

# تحلیل سیالاتی پدیده کاویتاسیون پمپ OH1 150-500 و طراحی عددی پیشران و بررسی نتایج تست تجربی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ehghaghimirbiuk@yahoo.com

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،  
kh\_asrizamani96@ms.tabrizu.ac.ir

میر بیوک احقایی\*

خلیل عصری زمانی

## چکیده

پدیده کاویتاسیون جزو مهمترین مباحث در صنعت پمپ سازی می‌باشد. رخداد این پدیده در پمپ، علاوه بر آسیب زدن به پروانه پمپ و کاهش طول عمر آن باعث ایجاد ارتعاش و سرو صدا شده که در دراز مدت موجب از کار افتادن پمپ می‌شود. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که  $NPSH_a$  (هد مکش مثبت خالص موجود در ایستگاه) کمتر از  $NPSH_r$  (هد مکش مثبت خالص مورد نیاز پمپ) باشد. هدف این مقاله طراحی یک ایندیوسر مناسب برای پمپ گریز از مرکز نوع OH1 150-500 در قسمت ورودی پمپ به منظور جلوگیری از وقوع پدیده کاویتاسیون می‌باشد تا مقدار  $NPSH_r$  کاهش پیدا کند و ضریب اطمینان بیشتری حاصل گردد. برای مدلسازی آشفتگی، مدل توربولانسی K-Omega SST با تابع دیواره استاندارد استفاده شده است. همچنین روش عددی حجم محدود در این مقاله به کار رفته است. نتایج عددی حاصله با نتایج تجربی مقایسه شده و تطابق قابل قبولی را ارائه می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد وجود ایندیوسر در ورودی پمپ باعث افزایش اختلاف  $NPSH$  از عددی کمتر از ۱ متر به بیشتر از ۲ متر و در نتیجه باعث دور تر شدن از نقطه وقوع کاویتاسیون می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** پمپ گریز از مرکز، ایندیوسر،  $NPSH$ ، کاویتاسیون، شبیه سازی عددی، آزمایش تجربی.

## Fluid Analysis of OH1 150-500 Pump Cavitation Phenomena And Inducer numerical design and examination of experimental test results

M. B. Ehghaghi  
Kh. Asri Zamani

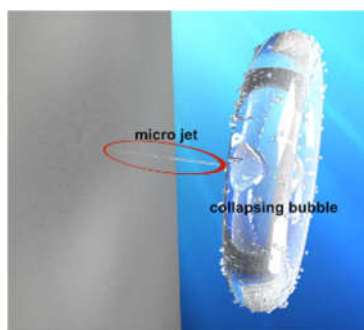
Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Abstract

The phenomenon of cavitation is one of the most important issues in the pumping industry. Occurrence of this phenomenon in the pump, in addition to damaging the pump impeller and reducing its life, causes vibration and noise, which in the long run causes the pump to fail. This phenomenon occurs when the  $NPSH_a$  (net positive suction head at the station) is less than the  $NPSH_r$  (net positive suction head required by the pump). The purpose of this paper is to design a suitable inducer for centrifugal pump type OH1 150-500 at the inlet of the pump in order to prevent cavitation to reduce the amount of  $NPSH_r$  and increase the reliability. To model the turbulence, the K-Omega SST turbulence model with a standard wall function is used. Also, the finite volume numerical method is used in this paper. The obtained numerical results are compared with the experimental results and provide acceptable agreement. The results show that the presence of an inducer at the pump inlet increases the difference in  $NPSH$  from a number less than 1 m to more than 2 m and thus causes it to be further away from the cavitation point.

**Keywords:** Centrifugal Pump, Inducer,  $NPSH$ , Cavitation, Numerical Simulation, Experimental Test.

ممکن است پس از مدت کوتاهی پروانه پمپ از بین برود پس باید از به وجود آمدن آن در پروانه جلوگیری کرد. شکل زیر زمانیکه یک حباب کاویتاسیون نزدیک یک سطح جامد، فرو می‌باشد را نشان می‌دهد:



### ۱- مقدمه

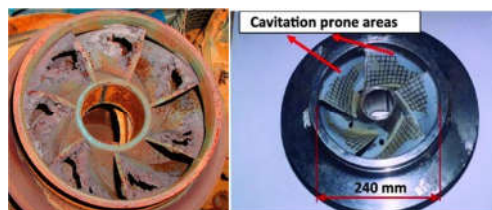
همان‌گونه که می‌دانیم آب یا هر مایع دیگری در هر دمایی، به ازای یک فشار معین موسوم به فشاربخار، تبخیر می‌شود. به عنوان مثال، آب در فشار 1atm در ۱۰۰ درجه سلسیوس و در فشار 0.02atm در ۲۰ درجه سلسیوس تبخیر می‌شود. با توجه به این موضوع هرگاه در حین جریان مایع در داخل پروانه پمپ، فشار از فشار بخار مایع در دمای مربوطه کمتر شود، حبابهای بخار به وجود آمده و همراه با مایع به نواحی پرفشار حرکت می‌کنند. اگر در محل جدید، فشار به اندازه کافی زیاد باشد، حبابهای بخار تقطیر می‌شوند (مایع می‌شوند). در این صورت، ذرات مایع اطراف حبابها، برای پر کردن فضای خالی ناشی از ترکیدن ناگهانی حبابها، از مسیر اصلی خود منحرف شده و با سرعت زیاد، به اطراف و از جمله پره های پروانه برخورد می‌کنند. این پدیده، پدیده کاویتاسیون در پمپ‌ها بوده و برای آن بسیار خطرناک است و

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ehghaghimirbiuk@yahoo.com



شکل ۱- بالایی (لحظه‌ی تشکیل میکروجرگت) پایینی (لحظه تخریب سطح جامد بعد از اصابت میکروجرگت) [۱]

