

## تحلیل عددی و تجربی پدیده کاویتاسیون در پمپ سانتریفوژ

فرزاد بازدید، محمدتقی شروانی تبار و جعفر غفوری

**چکیده:** یکی از مشکلات عملکردی پمپ‌های سانتریفوژ بروز پدیده کاویتاسیون می‌باشد. جریان‌های همراه با پدیده کاویتاسیون از فیزیک بسیار پیچیده‌ای برخوردار می‌باشند و به همین دلیل پژوهشگران اکثراً این پدیده را بصورت تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند. در مقاله حاضر پدیده کاویتاسیون داخل یک نمونه تحقیقاتی پمپ سانتریفوژ بصورت تجربی و عددی تحلیل شده است. مطالعات تجربی بر روی مدار هیدرولیکی تست پمپ سانتریفوژ با امکانات ویژه مشاهده جریان بین پره‌های پمپ انجام شده است. تحلیل عددی پدیده کاویتاسیون به کمک نرم‌افزار فلوئنت بصورت تحلیل جریان داخل پمپ تحت شرایط دائم، تک‌فاز، سه بعدی، توربولانس و لزج همراه با دوران پروانه در شرایط کاری مختلف انجام شده است. با استفاده از توزیع فشار بدست آمده داخل قسمت‌های مختلف پمپ، نواحی بروز پدیده کاویتاسیون شناسایی شده‌اند. مقایسه نتایج تجربی و عددی حاضر نشانگر تطابق رضایتبخش می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بررسی تجربی، تحلیل عددی، پدیده کاویتاسیون، پمپ سانتریفوژ، مشاهده حباب

## ۱. مقدمه

پمپ‌های سانتریفوژ کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف، از جمله پتروشیمی، پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌های حرارتی، صنایع نظامی، کشاورزی و در مجموع هر جا که نیاز به بالابردن فشار جریان سیال وجود داشته باشد، دارند. یکی از مشکلات عملکردی این نوع از پمپ‌ها بروز پدیده کاویتاسیون (Cavitation) می‌باشد. اثرات عمده پدیده کاویتاسیون در پمپ‌های سانتریفوژ بصورت افت عملکرد، خوردگی پره‌ها و پوسته، سر و صدا و ارتعاشات ناخواسته پمپ مطرح می‌گردد. تحلیل جریان داخل توربوماشین‌ها بطور کلی از پیچیده‌ترین مسائل مهندسی است. به دلیل دوران روتور رفتار جریان بسیار پیچیده و شامل مسائل لایه مرزی، توربولانس و جریان‌های ثانویه می‌شود. به ویژه هنگام تشکیل پدیده کاویتاسیون ماهیت

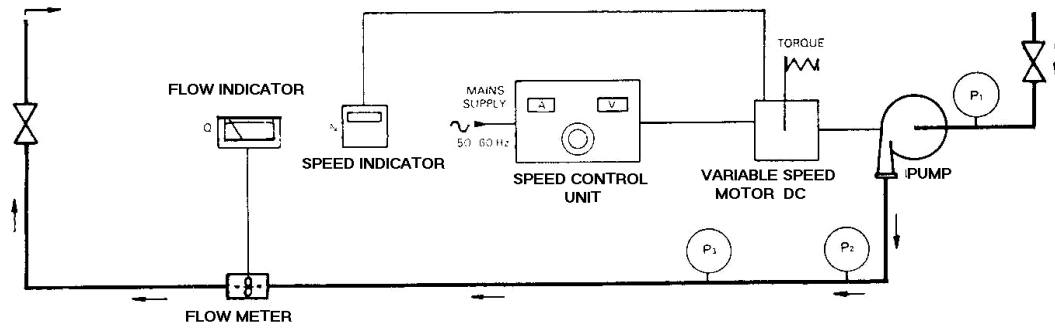
جریان بصورت دوفاز مایع-گاز می‌گردد و پژوهشگران اکثراً بصورت تجربی بروز این پدیده را مطالعه نموده‌اند. مک نالتی (McNulty) [1] در سال ۱۹۷۹ نقطه شروع کاویتاسیون را با استفاده از روش اندازه گیری صدا تعیین نمود. هافمن (Hofman) و استافل (Stoffel) [2] در سال ۱۹۹۹ با استفاده از روش ظاهر سازی حباب پدیده کاویتاسیون را بررسی کرد. پیشرفت و توسعه بکارگیری کامپیوتر در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی سبب توسعه روش‌های مختلف تحلیل جریان در پمپ‌های سانتریفوژ شد. روث (Roth) وکی‌سی (Casey) [3] در سال ۱۹۸۴ روش خطوط جریان منحنی (Streamline-curvature) برای تحلیل میدان جریان بین پره‌ها را بصورت دوبعدی و بدون دوران پروانه ارائه دادند. هنوز هم اکثر مطالعات اخیر بر روی تحلیل میدان جریان داخل پروانه و حلزونی بصورت جدا از هم متمرکز شده است. مورفیدکیس (Morfiadakis) و همکاران [4] در سال ۱۹۹۱ جریان را بصورت دو بعدی و غیر دائم در حلزونی پمپ تحلیل نمودند. وان ایسن (Van Essen) [5] در سال ۱۹۹۷ میدان جریان داخل پمپ مختلط را با تکیه بر روش اجزاء محدود (FEM) تحلیل

مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۲/۸ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۲/۱۲/۲۵ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر فرزاد بازدید، تهرانی دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، bazdid@iust.ac.ir

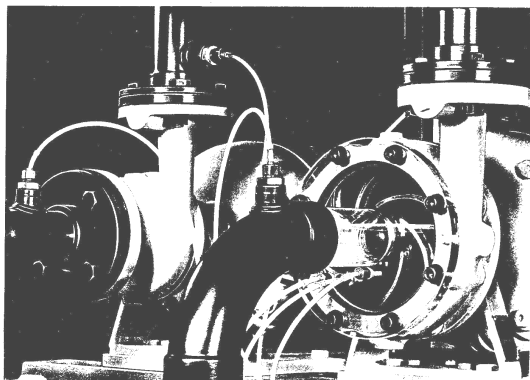
دکتر محمدتقی شروانی تبار استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، msherv@tabrizu.ac.ir

جعفر غفوری کارشناس ارشد مهندسی مکانیک



شکل ۱. شکل شماتیک مدار تست پمپ سانتریفوژ

پمپ سانتریفوژ با پروانه از نوع یک طرف باز می‌باشد که مشخصات عملکردی آن بصورت زیر است:  
 قطر پروانه پمپ: ۱۴۰ mm  
 ماکزیمم دبی: ۶/۵ lit/sec در دور ۳۰۰۰ rpm  
 ماکزیمم هد خروجی: ۲۸ metres در دور ۳۰۰۰ rpm  
 از جریان میان پره‌های در حال دَوَران با دور مختلف توسط استروبوسکوپ (Stroboscope) و دوربین فیلم‌برداری معمولی در شرایط مختلف کاری پمپ عکس برداری شده است.  
 استروبوسکوپ یک فلاشر است و با همان فرکانسی که پروانه پمپ دوران می‌کند نور بسمت پره‌ها ساطع می‌نماید. بنابراین پره‌های در حال دوران ساکن به نظر می‌رسند و می‌توان بدون نیاز به دوربین فیلم‌برداری سرعت بالا از جریان میان پره‌ها عکسبرداری کرد.



شکل ۲. پمپ با محفظه از جنس پلکسی‌گلاس

با استفاده از این مجموعه می‌توان مشخصات عملکردی پمپ‌ها مانند دور، دبی حجمی، هد و فشار مکش به تعبیری هد مثبت خالص مکش (NPSH) را اندازه‌گیری نمود و صدا را در هر مرحله ثبت نمود.

کردند. آلبرتو (Alberto) و همکاران [6] در سال ۲۰۰۱ میدان جریان را بصورت سه بعدی، توربولانس و شبه دائم با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت (Fluent) تحلیل نمودند. در مقاله حاضر پدیده کاویتاسیون داخل یک نمونه تحقیقاتی پمپ سانتریفوژ بصورت عددی و تجربی تحلیل شده است. مطالعات تجربی بر روی مدار هیدرولیکی تست پمپ سانتریفوژ با امکانات ویژه مشاهده جریان بین پره‌های پمپ انجام شده است. تحلیل عددی پدیده کاویتاسیون بصورت تحلیل جریان تک‌فاز داخل پمپ تحت شرایط دائم، سه بعدی، توربولانس و لزج همراه با دَوَران پروانه در شرایط کاری مختلف انجام شده است و با استفاده از توزیع فشار بدست آمده داخل قسمت‌های مختلف پمپ نواحی بروز پدیده کاویتاسیون شناسایی شده‌اند. با تحلیل جریان در شرایط مختلف منحنی‌های عملکردی مانند هد-دبی ( $H-Q$ ) و بازده-دبی ( $\eta-Q$ ) پمپ‌گریز از مرکز بدست آمده است. نتایج تجربی و عددی با هم مقایسه شده‌اند.

## ۲. تجهیزات آزمایش

مطالعات تجربی بر روی دستگاه تحقیقاتی تست هیدرولیکی پمپ سانتریفوژ مدار بسته انجام شده است [7]. مدار هیدرولیکی و تجهیزات آن بصورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

دستگاه تست شامل دو نمونه پمپ سانتریفوژ است و تجهیزات آن شامل دبی سنج دیجیتالی، دور سنج برای اندازه‌گیری دور، چندین گیج (Gauge) برای اندازه‌گیری فشار مکش و رانش پمپ‌ها و نیرو سنج برای اندازه‌گیری گشتاور مورد نیاز برای دوران پمپ‌ها می‌باشد.

