



## شبیه‌سازی جریان دوفاز روغن و هوا در یاتاقان پایینی ژنراتور نیروگاه سد شهید عباسپور

سارا طاهری پور<sup>۱</sup>، محمدرضا صفاریان<sup>۲\*</sup> و علیرضا دنه دزفولی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۱/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۸

### چکیده

جریان دوفاز روغن و هوا در یاتاقان ژورنال ژنراتور نیروگاه سد شهید عباسپور، به صورت عددی شبیه‌سازی می‌شود. مسئله به صورت ناپایا و در زمان‌های مختلف از لحظه شروع به کار ژنراتور، مورد بررسی قرار می‌گیرد. هندسه مسئله سه‌بعدی و جریان آرام است. این هندسه از چند بخش مجزا شامل، مخزن روغن دوار، یاتاقان ژورنال و شافت فولادی تشکیل شده است که تمامی بخش‌ها با لوله به هم متصل هستند و جریان از میان آن‌ها عبور می‌کند. با توجه به تکراری بودن ناحیه محاسباتی، یک چهارم از هندسه مدل‌سازی می‌شود. به دلیل پیچیدگی هندسه، مدل هندسی به حجم‌های کوچکتر تقسیم شده و به صورت باسازمان شبکه‌بندی می‌شود. میدان سرعت، توزیع فشار و کسر حجمی با حل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت بدست می‌آیند. روش حجم سیال برای مدل‌سازی جریان دوفاز، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از حل عددی با داده‌های بدست آمده از فشارسنج واقع بر یاتاقان ارزیابی می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که حرکت روغن با شرایط فیزیکی واقعی تطابق دارد. با توجه به لزوم اصلاح سیستم خنک کاری، لازم است تا نقاط پرفشار حاوی روغن در یاتاقان جهت انشعاب‌گیری مشخص شوند که با محاسبه و بررسی توزیع فشار در یاتاقان این امر محقق می‌شود.

**کلمات کلیدی:** یاتاقان ژورنال؛ شبیه‌سازی؛ جریان دوفاز؛ دینامیک سیالات محاسباتی؛ مدل حجم سیال.

## Simulation of Two-Phase Oil and Air Flow of the Lower Bearing of Shahid Abbaspour Dam Power Plant Generator

S. Taheripour<sup>1</sup>, M. R. Saffarian<sup>2,\*</sup>, A. Daneh-Dezfuli<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Graduated, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

<sup>2</sup> Assisat Prof., Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

<sup>3</sup> Assisat Prof., Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

### Abstract

Two-phase flow of oil and air in the journal bearing of Shahid Abbaspour dam power plant is simulated. The problem is considered as unsteady and it is investigated at different times from the generator starts up. The geometry is 3D and the flow is laminar. This geometry consists of several separate sections, including a rotary oil reservoir, a journal bearing, and a steel shaft, where all sections are connected by pipes and the flow is passed through them. Regarding the repetition of the computational domain, a quarter of the geometry is modeled. Due to the complexity of geometry, the geometric model is divided into smaller volumes and is gridded with the structured mesh. The velocity field, pressure distribution and volume fraction are obtained by solving the equations of continuity, and momentum. Two-phase flow is modeled by VOF model. Results are evaluated with the data obtained from the pressure gage of bearing. Results indicate that the oil movement is consistent with the actual physical condition. In order to improve the cooling system of bearing, it is necessary to identify the high-pressure locations of bearing for branching, which it is achieved by calculating and analyzing the distribution of pressure in the bearing.

**Keywords:** Journal Bearing; Simulation; Two-Phase Flow; Computational Fluid Dynamics; VOF Model.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۶۱-۳۳۳۳۰۰۱۱-۱۹

آدرس پست الکترونیک: [mr.saffarian@scu.ac.ir](mailto:mr.saffarian@scu.ac.ir)

## ۱- مقدمه

یاتاقان‌های پایینی<sup>۱</sup> یکی از مهمترین اجزاء مکانیکی ژنراتورهای بزرگ آبی هستند که معمولاً به صورت عمودی نصب می‌شوند. این یاتاقان‌ها ضمن تحمل نیروی وزن مجموعه دوار ژنراتور، شرایط پایداری و حذف حرکات ناخواسته را نیز فراهم می‌آورند [۱]. به دنبال گسترش صنعت در چند دهه اخیر، تقاضا در زمینه ساخت و به کارگیری سیستم‌های دوار، رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است؛ در نتیجه استفاده از انواع یاتاقان‌ها به عنوان جزء جدایی‌ناپذیر این سیستم‌ها، توسعه روزافزونی پیدا کرده است. در پژوهش حاضر، جریان دوفاز روغن و هوا در یاتاقان پایینی ژنراتور نیروگاه دوم سد شهید عباسپور مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سد شهید عباسپور دارای ارتفاع ۲۰۳ متر است و در ۵۵ کیلومتری شمال شرقی شهر مسجد سلیمان در استان خوزستان واقع گردیده است. در نیروگاه‌های بزرگ برق‌آبی، عموماً ژنراتورها به صورت عمودی هستند. این قبیل ژنراتورها در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی، معمولاً اندازه بزرگتری دارند و با سرعت پایین‌تری می‌چرخند [۲]. یاتاقان‌های ژورنال برای انواع بارگذاری‌های مختلف، سرعت‌های مختلف و به طور کلی شرایط کارکرد مختلف ساخته شده‌اند و بنا به کاربردهای مختلف، دارای طراحی‌های متفاوتی می‌باشند [۳]. نحوه عملکرد این نوع یاتاقان‌ها به این گونه است که با چرخش شافت، روغن وارد فضای نازک بین یاتاقان و شافت می‌شود و عملیات روان کاری صورت می‌گیرد. این فضای نازک فیلم روغن نامیده می‌شود [۴]. برای هدایت بهتر جریان ممکن است، چندین لوله، کار هدایت جریان را به بخش‌های مختلف یاتاقان به عهده داشته باشند. کار سیال روان کار، ایجاد یک محیط مناسب برای جلوگیری از تماس فلز به فلز هنگام کارکرد یاتاقان است. مهمترین نقش یاتاقان، این است که از حرکات شعاعی شافت جلوگیری نماید. در اطراف یاتاقان مورد بررسی در این پژوهش، مخزن روغن جهت ورود و خروج روغن به یاتاقان قرار دارد. مخزن مورد نظر به وسیله فلنج به شافت متصل است و همواره با همان سرعت دورانی شافت می‌چرخد [۵]. با توجه به اینکه روغن کاری در یاتاقان

بر اساس خاصیت هیدرودینامیکی روغن است، دوران مجموعه باید فیلم مناسبی از روغن را مابین سطوح پخش نماید [۶]. در سیستم‌هایی با سرعت دورانی بالا، افزایش دما و تحمل آن توسط مجموعه قطعات یاتاقان، یکی از عوامل محدودکننده است. تحلیل مناسب حرکت روغن و هوا در طراحی یک سیستم مناسب جهت روان‌سازی و ایجاد یک لایه فیلم نازک میان یاتاقان و شافت، بسیار مهم است. روغن کاری هیدرودینامیکی، جداسازی سطوح زیر بار یاتاقان با لایه‌ای از روان‌ساز است تا جلوی تماس فلز با فلز را بگیرد که در حالت پایدار از قوانین مکانیک سیالات پیروی می‌کند [۶، ۷].