و شکلهای زیر نیز تاثیر پدید کاویتاسیون در پره‌های پمپ گریز از مرکز را نشان می‌دهند:



شکل ۲- کاویتاسیون در پره‌های پمپ گریز از مرکز [۲]

و تاثیر گذر زمان بر پره‌های پمپ بر اثر پدیده کاویتاسیون را می‌توان طبق شکل زیر مشاهده کرد:



شکل ۳- تاثیر گذر زمان بر پدیده کاویتاسیون بر روی پره‌های پمپ [۳]

با توجه به موضوع ایندیوسرها عملکرد آنها موضوع بسیاری از مطالعات بوده است:

جاکوبسن و کلر [۴] طراحی بهینه یک ایندیوسر برای دستیابی به عملکرد مکش بالا علاوه بر حفظ تمامیت ساختاری در شرایط عملیاتی مختلف را مورد بررسی قرار دادند. کوتیر و همکاران [۵] هیدروفویل‌های دارای لبه‌های پیشرو<sup>۱</sup> مختلف به عنوان شبیه ساز بخش تیغه ایندیوسر را مدل کردند و نتایج را با داده های تجری مقایسه نمودند. بکیر و همکاران [۶] رفتار حفره‌زایی یک ایندیوسر سه پره را مورد مطالعه قرار دادند. داده های عددی با داده‌های تجربی برای یک گستره از نرخ

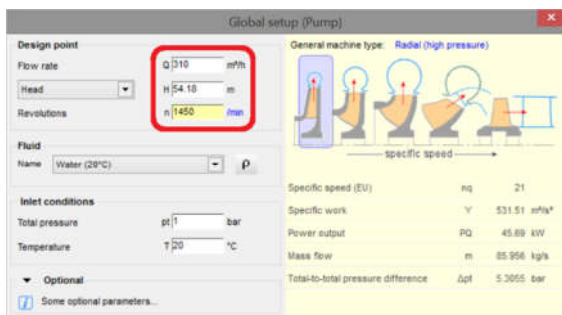
جریان مطابقت خوبی دارند و ضرورت تحقیقات بیشتری در زمینه تعیین ثابتهای تجربی مدل کاویتاسیون ارائه شده است. کوتیر و همکاران [۷] شرایط غیر حفره‌زایی و حفره‌زایی یک ایندیوسر چهار پره را مورد بررسی قرار دادند. مطابقت خوبی بین نتایج عددی و تجربی مشاهده شد و همچنین بحثی در مورد توسعه و توزیع ساختارهای بخار درون ایندیوسر انجام شد. اکیتا و همکاران [۸] تاثیرات جریان فاصله سر<sup>۲</sup> روی جریان حفره‌زای ناپایا را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و آنها بیان داشتند که جریان فاصله سر که از طرف فشار به طرف مکش تیغه ایجاد می‌شود، کاویتاسیون گردابی سر را ایجاد می‌کند که روی کاویتاسیون ورق بر روی لبه پیشرو از تیغه بعدی تاثیر می‌گذارد. همچنین باعث افزایش اثر انسداد در نزدیکی محفظه حلزونی از نتیجه بدون فاصله سر می‌شود. جعفرزاده و همکاران [۹] پمپ گریز از مرکز مجهز به ایندیوسر دو راهه را شبیه سازی کردند. مناسب ترین مدل آشفتگی با بررسی مدل‌های مختلف تلاطم انتخاب شد. همچنین مطالعه تاثیر تعداد پرها بر کارایی پمپ نشان داده شد که پروانه با هفت پره بالاترین ضریب هد را دارد. گوآ و همکاران [۱۰] به مطالعات تجربی و عددی برای کشف تاثیر مکانهای تیغه کوتاه بر عملکرد ضد کاویتاسیون ایندیوسر تیغه‌دار شکاف‌دهنده و پمپ پرداختند. اثر جزئی مکانهای پره کوتاه بر جریان داخلی ایندیوسر و عملکرد خارجی پمپ گزارش شده است. همچنین پیشنهاد می‌شود که ایندیوسر با نسبت مناسب فاصله از نوک تیغه کوتاه تا نوک تیغه بلند به قطر ایندیوسر (L/D) طراحی شود. فو و همکاران [۱۱] به مطالعه عددی و تجربی تاثیر فاصله سر بر روی جریان داخلی و عملکرد هیدرولیک یک ایندیوسر با سه پره پرداختند. دو فاصله سر استفاده شده بود و این پی برده شد که فاصله سر کمتر، سبب افزایش فشار و بازده هیدرولیکی می‌شود. گوآ و همکاران [۱۲] به بررسی اثرات سرعت‌های دورانی بر روی عملکرد یک پمپ گریز از مرکز با یک ایندیوسر گام متغیر پرداختند. نتایج نشان داد عملکرد ضد کاویتاسیون پمپ با افزایش سرعت دورانی، بدتر می‌شود. چنگ و همکاران [۱۳] به بررسی تاثیر ایندیوسر برگشتی بر روی عملکرد کاویتاسیون پمپ گریز از مرکز پرداختند. نتایج نشان داد زمانیکه زاویه برگشتی ایندیوسر از ۱۲۰ تا ۲۷۰ درجه افزایش می‌یابد NPSH<sub>r</sub> پمپ به صورت تدریجی کاهش می‌یابد که بدین معنی است که عملکرد ضد کاویتاسیون پمپ بهبود یافته است. جیانگ و همکاران [۱۴] به بررسی عملکرد کاویتاسیون در پمپ گریز از مرکز سرعت بالا با جت حلقوی و ایندیوسر دردهاها و کسرهای فضای خالی متفاوت پرداختند. با کسرهای فضای خالی یکسان، هد پمپ گریز از مرکز با افزایش دما به آهستگی افت پیدا می‌کند، اگرچه زمانی که دما بیشتر از 90°C می‌شود هد پمپ به سرعت افت می‌کند. شجاعی فرد و همکاران [۱۵] به بهبود عملکرد ایندیوسر با در نظر گرفتن زاویه پره سر ورودی، زاویه پره سر خروجی و نسبت شعاع هاب<sup>۳</sup> خروجی به شعاع هاب ورودی به عنوان متغیرهای طراحی، و ضریب هد و بازده هیدرولیک و هد مکش مثبت خالص مورد نیاز<sup>۴</sup> به عنوان توابع هدف پرداختند. با استفاده از بهینه‌سازی چند منظوره، ضریب هد، بازده هیدرولیک و NPSH<sub>r</sub> به