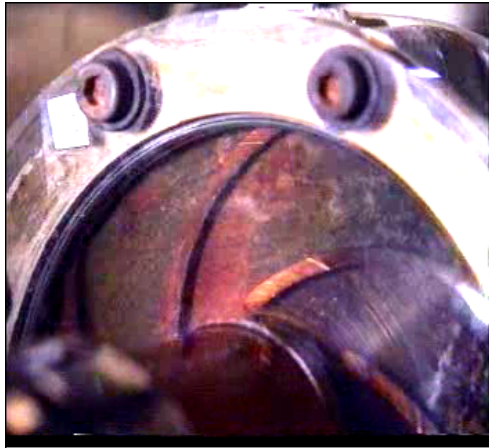
محفظه یکی از پمپ‌ها از جنس پلکسی‌گلاس (Plexiglass) است که جهت رؤیت جریان داخل پمپ پیش بینی شده است و در شکل ۲ مشاهده می‌شود. پمپ مورد مطالعه یک نمونه

### ۳. روش انجام آزمایش

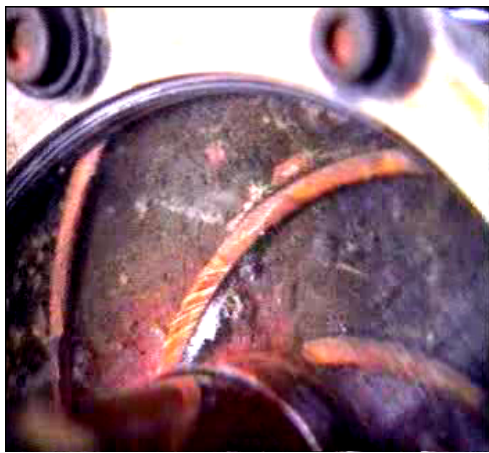
در مقاله حاضر با استفاده از تجهیزات ذکر شده در بخش قبلی بروز پدیده کاویتاسیون در یک نمونه تحقیقاتی پمپ سانتریفوژ بررسی شده است. در حقیقت اساس روش بر مبنای ظاهر سازی (visualization) حباب‌های در حال تشکیل کاویتاسیون توسط استروبو اسکوپ و دوربین فیلم برداری معمولی است. همچنین با تکرار آزمایش در دبی‌های مختلف، دور ثابت ۳۰۰۰ rpm و اندازه گیری فشار ورودی و خروجی پمپ نمودار هد بر حسب دبی حجمی در دور ثابت برای پمپ سانتریفوژ مورد مطالعه تعیین شده است.

در شکل ۳ تصاویر گرفته شده از جریان میان پره‌های پمپ در دو حالت (الف) بدون بروز پدیده کاویتاسیون و (ب) بروز پدیده کاویتاسیون ارائه شده است.

در شکل ۴ تغییرات هد بر حسب دبی حجمی پمپ که در دور ثابت ۳۰۰۰ rpm اندازه گیری شده ارائه شده است و از این اطلاعات جهت مقایسه با نتایج حل عددی در قسمت بعدی استفاده خواهد شد.



(الف)



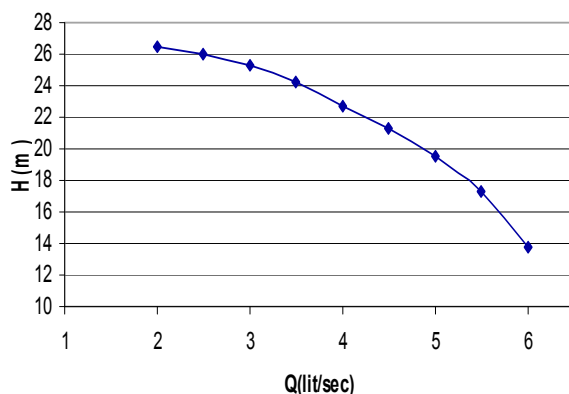
(ب)