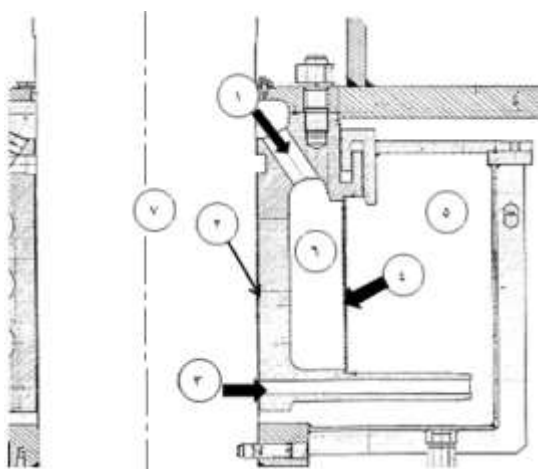
در راستای تحلیل جریان دوفاز درون یاتاقان‌های ژورنال صنعتی با ابعاد بزرگ، اقدامات محدودی انجام شده است. سهرابی و سیرتی در سال ۲۰۰۳ [۱]، به بررسی مجموعه یاتاقان پایینی ژنراتورهای بزرگ آبی با قدرت بالای ۱۰۰ مگاوات پرداختند. آن‌ها مجموعه نگهدارنده پایینی ژنراتور را مورد مطالعه قرار دادند. این مجموعه ضمن تحمل نیروی وزن مجموعه دوار ژنراتور، باید شرایط پایداری و حذف حرکات ناخواسته را نیز ایجاد نماید. در پژوهش آن‌ها، نیروی محوری که شامل وزن مجموعه دوار و نیز مؤلفه عمودی نیروهای هیدرولیکی بخش توربین است، مورد بررسی قرار گرفته است. منشیان و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۸]، پارامترهای ترموهیدرودینامیکی جریان متلاطم یاتاقان ژورنال را مطالعه کردند. در کار آن‌ها، آنالیز ترموهیدرودینامیکی جریان متلاطم در یاتاقان ژورنال با طول نامحدود براساس روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است. آنالیز بر پایه حل عددی معادلات دوبعدی ناویر استوکس همراه با معادلات مربوط به انرژی جنبشی و نرخ اتلاف انرژی در جریان متلاطم و معادله انرژی در جریان روغن و انتقال حرارت هدایتی در یاتاقان انجام شده است. اسلیزگو<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۹]، به مطالعه تحلیل روغن در شکاف یک یاتاقان ژورنال با شیار جانبی پرداختند. آن‌ها جهت تحلیل جریان روغن در شکاف یاتاقان ژورنال از حل همزمان معادلات ناویراستوکس و انرژی استفاده نمودند. در پژوهش آن‌ها جریان، سه‌بعدی و آدیاباتیکی در نظر گرفته شده است. آن‌ها با حل عددی

<sup>2</sup> Slizgowe<sup>1</sup> Lower Bearings

## ۲- روش حل

## ۲-۱- مدل سازی فیزیکی مسئله

در این پژوهش، ناحیه محاسباتی به چندین حجم تبدیل شده تا توانایی تحلیل آن به شکل دقیق وجود داشته باشد. جهت ایجاد ناحیه محاسباتی، از نقشه‌های اصلی یاتاقان استفاده شده است. مطابق با داده‌ها و اندازه‌های موجود در نقشه‌ها، مدل سه بعدی ناحیه محاسباتی تهیه می‌شود. در شکل ۱، نقشه یاتاقان از یک نما نشان داده شده است و جدول ۱، ابعاد و مشخصات یاتاقان را ارائه می‌دهد.



شکل ۱- نقشه یاتاقان از نمای روبرو:

- ۱- لوله نشستی، ۲- فیلم نازک روغن، ۳- لوله ورود روغن،
- ۴- صفحه نازک، ۵- مخزن روغن، ۶- بخش داغ یاتاقان،
- ۷- شافت [۵]

هندس‌ه واقعی از چندین بخش جامد تشکیل شده است. برای تحلیل عددی لازم است تا فضای درون آن یا همان دامنه محاسباتی، بیرون کشیده شود. بخش‌های اصلی هندسه، یاتاقان، مخزن روغن و شافت می‌باشند. با توجه به اتصال لوله‌های مختلف به یاتاقان، هندسه تقارن محوری ندارد؛ بنابراین شبیه سازی عددی دوبعدی و تقارن محوری آن امکان پذیر نمی‌باشد. هندسه یاتاقان در هر ۹۰ درجه زاویه تکراری است؛ بنابراین در این پژوهش، فقط یک چهارم از هندسه مدل سازی می‌شود. مدل هندسه جامد در شکل ۲ و دامنه محاسباتی سیال در شکل ۳ نشان داده شده است.

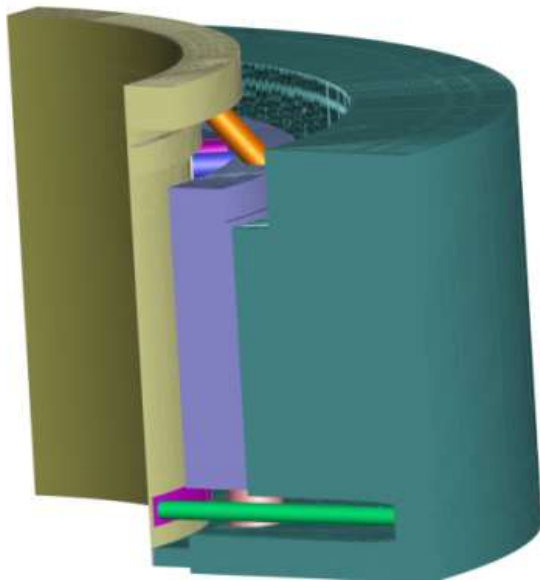
جریان، اثر اندازه شیار را روی روغن کاری و بار هیدرودینامیکی یاتاقان ژورنال به دست آورده اثرات جریان را روی فیلم روغن بررسی کردند. علی احمد و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۰]، به مطالعه عددی روی اثرات شیار فیلم روغن روی پروفیل‌های فشار و دما در روغن کاری یاتاقان ژورنال پرداختند. آن‌ها اثر مکان تزریق روغن را روی فشار و دمای یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی، به صورت تجربی بررسی کردند.

در یاتاقان‌هایی با ابعاد بزرگ، بیشتر تحقیقات انجام شده روی سیستم‌های باز تمرکز دارند که دارای ورودی و خروجی روغن می‌باشند و سیستم‌های بسته‌ای که روغن آن درون مجموعه یاتاقان در گردش باشد، کمتر مورد توجه قرار گرفته شده است [۱]. یاتاقان مورد بررسی در این پژوهش، از سیستم بسته چرخش روغن استفاده می‌کند و با توجه به دمای بالای آن، لازم است تا سیستم خنک کاری آن اصلاح شود. به این منظور پیشنهاد شده است تا از یک نقطه مناسب یاتاقان، انشعابی گرفته شود و روغن از این انشعاب به منظور خنک کاری بیشتر وارد یک مبدل حرارتی شود. در این پژوهش با بررسی توزیع فشار در محدوده یاتاقان و مخزن روغن، پرفشارترین نقطه به این منظور معرفی می‌شود.

مدل هندسی مورد استفاده در این پژوهش، در نرم افزار سالیدورکس<sup>۱</sup> ایجاد شده، ناحیه محاسباتی با استفاده از نرم افزار گمبیت شبکه زده شده و حل عددی توسط نرم افزار فلونت انجام می‌گیرد. توزیع کسر حجمی و نحوه بالا آمدن روغن از شیارهای یاتاقان جهت روغن کاری هیدرودینامیکی اطراف ژورنال، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودارها و کانتور توزیع فشار ارائه شده و پرفشارترین نقطه یاتاقان تعیین می‌شود و به منظور صحت سنجی نتایج، از اطلاعات بدست آمده از نیروگاه کمک گرفته می‌شود.

وجه تمایز کار حاضر با سایر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، هندسه پیچیده یاتاقان، شبیه سازی جریان در یک یاتاقان صنعتی به منظور یافتن نقاط پرفشار جهت انشعاب گیری و بهبود سیستم خنک کاری و حل دوفازی جریان در این یاتاقان است.

