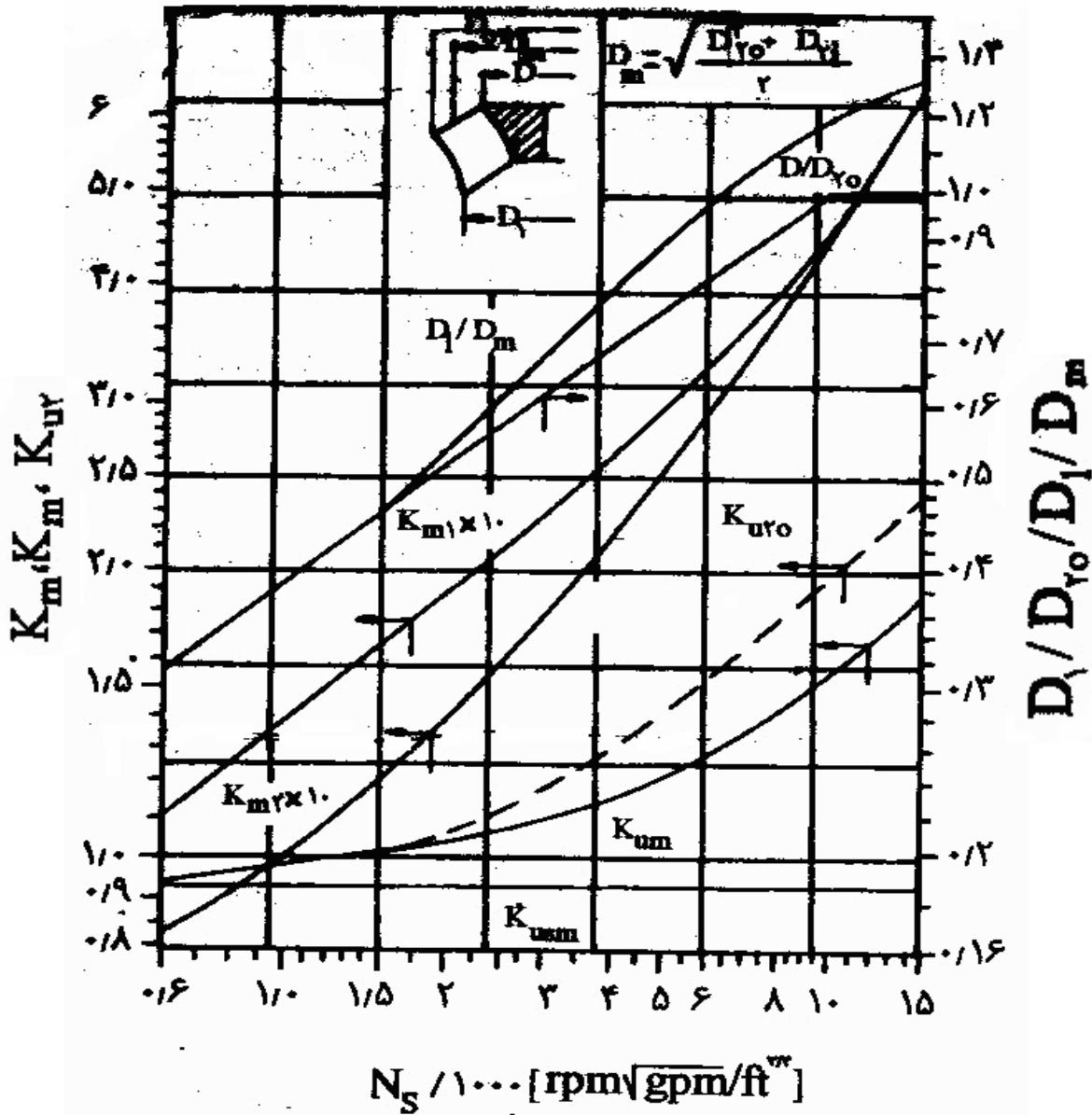
(قطر رو تور)

$$\frac{D_i}{D_m} = \frac{D_o}{\sqrt{\frac{D_i^2 + D_o^2}{2}}} = 1.21$$

از شکل (۸-۹) داریم:

$$\Rightarrow D_i = 1.46m$$

(قطر حداقل خروجی)



شکل ۸-۹ مشخصات روتور بر حسب سرعت مخصوص برای پمپ یک مک

حال قطر، شعاع انحنای افت زانویی رانش را محاسبه می کنیم:

$$V_B = (0.05 * 2gH)^{0.5} = (0.05 * 2 * 9.8 * 6.97)^{0.5} = 2.62 \text{ m/s} \text{ :رانش در زانویی رانش}$$

$$D_B = \left( \frac{UQ}{\pi V_B} \right)^{1/2} = \left( \frac{U}{\pi} * \frac{21.6}{2.62} \right)^{0.5} = 3.24 \text{ m} \text{ :قطر زانویی رانش}$$

شعاع انحنای زانویی رانش ۱٫۲۵ برابر قطر زانو است.  $R_B = 1.25 * 3.24 = 4.05 \text{ m}$

ضریب اصطحاک در زانویی به شرح زیر بدست می آید:

$$f = \frac{0.186}{R_e^{0.2}}$$

$$Re = \frac{V_B D_B}{\nu} = \frac{2.62 * 3.24}{10^{-7}} = 8.5 * 10^7$$

$$\Rightarrow f = \frac{0.186}{(8.5 * 10^7)^{0.2}} = 0.0048$$

حال می توان افت در زانویی رانش را محاسبه کرده با فرض اینکه نسبت طول معادله به

قطر زانو ۱۴ باشد. داریم:

$$h_{lB} = f \frac{l_e V_B^2}{D 2g} = 0.0048 * 14 * \frac{2.62^2}{2 * 9.81} = 0.0235 \text{ m}$$

سیال خروجی از پره های ساکن قبل و بعد از پروانه (پره های راهنما) تنها دارای

محوری است:

$$V_n = \frac{4Q}{\pi(D_0^2 - D_1^2)} = \frac{4 * 21.6}{\pi(2.42^2 - 1.46^2)} = 7.38 \text{ m/s}$$

افت در دیفیوزر با توجه به اینکه زاویه دیفیوزر  $8^\circ$  است را بدست آورید.

$$h_{lD} = k \frac{VB^2}{2g}$$

$$k = \frac{2.6 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \frac{V_B}{V_N}\right]}{\left(\frac{V_B}{V_N}\right)^2} = \frac{2.6 \sin(4^\circ) \left(1 - \frac{2.62}{7.38}\right)}{\left(\frac{2.62}{7.38}\right)^2} = 0.928$$

$$h_{ID} = 0.928 * \frac{2.62^2}{2 * 9.81} = 0.325 \text{ m}$$

برای محاسبه افت ورودی ابتدا باید سرعت ورودی سیال را محاسبه کنیم :

$$V_I = \frac{4Q}{\pi D_0^2} = \frac{4 * 21.6}{\pi * 2.42^2} = 4.7 \text{ m/s}$$

با فرض اینکه نسبت شعاع انحنای ورودی به قطر ورودی برابر 0.8 باشد ، ضریب افت کار برابر 0.05 بوده و داریم :

$$R_I = 0.8 D_0 = 1.94 \text{ m}$$

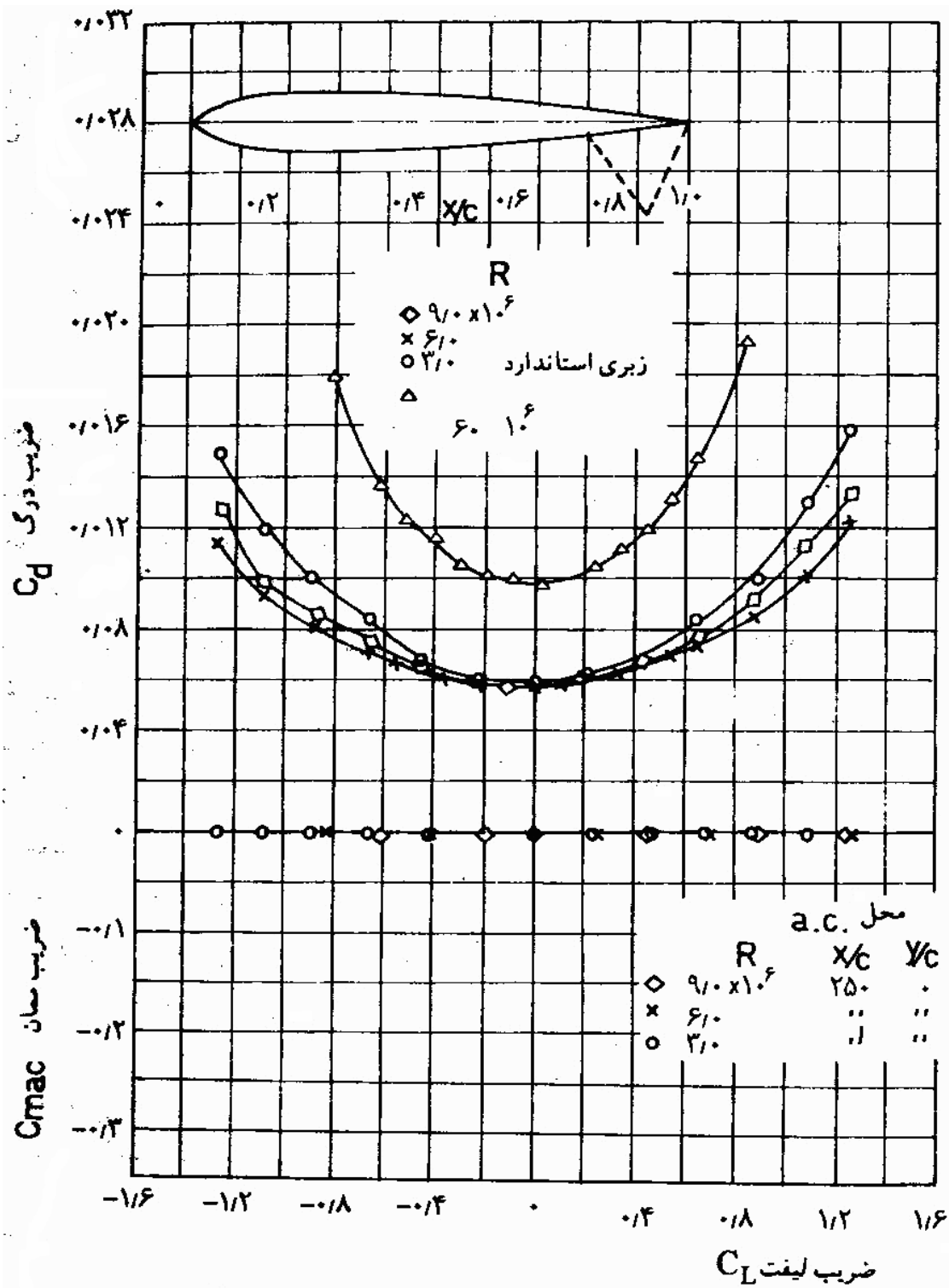
$$h_{II} = k \frac{V_I^2}{2g} = 0.05 * \frac{4.7^2}{2 * 9.81} = 0.056 \text{ m}$$

تعداد پره های کوتاه ۴ عدد است. افت در وسط پره های مزبور را با تقریب برای کلیه شعاعها ی استفاده می شود. طول وتر این پره ها برابر 0.2 قطر روتو را انتخاب شده ایرفویل NACA0012 به عنوان پروفیل پره بر گزیده می شود. با توجه به شکل (6-16) ایرفویل مزبور دارای :

$$C_{Dp} = 0.01, C_L = 0$$

حال باید  $C_{Da}$  را حساب کنیم ، برای محاسبه عدد دینولد از قطر هیدرولکی ( $D_h$ ) استفاده می کنیم:





$$D_n = D_o - D_i = 2.42 - 1.46 = 0.96m$$

$$f = \frac{0.184}{\rho \ell^{0.2}}, \quad Re = \frac{V_n D_n}{\nu} = \frac{7.38 * 0.96}{10^{-7}} = 7.1 * 10^7$$

فاصله متوسط دو متوالی (تعداد کل پره ها ۴ است):  $S_s = \frac{1}{4} \pi \left( \frac{D_o D_l}{2} \right) = 1.52m$

طول پره ( $h_s$ ):  $h_s = \frac{D_o D_l}{2} = \frac{2.42 - 1.46}{2} = 0.48m$

$$\Rightarrow f = \frac{0.184}{(7.1 \times 10^7)^{0.2}} = 0.005$$

ضریب درگ روی دیوار:  $C_{D_a} = \frac{1}{2} * 0.005 * \frac{1.52}{0.48} = 0.008m$

مقدار افت در پره های کوتاه:  $h_{ts} = C_D \frac{C_s V_n^2}{T_s 2g}$

$$C_D = C_{D_a} + C_{D_p} = 0.008 + 0.01 = 0.018$$

$$C_s = 0.2 D_0 = 0.2 * 2.42 = 0.484m, t_s = s_c = 1.52m$$

$$\Rightarrow h_{ts} = 0.018 * \frac{0.484}{1.52} * \frac{7.38^2}{2 * 9.81} = 0.016m$$

برای محاسبه هد کل پمپ ( $H_d$ ) افت متوسط در پره های راهنما  $\bar{h}_{\ell v}$  را حدس بزنیم این

حدس بعد از محاسبه افت در پره های راهنما تصحیح می شود. حدس معقول:

$$\bar{h}_{\ell v} = 0.02H = 0.139m$$

$$H_d = H + h_{\ell l} + h_{\ell D} + h_{ts} + \bar{h}_{\ell v} \Rightarrow$$

$$H_d = 6.971 + 0.056 + 0.325 + 0.016 + 0.139 = 7.507m$$

اکنون پروفیل پره ای در قطر  $D_0$  طراحی می کنیم. ایروفویل NACA4406 برای قطر

مذبور انتخاب می کنیم با توجه به شکل (10-4) در می یابیم که ایروفویل NACA

4406 دارای  $C_{Lmax} = 1.23$  است. با توجه به اینکه ضریب لیفت باید کمتر از  $0.7C_{Lmax}$

باشد ضریب را برابر  $C_L = 0.85$  در نظر می گیریم اگر چه چنین ضریب لیفتی دارای

کمترین  $\lambda$  نخواهد بود و در عین حال باعث ایجاد کاویتاسیون خواهد بود اما با چنین ضریب لیفتی شروع می کنیم تا در تصحیحات بعدی برای ایرفویل NACA4406 خواهیم داشت:

شکل 4-10:  $C_L = 0.85 \rightarrow \lambda_1 = 0.683^\circ, \alpha = 4.4^\circ$

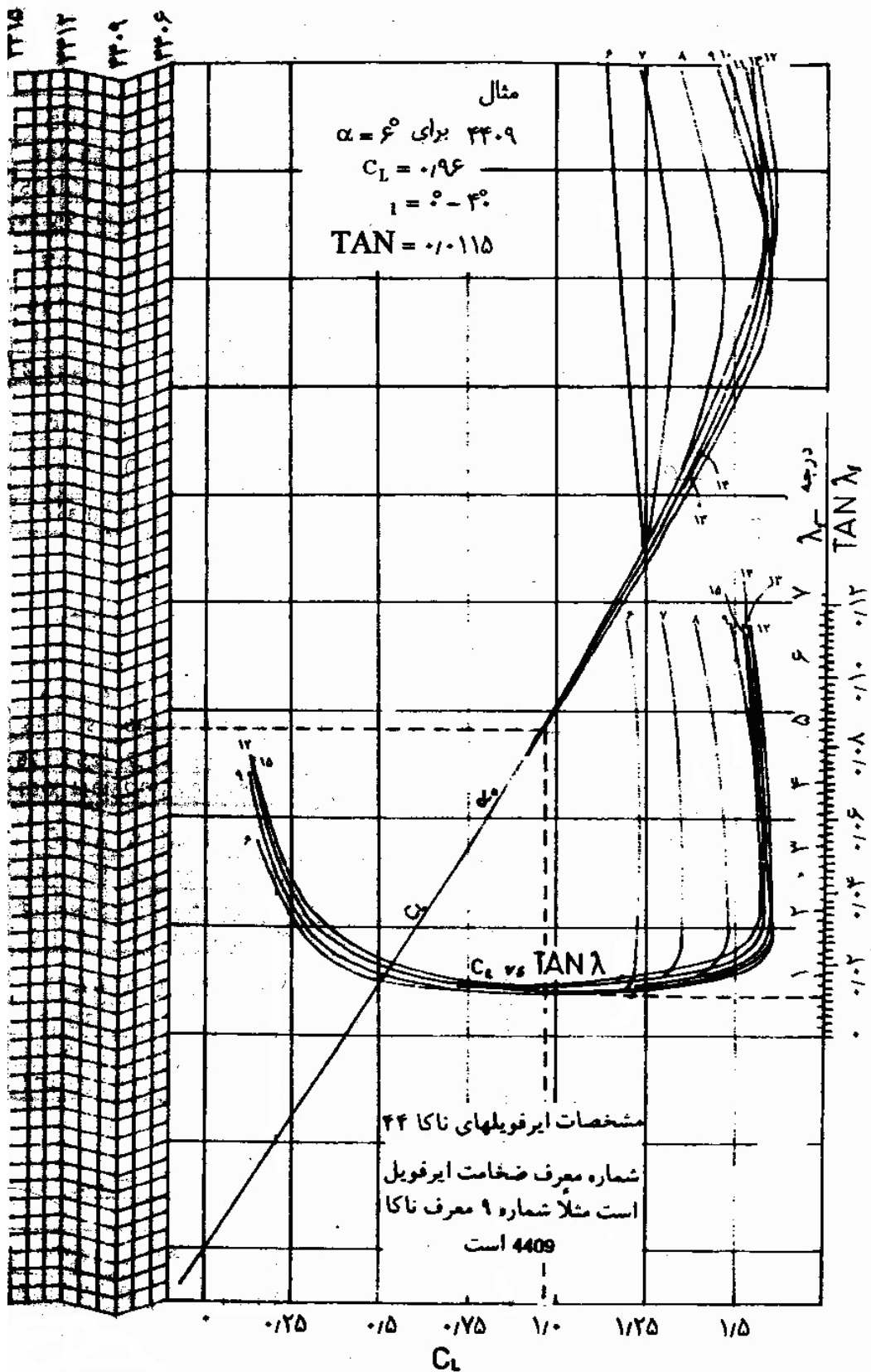
$$C_{Dp} = C_L \text{ton} \lambda_1 = 0.85 \text{ton}(0.683) = 0.0101 \quad C_D \text{ و } \lambda \text{ را محاسبه می کنیم:}$$

$$C_{DS} = 0.018 C_L^2 = 0.013 \quad \text{ضریب پسای جریان ثانویه:}$$

برای محاسبه  $C_{Da}$  باید با استفاده از سرعت متوسط سیال در پروانه  $Re$  را محاسبه کنیم:

$$\bar{V} = \sqrt{V_n^2 + \left(\frac{v+2}{2}\right)^2} \quad V_{t2} = \frac{ghd}{u\eta p}$$

$$u = \frac{N}{60} \pi D_0 = \frac{179}{60} \pi * 2.42 = 22.68 \text{ m/s}$$



شکل ۱۰-۴ منحنیهای مشخصه بعضی از ایرفویل‌های سری ۴۴ ناکا

ابتدا  $\eta_p$  را محاسبه می کنیم و سپس تصحیح می کنیم:  $\eta_p = 0.9$

$$V_{i2} = \frac{9.81 * 7.507}{22.68 * 0.9} = 3.608 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow \bar{V} = \sqrt{7.38^2 + \left(\frac{3.608}{2}\right)^2} = 7.6 \text{ m/s}$$