شکل ۳. الف- دور ۳۰۰۰ rpm، فشار نسبی مکش ۰ مترآب، دبی

حجمی ۳/۷ lit/sec و فشار رانش ۲۴/۰ مترآب

ب- دور ۳۰۰۰ rpm، فشار نسبی مکش ۱- مترآب، دبی

حجمی ۳/۶ lit/sec و فشار رانش ۲۳/۵ مترآب



شکل ۴. تغییرات هد بر حسب دبی حجمی پمپ سانتریفوژ

مورد مطالعه در دور ۳۰۰۰ rpm

### ۴. تحلیل عددی جریان داخل پمپ سانتریفوژ

تحلیل جریان داخل پمپ سانتریفوژ یکی از پیچیده ترین مسائل مهندسی است و از جمله دلایل آن می توان شدن با شتاب منفی شدید، جریان‌های ثانویه، حالت گذرا، جدایی و شکل نامنظم پره‌ها همراه با دوران را ذکر کرد. برای تحلیل میدان جریان داخل پره‌های در حال دوران باید شبکه مناسبی داخل قسمت‌های مختلف پمپ ایجاد شود. برای ایجاد شبکه از نرم افزار گمبیت (GAMBIT) [8] استفاده شده است. به همین منظور مدل پمپ مطابق با اندازه و ابعاد آن در نرم افزار یاد شده ایجاد شده است. داخل پمپ به سه ناحیه زیر تقسیم بندی شده است :

- ناحیه ورودی به پمپ بدون دوران
- ناحیه داخل پره‌های پروانه در حال دوران
- ناحیه خروجی شامل حلزونی و دیفیوزر خروجی بدون دوران

داخل پمپ یک شبکه بی سازمان (unstructured) از نوع مثلثی با تعداد در حدود ۱۱۲۰۰۰ سلول با استفاده از نرم افزار گمبیت ایجاد شده است. شبکه ایجاد شده در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.

است استفاده می‌نماید [9]. مدل MRF یکی از ساده‌ترین مدل‌ها برای تحلیل جریان میان اجزاء دارای دوران محسوب می‌شود. مدل MRF را می‌توان برای تحلیل جریان تراکم ناپذیر داخل توربوماشین‌ها با پره‌های در حال دوران بکار برد. با بکارگیری آن برای ناحیه دورانی معادلات پیوستگی و مومنوم همراه با یک ترم اضافی ناشی از دوران حل می‌شوند. در این صورت بجای ترم  $\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla(\rho VV)$  معادله ناوراستوکس ترم  $\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla(\rho V_r V) + \Omega \times V$  جایگزین می‌شود، که  $V_r$  بردار سرعت نسبی در ناحیه دورانی می‌باشد و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_r = V - \Omega \times V \quad (5)$$

با توجه به اینکه جریان داخل پمپ به شدت آشفته است برای تحلیل جریان ناگزیر باید از یک مدل توربولانسی استفاده شود. برای این کار مدل توربولانسی  $k-\varepsilon$  استاندارد [11] بکار گرفته شده است. در این حالت نرم‌افزار فلوئنت معادلات پیوستگی و مومنوم متوسط‌گیری شده (روابط (۶) الی (۱۰)) را همراه با دو معادله اضافی توربولانسی برای تعیین  $k$  و  $\varepsilon$  (روابط (11) و (12)) جهت محاسبه و تقریب ترم‌های توربولانس بر اساس الگوریتم بیان سیمپل حل می‌نماید [10 و 11].

$$\frac{\partial(\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w})}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(u')}{\partial x} + \frac{\partial(v')}{\partial y} + \frac{\partial(w')}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

$$\rho \left\{ \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right\} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left\{ \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right\} \quad (8)$$

$$\rho \left\{ \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right\} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} - \rho \left\{ \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right\} \quad (9)$$

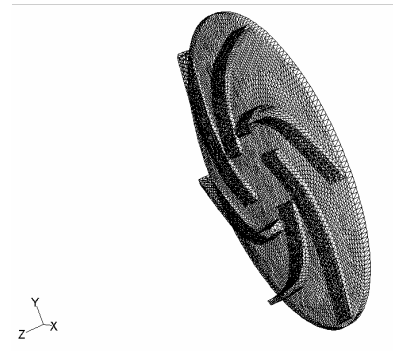
$$\rho \left\{ \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right\} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} - \rho \left\{ \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right\} \quad (10)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu_T \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_T \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} - \varepsilon + u'_i G'_i - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \frac{\partial x_i}{\partial x_j} \quad (11)$$

$$\nu_T \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} - \varepsilon + u'_i G'_i - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \frac{\partial x_i}{\partial x_j}$$



شکل ۵. شبکه بی‌سازمان ایجاد شده داخل پمپ سانتریفوژ



شکل ۶. شبکه ایجاد شده بر روی پروانه یک طرف باز پمپ سانتریفوژ

### ۵. معادلات حاکم و شرایط مرزی

به منظور حل عددی میدان جریان داخل پمپ تحت شرایط دائم و سه بعدی از نرم‌افزار فلوئنت (FLUENT) [9] جهت حل معادله پیوستگی و معادلات مومنوم در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$  بر اساس روش حجم محدود (Finite Volume) و مبتنی بر الگوریتم عددی سیمپل (Simple) [10] استفاده شده است. معادلات بقاء به ترتیب در سری معادلات (1) الی (4) ارائه می‌شوند.