<sup>2</sup> Tip clearance

<sup>3</sup> Hub

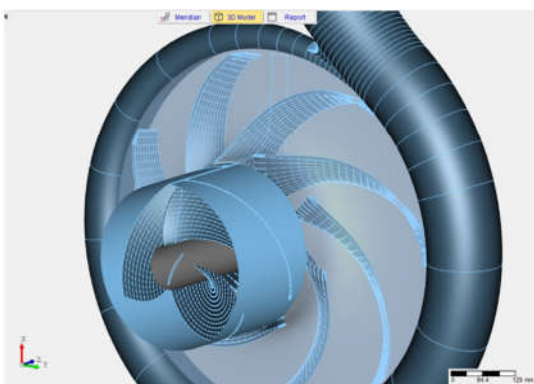
<sup>4</sup> NPSH<sub>r</sub>

<sup>1</sup> Leading edges



شکل ۴- اولین گام در طراحی پمپ با استفاده از پارامترهای اولیه

مقادیر هد و دبی و دور دورانی که پارامترهای اولیه طراحی پمپ هستند، برای پمپ OH1 150-500 به ترتیب برابر 54.18m و 310m<sup>3</sup>/h و 1450 rpm می‌باشند. همچنین ابعاد و اندازه‌های مورد نیاز برای پمپ، مطابق با نقشه‌ی اتوکد استفاده شده است. طراحی صورت گرفته برای این نوع پمپ به همراه ایندیوسر آن در نرم افزار CFturbo® مطابق شکل زیر می‌باشد.



شکل ۵- طراحی پمپ گریز از مرکز OH1 150-500 به همراه ایندیوسر آن در نرم افزار CFturbo®

پس از طراحی ایندیوسر در نرم افزار CFturbo® یک مدل از آن ساخته شد و سپس یک نمونه ریخته گری شده از آن مدل، طبق تصویر زیر تولید شد.

ترتیب 14.3% و 0.3% و 30.2% بهبود پیدا کردند. یانگ و همکاران [۱۶] به تجزیه و تحلیل تولید آنتروپی برای اثر زمان بندی بین ایندیوسر و پروانه در یک پمپ گریز از مرکز سرعت بالا پرداختند. نتایج نشان می‌دهد بهترین عملکرد زمانی حاصل می‌شود که زاویه دور نسبی بین لبه ورودی پره ایندیوسر و لبه خروجی پره پروانه به صفر درجه تنظیم شده باشد. پاربخ و همکاران [۱۷] به تحقیقات در مورد تاثیر شکاف لقی سر و ایندیوسر بر روی انتقال جریان دو فازی هوا-آب توسط پمپهای گریز از مرکز پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از ایندیوسر یا افزایش دادن فاصله شکاف، سبب بهبود عملکرد و اختلاط فاز می‌شود. چنگ و همکاران [۱۸] به بررسی تاثیر زاویه شیب صفحه نصف النهاری از پره ایندیوسر گام متغیر روی عملکرد کاویتاسیون برای پمپ گریز از مرکز سرعت بالا پرداختند. نتایج نشان داد که عملکرد کاویتاسیون برای پمپ گریز از مرکز با سرعت بالا زمانیکه زاویه شیب قسمت پره در صفحه نصف النهاری با یک رنج مشخص افزایش پیدا می‌کند، بهبود خواهد یافت، اما عملکرد کاویتاسیون زمانیکه زاویه شیب از یک حدود معین تجاوز می‌کند، بدتر می‌شود.

با توجه به مطالب گفته شده می‌توان به اهمیت پدیده کاویتاسیون پی برد. به همین دلیل در پمپ هایی که اختلاف  $NPSH_a$  و  $NPSH_r$  کمتر از یک متر می‌باشد برای اطمینان حاصل کردن از عدم وقوع پدیده کاویتاسیون یک ایندیوسر در ابتدای پمپ و قبل از پروانه طراحی می‌شود تا با هدی که تولید می‌کند به افزایش مقدار  $NPSH_a$  کمک کند و در نتیجه سبب افزایش اختلاف بین  $NPSH_a$  و  $NPSH_r$  بشود و در واقع از عدم بروز پدیده کاویتاسیون اطمینان حاصل شود. در این مقاله با توجه به مقدار عددی کم و مناسب به دست آمده برای  $NPSH_r$  و با توجه به اینکه برای نصب ایندیوسر هیچ قطعه اضافی در ورودی پمپ نصب نشده است و قطعه ایندیوسر فقط با یک پیچ و بلافاصله به پروانه متصل شده است یک نوآوری و نتیجه مطلوب محسوب می‌شود. همچنین به جای طراحی و ساخت پمپ جدید با رفتار کاویتاسیون کمی بهتر، که هم زمانبر و هم هزینه بر است صرفاً با طراحی و ساخت یک قطعه به نام ایندیوسر که هم از نظر زمانی کوتاه و هم هزینه کمتری دارد رفتار پمپ موجود را به لحاظ کاویتاسیون اصلاح کردیم.