برای محاسبه  $Re$  باید از قطر هیدرولیکی استفاده کنیم:

$$D_h = D_o - D_i = 2.42 - 1.46 = 0.96 \text{ m}$$

$$Re = \frac{\bar{V} D_h}{\nu} = \frac{7.9 * 0.96}{10^{-7}} = 7.3 * 10^7$$

$$f = \frac{0.184}{Re^{0.2}} = \frac{0.184}{(7.3 * 10^7)^{0.2}} = 0.0049$$

$$C_{D_a} = \frac{1}{2} f \frac{S}{h}$$

$C_{D_a}$  همان ضریب درگ دیواره است.

$$s = \frac{D_o + D_i}{2} \frac{\pi}{4} = \frac{2.42 + 1.46}{2} * \frac{\pi}{4} = 1.523 \text{ m} \quad \text{تعداد پره های 4 عدد است:}$$

$$C_{D_a} = \frac{1}{2} * 0.0049 * \frac{1.523}{0.48} = 0.0076 \text{ m}$$

ضریب درگ کل:

$$C_D = C_{D_a} + C_{D_s} + C_{D_p} = 0.0076 + 0.013 + 0.0101 = 0.0307$$

$$\tan \lambda = \frac{c_D}{c_L} = \frac{0.0307}{0.85} = 0.0362 \Rightarrow \lambda = 2.07^\circ$$

در باره  $\eta_p$  را محاسبه برای این منظور ابتدا باید  $\beta_m$  را محاسبه کنیم:

$$\tan \beta_m = \frac{V_n}{u - \frac{V+2}{2}} = \frac{7.38}{22.68 - \frac{3.61}{2}} = 0.354 \Rightarrow \beta_m = 19.47^\circ$$

$$\Rightarrow \eta_p = 1 - \frac{v_n}{u} \frac{\sin \lambda}{\sin \beta_m \sin(\beta_m + \lambda)} = 1 - \frac{7.38}{22.68} \frac{\sin(2.07)}{\sin(19.47) \sin(19.47 + 2.07)}$$

$$\Rightarrow \eta_p = 0.904$$

$\eta_p$  بدست آمده به  $\eta_p$  حدس زده بسیار نزدیک است و تصحیح مجدد لازم ندارد اکنون

پروفیل را در برابر کاویتاسیون باز بینی می کنیم. از شکل (۱۰-۸) در می یابیم که

برای ضریب لیفت انتخابی  $C_K = 0.868$  است. ضریب کاویتاسیون:

$$\sigma = \frac{6.3 N_s^{4/3}}{10^r} = \frac{6.3(11000)^{4/3}}{100} = 1.54$$

$$NPSH = \sigma H = 1.54 * 6.97 = 10.74 m$$

$$NPSH = h_f + \frac{v_n^2}{2g} + C_K \frac{V_m^2}{2g} + H_{ii} \quad \text{از طرفی:}$$

$h_f$  برابر افت دو ورودی به افت در پره های کوتاه است.

$$V_m^2 \sqrt{v_n^2} + \left(4 - \frac{v+2}{2}\right)^2 = \sqrt{7.38^2 + \left(22.68 - \frac{3.61}{2}\right)^2} = 22.14 m/s$$

با استفاده از معادله زیر  $C_K$  را بدست می آوریم:

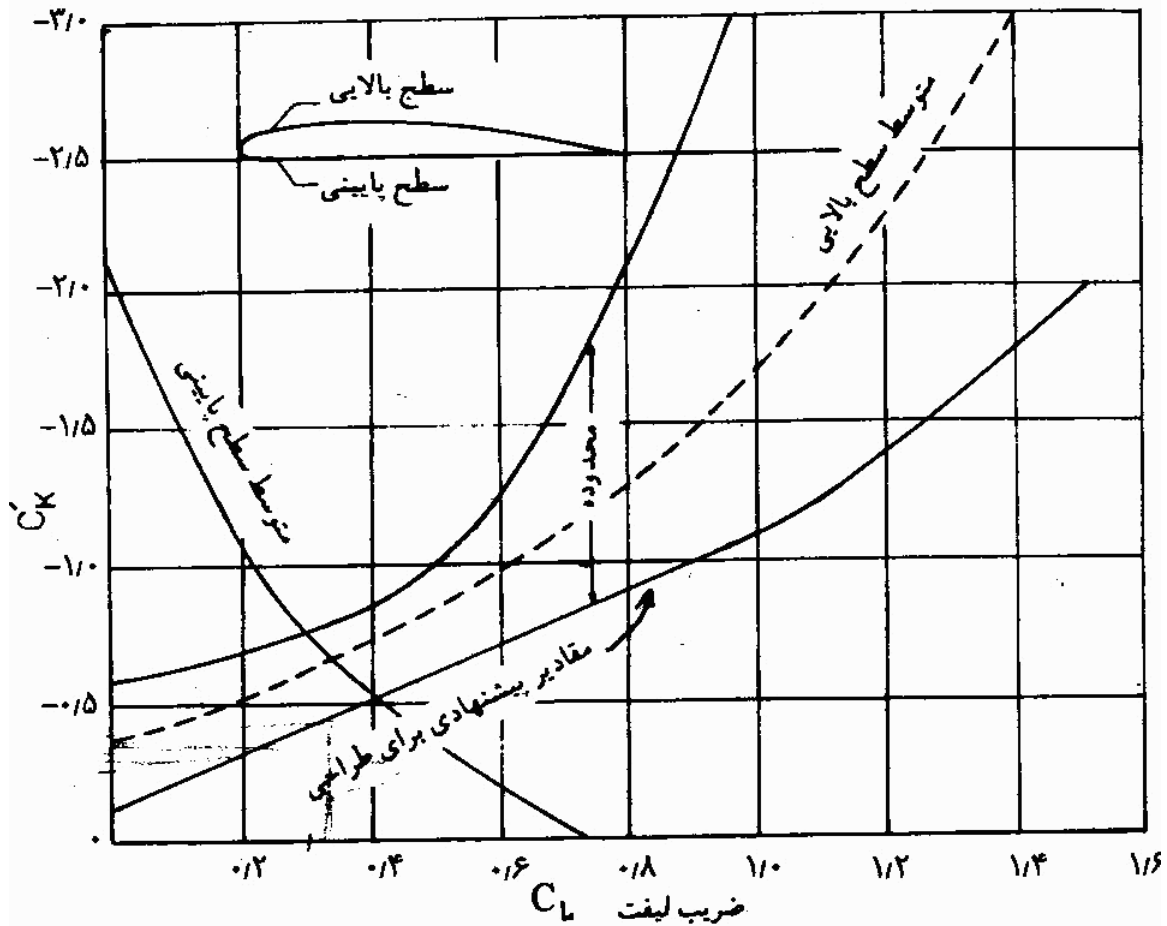
$$NPSH = H_{ii} + h_{ls} + \frac{vn^2}{2g} + C_K \frac{V_m^2}{2g}$$

$$10.74 = 0.056 + 0.016 + \frac{7.38^2}{2 \times 9.81} + C_K \frac{22.14^2}{2 \times 9.81}$$

$$\Rightarrow C_K = 0.38, \hat{C}_K = -C_K = -0.36$$

$C_K$  بدست آمده از  $C_K$  انتخابی بزرگتر است. بنابراین باید ضریب لیفت را کاهش داده و

مجدداً این فویل را طراحی کرد.



شکل ۸-۱۰ ضریب کاهش فشار حداکثر بر حسب ضریب همراه با مقادیری که برای طراحی پیشنهاد شده است.

با استفاده از  $C_K$  را انتخاب می کنیم از شکل (۸-۱۰) در می بابیم که با  $C_K$  به دست آماده مقدار  $C_L=0.21$  است. چنین ضریب لیفتی دارای کمترین  $\lambda$  نسبت به ضرایب لیفت کمتر از خود است.

$$C_L = 0.25, \lambda_1 = 1.98^\circ$$

$$C_{Dp} = C_L \tan \lambda_1 = 0.25 \tan(1.98) = 0.00864$$

$$C_{Ds} = 0.018 C_L^2 = 0.018 (0.25)^2 = 0.0013$$

$$\eta_p = 0.87$$

مجدداً  $\eta_p$  را برابر 0.87 حدس می زنیم:

$$V_{t2} = \frac{ghd}{u\eta_p} = \frac{9.81 * 7.507}{22.68 * 0.87} = 3.73 \text{ m/s}$$

$$\bar{V} = \sqrt{V_n^2 + \left(\frac{v+2}{2}\right)^2} = \sqrt{7.38^2 + \left(\frac{B.73}{2}\right)^2} = 7.61 \text{ m/s}$$

$$C_{DU} = 0.00307$$

$$\beta_m = \tan^{-1} \left( \frac{v_n}{u - \frac{v+2}{2}} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{7.38}{22.68 - \frac{3.73}{2}} \right) \Rightarrow \beta_m = 19.52^\circ$$

$$C_D = C_{DU} + C_{DS} + C_{DP} = 0.00864 + 0.00113 + 0.00307 = 0.01284$$

$$\tan \lambda = \frac{C_D}{C_L} = 0.0495 \rightarrow \lambda = 2.93$$

$$\eta_p = 1 - \frac{7.38}{22.68} \frac{\sin(2.93)}{\sin(19.52)\sin(19.52 + 2.93)} \Rightarrow \eta_p = 0.871 \rightarrow \text{نزدیک است}$$

حال پرو فیل را در برابر کاویتاسیون باز بینی می کنیم:

$$V_{rm} = \sqrt{v_n^2 + \left(u - \frac{v+2}{2}\right)^2} = 22.08 \text{ m/s}$$

$$NPSH = H_{el} + h_{ls} + \frac{vn^2}{2g} + C_K \frac{V_{rm}^2}{2g}$$

$$10.74 = 0.056 + 0.016 + \frac{7.38^2}{2 \times 9.81} + C_K \frac{22.08^2}{2 \times 9.81} \Rightarrow$$

$$C_K = 0.318, \quad C_K' = -C_K = -0.318$$

$C_K$  بدست آمده از  $C_K'$  قبلی است. بنابراین پروفیل پره در برابر کاویتاسیون ایمن است

با استفاده از معادله های (9-10) و (10-10) دیگر مشخصات پروفیل پره را بدست می

آوریم:

$$\frac{C}{t} = \frac{2v_{t2}}{C_L V_n} \frac{\sin^2 \beta_m}{\sin(\beta_m + \lambda)} \Rightarrow$$

$$\frac{C}{t} = \frac{2 * 3.73}{0.25 * 7.38} \frac{(2.83)(\sin 19.52)^2}{\sin(19.52 + 2.83)} \Rightarrow \frac{C}{t} = 1.186 \quad \text{صلبیت:}$$

$$t = \frac{\pi D_0}{4} = \frac{\pi * 2.42}{4} = 1.9 \text{ m}$$

فاصله بین دو پره متوالی:



$$C=1.9*1.186=2.25m$$

طول وتر پره ها:

$$\beta_m = \beta_m^{\circ} - \alpha = 19.52 - 2.25 = 17.24^{\circ}$$

زاویه متوسط پره ها:

اکنون در همین قطر پروفیل پره های ساکن راهنما را طراحی می کنیم. تعداد پره های راهنما 8 عدد انتخاب می شود. در قطر مذکور ایروفویل مذکور دارای کمترین  $\lambda$  در  $C_L=0.68$  است. از شکل (4-10) برای ایروفیل NACA4408 خواهیم داشت:

$$C_L = 0.68, \lambda_1 = 0.79, \alpha = 2.88^{\circ}$$

$$C_{DP} = C_L \tan \lambda_1 = 0.68(\tan 0.79) = 0.00933$$

$$C_{DS} = 0.18C_L^S = 0.00832$$

$$C_{Da} = \frac{1}{2} f \frac{S}{h}$$

ضریب اصطحکاک  $f$  و طول پره ( $h$ ) در پره های ساکن بعد از پروانه و پره های یکسان است. تنها فاصله متوسط دو پره متوالی ( $S$ ) به علت متفاوت بودن تعداد پره ها تغییر می کند.

$$S_V = \frac{D_o + D_I}{2} * \frac{\pi}{8} = \frac{2.42 + 1.46}{2} * \frac{\pi}{8} = 0.79m$$

$$C_{Da} = \frac{1}{2} * 0.0049 * \frac{0.79}{0.48} = 0.0039$$

$$C_{D_{total}} = C_{Da} + C_{DP} + C_{DS} = 0.0039 + 0.0093 + 0.0083 = 0.0215$$

$$\tan \lambda = \frac{C_D}{C_L} = \frac{0.0215}{0.68} = 0.316 \rightarrow \lambda = 1.81^{\circ}$$

با استفاده از معادلات (9-10) و (10-10) دیگر مشخصات پروفیل پره را بدست آورده و

با استفاده از معادله (11-10) افت را محاسبه می کنیم. بدین منظور ابتدا  $\beta_m^{\circ}$  را بدست

می آوریم:

$$\tan \beta_m^{\circ} = \frac{2V_n}{V_{t2}} = \frac{2*7.38}{3.73} = 3.96 \rightarrow \beta_m^{\circ} = 75.8^{\circ}$$

$$\frac{C_v}{t_v} = \frac{2V_{t2} \cos \lambda \sin^2 \beta_m}{C_L V_n \sin(\beta_m + \lambda)} = \frac{2 * 3.73 \cos(1.81)(\sin 75.8)^2}{0.68 * 7.38 \sin(75.8 + 1.81)}$$

صلبیت:

$$\Rightarrow \frac{C_v}{t_v} = 1.43$$

$$b_v = \frac{\pi D_o}{8} = \frac{\pi * 2.42}{8} = 0.95$$

فاصله بین دو پره متوالی:

$$C_v = 1.43 * 0.95 = 1.36 m$$

طول وترپره‌های ساکن بعد از پروانه:

$$h_{lv} = \frac{C_v V_n^2}{t_v} \frac{C_D}{2g \sin^3 \beta_m}$$

افت در پره های راهنما:

$$h_{lv} = 1.43 * \frac{7.38^2}{2 * 9.81} * \frac{0.0215}{(\sin 75.8)^3} = 0.094 m$$

$$\beta_{mv} = \beta_m + \alpha = 75.8 + 2.88 = 78.68^\circ$$

زاویه متوسط پره ها:

**فرض)** برای محاسبه  $H_d$  باید  $\overline{h_{lv}}$  را حساب کنیم که برای این منظور باید پره‌های

ساکن را برای چند قطر دیگر طراحی کرده و متوسط بگیریم با توجه به اینکه در

قطرهای کمتر  $h_{lv}$  افزایش خواهد یافت به طور تقریبی در زیر داریم:

$$\overline{h_{lv}} = 2h_{lv} = 2 * 0.094 = 0.188 m$$

$$\Rightarrow H_d = H + h_{II} + h_{ID} + h_{IB} + \overline{h_{lv}}$$

$$\Rightarrow H_d = 6.971 + 0.056 + 0.325 + 0.0235 + 0.016 + 0.188 = 7.58 m$$

حال می‌توانیم توان مصرفی پمپ را حساب کرد. بازه مکانیکی  $(\eta_m)$  را **0.96** در نظر

می‌گیریم:

$$\overline{\eta_p} \cong 0.908$$

$$\dot{w} = \frac{PQgH}{\eta_p} = \frac{1000 * 21.6 * 9.81 * 7.58}{0.908} = 1769 KW = 2365 hp$$

برای نقطه طرح

خطای حاصل محاسبه نسبت به مقدار واقعی موجود در کاتالوگ:

$$\begin{cases} \dot{w} = 2365 \text{ hp} \\ \dot{w} = 2000 \text{ hp} \end{cases} \Rightarrow error\% = \frac{|2000 - 2365|}{2000} \times 100 = 18\%$$

## عوامل خطا:

۱- در تونل آب موجود پره های ساکن نداریم پس اگر این پره ها را از  $H$  کم کنیم:

$$H = 7.38 \rightarrow \dot{w} = 1722 \text{ km} = 2302 \text{ hp}$$

$$error\% = \frac{12000 - 23021}{2000} \times 100 = 15\%$$

۲- مقدار راندمان متوسط به کمک نتایج تجربی فرض شده است، حال آنکه مقدار ممکن است کمی متفاوت باشد.