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \right\} = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} \right\} = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (3)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} \right\} = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (4)$$

نرم‌افزار یاد شده برای تحلیل جریان در ناحیه دورانی از مدل MRF (Multiple Reference Frame) که یک مدل شبه دائم

پمپ سانتریفوژ در شکل ۷ همراه با ذکر شرایط کاری آن ارائه شده است.

همچنین تصویر گرفته شده از جریان میان پره‌ها در شرایط کاری مشابه برای مقایسه ناحیه بروز کاویتاسیون از هر دو روش تجربی و عددی در شکل ۷ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود حداقل فشار در لبه ورودی پره از نتایج تحلیل عددی تعیین شده است و با توجه به اینکه حداقل فشار بدست آمده از فشار بخار آب در دمای آزمایشگاه (۳۰ درجه سلسیوس) پایین‌تر است پدیده کاویتاسیون در این ناحیه بروز می‌کند.

تصویر ارائه شده از جریان میان پره‌ها نیز در شرایط کاری مذکور محل تشکیل حباب‌های کاویتاسیون را در این ناحیه بطور واضح نشان می‌دهد. محل بروز پدیده کاویتاسیون بر اساس هر دو روش تجربی و عددی بطور یکسان تعیین شده است، بنابراین نتایج تجربی و عددی حاضر از دیدگاه شناسایی محل تشکیل کاویتاسیون به خوبی کامل یکدیگر را تأیید می‌نمایند.

برای بدست آوردن نمودارهای عملکردی پمپ سانتریفوژ مورد بررسی مانند  $H-Q$  و  $\eta-Q$ ، تحت شرایط دور ثابت و دبی حجمی متغیر، میدان جریان سه بعدی توسط نرم‌افزار فلوئنت حل می‌گردد. سپس با استفاده از نتایج حاصله، هد پمپ، توان مصرفی برای دوران پروانه و بازده پمپ در دبی‌های مختلف توسط روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$H = \frac{P_{\text{total}2} - P_{\text{total}1}}{\rho g} \quad (16)$$

$$P = \frac{T \cdot 2\pi \cdot N}{60} \quad (17)$$

$$P_{\text{net}} = \rho g H Q \quad (18)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{net}}}{P} \quad (19)$$

در جدول ۱ نتایج بدست آمده از تحلیل عددی حاضر، در دور ثابت ۳۰۰۰ rpm و در دبی‌های حجمی مختلف ارائه شده است با توجه به اطلاعات موجود در جدول ۱ منحنی‌های عملکردی پمپ سانتریفوژ در دور ثابت رسم شده است.

شکل ۸ نماینگر کاهش هد پمپ در اثر افزایش دبی حجمی است، که این از مشخصه‌های بارز پمپ‌های سانتریفوژ با پره‌های خمیده به پشت (backward blade) می‌باشد [12]. نظر به اینکه اطلاعات تجربی مربوط به تغییرات هد برحسب دبی حجمی پمپ مورد مطالعه در شکل ۴ موجود است، لذا شکل ۸ به مقایسه مستقیم نتایج حل عددی و تجربی حاضر اختصاص یافته است.

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial x_i}{\partial x_j} \quad (12)$$

$$\times \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

در معادلات (11) و (12) پارامترهای  $k$  و  $\varepsilon$  به ترتیب شدت انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف انرژی آشفتگی می‌باشند که از روابط (13,14) محاسبه می‌شوند [11].

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (13)$$

$$\varepsilon = \nu \left[ 2 \left( \frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v'}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w'}{\partial z} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial u'}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (14)$$

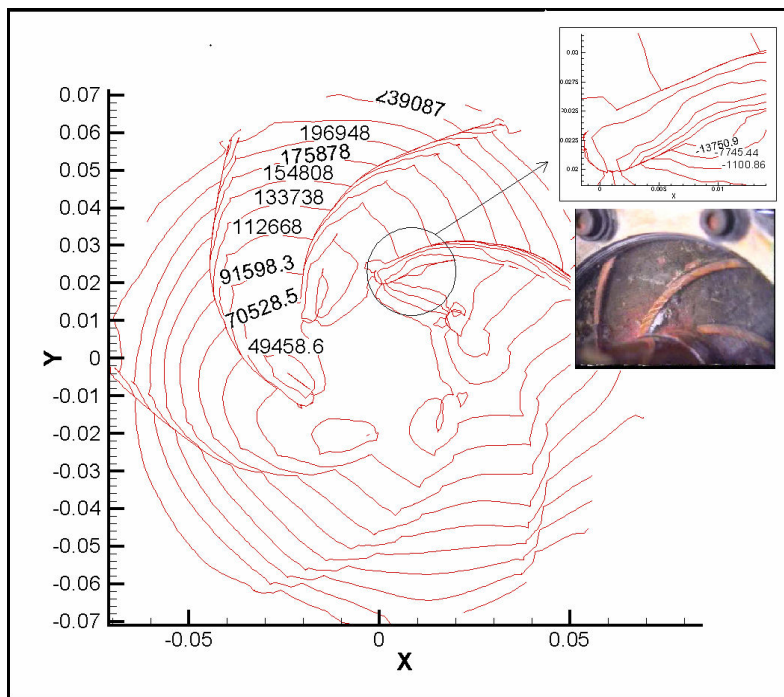
مدل توربولانسی  $k-\varepsilon$  همگن است و مولفه‌های نوسانات سرعت در همه جهات برابر در نظر گرفته می‌شود بنابراین:

$$u'^2 = v'^2 = w'^2 \quad (15)$$

در پمپ‌های سانتریفوژ با توجه به اینکه دبی جرمی و فشار ورودی به پمپ در دور مشخص مقادیر معلوم و در دسترس می‌باشند، در ورود به پروانه به شرط مرزی ورودی فشار (pressure inlet) و در خروج از حلزونی شرط دبی جرمی عمود بر سطح خروجی (mass flow outlet) استفاده شده است. دیواره‌های پروانه و پره‌ها همگی در حال دوران با سرعت ثابت هستند. سطوح کلیه دیواره‌ها از لحاظ هیدرولیکی صاف می‌باشند (smooth wall).

## ۶. بحث پیرامون نتایج

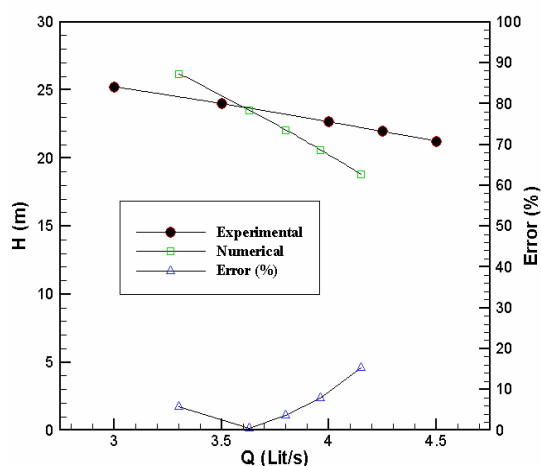
همانطور که در بخش‌های قبلی بیان شد یکی از نتایج بسیار مهم شبیه‌سازی عددی میدان جریان داخل پمپ شناسایی نواحی بروز پدیده کاویتاسیون بر روی پروانه پمپ می‌باشد. بدین ترتیب که با استفاده از تحلیل میدان جریان توزیع فشار داخل قسمت‌های مختلف پمپ سانتریفوژ تعیین می‌شود. با توجه به توزیع فشار بدست آمده در نقاط مختلف و مقایسه با فشار بخار آب، هر جا که فشار مطلق از فشار بخار کمتر باشد محل بروز پدیده کاویتاسیون محسوب می‌گردد. در این قسمت میدان جریان در شرایطی که داده‌های تجربی آن همراه با تصویر گرفته شده با توسط روش ظاهرسازی حباب موجود است، تحلیل شده است. توزیع فشار بدست آمده بر روی پروانه



شکل ۷. توزیع فشار استاتیک بر حسب Pa بدست آمده از تحلیل جریان بر روی پروانه پمپ سانتریفوژ (دور ۳۰۰۰ rpm، فشارنسبی مکش ۱- مترآب، دبی حجمی ۳/۶۳ lit/sec و فشار رانش ۲۴ مترآب)

جدول ۱. نتایج بدست آمده از تحلیل سه بعدی میدان جریان

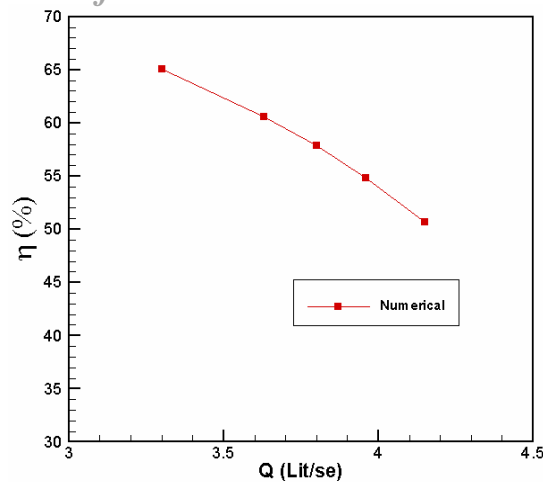
مراحل	N (rpm)	Q (kg/s)	P <sub>total1</sub> (pa)	P <sub>total2</sub> (pa)	T (Nm)	P (w)	P <sub>net</sub> (w)	H (m)	η (%)
۱	3000	3.30	79880	336852	4.1459	1301.6	848.1	26.2	65.1
۲	3000	3.63	79869	315516	4.427	1390.1	854.6	24.0	61.5
۳	3000	3.80	79863	301005	4.570	1434.9	838.7	22.5	58.4
۴	3000	3.96	79857	28629	4.683	1470.4	816.4	21.0	55.5
۵	3000	4.15	79850	264139	4.806	1509.0	765.7	18.8	50.7



