

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی

بهینه‌سازی پارامترهای طراحی یاتاقان‌های ژورنال

دانشجو:

سیده زهرا میکائیلی

استاد راهنما:

دکتر پوریا اکبرزاده

استاد مشاور:

دکتر مرتضی رحیمیان

بهمن ۱۳۹۴

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام بخش آلام زمینی‌ام

است

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بگو شدم قطره‌ای از دریای بی‌کران

مهربانیان را پاس نتوانم بگویم .

امروز، مستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ به‌شتم رضای شما

را آوردی کران سنگ تراز این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل

تلاش منم کوزه غبار خشکی‌تان را بروداید .

بوسه بر دستان پر مهرتان

استادان گرامی جناب آقای دکتر پوریا اکبرزاده و
جناب آقای دکتر مرتضی رحیمیان:

دلسوزی، تلاش و کوشش حضرتعالی در تعلیم و تربیت و انتقال معلومات
و تجربیات ارزشمند در کنار برقراری رابطه صمیمی و دوستانه برای کسب علم و
دانش حقیقتاً قابل ستایش است. اینجانب بر خود وظیفه میدانم در کسوت
ساکردی از زحمات و خدمات ارزشمند شما استاد گرامی تقدیر و تشکر نمایم.

تعمیرنامه

اینجانب سیده زهرا میکائیلی دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه با عنوان **بهینه‌سازی پارامترهای طراحی یاتاقان‌های ژورنال**، تحت راهنمایی **دکتر پوریا اکبرزاده** و مشاوره **دکتر مرتضی رحیمیان** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ‌جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج بانام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "**Shahrood University of Technology**" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به‌دست‌آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در تمام مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در تمام مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

❖ تمام حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته‌شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

بهینه‌سازی یاتاقان‌های ژورنال به دلیل کاربرد فراوان و مستمر آن‌ها در صنایع مختلف نظیر نیروگاه‌ها، توربوماشین‌ها، ماشین‌های الکتریکی، کشتی‌سازی و غیره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. در این پایان‌نامه از الگوریتم ازدحام ذرات برای طراحی بهینه و کارآمد یاتاقان‌های کفشک ثابت و یاتاقان‌های کفشک لولایی استفاده شده است. روش بهینه‌سازی بر اساس کمترین ضخامت فیلم، تلفات حرارتی و بیشترین دما می‌باشد. نتایج برای روغن با دماهای ورودی مختلف ارائه شده است. همچنین برای یاتاقان ژورنال کفشک ثابت بهینه‌سازی برای زاویه‌های مختلف کفشک نیز صورت گرفته است. در این پایان‌نامه یک برنامه عددی سه بعدی ترموهیدرودینامیکی، جهت شبیه‌سازی شرایط دائمی یاتاقان‌های ژورنال کفشک لولایی بدون محدودیت در ابعاد به ویژه طول آن‌ها تهیه شده است. در این برنامه، معادلات رینولدز جریان روغن در شکاف بین محور و کفشک‌های یاتاقان به کمک روش عددی تفاضلات محدود حل می‌شود. در این شبیه‌سازی به منظور نزدیک بودن جواب‌ها به شرایط واقعی، تغییرات لزجت روغن با دما نیز در نظر گرفته می‌شود.

کلمات کلیدی: یاتاقان ژورنال، یاتاقان کفشک ثابت، یاتاقان کفشک لولایی، بهینه‌سازی، الگوریتم

ازدحام ذرات، روش MOPSO.

فهرست مطالب

۱	مقدمه	۱
۲	۱-۱- یاتاقان‌های ژورنال	۲
۴	۲-۱- الگوریتم بهینه‌سازی	۴
۵	۳-۱- تاریخچه	۵
۹	الگوریتم بهینه‌سازی	۹
۹	۱-۲- مقدمه	۹
۱۰	۲-۲- تعریف بهینه‌سازی	۱۰
۱۰	۳-۲- بهینه‌سازی و طبقه‌بندی آن	۱۰
۱۰	۱-۳-۲- بهینه‌سازی حدس و خطا، بهینه‌سازی با تابع	۱۰
۱۱	۲-۳-۲- بهینه‌سازی یک‌بعدی و چندبعدی	۱۱
۱۱	۳-۳-۲- بهینه‌سازی دینامیک و استاتیک	۱۱
۱۱	۴-۳-۲- بهینه‌سازی گسسته و پیوسته	۱۱
۱۲	۵-۳-۲- بهینه‌سازی مقید و غیرمقید	۱۲
۱۴	۶-۳-۲- بهینه‌سازی تک معیاره و چند معیاره	۱۴
۱۵	۴-۲- ساختار شبکه‌ای	۱۵
۱۵	۵-۲- بهینه‌سازی گروه ذرات	۱۵
۱۵	۱-۵-۲- تاریخچه بهینه‌سازی گروه ذرات	۱۵
۱۸	۲-۵-۲- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات	۱۸
۲۲	۳-۵-۲- وزن اینرسی	۲۲
۲۳	۴-۵-۲- مهار کردن سرعت	۲۳
۲۳	۵-۵-۲- مراحل الگوریتم PSO	۲۳
۲۴	۶-۵-۲- بهینه‌سازی چند معیاره	۲۴
۳۰	۶-۲- مزایای الگوریتم بهینه‌سازی ذرات	۳۰
۳۰	۷-۲- مقایسه‌ی PSO با الگوریتم‌های تکاملی	۳۰
۳۳	یاتاقانهای ژورنال	۳۳
۳۳	۱-۳- مقدمه	۳۳
۳۳	۲-۳- یاتاقانه‌ای ژورنال کفشک ثابت	۳۳
۳۴	۱-۲-۳- معادلات حاکم	۳۴

۴۰	..... معادله وگلیپول	۲-۲-۳
۴۱	..... پارامترهای عملکردی یاتاقان	۳-۲-۳
۴۳	..... یاتاقان کفشک لولایی	۳-۳
۴۳	..... معادلات حاکم	۱-۳-۳
۴۴	..... گسسته سازی	۴-۳
۴۵	..... روش حل	۵-۳
۴۷	..... نتایج	۴
۴۷	..... مقدمه	۱-۴
۴۷	..... صحت سنجی نتایج	۲-۴
۵۰	..... نتایج یاتاقان ژورنال	۳-۴
۵۱	..... بهینه‌سازی با یک تابع هدف	۱-۳-۴
۵۱	..... بهینه‌سازی با دو تابع هدف	۲-۳-۴
۵۹	..... بهینه‌سازی با سه تابع هدف	۳-۳-۴
۶۷	..... نتایج یاتاقان کفشک لولایی	۱-۴
۶۷	..... بهینه‌سازی با دو تابع هدف	۱-۱-۴
۷۲	..... بهینه‌سازی با سه تابع هدف	۲-۱-۴
۷۹	..... فصل پنجم	
۷۹	..... نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۵
۸۳	..... منابع	۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۲-۱ به‌روزرسانی سرعت ۲۱
- شکل ۲-۲ به‌روزرسانی موقعیت ذره ۲۱
- شکل ۲-۳ الگوریتم PSO ۲۴
- شکل ۳-۱ شماتیک یاتاقان ژورنال کفشک ثابت ۳۵
- شکل ۳-۲ یاتاقان ژورنال با کفشک ثابت ۳۸
- شکل ۳-۳ یاتاقان کفشک لولایی ۴۴
- شکل ۴-۲ شبیه‌سازی یاتاقان کفشک ثابت. (الف) کمترین ضخامت بی‌بعد فیلم روغن و زاویه گرایش یاتاقان. (ب) ضریب اصطکاک و ضریب دبی روغن ورودی. ۴۹
- شکل ۴-۳ شبیه‌سازی یاتاقان کفشک لولایی. کمترین ضخامت بی‌بعد فیلم روغن بر حسب عدد سامرفیلد. ۵۰
- شکل ۴-۴ منحنی پرتو با دمای ورودی ۳۵ درجه سانتیگراد با توابع هدف اتلاف حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای تکرارها مختلف با روش MOPSO. ۵۳
- شکل ۴-۵ منحنی پرتو با دمای ورودی ۴۰ درجه سانتیگراد با توابع هدف اتلاف حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای تکرارها مختلف با روش MOPSO. ۵۳
- شکل ۴-۶ منحنی پرتو با دمای ورودی ۴۵ درجه سانتیگراد با توابع هدف اتلاف حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای تکرارها مختلف با روش MOPSO. ۵۴
- شکل ۴-۷ منحنی پرتو با توابع هدف بیشترین دما و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دماهای ورودی روغن مختلف با روش MOPSO. ۵۵
- شکل ۴-۸ منحنی پرتو با توابع هدف اتلاف حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دماهای ورودی روغن مختلف با روش MOPSO. ۵۶
- شکل ۴-۹ منحنی پرتو با توابع هدف اتلاف حرارتی و بیشترین دمای روغن به ازای دماهای ورودی روغن مختلف با روش MOPSO. ۵۸
- شکل ۴-۱۰ منحنی پرتو یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۳۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۳۵ درجه سانتیگراد روغن با روش MOPSO. ۶۰
- شکل ۴-۱۱ منحنی پرتو یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۳۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO. ۶۱
- شکل ۴-۱۲ منحنی پرتو یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۶۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای

روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۴۵ درجه سانتیگراد روغن با روش MOPSO ۶۲

شکل ۴-۱۳ منحنی پرتو یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۶۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO ۶۳

شکل ۴-۱۴ منحنی پرتو یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۹۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۳۰ درجه سانتیگراد روغن با روش MOPSO ۶۵

شکل ۴-۱۵ منحنی پرتو یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۹۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO ۶۶

شکل ۴-۱۶ منحنی پرتو یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و توابع هدف اتلاف حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO ۶۸

شکل ۴-۱۷ منحنی پرتو یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و توابع هدف بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO ۷۰

شکل ۴-۱۸ منحنی پرتو یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و توابع هدف اتلاف حرارتی و بیشترین دمای روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO ۷۱

شکل ۴-۱۹ منحنی پرتو یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۳۰ درجه سانتیگراد با روش MOPSO ۷۲

شکل ۴-۲۰ منحنی پرتو یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشکو توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۳۵ درجه سانتیگراد با روش MOPSO ۷۳

شکل ۴-۲۱ منحنی پرتو یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۴۰ درجه سانتیگراد با روش MOPSO ۷۴

شکل ۴-۲۲ منحنی پرتو یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۴۵ درجه سانتیگراد با روش MOPSO ۷۵

شکل ۴-۲۳ منحنی پرتو یاتاقان کفشک ثابت با ۵ کفشک و توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO ۷۶

فهرست جدول ها

- جدول ۴-۱ مشخصات هندسی یاتاقان ژورنال جهت اعتبار سنجی. ۴۸
- جدول ۴-۲ بهینه‌سازی یاتاقان کفشک ثابت با یک تابع هدف. ۵۱
- جدول ۴-۳ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک ثابت با توابع هدف کمترین ضخامت فیلم روغن و بیشترین دما با روش MOPSO. ۵۵
- جدول ۴-۴ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک ثابت با توابع هدف کمترین ضخامت فیلم روغن و تلفات حرارتی با روش MOPSO. ۵۷
- جدول ۴-۵ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک ثابت با توابع هدف بیشترین دما و تلفات حرارتی با روش MOPSO. ۵۸
- جدول ۴-۶ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۳۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن با روش MOPSO. ۶۱
- جدول ۴-۷ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۶۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن با روش MOPSO. ۶۴
- جدول ۴-۸ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۹۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن با روش MOPSO. ۶۶
- جدول ۴-۹ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک لولایی با توابع هدف تلفات حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن با روش MOPSO. ۶۹
- جدول ۴-۱۰ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک لولایی با توابع هدف بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن با روش MOPSO. ۷۰
- جدول ۴-۱۱ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک لولایی با توابع هدف اتلاف حرارتی و بیشترین دمای روغن با روش MOPSO. ۷۱
- جدول ۴-۱۲ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک لولایی با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن با روش MOPSO. ۷۷

فهرست علائم

لقی کفشک و محور یاتاقان، m	c
پارامتر ثابت	C_1
پارامتر ثابت	C_2
لقی دایره استقرار مفصل و محور یاتاقان، m	c'
ظرفیت حرارتی روغن، J/kg. °C	C_p
خروج از مرکزیت محور، m	e
تابع هدف	$f(x)$
ضریب اصطکاک یاتاقان	f
ضخامت فیلم روغن، m	h
ضخامت بی بعد فیلم روغن، $(\bar{h} = h/c)$	\bar{h}
کمترین ضخامت فیلم روغن، m	h_0
کمترین ضخامت بی بعد فیلم روغن	\bar{h}_{min}
توان تلفات اصطکاکی، w	H_f
ممان دوم سطح کفشک، m^4	I
طول یاتاقان، m	L
ضریب پیش بارگذاری، $(m = 1 - c'/c)$	m
کمیت و گلیپول، $(M = \bar{p}\bar{h}^{1.5})$	M
گشتاور موضعی حول نقطه مفصل، N.m	M'
سرعت دورانی محور یاتاقان، rpm	N
تعداد ذرات	n
تعداد کفشک یاتاقان	N_p
فشار روغن، Pa	p
فشار بی بعد، $\bar{p} = pc^2/(6U\mu R)$	\bar{p}
توان تلفاتی اصطکاکی یاتاقان، kW	P_f
دبی روغن ورودی به یاتاقان، lit/s	Q_I
نشستی روغن در راستای محور یاتاقان، lit/s	Q_S
شعاع یاتاقان، m	R
عدد سامرفیلد، $S = (R/c)^2(\mu N/P)$	S

دمای روغن، °C	T
گشتاور اصطکاکی، N.m	\tilde{T}
دمای کفشک، °C	T_{Pad}
بیشترین دمای فیلم روغن، °C	T_{max}
مولفه سرعت سیال در راستای چرخشی، m/s	u
سرعت خطی محور یاتاقان، m/s	U
مولفه سرعت سیال در راستای عمود، m/s	v
مولفه سرعت ذرات	$v_{i,j}$
مولفه سرعت سیال در راستای محوری، m/s	w
نیروی محوری، N	w_x
نیروی عمودی، N	w_y
نیروی کل، N	w_t
نیروی وارد بر یاتاقان، N	W
ضریب وزنی	\tilde{w}
مختصات در راستای محیطی، m	x
بردار موقعیت ذرات	$x_{i,j}$
مختصات زاویه‌ای، $(\bar{x} = x/R)$	\bar{x}
موقعیت زاویه‌ای مفصل کفشک، m	\bar{x}_P
مختصات در راستای محوری، m	y
بهترین خاطره شخصی ذرات	$y_{i,j}$
بهترین خاطره گروهی ذرات	$\hat{y}_{i,j}$
مختصات بی‌بعد محوری، $\bar{y} = y/c$	\bar{y}
مختصات در راستای ضخامت فیلم، m	z
علائم یونانی	
زاویه چرخش کفشک	δ
نسبت خروج از مرکزیت، $(\varepsilon = e/c)$	ε
زاویه کمائی کفشک	θ_P
زاویه گرایش یاتاقان	ϕ
زاویه بارگذاری	φ
پارامتر ثابت	φ_1

پارامتر ثابت	φ_2
لزجت روغن، Pa.s	μ
لزجت بی بعد روغن، $(\bar{\mu} = \mu/\mu_0)$	$\bar{\mu}$
لزجت مرجع، Pa.s	μ_0
چگالی روغن، kg/m^3	ρ
نسبت لقی، $(\psi = c/R)$	ψ
محل لولای کفشک	γ
	زیرنویس‌ها
شماره شبکه محاسباتی	i, j

فصل اول

مقدمه

با رشد و توسعه جوامع صنعتی و ظهور فن‌آوری‌های نوین و پیشرفته، نیاز به ماشین‌های دوار نظیر توربین‌ها، پمپ‌ها، کمپرسورها و غیره با سرعت و ظرفیت بارپذیری زیاد بیش‌ازپیش احساس می‌شود. در طراحی و ساختار این ماشین‌آلات، استفاده از یاتاقان‌های ژورنال^۱ به‌عنوان تکیه‌گاه اصلی آن‌ها، به دلیل هزینه کم، عمر طولانی، سروصدای کم، ظرفیت بارپذیری بالا، سهولت تعمیر و نگهداری و غیره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. روش‌های بهینه‌سازی ریاضی و هوشمند می‌توانند برای بهینه‌سازی طراحی و عملکرد یاتاقان مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به پیچیدگی‌های این مسئله به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و باید الگوریتمی مورد استفاده قرار گیرد که با مسئله سازگار باشد. چنانچه رابطه توابع هدف در اختیار نباشد روش‌های ریاضی نمی‌توانند جهت بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرند. در این شرایط روش‌های بهینه‌سازی هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک^۲ و الگوریتم ازدحام ذرات^۳ از عملکرد بهتری برخوردارند.

^۱ Journal bearing

^۲ Genetic algorithm

^۳ Particle swarm

۱-۱- یاتاقان‌های ژورنال

یاتاقان‌ها اجزایی هستند که حرکت نسبی بین دو یا چند قطعه را برای دستیابی به حداقل اصطکاک ممکن تأمین می‌کنند. یاتاقان‌های ژورنال بنا به نوع کاربردشان به سه دسته یاتاقان‌های هیدروستاتیک^۱، هیدرودینامیک^۲ و هیدروستاتیک-هیدرودینامیک تقسیم می‌شوند که در این پایان‌نامه، موضوع مورد بررسی، یاتاقان‌های هیدرودینامیک می‌باشد. تجهیزات دوار مانند کمپرسورها، توربین‌ها، پمپ‌ها، الکتروموتورها و غیره معمولاً با استفاده از یاتاقان‌های هیدرودینامیکی به گردش درمی‌آیند.

یاتاقان‌های ژورنال از مهم‌ترین اجزای تجهیزات دوار می‌باشند که نقش راهنما و تحمل‌کننده بارهای مکانیکی را در اعضاء متحرک با حرکت دوار یا خطی دارند. فیلم روغن ایجادشده در این یاتاقان‌ها، تماس فیزیکی بین شفت و یاتاقان را به تماس هیدرودینامیکی تبدیل می‌نماید. در روان‌کاری هیدرودینامیکی، سطح یاتاقان کاملاً توسط یک فیلم سیال از یکدیگر جدا می‌شوند. چنین یاتاقان‌هایی علاوه بر داشتن اصطکاکی پایین و نیز افت قدرت پایین، از امتیاز بسیار خوب ساده بودن، برخوردارند. لذا قابل‌اعتماد و ارزان بوده و نگهداری از آن‌ها راحت است. از لحاظ شکل هندسی، این نوع یاتاقان‌ها می‌تواند به شکل ساده با کفشک ثابت^۳ تا شکل‌های پیچیده شامل کفشک لولایی^۴ باشند [۱]. استفاده از یاتاقان‌های ژورنال کفشک لولایی به‌عنوان یکی از فناوری‌های صنعتی جهت رفع مشکلات ناپایداری و رفع مشکلات ساخت و مونتاژ مانند ناهمراستایی شفت و یاتاقان‌ها، خصوصاً در توربوماشین‌ها کاربردهای فراوان یافته است. یاتاقان‌های ژورنال کفشک لولایی با یک مقدار بارگذاری اولیه^۵ طراحی می‌شوند. یاتاقان‌های ساده در هنگام کارکرد به ویژه با نیروهای کم، دچار ناپایداری می‌گردند. این ناپایداری در نتیجه‌ی تحریک فرکانس-

¹ Hydrostatic

² Hydrodynamic

³ Fixed-pad journal bearing

⁴ Tiltin-pad journal bearing

⁵ Preload

های طبیعی سیستم به وسیله‌ی ارتعاشات حاصل از چرخش روغن ایجاد می‌گردد. از سوی دیگر یاتاقان-های کفشک ثابت در اثر عواملی نظیر عدم هم‌محوری، نامیزانی، سایش و نیروهای ضربه‌ای آسیب‌های جدی می‌بینند [۲].

خصوصیات طراحی یاتاقان‌های ژورنال کفشک لولایی به‌گونه‌ای است که کلیه مشکلات مربوط به ناپایداری فیلم روغن را از بین می‌برد. درعین حال، طراحی مکانیکی این یاتاقان‌ها تحمل ضربه و نیروهای ناشی از نامیرایی را به آن بخشیده و کارکرد مداوم آن را حتی به همراه مشکلاتی نظیر عدم هم‌محوری و سایش، امکان‌پذیر ساخته است. یک یاتاقان کفشک لولایی از چندین کفشک مجزا تشکیل شده است که هر یک حول محوری در مرکز کفشک دوران می‌کنند. هنگامی که یاتاقان تحت بار قرار می‌گیرد، موقعیت مرکز شافت نسبت به مرکز یاتاقان جابجا می‌شود. مزیت اصلی این طرح، دوران مستقل هر کفشک و تشکیل پروفیل فشار به‌صورت مجزا است. اغلب این یاتاقان‌ها دارای چهار یا پنج کفشک می‌باشند. به همین دلیل امروزه یاتاقان‌های ژورنال کفشک لولایی در مقایسه با یاتاقان‌های ژورنال کفشک ثابت، به دلیل ویژگی خود-تنظیمی کفشک‌ها (متناسب با شرایط کارکرد)، عملکرد و پایداری خوب و مطمئنی در سرعت‌های بالا از خود نشان می‌دهند، اما همین ویژگی، چنانچه به‌خوبی در طراحی‌ها و محاسبات لحاظ نگردد می‌تواند منجر به ارتعاشات کفشک‌ها حول نقطه مفصل^۱ شود و صدمات جبران‌ناپذیری در اثر برخورد آن‌ها با محور ماشین به وجود آورد. از این‌رو در طراحی یاتاقان‌های کفشک لولایی، دقت و ظرافت خاصی در شبیه‌سازی جریان روان‌ساز بین کفشک‌ها و محور یاتاقان باید در نظر گرفته شود. یکی دیگر از مواردی که باید در طراحی‌ها به آن توجه شود نیروی اصطکاک و روان‌سازی یاتاقان‌ها است. نیروی اصطکاک با وجود فواید بسیاری که در برخی موارد داشته است در مواردی هم به‌عنوان مانعی در سر راه انسان بوده و باعث اتلاف مقدار بسیار زیادی از انرژی می‌شود و دمای روان‌سازی را تا حدی افزایش می-

¹ Pivot

دهد که نصب دستگاه‌های دقیق و پرهزینه خنک کاری را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. به همین دلیل این‌گونه یاتاقان‌ها نیازمند مراقبت‌های ویژه از نظر میزان روان‌ساز می‌باشند. این مقدار باید به گونه‌ای تنظیم شود که نه زیاد و نه کم باشد. روان‌کاری نامناسب باعث می‌شود یاتاقان‌ها خیلی سریع فرسوده شوند و باعث ایجاد رسوب و خوردگی در یاتاقان‌ها می‌گردد [۳] به طور مثال روان‌کاری بیش‌ازحد سبب داغ شدن یاتاقان‌ها در نتیجه باعث کوتاه شدن عمر یاتاقان‌ها می‌گردد. از این‌رو مسئله روان‌کاری و ضخامت فیلم روغن مبحث مهمی در یاتاقان‌ها می‌باشد.