۳- در محاسبه هر پمپ مقادیر سرعت از هر منطقه از تونل آب ثابت در نظر گرفته شده است در صورتیکه می تواند کمتر از آن مقدار باشد (به علت تلفات)

۴- در مورد زانویی ها اثر  $vane$  داخل زانویی بصورت یک کاهش  $40\%$  در نظر گرفته شد در حالیکه برای اساس نتایج تا  $50\%$  نیز مؤثر است.

# پوست (الف)

ترجمہ کاتالوگ تونل آبی گارفیلد

# تونل آب گارفیلد توماس

(تونل آب سرعت بالا با سیکل بسته)

در بزرگترین تونل آبی جهان در دانشگاه ایالت پنسیلوانیا، جریان ۳۱ گرهی که با سرعت از روی اژدر عبور می کند، الگوی حباب های متلاطمی را تشکیل می دهد. دانشمندان ناظر می دانند که هرچه حباب های بیشتری را مشاهده کنند، اژدر از کارایی کمتری برخوردار خواهد بود. اژدری با شکل کامل دارای هیچ تلاطمی نیست، زیرا آب به صورت یکنواخت در اطراف آن جریان می یابد. همانند هواپیماها، تلاطم منجر به ایجاد سنگینی و کاهش سرعت موشک می شود. مهم تر آن که تلاطم در اژدرها موجب ایجاد نویز می شود.

پنجاه سال پیش نمایندگان آزمایشگاه تحقیقاتی مهمات سازی دانشگاه ایالت پنسیلوانیا و نیروی دریایی پیشنهادی را برای ساخت تونل آبی گارفیلد توماس ارائه کردند که یک تونل آبی ۴۸ اینچی بود که خیلی زودی به عنوان بزرگترین تونل آبی پرسرعت در جهان شناخته شد. این تونل آبی که در کمپ اصلی دانشگاه ساخته شد، در ۷ اکتبر ۱۹۴۹ اختصاص داده شده و شش ماه بعد کار خود را آغاز کرد. این تجهیزات جدید به افتخار گارفیلد توماس - یکی از نخستین فارغ التحصیلان ایالت پنسیلوانیا که در جنگ جهانی دوم زندگی خود را فدای وطنش نمود - به اسم او نامگذاری شد.

## پیشینه

ظرفیت کلی تونل - که طول آن حدود ۱۰۰ فوت و ارتفاع آن حدود ۳۲ فوت است - 100,000 گالن است. زمانی که این تونل در بالاترین سرعت خود کار می کند، هر سه دقیقه یکبار بیش از یک میلیون گالن آب از درون مقطع آزمایشی آن عبور می کند.

تونل آبی گارفیلد توماس، یک تونل آبی به قطر ۴۸ اینچ است که در بین سال های ۱۹۴۸ تا ۱۹۴۹ در آزمایشگاه تحقیقاتی مهمات سازی (ORL) ساخته شده و تحت پشتیبانی نیروی دریایی در دانشگاه ایالت پنسیلوانیا قرارداد.

گزارش آزمایشگاه در سال ۱۹۴۶ با عنوان پیشنهاد تونل آبی بیان کرده که از تونل جدید انتظار می رود تا:

- مبنای علمی محکمی را برای طراحی پروانه های زیر دریایی ایجاد کند
- بازدهی کلی ترکیب پوسته و پروانه را افزایش دهد
- پرتوی جدیدی را بر روی احتمال به دست آوردن پروانه هایی با سرعت های پیشرفته بالا بیفکند
- عملکرد کاملاً ایمن و بدون تخلخلی را برای پروانه تسلیحات هدایت شده ای که در سرعت های بیش از سرعت ماکزیمم ممکن کار می کنند، ارائه دهد.

برای این که آزمایشگاه بتواند به این اهداف دست پیدا کند، نیاز به تونل آبی پر سرعتی داشت که بزرگتر از هر تونلی باشد که تاکنون ساخته شده است. قطر مقطع

آزمایش باید حداقل ۴۸ اینچ بوده و سرعت آبی که از درون این مقطع می گذرد، ۳۰ تا ۳۵ گره ( ۴۸ تا ۵۶ فوت برثانیه) باشد. به علاوه، هزینه تونل - شامل ساخت وسایل و تجهیزات عکسبرداری آن - حدود ۱ میلیون دلار و هزینه نهایی آن حدود ۲ میلیون دلاریش بینی شد.

در این زمان طراحی پروانه های زیر آبی بیشتر تابع هنر بود تا عمل، و طراحان اژدر به داده های به دست آمده از تست آب متکی بودند. اما ORL از اهمیت اطلاع از خواص دقیق اختلال جریان که در اثر جریان موجود بر روی بدنه ایجاد می شد، آگاه بود. برای آرام تر و کارآمدتر کردن اژدر، محققان نیاز به تجهیزات آزمایشی برای اندازه گیری واقعی میدان اثر ایجاد شده توسط اژدر داشتند.

تحقیقات قبلی نیروی دریایی نشان داده بود که برای تعیین عملکرد واقعی پروانه، نمی توان آن را به خودی خود در یک جریان یکنواخت امتحان کرد. محققان با قراردادن پروانه بر روی وسیله آزمایش توانستند اثرات جریان روی پوسته و برهم کنش پروانه با جریان را ارزیابی کنند. به علاوه برای اندازه گیری دینامیک مدل های اژدر، محققان نیاز به بررسی حفراتی داشتند که در اثر تشکیل حباب های میدان گازی در آب (کاویتاسیون) ناشی از وجود نواحی موضعی با فشار بخار بالاتر

## مراحل ساخت تونل آب گارفیلد در ۱۹۴۸



ساخت فنداسیون تونل آب  
کنترل پره ها است



محل نصب پمپ سیرکوله و کارگری که مشغول



مراحل تکمیل پروژه



تونل آب کامل شده



مرحله ساخت ساختمان تونل آب



ساختمان تکمیل شده

از فشار استاتیک موضعی ایجاد می شد. این ناحیه اساسی نقشی بحرانی در طراحی

اژدر ایفا می کند، زیرا نتیجه اولیه ارتعاش (noise) زیر آب است.



## طراحی تونل

تلاش های تیم طراحی برای ساختن تونل زیر آبی واقعا جالب است وقتی بدانید که اطلاعات کمی در مورد جریانات عدد رینولد صحیح در دست بوده و دوره طراحی تونل بسیار کوتاه بوده است. این تونل از نظر هیدرولیک کارآمد بوده، از نظر آکوستیک آرام و از نظر مکانیکی قدرتمند است ( حتی با استانداردهای امروزی). در این زمان، گروهی از ORL خصوصیات را برای ساخت پوسته تونل ارائه کردند. آن ها دو هدف عمده برای طراحی خود داشتند: کارایی و ساختار حجیم برای میرایی ارتعاش.

## بازدهی

مهندسان می دانند که آب موجود در تونل باید براساس مقدار قدرت ورودی تا حد امکان با سرعت بالا حرکت کند. موتور الکتریکی مورد استفاده برای راندن پمپ اصلی در ۲۰۰۰ hp تعیین شده و سرعت آن بین ۰ تا ۱۸۰ rpm متغیر است. این موتور به آمپلی فایری به قطر ۹۵ اینچ با شیب قابل تنظیم جفت شده است. موتورهای بزرگتری نیز در نظر گرفته شده اند، اما هزینه اجرای آن ها عاملی بازدارنده است. برای رفع این مشکل، مهندسان می خواهند اجزای تونل را به گونه ای طراحی کنند که افت جریان کمینه شده و قسمت اعظم انرژی را بتوان در قسمت دیفیوزر بازیابی نمود.

پیش از آغاز ساخت تونل آب، تیم طراحی تونل های موجود را مورد بررسی قراردادند. آن ها همچنین اطلاعاتی را در رابطه با جریان اجزای تونل مرور کرده و چنین جریاناتی را آنالیز نمودند. آن ها برای اصلاح رقابت طراحی فنی خود، یک مدل تونل آبی را در لابراتوار هیدرولیک ایالت پنسیلوانیا مورد بررسی قراردادند. این تونل آبی تجربی از ایجاد یک روش مستدل برای آنالیز جریان در اجزای تونل حمایت می کرد. مطالعه روابط بین اجزای تونل را می توان به صورت تجربی با استفاده از این مدل انجام داد. در یک تلاش تحقیقاتی موازی، تیم دیگری به انجام تحقیقات تحلیلی می پرداخت.

این مطالعات بر روی مقاطع هیدرودینامیک بحرانی همچون نازل مدار تونل، مقطع آزمایش، مقطع انتقال، دیفیوزر و محل های چرخش متمرکز شده بودند. این تیم دیفیوزر و زانویی ها را شدیداً مورد بررسی قرارداد، اما کار آن ها بر روی نازل و مقاطع انتقال تحلیلی تر بود. مقاطعی با کانتورهای منحنی شکل فوراً تحت کار قرار گرفته و بعد از مقطع آزمایش در بالاترین حد در معرض ایجاد کاویناسیون یا جدایش جریان قرار داشت.

محققان مطالعاتی را انجام دادند که فیزیک چگونگی جریان آب در نازل و نفوذ مجدد آن به درون مدار برای بازیابی قسمتی از انرژی را بررسی می کرد. آن ها به دلیل افت انرژی حاصله نمی خواستند ناحیه کاملاً یکنواختی را در سرتاسر تونل داشته باشند. بزرگترین افت انرژی در تونل آبی در مقطع آزمایش صورت می گیرد که در آن بالاترین سرعت متمرکز می شود.

یکی از موارد بسیار مهم، چگونگی ایجاد لایه های مرزی در امتداد جداره با عدد رینولد بالا است. با جریان یافتن آب در امتداد جداره، اصطکاک منجر به ایجاد تاخیر در جریان نزدیک سطح شده و یک لایه مرزی را ایجاد می کند. این منطقه فوق العاده متلاطم میدان جریان، آب را از جداره دور کرده و موجب افت انرژی می شود. همچنین اگر مساحت سطح مقطع دیفیوزر به سرعت افزایش پیدا کند، لایه های مرزی نمی توانند دیواره را دنبال کنند. بنابراین لایه های مرزی از جداره جدا شده و منجر به افت انرژی می شوند.

در مارچ ۱۹۴۶ اعضای تیم نخستین آنالیز این میدان جریان را به پایان رسانده و کار خود را بر مبنای روابط پروفیل سرعت توربولنت ایجاد شده قراردادند. آنالیز آن ها شامل تعمیماتی در تئوری مرسوم بوده و منجر به پیش بینی پروفیل های سرعت شد. با وجود آن که این آنالیز فاقد بسیاری از ابزارهای قابل دسترس کنونی بود، کار آن ها منجر به طراحی موفق تونل آبی گردید.

## ساختار

هنگامی که محققان بر روی تونل کار می کردند، تیم آن ها تصمیم گرفت که این تونل باید حجیم باشد تا بتواند ارتعاش را کمینه کند. مواد لازم برای مقاطع تونل براساس تکنیک های طراحی و ساخت و نیز هزینه تولید کانتورهای جریان فوق دقیق تهیه شد. مقاطع حد فاصل و استوانه ای فولادی برای اجزای اصلی تونل انتخاب شد. مقطع آزمایش و مقطع دیفیوزر رو به پایین از قطعات ریختگی چدن ساخته شد.

این اندازه عظیم موجب میرایی ارتعاش شده و توضیح می دهد که چرا این امکانات لابراتوار یکی از آرام ترین تونل های آزمایشی در جهان است.

## کنترل تونل



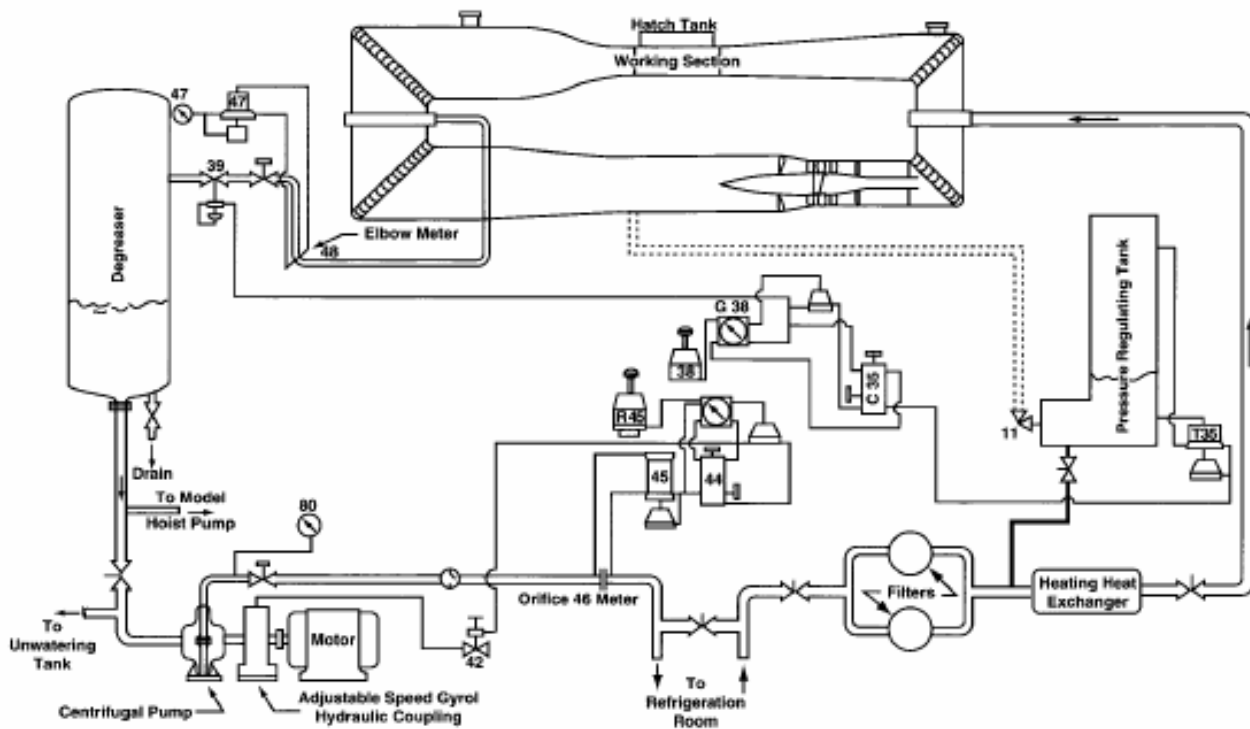
بخشی از تجهیزات کنترل سرعت و فشار در تونل آب

کنترل سرعت از طریق پمپی از نوع پروانه جریان محوری با تغییر دادن سرعت چرخش پره پیش ران (impeller) و شیب چهار تیغه پیشران صورت می گیرد. پره پیشران به وسیله موتور القایی با سرعت متغیر 2000 hp در سرعت های بین ۰ تا 180 rpm به حرکت درآمده و شیب تیغه را می توان با استفاده از سروومکانیزم هیدرولیکی که از راه دور از طریق اتاق کنترل تونل اداره می شود، تا بیش از ۲۸ درجه تغییر داد. این بازه وسیع سرعت عملیات با کنترل سرعت دقیق و اتوماتیک تا حد ۵۰٪ مقدار تنظیم شده در شرایط بارگذاری طراحی به وسیله سیستم تحریک کرامر اصلاح شده به دست می آید که در روش عملیاتی آن، نیاز به وجود تجهیزات راه اندازی در مقیاس بزرگ حذف شده و بنابراین هزینه های راه اندازی و کاری کاهش می یابد.