## ۲- طراحی ایندیوسر در نرم‌افزار CFturbo® و مراحل ساخت

طراحی ایندیوسر پمپ گریز از مرکز OH1 150-500 در نرم افزار CFturbo® انجام گرفته است. بدین صورت که ابتدا مطابق شکل زیر با استفاده از سه پارامتر هد و دبی و دور دورانی که پارامترهای اولیه طراحی برای یک پمپ می‌باشند، قسمت پروانه و حلزونی در نرم افزار طراحی شده و سپس برای آن ایندیوسر طراحی شده است.



شکل ۸- محل نصب ایندیوسر که مطابق شکل بعد از پره های ضد گرداب<sup>۱</sup> قرار دارد

نمای کلی تست پمپ مد نظر به همراه ایندیوسر آن در تصویر زیر نشان داده شده است، محل قرار گیری ایندیوسر با بیضی قرمز رنگ مشخص شده است:



شکل ۹- محل قرار گیری ایندیوسر که با بیضی قرمز رنگ نشان داده شده است

### ۳- تحلیل سیالاتی با استفاده از نرم افزار TCFD®

#### ۳-۱- خواص<sup>۲</sup>

##### ۳-۱-۱- توربولانس

برای مدل سازی آشفتگی در داخل پمپ از مدل توربولانس  $k-\omega$ <sup>۳</sup> برای SST<sup>۴</sup> استفاده می کنیم و همچنین برای رفتار دیواره از حالت تابع دیواره استاندارد<sup>۵</sup> استفاده می کنیم.

##### ۳-۱-۲- شرایط مرزی

برای شرایط مرزی ورودی از حالت نرخ جریان حجمی  $310\text{m}^3/\text{h}$  و شدت انرژی آشفتگی<sup>۶</sup> 5 درصد و نرخ پراکندگی آشفتگی  $100(1/\text{s})$  و



شکل ۶- ایندیوسر ریخته گری شده

بعد از ریخته گری به ترتیب مراحل سند بلاست، ماشین کاری و رنگ زنی روی ایندیوسر ریخته گری شده انجام شد. تصویر زیر شکل ایندیوسر نهایی را نشان می دهد که در آزمایشگاه شرکت پمپسازی نوید سهند تست شد.



شکل ۷- نمونه واقعی ایندیوسر ساخته شده

نمونه ساخته شده مطابق شکل زیر در آزمایشگاه تست شرکت پمپسازی نوید سهند تست شد:

<sup>1</sup> Anti-Vortex

<sup>2</sup> Properties

<sup>3</sup> Turbulence

<sup>4</sup> K- $\omega$  Shear Stress Transport

<sup>5</sup> Standard wall functions

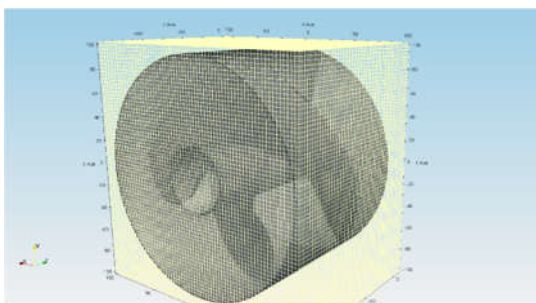
<sup>6</sup> Turbulent energy intensity

تغییرات هد بعد از 3411289 سلول ناچیز بوده و دقت مناسبی نیز دارد. بنابراین این شبکه به عنوان شبکه محاسباتی انتخاب شد.

جدول ۱- نمودار هد به ازای تعداد سلولهای مختلف شبکه

تعداد سلولهای شبکه	هد خروجی (m)
۲۷۴۱۴۳۸	۴,۶۲۷۸۷
۳۰۵۶۸۲۶	۴,۲۱۹۳۶
۳۴۱۱۲۸۹	۳,۸۳۷۰۸
۳۷۲۳۹۷۸	۳,۸۲۹۸۲

تعداد سلول 3411289 زمانی به دست آمد که برای اندازه مش زمینه<sup>۳</sup> عدد 3mm را انتخاب کرده بودیم که همین عدد در نرم افزار TCFD® برای هرسه جهت X, Y, Z طبق شکل زیر استفاده می-شود.



شکل ۱۰- نمای اندازه مش زمینه در هر سه جهت

نکته حائز اهمیت و مهم در مش بندی این می باشد که طبق جدول زیر برای تمامی قسمت های ایندیوسر با یک اندازه برابر مش بندی صورت گرفته و برای قسمت های مختلف ایندیوسر ضریبی در نظر گرفته شده است بدین گونه که قسمتهایی که ضریب یک دارند با همان اندازه استاندارد 3mm مش بندی شده اند و برای مثال قسمتهایی که ضریب دو و سه در جدول دارند 3mm بر ضریب آنها تقسیم می شود و با آن اندازه مش بندی برای آن نواحی صورت می گیرد در واقع این ضریب یک نوع ضریب ریزی مش بندی نسبت به حالت استاندارد می باشد. ستون آخر در جدول زیر که بیانگر تعداد لایه ها می باشد فقط مخصوص قسمتهای دیواره است و به این دلیل ایجاد می شود تا مش بندی بین دیواره ها و قسمتهایی که سیال عبور می کند به یکباره با ضرایب متفاوت به هم وصل نشوند و در واقع رابط بین این دو نوع قسمت می-باشد.

برای شرایط مرزی خروجی از حالت فشار نسبی ثابت صفر استفاده می-کنیم.