۱-۲- الگوریتم بهینه‌سازی

هر مسئله مهندسی ممکن است دارای چندین جواب مختلف باشد که بعضی از آن‌ها قابل قبول و بعضی غیر قابل قبول‌اند. وظیفه طراحان پیدا کردن بهترین جواب ممکن از میان جواب‌های مختلف است که لزوم بحث بهینه‌سازی مطرح می‌شود. اخیراً راهکار بهینه‌سازی‌های چندمنظوره در طراحی مکانیکی به جای مفهوم بهینه‌سازی تک منظوره که مدت‌زمان زیادی مورد استفاده بود، بکار می‌رود. تخمین بهینه‌سازی چندمنظوره به‌طور وسیعی در مسائل طراحی مکانیکی و فرآیندهایی از این قبیل قابل اجرا است. در بعضی موارد، ممکن است عملکرد شرایط با یکدیگر در تضاد باشد، به طوری که بهبود در یکی از آن‌ها موجب بدتر شدن تابع یا توابع دیگر شود. این مسائل نمی‌تواند با انتخاب یک بهینه‌سازی تک‌منظوره بهینه شوند؛ بنابراین بهترین حل بهینه در طراحی فرآیند، بایستی در بین توابع تک و چندمنظوره جستجو شود. معمولاً در روش‌های محلی و سنتی امکان بهینه‌سازی هم‌زمان چندین پارامتر غیرمستقیم، میسر نیست. همچنین بزرگ‌ترین مشکل در رواج بهینه‌سازی چندمنظوره این می‌باشد که روش بهینه‌سازی مناسبی مخصوصاً برای شرایط متضاد وجود ندارد. در دهه‌های اخیر الگوریتم‌های تکاملی که جزء روش‌های بهینه‌سازی هستند به وجود آمدند. این روش‌ها بر پایه حرکت، ژنتیک، توارث و نظریه تکامل بیان بناشده‌اند. در

ابتدا قادر به بهینه‌سازی یک تابع هدف بودند ولی به تدریج به قدرت این روش‌ها نیز افزوده شد. به طوری که امروزه چند تابع هدف را می‌توان به طور همزمان بهینه کرد [۴]. در حال حاضر بهینه‌سازی چندهدفه به یک موضوع بسیار محبوب بین محققین درآمدہ است اما هنوز هم بسیاری از سؤالات بی‌پاسخ در این حوزه وجود دارد. در واقع حتی یک مورد، پذیرش بین‌المللی در رابطه با تعریف مطلوب از هدف بهینه‌سازی وجود ندارد که باعث شود حتی آن قابل مقایسه با روش‌های دیگر شود. اما در نهایت راه‌حل این مشکل، معمولاً با تنظیم پارامترهای مختلف توسط کاربر امکان‌پذیر است. از آنجایی که بهینه‌سازی چند معیار دارد و ممکن است این معیارها با هم فرق داشته باشند معمولاً برای ارائه راه‌حل برای آن‌ها مشکلاتی وجود دارد. معمولاً بهینه‌سازی با تعریف تابع هدف شروع می‌شود که برای مسائل مختلف، متفاوت می‌باشد، توابع هدف به صورت بیشینه یا کمینه کردن یک متغیر خاص تعریف می‌شوند و حتی برای یک مسئله خاص می‌توان چند تابع هدف را منظور کرد.

۱-۳- تاریخچه

در سال ۲۰۰۳ اشکابیلو و همکارش [۵] از الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه شکل یاتاقان با عرض محدود پرداختند، که لزجت ثابت در نظر گرفته شده است و این کار، تحت بار و سرعت‌های مختلف صورت گرفته است. داده‌های ورودی در این مسئله به صورت گسسته می‌باشد. در همان سال حیرانی و همکارش [۶] با متغیرهای تصمیم نسبت طول به قطر، ضریب لقی، لزجت روغن و نسبت خروج از مرکز با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی یاتاقان با عرض محدود و با توابع هدف کمترین ضخامت فیلم روغن و بیشترین اختلاف دما پرداخته است که برای این کار از نیروهای ۱۰ و ۲۰ کیلو نیوتن و بازه سرعت ۴۰ تا ۲۴۰ رادیان بر ثانیه استفاده کرده است و تاثیر سرعت و نیرو را بر روی این توابع بررسی نمودند. ساروهان و همکاران [۷] با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک پرداخته

است. وی همچنین تاثیر سرعت و نیرو را بر روی پارامترهای عملکردی این نوع یاتاقان بررسی نموده است. همچنین حیرانی و سوح [۸] در سال ۲۰۰۵ به بهینه‌سازی پارامترهای طراحی یاتاقان ژورنال با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندگانه با توابع هدف کمترین ضخامت فیلم روغن و تلفات حرارتی پرداخته‌اند و منحنی پرتو^۱ این دو تابع را رسم کرده‌اند که متغیرهای طراحی آن ضریب لقی^۲، نسبت طول به قطر، هندسه شیار و لزجت روغن بوده است. در این مقاله نسبت طول به قطر، ضریب لقی لزجت روغن و هندسه شیار به ترتیب بین ۰/۲ تا ۰/۹، ۳۵ تا ۷۰ میکرون، ۱ تا ۱۶ مگا پاسکال در ثانیه و ۲۰ تا ۹۰ درجه می‌باشد. حیرانی و سوح تاثیر هندسه شیار و فشار حمایت کننده‌ی آن را بر روی توابع هدف مسئله بررسی نموده‌اند. گوپتا و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۷ به بهینه‌سازی یاتاقان غلتشی با ۳ تابع هدف و با استفاده از همان الگوریتم پرداخته است. شریینیت و همکاران [۱۰] نیز پارامترهای طراحی یاتاقان ژورنال، با لزجت ثابت را با استفاده از ترفند بهینه‌سازی حداقل مربعات برای حل بهینه استفاده کردند. برای حل مسائل روان‌کاری یاتاقان که بیشتر شامل معادلات ضخامت فیلم روغن و شرایط مرزی در میدان فشار است، یک تحلیل عددی ارائه شده است. هاشیماتو و ماتسوماتو [۱۱] ویژگی‌ها و پارامترهای هیدرودینامیکی یاتاقان ژورنال، با سرعت بالا را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه کردند و تاثیر بار را بر روی این یاتاقان بررسی نمودند. قربانیان و همکاران [۱۲] نیز علاوه بر الگوریتم ژنتیک از مدل شبکه عصبی نیز برای بهینه‌سازی یاتاقان-های ژورنال با توابع هدف کمترین ضخامت فیلم روغن، تلفات اصطکاکی^۳ و بیشترین درجه حرارت پرداخته است. قربانیان و همکاران تاثیر لزجت را بر روی توابع هدف بررسی نموده است. حیرانی و همکاران [۱۳] در مقاله‌ای از روش نیوتن رافسون برای بدست آوردن خروج از مرکز استفاده کرده است و با بارها، سرعت‌ها و محل‌های متفاوت شیار با استفاده از روش وزنی الگوریتم ژنتیک به بهینه کردن دبی و

¹ Pareto

² Clearance

³ Groove location

³ Power loss

اتلاف حرارتی پرداخته است. روی و همکاران [۱۴] نیز بیشترین دبی و اتلاف حرارتی را بهینه نموده است. گودور و همکارش [۱۵] در تحقیقی دیگر بعضی از ترفندهای بهینه‌سازی را برای طراحی و تعیین پارامتر-های یاتاقان ژورنال ارائه داده است. توداس و همکارش [۱۶] به تفاوت بین طراحی بهینه و طراحی معمولی پرداخته است. سالم [۱۷] در مسئله بهینه‌سازی با توجه به بیشترین ظرفیت بار، یاتاقان‌های ژورنال را فرموله کرده است. همچنین محدودیت‌های عملی و محدودیت کاربردهای طراحی نیز در نظر گرفته شده است. در این مقاله اصول روش بهینه‌سازی بر اساس روش معروف رزن برگ^۱ بنا شده است که نتایج حاصله اثر نسبت سطح، ظرفیت بار، نرخ جریان و نسبت قدرت را بیان می‌کند. بیقتلر و همکارش [۱۸] در نتایج حاصل از یک روش بهینه‌سازی در کمینه کردن کل نیروی اتلافی در یاتاقان‌های ژورنال هیدروستاتیک ارائه کرده‌اند که نتایج بدست آمده مقادیر بهینه‌ی نسبت سطح و نسبت فشار را بیان می‌کند.

در این پایان‌نامه با توجه به پیوسته بودن داده‌ها، روشی کارآمد و قوی بر اساس الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی یاتاقان‌های کفشک ثابت و کفشک لولایی (یاتاقان‌های هیدرودینامیک) ارائه می‌شود که یکی از تکامل یافته‌ترین الگوریتم‌ها بشمار می‌رود. این الگوریتم که همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی بر اساس اصول تکامل طبیعی پایه‌ریزی شده است، اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط ابرهات و کندی ارائه گردید [۱۹]، که در این روش هدف به دست آوردن منحنی پرتو می‌باشد. این منحنی شامل مجموعه‌ای از جواب‌ها است. خصوصیات این جواب‌ها به گونه‌ای می‌باشد که هیچ‌کدام بر یکدیگر غالب^۲ نیستند و از طرفی، حداقل یک جواب در این منحنی وجود دارد که از هر حل دیگری به غیر از حل‌های موجود در منحنی، بهتر است. در این پایان‌نامه سعی شده است مقادیر مهم و اساسی در طراحی یاتاقان‌ها شامل بیشترین دما، کمترین ضخامت لایه روغن و توان اصطکاکی به نحو مطلوبی پیشینه یا کمینه شوند تا

^۱Rozenberg

^۲Domination

یاتاقان‌ها کارایی موردنظر خود را با بهینه شدن یک متغیر از دست ندهند. هر یک از این سه مقدار با یکدیگر در تضادند، بدین معنی که با بهبود در یکی، دیگری به سمت نامطلوب پیش می‌رود. در طراحی یاتاقان‌ها باید مقادیر مناسب شعاع، لقی و نسبت طول به قطر یاتاقان به همراه روغنی با دمای ورودی مناسب را برگزید. انتخاب نادرست هرکدام می‌تواند لایه روغن را نازک کند به نحوی که کافی نبودن جریان روغن موجب گرمای فراوان و خرابی ناگهانی می‌گردد.

فصل دوم

الگوریتم بهینه‌سازی

۲-۱- مقدمه

بهینه‌سازی هنر یافتن بهترین جواب در بین وضعیت‌های موجود است. هر فرآیندی پتانسیل بهینه شدن را دارد و مسائل پیچیده می‌توانند در زمینه‌های علوم مهندسی، اقتصادی و تجاری به صورت مسائل بهینه‌سازی مدل‌سازی شوند. هدف از مدل‌سازی مسائل بهینه‌سازی، حداقل کردن زمان، هزینه و ریسک یا حداکثر کردن سود، کیفیت و اثربخشی است. بعضی از مسائل بهینه‌سازی پیچیده هستند و به‌دست آوردن جواب‌های بهینه در زمان معقول با روش حل دقیق مشکل است [۲۰]. از این‌رو توسعه روش‌های حل در این نوع مسائل که بتوانند در زمان معقول جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه به دست آورند، از نظر اقتصادی به صرفه‌تر است [۲۱]. به دلیل کاربرد وسیع بهینه‌سازی در علوم متفاوت، این مبحث رشد بسیاری کرده است، به‌طوری‌که در ریاضیات، مدیریت، صنایع و بسیاری از شاخه‌های علوم مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. در سالیان اخیر محققان در اکثر مسائل پیچیده‌ی بهینه‌سازی با پیاده‌سازی روش‌های فراابتکاری به نتایج مناسبی دست‌یافته‌اند [۲۲]. در این فصل سعی بر این است که در مورد الگوریتم‌های بهینه‌سازی، خصوصاً الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات توضیحاتی داده شود.

۲-۲- تعریف بهینه‌سازی

بهینه‌سازی بدین مفهوم است که در بین پارامترهای یک تابع به دنبال مقادیری باشیم که تابع را کمینه یا بیشینه می‌نمایند و بهترین جواب در خروجی از یک تابع یا فرآیند، به وسیله تغییر در ورودی‌های یک سیستم می‌باشد. واژه بهترین بیان می‌دارد که بیش از یک جواب و راه‌حل برای مسئله وجود دارد که یافتن بهترین جواب بستگی به مسئله دارد. کلیه مقادیر مناسب جهت این امر را، راه‌حل‌های ممکن^۱ و بهترین مقدار از این مقادیر را راه‌حل بهینه^۲ می‌نامند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی هر دو نوع مسائل بیشینه‌سازی و کمینه‌سازی را پوشش می‌دهند. به این علت که هر مسئله بیشینه‌سازی قادر به تبدیل به مسائل کمینه‌سازی است. بهینه‌سازی کاربردهای زیادی دارد و روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی وجود دارد.

۲-۳- بهینه‌سازی و طبقه‌بندی آن

بهینه‌سازی روندی است برای یافتن و مقایسه کردن راه‌حل‌های ممکن تا زمانی که پاسخ بهتری پیدا نشود. پاسخ خوب یا بد با توجه به هدف یا اهدافی مشخص تعیین می‌شود.

۲-۳-۱- بهینه‌سازی حدس و خطا، بهینه‌سازی با تابع

بهینه‌سازی حدس و خطا مربوط به بهینه کردن فرآیندهایی می‌باشد که تنظیم متغیرهای ورودی موجب تأثیر بر خروجی فرآیند می‌شود بدون اینکه درباره جزئیات انجام فرآیند اطلاعات کافی داشته باشیم و این کار را با تغییر متغیرهای ورودی می‌توان انجام داد.

^۱Feasible solution

^۲Optimization solution

۲-۳-۲- بهینه‌سازی یک‌بعدی و چندبعدی

اگر تنها یک متغیر وجود دارد، بهینه‌سازی یک‌بعدی است و اگر مسئله‌ای دارای چندین متغیر باشد، یک مسئله چندبعدی است و نیاز به انجام بهینه‌سازی چندبعدی است. بدیهی است که هر قدر تعداد متغیرها بیشتر باشد بهینه‌سازی مشکل‌تر و پیچیده‌تر خواهد شد.

۲-۳-۳- بهینه‌سازی دینامیک و استاتیک

بهینه‌سازی دینامیک یا پویا به این معنی است که خروجی تابعی از زمان می‌باشد و به زمان وابسته باشد. حال اگر بهینه‌سازی مسئله‌ای، مستقل از تأثیر زمان باشد به آن بهینه‌سازی استاتیک یا ایستا گویند.

۲-۳-۴- بهینه‌سازی گسسته و پیوسته

بهینه‌سازی همچنین می‌تواند به صورت متغیرهای مجزا (گسسته) یا پیوسته، تفکیک گردد. در مسئله بهینه‌سازی اگر تمامی دامنه‌های متغیرها مجموعه‌هایی پیوسته باشد، آنگاه مسئله را یک مسئله بهینه‌سازی پیوسته^۱ گوئیم؛ اما اگر دامنه‌های متغیرها برابر با مجموعه اعداد صحیح یا مجموعه دودویی $\{0,1\}$ و یا هر مجموعه با تعداد عضو متناهی باشد، آنگاه مسئله را یک مسئله گسسته می‌نامیم.

متغیرهای مجزا تنها شامل یک عدد محدود از مقادیر ممکن می‌باشند در حالی که متغیرهای پیوسته دارای اعداد نامحدودی از مقادیر ممکن هستند. اگر ما قصد داشته باشیم که به مجموعه‌ای از اهداف دست پیدا کنیم، بهینه‌سازی مجزا به کار گرفته خواهد شد. در حالی که اگر ما بخواهیم مقدار کمینه $f(x)$ را بر روی دامنه‌ای از اعداد حقیقی بیابیم با یک مسئله پیوسته روبه‌رو هستیم.

همچنین ممکن است فضای محاسباتی مسئله مورد نظر به صورت ترکیبی باشد، یعنی برخی از متغیر-های تصمیم پیوسته و برخی دیگر گسسته و دودویی باشند. در این حالت، مسئله را یک مسئله بهینه-

^۱ Continuous optimization

سازی مخلوط^۱ می‌نامیم.

۲-۳-۵- بهینه‌سازی مقید و غیرمقید

متغیرها اغلب دارای محدودیت‌ها یا قیدهایی هستند. در بهینه‌سازی غیر مقید متغیرها مجاز هستند تا هر مقداری را دارا باشند اما در بهینه‌سازی مقید^۲ متغیرها مجاز به دارا بودن همه‌ی مقادیر نیستند و این مقادیر نباید هیچ‌گونه منافاتی با قیدها داشته باشند. در بهینه‌سازی مقید، بهینه‌سازی یک تابع در حضور مجموعه‌ای از قیدها یا محدودیت‌ها انجام می‌شود، که می‌توان یک متغیر مقید را به یک متغیر غیر مقید تبدیل کرد. بیشتر روش‌های بهینه‌سازی عددی^۳ بهترین جواب را برای متغیرهای غیر مقید ارائه می‌دهند. و حل بسیاری از مسائل دنیای واقعی در حضور مجموعه‌ای از قیدها و محدودیت‌ها انجام می‌شود.

در سال‌های اخیر، روش‌های متعددی برای حل مسائل مقید با استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری پیشنهاد شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

- روش حذف اعضای غیرعملی.
- روش ترمیم اعضای غیرعملی.
- روش اصلاح عملگرهای وراثتی.
- روش جریمه.

از میان روش‌های بالا روش‌های حذف اعضای غیرعملی و جریمه کردن از جمله روش‌هایی هستند که به نوع مسئله چندان وابسته نبوده و می‌توان از این روش‌ها در بیشتر مسئله‌ها استفاده نمود. این در حالی است که روش حذف به واسطه نقاط ضعفی که دارد، چندان مورد توجه و استقبال واقع نشده است. از سوی دیگر، روش‌های ترمیم اعضای غیرعملی و اصلاح عملگرهای وراثتی وابسته به مسئله‌اند و برای هر

¹ Mixed optimization

² Constrained problems

³ Numerical

مسئله باید از یک فرآیند و الگوریتمی خاص استفاده شود.

۲-۳-۵-۱- روش حذف

در روش حذف، کلیه ذراتی که به جواب‌های غیرعملی منجر می‌شوند، حذف می‌شوند. این روش، نوع خاصی از روش جریمه است که در آن به افرادی که به نقاط غیرعملی اشاره می‌کنند، اجازه مشارکت در تکامل داده نمی‌شود. روش حذف اگرچه روشی به ظاهر منطقی است، اما در عمل با مشکلات فراوانی روبرو است. شرایطی را در نظر بگیرید که در حل یک مسئله، اکثر ذرات به جواب‌هایی از مجموعه جواب‌های غیرعملی اشاره کنند. در این حالت، روش حذف منجر به کاهش تعداد ذرات شرکت‌کننده در حل مسئله می‌شود که این موضوع باعث می‌شود که عملیات جستجو به‌درستی صورت نگیرد و الگوریتم بهینه‌سازی به‌درستی عمل نکند.

۲-۳-۵-۲- روش ترمیم

در این روش، راه‌حل غیرعملی تولیدشده توسط ذرات با اعمال یک فرآیند مشخص و از پیش تعریف شده به جواب‌های عملی تبدیل می‌شود. از مشکلات این روش می‌توان به وابسته بودن این روش به نوع مسئله اشاره کرد به‌گونه‌ای که در روش ترمیم تبدیل جواب‌های غیرعملی به جواب‌های عملی از یک مسئله به مسئله دیگر متفاوت است. به عبارتی، فرآیند ترمیم باید برای هر مسئله، طراحی و پیشنهاد شود. بسیاری از مسائل ترکیباتی با استفاده از روش ترمیم حل می‌شوند.

۲-۳-۵-۳- روش اصلاح عملگرهای وراثتی

در این روش، با تعریف یک سری عملگرهای وراثتی خاص، همواره ذرات در محدوده‌ی جواب‌های عملی تولید می‌شوند. از معایب این روش می‌توان به وابسته بودن آن به نوع مسئله اشاره کرد؛ اما با تعریف عملگرهای مناسب می‌توان الگوریتم وراثتی کارآمد و خوبی برای حل مسائل خاص طراحی و ارائه کرد. در بعضی از تحقیقات نشان داده شده است که استفاده از این روش، در مسائل خاص، اغلب مفیدتر از روش

جریمه است.

۲-۳-۴- روش جریمه

در تمام روش‌هایی که تاکنون گفته شد از تولید جواب‌های غیرعملی جلوگیری به عمل می‌آید و جستجویی در آن فضاها صورت نمی‌گیرد اما در روش جریمه نواحی که جواب‌های غیرعملی را تولید می‌کنند را نیز مورد جستجو قرار می‌دهد. اساس کار این روش این است که یک مسئله بهینه‌سازی مقید را با اعمال یک تابع جریمه برای نواحی غیرعملی، یک مسئله بهینه‌سازی مقید را به یک مسئله بهینه‌سازی نا-مقید تبدیل می‌کند. نحوه کار این‌گونه است که برای جواب‌های غیرعملی، یک تابع جریمه به تابع هدف مورد نظر افزوده می‌شود. برای مسئله‌هایی که شامل چندین قید هستند، به ازای برآورده نشدن هر قید، یک جریمه در نظر گرفته می‌شود. در این روش طراح این قابلیت را پیدا می‌کند که با توجه به درجه اهمیت توابع هدف وزن‌هایی را به تابع جریمه اضافه می‌کند و با انجام این کار جستجو را به خوبی هدایت می‌کند. این روش با وجود کارایی زیاد، دارای عیب‌هایی نیز هست. مهم‌ترین ایراد این روش در برگرداندن یک مقدار به ازای هر جواب عملی یا غیرعملی است. بنابراین، کلیه اطلاعات مفید مربوط به میزان ارضا قیدها از بین می‌رود.

۲-۳-۶- بهینه‌سازی تک معیاره و چند معیاره

در بهینه‌سازی تک معیاره^۱ مسئله‌ی مورد نظر تنها دارای یک تابع هدف می‌باشد اما در یک مسئله چند معیاره^۲ که اولین بار در سال ۱۹۹۹ ارائه شده است [۲۳]. تعداد تابع هدف‌هایی که باید به‌طور همزمان بهینه شوند بیش از یکی است. معمولاً در یک مسئله بهینه‌سازی چند معیاره، با دادن اهمیتی (وزنی) به هر کدام از توابع هدف و سپس جمع بستن آن‌ها، مسئله‌ی بهینه‌سازی چند معیاره را تبدیل به یک مسئله

^۱ Single Objective

^۲ Multi Objective

تک معیاره می‌کنند. و یا اینکه از روش‌های دیگری که مخصوص بهینه‌سازی چند معیاره است استفاده می‌کنند. حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، به‌تنهایی مبحث مستقل و مهمی از حوزه بهینه‌سازی است. که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۲-۴- ساختار شبکه‌ای

برای همسایه‌های یک ذره می‌توان ساختار شبکه‌ای متفاوتی را در نظر گرفت. متداول‌ترین ساختارهایی که استفاده می‌گردد، حلقه‌ای و ستاره‌ای می‌باشد. در ساختار ستاره، یک ذره به عنوان مرکز در نظر گرفته می‌شود که کلیه ذرات گروه را با هم متصل می‌نماید. در واقع کلیه ذرات دیگر فقط به مرکز متصل هستند. در ساختار حلقه‌ای، ذرات در یک حلقه قرار دارند و هر ذره دارای تعدادی همسایه در سمت چپ و تعدادی همسایه در سمت راستش است. انتخاب شبکه تأثیر بسزایی بر یافتن بهترین راه‌حل گروه دارد. با انتخاب ساختاری درست در بهینه‌سازی می‌توان ذرات را به سمت پاسخی مطلوب هدایت کرد.