یکی از الزامات طراحی تونل که اجازه مطالعه کاویتاسیون را می دهد، کنترل فشار استاتیک در داخل مقطع آزمایش است. کنترل فشار به وسیله تغییر دادن فشار هوا در قسمت فوقانی یک تانک اصلاح کننده فشار به دست می آید که به پایه تونل متصل است. این تانک شامل تخته شناوری است که از تماس هوا با سطح بزرگی از آب جلوگیری می کند. این تخته یکی از عوامل ضروری برای کمینه سازی محتوای گاز در آب است.

این منحصر به فرد بودن سیستم اصلاح فشار در این واقعیت نهفته است که ایجاد تغییرات مطلوب در فشار در مقطع آزمایش در هنگام تنظیم فشار به شکل کاملا اتوماتیک انجام می شود.

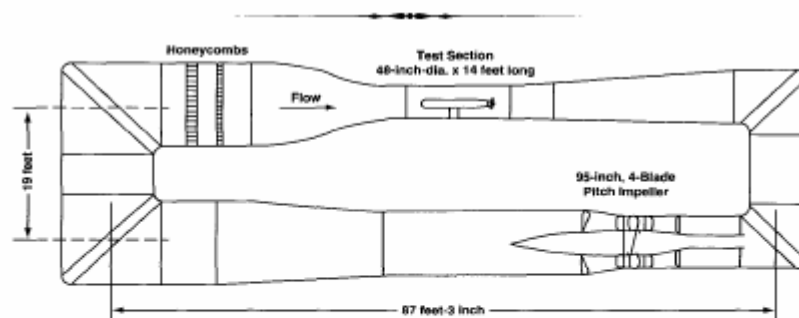
تونل آب شامل یک تهویه آب یا بای پاس، یک سیستم فیلتر، سیستم تخلیه گاز و سیستم کنترل درجه حرارت آب است. دیاگرام های عملی زیر این سیستم بای پاس را به همراه تانک اصلاح کننده فشار و وسایل مکانیکی مناسب نشان می دهد. یکی از خصوصیات منحصر به فرد تونل آبی این است که وضعیت آب را می توان در طول عملیات کنترل کرد. کنترل محتوای آب خصوصا بدین دلیل اهمیت دارد که مقدار گاز بر روی جوانه زنی حفرات (کاویتاسیون) و رشد آن ها تاثیر می گذارد.



Above: Tunnel bypass system and controls

سیستم بای پاس و کنترل تونل آب

## خصوصیات تونل آبی گارفیلد توماس



Description of Facility:  
 Type of Drive System:  
 Total Motor Power:  
 Working Section Max. Velocity:  
 Max. & Min. Abs. Pressure:

Closed Circuit, Closed Jet  
 4-Blade Adjustable Pitch Impeller  
 2,000 hp Variable Speed  
 60 ft/s  
 60 psia to 3 psia

\*قابلیت های اندازه گیری: نیروی محرکه - نیرو و گشتاور پایدار، وابستگی به عدد رینولد و نسبت های پیشرفته

\*آکوستیک: نیروی ناپایدار شافت و بدنه، نیروهای جانبی، فشارهای ناپایدار اندازه گیری شده با تراز، شتاب، لیزر اندازه گیری ارتعاش، نويز حرارتی برای ردیف پایین جریان، هیدروفون های پنجره ای و هیدروفون متمرکز تانک روزنه

\*کاویتاسیون: شروع، دزیننس، شکل، زاویه حمله مدل، محتوای جوانه ها، وابستگی به عدد رینولد و نسبت های پیشرفته، قدرت برخورد و نیروهای جانبی، شکست حفرات و محتوای هوا

\*خصوصیات میدان جریان: بررسی های خطی و محیطی با جستجو گر های (probes) فشار پنج حفره ای، سرعت سنجی داپلر لیزر، توزیعات فشار استاتیک

\*مشاهده جریان: رنگ روغن، ورقه نور لیزر، حباب، پرزهای ریز (mini tufts)،

سرعت سنجی تصویر ذره ای

\*مانورینگ: کنترل نیروهای پره

\*آزمایش های انجام شده: مدل های قدرت، چرخش یا بازگشت بدنه ها، هیدروفویل، پروانه ها و غیره

\*ساخت وسایل: دینامومترهای پروانه، پروب های فشارپنج حفره ای، لوله های پیتوت، لیزرها، سنسورهای فشار، هیدروفون ها، مکانیزم حرکت صفحه ای، تعادل

نیرو

\*نوع و مکان دینامومترهای گشتاور و نیروی محوری: مدل نصب شده داخلی تا حد

150 hp

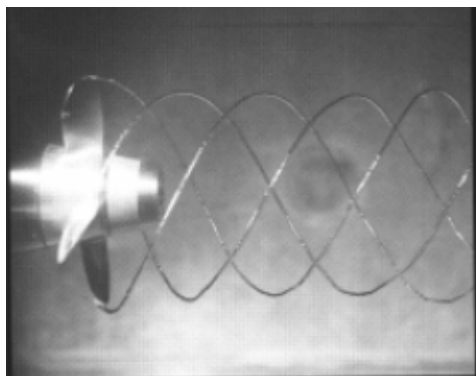
\*بازه اندازه پروانه یا مدل: اندازه قطر مدل بین ۳,۵ تا ۲۵ اینچ

\*سایر موارد: سطح تلاطم تونل در مقطع آزمایش برابر با ۰,۱٪ است. محتوای هوا را می

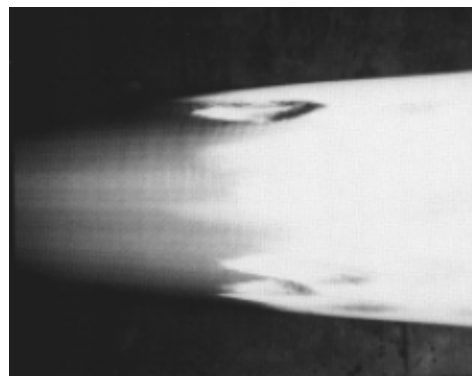
توان تا حد 1 ppm/mole کنترل کرد. این اندازه گیری ها را می توان برای پایداری و

کنترل وسایل مربوطه از نوع توابع هیدرودینامیک قرارداد. سیستم هیدروفون

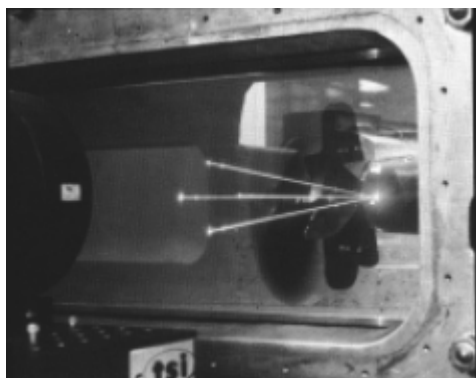
جهتدار برای اندازه گیری های آکوستیک نسبی.



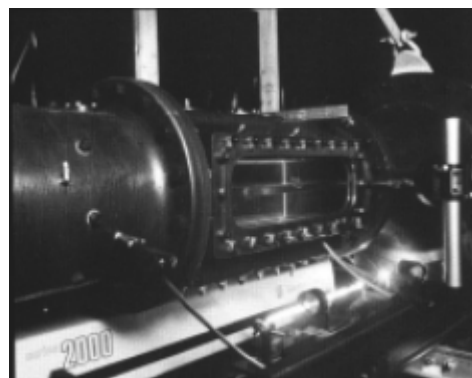
مشاهده کاویتاسیون از نوع چرخشی ناشی از حرکت پره



مشاهده گذار لایه مرزی در سطح با استفاده از عبور جریان از روی یک دماغه گرم



اندازه گیری سرعت جریان روی پره بوسیله سرعت سنج لیزری داپلر

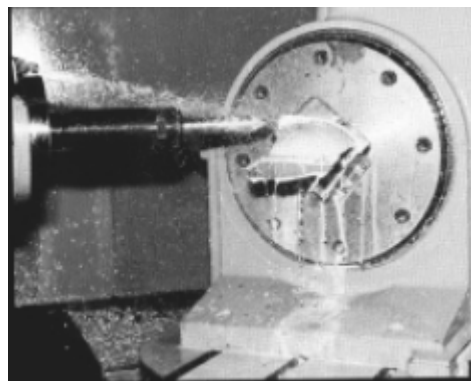


اندازه گیری متمرکز پلیمر در آزمایش کاهش درگ بوسیله دستگاه لیزر د تونل آب ۱۲ اینچ





مدل کردن پره پیشران بوسیله کامپیوتر



ساخت پره پیشران بوسیله دستگاه تراش

پنج محور

## عملکرد

تونل آبی گارفیلد توماس تنها یک قطعه فلز است، اما ارزش واقعی آن در دانشمندی نهفته است که از آن بهره می گیرند. آن ها نظریات، ایده ها را خلق کرده اند که رابطه زیادی با زمینه مکانیک سیالات و آکوستیک داشته و کار آن ها به خوبی در سرتاسر جهان شناخته شده است.

در سال ۱۹۵۰، جیمز رابرتسون اولین هدایت کننده تونل آبی گارفیلد توماس بود. او و پنج راهنمای بعدی اش برنامه های تحقیقاتی و توسعه ای را ترتیب دادند که بر روی افزایش درگ دینامیک سیالات و پدیده آکوستیک تمرکز می کرد. چنین آگاهی می تواند منجر به عملکرد کارآمدتر، آرام تر و بی نقص تری برای پروانه ها و توربومشین های کم سرعت شود.

در طول ۵۰ سال کارتونل، محققان ARL مطالعاتی را بر روی تلاطم، کاهش کشش، جریان و آمکوستیک ساختاری، کنترل نویز فعال و جوانه زنی حفرات (کاویتاسیون) انجام داده اند. در طول سالیان، کار آن ها منجر به پیشرفت ساخت وسایل و تکنیک های تجربی و نیز پیوند بین طراحی قسمت دافعه با دینامیک و آکوستیک تجربی و محاسباتی شده است.

این واقعیت که تونل آبی در مدت ۳۸ سال تقریباً بی وقفه و بدون هیچ گونه توقف عمده ای کار کرده، برای بسیاری از افرای که در طراحی و ساخت آن دخیل بوده اند، شگفت آور است. اما در سال ۱۹۸۸ این لابراتوار پروژه بازسازی عمده ای را برای حذف نشت های تونل، جلای مجدد شافت محرک پروانه اصلی و اصلاح پروانه و چرخاندن بادنها برای بهبود خواص هیدرودینامیک و هیدروآکوستیک آن ترتیب داد. همچنین در این پروژه سیستم کنترل قدرت و سرعت محرک اصلی، سیستم کنترل فشار تونل، وسایل اتاق کنترل و سیستم قدرت مدل ارتقا داده شد.

قابلیت های اندازه گیری کنونی در تونل آبی ۴۸ اینچی، داده هایی را برای دافعه، آکوستیک، کاویتاسیون، خصوصیات میدان جریان، رؤیت جریان و مانورینگ فراهم می کند. در تست ها و آزمایش ها از تکنیک های متوسط زمانی، وابستگی زمانی و اندازه گیری نوری استفاده شده است. ساخت وسایل برای اندازه گیری های وابسته به زمان شامل ردیف نویز به جریان حرارتی از هیدروفون ها، هیدروفون های پنجره ای و یک هیدروفون متمرکز تانک روزنه است. چندین تکنیک نوری برای GTWT و

سایر امکانات آزمایشی مورد استفاده قرار گرفته است. این تکنیک ها شامل سرعت سنجی داپرلیزر، ارتعاش سنجی لیزر و سرعت سنجی تصویر ذره ای می باشند.

## تونل آب و نیروی دریایی آمریکا

ثابت شده است که تونل آبی یک امکانات هیدرودینامیک منحصر به فرد بوده و لابراتوار را قادر ساخته تا از تحقیقات و فناوری ساختی بهره بگیرد که منجر به پیشرفت سریع نیروی دریایی شده است. بسیاری از این کاربردها به صورت طرح های زیرآبی ای ایجاد شدند که از توربوماشین های برنامه R&D که در زمان رهبری جرج واشنگتن صورت می گرفت، ناشی می شد. بزرگترین شاخص تونل آبی این بود که امکان طراحی پروانه های اصلاح کننده اثر را برای لابراتوار فراهم می کرد. با اندازه گیری این اثرات، این تجهیزات می توانست نظریاتی را در مورد چگونگی طراحی پروانه ها برای موقعیت های اصلاح اثر ارائه دهد. این قابلیت منجر به ساخت پروانه های آرام تری برای نیروی دریایی شده است.

علاوه بر تست پروانه، کارکنان ARL نخستین آزمایش مدل زیرآبی را در این تجهیزات انجام داده اند. چنین کارهایی منجر به افزایش موفقیت در طراحی وسایل زیرآبی شده است. برنامه های دیگری نیز به طراحی پروانه و تست های انجام شده در تونل آبی بستگی دارد.

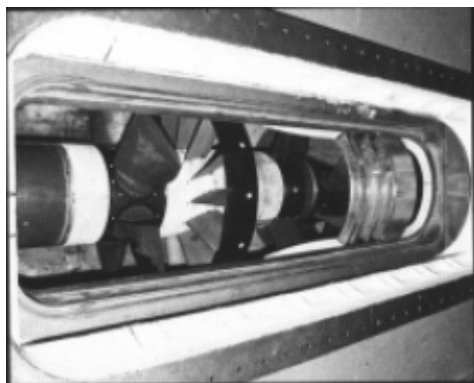
تونل آبی با بسیاری از برنامه های نیروی دریایی با فراهم کردن دسته ای از داده های تجربی که معمولا عملکرد کاویتاسیون را تفسیر می کند، ارتباط دارد. کار حاضر از

سیستم های دفاع بحرانی ای همچون موشک پلاریس، موشک SUBROC، اژدر MK-46 و اژدر MK-44 حمایت می کند.

## تجهیزات کنونی

امروزه تونل آبی گارفیلد توماس، مجموعه ای از تجهیزات آزمایشی هیدرودینامیک و هیدروآکوستیک است که در کنفرانس تانک کشش بین المللی (ITTC) – سازمانی از کشورهای عضوی که کشتی ها و سائرسازه های زیرآبی را طراحی و تست می کنند - ثبت شده است. از زمان آغاز عملیات، تونل آبی امکانات خود را افزایش داده است. این گسترش شامل افزودن چندین تونل کوچک تر در هاوسینگ ساختمان تونل آبی است. با بودن یک تونل آبی کوچک تر، محققان می توانند مسائل فیزیکی خاصی را حل کرده و در نتیجه این کارخصوصا برای کارهای دانشجویان کارشناسی مناسب است.

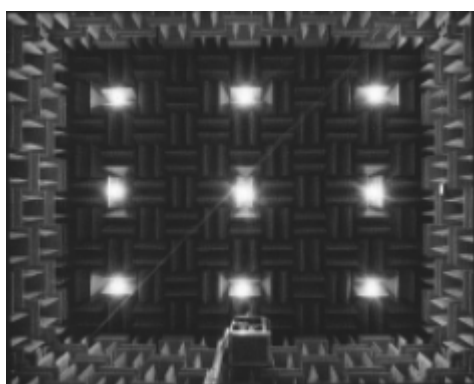
این تلاش برای تعمیم از سال ۱۹۵۱ آغاز شد، زمانی که لابراتوار یک تونل آبی ۱۲ اینچی را برای تکمیل تونلی به قطر ۴۸ اینچی ساخت. این تونل کوچک تر را می توان با مقطع آزمایش مدوری به قطر ۱۲ اینچ و یا با مقطعی مستطیلی شکل به ابعاد ۴،۵\*۲۰ اینچ مربع مورد استفاده قرار داده و سرعت آبی برابر با ۸۰ فوت در ثانیه را به دست آورد. این تونل از آزمایش های مقدماتی محققان مختلفی در زمینه هیدرودینامیک حمایت کرده و به توسعه وسایل پیشرفته ای همچون سیستم های اندازه گیری بزرگتر، نخستین سیستم عکسبرداری شیلرن و پروب های فشار پنج حفره ای کمک نموده است.



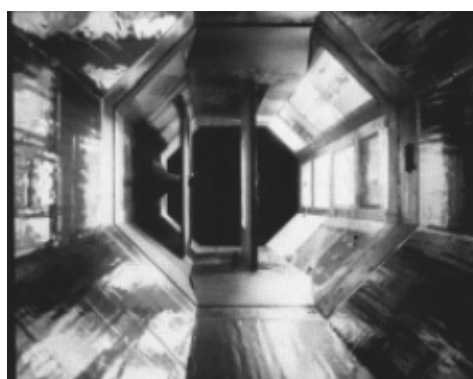
پمپ رینولدز بالا ، نصب شده در دریچه  
آب ۴۸ اینچ (HIREP)



اتاق کنترل تونل آب ۴۸ اینچ



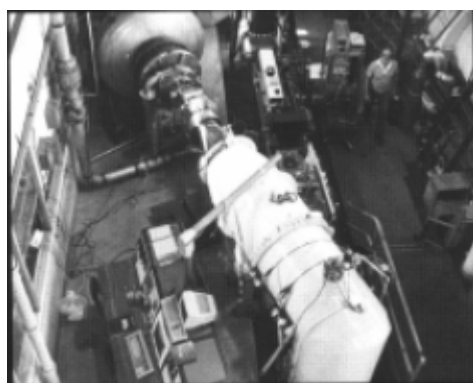
جریان پیرامون محفظه بدون انعکاس  
باد زیر صوت



تجهیزات ایجاد گردابه نصب شده در تونل



تانک پر انعکاس (Reverberant tank)



پمپ سانتریفیوژ مورد تست

در سال ۱۹۶۰، تونل سومی در لابراتوار ساخته شد. این تونل پرسرعت که توسط  
NASA ساخته شده بود، برای مطالعه کاویتاسیون در پمپ های اکسیژن و نیتروژن

مایع مورد استفاده در صنعت فضا به کار می رفت. در داخل این تجهیزات، جریان می توانست از طریق مقطع آزمایش خود به قطر ۱۱,۵ اینچ به سرعت های بالای ۲۹۰ فوت بر ثانیه دست پیدا کند. همچنین می توان تحقیقاتی را با بهره گیری از آب یا مایعات دیگری همچون فرئون ۱۱۳ انجام داد. این تونل برای مطالعات آسیب کاویتاسیون بر روی سطوحی از جنس مواد مختلف شامل برنز، فولاد زنگ نزن و کامپوزیت ها مورد استفاده قرار گرفته است.