شکل ۸. تغییرات هد بر حسب دبی حجمی پمپ سانتریفوژ (N=۳۰۰۰ rpm)

همانطور که مشاهده می شود شبیه سازی عددی حاضر به صورت رضایت بخشی با نتایج تجربی سازگاری دارد و درصد خطا برای گستره قابل قبولی از دبی حجمی عملاً کمتر از ۱۰ درصد تخمین زده شده است. البته این اختلاف می تواند از عدم مدلسازی دقیق اندازه و ابعاد پمپ مورد بررسی در نرم افزار گمبیت ناشی شود. بهتر است برای اندازه گیری دقیق ابعاد و مدلسازی پروفیل پره ها بطور دقیق از دستگاه اندازه گیری سه بعدی (CMM) استفاده شود.

شکل ۹ تغییرات توان مصرفی پمپ بر حسب دبی حجمی در



شکل ۱۰. تغییرات بازده بر حسب دبی حجمی پمپ سانتریفوژ (N= ۳۰۰۰ rpm)

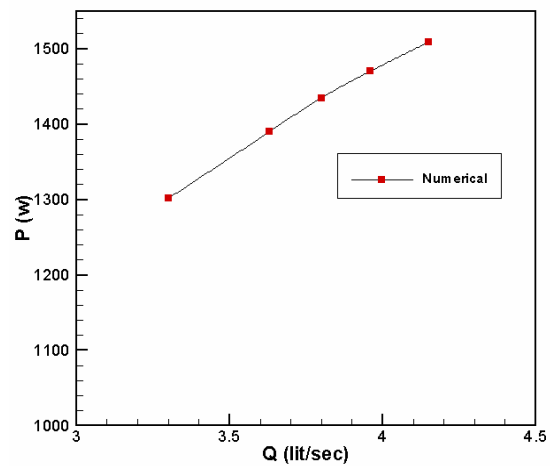
۳. منحنی‌های عملکردی پمپ سانتریفوژ را می‌توان بدون نیاز به انجام تست حتی در فاز طراحی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی عددی سه بعدی جریان با دقت قابل قبول بدست آورد.

۴. با استفاده از توزیع فشار بدست آمده از تحلیل عددی میدان جریان داخل پمپ سانتریفوژ نواحی بروز پدیده کاویتاسیون قابل شناسایی می‌باشند.

۵. نتایج شبیه‌سازی عددی حاضر مطابقت رضایتبخش با نتایج تجربی دارند.

### مراجع

- [1] McNulty, P.J., "Cavitation Inception in Pumps", International Symposium on Cavitation Inception, 1979.
- [2] Hofmann, M. and Stoffel, B., "Similarity and Geometrical Effects on Rotating Cavitation in Two Scaled Centrifugal Pump", Technical Report, 1999.
- [3] Casey, M.V., and Roth, P., "A Steamline Curvature Through-Flow Method For Radial Turbocompressors", Proc. I. Mech. Conf. Computational Methods in Turbomachinery, 1984.
- [4] Morfiadakis, E.E., Voutsinas, S.G. and Papantonis, D.E., "Unsteady Flow Calculation in Centrifugal Pump with Spiral Casing", Int. J. Num. Meth. Fl., Vol 12, pp. 895-908, 1991.
- [5] Van Esch, B.P.M., "Simulation of Three-Dimensional Unsteady Flow in Hydraulic Pumps", Ph.D Thesis, University of Twente, The Netherlands, 1997.



شکل ۹. تغییرات توان مصرفی بر حسب دبی حجمی پمپ سانتریفوژ (N= ۳۰۰۰ rpm)

دور ثابت ۳۰۰۰ rpm مبتنی بر داده‌های موجود در جدول ۱ را نشان می‌دهد. به منظور کاهش زمان انجام تست‌ها و جلوگیری از صدمات احتمالی به پمپ مورد بررسی، اطلاعات تجربی مرتبط با توان مصرفی بر حسب دبی حجمی پمپ اندازه‌گیری نشد و لذا مقایسه مستقیم با نتایج تحلیل عددی حاضر امکانپذیر نمی‌باشد. اما، منحنی ارائه شده در شکل ۹ روند منطقی را نشان می‌دهد زیرا عموماً برای پمپ‌های سانتریفوژ با افزایش دبی حجمی در دور ثابت توان مصرفی پمپ افزایش می‌یابد [12].