۲-۵- بهینه‌سازی گروه ذرات

۲-۵-۱- تاریخچه بهینه‌سازی گروه ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات بر اساس شبیه‌سازی یک رفتار جمعی است. در بیشتر گونه‌های جانوران رفتارهای گروهی دیده شده است. چه بسا که بعضی از این گونه‌ها نیز توسط یک عضو برتر گروه راهنمایی می‌شوند. گونه‌هایی از جانوران وجود دارند که به صورت گروهی زندگی می‌نمایند اما راهنمایی ندارند. هر عضو یک رفتار خود سازمانده^۱ دارد که بدون استفاده از یک راهنما می‌تواند در محیط حرکت نموده و نیازهای طبیعی خود را برطرف نماید؛ مانند گروه پرندگان، ماهی‌ها و گله گوسفندان. این گونه از جانوران

^۱ Self-organizing

هیچ دانشی نسبت به رفتار عمومی کل گروه ندارند و یا حتی هیچ دانشی نسبت به محیطی که در آن قرار دارند، ندارند. در عوض قادرند بارد و بدل نمودن اطلاعات با اعضای هم‌جوار خود در محیط حرکت نمایند. این تعامل ساده بین ذرات باعث ایجاد رفتار پیچیده‌تر گروه می‌شود؛ مانند جستجوی یک محیط توسط ذرات.

جهت فهم بهتر رفتار پویای گروه ذرات، در [۲۴] بعضی از رفتارها شبیه‌سازی شدند و رفتار اعضای گروه به دسته‌های زیر تقسیم شدند:

- **اجتناب از برخورد^۱:** اعضای یک گروه با یکدیگر برخوردی ندارند.
- **تنظیم سرعت^۲:** هر عضو سرعت خود را متناسب با اعضای همسایه خود تنظیم می‌نمایند.
- **جمع شدن مرکزی^۳:** هر عضو تلاش می‌کند که در کنار همسایگان خود حرکت نماید.

در بسیاری از کاربردهای بهینه‌سازی از این شبیه‌سازی‌ها الهام گرفته شده است. در ادامه به مدل خاصی از بهینه‌سازی‌ها که از زندگی جانوران انبوه الهام گرفته است پرداخته می‌شود که بهینه‌سازی گروه ذرات^۴ نام دارند (PSO).

اجزای یک گروه از یک رفتار ساده تبعیت می‌نمایند. بدین نحو که هر عضو از گروه از موفقیت سایر همسایگان‌شان تقلید می‌نماید. هدف از این الگوریتم‌ها این است که اعضای گروه در فضای جستجو حرکت نموده و در یک نقطه‌ی بهینه جمع شوند. به منظور توسعه‌ی بیشتر این مدل، مفهوم سردسته پرنده‌گان^۵ به مدل اضافه گردید که به شکل یک حافظه از بهترین موقعیت‌های هر عضو و همسایگان آن عضو است. بهترین موقعیت قبلی هر عضو، بهترین موقعیتی است که آن عضو از ابتدای حیات خود

¹ Collision avoidasnce

² Velocity matching

³ Flock centering

⁴ Particle swarm optimization

⁵ Rooster

تابه حال کسب نموده است. بهترین موقعیت همسایگی، بهترین موقعیتی است که توسط همسایگان یک عضو ملاقات شده است. این دو بهترین موقعیت به عنوان نقاط جذب عمل می‌نمایند. با استفاده از یک مجموعه قوانین ساده می‌توان موقعیت‌های اعضای گروه را به روز نمود. بدین صورت که عضو به یک نسبت به سمت دو موقعیت بهتر حرکت می‌نماید. به مرور زمان با تکرار الگوریتم، اعضا حول یک هدف جمع می‌شوند. اصول پایه‌ای هوش گروهی به صورت زیر تعریف شده است:

- **اصل هم‌جواری^۱**: گروه عناصر باید قادر باشند که محاسبات را در فضا و زمان اندکی انجام دهند.

- **اصل کیفیت^۲**: گروه ذرات باید قادر باشند که به عوامل کیفی محیط پاسخ دهند.

- **اصل تنوع^۳**: پاسخ ذرات نباید فعالیتش را بر روی کانال‌های خیلی باریک محدود نماید.

- **اصل پایداری^۴**: گروه ذرات نباید حالت رفتار خود را هر بار با تغییرات محیط تغییر دهد.

- **اصل تطابق^۵**: گروه ذرات باید قادر باشد که رفتار خود را به نفع کاهش هزینه‌ی محاسباتی تغییر دهد.

بهینه‌سازی گروه ذرات به صورت زیر این موضوعات را برآورده می‌نماید که محاسبات فضای چند بعدی به صورت یک سری از گام‌های زمانی انجام می‌شوند که این اصل اول را پوشش می‌دهد. گروه ذرات به عوامل کیفی به صورت بهترین موقعیت‌های فردی و همسایگی جواب می‌دهد. تخصیص پاسخ‌ها بین بهترین موقعیت ملاقات شده ذره و بهترین موقعیت ملاقات شده گروه تنوع پاسخ‌ها را تضمین می‌نماید. گروه حالت خود را فقط هنگامی که بهترین موقعیت ملاقات شده توسط ذره و بهترین موقعیت ملاقات

¹ Proximity principle.

² Quality principle

³ Principle of diverse response

⁴ Principle of stability

⁵ Principle of adaptability

شده توسط گروه تغییر می‌کنند، تغییر می‌دهد که اصل پایداری را پوشش می‌دهد. در نهایت گروه رفتار تطبیقی از خود نشان می‌دهد بدین‌صورت که حالت خود را هنگامی که بهترین موقعیت ملاقات شده توسط ذره و بهترین موقعیت ملاقات شده توسط گروه تغییر می‌کنند، تغییر می‌دهد.

یکی از دلایل استفاده از روش‌های جدید وجود اشکالاتی در روش‌های قدیمی است، که روش‌های قدیمی دارای اشکالات زیر هستند:

- عدم پیدا کردن چندین جواب بهینه در طی یک‌بار اجرای الگوریتم.
 - عدم تضمین برای یافتن جواب‌های بهینه مختلف و متفاوت.
 - نمی‌توان برای مسائلی با متغیرهای گسسته و دارای چندین جواب بهینه‌سازی بکار برد.
- اما در الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ازدحام ذرات دیگر با چنین مشکلاتی روبرو نیستیم.

۲-۵-۲- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ (PSO) یک روش سراسری بهینه‌سازی است که در آن فرضیاتی مطرح می‌شود و یک سرعت ابتدایی به ذراتی که در فضای جستجوی تابعی که بهینه می‌شود، پخش شده‌اند، اختصاص داده می‌شود، همچنین کانال‌های ارتباطی بین ذرات در نظر گرفته می‌شود. به طوری که ذرات با هم در ارتباط بوده و تبادل اطلاعات می‌کنند سپس این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌کنند و مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته‌اند را محاسبه می‌کنند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که در گذشته در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کنند. پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا آن‌که جواب موردنظر بدست

¹ Particle swarm optimization

بیاید. در واقع انبوه ذرات که مقدار کمینه یا بیشینه یک تابع را جستجو می‌کنند، همانند دسته‌ای از پرندگان عمل می‌کنند که به دنبال غذا می‌گردند [۲۵].

هر ذره دارای یک موقعیت است که مشخص می‌نماید مختصات ذره در فضای جستجوی چندبعدی چگونه است. با حرکت ذره در طول زمان موقعیت ذره تغییر می‌نماید. $x_i(t)$ موقعیت ذره i ام در زمان t ام را مشخص می‌نماید. همچنین هر ذره برای حرکت نمودن در فضا نیاز به یک سرعت دارد $v_i(t)$ سرعت ذره i م در زمان t ام را مشخص می‌نماید. با افزودن سرعت به موقعیت هر ذره، می‌توان موقعیت جدیدی برای ذره در نظر گرفت. معادله به‌روز نمودن موقعیت ذره در (۱-۲) آورده شده است.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (1-2)$$

ذرات توانایی این را دارند که بهترین موقعیتی را که در طول حیات خود در آن قرار داشته‌اند به خاطر بسپارند. به بهترین تجربه فردی ذره یا بهترین موقعیت ملاقات شده توسط ذره y_i گفته می‌شود. ذرات می‌توانند از بهترین موقعیت ملاقات شده توسط کل گروه نیز آگاهی داشته باشند که این موقعیت \hat{y}_i نامیده می‌شود. بردار سرعت ذره در فرآیند بهینه‌سازی منعکس‌کننده دانش تجربی ذره و اطلاعات جامعه ذرات است. هر ذره برای حرکت در فضای جستجو دو مؤلفه را مدنظر دارد.

- مؤلفه شناختی^۱: $y_i(t) - x_i(t)$ بهترین راه‌حلی است که هر ذره به‌تنهایی به دست می‌آورد.
- مؤلفه اجتماعی^۲: $\hat{y}_i(t) - x_i(t)$ بهترین راه‌حلی است که توسط کل گروه تشخیص داده می‌شود.

دو مدل اصلی برای الگوریتم استاندارد PSO وجود دارد که محاسبه بردار سرعتشان بر اساس دو مؤلفه شناختی و اجتماعی می‌باشد. این دو مدل به نام‌های lbest PSO و gbest PSO می‌باشند که تفاوت زیادی با هم ندارند و تفاوت آن‌ها در سبب همسایگی است که برای هر ذره در نظر گرفته می‌شود که در

¹ Cognitive component

² Soocial component

ادامه به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۲-۵-۲-۱-مدل Global Best PSO

در این الگوریتم همسایه یک ذره کل ذرات گروه می‌باشد و مدل شبکه‌ای آن ستاره‌ای می‌باشد. \hat{y}_i در این الگوریتم بهترین موقعیت ملاقات شده توسط کل گروه می‌باشد. موقعیت هر ذره توسط فرمول (۲-۲) ارزیابی می‌گردد (تابع ملاک شایستگی ذرات می‌باشد [۲۷]).

$$(y_i(t+1)) = \begin{cases} y_i(t) & \text{if } f(x_i(t+1)) \geq f(y_i(t)) \\ x_i(t) & \text{if } f(x_i(t+1)) < f(y_i(t)) \end{cases} \quad (2-2)$$

بردار \hat{y} به صورت فرمول (2-3) محاسبه می‌شود.

$$\hat{y} \in \{y_0, y_1, \dots, y_s\} = \min\{f(y_0(t)), f(y_1(t)), \dots, f(y_n(t))\} \quad (3-2)$$

در فرمول بالا n سایز گروه (تعداد ذرات) را مشخص می‌نماید. ذرات در ابتدا در فضای جستجو پراکنده‌اند و سپس هر ذره با سرعت خاصی به سمت یک نقطه همگرا می‌شود. v_{ij} سرعت i امین عنصر از بردار سرعت ذره i را نمایش می‌دهد. بنابراین سرعت ذره i بر اساس فرمول (۲-۴) بروز می‌گردد.

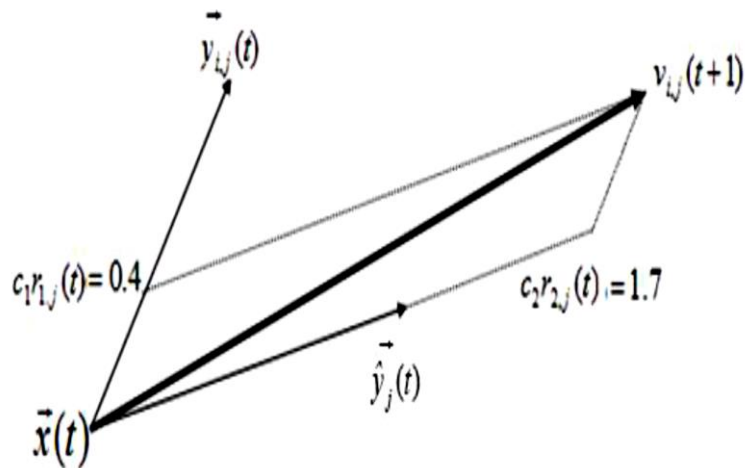
$$v_{ij}(t+1) = \tilde{w}v_{ij}(t) + c_1r_{1,j}(t)(y_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) + c_2r_{2,j}(t)(\hat{y}_j(t) - x_{i,j}(t)) \quad (4-2)$$

$$r_{1,j}, r_{2,j} \approx U(0,1) \quad (5-2)$$

\tilde{w} وزن اینرسی^۱ را مشخص می‌نماید که در مورد آن توضیحاتی داده خواهد شد و c_1 و c_2 ثابت‌ها می‌باشند و $U(0,1)$ عدد تصادفی بین صفر و یک می‌باشد.

در شکل ۱-۲ نحوه به‌روز نمودن سرعت ذره نمایش داده شده است.

¹ Inertia weight



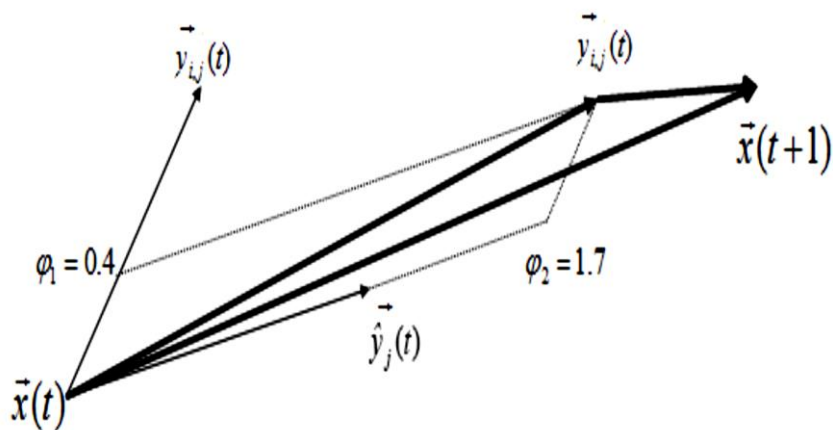
شکل ۱-۲ به روزرسانی سرعت [۲۶].

باید یک ارتباطی بین مقادیر ثابت و وزن موجود باشد. تا رسیدن به جواب را تضمین نماید. چون در غیر این صورت باعث می شود که ذرات بر اثر یک سری از رفتارها واگرا شوند. که این ارتباط به صورت زیر می باشد:

$$\frac{(c_1 + c_2)}{2} - 1 < \tilde{w} \quad (۶-۲)$$

موقعیت ذره i ام توسط معادله (۱-۲) بروز می گردد:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (۱-۲)$$



شکل ۲-۲ به روزرسانی موقعیت ذره [۲۶].

سرعت و موقعیت هر ذره توسط معادلات ذکر شده بروز می‌گردد و آن قدر این عمل تکرار می‌گردد تا یا به حداکثر تعداد تکرار برسد و یا سرعت بروز شده به صفر نزدیک شود و عملکرد هر ذره توسط ملاک شایستگی برآورد می‌شود.

۲-۵-۲-۲ مدل local Best PSO

در این مدل یک ذره جهت به‌روز نمودن سرعت خود فقط توانایی برقراری ارتباط با تعدادی ذره که در همسایگی آن قرار دارد، را دارد که ساختار شبکه‌ای آن به‌صورت حلقه می‌باشد. معادله به‌روزرسانی موقعیت ذره‌ها مانند روش قبل است و تغییری نمی‌نماید. در این روش همسایه‌های یک ذره عملاً مشخص‌کننده رفتارهای اجتماعی یک ذره هستند [۲۷].

۲-۵-۳ وزن اینرسی

عبارت وزن اینرسی برای اولین بار توسط شای و ابره‌ارت در سال ۱۹۹۸ معرفی گردید [۲۸]. این وزن در واقع درصدی از سرعت قبلی ذره را در محاسبه سرعت جدید تأثیر می‌دهد و تأثیر سرعت ذرات در گام قبل را بر سرعت فعلی تعیین می‌نماید. به این ترتیب که با مقادیر بزرگی از وزن اینرسی، قابلیت جستجوی عمومی الگوریتم بهبود یافته و فضای بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. حال آنکه با مقادیر کوچک وزن اینرسی فضای مورد بررسی محدود شده و جستجو در این فضای محدود شده صورت می‌گیرد. وزن اینرسی از فرمول (۷-۲) محاسبه می‌شود [۱۹].

$$\tilde{w} = \frac{1}{|-2 + \varphi_3 \sqrt{\varphi_3^2 + 4\varphi_3}|} \quad (7-2)$$

$$\varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_2$$

که φ_1 و φ_2 ثابت‌هایی هستند که معمولاً بین ۲-۵/۲ انتخاب می‌شوند.

۲-۵-۴- مهيار كردن سرعت

نحوه جستجوی عمومی و جستجوی محلی یک الگوریتم عامل‌هایی مهم جهت ارزیابی یک الگوریتم می‌باشند. جستجوی عمومی یعنی اینکه الگوریتم به چه میزان قادر است ناحیه‌های متفاوتی از فضا را جستجو نماید. در مقابل جستجوی محلی بدین مفهوم است که الگوریتم فقط ناحیه‌هایی را که احتمال اینکه جواب در آن نقاط وجود دارد را جستجو نماید. الگوریتم بهینه‌سازی‌ای خوب است که بتواند تعادلی بین این دو جستجو برقرار نماید. در بیشتر الگوریتم‌ها برای ایجاد این تعادل معادله سرعت ذره را، کنترل می‌کنند چون ممکن است گاهی سرعت ذره بسیار زیاد شود در نتیجه این امکان وجود دارد که ذرات از فضای جستجو خارج شوند. برای کنترل سرعت ذره حد آستانه‌ای به نام v_{max} تعریف می‌کنند که سرعت ذره نباید از این حد فراتر برود [۲۹].

$$v_{i,j}(t+1) = \begin{cases} \dot{v}_{i,j}(t+1) & \text{if } \dot{v}_{i,j}(t+1) < v_{\max,j} \\ v_{\max} & \text{if } \dot{v}_{i,j}(t+1) \geq v_{\max,j} \end{cases} \quad (۸-۲)$$

در فرمول بالا $\dot{v}_{i,j}$ سرعت بدست آمده از رابطه‌ی (۴-۲) می‌باشد.

۲-۵-۵- مراحل الگوریتم PSO

برای آشنایی بهتر الگوریتم ازدحام ذرات و نحوه اجرای آن مراحل برای آن در نظر گرفته شده است که این مراحل به شرح زیر می‌باشد:

۱. **مقداردهی اولیه:** ابتدا مقدار اولیه‌ای به یک جمعیت از ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های

تصادفی در فضای جستجو داده می‌شود.

۲. **تخمین زدن:** برای شایستگی هر ذره در این جمعیت تخمینی در نظر گرفته می‌شود.

۳. **به‌روزرسانی:** سرعت هر ذره را با رابطه (۴-۲) و حرکت به موقعیت بعدی ذرات بر اساس

رابطه (۱-۲) محاسبه می‌شود.

۴. **خاتمه:** برای متوقف کردن الگوریتم یک معیار در نظر گرفته می‌شود اگر این معیار عملی شود

الگوریتم پایان می‌یابد در غیر این صورت از مرحله ۲ الگوریتم ادامه پیدا می‌کند. الگوریتم

PSO استاندارد در شکل ۲-۳ نمایش داده شده است.

```

For each particle  $i \in 1, \dots, s$  do
  Randomly initialize  $x_i$ 
  Randomly initialize  $v_i$  (or just set  $v_i$  to zero)
  Set  $y_i = x_i$ 
endfor
Repeat
  For each particle  $i \in 1, \dots, s$  do
    Evaluate the fitness of particle  $i$ ,  $f(x_i)$ 
    Update  $y_i$  using  $y_i(t+1) = \begin{cases} y_i(t) & \text{if } f(x_i(t+1)) \geq f(y_i(t)) \\ x_i(t+1) & \text{if } f(x_i(t+1)) < f(y_i(t)) \end{cases}$ 
    Update  $\hat{y}$  using  $\hat{y}(t) \in \{y_0, y_1, \dots, y_s\} = \min\{f(y_0(t)), f(y_1(t)), \dots, f(y_s(t))\}$ 
    For each dimension  $j \in 1, \dots, N_d$  do
      Apply velocity update using
      
$$v_{i,j}(t+1) = wv_{i,j}(t) + c_1r_{1,j}(t)(y_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) + c_2r_{2,j}(t)(\hat{y}_j(t) - x_{i,j}(t))$$

    endloop
    Apply position update using  $x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$ 
  endloop
Until some convergence criteria is satisfied
  
```

شکل ۲-۳ الگوریتم PSO [۲۶].

۲-۵-۶- بهینه‌سازی چند معیاره

مسئله بهینه‌سازی چند معیاره در واقع یافتن جواب‌هایی بر روی یک مجموعه از گزینه‌های امکان‌پذیر با

رعایت کردن قیدهای مسئله و با هدف بهینه‌سازی توابع هدف مسئله است. در این‌گونه از مسائل برخلاف مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه و به خاطر وجود چند تابع هدف به جای یک تابع هدف که ممکن است تابع-ها با هم در تضاد باشند مجموعه‌ای از جواب وجود دارد [۳۰]. دو اصل مهم برای بهینه‌سازی با چند تابع هدف وجود دارد که این دو اصل به این صورت می‌باشد:

- مسیر جستجو در جهت رسیدن به منحنی جواب‌های بهینه پرتو هدایت می‌شوند.
- جواب‌های بهینه در طول جمعیت جواب‌ها حفظ و تولید می‌شوند.

صورت کلی مسائل بهینه‌سازی چندهدفه به صورت زیر می‌باشد.

$$\min F(x) = \{f_i(x), \dots, f_n(x)\}$$

$$g(x) \leq 0 \quad (9-2)$$

$$h(x) = 0$$

$f_i(x)$ تابع هدف i ام مسئله بهینه‌سازی است و $g(x)$ مجموعه قیود نامساوی مسئله بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشد و $h(x)$ نیز مجموعه قیود مساوی مسئله بهینه‌سازی است.

۲-۵-۶-۱- مفهوم پرتو

زمانی که توابع هدف قابلیت ترکیب شدن با هم را ندارند. بایستی تعریف جدیدی از نقطه بهینه ارائه داد به طوری که همزمان تمامی خواسته‌ها را تأمین نماید. مفهوم بهینه پرتو^۱ بیان می‌دارد اگرچه نمی‌توان یک نقطه بهینه را همزمان برای تمامی توابع هدف بدست آورد اما می‌توان یک مجموعه از پاسخ‌ها را طوری پیدا نمود که در فضای جستجو از پاسخ‌های دیگر بهتر باشد. و هیچ‌گونه برتری نسبت به یکدیگر نداشته باشند [۳۱]. این مجموعه پاسخ‌ها را، مجموعه پاسخ‌های بهینه پرتو می‌نامند و نقاط دیگر فضای جستجو را مجموعه پاسخ‌های مغلوب^۲ می‌نامند. درروش پرتو به جای استفاده از مقادیر مطلق برای هر

¹ Pareto optimal set

² Dominated solution set

هدف از مفهوم غلبه برای به دست آوردن جواب بهینه استفاده می‌شود. جوابی غالب نامیده می‌شود که یکی از توابع هدف آن بهتر از دیگری باشد و دیگر توابع هدف آن بدتر از بقیه نباشد. انتخاب پاسخ بهینه نهایی از میان پاسخ‌های بهینه پرتو به میزان آگاهی ما از مسئله، نیاز ما، شرایط مرزی و محیطی آن بستگی دارد.