در سال ۱۹۸۸ لازم بود لابر اتوار تجهیزات مضاعفی را برای حمایت از این تست ها و انواع دیگر آزمایش های اکوستیک بسازد. یک محفظه ضد اکو با جریان بزرگ در ساختمان اصلی که تونل آبی در آن قرار داشت، ساخته شد. با حجم کاری به ابعاد ۱۸ فوت عرض \* ۲۲ فوت عمق \* ۳۰ فوت ارتفاع، این محفظه دارای فرکانس cut off پایین ۹۰ هرتز بود. این امکانات تطبیق پذیر را می توان به عنوان یک محفظه ضد اکوی نرمال و یا برای مطالعه فن جریان محوری یا تجهیزات اپن جت آرام مورد استفاده قرارداد.

از آن جا که این تنها نوع ۱ ز این امکانات تحقیقات لایه مرزی در جهان است که در سال ۱۹۶۱ ساخته شده، دارای یک مقطع آزمایش به قطر ۱۱,۵ اینچ می باشد. گلیسرین با سرعت ۲۰۰ برابر بزرگتر از آب به عنوان مایع کاری در تونل حلقه بسته مورد استفاده قرار می گیرد. این سرعت بالا اثرات لایه مرزی جریان بر روی اشیای داخل تونل را تشدید می کند. محققان از این امکانات برای انجام مطالعات مشخصی

بر روی خصوصیات توربولنس در لوله کاملی با سرعت سیال ۲۰ فوت بر ثانیه بهره گرفته اند.

علاوه بر ساخت تونل های جدید، ARL مقاطع آزمایش تونل های کنونی را برای افزایش قابلیت های بالقوه آنها اصلاح کرده است. در سال ۱۹۸۵ مهندسين لابراتوار تجهيزات پمپی را با عدد رینولد بالا (HIREP) ساختند که درمقطع آزمایش تونل آبی به قطر ۴۸ اینچ قرارداد. HIREP شامل یک پمپ به قطر ۴۲ اینچ است که توسط توربین جریانی به قطر ۴۸ اینچ از طریق یک شافت به حرکت در می آید. این ابعاد بزرگ اجازه تست کردن تیغه های دافعه ای را با اعداد رینولد بزرگتر از تیغه های مدلی که در پشت وسایل زیرآبی نصب می شود، می دهد. اندازه HIREP بدین معنی است که می تواند انواع مختلفی از وسایل را در قاب های ساکن و چرخشی مرجع خود جای دهد. به علاوه، محققان ARL می توانند لایه های مرزی با اعداد رینولد بسیار بزرگ را با نصب صفحه مسطح بزرگی در داخل تونل آبی به قطر ۴۸ اینچ مطالعه کنند.

مهندسان تونل آبی برای کار در آکوستیک سازه ای می توانند لابراتوار آکوستیک سازه ای (SAL) را که در سال ۱۹۶۸ ساخته شده و تانک ریوربرانت را که در سال ۱۹۹۴ ساخته شده به خدمت بگیرند. قابلیت های SAL به ابعاد ۸ فوت عرض \* ۸ فوت عمق \* ۲۵ فوت ارتفاع عبارتند از:

- کالیبره کردن فشار آکوستیک در مدل و ترانسدیوسرهای نیروهای ناپایدار
- اندازه گیری دریافت و میرایی سازه های بزرگ

• اندازه گیری بازدهی تشعشع سازه ای در داخل یک تانک غیرمتقارن پر

انعکاس (reverberant tank)

تانک پر انعکاس به ابعاد ۲۸,۷ فوت عرض \* ۲۲,۷ فوت عمق \* ۱۸ فوت ارتفاع برای

اندازه گیری دریافت، فاکتورافت و بازدهی تشعشع سازه های بزرگ و کوچک مورد

استفاده قرار می گیرد.

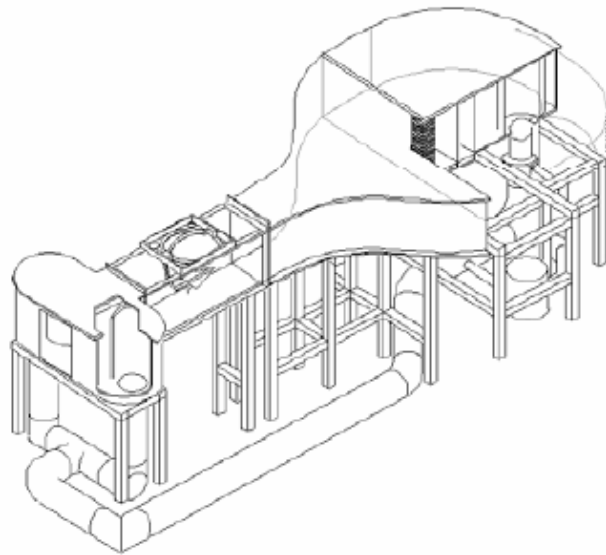


# پوست (ب)

ترجمہ کاتالوگ تونل آبی RollingHills

# RESEARCH WATER TUNNELS

## SPECIFICATIONS

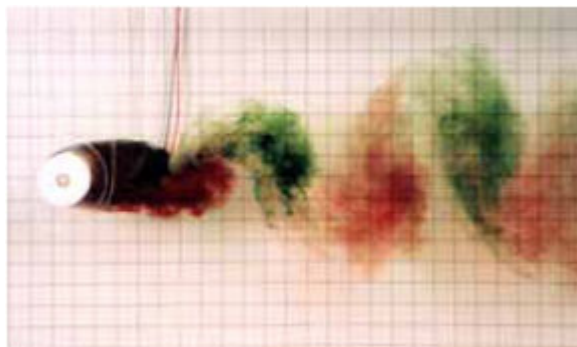
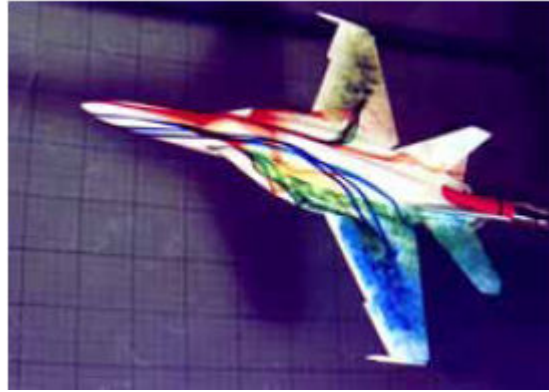
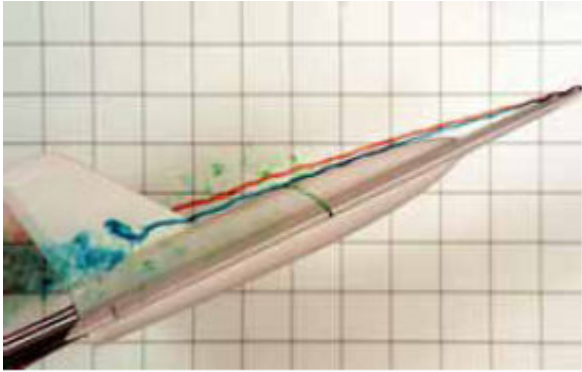


## مقدمه

شرکت تحقیقاتی رولینگ هیلز، یک شرکت تکنولوژی هوانوردی است که در سال ۲۰۰۲ تاسیس شده است. یکی از اهداف کلیدی این شرکت توسعه تکتولوژی هایی است که بتواند به درک پدیده هوانوردی کمک کند. تونل آب یک طراحی اولیه و ابزار تحقیقاتی عالی برای بررسی فیزیک جریان مبنای است که عملکرد وسایل هوایی را سبب می شود. دلیل این امر عمدتاً کیفیت فوق العاده بالای رؤیت جریانی است که در تونل آبی میسر می باشد.

با وجود آن که زمانی تست تونل آب تنها به عنوان ابزاری کیفی برای رؤیت میدان جریان حول وسایل در نظر گرفته می شد، RHRC این تکنیک را به بلوغ رسانده تا اندازه گیری های کمی نیروها و ممان ها را با تعادل گیج کرنش در آب شامل شود. علاوه بر اندازه گیری های استاتیک، تونل آبی ابزاری عالی برای مطالعه حرکات دینامیک هواپیما و اختلافات حاصل در میدان جریان و نیروها و ممان های مربوطه است. در یک تونل بادی زیر مقیاس باید آزمایش های دینامیکی را در سرعت های بالاتر از مقیاس کامل انجام داد. در تونل آب، نرخ های مقیاس بندی شده دینامیکی بسیار پایین تر از مقیاس کامل بوده و در نتیجه بسیاری از مشکلاتی که معمولاً در آزمایش های دینامیک یافت می شود، کاهش پیدا می کند. در این نرخ های مقیاس بندی شده، نیروهای اینرسی به شدت کوچک شده و استحکام، سفتی و اندازه ساپورت مدل شدیداً کاهش می یابد. این امر اجازه می دهد تا انواع مختلفی

از آزمایش ها با یک سیستم پشتیبان کامپیوتری چند محوری انجام شود که در بخش های بعد در مورد آن صحبت شده است.



**RHRC** دو مدل متفاوت برای تونل آبی تحقیقاتی ارائه می دهد که عبارتند از مدل ۲۴۳۶ و مدل ۱۵۲۰. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده، طرح کلی این دو تونل

آبی تقریباً یکسان بوده و اختلاف اصلی آن ها اندازه مقاطع آزمایش است. هردو تونل از یک مقطع آزمایش "سطح آزاد" بهره می برند که بدون ضرورت زهکشی تونل، اجازه دسترسی آسان به قسمت تست را در طول آزمایش برای تغییرات مدل یا کنترل حرکت به آن می دهد. مدل ۲۴۳۶ دارای مقطع آزمایشی است که عرض آن ۲۴ اینچ، عمق آن ۳۶ اینچ و طول آن ۷۲ اینچ بوده و ظرفیت کلی آن حدود ۵۰۰۰ گالن است. اندازه مدل ۲۴۳۶ به گونه ای طراحی شده که نسبت ظاهری معمول  $1/32^{nd}$  را بتوان برای هواپیما درزویای حمله بالا ( تا حد ۹۰ درجه) تست کرده و درعین حال عاری از اثرات انسداد اضافی و تداخل جداره باقی بماند. مدل ۱۵۲۰ دارای مقطع آزمایشی است که عرض آن ۱۵ اینچ، عمق آن ۲۰ اینچ و طول آن ۶۰ اینچ بوده و ظرفیت کلی آن حدود ۱۰۰۰ گالن است. اندازه مدل ۱۵۲۰ برای استفاده با مدل های هواپیما با مقیاس معمول  $1/48^{th}$  طراحی شده است. هردو سیستم را می توان به وسیله تکنیسین RHRC منتقل، تنظیم، کالیبره و راه اندازی کرده و اکنون هردو مدل ۱۵۲۰ و ۲۴۳۶ به شکل کیت قابل دسترس می باشند. در شکل کیت، مشتری می تواند برای صرفه جویی در پول خود تونل آبی را در خانه سرهم کند. این کیت شامل دستورالعمل هایی با نمایش های تصویری است.

## ۱. تشریح امکانات - مدل ۲۴۳۶



تونل آبی رؤیت جریان شرکت تحقیقاتی هیلزروولینگ، یک تجهیزات مداربسته مناسب برای مطالعه بازه وسیعی از پدیده های ایرودینامیک و دینامیک سیالات است. ترسیمی از آن که نماهای جانبی و پلتفرم آن را به همراه ابعاد کلی آن نشان می دهد، در شکل ۲ نمایش داده شده است. خصوصیات کلیدی طراحی تونل عبارتند از کیفیت بالای جریان و جهت گیری افقی آن. حالت افقی تونل، دسترسی به مدل را تسهیل کرده و اجازه تغییر آسان آن را بدون زهکشی آب از تونل داده و امکان رؤیت جریان محوری را از یک پنجره متقاطع پایین جریان فراهم می کند. این تجهیزات به صورت یک کانال جریان پیوسته کار می کند، یعنی لازم نیست سطح آب در مقطع آزمایشی در قسمت فوقانی جداره های مقطع قرار گیرد. معمولاً سطح آب حدوداً دو اینچ پایین تر از قسمت فوقانی جداره ها قرار گرفته و نیاز به پوشش دادن آن را برطرف کرده و امکان دسترسی آسان به مدل را در هنگام کار کردن آن فراهم می کند. کل مدار از

مواد ضد خوردنده ساخته شده و به وسیله قالب بندی فولادی رنگ شده پشتیبانی می شود. قطعات اولیه از فایبرگلاس رزین پلی اورتان ساخته شده و سطوح داخلی آن درمقابل یک سطح قالب صاف و براق قرارداد که منجر به ایجاد سطح پرداخت کاری شده بسیار مناسبی می شود. سطوح خارجی آن نیز از رزین اپوکسی پوشش ژل رنگی ساخته شده که بر روی فایبرگلاس اسپری شده است. سطح خارجی صاف بوده و نیاز به نقاشی ندارد.

مقطع آزمایش نامی ، دارای عرض 24 اینچ، ارتفاع 36 اینچ و طول 72 اینچ بوده و از شیشه عملیات حرارتی شده ساخته شده تا اجازه رؤیت حداکثر مدل را بدهد. مقطع آزمایش شیشه ای، آب تونل را برای استفاده با تجهیزات سرعت سنجی تصویر ذره ای (PIV) ایده آل می سازد. مقطع آزمایش و فضای تخلیه به گونه ای طراحی شده اند که اجازه رؤیت همزمان مدل را از بالا، پایین، اطراف و عقب بدهد. مشاهده از عقب خصوصا در هنگام مطالعه ساختارهای جریان در صفحه سطح مقطع مفید است. خط مرکزی مقطع آزمایش در فاصله 72 اینچ بالای سطح زمین قرارداد شده و 54 اینچ پایین تراز مقطع آزمایش قرارداد تا اجازه رؤیت و ایجاد فضای مناسب را برای دسترسی بصری مستقیم یا غیرمستقیم به آن برای عکسبرداری از قسمت پایینی مقطع آزمایش بدهد. خط مرکزی تونل در نماهای جانبی و عقبی تقریبا در سطح چشم قرارداد. این ارتفاعات برای فراهم کردن نمای سطح چشم مقطع آزمایش بدون نیاز به وجود پلتفرم های کمکی در اطراف مقطع آزمایش انتخاب شده اند. ناحیه زیر مقطع آزمایش کاملا آشکار است، زیرا لوله کشی برگشت آن به هردو

طرف تونل کشیده شده و اگر مشتری ترجیح دهد، مستقیماً در زیر خط مرکزی تونل در پایین سطح زمین قرار دارد. دسترسی به قسمت زیرین مقطع آزمایش برای به دست آوردن عکس یا نصب دوربین ویدیویی ضروری است. سرعت جریان مقطع آزمایش بین ۰ تا ۱۰ فوت بر ثانیه متغیر است. در مورد اکثر تست های بصری که از قالب رنگی بر روی سطح مدل استفاده می کنند، سرعت هایی در بازه ۰٫۳ تا ۰٫۵ فوت بر ثانیه بهترین نتایج را فراهم می کند. سرعت های بالاتری همچون 1ft/sec برای استفاده با سیستم بالانس گیج کرنش زیر آبی مطلوب است، زیرا فشار دینامیک بزرگتر، علامت بهتری را برای نسبت نویز نیروهای ایرودینامیک مطلوب به دست می دهد. پشتیبان مدل بر بالای مقطع آزمایش قرار داشته و مدل به صورت معکوس در آن قرار دارد.