### ۳-۲- معادلات حاکم

معادلات اساسی حاکم بر مسئله شامل بقای جرم، بقای مومنتم و حل نمی شود. روابط (۱) و (۲) به ترتیب معادلات پیوستگی و بقای مومنتم را با فرض جریان پایا برای یک سیال نیوتنی و تراکم ناپذیر در حجم کنترل نشان می دهد.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + f \quad (2)$$

در این معادله  $\tau$  تانسور تنش و  $f$  نیروهای حجمی وارد بر سیال می باشند و از روابط (۳) و (۴) محاسبه می شوند.

$$\bar{\tau}_{ij} = -\mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$f = -\rho \left[ 2\bar{\Omega} \times \bar{u} + \bar{\Omega} \times [\bar{\Omega} \times \bar{r}] \right] \quad (4)$$

که در این روابط  $\bar{\Omega}$  معرف سرعت زاویه ای و  $\bar{r}$  بیانگر بردار جابه جایی سیال می باشد. عبارت اول در سمت راست معادله (۴) نیروی کوریولیس<sup>۱</sup> و عبارت دوم نیروی گریز از مرکز می باشد [۱۹].

به منظور بسته شدن دستگاه معادلات و همچنین تحلیل آشفتگی در جریان، نیاز به یک مدل آشفتگی مناسب با فیزیک مسئله می باشد. با توجه به ماهیت جریان، مدل آشفتگی SST k- $\omega$  برای این منظور در نظر گرفته شده است. این مدل قدرت بالایی در حل جریان های چرخشی و جریان در لایه مرزی دارد. روابط (۵) و (۶) معادلات انتقال برای مدل آشفتگی SST k- $\omega$  را نشان می دهد.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (6)$$

در این معادلات  $G_k$  و  $G_\omega$  تولید انرژی جنبشی آشفتگی  $k$  و  $\omega$  هستند.  $\Gamma_k$ ،  $\Gamma_\omega$ ،  $Y_k$  و  $Y_\omega$  به ترتیب نفوذ موثر<sup>۲</sup> و اتلاف آشفتگی  $k$  و  $\omega$  می باشند.  $D_\omega$  معرف ترم پخش  $\omega$  و ضرایب  $S_k$  و  $S_\omega$  مربوط به جملات چشم می باشند [۲۰].

گسسته سازی معادلات به روش حجم محدود انجام شده است. الگوریتم coupled برای حل همزمان سرعت و فشار مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم بر خلاف الگوریتم simple معادلات را به صورت مستقیم و همزمان حل می کند [۲۱].

### ۳-۳- استقلال نتایج از شبکه و مش بندی

برای اطمینان از استقلال حل از شبکه، مقدار هد ایندیوسر در اندازه های مختلف شبکه بررسی شده است. مقدار هد ایندیوسر نباید با تغییر اندازه شبکه تغییر کند. با کاهش اندازه سلول، هد ایندیوسر برای تعداد سلول های مختلف بررسی شده است. با توجه به نتایج بدست آمده که در جدول زیر نشان داده شده است،

<sup>3</sup> Background mesh size

<sup>1</sup> Coriolis

<sup>2</sup> Effective diffusivity

#### ۴- نتایج

##### ۱-۴- نتایج عددی

با مراجعه به گزارش به دست آمده از نرم افزار TCFD® و پیدا کردن قسمت مربوط به نمودار هد به دست آمده بر حسب نرخ جریان برای ایندیوسر طراحی شده در نرم افزار CFturbo® مقدار به دست آمده را برای انجام محاسبات مطابق نمودار زیر یادداشت می‌کنیم. طبق جدول زیر، هد تولیدی ایندیوسر در نرخ جریان  $310\text{m}^3/\text{h}$  برابر  $3.84\text{m}$  می‌باشد.

جدول ۳- جدول به دست آمده از گزارش نتایج نرم افزار

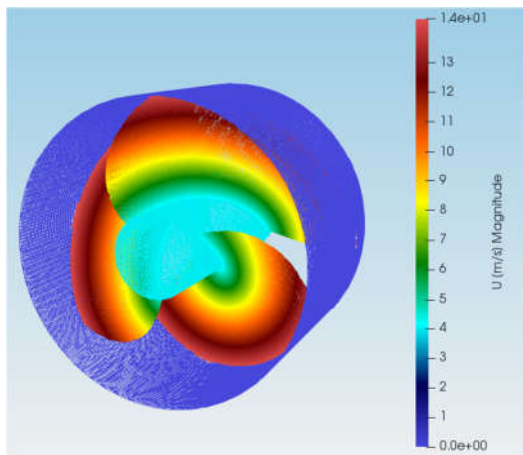
TCFD®

### Head

1:InducerETA150500\_Co1\_Inflow —  
1:InducerETA150500\_Co1\_Outflow

Point Nr.	Flow Rate [ m <sup>3</sup> /h ]	Head [ m ]
1	310.000	3.83708

کانتورهای به دست آمده برای سرعت و فشار مطابق زیر می‌باشند:



شکل ۱۳- کانتور بدست آمده برای سرعت

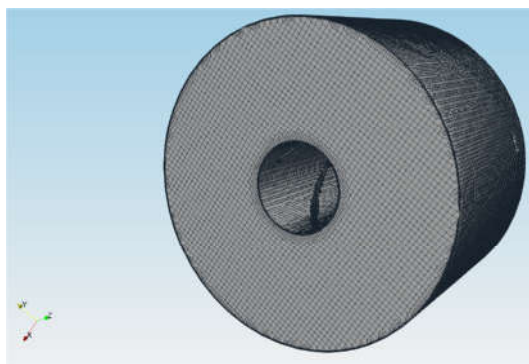
مطابق شکل بالا هر چه قدر از شعاع داخلی پره به شعاع بیرونی پره حرکت می‌کنیم، با توجه به افزایش شعاع و ثابت بودن دور دورانی، اندازه سرعت به تدریج افزایش پیدا می‌کند.