۲-۵-۶-۲- روش وزن دهی

خروجی تابع هدف، یک عدد (اسکالر) می‌باشد. برای بهینه‌سازی چند هدفی، باید اهداف مختلف با بهره‌گیری از ضرایب وزنی متفاوت در قالب یک تابع اسکالر تعریف گردند:

$$\min F(x) = \{f_1(x), \dots, f_n(x)\}$$

$$g(x) \leq 0$$

$$h(x) = 0$$



$$\min(w_1 f_1 + w_2 f_2 + \dots + w_n f_n)$$

$$g(x) \leq 0$$

(۱۰-۲)

$$h(x) = 0$$

توابع وزنی در این روش با توجه به اهمیت تابع‌های هدف مشخص می‌شود به این صورت که اگر تابع هدفی برای ما دارای اهمیت بیشتری بود به آن ضریب وزنی بزرگ‌تری اختصاص داده می‌شود. اما استفاده از این روش مزایا و معایبی دارد که به صورت موردی به شرح زیر ذکر می‌گردد.

مزایا:

- ساده بودن فهم و پیاده‌سازی آن.
- کاربرد مناسب برای بسیاری از مسائل بهینه‌سازی.

معایب:

- در مسائلی که به‌طور هم‌زمان برخی اهداف باید کمینه و برخی دیگر بیشینه شوند، همه اهداف باید به یک نوع تبدیل شوند که برای چنین کاری باید با ضرب یکی از توابع هدف در ۱- و یا با تقسیم کردن عدد یک بر تابع هدف، مسئله را به یک مسئله بیشینه‌سازی یا کمینه‌سازی تبدیل کرد.
- عدم امکان یافتن یک توزیع یکنواخت در میان مجموعه جواب‌های بهینه پرتو.
- چگونگی تعریف تابع هدف ترکیبی.

۲-۵-۶-۳- الگوریتم بهینه‌سازی چند گانه ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذرات^۱ (MOPSO) مورد استفاده در این پایان‌نامه توسط کوئلو در سال ۲۰۰۴ معرفی گردید [۳۲]. در واقع این الگوریتم تعمیمی است از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات است. این الگوریتم از عملگری به نام عملگر جهش^۲ استفاده می‌کند که یک عضو از جمعیت را انتخاب کرده و مقدار یک بعد آن ذره را به عددی در محدوده مقادیر معتبر تغییر می‌دهد. همچنین، یک سیاست نخبه‌گرایی به منظور نگه داشتن نتایج برتر و غالب در تکرارهای الگوریتم تعریف شده است. پاسخ‌های غالب در مخزن خارجی که جدول‌بندی شده است، ذخیره می‌شوند [۳۳]. یک عضو از مخزن به عنوان رهبر^۳ انتخاب می‌شود. این رهبر حتماً باید عضو مخزن و همچنین نامغلوب باشد. اعضای مخزن بیانگر جبهه پرتو و شامل ذرات نامغلوب هستند. پس به جای i یکی از اعضای مخزن انتخاب می‌شود. در PSO، مخزن وجود ندارد، زیرا در آن تنها یک هدف وجود دارد و یک ذره بهترین است. اما در MOPSO چند ذره وجود دارد که نامغلوب هستند و در مجموعه‌ای از جواب جای

¹ Multi-objective particle swarm optimization

² Mutation

³ Leader

دارند، که ترتیب اجرای این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد:

۱. تعیین پارامترهای موردنیاز برای اجرای الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات: حداکثر تکرار برای اجرای الگوریتم، اندازه جمعیت، مقادیر c_1, c_2 و میزان اعضای مخزن.
 ۲. جمعیت اولیه ایجاد می‌شود.
 ۳. بهترین خاطره شخصی هر کدام از ذرات بروز می‌شود.
 ۴. فضای هدف کشف شده جدول بندی می‌شود.
 ۵. اعضای نامغلوب جمعیت جداسازی و در مخزن ذخیره می‌شوند.
 ۶. هر ذره از میان اعضای مخزن یک رهبر انتخاب می‌کند و حرکت خود را انجام می‌دهد. (یعنی سرعت و موقعیت آن به روز می‌شود).
 ۷. جهش روی جمعیت جدید انجام می‌شود.
 ۸. بهترین خاطره‌ی شخصی هر کدام از ذرات بروز می‌شود.
 ۹. اعضای نامغلوب جدید به مخزن افزوده می‌شوند.
 ۱۰. اعضای مغلوب مخزن حذف می‌شوند.
 ۱۱. اگر تعداد اعضای مخزن بیش از ظرفیت تعیین شده باشد، اعضای اضافی حذف می‌شود.
 ۱۲. در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده باشد الگوریتم از شماره ۳ ادامه پیدا می‌کند.
- برای درک بهتر و آشنایی بیشتر در مورد بعضی از مراحل بالا توضیحاتی داده می‌شود که این توضیحات به شرح زیر می‌باشد:

الف) بروزرسانی خاطره شخصی

برای مقایسه بهترین بردار خاطره شخصی به شکل زیر عمل می‌شود:

- اگر موقعیت جدید، بهترین خاطره را مغلوب کند، آن‌گاه موقعیت جدید جای بهترین خاطره را

می‌گیرد. به بیان ریاضی:

$$pbest_i^{t+1} = x_i^{t+1} \quad (11-2)$$

که در فرمول (11-2) $pbest_i^{t+1}$ بهترین خاطره شخصی جمعیت i ام در تکرار $t + 1$ می‌باشد.

• اگر موقعیت جدید توسط بهترین خاطره مغلوب شد، کاری انجام نمی‌گیرد. به بیان ریاضی:

$$pbest_i^{t+1} = pbest_i^{t+1} \quad (12-2)$$

• اگر هیچ‌کدام یکدیگر را مغلوب نکنند، به تصادف یکی به عنوان بهترین موقعیت در نظر گرفته

می‌شود.

ب) انتخاب رهبر

برای انتخاب رهبر ابتدا باید فضای جستجو را جدول‌بندی کرد، سپس برای هر خانه احتمالی در نظر گرفت و به صورت تصادفی خانه‌ای انتخاب می‌شود و یکی از اعضای آن خانه به عنوان رهبر انتخاب می‌شود. انتخاب رهبر به‌گونه‌ای است که احتمال انتخاب شدن خانه‌هایی که جمعیت کمتری دارد بیشتر باشد و دلیل انتخاب شدن خانه‌های کم جمعیت به این‌گونه است که تنوع حفظ شود و نقاطی که در آن جستجوی کمتری صورت گرفته است مورد جستجو قرار بگیرد.

$$P_i = \frac{\frac{1}{n_i}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{n_j}} \quad (13-2)$$

p_i احتمال نسبت داده شده به خانه i ام و n_i تعداد جمعیت خانه i ام است. همچنین m تعداد خانه-

های موجود است.

ج) حذف جمعیت اضافی از مخزن

برای کاهش زمان محاسبات بعد از اضافه شدن اعضای جدید جمعیت مغلوب نشده به مخزن، تعدادی از اعضا حذف می‌شوند. برای حذف اعضا فضای جستجو دوباره جدول‌بندی می‌شود و به هر خانه احتمالی

داده می‌شود اما این بار حذف اعضا به‌گونه‌ای است که خانه‌هایی که جمعیت بیشتری دارند احتمال انتخاب شدنشان بیشتر باشد.

$$P_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^m n_j} \quad (1-2)$$

۲-۶- مزایای الگوریتم بهینه‌سازی ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات مزایای بسیاری نسبت به دیگر الگوریتم‌ها دارد از جمله این مزایا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- یک روش مرتبه صفر است و نیازی به عملیات سنگین ریاضی مثل گرادیان‌گیری ندارد.
- یک روش مبتنی بر جمعیت است. (استفاده از محاسبات توزیع‌شده).
- بار محاسباتی قابل قبولی دارد.
- همگرایی نسبتاً سریعی دارد.
- الگوریتم ازدحام ذرات به مشتقات تابع هدف نیاز ندارد و فقط از ارزیابی متغیرهای تصمیم‌گیری در تابع هدف استفاده می‌کند بنابراین محدودیتی از لحاظ مشتق‌پذیر بودن بر تابع هدف اعمال نمی‌کند.
- این الگوریتم از انتقال تصادفی و آماری استفاده می‌کند و از قوانین آماری برای هدایت جستجو استفاده می‌کند. فرآیند جستجو در این روش بر اساس تصادف محض نیست. بلکه در این روش از جستجوی تصادفی به عنوان ابزاری برای رسیدن به فضای جستجوی بهتر استفاده می‌شود.

۲-۷- مقایسه‌ی PSO با الگوریتم‌های تکاملی

برای درک بهتر کارایی الگوریتم بهینه‌سازی، مقایسه‌ای بین این الگوریتم و سایر الگوریتم‌های تکاملی

صورت گرفته است که به صورت موردی در زیر ذکر گردیده است.

- برخلاف الگوریتم‌های تکاملی در PSO عملیات انتخاب وجود ندارد. این بدان معناست که هیچ‌یک از ذرات (پاسخ‌ها) حذف نمی‌شوند و تنها مقدار هر ذره تغییر می‌کند.
- PSO از اصل بقای نسل استفاده نمی‌کند.
- عمل ترکیب جواب‌ها در PSO وجود ندارد.
- در PSO نیز عمل جهش به نوعی وجود دارد.
- می‌توان در PSO نسبت بین جستجوی محلی و سراسری را به کمک وزن‌ها مشخص کرد.

فصل سوم

یاتاقان‌های ژورنال

۳-۱- مقدمه

یاتاقان‌های ژورنال از مهم‌ترین اجزای تجهیزات دوار می‌باشند که امروزه به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع یاتاقان نقش تحمل‌کننده بارهای مکانیکی را در اعضای متحرک با حرکت دوار یا خطی ایفا می‌کنند. فیلم روغن ایجادشده در این یاتاقان‌ها، تماس فیزیکی بین شفت و یاتاقان را به تماس هیدرودینامیکی تبدیل می‌نماید. چنین یاتاقان‌هایی علاوه برداشتن اصطکاکی پایین و نیز افت قدرت پایین، از امتیاز بسیار خوب ساده بودن، برخوردارند. لذا قابل‌اعتماد و ارزان بوده و نگهداری از آن‌ها راحت است. از لحاظ شکل هندسی، این نوع یاتاقان‌ها می‌توانند به شکل ساده با کفشک ثابت تا شکل‌های پیچیده شامل کفشک لولایی باشند.

۳-۲- یاتاقان‌های ژورنال کفشک ثابت

وجود برخی از شرایط ویژه نظیر تقاضا برای بکارگیری یاتاقان در سرعت‌های بالاتر، وجود مسائل ارتعاشی به علت کارکرد در سرعت‌های بحرانی، نامتعادل بودن و ایجاد شرایط ناپایداری گاهی سبب می‌گردد تا نیاز به استفاده از یاتاقان‌های ژورنال با اشکال هندسی متفاوت با نوع ساده آن در انواع دستگاه‌های مکانیکی

دارای اجزای دوار احساس گردد.

یاتاقان ژورنال با کفشک ثابت شکل ساده‌ای از یاتاقان‌های هیدرودینامیکی است که کاربردهای زیادی در صنعت مخصوصاً در توربوماشین‌ها دارند. این نوع یاتاقان برای حمایت محورها و حمل بار شعاعی با افت قدرت کمینه و خوردگی بکار گرفته می‌شوند. روان‌کننده از نقطه مناسبی در این یاتاقان و از طریق یک سوراخ یا یک شیار تعبیه می‌شوند. اگر یاتاقان حول 360° درجه کامل ادامه داشته باشد، یاتاقان ژورنال کامل^۱ نامیده می‌شود. اگر زاویه پوشش از 360° درجه کمتر باشد، عبارت یاتاقان ژورنال جزئی^۲ بکاربرده می‌شود [۳۴].

یاتاقان‌های ژورنال برای تولید فشارهای متحمل شونده‌ی بار در فیلم روان‌کننده متکی به حرکت محور هستند. شکل هندسی یاتاقان ژورنال در شکل ۱-۳ نشان داده می‌شود. محور معمولاً هم‌مرکز یاتاقان نمی‌چرخد. خارج از مرکزی محور نسبت به مرکز یاتاقان را نسبت خروج از مرکز گویند. فشار تولیدشده، در نتیجه ظرفیت حمل بار یاتاقان بستگی به نسبت خروج از مرکز، سرعت زاویه‌ای، لزجت مؤثر روان‌کننده، ابعاد و لقی یاتاقان دارد [۳۵].

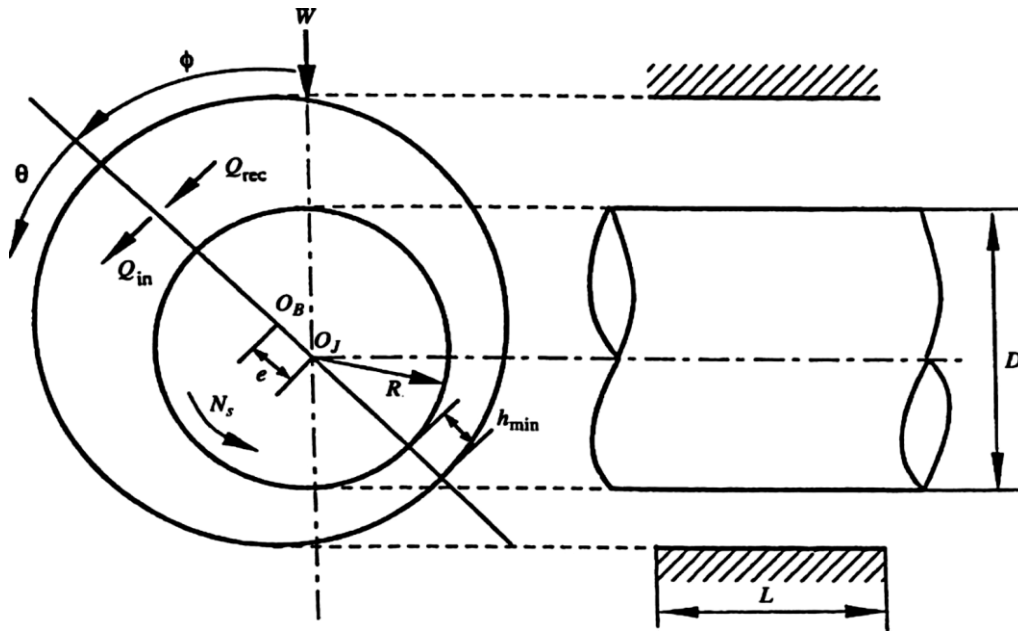
۳-۲-۱- معادلات حاکم

برای تحلیل عملکرد یاتاقان‌های ژورنال تحلیل معادلات حاکم بر فیلم سیال روان‌کار درون یاتاقان روش مناسبی می‌باشد. اساس بسیاری از کارها در حوزه روان‌کاری فیلم سیال را، بررسی معادله رینولدز در شرایط مربوط به مسائل گوناگون تشکیل می‌دهد. بررسی معادله رینولدز حاصل از اعمال فرضیات تسهیل‌کننده، از روش‌هایی می‌باشد که پژوهش‌های متعددی پیرامون آن انجام گرفته است. حل تحلیلی

¹ Finite bearing

² Partial bearing

این معادله تنها در حالتی که از تقریب یاتاقان طویل^۱ و یا بسیار کوتاه^۲ استفاده گردد امکان پذیر است [۳۳]. بنابراین در حالت کلی حل این معادله نیازمند بکارگیری یکی از انواع روش های حل عددی می باشد.



شکل ۱-۳ شماتیک یاتاقان ژورنال کفشک ثابت [۳۷].

برای حل معادلات حاکم و سادگی کار فرضیاتی صورت گرفته که به شرح زیر می باشد [۳۸]:

- سیال روان کار نیوتنی و تراکم ناپذیر است.
- جریان روان کار آرام و یکنواخت است.
- نیروهای اینرسی و حجمی در مقایسه با نیروهای فشاری و لزجی کوچک است.
- جریان روان کار، لایه ای است و از لایه های روغن و آمولسیون تشکیل شده است.
- جریان آرام است.

اولین رابطه اساسی حاکم بر سیال روان ساز داخل یاتاقان ها توسط رینولدز [۳۹] در سال ۱۸۶۶ ارائه

¹ Long bearing

² Short bearing

شد. وی به کمک یک سری توابع ریاضی، توزیع میدان فشار در درون یاتاقان را محاسبه نمود. اولین پاسخ شکل-بسته^۱ از معادله رینولدز^۲ توسط سامر فیلد [۴۰] در سال ۱۹۰۴ مطرح گردید. با اعمال فرضیات صورت گرفته در مسئله معادله رینولدز به صورت زیر درمی آید [۳۸]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6R\omega \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1-3)$$

که x مختصات در راستای محیطی، y مختصات در راستای محوری یاتاقان، R شعاع محور h ضخامت فیلم روغن، ω سرعت زاویه‌ای، μ لزجت روغن و p فشار روغن می‌باشد. برای یاتاقان ژورنال نمایش داده شده در شکل ۲-۳ معادله ضخامت فیلم روغن مطابق آنچه در زیر بیان می‌شود به دست می‌آید [۳۸]. از قانون سینوس‌ها می‌توان نوشت:

$$\frac{\overline{QO_B}}{\sin \gamma} = \frac{R_J}{\sin \theta} = \frac{e}{\sin \delta} \quad (2-3)$$

که $\overline{QO_B}$ ضلع مثلث، R_J شعاع دایره کوچک، e خروج از مرکزیت محور، δ ، θ و γ زوایای موجود در شکل می‌باشند. با توجه به فرمول (۲-۳) زاویه δ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\delta = \arcsin \left(\frac{e}{R_J} \sin \theta \right) \quad (3-3)$$

از طرفی داریم:

$$\gamma = \theta - \delta = \theta - \arcsin \left(\frac{e}{R_J} \sin \theta \right) \quad (4-3)$$

$$\overline{QQ_B} = \frac{R_J}{\sin \theta} \sin \left[\theta - \arcsin \left(\frac{e}{R_J} \sin \theta \right) \right] = \sqrt{R_J^2 - e^2 \sin^2 \theta} - e \cos \theta \quad (5-3)$$

طبق شکل R_B شعاع دایره بزرگ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$R_B = R_J + C \quad (6-3)$$

1. Closed form solution
2. Reynolds equation

$$h = R_B - \overline{QQ_B} \quad (7-3)$$

که C لقی کفشک می باشد.

با جایگذاری معادله های (5-3) و (6-3) در معادله (7-3) مقدار h به صورت زیر به دست می آید:

$$h = C + R_J + e \cos \theta - R_J \sqrt{1 - \left(\frac{e}{R_J}\right)^2 \sin^2 \theta} \quad (8-3)$$

از طرفی داریم:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{e}{R_J}\right)^2 \sin^2 \theta} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{e}{R_J} \sin \theta\right)^2 - \frac{1}{8} \left(\frac{e}{R_J} \sin \theta\right)^4 - \dots \quad (9-3)$$

چون نسبت $\frac{e}{R_J}$ از درجه بزرگی 10^{-3} است، می توان معادله (9-3) را می توان به شکل زیر ساده کرد:

$$h = C + e \cos \theta = C(1 + \epsilon \cos \theta) \quad (10-3)$$

که:

$$\epsilon = \frac{e}{C} \quad (11-3)$$

در رابطه ی بالا ϵ نسبت خروج از مرکز است. توجه داشته باشید که $0 \leq \epsilon \leq 1$ است.

معادله انرژی استفاده شده جهت تعیین تغییرات دمای روغن و در نتیجه به روز کردن لزجت روغن در

فرایند حل، به شرح زیر در نظر گرفته شده است [41]:

$$q_x \frac{\partial T}{\partial x} + q_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{h^3}{12\mu\rho C_p} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 \right] + \frac{\mu U^2}{\rho h C_p} \quad (12-3)$$

که در این اینجا ρ چگالی روغن، T دمای روغن، C_p ظرفیت ویژه حرارتی روغن، q_x و q_y نیز صورت

زیر می باشند:

$$q_x = Uh/2 - (h^3/12\mu)(\partial p/\partial x) \quad (13-3)$$

$$q_y = -(h^3/12\mu)(\partial p/\partial y) \quad (14-3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (18-3)$$

با حل معادلات بالا، معادلات سرعت به صورت زیر به دست می آید

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} z^2 + Az + B \quad (19-3)$$

$$w = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial z} z^2 + Cz + D \quad (20-3)$$

برای به دست آوردن ثابت‌های بالا باید از شرایط مرزی مسئله استفاده نمود و در این مسئله شرایط مرزی به صورت زیر است.

$$\begin{cases} w = 0 \text{ و } u = U \text{ در } y = 0 \\ w = 0 \text{ و } u = 0 \text{ در } y = h \end{cases} \quad (21-3)$$

با اعمال شرایط مرزی خواهیم معادله سرعت w و u به صورت زیر درمی آید:

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (z^2 - zh) + \frac{z}{h} U \quad (22-3)$$

$$w = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} (z^2 - zh) \quad (23-3)$$

با جایگذاری معادلات سرعت بالا در معادله پیوستگی معادله سرعت v نیز به دست خواهد آمد:

$$v = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) \left(\frac{z^2 h}{2} - \frac{z^3}{3} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{z^2}{4\mu} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{Uy^2}{2h^2} \right) \quad (24-3)$$

در معادلات سرعت که در بالا ذکر شده است محور z مختصات در راستای ضخامت فیلم روغن است و

u ، w و v مؤلفه‌های سرعت به ترتیب در راستای چرخشی، محوری و ضخامت فیلم می‌باشند.

برای حل معادلات رینولدز، انرژی و ضخامت فیلم روغن باید از بی‌بعد سازی استفاده کرد تا بتوان از

روش‌های عددی آن را حل نمود که در این پایان‌نامه پارامترهای بی‌بعد مسئله به شرح زیر می‌باشد:

$$\bar{h} = h/c : \text{ضخامت بی‌بعد فیلم روغن.}$$

$\bar{x} = x/R$: مختصات زاویه‌ای.

$\bar{\mu} = \mu/\mu_0$: لزجت بی‌بعد شده.

$\bar{y} = y/l$: مختصات بی‌بعد در راستای محوری یاتاقان.

$\bar{p} = pc^2/(6U\mu R)$: فشار بی‌بعد.

$\bar{T} = \frac{2\rho c_p c^2}{UR\mu}$: دمای بی‌بعد.