## ۱٫۱ توضیحات جزء مدار

در بخش های بعد در مورد اجزای مدار مقدماتی تونل که در شکل ۲ نشان داده شده، توضیحاتی ارائه خواهد شد. این تونل که ناحیه کار مفید آن فضایی حدود 40 ft x 20 ft را اشغال می کند، دارای ارتفاع ماکزیمم حدود ۸ فوت است. ارتفاع سقف اتاقک تونل باید حداقل ۱۲ فوت باشد تا اجازه نصب یا برداشتن صفحات، مدل ها و غیره را بدهد. این تجهیزات مستلزم وجود یک شیر آب و سیستم زهکشی مرسوم است. وقتی تونل پر است، حدوداً حاوی ۵۰۰۰ گالن آب به وزن حدود ۴۰۰۰۰ پوند می باشد. وزن سازه حدوداً برابر با ۸۰۰۰ پوند بوده و موتور آن از نوع 7.5 Hp بوده و واحد جریان محوری آن 2800 gpm است که نیازمند یک مدار 230 V، سه فاز، 60 Hz، 30



amp می باشد. ولتاژهای دیگری را هم می توان استفاده کرد. ساختارزمین باید بار 200 psf را تحمل کند. تمام قطعات قبل از اسمبلی نهایی از یک گذرگاه 7 ft x 4 ft عبور خواهد کرد.

## ۱,۱,۱ فضای انتقال

آب با نرخ جریان ۲۸۰۰ گالن بردقیقه به چرخش درآمده و سرعت ماکزیمم ۱,۰ فوت برثانیه را در مقطع آزمایش فراهم می کند. این آب از طریق یک استوانه سوراخ دار وارد فضای انتقال می شود که در بالای این فضا قرار دارد. اسمبلی سوراخ دار انرژی کافی برای اطمینان از انتقال یکنواخت آب در امتداد استوانه جذب می کند. در انتهای پایینی فضای انتقال، مقطعی با عناصر تهویه جریان قرار دارد که اولین نوع آن یک صفحه فولادی از جنس فولاد زنگ نزن است که تلاطم را به مقیاس های کوچکی تبدیل کرده و بعد از آن دو صفحه فایبرگلاس قرار دارد که سطح تلاطم را بیشتر کاهش می دهد. آخرین مورد نیز یک مسطح کننده جریان لانه زنبوری است. این عناصر تهویه جریان را می توان به سادگی جایگزین کرد تا شرایط تست به دلخواه کاربر تغییر کند.

## ۱,۱,۲ مقطع انقباض

مقطع انقباض دارای مساحتی به نسبت ۶:۱ است. هندسه آن به گونه ای انتخاب شده تا مینیمم انقباض طولی را با توزیع مناسب، کاهش تلاطم و جلوگیری از جدایش و توسعه حالت گردابی فراهم کند.

## ۱,۱,۲ مقطع آزمایش

ابعاد داخلی مقطع آزمایش عبارتند از: "24 عرض، "36 ارتفاع و "72 طول. جداره های جانبی اندکی واگرا می باشند تا رشد لایه مرزی را خنثی کرده و گذردهی سرعت جریان یکنواختی را به دست آورند. این بخش از یک قاب فولادی رنگ شده با شیشه عملیات حرارتی شده در سه جهت ساخته شده است. شیشه عملیات حرارتی شده به ضخامت "1/2 در جداره ها و ضخامت "3/4 در کف، با لاستیک سیلیکونی در قاب فولادی نصب شده تا از فاکتور ایمنی بالا در بارهای تنشی در اثر وزن و فشار آب اطمینان حاصل شود. شیشه عملیات حرارتی شده به دلیل مقاومت بالاتر خود نسبت به خراش و رسانایی حرارتی بالاتر خود بر پلکسی گلاس و پلاستیک ترجیح داده شده و اجازه عبور موثرتر حرارت را از منایع لامپ مورد استفاده در عکاسی می دهد. آزمایش های سرعت سنجی لیزری را می توان از طریق شیشه عملیات حرارتی شده انجام داد که ضخامت شیشه ثابت بوده و سطح آن صاف است. اگر اشعه های لیزر به محل های دیگری در مقطع آزمایش مهاجرت کنند، انکسار سطحی موجب بروز مشکلاتی در فوکوس نگه داشتن پرتوهای لیزر بر روی یک نقطه از پیش انتخاب شده می شود.

مقطع آزمایش با یک قاب فولادی ساخته شده تا پلتفرم پشتیبان قدرتمندی را برای سخت افزار پشتیبان مدل فراهم کرده و محیط پایدار و کم نویزی را برای بالانس گیج کرنش ۵ جزئی ارائه دهد. پایه پشتیبان مدل را می توان در موقعیت های طولی متغیری بر روی قاب قرارداد تا طول قابل دسترس ماکزیمم مقطع آزمایش در جلو یا

پشت مدل قرارگیرد. همچنین این قاب برای امکان نصب کردن سایر تجهیزات بر روی مقطع ساخته شده، مثل سیستم متقاطع ۳ محوری که برای پروب های چشمی کنترل از راه دور به کار می رود. سیستم متقاطع را می توان برای نصب کردن و قراردادن دقیق پروب های LDV به کاربرد.

سیستم پشتیبان مدل به قسمت فوقانی مقطع آزمایش متصل شده و مدل در موقعیت معکوس آزمایش می شود. پشتیبان مدل دارای پنل قابل حرکتی است تا امکان دسترسی آسان به مدل را در هنگام کارکردن آن فراهم کرده و پس زمینه آن را برای عکاسی تغییردهد.

سطح کیفیت جریان (میزان خطا) با سرعت ماکزیمم ۱ فوت برثانیه در مقطع آزمایش به صورت زیر است:

سطح شدت تلاطم: کمتر از  $1.0\% \text{ RMS}$

یکنواختی سرعت: کمتر از  $\pm 2\%$

زاویه میانگین جریان: کمتر از  $\pm 1.0^\circ$

یک سنسور سرعت در مدار لوله کشی تونل قرارداد شده و به گونه ای کالیبره شده تا خواندن دیجیتالی سرعت مقطع آزمایش را در پنل سیستم کنترل تونل آسان کند. اگر سیستم بالانس ۵ جزئی مورد استفاده قرارگیرد، ارتقا دادن سیستم اندازه گیری سرعت و دما مطلوب بوده و می تواند سرعت و دما را در مقطع آزمایش به شکل بسیار دقیقی بسنجد. این اطلاعات برای محاسبه دقیق فشار دینامیکی که در مدل وجود دارد، به کاررفته و برای محاسبه ضرایب ایرودینامیک ضروری است.

## ۱,۱,۴ فضای تخلیه

وضعیت فضای تخلیه مقطع آزمایش، خصوصیت منحصر به فردی از این تونل آبی است. این فضا شامل یک پنجره نمای جریان است که اجازه مشاهده مستقیم مدل را از عقب داده و نیاز به وجود آینه را حذف می کند. وضعیت فضای تخلیه به گونه ای طراحی شده که اطمینان دهد هیچ زاویه جریان یا تلاطمی وجود ندارد تا بتواند جریان را به درون مقطع آزمایش گسترش دهد. استوانه های سوراخ دارو پوشش داری از جنس فولاد زنگ نزن مشابه استوانه های سوراخ دار قسمت انتقال درحفرات خروجی مقطع آزمایش قرار داده شده اند تا از ورود هوا در مدار برگشتی در اثر گرداب های بزرگ ورودی به لوله های تخلیه جلوگیری کنند. این صفحات استوانه ای از ورود اشیای خارجی به لوله کشی برگشتی در این پمپ نیز جلوگیری می کنند.

## ۱,۱,۵ لوله های برگشتی و ذخیره

از فضای تخلیه، آب از طریق دو لوله عمودی به درون یک هدر جمع می شود. از هدر، آب در امتداد جداره تونل جریان یافته و از طریق لوله ذخیره به پمپی می رسد که مستقیماً در زیر فضای انقباض قرار دارد. لوله کشی درکناره تونل قرار دارد تا ناحیه زیر مقطع آزمایش را برای مشاهده و قراردادن تجهیزات ویدیویی و عکسبرداری کاملاً آزاد نگه دارد. اگر بتوان لوله کشی برگشتی را در زیر سطح زمین قرارداد، ایجاد برگشتی خط مرکزی مطلوب خواهد بود. لوله کشی برگشتی خط مرکزی بدون غوطه وری، کارکردن در زیر مقطع آزمایش برای به دست آوردن نماهای پلتفرم مدل و

رفتن از یک قسمت از مقطع آزمایش به قسمت دیگر بدون گذر از انتهای تونل را غیرممکن می سازد. این ترتیب لوله کشی پیشنهاد نمی شود. مفاصل جداسازی ارتعاش در بین پمپ و لوله های برگشتی قرارداد. یک تنظیم کننده و حباب در نقطه پایینی لوله ها قرارداد تا اجازه زهکشی تجهیزات را بدهد.

### ۱,۱,۶ پمپ /موتور

آب با یک پمپ جریان محوری به ظرفیت 2800 gpm که توسط یک موتور الکتریکی 7.5 HP رانده می شود، جریان پیدا می کند. محفظه پمپ از جنس چدن ساخته شده و برای جلوگیری از فرسایش و خوردگی پوشش داده شده است. پروانه از جنس برنز بوده و بر روی یک شافت فولاد زنگ نزن نصب شده است. سرعت جریان مقطع آزمایش را می توان بدون توجه به افت های متغیر مقطع آزمایش در اثر اندازه و وضعیت مدل بین ۰ تا 1.0 fps تغییر داد. کنترلگرهای پمپ بر روی پنلی نصب شده اند که در نزدیکی ناحیه مقطع آزمایش قرارداد. وسایل اندازه گیری و نمایش سرعت مقطع آزمایش نیز فراهم شده است.

### ۱,۱,۷ سیستم منبع رنگ

یک سیستم شش رنگ فشرده با استفاده از رنگ های غذایی محلول در آب برای هر مسیری از قوطی های رنگ تا سیستم پشتیبان مدل ساخته شده است. این سیستم اجازه کنترل دقیق نرخ نشر رنگ را داده و وسیله ای را برای دمش هوا به بیرون از خطوط رنگ که به مدل می رود، فراهم می کند. قوطی های رنگ را می توان با

سیستم هوای کارگاه تحت فشار قرارداد که سطح فشاربه وسیله یک رگولاتورفشارکنترل می شود. کمیت رنگ برای هر قوطی به وسیله حباب های منفردی اصلاح می شود که بروی پنلی در نزدیکی مقطع آزمایش قرارداد.

### ۱,۱,۸ سیستم مکش به داخل ( اختیاری )

در برخی از آزمایش ها شبیه سازی جریان جرم در ورودی های موتور برای مدل های هواپیمای واقعی اهمیت دارد. سیستم مکشی شامل یک پمپ کوچک و حباب های مناسب و چند دبی سنج برای تغییر جریان از طریق ورودی های موتور جداگانه برای شبیه سازی جریان ورودی از صفر تا ماکزیمم برای برخی از هواپیماها اهمیت دارد.

### ۱,۱,۹ سیستم اگزوز جت ( اختیاری )

سیستمی برای شبیه سازی جریان خروجی از اگزوز جت را نیز می توان فراهم کرد. یک پمپ کوچک شبیه به پمپ سیستم مکش ورودی و حباب های مناسب و یک دبی سنج برای شبیه سازی و اصلاح جریان فراهم می شود.

### ۱,۱,۱۰ سیستم فیلتراسیون:

تغییر رنگ تدریجی آب در اثر استفاده مداوم از رنگ به وجود می آید. این تغییر رنگ را می توان با افزودن متناوب مقادیر کمی از کلر به آب از بین برد. یک سیستم فیلتراسیون نیز برای تمیز کردن آب فراهم شده که از موتور/ پمپ  $\frac{3}{4}$  Hp با یک صافی و یک واحد فیلتر به کار می رود. سیستم فیلتراسیون معمولاً در هنگام عدم

استفاده از تونل - معمولاً شب هنگام - کاری کند. بعد از کار مداوم باید آب را جایگزین کرد. زهکشی و اتصالات پرکننده تونل برای این هدف فراهم شده اند.

## ۱,۱,۱۱ کنترل تونل

کنترلگر سرعت تونل یک معکوس کننده کم نویز تمام دیجیتالی است. اجزای سرعت برای انتخاب سرعت به وسیله کاربر قابل تنظیم بوده و سرعت به وسیله یک دستگاه خواندنی دیجیتالی نمایش داده می شود. کنترلگر سرعت تونل به سیستم پشتیبان مدل کنترل شده کامپیوتری و سیستم بالانس ۵ حزئی تبدیل می شود تا امکان کنترل کامپیوتری سرعت تونل را فراهم کرده و اجازه عملکرد تمام اتوماتیک آن را بدهد.

## ۲ - تشریح تجهیزات: مدل ۱۵۲۰



تونل آبی مدل ۱۵۲۰ شرکت تحقیقاتی رولینگ هیلز تقریباً با مدل ۲۴۳۶ معادل بوده، اما مقطع آزمایش آن کوچکتر است. ترسیمی که نماهای جانبی و پلتفرم آن را به همراه ابعاد کلی آن نشان می دهد، در شکل ۳ نمایش داده شده است. مقطع آزمایش نامی دارای عرض ۱۵"، ارتفاع ۲۰" و طول ۶۰" است. خط مرکزی مقطع آزمایش ۶۶" بالای سطح زمین و ۵۶" پایین تراز مقطع آزمایش قرار دارد تا اجازه رؤیت آسان و تنظیم فضا و دسترسی بصری مستقیم یا غیرمستقیم را برای عکسبرداری از قسمت زیرین مقطع آزمایش بدهد. شیشه عملیات حرارتی شده به ضخامت ۳/۸" درجداره ها و ۱/۲" در قسمت زیرین با لاستیک سیلیکونی نصب شده است. خط مرکزی تونل در نماهای جانبی و عقبی تقریباً در سطح چشم قرار دارد. این ارتفاعات برای فراهم کردن نمای سطح چشم مقطع آزمایش بدون نیاز به وجود پلتفرم های کمکی در اطراف ناحیه مقطع آزمایش انتخاب شده اند. ناحیه زیر مقطع آزمایش کاملاً آشکار است، زیرا لوله کشی برگشتی آن به هر دو طرف تونل کشیده شده و مستقیماً به زیر خط مرکزی تونل در زیر سطح زمین راه دارد. دسترسی به قسمت زیرین مقطع آزمایش برای به دست آوردن عکس یا نصب دوربین ویدیویی ضروری است. سرعت جریان مقطع آزمایش بین ۰ تا ۱،۰ فوت بر ثانیه متغیر است. در مورد اکثر تست های بصری که از قالب رنگی بر روی سطح مدل استفاده می کنند، سرعت هایی در بازه ۰،۳ تا ۰،۵ فوت بر ثانیه بهترین نتایج را فراهم می کند. سرعت های بالاتری همچون 1ft/sec برای استفاده با سیستم بالانس گیج کرنش زیرآبی مطلوب است، زیرا فشار دینامیک بزرگتر، علامت بهتری را برای نسبت نویز نیروهای ایرودینامیک



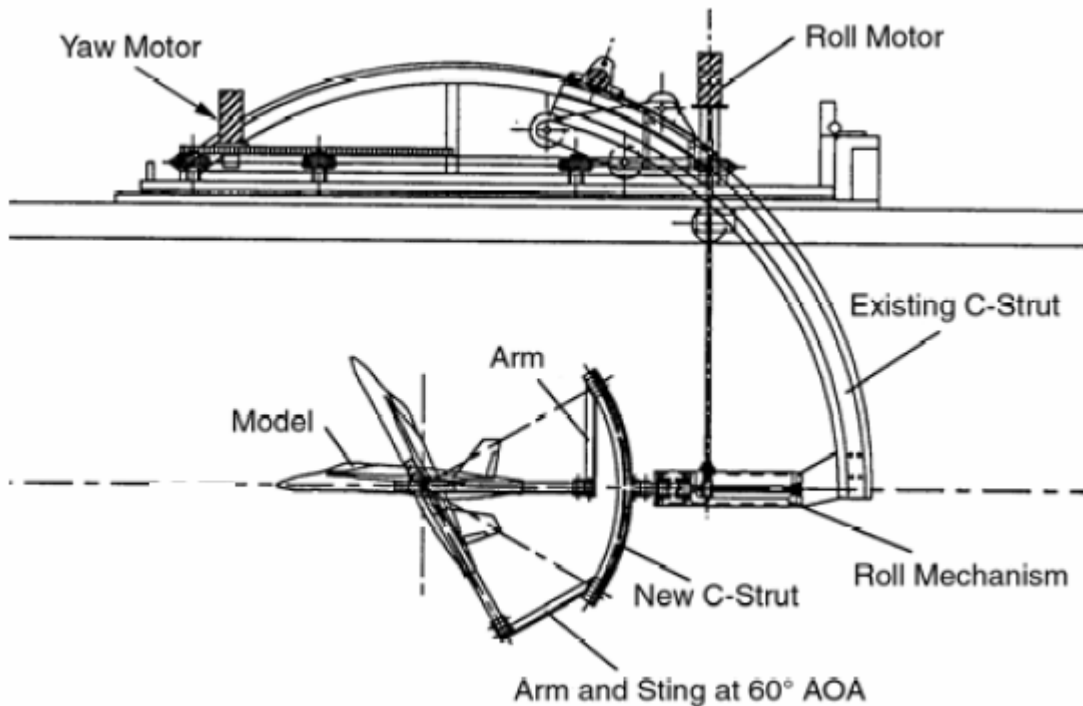
مطلوب به دست می دهد. اگر کیفیت جریان کمتر مورد توجه باشد، سرعت های بالاتری برای مدل ۱۵۲۰ قابل دسترس خواهد بود.