<sup>۱</sup> Solid Works

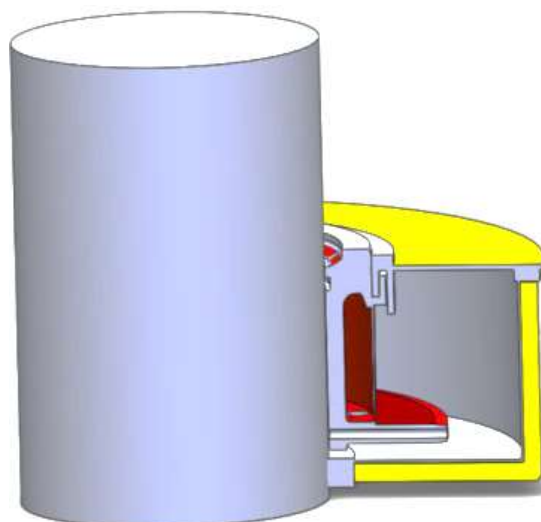


شکل ۳- دامنه محاسباتی سیال

لوله افقی سبز رنگ نشان داده شده در شکل ۳، رابط اصلی بین مخزن و شافت است و نقش ورود روغن را روی بدنه شافت برعهده دارد. با حرکت دورانی مخزن، روغن از این لوله وارد یک شیار L شکل می‌شود. وجود این شیارها به این خاطر است که روغن با سرعت بیشتری و در زمان کمتری در حرکت باشد و فیلم روغن زودتر ایجاد شود تا صدمه‌ای به یاتاقان و شافت وارد نشود. شکل ۴ نمایی از فیلم روغن ایجاد شده روی شافت و لوله‌های متصل به آن را نشان می‌دهد. شیارهای L شکل و I شکل نشان داده شده در شکل ۴، با کمی چرخش نسبت به هم قرار گرفته‌اند. سه لوله دیگر، خروجی‌های روغن داغ محسوب می‌شوند که دوتای آن با تقارن روی بدنه و با زاویه ۱۰ درجه نسبت به لوله ورودی، نصب شده‌اند. این دو لوله انتهای دو شیار L و I شکل می‌باشند. اطراف یاتاقان را مخزن روغن احاطه کرده است. مخزن توسط فلنج به شافت وصل شده و با سرعت دورانی آن می‌چرخد. در ابتدا روغن ساکن است و تا ارتفاع مشخصی از مخزن قرار دارد. با شروع چرخش سیستم، روغن به‌عنوان فاز همراه با هوا به گردش درآمده و وارد ناحیه فیلم روغن می‌شود. خواص روغن در این تحقیق، ثابت در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- ابعاد و مشخصات یاتاقان [۵]

مشخصه	بعد (mm)
شعاع شافت	۵۰۶
طول موثر شافت	۸۲۴/۹
قطر لوله ورودی روغن	۳۵
قطر لوله نشتی روغن	۵۷
قطر لوله‌های خروجی روغن	۴۵
ضخامت صفحه تفکیک‌دهنده روغن داغ و سرد	۱۰
ارتفاع مخزن روغن	۷۲۵/۰۷
قطر لوله ورودی از بخش داغ یاتاقان به مخزن روغن	۹۰
ضخامت فیلم روغن	۰/۲۵
ارتفاع پره نصب‌شده روی مخزن روغن	۷۳۳/۷۹
ارتفاع حالت اولیه و ساکن سطح روغن	۲۵۰
ضخامت شیارهای L و I شکل	۲/۵
طول شیار L شکل نصب شده روی بدنه یاتاقان	۶۵۹/۸
طول شیار I شکل نصب شده روی بدنه یاتاقان	۵۷۹/۸



شکل ۲- مدل ایجادشده از هندسه جامد

بنابراین معادلات (۳-۴) برای خواص کلی مخلوط دوفاز روغن و هوا تعریف می‌شوند:

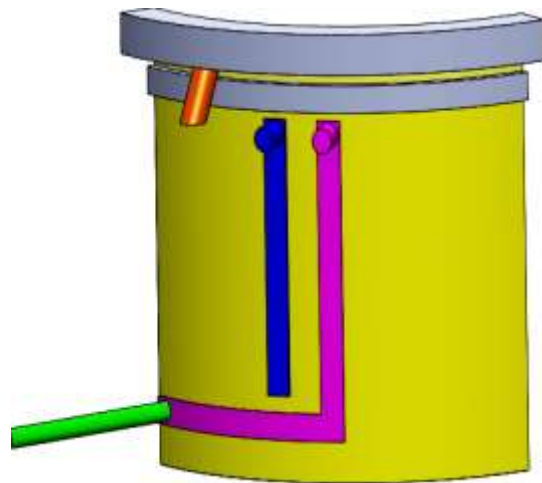
$$\mu = \alpha_a \mu_a + \alpha_o \mu_o \quad (۳)$$

$$\mu = \alpha_a \mu_a + \alpha_o \mu_o \quad (۴)$$

در روابط ۱ تا ۴،  $\alpha$  کسر حجمی،  $\rho$  چگالی و  $\mu$  لزجت مخلوط می‌باشند و زیرنویس‌های  $a$  و  $o$  به ترتیب بیانگر سیال هوا و روغن هستند. یکی از مسایل مهم در شبیه‌سازی جریان‌های چندفاز، مشخص کردن سطح مشترک بین آن‌ها است. جهت محاسبه سطح مشترک، روش‌های گوناگونی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به دو گروه کلی تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های سطحی، سطح مشترک با نقاط نشان‌دار خاصی نمایش داده می‌شوند و برای تقریب‌زدن نقاط بین آن‌ها از روش میان‌یابی استفاده می‌شود. روش دیگر روش حجمی است. این روش امکانی را ایجاد می‌کند که بتوان با آن سطح آزاد را پیش‌بینی و یا این‌که سطح مشترک بین دو سیال را مدل‌سازی کرد. این روش مشکلاتی را که در این‌گونه مسائل وجود دارد مانند، ناپیوستگی و یا اثرات کشش سطحی، تحت پوشش قرار می‌دهد. از جمله مهم‌ترین مدل‌های این روش، می‌توان مدل حجم سیال<sup>۱</sup> را نام برد [۱۸]. مدل حجم سیال یکی از مدل‌های مرسوم به منظور حل عددی جریان‌های چند فاز است [۱۹ و ۲۰]. در پژوهش حاضر جهت حل عددی جریان دوفاز، از روش حجم سیال استفاده شده است. مدل حجم سیال، یک مدل اوپلری - اوپلری برای حل عددی مسائل چندفازی است. در این مدل، فصل مشترک بین دو فاز با محاسبه حجم هر کدام از سیال‌ها در یک سلول محاسباتی بدست می‌آید [۱۸]. بدین منظور، یک معادله پیوستگی برای کسر حجمی هر فاز، حل می‌شود. این معادله برای فاز  $q$  در رابطه ۵ ارائه شده است [۲۱]:

$$\frac{1}{\rho_q} \left( \frac{\partial \alpha_q \rho_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right) = S_{\alpha q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (۵)$$

<sup>۱</sup> Volume of Fluid



شکل ۴- مدل هندسی فیلم روغن تشکیل شده (رنگ زد) و لوله‌های متصل به آن

## ۲-۲- معادلات حاکم

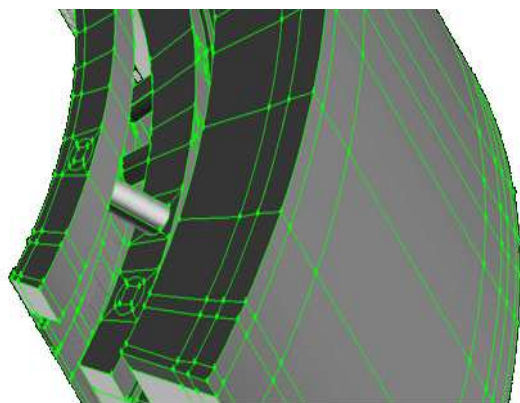
به حرکت همزمان دوفاز مخلوط‌نشده‌ای که توسط یک فصل مشترک از هم جدا شده‌اند، جریان دوفازی گفته می‌شود. حل عددی جریان‌های چندفاز با استفاده از دو دیدگاه اوپلری- اوپلری و اوپلری- لاگرانژی ممکن است [۱۱]. نمونه‌هایی از چنین جریان‌هایی در سیستم‌های صنعتی و یا در پدیده‌های طبیعی از جمله، مخلوط‌های دو فاز مایع-گاز، مایع-جامد و یا گاز-جامد قابل مشاهده است [۱۶-۱۲]. در جریان‌های دو فاز مایع-گاز ارائه مدل ریاضی برای محاسبه افت فشار و کسر حجمی هر یک از فازها تحت الگوهای مختلف جریان حائز اهمیت است. الگوهای جریان که خود نحوه شکل‌گیری فازها در کنار یکدیگر را نشان می‌دهند، در میزان انتقال حرارت و افت فشار نقش تعیین‌کننده‌ای دارند [۱۷]. جریان‌های دوفاز گاز-مایع تحت گرانش، دسته خاصی از جریان‌های چندفاز هستند که همه فعالیت‌های صورت‌گرفته در آن‌ها تحت تأثیر نیروی جاذبه قرار دارد [۱۷]. کسر حجمی پارامتر مهمی در حل عددی جریان‌های دو فاز است. مقدار این پارامتر در ناحیه محاسباتی، بین صفر و یک متغیر است. در این پژوهش، توزیع کسر حجمی در فازها به شکل روابط (۱-۲) است:

$$\text{oil} \quad \alpha = 1 \quad (۱)$$

$$\text{air} \quad \alpha = 0 \quad (۲)$$

## ۲-۳- تولید شبکه

ایجاد یک شبکه مناسب موجب همگرایی مسئله و حل دقیق معادلات حاکم بر مسئله می‌شود. شبکه زدن تمامی هندسه به خاطر پیچیدگی و وجود لوله‌ها و انحناهای زیاد در مسیر جریان و وجود فیلم روغن بسیار نازک ۰/۲۵ میلی‌متری کار زمان‌بری است. در برخی نواحی که گرادیان‌های شدید جریان وجود دارد، باید شبکه‌ی ریزتری انتخاب شود. برای تولید شبکه از نرم‌افزار گمبیت استفاده می‌شود. با توجه به پیچیدگی مجموعه، برای ایجاد شبکه محاسباتی ابتدا دامنه محاسباتی مطابق شکل ۵ به چندین دامنه تبدیل شده و هر دامنه با کیفیت بالا شبکه زده می‌شود. در همه حالت‌ها از شبکه با سازمان استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، همه این نواحی محاسباتی حجم‌های شش وجهی هستند؛ همچنین مطابق شکل ۶ روی نواحی محاسباتی که در مجاورت با فیلم روغن قرار دارند، شبکه به تدریج ریز شده است. شبکه ایجادشده روی دو لوله خروجی واقع در دو انتهای شیارها در شکل ۷ نشان داده شده است. تمامی لوله‌ها به ۵ حجم شش وجهی تبدیل شده و با روش با سازمان مرسوم به روش او<sup>۲</sup> شبکه زده شده‌اند [۱۷]. بقیه نواحی نیز به نواحی شش وجهی تبدیل شده و به‌صورت با سازمان شبکه زده می‌شوند. شبکه تولید شده روی کل هندسه، در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۵- تفکیک ناحیه محاسباتی به حجم‌های کوچکتر

در رابطه ۵،  $\dot{m}_{pq}$  انتقال جرم از فاز q به فاز p،  $\vec{v}$  بردار سرعت و  $s_{\alpha q}$  تولید جرم فاز q است. معادله کسر حجمی برای فاز ثانویه حل نمی‌شود و با توجه به رابطه ۶ محاسبه می‌شود که یک محدودیت را تعریف می‌کند.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (6)$$

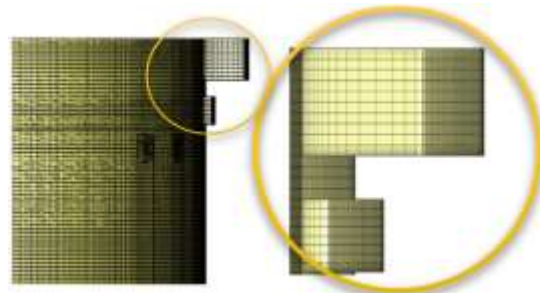
یک دستگاه معادلات منفرد برای تمامی محاسبات حل می‌شود و سپس میدان سرعت بین فازها تقسیم می‌شود. معادله اندازه حرکت در رابطه ۷ ارائه شده است که به کسر حجمی تمام فازها و چگالی و لزجت سیال‌ها وابسته است.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)) + \rho \vec{g} \quad (7)$$

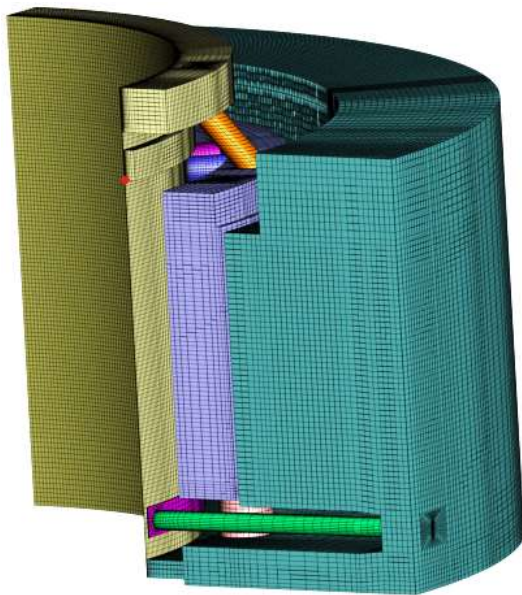
در رابطه ۷،  $\vec{g}$  بردار شتاب گرانش زمین و p فشار است. جریان‌های دو فاز غالباً گذرا حل می‌شوند [۲۱]. در این‌جا جریان، به‌صورت بسته و چرخشی است و بصورت گذرا از لحظه شروع به کار یاتاقان حل می‌شود. مخزن یاتاقان تا ارتفاع مشخصی از روغن پر شده و سپس یاتاقان با دور ثابت به چرخش در می‌آید. با توجه به ضخامت بسیار نازک ناحیه فیلم روغن که مهمترین ناحیه در یاتاقان است، جریان در این ناحیه آرام است. بسیاری از محققان جریان درون یاتاقان‌ها را بر صورت آرام حل نموده‌اند و از اثرات آشفتگی صرف‌نظر نموده‌اند [۹، ۲۶-۲۲] لذا در این پژوهش جریان بصورت آرام در نظر گرفته می‌شود؛ همچنین جریان به‌صورت سه‌بعدی در نظر گرفته شده و خروج از مرکز یاتاقان برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. گسسته‌سازی به‌صورت مرتبه دو بالادست و با استفاده از کولپینگ سرعت - فشار سیمپل<sup>۱</sup> انجام می‌گیرد. معیار همگرایی در هر پله زمانی رسیدن باقیمانده‌ها به عدد  $10^{-4}$  تعیین شده است و معیار همگرایی کلی عدم تغییر در سطح روغن در نظر گرفته شده است که در هر پله زمانی بازبینی می‌شود.

<sup>1</sup> O Method<sup>2</sup> Simple

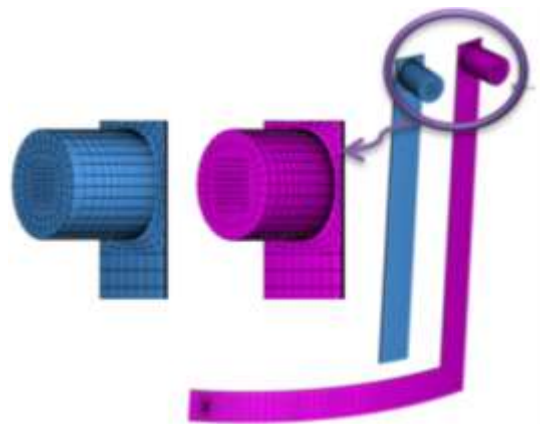
ثانیه به ازای سه پله زمانی ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ ثانیه در شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به این شکل، تغییرات فشار به ازای تغییر پله زمانی چندان قابل توجه نمی‌باشد؛ بنابراین با توجه به اینکه استفاده از پله زمانی ۰/۰۵ ثانیه بسیار زمان بر است، در این پژوهش از پله زمانی ۰/۰۱ ثانیه استفاده شده است.