با به‌کارگیری پارامترهای بی‌بعد فرم بی‌بعد معادلات (۳-۱۲)، (۳-۱۰) و (۳-۱) به‌صورت زیر درمی‌آیند:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} \right) + \left(\frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} \right) = \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{x}} \quad (۳-۲۵)$$

$$\bar{h} = (1 + \epsilon \cos \theta) \quad (۳-۲۶)$$

$$\bar{q}_x \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} + \bar{q}_y \left(\frac{R}{L} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} = \frac{6\bar{h}}{\bar{\mu}} \left[\left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} \right)^2 + \left(\frac{R}{L} \right)^2 \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} \right)^2 \right] + \frac{2\bar{\mu}}{\bar{h}} \quad (۳-۲۷)$$

برای q_x و q_y داریم:

$$\bar{q}_x = q_x/(Uc) \quad (۳-۲۸)$$

$$\bar{q}_y = q_y/(Uc) \quad (۳-۲۹)$$

$$\bar{q}_x = \bar{h}/2 - (\bar{h}^3/2)(\partial \bar{p}/\partial \bar{x}) \quad (۳-۳۰)$$

$$\bar{q}_y = -(\bar{h}^3/2)(\partial \bar{p}/\partial \bar{y}) \quad (۳-۳۱)$$

۳-۲-۲- معادله وگلیپول

یکی از روش‌های حل معادله رینولدز تبدیل این معادله به معادله‌ی وگلیپول^۱ است. در این معادله

متغیری وجود دارد که این متغیر به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$M = \bar{p}\bar{h}^{1.5} \quad (۳-۳۲)$$

^۱ Vogelpohl equation

و این معادله به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial^2 M}{\partial \bar{x}^2} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 M}{\partial \bar{y}^2} = FM + G \quad (33-3)$$

در معادله‌ی بالا پارامتر F و G به صورت زیر تعریف می گردند:

$$F = \frac{0.75}{\bar{h}^2} \left[\left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{y}}\right)^2 \right] + \frac{1.5}{\bar{h}^2} \left[\frac{\partial^2 \bar{h}}{\partial \bar{x}^2} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 \bar{h}}{\partial \bar{y}^2} \right] \quad (34-3)$$

$$G = (\partial \bar{h} / \partial \bar{x}) / \bar{h}^{1.5} \quad (35-3)$$

۳-۲-۳- پارامترهای عملکردی یاتاقان

با حل رابطه‌های (۳۲-۳) تا (۳۵-۳) و با توجه به شرایط مرزی می توان مقادیر فشار و دما را به دست

آورد و وقتی فشار معلوم باشد، مؤلفه‌های بار و دیگر پارامترهای عملکردی یاتاقان را می توان حساب کرد.

پارامترهای عملکردی یاتاقان به شکل بی بعد به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود.

الف) مؤلفه‌های نیرو قابل حمل

۱- مؤلفه نیرو در امتداد محور افقی (محور X).

$$W_x = \int_0^1 \int_0^1 \bar{p} \cos \theta \, d\bar{x} d\bar{y} \quad (36-3)$$

که W_x مؤلفه نیرو در امتداد محور افقی است.

۲- مؤلفه نیرو در امتداد محور عمودی (محور Y).

$$W_y = \int_0^1 \int_0^1 \bar{p} \sin \theta \, d\bar{x} d\bar{y} \quad (37-3)$$

که W_y مؤلفه نیرو در امتداد محور عمودی است.

۳- نیروی کلی قابل حمل برای هر یاتاقان.

$$W_t = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (38-3)$$

که W_t نیروی کلی قابل حمل برای هر یاتاقان می‌باشد.

(ب) زاویه وضعی

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{W_y}{W_x} \right) \quad (39-3)$$

در فرمول بالا ϕ زاویه‌ای است که دو نیروی عمودی و افقی نسبت به هم می‌سازند.

(ج) آهنگ ناشی روان کار

$$Q_s = \int_0^l \int_0^h u \, dy \, dz \quad (40-3)$$

که Q_s آهنگ ناشی روان کار می‌باشد.

(د) نیروی اصطکاک تولیدی ناشی از تنش برشی

$$F_\mu = \int_0^L \int_0^B \tau \, dx \, dy \quad (41-3)$$

که F_μ نیروی اصطکاک تولیدی است و τ تنش برشی وارد شده بر فیلم روغن می‌باشد که از رابطه‌ی زیر

به دست می‌آید:

$$\tau = \mu \frac{du}{dz} \quad (42-3)$$

(ه) تلفات اصطکاکی

$$H_f = \tilde{T} \omega \quad (43-3)$$

که H_f تلفات اصطکاکی و \tilde{T} گشتاور تولیدی می‌باشد.

۳-۳- یاتاقان کفشک لولایی

از یاتاقان‌های ژورنال کفشک لولایی به‌عنوان یکی از فناوری‌های صنعتی جهت رفع مشکلات ناپایداری و رفع مشکلات ساخت و مونتاژ مانند ناهمراستایی شفت و یاتاقان‌ها، خصوصاً در توربوماشین‌ها استفاده می‌شود.

امروزه یاتاقان‌های ژورنال کفشک لولایی در مقایسه با یاتاقان‌های ژورنال کفشک ثابت به دلیل ویژگی خود-تنظیمی کفشک‌ها (متناسب با شرایط کارکرد)، عملکرد و پایداری خوب و مطمئنی در سرعت‌های بالا از خود نشان می‌دهند اما همین ویژگی، چنانچه به‌خوبی در طراحی‌ها و محاسبات لحاظ نگردد می‌تواند منجر به ارتعاشات کفشک‌ها حول نقطه مفصل شده و صدمات جبران‌ناپذیری در اثر برخورد آن‌ها با محور ماشین به وجود آورد. از این‌رو در طراحی یاتاقان ژورنال کفشک لولایی، دقت و ظرافت خاصی در شبیه‌سازی جریان روان‌ساز بین کفشک‌ها و محور یاتاقان باید در نظر گرفته شود.

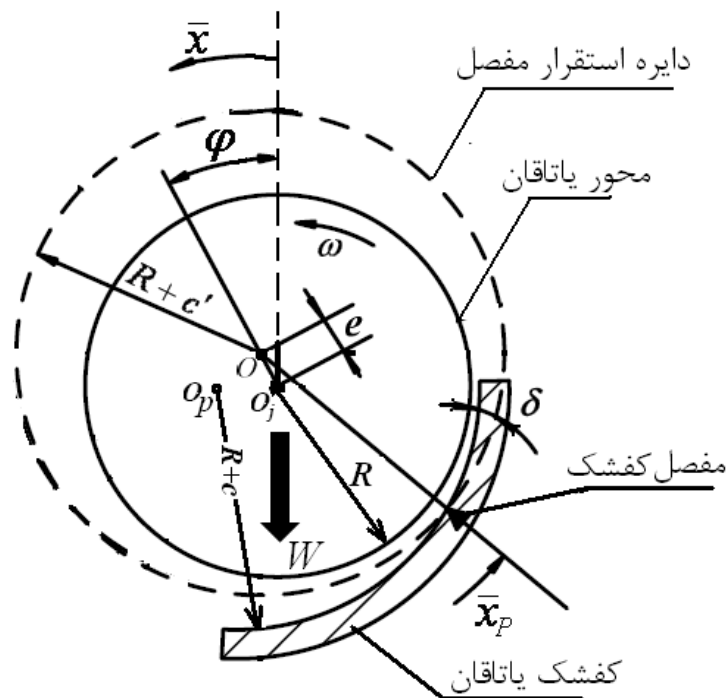
۳-۳-۱- معادلات حاکم

برای یاتاقان ژورنال نمایش داده‌شده در شکل ۳-۳ با فرض ثابت بودن ضخامت فیلم روغن در راستای محور یاتاقان (فرض عدم ناهم‌میزانی محور یاتاقان)، معادله ضخامت فیلم روغن برای هر کفشک در شکل بی‌بعد آن مطابق رابطه (۳-۴۶) بیان می‌شود [۴۲]:

$$\bar{h} = 1 - m \cos(\bar{x}_p - \bar{x}) + \varepsilon \cos(\bar{x} - \varphi) + \frac{\delta}{\psi \sin(\bar{x}_p - \bar{x})} \quad (۳-۴۴)$$

که $m = 1 - c'/c$ ضریب پیش بارگذاری، c' لقی دایره استقرار مفصل و محور یاتاقان، از مرکزیت، e خروج از مرکزیت محور، $\bar{x} = x/R$ مختصات زاویه‌ای، x مختصات در راستای محیطی، R شعاع محور، \bar{x}_p موقعیت زاویه‌ای مفصل کفشک، δ زاویه چرخش کفشک، φ زاویه بارگذاری و

$\psi = c/R$ نسبت لقی می باشد.



شکل ۳-۳ یاتاقان کفشک لولایی [۴۲].

معادلات دیگر برای یاتاقان کفشک لولایی مانند یاتاقان کفشک ثابت می باشد با این تفاوت که روابط برای هر کفشک به طور جداگانه برقرار است و برای بدست آوردن روابط کلی باید از جمع جبری استفاده کرد؛ و پارامترهای به دست آمده در هر کفشک را باهم جمع نمود.

۳-۴- گسسته سازی

برای حل معادلات به روش عددی و الگوریتم تکرار ابتدا نیاز است که معادلات گسسته سازی شوند. برای گسسته سازی از روش تفاضل مرکزی با خطای مرتبه دو استفاده شده است. و در مرزها نیز از روش تفاضل پیشرو و تفاضل پسرو با خطای مرتبه یک استفاده شده است. با استفاده از معادلات و فرمول های گسسته سازی فرم گسسته معادله و گلیپول (۳-۳۲) به صورت فرمول (۳-۴۵) درمی آید.

$$M_{i,j} = \frac{M_{i+1,j} + M_{i-1,j} + r^2(M_{i,j+1} + M_{i,j-1})}{2(1+r^2) + (\Delta\bar{x})^2\eta_{i,j}} - \frac{-(\Delta\bar{x})^2\xi_{i,j}}{2(1+r^2) + (\Delta\bar{x})^2\eta_{i,j}} \quad (45-3)$$

که پارامتر r به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$r = (R/L)(\Delta\bar{x}/\Delta\bar{y}) \quad (46-3)$$

فرم گسسته معادله انرژی نیز به این صورت است:

$$\bar{T}_{i,j} = \frac{\left[\Lambda_{i,j} + \frac{(\bar{q}_x)_{i,j}}{\Delta\bar{x}} \bar{T}_{i-1,j} + \left(\frac{R}{L}\right) \frac{(\bar{q}_y)_{i,j}}{\Delta\bar{y}} \bar{T}_{i,j-1} \right]}{\left[\frac{(\bar{q}_x)_{i,j}}{\Delta\bar{x}} + \left(\frac{R}{L}\right) \frac{(\bar{q}_y)_{i,j}}{\Delta\bar{y}} \right]} \quad (47-3)$$

که پارامتر Λ به شکل زیر می‌باشد:

$$\Lambda = \frac{2\bar{\mu}}{\bar{h}} + \frac{6\bar{h}^3}{\bar{\mu}} \left[\left(\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \left(\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{y}}\right)^2 \right] \quad (48-3)$$

۳-۵- روش حل

در این پایان‌نامه معادلات به روش تکرار حل شده‌اند که الگوریتم حل به شرح زیر است:

۱- دریافت ورودی مسئله شامل ابعاد هندسی یا تاقان و مشخصات فیزیکی سیال روان‌ساز در دمای محیط.

۲- حدس اولیه برای دمای روغن.

۳- محاسبه لزجت روغن مطابق حدس مرحله ۲.

۴- حل هم‌زمان معادلات فیلم روغن و وگلیپول به روش تکرار و محاسبه کمیت‌های p ، h و ε .

۵- حل معادله انرژی به روش تکرار و محاسبه درجه حرارت روغن.

۶- بازگشت به مرحله ۳ (تا رسیدن به معیار پذیرش خطا در درجه حرارت).

۷- به دست آوردن پارامترهای عملکردی.

شرایط مرزی مورداستفاده در مسئله هم به صورت زیر می باشد:

الف) شرایط مرزی برای به دست آوردن فشار:

$$\frac{dp}{dx} = 0 \quad \text{در} \quad \theta = \theta^* \quad (49-3)$$

$$p = 0 \quad \text{در} \quad \theta = 0 \quad (50-3)$$

که θ^* زاویه ای است که در آن کاویتاسیون رخ می دهد.

ب) شرایط مرزی برای به دست آوردن دمای روغن:

برای دمای روغن در خروجی و لبه های جانبی داریم:

$$\partial T / \partial y = 0, \partial T / \partial x = 0 \quad (51-3)$$

فصل چهارم

نتایج

۴-۱- مقدمه

امروزه با توجه به کاربرد فراوان یاتاقان‌ها در صنعت، مسئله عملکرد یاتاقان‌ها مسئله‌ی مهمی است. همچنین با دانستن اطلاعاتی جهت بهبود عملکرد یاتاقان‌ها و افزایش عمر کارایی با توجه به خوردگی و اتلاف حرارتی یاتاقان‌ها می‌توان به صنعت کمک بزرگی کرد. به همین منظور به بهینه‌سازی یاتاقان کفشک ثابت و یاتاقان کفشک لولایی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و با توابع هدف مختلف پرداخته شده است. که نتایج بدست آمده در این فصل آورده شده است.

۴-۲- صحت سنجی نتایج

اولین مورد مطالعاتی جهت ارزیابی صحت برنامه عددی مربوط می‌شود به شبیه‌سازی یاتاقان کفشک ثابت با مشخصات مندرج در جدول ۴-۱ در این مساله، لزجت و چگالی روغن ثابت فرض شده و لایه روغن در لقی بین کفشک و محور با شبکه‌ای به ابعاد $80 \times 80 \times 80$ به‌طور یکنواخت تقسیم‌بندی می‌شود. نتایج حاصل از حل عددی معادلات که عبارتند از مینیمم ضخامت بی‌بعد فیلم روغن (h_0/c) ، موقعیت کمترین

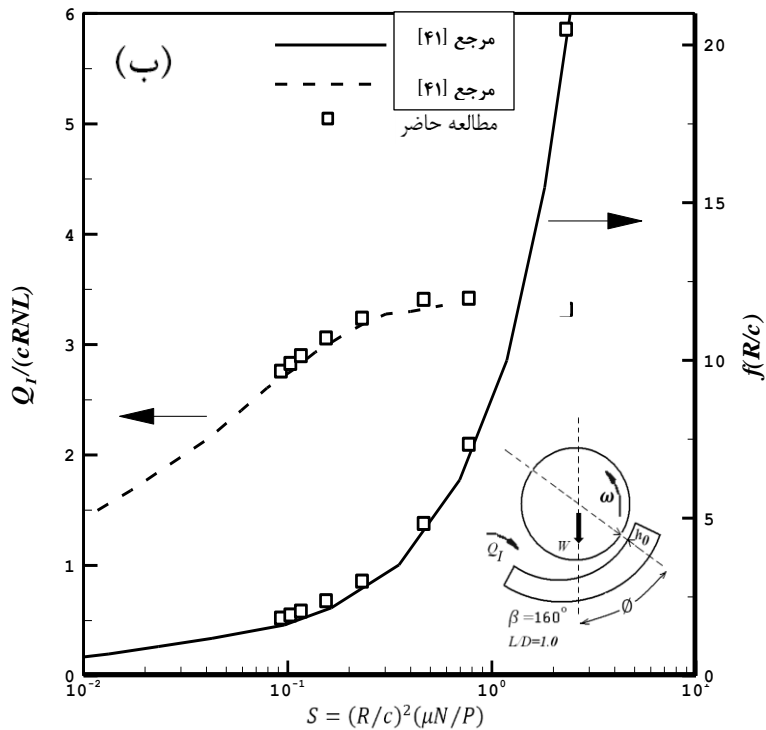
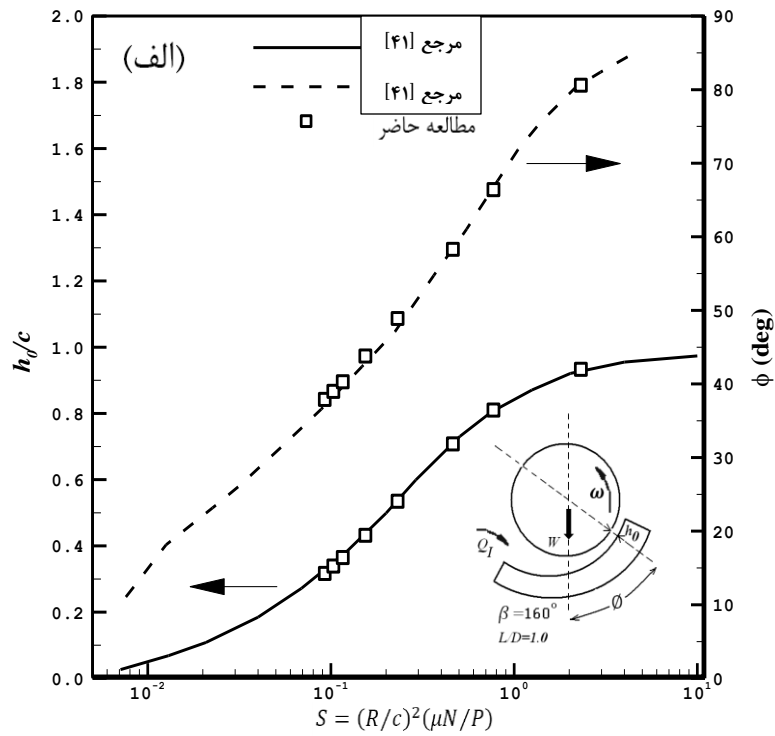
ضخامت فیلم روغن با زاویه گرایش^۱ (θ)، ضریب اصطکاک یاتاقان (cf/R) و ضریب دبی روغن ورودی به هر کفشک یاتاقان ($Q_1/(cRLN)$) برحسب عدد بی بعد سامرفیلد $S = (R/c)^2(\mu N/P)$ ، در شکل ۱-۴ نمایش داده شده است. این نتایج با گزارشات ارائه شده در مرجع [۴۱] که مربوط به حل عددی است مقایسه شده است که انطباق خوبی در آن‌ها مشاهده می‌شود.

دومین مورد مطالعاتی جهت اعتبارسنجی برنامه عددی مربوط می‌شود به شبیه‌سازی یاتاقان کفشک لولایی که مشخصات هندسی و هیدرولیکی آن در سطر دوم جدول ۱-۴ آورده شده است. کمیت γ معرف محل قرارگیری لولای کفشک نسبت به لبه خروجی کفشک، θ_p زاویه کمانی هر کفشک و N_p تعداد کفشک‌ها می‌باشد. در این مورد مطالعاتی هم، لزجت و چگالی روغن ثابت فرض شده و لایه روغن در لقی بین هر کفشک و محور با شبکه‌ای به ابعاد $80 \times 80 \times 80$ به‌طور یکنواخت تقسیم‌بندی می‌شود. شکل ۲-۴ کمترین ضخامت بی‌بعد فیلم روغن را برحسب عدد سامرفیلد نمایش می‌دهد که با مقادیر گزارش شده در مرجع [۴۱] مقایسه شده است. این مقایسه انطباق خوب نتایج مطالعه حاضر را با مقادیر مرجع [۴۱] که مربوط به حل عددی است نشان می‌دهد.

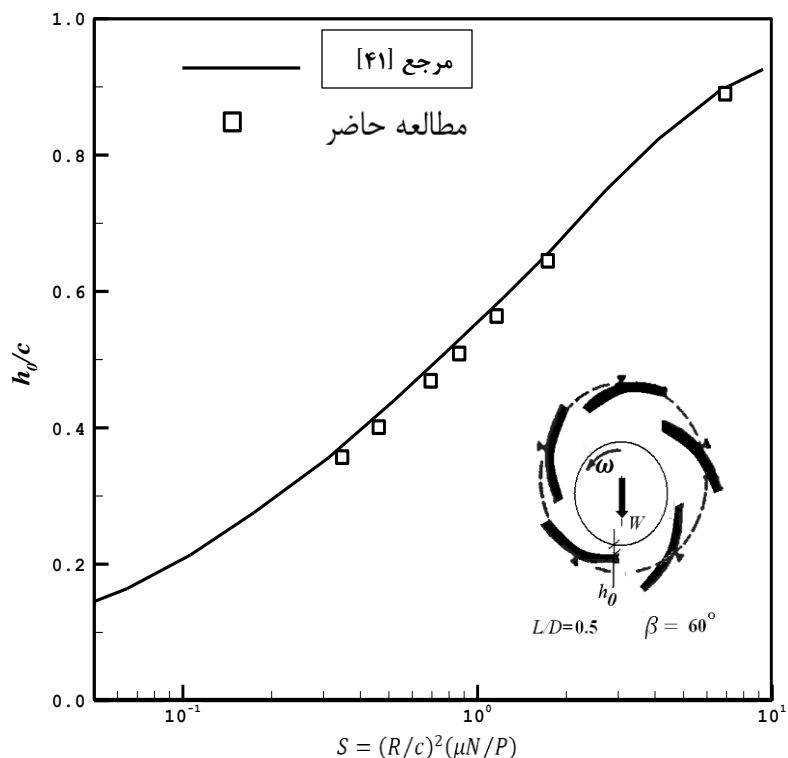
جدول ۱-۴ مشخصات هندسی یاتاقان ژورنال جهت اعتبار سنجی.

γ [%]	$\frac{\rho R \omega c}{\mu}$	θ_p [deg]	N_p	L/D	m	نوع یاتاقان
-	۱	۱۶۰	۱	۱	-	کفشک ثابت
۵۰	۱	۶۰	۵	۰/۵	۰	کفشک لولایی

^۱ Attitude angle



شکل ۴-۱ شبیه‌سازی یاتاقان کفشک ثابت. (الف) کمترین ضخامت بی‌بعد فیلم روغن و زاویه گرایش یاتاقان. (ب) ضریب اصطکاک و ضریب دبی روغن ورودی.



شکل ۴-۲ شبیه‌سازی یاتاقان کفشک لولایی. کمترین ضخامت بی‌بعد فیلم روغن بر حسب عدد سامرفیلد.

۴-۳- نتایج یاتاقان ژورنال

در این قسمت به بهینه‌سازی یاتاقان‌های ژورنال با کفشک ثابت با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات پرداخته شده است. که مسئله بهینه‌سازی، یک مسئله کمیینه‌سازی می‌باشد. ابتدا این کار با یک تابع هدف سپس دو و سه تابع هدف انجام شده است. منظور از توابع هدف، توابعی است که قرار است بهینه شوند، که توابع هدف در این مسئله، کمترین ضخامت روغن، تلفات اصطکاکی و بیشترین دما می‌باشد که باید کمترین ضخامت فیلم روغن بیشینه گردد تا یاتاقان دچار فرسودگی و خوردگی کمتری گردد همچنین تلفات اصطکاکی و بیشترین دما باید کمیینه گردند. این کمیینه‌سازی باعث می‌گردد که عمر

یاتاقان افزایش یافته و یاتاقان عملکرد بهتری داشته باشد. متغیرهای تصمیم مسئله، ضریب لقی و نسبت طول به قطر می باشد که این کار با دماهای ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه سانتی گراد و زاویه ی کفشک ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه سانتی گراد صورت گرفته است. در قسمتی دیگر هم از دما به عنوان متغیر تصمیم نیز استفاده شده است. برای قیود مسئله نیز از روش ترمیم استفاده شده به گونه ای که اگر ذرات خارج از فضای محاسباتی قرار گرفتند مقدار ذرات با مقداری که برای مرزهای فضای محاسباتی در نظر گرفته شده است برابر در نظر گرفته می شود.