در شکل ۱۰ تغییرات بازده پمپ سانتریفوژ بر حسب دبی حجمی در دور ثابت ۳۰۰۰ rpm بر اساس داده‌های جدول ۱ نشان داده شده است. نمودار تغییرات بازده اغلب پمپ‌های سانتریفوژ بر حسب دبی بصورت سهمی می‌باشد که مقدار ماکزیمم آن در نقطه طراحی (Best Efficiency Point)(Q<sub>bep</sub>) است و در سایر دبی‌ها بازده سیر نزولی دارد [12]. همانطور که در نمودار شکل ۱۰ مشاهده می‌شود با کاهش دبی به سمت دبی طراحی بازده پمپ افزایش می‌یابد و تغییرات بازده از روند منطقی برخوردار است.

### ۷. نتیجه‌گیری

۱. روش ظاهرسازی حباب (visualization) یک روش مناسب و دقیق برای مطالعه تجربی پدیده کاویتاسیون در پمپ‌های سانتریفوژ می‌باشد.
۲. مدل MRF (Multiple Reference Frame) موجود در نرم‌افزار فلوئنت مدلی مناسب برای تحلیل جریان داخل توربوماشین‌های با جریان تراکم‌ناپذیر با در نظر گرفتن دوران پره‌ها است.

[18] Kubota, A. and Kato, H., "A New Modeling Of Unsteady Cavitation On Hydrofoil Section", Journal of Fluid Mechanics, pp 59-69, 1992.

[19] Richard, B., Rebort, F. and David, A., "Performance Analysis Of Cavitating Flow in Centrifugal Pumps Using Multiphase CFD", Proceedings of ASME FEDSM 01, Fluid Engineering Division, Summer Meeting. FEDSM2001-18075, 2001.

[20] Avellan, F., "Centrifugal Pump Performance Drop Due to Leading Edge Cavitation: Numerical Predictions Compared With Model Tests", J. Fluid Engineering, Vol. 2, pp. 120, 1998.

### علائم اختصاری

- H: هد پمپ (m)  
 $\eta$ : بازده پمپ (%)  
 Q: دبی حجمی پمپ (lit/sec)  
 P: توان مصرفی (w)  
 T: گشتاور پروانه (N.m)  
 N: دور (rpm)  
 NPSH: هد مثبت خالص مکش (m)  
 $P_1$ : فشار ورودی به پمپ (Pa)  
 $P_2$ : فشار رانش پمپ (Pa)  
 $P_v$ : فشار بخار (Pa)  
 $u, v, w$ : مؤلفه‌های سرعت (m/sec)  
 $u', v', w'$ : مؤلفه‌های نوسانات سرعت  
 $k$ : انرژی جنبشی آشفتگی  
 $\varepsilon$ : نرخ اتلاف انرژی آشفتگی  
 $\mu$ : ویسکوزیته (Pa.sec)  
 $\rho$ : دانسیته (kg/m<sup>3</sup>)  
 g: شتاب گرانش  
 $\Omega$ : سرعت زاویه‌ای (rad/sec)

[6] Alberto, T., Gerhard, L., Stoffel, B., "Numerical, Experimental and Theoretical Analysis of the Individual Efficiencies of a Centrifugal Pump", Proceedings of ASME FEDSM 01, Fluid Engineering Division, Summer Meeting. FEDSM, 2001-18071, 2001.

[۷] آزمایشگاه توربوماشین‌ها، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

[8] GAMBIT User Guide, version 1.1.2, 1998.

[9] FLUENT User Guide, version 5.2.3, 1999.

[10] Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, 1980.

[11] Schlichting, H., "Boundary Layer Theory", McGraw-Hill, 1989.

[12] Stepanoff, A.J., "Centrifugal and Axial Flow Pumps", John Wiley, New York, 1962.

[13] Yveslecoffre, A.H., "Cavitation Bubble Trackers", A.A.Balkema, 1999.

[14] Young, F.R., "Cavitation", Mc Graw-Hill, 1989.

[15] Grist, E. "Cavitation and Centrifugal Pump", Taylor & Francis, 1999.

[16] Simpson, H.C., "The Quantitative Study of 3D Flow Patterns in Centrifugal Pump", International Assoc. for Hydraulic Research, 10th Congress, London, 1963.

[17] Roger, E.A., Gotferd, S. and Morten, k., "Numerical Modeling Of Sheet and Tip Vortex cavitation whit Fluent5", Cavitation Symposium, Session B5.006, 2001.