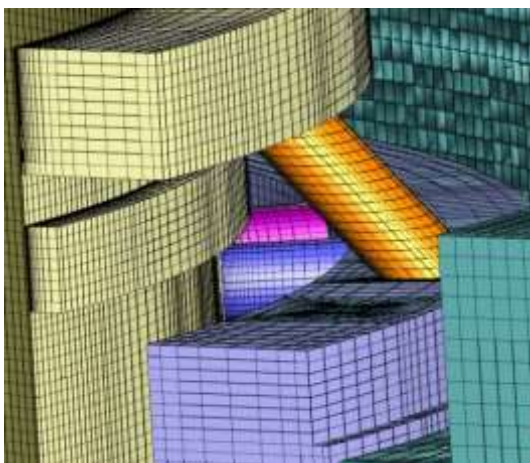
شکل ۶- ریز شدن تدریجی شبکه در ناحیه فیلم روغن



(الف)



شکل ۷- شبکه تولید شده بر دو شیار L و I شکل و دو لوله خروجی روغن

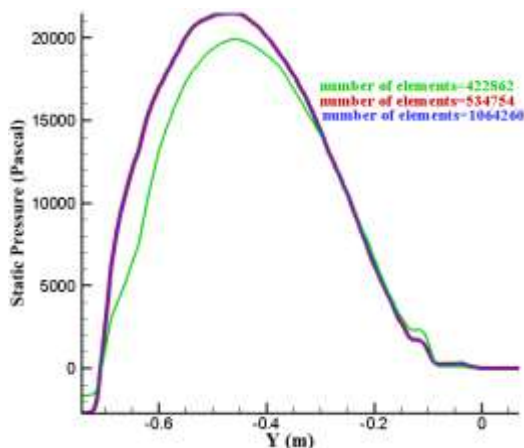


(ب)

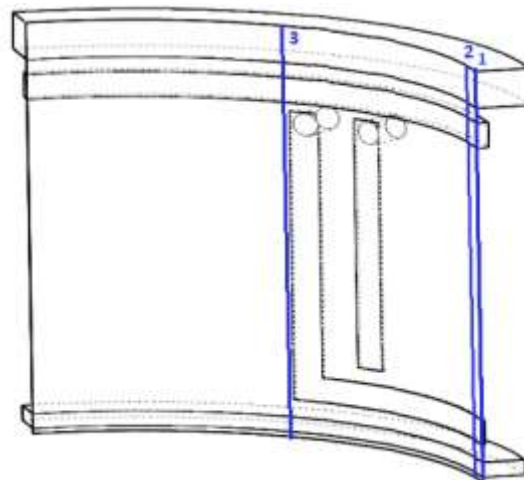
شکل ۸ - الف) شبکه تولید شده بر روی کل هندسه و ب) ناحیه متمرکز شده بخشی از هندسه

به منظور بررسی بهتر نتایج، تعدادی راستا در شکل ۹ نشان داده شده است. جهت انتخاب یک شبکه مناسب، تغییرات نتایج با ریزتر کردن شبکه بررسی شده است. سه شبکه با تعداد ۴۲۲۸۶۲، ۵۳۴۷۵۴ و ۱۰۶۴۲۶۰ سلول تولید شده است و فشار، در راستای شماره ۱ بخش داغ یاتاقان در زمان ۲۴۰ ثانیه به عنوان یک معیار برای انتخاب شبکه در نظر گرفته شده است. نتایج حاصله در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکل، مناسب ترین شبکه، شبکه‌ای با تعداد ۵۳۴۷۵۴ سلول است. در این شکل Y فاصله از نقطه مرجع می‌باشد که به سمت پایین اندازه‌گیری می‌شود. نقطه مرجع در ارتفاع ۰/۷۵۴ متری از کف مخزن یاتاقان قرار دارد که در شکل ۸-الف با دایره قرمز مشخص شده است.

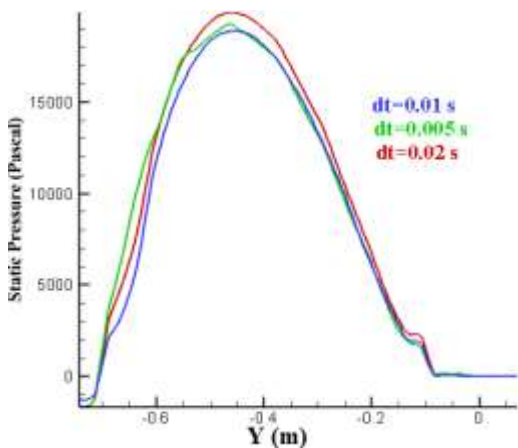
به منظور تعیین پله زمانی مناسب جهت حل عددی، تغییرات فشار در راستای خط شماره ۱ در زمان نهایی ۲۴۰



شکل ۱۰- تغییرات فشار استاتیکی برای سه شبکه مختلف در راستای خط شماره ۱



شکل ۹- راستاهای مختلف در شعاع  $r = 609.875 \text{ mm}$



شکل ۱۱- تغییرات فشار استاتیکی برای سه پله زمانی مختلف در راستای خط شماره ۱

#### ۲-۴- شرایط اولیه و مرزی

شرایط اولیه برای جریان، فشار اتمسفر و مولفه‌های سرعت صفر در سه جهت است. در این حالت سیستم کاملا ساکن است و مخزن تا ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر از روغن پر شده است. با شروع چرخش مجموعه و رسیدن سرعت آن به سرعت نامی، روغن از نواحی محاسباتی عبور می‌کند. شرایط مرزی، به ۴ نوع تقسیم‌بندی می‌شوند. شرط مرزی روی دیواره‌های کناری به دلیل تکرار هندسه در هر ۹۰ درجه، شرط مرزی پریودیک در نظر گرفته می‌شود. تمامی مؤلفه‌های جریان و انرژی روی سطوحی مشترک می‌باشند که دو به دو با هم پریودیک شده‌اند. دیواره‌های بالا، پایین و جانبی مخزن با سرعت چرخشی  $\Omega$  حول مرکز یاتاقان در چرخش هستند؛ لذا شرط مرزی برای این بخش سرعت چرخشی با اندازه  $166/7 \text{ rpm}$  لحاظ شده است. دیواره‌ای از فیلم روغن که در مجاورت شافت قرار گرفته است، نیز دارای همین شرط مرزی سرعت چرخشی است. بقیه دیواره‌های هندسه، ساکن هستند.

#### ۳- نتایج

شکل ۱۲ مکان یک راستای دیگر را جهت درک بهتر مسئله و تحلیل هندسه نشان می‌دهد. راستای شماره ۴ در مجاورت لوله نشستی است. نمودار تغییرات کسر حجمی روغن روی ناحیه داغ یاتاقان در زمان‌های مختلف در این راستا، در شکل ۱۳ رسم شده است.

با توجه به شکل ۱۳، در زمان‌های ابتدایی از چرخش سیستم، بخش پایینی به مقدار زیادی شامل روغن است و در بخش بالایی هیچ نشانی از روغن وجود ندارد. با گذشت زمان سطح روغن در بخش پایینی کاهش یافته و کسر حجمی روغن در بخش بالایی افزایش می‌یابد. کانتورهای تشکیل فازها در زمان‌های مختلف، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که از کانتور تشکیل فازها در ۲۰۰ ثانیه اول قابل مشاهده است، جریان پیش از ورود روغن به بدنه شافت تک فاز و فقط شامل هوا است؛ ولی بلافاصله پس از جریان یافتن و شروع چرخش مخزن و ژورنال، روغن به سرعت وارد بخش زیرین یاتاقان شده و فیلم روغن را پر می‌کند. در ابتدا

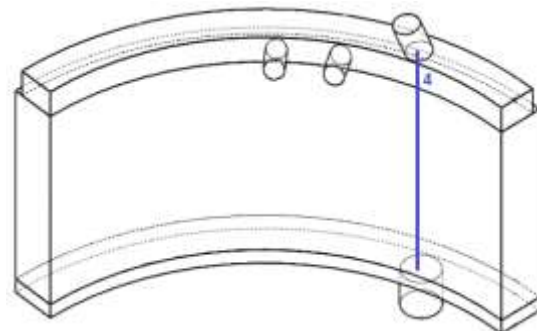


بالای ناحیه جمع‌آوری روغن وجود دارد که ناحیه نشستی نامیده می‌شود. این ناحیه وظیفه برگشت روغن‌های پُرش کرده و بخار شده را به عهده دارد [۵]. شکل ۱۴-ج نشان می‌دهد که در زمان ۲۰۰ ثانیه به غیر از ناحیه کوچکی در بالای فیلم روغن، کسر حجمی روغن در همه نواحی فیلم روغن برابر با ۱ است و این امر نشان دهنده این است که روغن کاری به خوبی در این ناحیه انجام شده است. درست پس از بالا آمدن روغن و رسیدن آن به لوله‌ها برگشتی، کسر حجمی روغن کاهش می‌یابد و شبیه‌سازی عددی وجود مقداری هوا را در این ناحیه پیش‌بینی می‌کند.