این بهینه سازی برای بازه ای از ضریب لقی، نسبت طول به قطر و دما صورت گرفته است که این بازه برای ضریب لقی، نسبت طول به قطر و دما به ترتیب برابر با ۳۰-۴۰ میکرون، ۰/۲-۰/۸ و ۳۵-۴۵ می باشد. نیروی وارد بر یاتاقان ۲۰ کیلو نیوتن و سرعت ۱۰۰۰ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

۴-۳-۱- بهینه سازی با یک تابع هدف

در ابتدای امر هر کدام از توابع هدف به طور جداگانه بهینه شدند، که در جدول ۴-۲ مقدار بهینه هر کدام از توابع هدف بدون در نظر گرفتن توابع هدف دیگر برای یاتاقان با زاویه ی کفشک ۳۰ درجه آورده شده است.

جدول ۴-۲ بهینه سازی یاتاقان کفشک ثابت با یک تابع هدف.

$T_{max} (^{\circ}C)$	$H_f (w)$	$1/h \square_{min}$
۴۴/۱۰۴	۱۶۰/۶۱۲	۱/۰۷

۴-۳-۲- بهینه سازی با دو تابع هدف

آنچه در این مبحث به آن پرداخته شده است، بهینه سازی با دو تابع هدف می باشد، که این کار به ازای

دماهای مختلف ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد با دو روش MOPSO و روش وزنی صورت گرفته است. که روش اجرای این دو الگوریتم قبلا در فصل دو آورده شده است.

الف) روش MOPSO

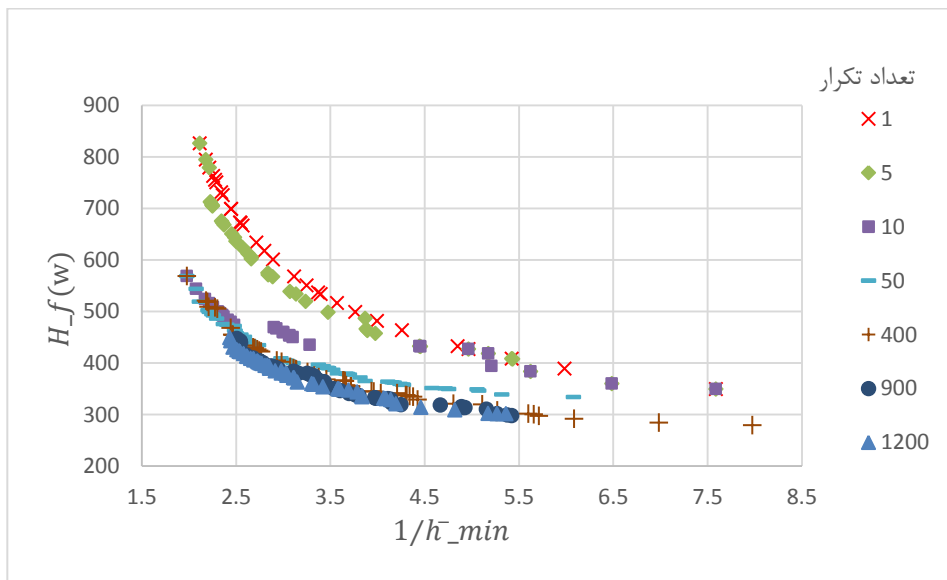
یکی از مباحثی که در بهینه‌سازی وجود دارد مفهوم پرتو می‌باشد. اگر مسئله، یک مسئله‌ی کمینه‌سازی باشد، هر چه نمودار به مبدا نزدیک‌تر باشد، به جواب بهینه نزدیک‌تر می‌شود. در زیر چند نمودار برای نمونه آورده شده است، که این مفهوم را توضیح می‌دهد.

در شکل ۳-۴ دمای ورودی و زاویه کفشک یاتاقان به ترتیب ۳۵ درجه سانتی‌گراد و ۳۰ درجه می‌باشد، و توابع هدف مسئله نیز اتلاف حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن در نظر گرفته شده است. این نمودار بیان می‌دارد که از تکرار ۷۰ به بعد تغییری در منحنی پرتو ایجاد نمی‌گردد، و ذرات، جبهه پرتو را پیدا کرده‌اند. منظور از جبهه پرتو نموداری است که با افزایش تعداد تکرار، نمودار حرکتی نکند و جابجا نشود. ذرات در تکرار ۹۰۰ به همگرایی رسیدند. منظور از همگرایی این است که با افزایش تکرار تغییری در مقدار ذرات حاصل نشود و ذرات همان مقادیر قبلی را داشته باشند.

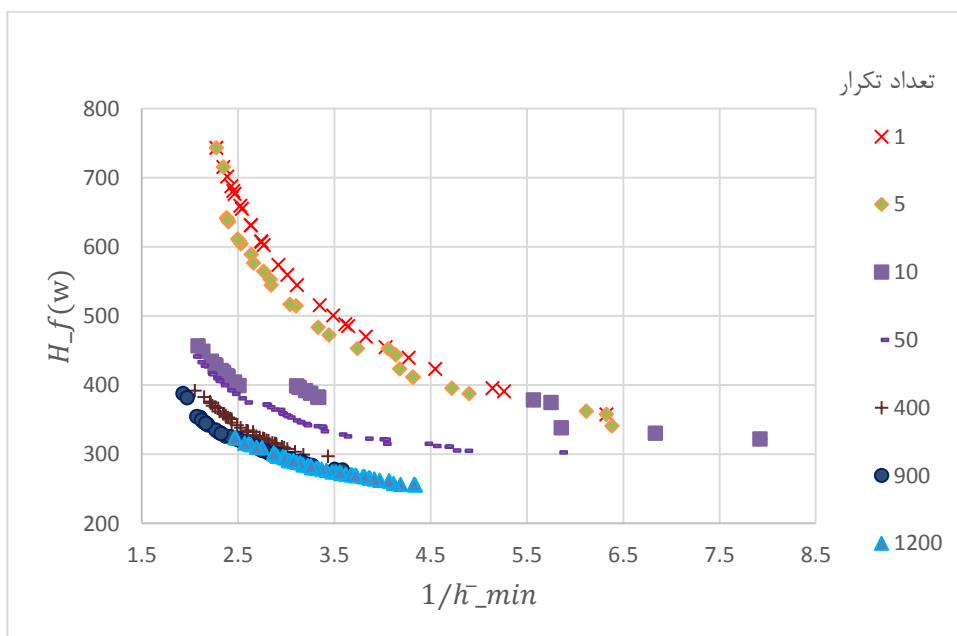
اعدادی که نمودار را تشکیل می‌دهند در واقع مقادیری هستند که توسط ذرات نامغلوب بدست آمدند، که این ذرات در مخزن قرار گرفتند. ذرات نامغلوب ذراتی هستند که در هیچ حالتی بدتر از ذرات دیگر نیستند و حداقل در یک حالت بهتر از ذرات دیگر می‌باشند. که در این نمودار ذرات نامغلوب، ذراتی هستند، که کمترین ضخامت فیلم روغن آن‌ها بیشترین مقدار است یا کمترین تلفات حرارتی را دارا می‌باشند و یا هم کمترین تلفات و بیشترین ضخامت فیلم روغن را دارند. تمام مقادیری که بالای منحنی پرتو قرار می‌گیرند مجموعه ذرات مغلوب می‌باشند، که توسط ذرات داخل مخزن مغلوب شدند.

همچنین شکل ۴-۴ همگرایی منحنی پرتو با دمای ورودی ۴۰ درجه سانتی‌گراد و با همان توابع هدف شکل ۳-۴ را نشان می‌دهد. آنچه از این نمودار پیداست ذرات، جبهه پرتو را در تکرار ۵۰۰ پیدا کردند، و

در تکرار ۹۰۰ به همگرایی رسیدند.

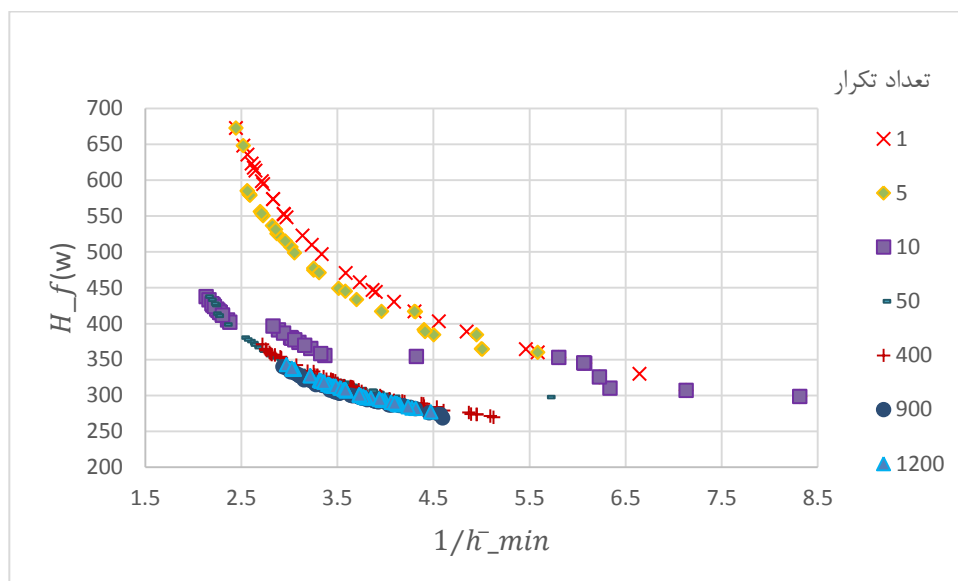


شکل ۳-۴ منحنی پرتو با دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد با توابع هدف اتلاف حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای تکرارها مختلف با روش MOPSO.



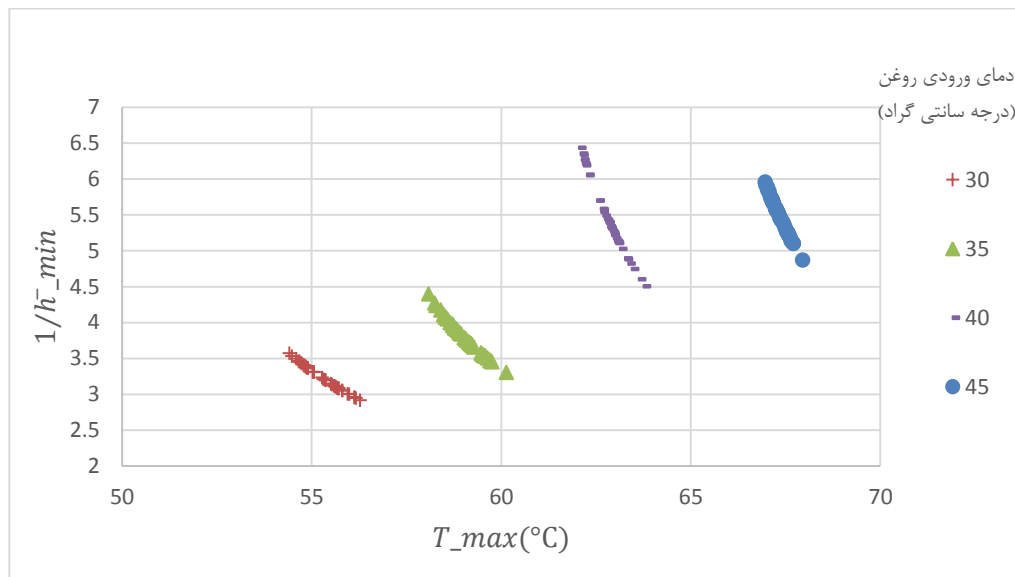
شکل ۴-۴ منحنی پرتو با دمای ورودی ۴۰ درجه سانتی‌گراد با توابع هدف اتلاف حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای تکرارها مختلف با روش MOPSO.

در شکل ۴-۵ دمای ورودی روغن ۴۵ داده شده است، و ذرات در تکرار ۴۰۰ جبهه پرتو را پیدا نموده و در تکرار ۸۰۰ به همگرایی رسیدند.



شکل ۴-۵ منحنی پرتو با دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد با توابع هدف اتلاف حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای تکرارها مختلف با روش MOPSO.

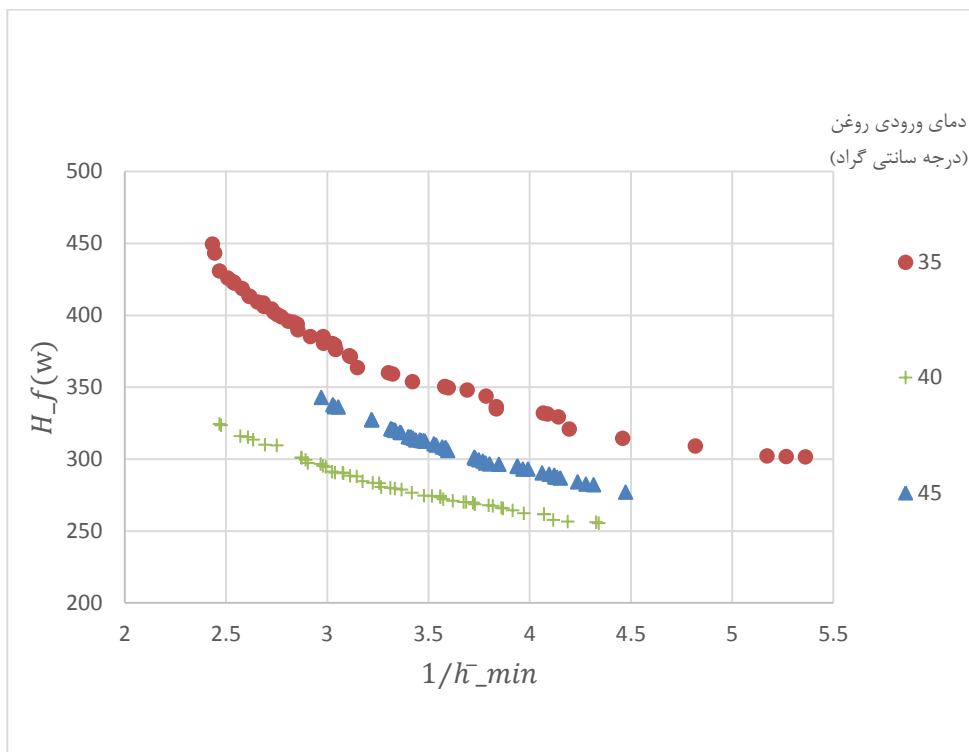
برای آنکه تاثیر دمای ورودی روغن بر روی توابع هدف معلوم شود شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۸ برای توابع هدف مختلف در زمان همگرایی رسم شده است، که در ادامه این نمودارها آورده شده است. شکل ۴-۶ نشان می‌دهد، که برای توابع هدف بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد از عملکرد بهتری برخوردار است و به مبدا نزدیک‌تر می‌باشد و هر دو تابع هدف در این مقدار کمتری نسبت به دماهای دیگر ورودی روغن را دارا می‌باشد. در جدول ۳-۴ متغیرهای تصمیم مسئله که مقادیر آن در نمودار بالا بدست آمده است، به صورت نمونه آورده شده است.



شکل ۴-۶ منحنی پرتو با توابع هدف بیشترین دما و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دماهای ورودی روغن مختلف با روش MOPSO.

جدول ۴-۳ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک ثابت با توابع هدف کمترین ضخامت فیلم روغن و بیشترین دما با روش MOPSO

بیشترین دما (درجه سانتی‌گراد)	معکوس ضخامت فیلم روغن (بی‌بعد)	نسبت طول به قطر (بی‌بعد)	ضریب لقی (میکرون)	دمای ورودی روغن (درجه سانتی‌گراد)
۵۴/۹۸	۳/۳۲۹	۰/۵۷۸	۸۴/۱۴	۳۰
۵۵/۳۵۷	۳/۱۹۴	۰/۵۷۸	۷۹/۸	
۵۸/۶۷	۴/۰۰۲	۰/۵۸۶	۹۵/۱۰	۳۵
۵۸/۸۴۶	۳/۸۹۹	۰/۵۸۷	۹۲/۲۴۰	
۶۱/۵۱۹	۷/۵۹۹	۰/۵۷۷	۱۷/۸۳۰	۴۰
۶۳/۶۵۵	۴/۵۷۰	۰/۵۷۷	۹۸/۷	
۶۶/۹۶	۵/۹۶۱	۰/۵۹۴	۱۲۲/۵۱۲	۴۵
۶۷/۵۲	۵/۱۳۲	۰/۵۹۴	۱۰۵/۰۰۰	



شکل ۴-۷ منحنی پرتو با توابع هدف اتلاف حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دماهای ورودی روغن مختلف با روش MOPSO.

شکل ۴-۷ بیانگر این موضوع است که برای بهینه‌سازی دو تابع کمترین ضخامت فیلم روغن و اتلاف حرارتی دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد دارای منحنی پرتو بهتری می‌باشد و از عملکرد مطلوبی برخوردار است. لذا انتخاب دما ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای دمای ورودی روغن زمانیکه این دو تابع از اهمیت خاصی برخوردار باشد، مناسب می‌باشد.

متغیرهای تصمیم مسئله به صورت موردی در جدول ۴-۴ ذکر گردیده است.

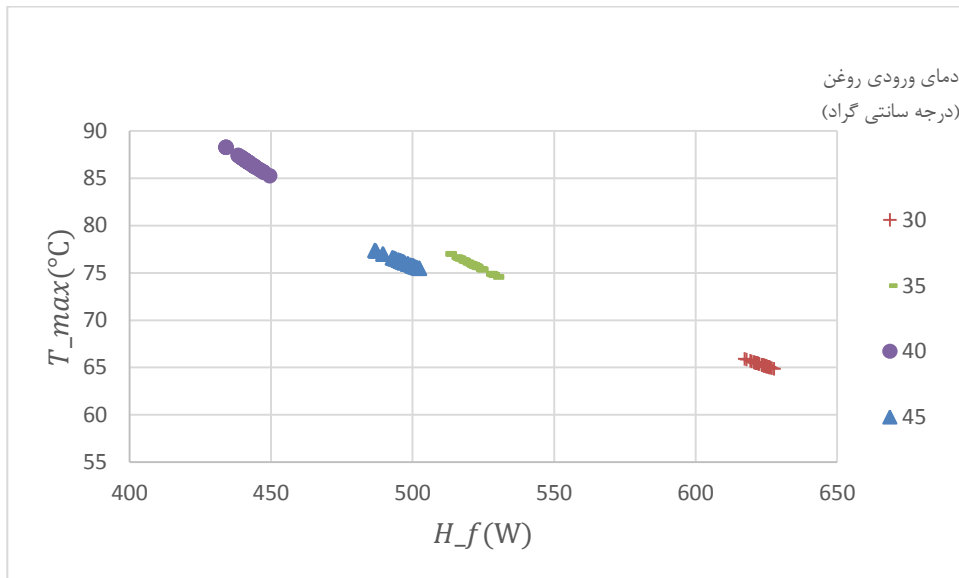
جدول ۴-۴ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک ثابت با توابع هدف کمترین ضخامت فیلم روغن و تلفات حرارتی با روش

MOPSO

تلفات حرارتی (وات)	معکوس ضخامت فیلم روغن(بی بعد)	نسبت طول به قطر (بی بعد)	ضریب لقی (میکرون)	دمای ورودی روغن (درجه سانتی گراد)
۳۳۱/۲۰۵	۴/۰۸۹	۰/۱۹۴	۱۶/۹	۳۵
۴۱۲/۸۸۴	۲/۶۱	۰/۲۴	۱۶/۳	
۳۰۱/۸۰۳	۵/۲۶۷	۰/۱۷۴	۱۷/۹	
۲۵۵/۳۵۵	۴/۲۴	۰/۱۶	۱۰/۴۲	۴۰
۳۱۵/۱۰۱	۲/۶۰	۰/۲۰	۹/۵۸	
۲۸۳/۱۴	۳/۲۵۷	۰/۱۸	۹/۷۴	
۲۸۲/۰۶	۴/۳۱	۰/۱۹۱	۱۶/۰	۴۵
۳۲۰/۲۹	۳/۳۲	۰/۲۲۲	۱۵/۹	
۳۴۲/۸۴	۲/۹۷	۰/۲۴	۱۶/۰	

در شکل ۴-۸ توابع هدف اتلاف حرارتی و بیشترین دمای روغن در نظر گرفته شده است که این توابع برای دماهای ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی گراد رسم شده است. این نمودار بیان می‌دارد که بعضی از ذرات در دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی گراد، بعضی از ذرات در دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی گراد را مغلوب می‌کند، ولی بیشتر ذرات در این دو دما هیچ گونه برتری نسبت به یکدیگر ندارند. و هر دو دما از یک مقدار متوسط بیشترین دما و اتلاف حرارتی برخوردارند. اما روغن با دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی-گراد با وجود اینکه بیشترین دمای آن نسبت به دماهای ورودی دیگر کمترین مقدار را دارا می‌باشد اما تلفات حرارتی آن زیاد می‌باشد. در دمای ۴۰ درجه نیز تلفات حرارتی، کم و بیشترین دما دارای مقدار زیادی است. شکل ۴-۸ به ازای یک سری متغیرهای ورودی و متغیرهای تصمیم بدست آمدند. در جدول

۴-۵ بعضی از این مقادیر آورده شده است.



شکل ۴-۸ منحنی پرتو با توابع هدف اتلاف حرارتی و بیشترین دمای روغن به ازای دماهای ورودی روغن مختلف با روش MOPSO.

جدول ۴-۵ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک ثابت با توابع هدف بیشترین دما و تلفات حرارتی با روش MOPSO.