این تونل که ناحیه کارمفید آن فضایی حدود 30 ft x 15 ft را اشغال می کند، دارای ارتفاع ماکزیمم حدود 6.5 فوت است. ارتفاع سقف اتاقک تونل باید حداقل 9 فوت باشد تا اجازه نصب یا برداشتن صفحات، مدل ها و غیره را بدهد. این تجهیزات مستلزم وجود یک شیرآب است و سیستم زهکشی مرسوم است. وقتی تونل پراست، حدودا حاوی 1000 گالن آب به وزن حدود 7500 پوند می باشد. وزن سازه حدودا برابر با 2000 پوند بوده و موتور آن از نوع 2 Hp بوده و واحد جریان محوری آن 900 gpm است که نیازمند یک مدار 230 V، سه فاز، 60 Hz، 20 amp می باشد. ولتاژهای دیگری را هم می توان استفاده کرد. ساختار زمین باید بار 100 psf را تحمل کند. تمام قطعات قبل از اسمبلی نهایی از یک گذرگاه 7 ft x 6 ft عبور خواهد کرد.

### ۳. سیستم پشتیبان مدل دینامیک

شرکت تحقیقاتی رولینگ هیلز، پیشگام در ساخت تونل های آبی برای صنعت و تحقیقات بوده و مارک تجاری Eidetics آن از سال ۱۹۸۵ تولید شده است. از آن جا که RHRC نیز تحقیقاتی را در زمینه تونل آبی خود انجام می دهد، این تجهیزات به صورت مداوم ارتقا پیدا کرده است. آخرین پیشرفت آن یک سیستم پشتیبان مدل کنترل کامپیوتری است که برای فراهم کردن حرکات بسیار مسطح و دقیق طراحی شده است. هنگامی که از این تجهیزات به همراه بالانس گیج کرنش نیمه هادی ۵

جزئی RHRC استفاده می شود، این سیستم قادر به انجام آزمایش هایی است که قبلا تنها با تونل های آبی تخصصی و گران قیمت عملی بود. در حال حاضر آزمایش هایی همچون نوسان های نیرو و حرکات چرخشی متعادل را می توان در تونل آبی با بهره گیری از رؤیت عالی جریان های پیچیده انجام داد.

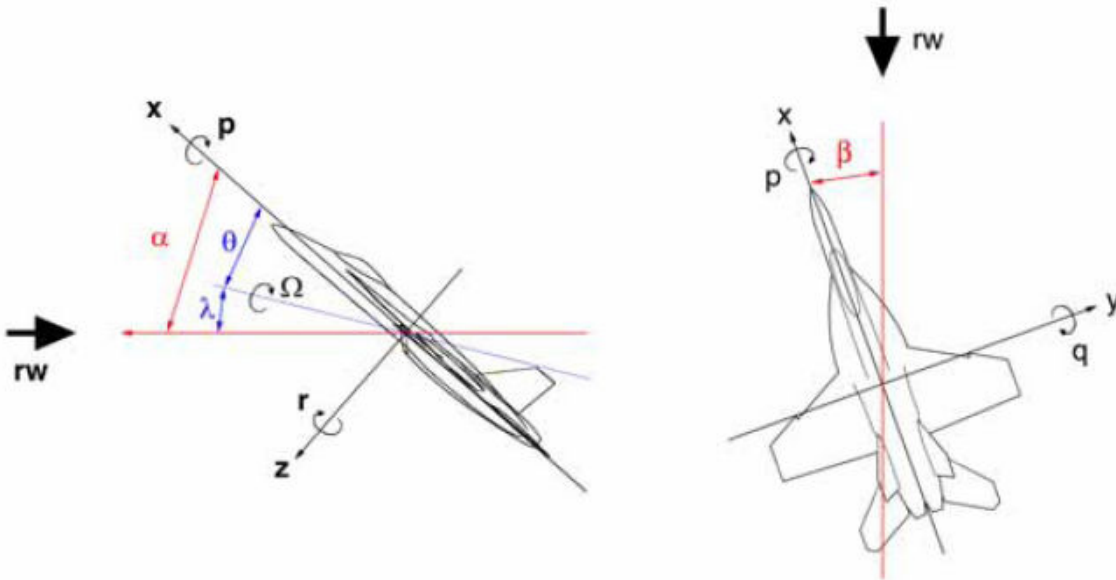


از نظر تاریخی، آزمایش های دینامیکی همچون اسیلاسیون نیرو و تعادل چرخشی اخیرا در برنامه طراحی هواپیما انجام شده اند. در زمانی که این نوع تست انجام می شود، معمولا تغییر شدید وضعیت آن از نظر مالی و سیاسی قابل قبول نیست. با این حال اگر دینامیک وضعیت در اوایل برنامه بررسی شود، می توان تغییراتی را با حداقل اثرگذاری انجام داده و از مسائل سیاسی پرهیز نمود. هزینه پایین مدل ها و آزمایش های تونل آبی، آن ها را در نگاه اول به گزینه های بسیار خوبی تبدیل می کند.

تکنیک های پذیرفته شده کنونی در تونل بادی برای اندازه گیری دینامیک وسایل نقلیه معمولا در سرعت های بسیار پایین انجام می شود. دلیل آن عمدتاً این است که حرکات چرخشی هواپیما با سرعت تونل هماهنگ است. حتی در این سرعت های پایین، بارهای روی سیستم پشتیبان تونل بادی می تواند بسیار بزرگ بوده و نرخ چرخش مدل را به شدت محدود کند. علاوه بر آن، بارهای داخلی مدل می تواند بسیار بزرگتر از ایرودینامیکی باشد که محققان برای اندازه گیری آن تلاش می کنند. تونل های آبی سطح آزاد معمولا در سرعت های کمتر از  $1 \text{ ft/sec}$  کار می کنند تا رؤیت جریان با کیفیت بالا و تلاطم پایین به دست بیاید. در این سرعت های تونل، فرکانس های پایین تولید شده به وسیله مانور مقیاس کامل، واکنش کندی را به وجود آورده و بارهای اینرسی چرخشی قابل چشمپوشی است. این بدین معنی است که بسیاری از دشواری هایی که معمولا در تست های دینامیک بروزمی کند، در تونل آبی وجود ندارد. لازم نیست پشتیبان مدل برای تونل آبی به همان قدرت بوده و تنها موردی که باید حذف شود، جاذبه است. این فاکتورها محیطی آزمایشی را خلق می کنند که در آن می توان داده های با کیفیت بالایی را با هزینه نسبتاً پایین به دست آورد.

## ۴,۱ اجزای پشتیبان مدل

### ۴,۱,۱ تعاریف زاویه ای مقدماتی



### ۴,۱,۲ بخش انحراف و پرتاب استاندارد

محور انحراف به وسیله یک سروموتور با گشتاور بالا به حرکت درآمده و حرکت انحرافی با اینرسی ثابتی را به وجود می آورد ( $\psi$ ). از یک رمزگذارنوری برای فراهم کردن بازخورد موقعیت و سرعت استفاده می شود. محور انحراف بر روی یک بخش آلومینیومی آندی دایره ای بزرگ قرارداداشته و مرکز قوس، مرکز چرخش مدل را تعریف می کند. زمانی که وضعیت تونل مدل ۲۴۳۶ مشخص می شود، زاویه انحراف می تواند تا  $\pm 22^\circ$  متغیر باشد، در حالی که در مدل ۱۵۲۰ زوایای  $\pm 10^\circ$  قابل دستیابی است. یک محور C شکل بزرگ بر روی میز انحراف در صفحه عمودی قراردادده می شود تا منجر به حرکت در جهت پرتاب شود ( $\theta$ ). زاویه پرتاب را می توان از ۰ تا ۴۵

درجه تغییرداد. گسترش C شکلی در دسترس است که ۱۰ درجه حرکت پرتابی اضافی را به آن افزوده و محور C کوچک که در تجهیزات بالانس چرخشی قرار دارد، ۶۰ درجه به زاویه پرتاب می افزاید.

### ۴,۱,۳ محور دوران و تعادل چرخشی

موتور دوران در محفظه ضد آبی قرارداد که به انتهای محور C بزرگ متصل است. محفظه موتور به یک سنسور رطوبت مجهز است که کاربر را از هرگونه نشت احتمالی آگاه می کند. موتور دوران از یک سردنده جهانی استفاده می کند که بک لش آن کمتر از 1/2 درجه است. تعادل چرخشی انحنای C شکل کوچکی را ایجاد می کند که در بین مدل و محفظه موتور دوران نصب شده است. محور C چرخشی از یک سری حفرات پیچ برای فراهم کردن تنظیمات زاویه ای در هر ۱ درجه استفاده می کند. در نگاه اول، منحنی C یک محور پرتاب زائد را به وجود می آورد. در واقع زمانی که منحنی C بزرگ بر روی + درجه تنظیم می شود، منحنی C کوچک را می توان برای تنظیم  $\theta$  از + تا ۶۰ درجه به کاربرد. هنگامی که منحنی C کوچک بر روی + درجه تنظیم می شود، می توان از موتور دوران برای فراهم کردن حرکات دورانی محور بدنه استفاده کرد. هنگامی که منحنی C بزرگ بر روی + تنظیم می شود، می توان از منحنی C کوچک برای فراهم کردن  $\theta$  استفاده کرد، اما در این حالت موتور دوران، حرکت دورانی را حول بردار سرعت تولید خواهد نمود. این حرکت اصطلاحاً کونینگ یا حرکت چرخشی متعادل نامیده می شود. این نوع حرکت قبلاً برای بررسی خصوصیات اسپین هواپیما به کار می رفت، اما اخیراً برای مطالعه شدت یک زاویه

غیرصفرمورد استفاده قرار می گیرد. اگر حرکت متعادل چرخشی با منحنی C بزرگ در یک زاویه غیرصفرانجام شود، حرکت حاصله با عنوان کونینگ محوری خمیده شناخته می شود. حرکت حاصله کونینگ را با یک نوسان در هر چرخش در هر دو زاویه حمله و سور خوردن فراهم می کند که با یکدیگر ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند.

## ۴,۱,۴ سیستم کنترل PID

سیستم پشتیبان مدل RHRC از سیستم فلکس موشن وسایل ملی برای فراهم کردن بازخورد نسبی - مجتمع - دیفرانسیلی مقدماتی و سیستم کنترل استفاده می کند. این سیستم از یک ذخیره قدرت موتور فرمان و یک آمپلی فایر و یک برد کامپیوتری مبتنی بر PCI تشکیل شده که سیگنال های رمزگذار نوری را خوانده و پردازش می کند. سوئیچ های محدود کننده برق در داخل سیستم قرارداد تا در صورت برقراری یک فرمان ناخواسته از سخت افزار پشتیبان مدل محافظت کند. زمانی که از یک سوئیچ محدود کننده استفاده می شود، قدرت وارد به سروموتور فوراً قطع می شود.



## ۴,۱,۵ نرم افزار کنترل آزمایش

**RHRC** یک بسته نرم افزاری گسترده را برای کنترل آزمایش، دریافت داده و پردازش داده فراهم می کند. این نرم افزار با استفاده از **LabVIEW API** شرکت وسایل ملی ساخته شده و یک فصل مشترک گرافیکی دوستانه کاربر را ارائه می دهد. این نرم افزار موجب ترکیب بین سیستم پشتیبان مدل دینامیک، بالانس ۵ جزئی کنترلگرهای تونل آبی می شود. این سیستم قادر است در حالت اتوماتیکی کار کند که در آن موارد وزن، بالای صفرها، کنترل سرعت تونل، حرکت مدل و زیر صفرهای داده را می توان برای یک سری اجرا انجام داد. همیشه می توان آزمایش ها را در حالات دستی و اینتراکتیو انجام داد.



## ۴,۲ آزمایش های قابل دسترس

نمودار شکل ۴ خلاصه ای گرافیکی از آزمایش هایی را که با پشتیبان مدل کنترل شده کامپیوتری قابل دسترس است، نشان می دهد. این تست ها را می توان به صورت دستی یا کاملاً اتوماتیک انجام داد. در حالت دستی، محقق باید مقیاس وزن و **wind-off zero** را قبل از تنظیم سرعت تونل ثبت کرده و مدل را در جهت مطلوب حرکت دهد. در حالت اتوماتیک، محقق باید یک جدول زمانبندی برای اجرای آزمایش های متعدد تعیین کند. سیستم ابتدا چک می کند که ورودی ها قانون بوده و قابل تولید باشند و سپس مقیاس های وزن و صفرهای مورد نیاز را به صورت خودکار ثبت کرده و در نهایت تونل را راه اندازی کرده و نیروها و ممان های ایرودینامیک موجود در مدل را ثبت می نماید. بعد از اجرا، کالیبراسیون تعادل انجام شده و داده ها به ضرایب محوربندنه سنتی تجزیه می شود.



## ۴,۲,۱ ایرودینامیک استاتیک

ایرودینامیک استاتیک را می توان به چندین روش اندازه گیری کرد. مدل را می توان به صورت دستی به نقطه مطلوب فرمان داده و خروجی تعادلی آن را ثبت کرده و یا از چندین روش اتوماتیک بهره گرفت. تست استاتیک اتوماتیک مرسوم می تواند یک سری زاویه حمله را در زوایای سر خوردن مشخص و سرعت های معین تونل اجرا کند. این سیستم پیش از پردازش به نقطه داده بعدی تا زمانی که سیگنال تعادل به مقدار حالت پایدار خود برسد، منتظر می ماند.

## ۴,۲,۲ شیب و توقف محوری منفرد

این نوع حرکت برای بررسی پدیده هایی همچون لیفت دینامیک حول محور مفید است. داده ها به صورت تابعی از زمان ثبت می شود تا بتوان کاهش لیفت صعودی را مشاهده کرد.

## ۴,۲,۳ نوسان نیروی Sine-wave محوری منفرد

حرکت sin-wave در آزمایش های نوسان تونل آب سنتی مورد استفاده قرار می گیرد. این حرکت به وسیله فرکانس و اندازه حول یک نقطه مرکزی تعریف می شود. معمولاً این حرکات حول یکی از سه محور بدنه تولید می شوند که عبارتند از: رول، پرتاب و انحنای.

## ۴,۲,۴ نوسان نیروی نرخ ثابت محور منفرد

**RHRC** تکنیک متفاوتی را ارائه کرده که در آن تا حد امکان نرخ ثابتی برای اندازه حرکت در نظر گرفته می شود. این نوع نوسان برای استخراج مشتقات حالت پایدار به صورت تابعی از سرعت مفید است. این حرکات نیز معمولاً حول یکی از سه محور فوق تولید می شوند.

## ۴,۲,۵ نوسان نیروی چند محوری

علاوه بر نوسان حول یک محور منفرد، می توان حرکاتی را تعیین کرد که سرعت ها را در هر سه محوره صورت همزمان با یکدیگر ترکیب کند. این یکی از ویژگی های منحصر به فرد این تجهیزات بوده و به خوبی برای بررسی اعتبار موقعیت ریاضی ایرودینامیک تولید شده توسط حرکات دینامیک مورد استفاده **RHRC** است.

## ۴,۲,۶ تعادل چرخشی - حرکت کونینگ

تعادل چرخشی حرکتی را تولید می کند که شبیه به مخروط است. این حرکت هنگامی به وجود می آید که هواپیمایی در زاویه حمله ثابتی قرار داشته و فرمان دوران حول یک بردار سرعت را می دهد. این نوع حرکت برای هواپیماهای جنگی در زوایای حمله بزرگتر در هنگام انجام مانورهای حملاتی مرسوم است. وقتی **AOA** به ۹۰ درجه می رسد، حرکت کونینگ به یک اسپین مسطح شباهت پیدا می کند.

## ۴,۲,۷ کونینگ محوری خمیده

کونینگ خمیده با حرکت متعادل چرخشی معادل است، به جزاین که حرکت چرخشی حول محوری انجام می شود که با بردار سرعت زاویه می سازد. این حرکت منجر به زاویه حرکت نوسان و سر خوردن در فرکانس کونینگ شده و مقادیر آن برابر با زاویه ای است که چرخش با بردار سرعت می سازد.

## ۴,۲,۸ حرکت کونینگ با نوسان های نیروی شدید

این آزمایش نسبتاً منحصر به فرد برای اولین بار توسط دکتر موری توباک و دکتر لویس اسکیف از ناسا انجام شد. در حالی که این آزمایش مشابه حرکت کونینگ خمیده است، از مزیت جداسازی فرکانس کونینگ از فرکانس و اندازه نوسان برخوردار می باشد.

## ۴,۲,۹ حرکات دلخواه

این سیستم قادر است پیشینه زمانی یک حرکت مطلوب را پذیرفته و آن را در تونل آبی بازسازی کند.