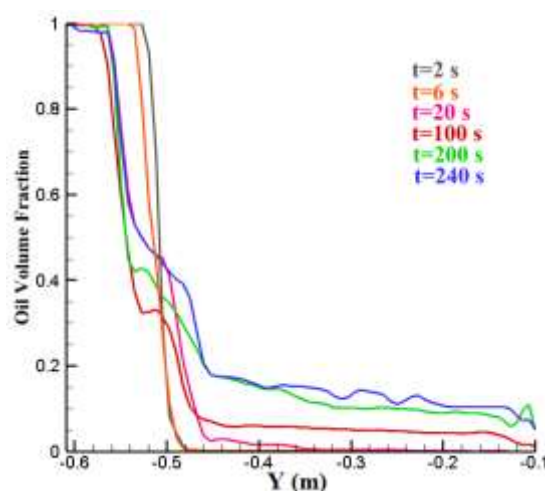
کانتورهای کسر حجمی روغن نشان داده شده در شکل ۱۴، بیانگر حرکت صحیح روغن به درون ناحیه فیلم روغن پس از چرخش یاتاقان می‌باشند. با چرخش یاتاقان روغن از ناحیه فیلم روغن بالا رفته و سطح آن در مخزن کاهش می‌یابد. علاوه بر آن به علت چرخش مخزن، روغن بر اثر نیروی گریز از مرکز در سمت راست شکل بالا رفته و به دیواره می‌چسبد. این دیواره، دیواره چرخان مخزن است که با توجه به اینکه خنک‌کاری یاتاقان در این ناحیه صورت می‌گیرد، وجود روغن روی آن به علت ضریب انتقال حرارت بیشتر ضروری است؛ بنابراین شبیه‌سازی عددی در این حالت نیز، رفتار فیزیکی صحیحی را مطابق با طراحی یاتاقان نشان می‌دهد.

به منظور یافتن پرفشارترین نقطه یاتاقان، کانتورهای فشار استاتیکی در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است. شکل ۱۵ کانتورهای فشار را در کل مجموعه و شکل ۱۶ کانتورهای فشار را روی فیلم روغن و اجزای مجاور آن، از نمای پشت فیلم روغن نشان می‌دهد. مطابق شکل‌های ۱۵ و ۱۶ پرفشارترین نقطه در فیلم روغن درست بعد از شیال L شکل و در راستای شماره ۳ نشان داده شده در شکل ۹ قرار دارد. با توجه به اینکه روغن در حال چرخش وارد شیال L شکل می‌شود که ضخامتی بیشتر از ناحیه فیلم روغن دارد، روغن در این ناحیه به دام می‌افتد و در انتهای شیال به دیواره شیال برخورد می‌کند در نتیجه فشار در این ناحیه افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، این روغن پرفشار با روغن ورودی ترکیب شده و سپس وارد فضای نازک بین شفت چرخان و دیواره ثابت یاتاقان می‌شود؛ بنابراین درست پس از ناحیه L شکل، بیشترین فشار به وقوع می‌پیوندد.

روغن از طریق لوله ورودی وارد شیال L شکل و سپس وارد شیال I شکل می‌شود. وجود این شیالها بسیار مهم می‌باشند. این شیالها روغن را با حرکت چرخشی به بالای سیستم هدایت می‌کنند و اگر شیالها نباشند، احتمال ساییده شدن بایت یاتاقان و شافت فولادی بسیار زیاد است.