تلفات حرارتی (وات)	بیشترین دما (درجه سانتی گراد)	نسبت طول به قطر (بی بعد)	ضریب لقی (میکرون)	دمای ورودی روغن (درجه سانتی گراد)
۵۱۴/۷۴	۷۶/۵۷	۰/۳۲۰	۱۷۲/۱	۳۵
۵۲۰/۷۰۵	۷۵/۷۰	۰/۳۲۶	۱۷۲/۲	
۴۳۹/۴۹	۸۷/۱۸	۰/۲۹۵	۱۳۲/۲۵	۴۰
۴۳۴/۲۰	۸۸/۲۵	۰/۲۹۰	۱۳۲/۲۳	
۴۸۹/۴۴	۷۶/۹۹	۰/۳۹۹	۲۱۳/۵۴	۴۵
۴۹۹/۴۰	۷۵/۸۰	۰/۴۱۲	۲۱۳/۳۶	

ب) روش وزن دهی

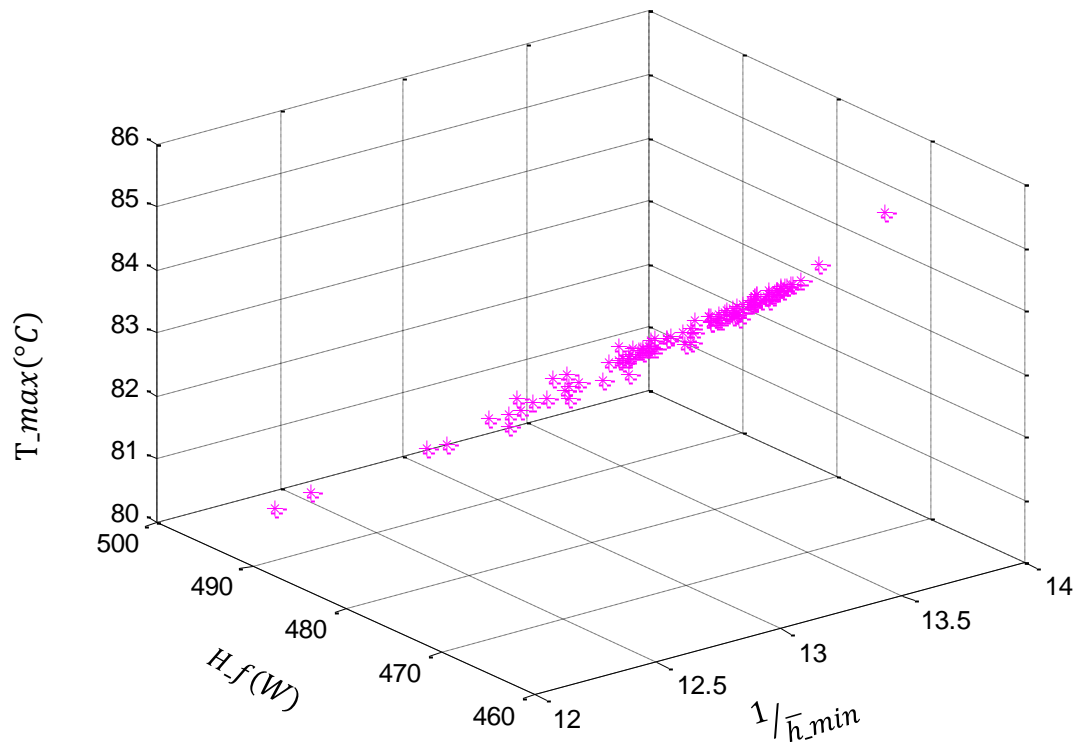
همانطور که در فصل دو گفته شد استفاده از روش وزن دهی با مشکلاتی همراه است که عمده ترین مشکل این روش در این است که توابع هدف باید به گونه ای با هم ترکیب شوند، که مطلوب ترین جواب را بتوان بدست آورد. در این مسئله توابع هدف متفاوت می باشد. توابع هدف در نظر گرفته شده نسبت فشار میانگین به حداکثر فشار و کمترین ضخامت فیلم روغن می باشد. به همین دلیل دو تابع $\frac{p_{avg}}{p_{max}}$ و $\frac{h_0}{c}$ به این دلیل می باشد که دو تابع سازگاری خوبی با یکدیگر دارند و از آنجایی که هر دو تابع دارای اهمیت یکسانی می باشد ضریب وزنی برای هر دو تابع ۰/۵ در نظر گرفته شده است. که مقدار بهینه این تابع ۰/۴۶۱۲۴ می باشد. و این مقادیر به ازای ضریب لقی ۹/۳۶۹ میکرون، نسبت طول به قطر ۰/۶۷۳ و دمای ورودی ۲۸ درجه سانتی گراد بدست آمده است.

۴-۳-۳- بهینه سازی با سه تابع هدف

زمانیکه توابع بیشترین دمای روغن، تلفات حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن، هر سه تابع اهمیت خاصی دارند و مقادیر این توابع مهم هستند باید هر سه تابع را به طور همزمان بهینه نمود. در این بخش نتایج بهینه سازی همزمان این سه تابع با استفاده از الگوریتم MOPSO آورده شده است. این کار برای دماهای ورودی مختلف روغن و به ازای زاویه های کفشک ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه صورت گرفته است، که این نتایج به شرح زیر می باشد:

الف) زاویه کفشک ۳۰ درجه

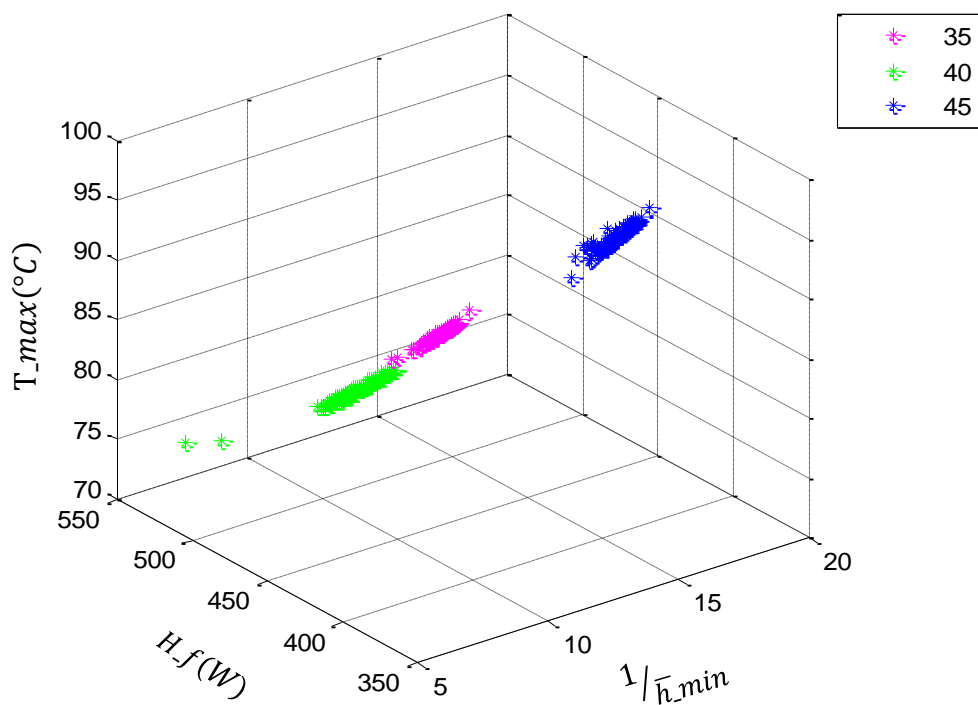
برای زاویه کفشک ۳۰ درجه منحنی پرتو برای دمای ورودی روغن ۳۵ درجه سانتی گراد به عنوان نمونه ترسیم شده است؛ سپس برای درک و مقایسه بهتر منحنی پرتو برای یاتاقان ورنال کفشک ثابت برای زاویه کفشک ۳۰ درجه به ازای مقادیر مختلف دما رسم شده است.



شکل ۴-۹ منحنی پرتو یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۳۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد روغن با روش MOPSO.

شکل ۴-۱۰ بیانگر تاثیر دمای ورودی روغن بر روی یاتاقان کفشک ثابت با زاویه ۳۰ درجه می‌باشد. دمای ورودی ۴۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دماهای ورودی ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد دارای بیشترین حداقل ضخامت فیلم روغن و حداکثر دمای کمتری است. و هیچکدام از این دماها برتری‌ای نسبت به یکدیگر ندارند. این در حالی است که دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد کمترین تلفات حرارتی را نسبت به دما-های دیگر دارا می‌باشد اما حداکثر دمای روغن و حداقل ضخامت فیلم روغن در این دمای ورودی مقدار مناسبی را نسبت به دماهای ورودی دیگر ندارد. می‌توان گفت که در این نمودار هیچکدام از دماها برتری-ای نسبت به یکدیگر ندارند. جدول ۴-۶ نمونه متغیرهای تصمیم این نمودار را نشان می‌دهد.

دمای ورودی روغن (درجه سانتی‌گراد)



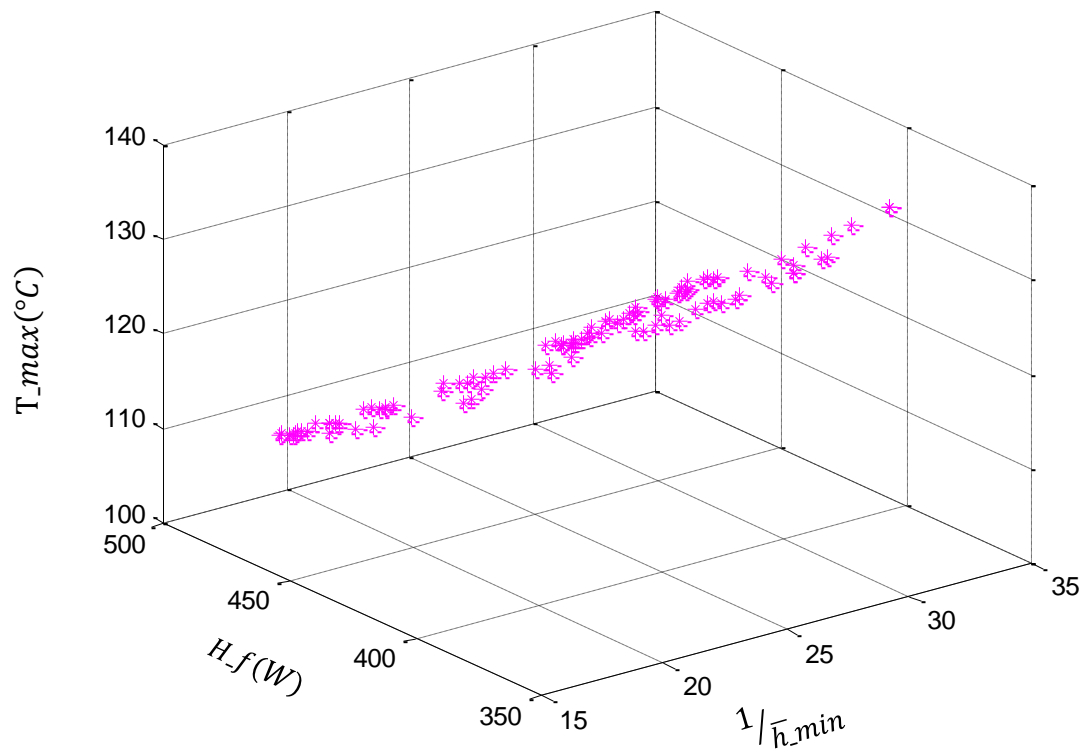
شکل ۴-۱۰ منحنی پرتو یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۳۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO.

جدول ۴-۶ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۳۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن با روش MOPSO.

تلفات حرارتی (وات)	بیشترین دما (درجه سانتی‌گراد)	معکوس ضخامت فیلم روغن (بی‌بعد)	نسبت طول به قطر (بی‌بعد)	ضریب لقی (میکرون)	دمای ورودی روغن (درجه سانتی‌گراد)
۴۷۲/۹۳۶	۸۵/۸۳۶	۱۳/۵۳	۰/۲۷۷	۱۵۰/۳۵۶	۳۵
۴۷۷/۲۸۷	۸۳/۰۸۵	۱۲/۷۳	۰/۲۸۸	۱۵۰/۳۵۶	
۵۳۴/۱۴۱	۷۴/۵۴۱	۶/۷۵۵	۰/۳۸۹	۱۰۲/۸۱۳	۴۰
۴۷۶/۴۰۴	۸۰/۸۶۰	۹/۷۴۵	۰/۳۳۰	۱۲۶/۰۹۱	
۳۸۴/۶۱۳	۹۶/۷۳۴	۱۳/۳۴۷	۰/۲۷۷	۱۲۷/۴۸	۴۵
۳۹۹/۹۲۰	۹۲/۶۹۸	۱۳/۸۰۹	۰/۲۹۳	۱۴۲/۷۹۶	

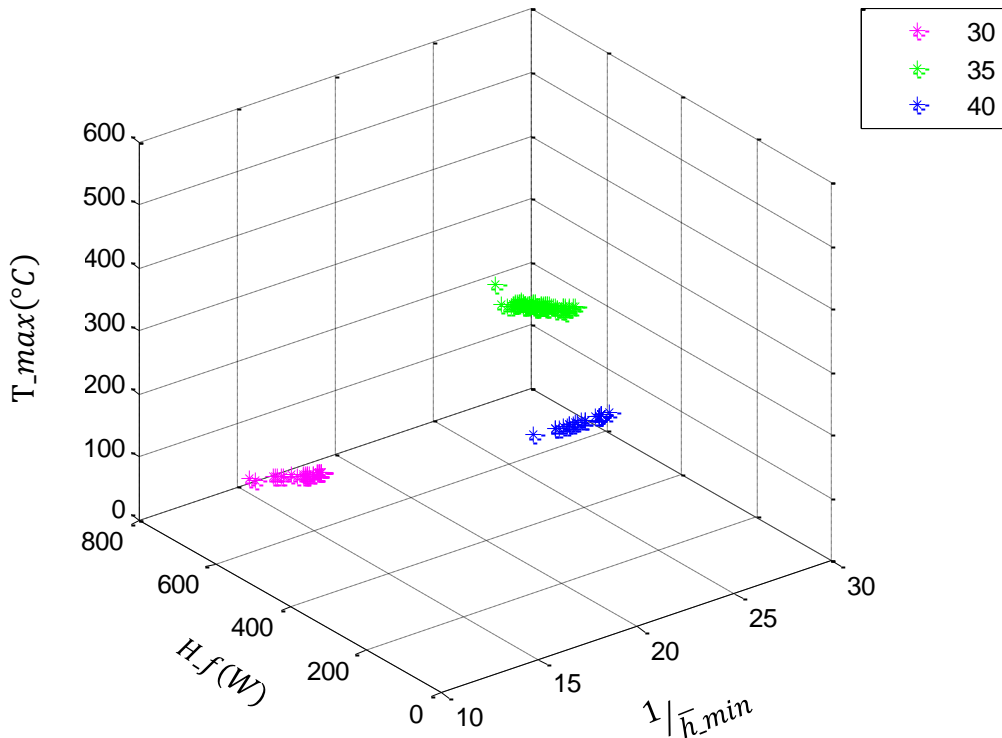
ب) زاویه کفشک ۶۰ درجه

منحنی پرتو برای زاویه کفشک ۶۰ درجه با دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد رسم شده است. که این منحنی در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است. در این نمودار ذرات دارای تلفات حرارتی در بازه ۴۰۰ تا ۵۰۰ وات می‌باشند و حداکثر درجه حرارت این ذرات بین ۱۰۰ تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد است. این در حالی است که معکوس کمترین ضخامت فیلم روغن در بازه ۱۹ تا ۳۵ قرار دارد.



شکل ۴-۱۱ منحنی پرتو یا تاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۶۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد روغن با روش MOPSO.

دمای ورودی روغن (درجه سانتی‌گراد)



شکل ۴-۱۲ منحنی پرتو یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۶۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO.

شکل ۴-۱۲ نیز بیان می‌دارد که در یاتاقان کفشک ثابت به ازای دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد حداقل ضخامت فیلم روغن دارای بیشترین مقدار و حداکثر دما دارای کمترین مقدار می‌باشد. از طرفی تلفات حرارتی برای دمای ورودی ۴۰ درجه سانتی‌گراد به جواب بهینه نزدیک‌تر می‌باشد. و برای روغن با دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد حداکثر دما و تلفات حرارتی بیشترین مقدار را دارد. می‌توان گفت در این نمودار روغن با دمای ورودی ۳۰ و ۴۰ درجه انتخاب مناسب‌تری نسبت به روغن با دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد باشد.

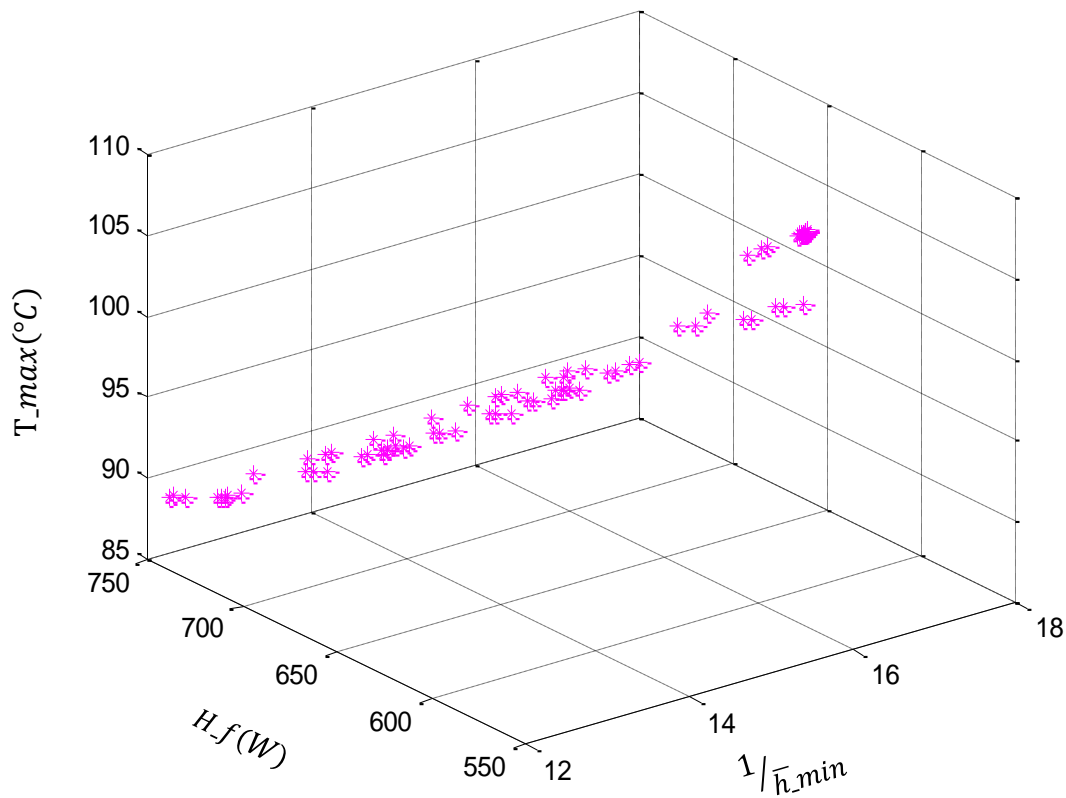
جدول ۴- ۷ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۶۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن با روش MOPSO.

دمای ورودی روغن (درجه سانتی‌گراد)	ضرب لقی (میکرون)	نسبت طول به قطر (بی‌بعد)	معکوس ضخامت فیلم روغن(بی‌بعد)	بیشترین دما (درجه سانتی‌گراد)	تلفات حرارتی (وات)
۳۰	۱۴۶/۸۶	۰/۲۵۳	۱۳/۴۰۱	۱۰۲/۲۵۰	۶۰۲/۵۷۷
	۱۳۸/۱۹۸	۰/۲۴۱	۱۳/۷۴	۱۰۷/۴۲۴	۵۷۷/۲۸
۳۵	۱۵۸/۷۷۱	۰/۲۶۲	۱۴/۸۰۸	۱۰/۸۲	۵۶۳/۱۷۴
	۱۴۶/۸۴۳	۰/۲۳۶	۱۶/۳۵۲	۱۱۳/۴۱۹	۵۱۲/۹۲۱
۴۰	۱۶۵/۷۶۲	۰/۲۱۳	۲۴/۶۴۷	۱۲۸/۸۸۴	۴۲۰/۳۶۹
	۱۶۵/۷۶۲	۰/۲۰۶	۲۶/۳۹۹	۱۳۳/۱۷۷	۴۰۶/۹۴۰

ج) زاویه کفشک ۹۰ درجه

در شکل ۴-۱۳ منحنی پرتو یاتاقان ژورنال کفشک ثابت با زاویه کفشک ۹۰ درجه و به ازای روغن با دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد رسم شده است. با وجود اینکه ذرات مقدار مطلوبی از توابع هدف کمترین ضخامت فیلم روغن و بیشترین دما را دارا می‌باشند اما تلفات حرارتی بالایی دارند.

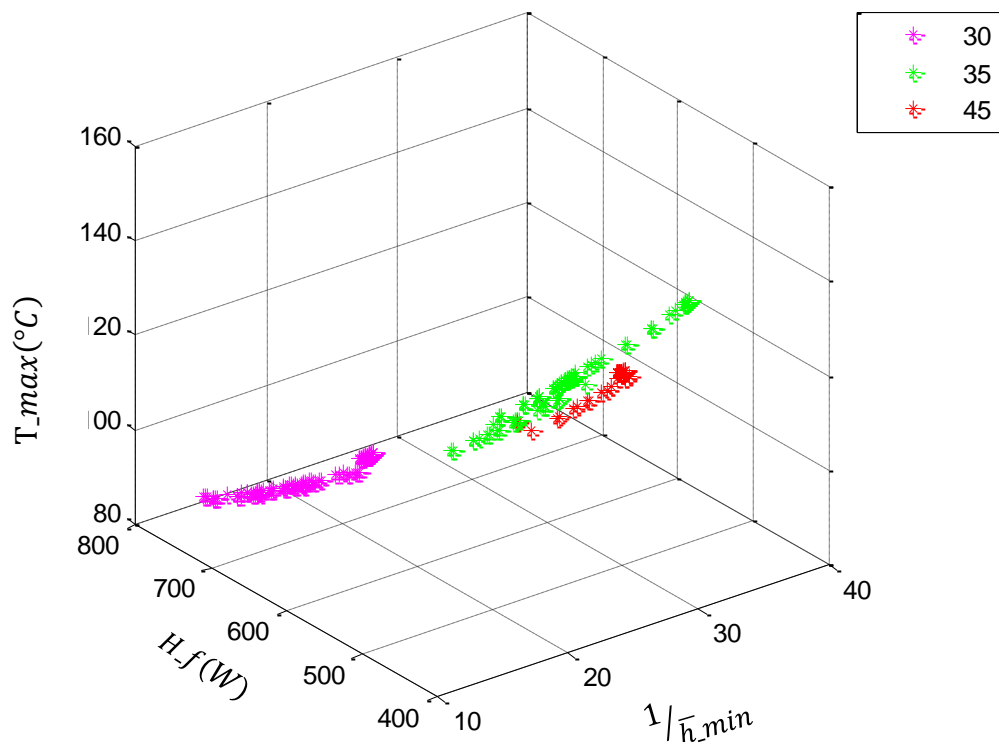
شکل ۴-۱۴ به ازای دماهای ورودی مختلف برای همین نوع یاتاقان ترسیم شده است که این نمودار بیان می‌دارد که دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار حداقل ضخامت فیلم روغن و بیشترین دمای روغن را دارا می‌باشد ولی تلفات حرارتی آن از دماهای دیگر بیشتر می‌باشد. در این نمودار هیچکدام از دماهای ورودی نسبت به هم برتری‌ای ندارند و انتخاب دمای ورودی روغن بسته به طراح دارد.



شکل ۴-۱۳ منحنی پرتو یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۹۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد روغن با روش MOPSO.

آنچه از تمامی نمودارهای این بخش پیداست تعیین مشخصات و پارامترهای طراحی یاتاقان ژورنال کفشک ثابت اهمیت زیادی بر روی توابع هدف مسئله دارد. و این توابع هدف نسبت به متغیرهای تصمیم مسئله حساسیت بالایی دارند. انتخاب نادرست هر پارامتر می‌تواند صدمات زیادی به یاتاقان وارد کند و باعث روان‌کاری نامناسب و کوتاه شدن عمر یاتاقان گردد.

دمای ورودی روغن (درجه سانتی‌گراد)



شکل ۴-۱۴ منحنی پرتو یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۹۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO.

جدول ۴-۸ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک ثابت با زاویه کفشک ۹۰ درجه با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن با روش MOPSO.