name	type	frame	grp	min ref	max ref	layers	mxp
InducerETA150500_Co1_BladeLE	bladeLeadingEdge	rotating	2	2	3	?	
InducerETA150500_Co1_BladePS	bladePressureSide	rotating	2	2	3	?	
InducerETA150500_Co1_BladeSS	bladeSuctionSide	rotating	2	2	3	?	
InducerETA150500_Co1_BladeTE	bladeTrailingEdge	rotating	3	3	3	?	
InducerETA150500_Co1_BladeTip	bladeCap	rotating	2	2	3	?	
InducerETA150500_Co1_Hub	hub	rotating	1	1	3	?	
InducerETA150500_Co1_Inflow	inlet	static	0	0	0	?	
InducerETA150500_Co1_Outflow	outlet	static	0	0	0	?	
InducerETA150500_Co1_Shroud	shroud	static	1	1	3	?	

جدول ۲- ضرایب مش بندی (نسبت چگالی مش‌ها) و تعداد لایه‌های

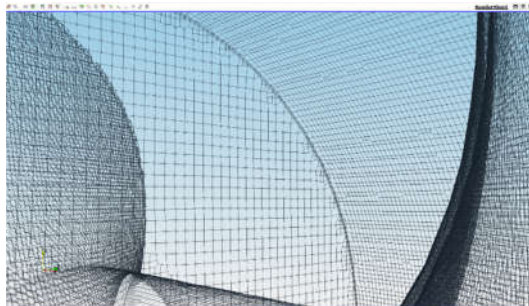
اجزای مختلف ایندیوسر

با احتساب موارد ذکر شده در بالا تعداد سلولهای به وجود آمده از مش بندی برای ایندیوسر 3411289 و تعداد نقاط حاصله 1546187 نقطه می‌باشد. نمای کلی مش بندی به صورت شکل زیر می‌باشد.



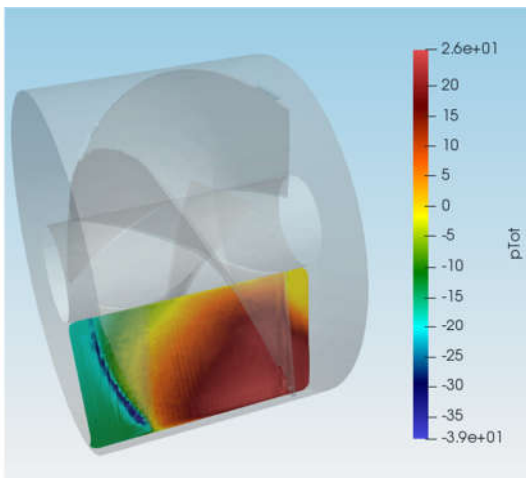
شکل ۱۱- نمای کلی مش بندی

نمای زیر مربوط به نمای سیم‌بندی<sup>۱</sup> دید از داخل ایندیوسر می‌باشند. زاویه دید در اینجا که نمایی سه بعدی می‌باشد همانند این هست که ناظر در داخل ایندیوسر و روی هاب آن قرار دارد و ناحیه پرننگتر کمان مانند که سمت چپ تصویر دیده می‌شود، مش بندی مربوط به قسمت جلویی یکی از پره‌های ایندیوسر را نشان می‌دهد و ناحیه پرننگ سمت راست تصویر مربوط به مش بندی قسمت عقبی پره دیگر ایندیوسر می‌باشد.



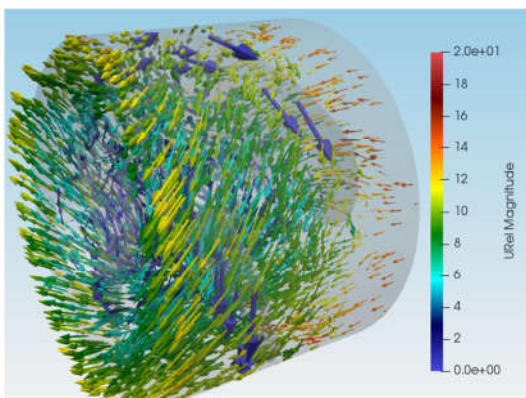
شکل ۱۲- نمای سیم‌بندی ایندیوسر دید از داخل ایندیوسر

<sup>۱</sup> Wireframe



شکل ۱۶- نمای نصف النهاری برای کانتور فشار

شکل بالا نمای نصف النهاری برای ایندیوسر را نشان می‌دهد. طبق شکل بالا فشار کل در ورودی ایندیوسر به خاطر مکش در ورودی منفی می‌باشد. خط آبی کمان مانند، مکانی هست که سیال در تماس با لبه ورودی ایندیوسر قرار می‌گیرد و از نظر اندازه، بیشترین مقدار فشار کل منفی را دارا می‌باشد.

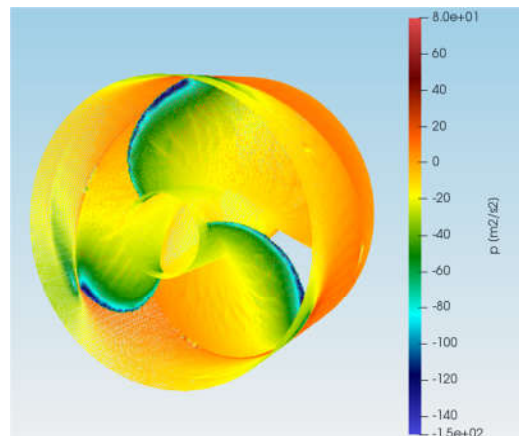


شکل ۱۷- نمایش برداری برای سرعت نسبی

شکل بالا نمایش برداری سرعت نسبی برای ایندیوسر را نشان می‌دهد، طبق شکل بردارهای سرعت مماس بر خطوط جریان هستند و همانطور که دیده می‌شود هنگام خروج سیال بردارهایی که در قسمت شعاع خارجی اند، مقدار بزرگتری دارند.