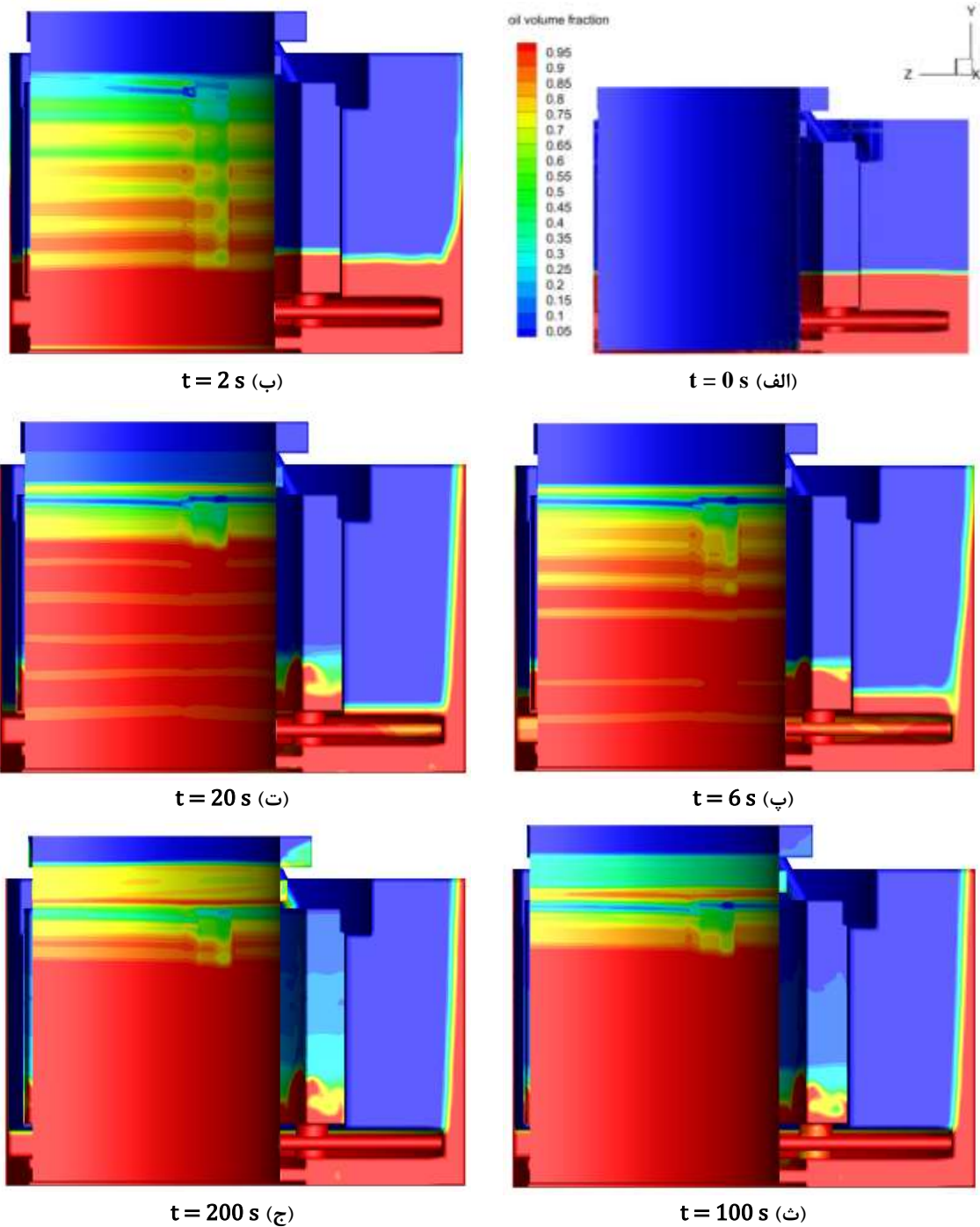


شکل ۱۲- راستای شماره ۴ در شعاع  $r = 720 \text{ mm}$

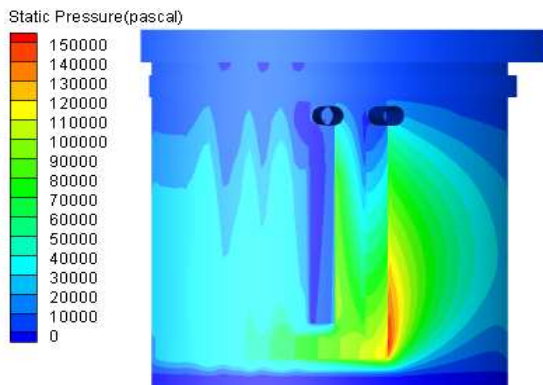


شکل ۱۳- نمودار تغییرات کسر حجمی روغن در راستای شماره ۴ در زمان‌های مختلف

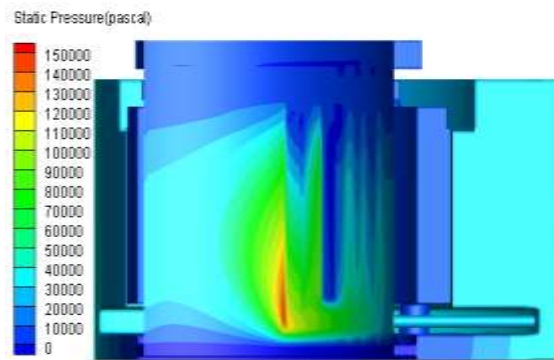
مطابق شکل ۱۴ ارتفاع مخزن روغن با گذشت زمان کم شده و روغن به آهستگی از طریق لوله افقی زیر یاتاقان وارد ناحیه فیلم روغن می‌شود. روغن از این ناحیه به تدریج بالا رفته و وارد ناحیه جمع‌آوری روغن می‌شود. با توجه به اینکه ضخامت این ناحیه بیشتر از ناحیه فیلم روغن است، این ناحیه کاملاً از روغن پر نمی‌شود و در این ناحیه مخلوط روغن و هوا وجود دارد. ناحیه دیگری با ضخامت بیشتر در



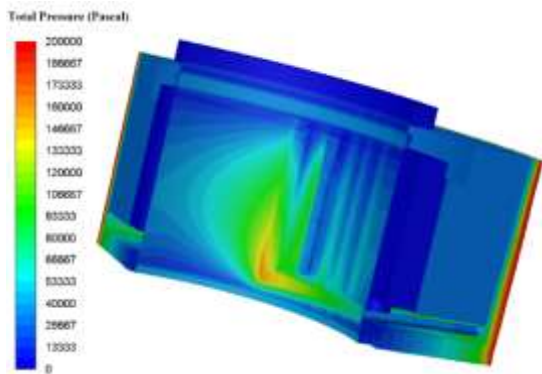
شکل ۱۴- کانتورهای کسر حجمی یاتاقان در زمان‌های مختلف



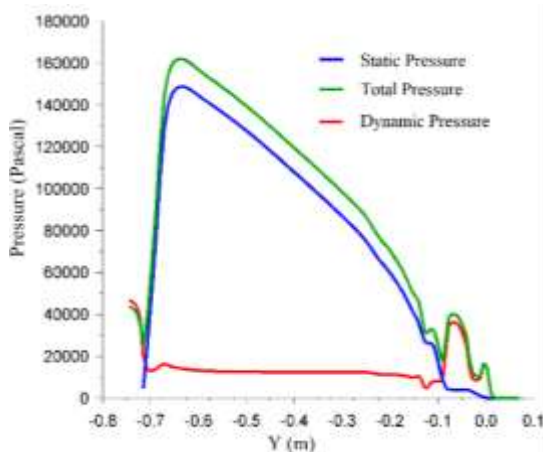
شکل ۱۶- کانتور فشار استاتیکی از نمای پشت فیلم روغن



شکل ۱۵- کانتور فشار استاتیکی در کل مجموعه یاتاقان



شکل ۱۷- کانتورهای فشار کل در یاتاقان

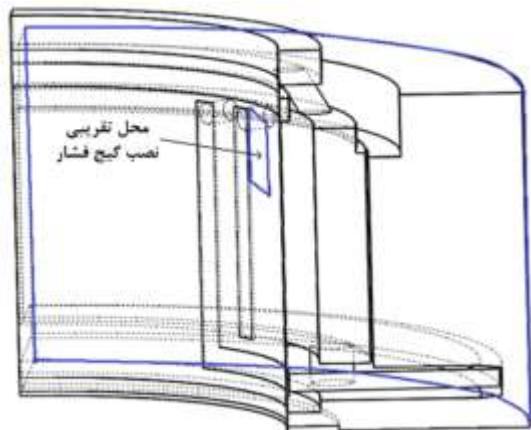


شکل ۱۸- نمودار تغییرات فشار استاتیکی، فشار دینامیکی و فشار کل در راستای شماره ۳ در زمانهای مختلف

شکل ۱۷ فشار کل که مجموع فشارهای استاتیکی و دینامیکی است را در کل هندسه یاتاقان نشان می‌دهد. مطابق این شکل، بیشترین فشار کل مربوط به دیواره بیرونی مخزن است. این دیواره با سرعت دورانی شافت می‌چرخد و شعاع زیادی دارد؛ بنابراین سرعت جریان در اطراف آن بالا است و همین امر سبب افزایش فشار دینامیکی و در نتیجه فشار کل در این ناحیه شده است. با توجه به چرخش مخزن امکان انشعاب‌گیری از آن وجود ندارد؛ در نتیجه مناسب‌ترین نقطه به منظور انشعاب‌گیری همان محدوده پشت فیلم روغن است. مقایسه شکل‌های ۱۵ و ۱۷ نشان می‌دهد که محدوده‌های حداکثر فشار استاتیک و حداکثر فشار کل تقریباً بر هم منطبق می‌باشند و حداکثر فشار کل نیز، در محدوده بعد از شیار L شکل در راستای شماره ۳ است. با توجه به اینکه عمده فشار در این ناحیه فشار استاتیک است، دلیل افزایش فشار، بیشینه بودن فشار استاتیک در این ناحیه است. شکل ۱۸ تغییرات فشار استاتیکی، فشار دینامیکی و فشار کل را در این راستا نشان می‌دهد. تغییرات فشار دینامیکی در محدوده میانی این راستا تقریباً ثابت است و در بالا و پایین راستا به علت ورود و خروج روغن مقادیر بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد. مطابق این شکل حداکثر فشار استاتیکی برابر  $Y = -0.639$  m پاسکال است که در موقعیت  $Y = -0.634$  m اتفاق می‌افتد؛ همچنین حداکثر فشار کل برابر  $161964$  پاسکال است که در موقعیت  $Y = -0.634$  m اتفاق می‌افتد؛ بنابراین این نقطه، مناسب‌ترین محل جهت انشعاب‌گیری از روغن به منظور خنک کاری است.

#### ۴- اعتبارسنجی

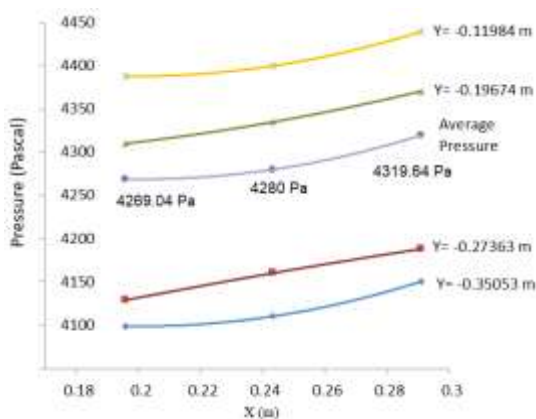
برای بررسی صحت نتایج حاصل از حل عددی، از فشارسنج واقع بر یاتاقان نیروگاه استفاده می‌شود. فشارسنج تقریباً در مرکز محدوده مستطیل شکل نشان داده شده در شکل ۱۹ قرار دارد. برای مقایسه نتایج حاصل از حل عددی، فشار متوسط در ناحیه مستطیل شکل نشان داده شده در شکل ۱۹، در محدوده فشارسنج محاسبه می‌شود. شکل ۲۰ تغییرات فشار را در ناحیه مذکور با تقسیم بندی این ناحیه به طول‌ها و ارتفاع‌های یکسان نشان می‌دهد؛ همچنین منحنی فشار متوسط در طول‌های انتخابی رسم شده است که میانگین فشار در آن برابر با ۴۲۹۰ پاسکال است. در این شکل، X فاصله طولی قوس ناحیه فیلم روغن است که از لبه سمت راست ناحیه محاسباتی اندازه‌گیری می‌شود. فشار اندازه‌گیری شده یاتاقان در حین عملکرد نیروگاه برابر با ۴۲۰۰ پاسکال است. خطای حاصله حدود ۲ درصد است که بیانگر دقت نتایج حاصل از حل عددی است.