Experiment	Side View	Front View	$\alpha$ History	$\beta$ History	$\Omega$ History
Static					
Body Axis Roll					
Body Axis Yaw					
Body Axis Pitch					
Velocity Vector Roll					
Inclined Axis					
Tobak-Schiff Pitch*					
Tobak-Schiff Yaw*					

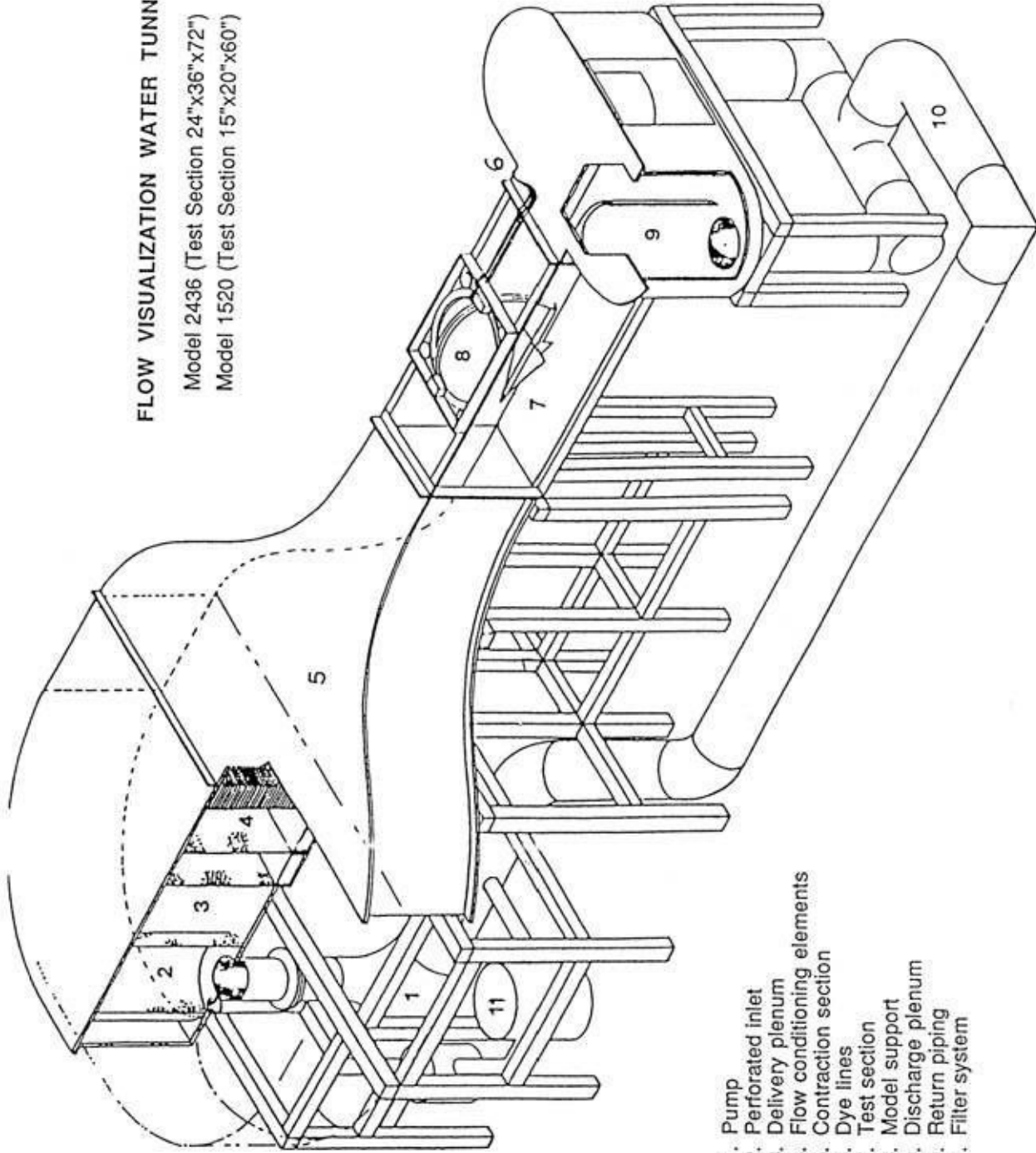
• requires 10° c-strut extension

Figure 4: Experiment Capability of RHRC Computer-Controlled Model Support System

**FLOW VISUALIZATION WATER TUNNEL**

Model 2436 (Test Section 24"x36"x72")

Model 1520 (Test Section 15"x20"x60")

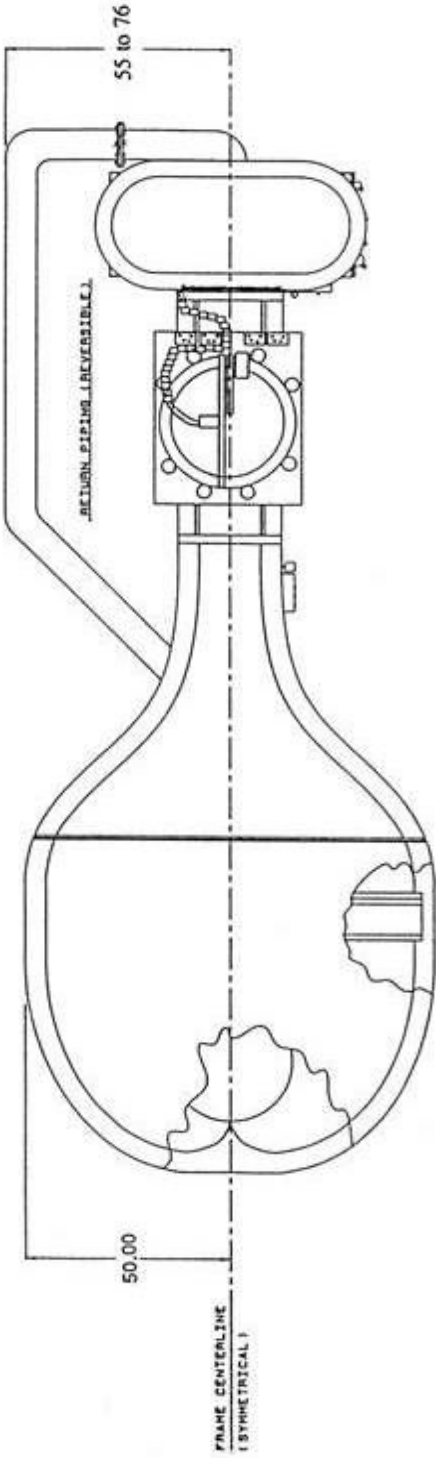


- Key:**
- 1. Pump
  - 2. Perforated inlet
  - 3. Delivery plenum
  - 4. Flow conditioning elements
  - 5. Contraction section
  - 6. Dye lines
  - 7. Test section
  - 8. Model support
  - 9. Discharge plenum
  - 10. Return piping
  - 11. Filter system

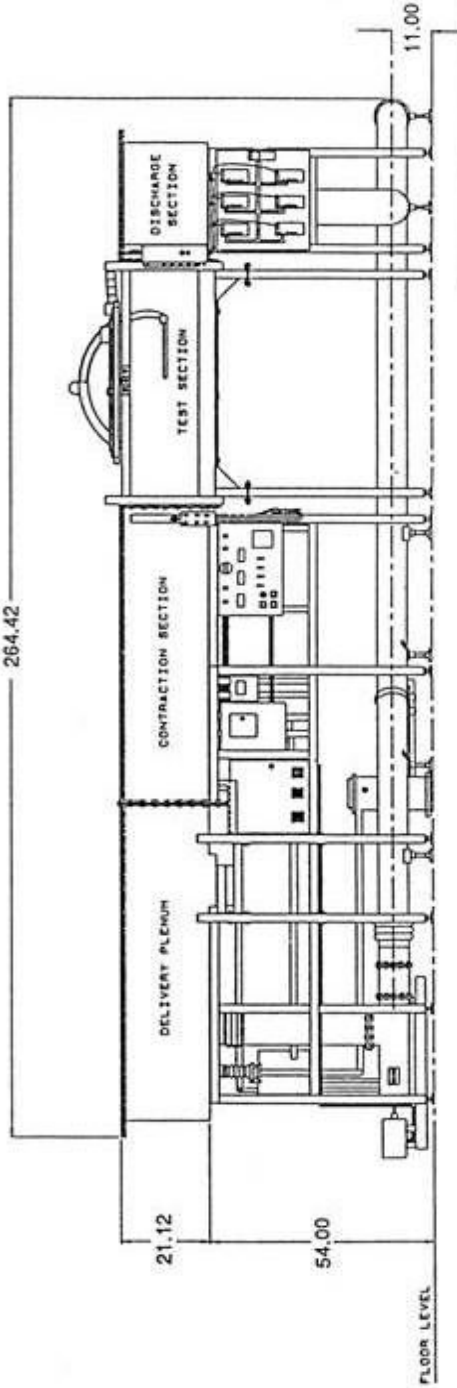
REVISION -

REVISION DESCRIPTION

NO. DATE



264.42



Model 1520 Water Tunnel

EIDICTICS INTERNATIONAL	
INSTALLATION AND CONTROL DRAWING	
PROJECT NO.	1520
DATE	11/18/83
BY	W. J. B. / J. S. B.
CHECKED BY	J. S. B.
SCALE	AS SHOWN
REV	REV

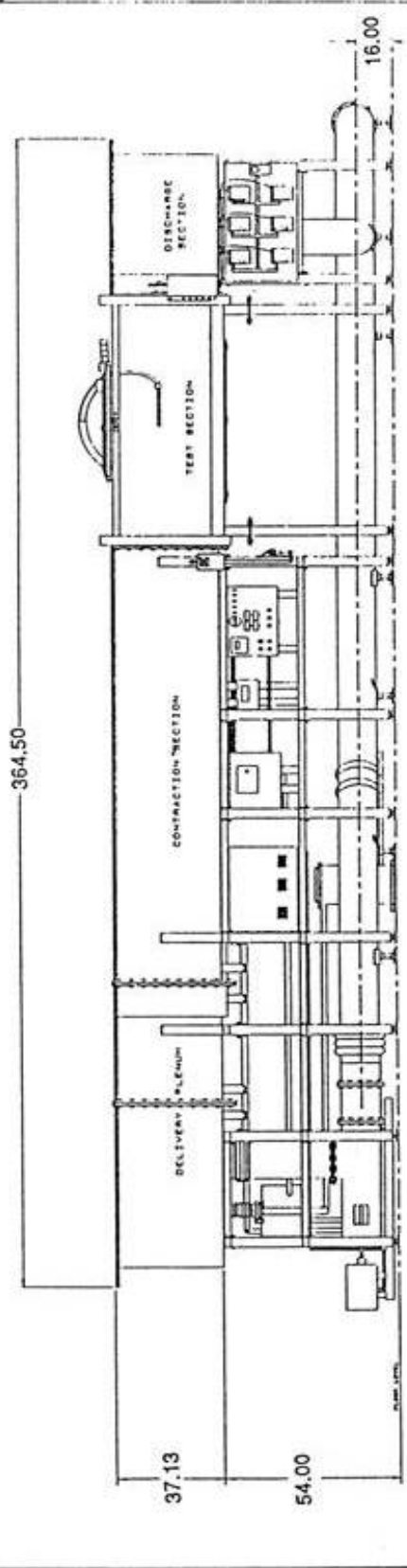
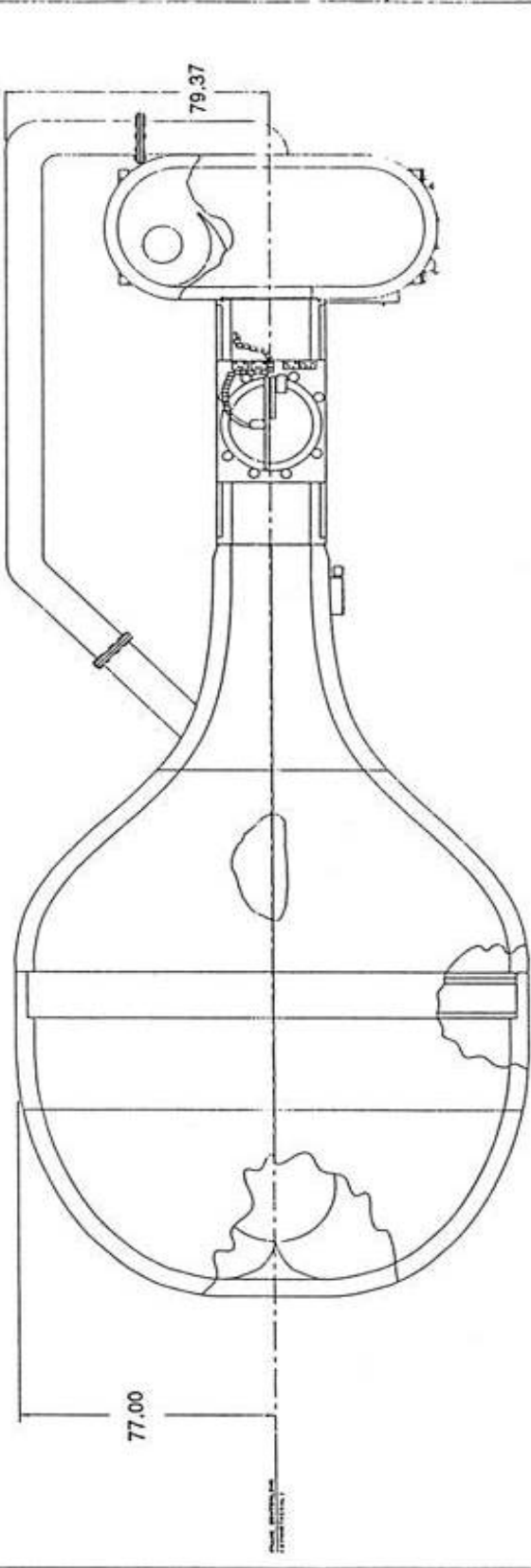
REVISION -

REVISION -

REVISION

AUTOMATIC

REVISION -



DATE	BY	CHKD	APP'D
10/10/57	J. H. ...	J. H. ...	J. H. ...
MODEL 2436 WATER TUNNEL CONTRACT NO. ... DRAWING NO. ...			

Model 2436 Water Tunnel

# پیوست (ج)

جداول ضمیمہ







## منابع و ماخذ :

### کتاب ها و مقالات :

دکتر ابراهیم شیرانی / توربوماشین ها/نشر دانشگاه صنعتی اصفهان / ۱۳۷۹ / صفحات ۲۵۷-۲۸۴

هرمن شیمز / مکانیک سیالات / ترجمه بهرام پوستی / نشر علوم دانشگاهی /۱۳۷۸/ صفحات ۱۹۶-۲۳۰

Morel T./ Comprehensive design of axisymmetric wind tunnel/  
Journal of Fluids Engineering/1975/225.

Karassik & kyutzsch & Fraser & Messina / Pump Hand Book/ Mc  
Graw-Hill Company /1976/First edition/9-1

Crocker & King / Piping Hand Book/ Mc Graw-Hill Company /  
1994/ Fifth edition/3-130 & 3-132 & 3-133

### منابع اینترنتی :

[www.bshc.bg/structure/cavitation\\_tunnel.htm](http://www.bshc.bg/structure/cavitation_tunnel.htm)

[www50.dt.navy.mil/facilities/data/24in.html](http://www50.dt.navy.mil/facilities/data/24in.html)

[www.ivt.ntnu.no/imt/forskning/lab/cavitation.php](http://www.ivt.ntnu.no/imt/forskning/lab/cavitation.php)

[www.en.wikipedia.org/wiki/Water\\_tunnel\\_\(hydrodynamic\)](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Water_tunnel_(hydrodynamic))

[www.amhrc.edu.au/facilities/cavtunnel-info.html](http://www.amhrc.edu.au/facilities/cavtunnel-info.html)

[www.oceaniccorp.com/FacilityDetails.asp](http://www.oceaniccorp.com/FacilityDetails.asp)

[www.cehipar.es/instalaciones/tunelcavitacion](http://www.cehipar.es/instalaciones/tunelcavitacion)

[www.cussons.co.uk/en/k&r/kempf1.htm](http://www.cussons.co.uk/en/k&r/kempf1.htm)

[environ.spawar.navy.mil/.../code2363/tunnel.html](http://environ.spawar.navy.mil/.../code2363/tunnel.html)

[www.allamericanracers.com](http://www.allamericanracers.com)

[www.arl.psu.edu](http://www.arl.psu.edu)

[www.baylor.edu/content/imglib](http://www.baylor.edu/content/imglib)

[www.dfrc.nasa.gov/Education/Educator/OnlineEducation](http://www.dfrc.nasa.gov/Education/Educator/OnlineEducation)

[www.dlr.de/archiv/ava.wasserkanal](http://www.dlr.de/archiv/ava.wasserkanal)

[www.engineeringatboeing.com/fluids](http://www.engineeringatboeing.com/fluids)

[www.iag.uni-stuttgart.de](http://www.iag.uni-stuttgart.de)

[www.niar.wichita.edu/researchlabs](http://www.niar.wichita.edu/researchlabs)

[www.nmri.go.jp/.../facilities/facilities\\_e.html](http://www.nmri.go.jp/.../facilities/facilities_e.html)

[www.npt.nuwc.navy.mil/facilities/QuietWater](http://www.npt.nuwc.navy.mil/facilities/QuietWater)

[www.nrc-cnrc.gc.ca/multimedia/picture](http://www.nrc-cnrc.gc.ca/multimedia/picture)

[www.rollinghillsresearch.com/Feedback.htm](http://www.rollinghillsresearch.com/Feedback.htm)

[www.ncl.ac.uk/marine/about/facilities/emerson](http://www.ncl.ac.uk/marine/about/facilities/emerson)