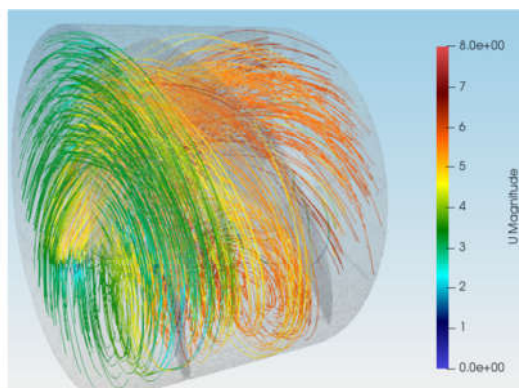
#### ۲-۴- نتایج تجربی

طبق نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی، مطابق جدول زیر که از گزارش مربوط به تست عملکرد پمپ<sup>۱</sup> به همراه ایندیوسر آن به دست آمده است، مقدار هد کل به دست آمده در دبی  $310\text{m}^3/\text{h}$  برابر  $57.57\text{m}$  به دست آمد.



شکل ۱۴-- کانتور به دست آمده برای فشار

مطابق شکل بالا که مربوط به کانتور فشار می‌باشد، چون فشار مکش ورودی منفی می‌باشد، به همین دلیل فشار در مکانهایی که سیال در تماس با لبه‌های ورودی ایندیوسر می‌باشد، بیشترین مقدار فشار منفی یعنی رنگهای سبز و آبی را نشان می‌دهد که به تدریج مقدار عددی فشار در سمت مکش پره‌ها مطابق شکل کاهش پیدا می‌کند و به سمت رنگهای زرد و نارنجی حرکت می‌کند.



شکل ۱۵- نمایش سرعت برای خطوط جریان

طبق شکل بالا خطوط جریان سیال داخل ایندیوسر نشان داده شده است که مسیر حرکت ذرات سیال از ورودی ایندیوسر به خروجی آن را به همراه کانتور سرعت مربوطه نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Pump performance test

جدول ۴- گزارش مربوط به تست عملکرد پمپ

Head										
Pool Temp	Gage Head	Discharge Head	Suction Head	Dynamic Head	Static Head	Total Head	Capacity	Pump Output	Electro Pump Eff.	PUMP Eff
°C	bar	m	m	m	m	m	m <sup>3</sup> /hr	KW	%	%
###	4.51	0	0.2803	2.1629	0	46.45	414.0	54.6	64.46	70.07
###	5.51	0	0.1672	1.2127	0	57.57	310.0	48.58	67.20	73.04
###	5.87	0	0.095	0.7329	0	60.70	241.0	39.82	63.31	68.82
###	6.12	0	0.0383	0.2954	0	62.76	153.0	26.14	53.24	57.86
###	6.22	0	0	0	0	63.44	0.0	0	0.00	0.00

و مقدار  $NPSH_r$  به دست آمده برای پمپ OH1 150-500 به همراه ایندیوسر آن، طبق جدول زیر که از گزارش تست  $NPSH$  به دست آمده است برابر با 0.3m به دست آمد.

جدول ۵- گزارش مربوط به تست  $NPSH$

ویژگی / شرح آزمون	استاندارد	نتیجه آزمون
NPSH TEST	ISO 9906	ok
$NPSHr = H_i - Z_0 - (P_a - P_v) / \gamma$		
$H_i$ : Overall energy at the inlet section of pump		
مقادیر ضوابط شده در سفارش		
$Q = 310 \text{ m}^3/\text{h}$	$H = 54.18 \text{ m}$	$NPSH_a = 2.69 \text{ m}$
		$NPSH_b = 2.1 \text{ m}$
ردیف	پارامترهای سنجش	مقادیر
1	میزان دبی	$Q1 = 311 \text{ m}^3/\text{h}$
2	هد دینامیکی	0.17
3	قطر لوله مکش	10"
4	فشار اتمسفر $P_a/\gamma$	8.6 m
5	فشار بخار سیال $P_v/\gamma$	0.25 m
6	مانومتر مکش	$Ps1 = -8.0 \text{ m}$

### ۵- نتیجه گیری

با توجه به اینکه مقدار هد کل تولیدی توسط پمپ OH1 150-500 در حالت بدون ایندیوسر طبق نتایج تست در دبی  $310 \text{ m}^3/\text{h}$  برابر 53.66m بوده و همانطور که در قسمت قبل بیان شد هد کل تولیدی در حالت با ایندیوسر طبق نتایج تست در دبی  $310 \text{ m}^3/\text{h}$  برابر 57.57m می باشد در نتیجه هد تولیدی توسط ایندیوسر که برابر اختلاف این دو مقدار می باشد به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\text{Inducer Head} = 57.57\text{m} - 53.66\text{m} = 3.91\text{m}$$

و چون مقدار به دست آمده برای هد ایندیوسر با استفاده از نرم افزار TCFD® که قبلاً بیان شد برابر 3.84m به دست آمده، در نتیجه درصد خطا بین نتیجه عددی و نتیجه تجربی برابر با مقدار زیر خواهد بود:

$$|3.84\text{m} - 3.91\text{m}| / 3.91 = 0.0179 = 1.79\%$$

که درصد خطای به دست آمده، نشانگر دقت بالای نتایج به دست آمده از تحلیل سیالاتی با استفاده از نرم افزار TCFD® می باشد. با توجه به اینکه مقادیر تست شده در آزمایشگاه برای دو حالت