شکل ۱۹- محل تقریبی نصب فشارسنج در یاتاقان

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جریان سه‌بعدی، گذرا و دوفاز روغن و هوا در یک مجموعه دوار یاتاقان ژنراتور نیروگاه آبی که شامل چندین بخش کلی است، شبیه‌سازی شده است. مدل جامد مجموعه، شامل شافت، یاتاقان پایینی و مخزن روغن است که این سه حجم با چند لوله با هم در ارتباط هستند. فضای محاسباتی شامل، بخش‌های میانی قسمت‌های جامد است که سیال از میان آن‌ها عبور می‌کند. این دامنه محاسباتی با روش باسازمان شبکه‌بندی شده است. معادلات حاکم حل شده و توزیع کسر حجمی و فشار درون یاتاقان محاسبه می‌شود؛ همچنین کانتورهای کسر حجمی در زمان‌های مختلف ارائه شده است. این کانتورها حرکت روغن از مخزن به لوله زیرین یاتاقان و ورود آن به ناحیه فیلم روغن و برگشت آن به مخزن را با روند فیزیکی صحیحی نشان می‌دهند. کاهش ارتفاع روغن و چسبیدن آن به دیواره در حال چرخش یاتاقان نیز، بیانگر روند صحیح فیزیکی حل مسئله است. در ادامه کار، کانتورهای فشار در کل هندسه رسم شده‌اند. این کانتورها بر افزایش فشار روغن در راستای شماره ۳ دلالت دارند. نمودار تغییرات فشار در این ناحیه، تعیین کننده نقطه پرفشار در یاتاقان است. یاتاقان مورد



شکل ۲۰- تغییرات فشار در محدوده ناحیه نصب فشار سنج

#### ۶- علائم و نشانه‌ها

شتاب گرانش زمین، $m/s^2$	g
دبی جرمی، kg/s	$\dot{m}$
فشار، Pa	p
شعاع، m	r

- assisted machining and ultrasound reflectometry. PhD Thesis, University of Sheffield.
- [8] Maneshan B, Gandjalikhan Nasab SA (2009) Thermohydrodynamic characteristics of journal bearing under turbulent condition. *Ije Transactions A* 22(2): 181-194.
- [9] Slizgowe L, Oleju P (2009) The flow oil analysis in the gap of a journal bearing with a circumferential groove. *Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance* 44(2):19-33.
- [10] Ali Ahmad M, Kasolang S, Dwyer-Joyce RS (2014) Experimental study on the effects of oil groove location on temperature and pressure profile in journal bearing lubrication. *Tribol Int* 74:79-86.
- [11] Patel RG, Desjardins O, Kong B, Capecelatro J, Fox RO (2017) Verification of Eulerian-Eulerian and Eulerian-Lagrangian simulations for turbulent fluid-particle flows. *AIChE J* 63(12): 5396-5412.
- [12] Monte Verde W, Biazussi JL, Sassim NA, Bannwart AC (2017) Experimental study of gas-liquid two-phase flow patterns within centrifugal pumps impellers. *Exp Therm Fluid Sci* 85:37-51.
- [13] Bhatti MM, Zeeshan A, Ellahi R, Ijaz N (2017) Heat and mass transfer of two-phase flow with Electric double layer effects induced due to peristaltic propulsion in the presence of transverse magnetic field. *J Mol Liq* 230:237-246.
- [14] Ismail I, Gamio JC, Bukhari SFA, Yang WQ (2005) Tomography for multi-phase flow measurement in the oil industry. *Flow Meas Instrum* 16(2):145-155.
- [15] Thorn R, Johansen GA, Hjertaker BT (2013) Three-phase flow measurement in the petroleum industry. *Meas Sci Technol* 24(1): 012003.
- [16] Singh H, Cai J (2018) A feature-based stochastic permeability of shale: Part 1-validation and two-phase permeability in a utica shale sample. *Transport Porous Med*.
- [۱۷] سعادت‌ئی‌ا، زین‌العابدینی م (۱۳۹۴) اصول شبیه‌سازی مقدماتی و پیشرفته دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم افزارهای Fluent و CFX. شرکت مهندسی پرداز پترو دانش، تهران.
- [18] Hirt CW, Nichols BD (1981) Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J Comput Phys* 39(1) 201-225.
- [۱۹] پورمویذع، رحمتی ر، غلامی م (۱۳۹۷) یک مدل جدید برای جریان دو فازی درون یک آب شیرین کن خورشیدی اصلاح شده با یک لایه متخلخل. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۱۸۲-۱۷۱ (۱): ۸.
- [۲۰] غلامیان‌ا، زارع و، موسوی س م (۱۳۹۵) بررسی عددی تأثیر اندازه نانوذرات مختلف بر روی عملکرد حرارتی نانوسیال در
- تولید جرم فاز q، kg/s  $S_{\alpha q}$
- زمان، s t
- سرعت، m/s v
- فاصله افقی قوس فیلم روغن، m X
- فاصله عمودی از نقطه مبدأ، m Y
- کسر حجمی  $\alpha$
- لزجت، Pa.s  $\mu$
- چگالی، kg/m<sup>3</sup>  $\rho$
- سرعت دورانی، rpm  $\Omega$
- زیرنویس‌ها
- هوا a
- روغن o
- فاز p p
- فاز q q

## ۷- مراجع

- [۱] سهرابی م، سیرتی م، (۱۳۸۲) بررسی مجموعه یاتاقان پایینی ژنراتورهای بزرگ آبی (بالای ۱۰۰ مگاوات). کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور، تهران، ایران.
- [۲] سهرابی م (۱۳۸۲) بررسی سیستم‌های خنک‌کننده در ژنراتورهای برق آبی. کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور، تهران، ایران.
- [3] Harnoy A (2003) Bearing design in machinery, engineering tribology and lubrication, Marcel Dekker.
- [4] Christensen H (1960) The oil film in a closing gap. PhD Thesis, University of Leeds.
- [5] Shahkabar R (1993) Documentations and maps of bearings of shahid abbaspour power plant generator. *J Braz Soc Mech Sci* 41(6).
- [۶] ابراهیمی ناغانی ر (۱۳۸۸) تحلیل روانکاری یاتاقان ژورنال با شرط لغزش دیواره‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرکرد.
- [7] Suzuki HA (2016) Bearing surface optimisation on hydrodynamic lubrication film with vibration-

- Journal Bearings. Proc Instn Mech Eng J Tribol 219: 459-467.
- [۲۵] زارع مهرجردی م، دشتی رحمت آبادی ا، رشیدی مبینی ر (۱۳۹۰) تاثیر پارامترهای طراحی و شرایط مونتاژ بر عملکرد یاتاقای های ژورنال غیر مدور با روانکار میکروپلار. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۱۳-۲۵: ۱(۲).
- [۲۶] اکبرزاده پ (۱۳۹۴) شبیه‌سازی ترموهیدرودینامیکی سه‌بعدی تاثیر روغن‌های صنعتی بر عملکرد یاتاقان‌های ژورنال کفشک لولایی با طول محدود. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۲۵۷-۲۶۹: ۴(۵).
- میکروکانال گرماگیر. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۲۸۴-۲۷۵: ۴(۶).
- [21] ANSYS Fluent Theory Guide (2013) ANSYS Inc., USA.
- [22] Tucker PG, Keogh PS (1995) A generalized CFD approach for journal bearing performance prediction. Proc Instn Mech Eng J Tribol 209: 99-109.
- [23] Tucker PG, Keogh PS (1996) On the dynamic thermal state in a hydrodynamic bearing with a whirling journal using CFD techniques. J Tribol-T ASME 118:356-363.
- [24] Gandjalikhan Nassab SA (2005) Inertia Effect on the Thermohydrodynamic Characteristics of