$NPSH_r$  (در حالت بدون ایندیوسر و در حالت با ایندیوسر) برای پمپ OH1 150-500 به صورت زیر می باشد:

$$NPSH_r \text{ (without inducer)} = 1.8\text{m}$$

$$NPSH_r \text{ (with inducer)} = 0.3\text{m}$$

و چون مقدار  $NPSH_a$  برابر 2.69m می باشد، در نتیجه اختلاف  $NPSH_a$  و  $NPSH_r$  در حالت جدید (پس از نصب ایندیوسر) به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$NPSH_a - NPSH_r = 2.69\text{m} - 0.3\text{m} = 2.39\text{m}$$

که عدد به دست آمده به حد کافی بیشتر از یک بوده و نتیجه میگیریم که وجود ایندیوسر سبب دور شدن از نقطه وقوع کاویتاسیون و در نتیجه ضریب اطمینان بیشتری برای عدم وقوع کاویتاسیون به وجود می آورد.

### ۶- سپاسگزاری

از شرکت پمپسازی نوید سهند بابت در اختیار گذاشتن نقشه های اتوکل و آزمایشگاه تست قدرانی می کنیم.

### ۷- نمادها

T	دما (°C)
L	طول (mm)
N	سرعت دورانی (rpm)
H	هد (m)
Q	دبی ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
$NPSH_r$	هد مکش مثبت خالص مورد نیاز (m)
$NPSH_a$	هد مکش مثبت خالص موجود (m)

### ۸- مراجع

- <https://www.youtube.com/watch?v=U-uUYCFDTrc&t=29s>
- Cavitation erosion testing on purchaser's pump PSP 250/40, Internal TestReport on Tests done at HRC-KBL-KOV for M/s IGCAR, Nov. 1999
- <https://www.youtube.com/watch?v=U-uUYCFDTrc&t=29s>
- Jakobsen JK, Keller Jr R., Liquid rocket engine turbopump inducers. NASA SP-8052, 98 pages, published by NASA, Washington, D.C., 1971
- Coutier-Delgosha O., Reboud J. L., & Fortes-Patella R., Numerical study of the effect of the leading edge shape on cavitation around inducer blade sections. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 45(3), 678-685, 2002.
- Bakir F., Rey R., Gerber A. G., Belamri T., & Hutchinson B., Numerical and experimental investigations of the cavitating behavior of an inducer. *International Journal of Rotating Machinery*, 10, 2004.
- Coutier-Delgosha O., Morel P., Fortes-Patella R., & Reboud J. L., Numerical simulation of turbopump inducer cavitating behavior. *International Journal of Rotating Machinery*, 2005.
- Okita K., Ugajin H., & Matsumoto Y., Numerical analysis of the influence of the tip clearance flows on the unsteady cavitating flows in a three-dimensional inducer. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 21(1), 34-40, 2009.



- [9] Jafarzadeh B., Hajari A., Alishahi M. M., & Akbari M. H. (2011). The flow simulation of a low-specific-speed high-speed centrifugal pump. *Applied Mathematical Modelling*, 35(1), 242-249.
- [10] Guo X., Zhu Z., Cui B., & Li Y., Effects of the short blade locations on the anti-cavitation performance of the splitter-bladed inducer and the pump. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(7), 1095-1101, 2015.
- [11] Fu Y., Yuan J., Yuan S., Pace G., & d'Agostino, L., Effect of tip clearance on the internal flow and hydraulic performance of a three-bladed inducer. *International Journal of Rotating Machinery*, 2017.
- [12] Guo X. M., Zhu Z. C., Shi G. P., & Huang Y., Effects of rotational speeds on the performance of a centrifugal pump with a variable-pitch inducer. *Journal of hydrodynamics*, 29(5), 854-862, 2017.
- [13] Cheng X. R., Liu H., Tu Y. X., Wei, Y. Q., & Zhang S. Y. (2018, July). Effect of inducer sweepback on cavitation performance of centrifugal pump. In *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* (Vol. 163, p. 012107).
- [14] Jiang, J., Li, Y. H., Pei, C. Y., Li, L. L., Fu, Y., Cheng, H. G., & Sun, Q. Q., Cavitation performance of high-speed centrifugal pump with annular jet and inducer at different temperatures and void fractions. *Journal of Hydrodynamics*, 31(1), 93-101, 2019.
- [15] Shojaeefard M. H., Hosseini S. E., & Zare J., CFD simulation and Pareto-based multi-objective shape optimization of the centrifugal pump inducer applying GMDH neural network, modified NSGA-II, and TOPSIS. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 60(4), 1509-1525, 2019.
- [16] Yang B., Li B., Chen H., & Liu Z., Entropy production analysis for the clocking effect between inducer and impeller in a high-speed centrifugal pump. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(15), 5302-5315, 2019.
- [17] Parikh T., Mansour M., & Thevenin D., Investigations on the effect of tip clearance gap and inducer on the transport of air-water two-phase flow by centrifugal pumps. *Chemical Engineering Science*, 218, 115554, 2020.
- [18] Cheng X., Jia N., Lv, B., & Chen H., Effect of meridian plane dip angle of the variable pitch inducer blade on cavitation performance of high-speed centrifugal pump. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(5), 2020.
- [19] Currie I.G., *Fundamental Mechanics of Fluids*, CRC Press, New York, 2012.
- [۲۰] حیدری نژاد ق.، مقدمه ای بر توربولانس. دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۸.
- [21] Fluent, ANSYS Fluent Theory Guide, Release 15, 2013.