تلفات حرارتی (وات)	بیشترین دما (درجه سانتی‌گراد)	معکوس ضخامت فیلم روغن (بی‌بعد)	نسبت طول به قطر (بی‌بعد)	ضریب لقی (میکرون)	دمای ورودی روغن (درجه سانتی‌گراد)
۶۹۴/۴۶۴	۹۲/۴۷۰	۱۴/۴۷۴	۰/۲۷۷	۱۸۴/۹۰۱	۳۰
۷۱۰/۲۵۸	۹۰/۸۷۸	۱۳/۹۰۶	۰/۲۸۳	۱۸۴/۹۰۱	
۴۸۰/۴۶۱	۱۲۲/۷۳۵	۲۳/۹۸۶	۰/۲۱۳	۱۷۲/۶۶۹	۳۵
۵۴۰/۲۵۳	۱۱۰/۷۵۸	۱۹/۲۳۲	۰/۲۳۸	۱۷۲/۶۶۹	
۴۳۲/۹۶۵	۱۲۶/۴۴۸	۲۲/۳۹۶	۰/۲۲۷	۱۵۸/۲۲۳	۴۵
۴۰۳/۲۶۶	۱۳۵/۳۷۴	۲۴/۸۴۲	۰/۲۱۱	۱۵۲/۹۴۶	

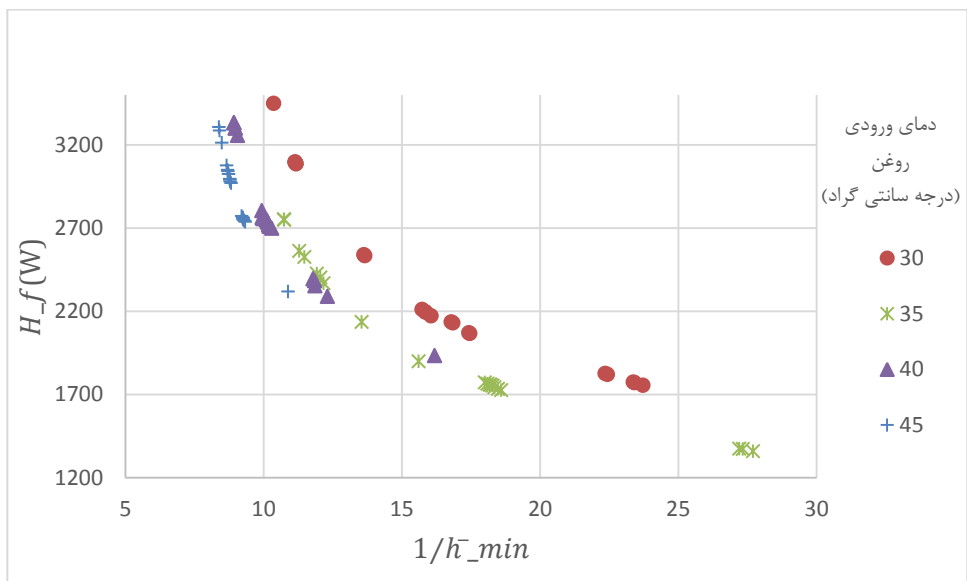
۴-۱- نتایج یاتاقان کفشک لولایی

در این قسمت به بهینه‌سازی یاتاقان‌های ژورنال کفشک لولایی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات پرداخته شده است. که یک مسئله‌ی کمینه‌سازی می‌باشد. توابع هدف در این بخش کمترین ضخامت فیلم روغن، تلفات اصطکاکی و بیشترین دما می‌باشد که همانند یاتاقان کفشک ثابت باید کمترین ضخامت فیلم روغن بیشینه گردد تا یاتاقان دچار فرسودگی و خوردگی کمتری گردد و روان‌کاری به درستی صورت گیرد. همچنین تلفات اصطکاکی و بیشترین دما باید کمینه گردد تا یاتاقان عملکرد مطلوبی داشته باشد. متغیرهای تصمیم مسئله، ضریب لقی و نسبت طول به قطر می‌باشد که این کار با دماهای ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ و زاویه‌ی کفشک ۳۰ درجه صورت گرفته است، برای قیود مسئله نیز مانند یاتاقان کفشک ثابت از روش ترمیم استفاده شده است.

۴-۱-۱- بهینه‌سازی با دو تابع هدف

یاتاقان کفشک لولایی با توابع هدف کمترین ضخامت فیلم روغن و بیشترین دما و تلفات حرارتی بهینه شده است. بار وارد بر یاتاقان همانند یاتاقان کفشک ثابت ۲۰ کیلو نیوتن و با همان مقدار سرعت می‌باشد. بازه ضریب لقی و نسبت طول به قطر برای یاتاقان کفشک لولایی به ترتیب ۱۰۰ تا ۶۰۰ میکرون و ۰/۳ تا ۰/۷ است.

نتایج بهینه‌سازی با دو تابع هدف در شکل‌های ۴-۱۵ تا ۴-۱۷ آورده شده است. این نمودارهای برای دمای ورودی ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد رسم شده است.



شکل ۴-۱۵ منحنی پرتو یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و توابع هدف اتلاف حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO.

در شکل بالا، منحنی پرتو یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و توابع هدف تلفات حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد رسم شده است. در این نمودار منحنی پرتو با دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دماهای ورودی دیگر قرار دارد در نتیجه روغن با این دمای ورودی در این شرایط مناسب نمی‌باشد. همچنین منحنی دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر از بقیه‌ی دماها قرار گرفته است. منحنی پرتو با دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد با وجود اینکه کمترین ضخامت فیلم روغن آن نسبت به دماهای ورودی دیگر بیشتر است تلفات حرارتی آن زیاد می‌باشد؛ همچنین از این نمودار می‌توان برداشت کرد که بعضی از ذرات دماهای ورودی ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد تلفات حرارتی کمتری را دارا می‌باشند.

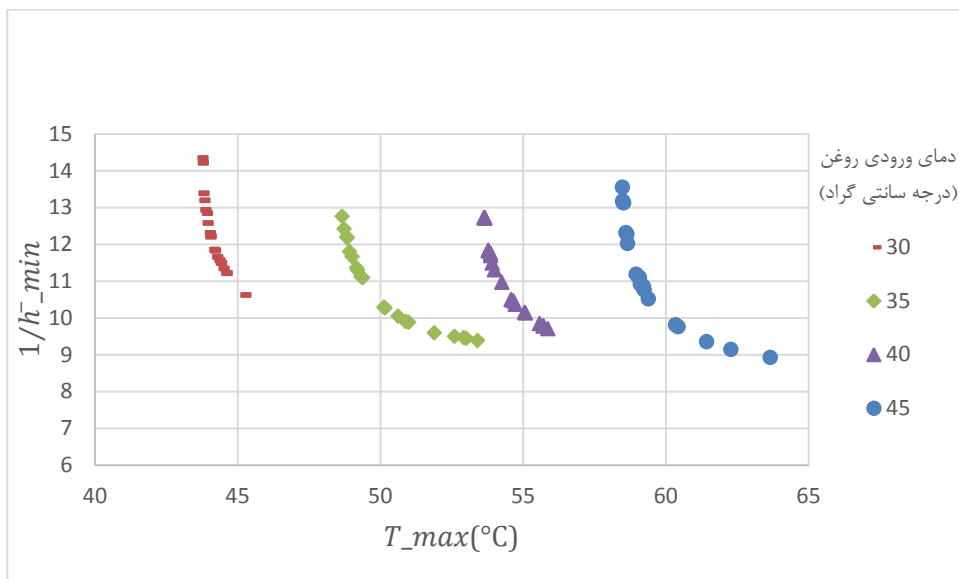
در جدول ۴-۹ نمونه‌ای از مقادیر متغیرهای تصمیم آورده شده است.

جدول ۴-۹ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک لولایی با توابع هدف تلفات حرارتی و کمترین ضخامت فیلم روغن با روش MOPSO.

تلفات حرارتی (وات)	معکوس ضخامت فیلم روغن(بی بعد)	نسبت طول به قطر (بی بعد)	ضریب لقی (میکرون)	دمای ورودی روغن (درجه سانتی گراد)
۲۴۴۸/۹۰۴	۱۴/۰۳۵	۰/۵۶۶	۳۶۹/۴۴۶	۳۰
۲۴۶۷/۱۶۳	۱۳/۹۶	۰/۵۶۵	۳۶۴/۹۷۲	
۲۱۶۷/۲۸۶	۱۳/۵۹۵	۰/۵۷۰	۳۲۴/۶۷۰	۳۵
۲۳۵۶/۷۵۰	۱۲/۲۸۰	۰/۵۶۹	۲۸۴/۷۵۷	
۱۹۳۳/۴۹۵	۱۶/۱۸۶	۰/۴۳۳	۳۷۷/۷۷۷	۴۰
۴۹۷۰/۷۶۶	۷/۸۵۹	۰/۶۶۰	۱۷۵/۸۸۶	
۳۲۸۶/۳۶۵	۸/۴۰۵	۰/۵۳۱	۱۸۸/۵۵۲	۴۵
۲۷۵۹/۵۷۴	۹/۲۵۴	۰/۵۶۳	۲۱۹/۷۰۰	

در شکل ۴-۱۶ ذرات با دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی گراد فیلم روغن، ذرات با دمای ورودی ۴۰ درجه سانتی گراد را مغلوب می کنند. اما بعضی از ذرات با دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی گراد توسط ذرات با دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی گراد مغلوب می شوند. همچنین در دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی گراد قسمت پایین منحنی که بیشترین ضخامت فیلم روغن را دارا می باشد توسط هیچکدام از ذرات مغلوب نمی شود و با وجود اینکه حداکثر دمای این ذرات نسبت به ذرات با دمای ورودی دیگر بیشترین مقدار را دارند اما حداقل ضخامت فیلم روغن این ذرات بیشترین مقدار است.

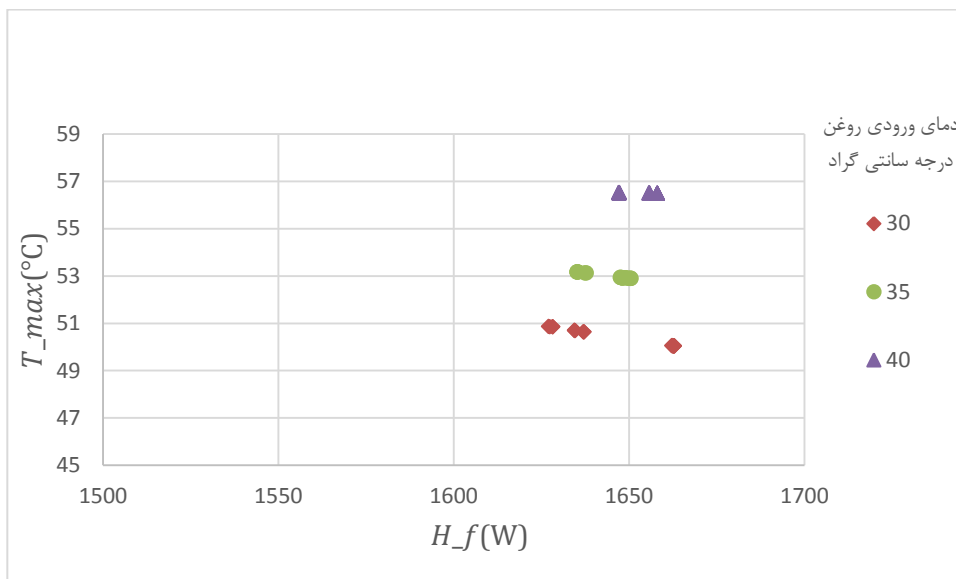
در جدول ۴-۱۰ نمونه متغیرهای تصمیم برای این توابع هدف آورده شده است.



شکل ۴-۱۶ منحنی پرتو یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و توابع هدف بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO.

جدول ۴-۱۰ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک لولایی با توابع هدف بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن با روش MOPSO.

بیشترین دما (درجه سانتی‌گراد)	معکوس ضخامت فیلم روغن (بی‌بعد)	نسبت طول به قطر (بی‌بعد)	ضریب لقی (میکرون)	دمای ورودی روغن (درجه سانتی‌گراد)
۴۳/۸۲۳	۱۲/۲۶۵	۰/۷۰۵	۳۹۵/۳۵۹	۳۰
۴۳/۶۸۹	۱۲/۷۸۳	۰/۷۰۵	۴۱۶/۱۷۶	
۴۹/۵۷۰	۱۰/۷۶۱	۰/۷۰۲	۲۹۵/۳۲۳	۳۵
۴۹/۹۴۶	۱۰/۴۵۹	۰/۷۰۱	۲۸۱/۲۲۶	
۵۵/۰۰۱	۱۰/۱۵۳	۰/۷۰۲	۲۴۴/۸۷۷	۴۰
۵۳/۸۶۰	۱۱/۵۷۶	۰/۷۳۳	۲۹۸/۰۲۱	
۶۰/۲۲۶	۹/۸۵۴	۰/۷۰۱	۲۱۳/۰۸۱	۴۵
۶۱/۳۵۴	۹/۳۶۱	۰/۷۰۱	۱۹۱/۷۶۳	



شکل ۴-۱۷ منحنی پرتو یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و توابع هدف اتلاف حرارتی و بیشترین دمای روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO.

منحنی پرتو بالا نشان می‌دهد که برای توابع هدف تلفات حرارتی و بیشترین دما، روغن با دمای

ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به روغن با دمای ورودی ۳۵ و ۴۵ از عملکرد بهتری برخوردار است.

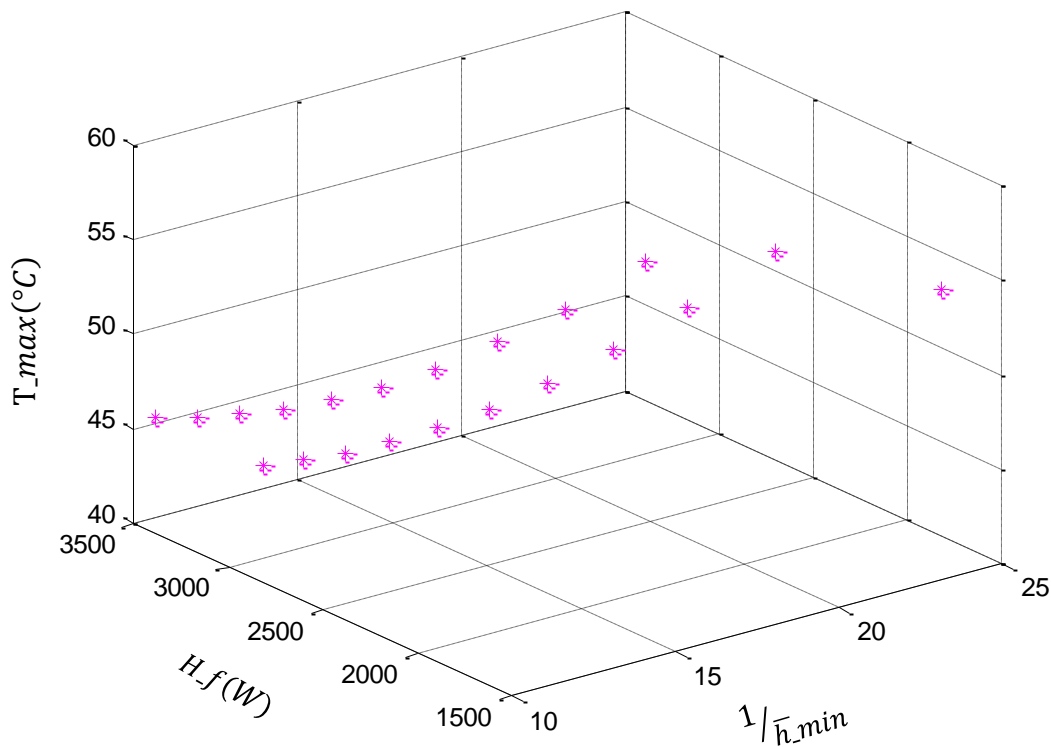
جدول ۴-۱۱ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک لولایی با توابع هدف اتلاف حرارتی و بیشترین دمای روغن روغن با روش MOPSO.

تلفات حرارتی (وات)	بیشترین دما (درجه سانتی‌گراد)	نسبت طول به قطر (بی‌بعد)	ضریب لقی (میکرون)	دمای ورودی روغن (درجه سانتی‌گراد)
۱۶۲۸/۲۸۵	۵۰/۸۴۶	۰/۵۴۸	۷۵۵/۶۱۳	۳۰
۱۶۳۶/۹۹۹	۵۰/۶۳۸	۰/۵۲۲	۷۵۵/۵۲۸	
۱۶۴۹/۸۹۵	۵۲/۸۹۸	۰/۵۸۵	۵۳۸/۱۵۷	۳۵
۱۶۳۵/۳۱۸	۵۳/۱۶۰	۰/۵۷۴	۵۳۸/۴۱۱	
۱۲۹۰/۸۲۶	۶۰/۳۴۷	۰/۵۴۲	۵۵۶/۳۰۲	۴۰
۱۷۰۶/۱۹۱	۵۶/۴۶۲	۰/۵۹۷	۳۷۴/۳۲۸	

جدول ۴-۱۱ متغیرهای تصمیم این مسئله را دارا می‌باشد.

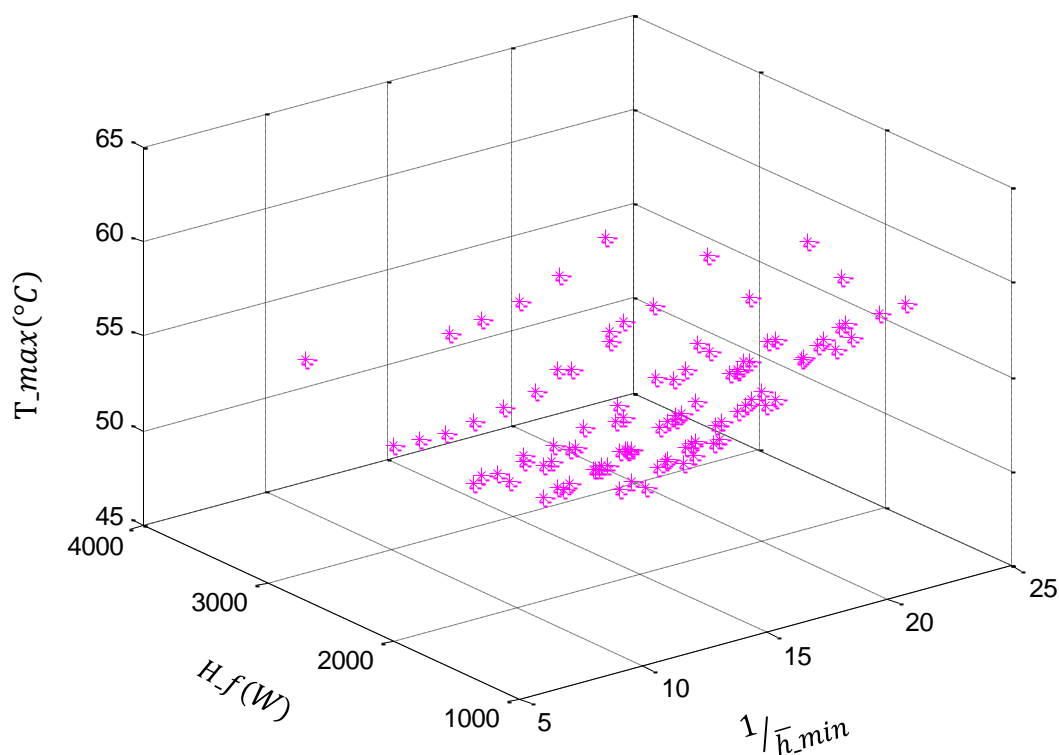
۴-۱-۲- بهینه‌سازی با سه تابع هدف

در این بخش هر سه تابع تلفات حرارتی، بیشترین دما و کمترین ضخامت فیلم روغن به طور همزمان بهینه می‌شوند، که این بهینه‌سازی برای یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و روغن با دماهای ورودی ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته است. منحنی پرتو این دماها در شکل‌های ۴-۱۸ تا ۴-۲۲ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۸ منحنی پرتو یاتاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد با روش MOPSO.

تلفات حرارتی برای روغن با دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد بین ۳۰۰ تا ۳۵۰۰ و حداکثر دما بین ۴۰ تا ۵۲ درجه سانتی‌گراد قرار دارند. در این دما طول بازه معکوس ضخامت فیلم روغن بیشتر از دماهای دیگر می‌باشد.



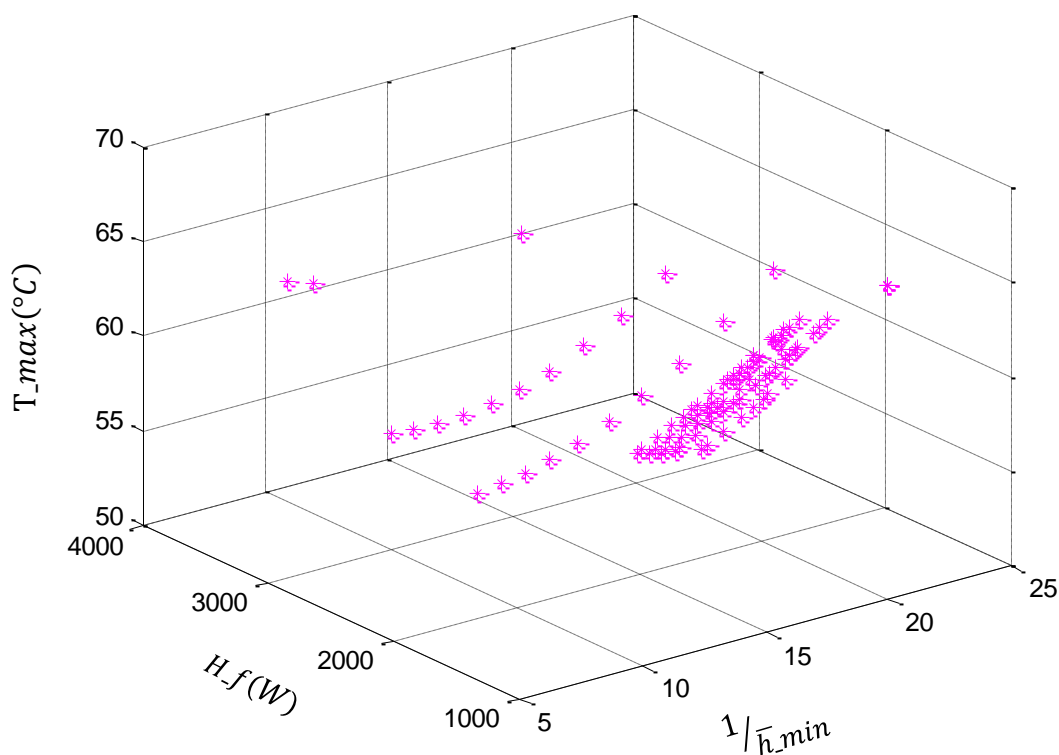
شکل ۴-۱۹ منحنی پرتو یا تاقان کفشک لولایی با ۵ کفشکو توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد با روش MOPSO.

شکل ۴-۱۹ نشان می‌دهد که روغن با دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد بازه حرارتی بیشتری نسبت به دماهای دیگر دارد.

در دمای ورودی ۴۰ درجه سانتی‌گراد تجمع ذرات به سمت راست نمودار بیشتر است و این قسمت از

نمودار تلفات کمتری را نسبت به بقیه نقاط دارا می‌باشد. در دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد حداکثر دما، نسبت به دماهای دیگر بیشتر می‌باشد.

از شکل ۴-۲۰ می‌توان فهمید که در دمای ورودی ۴۰ درجه سانتی‌گراد تجمع ذرات به سمت راست نمودار بیشتر است و این قسمت از نمودار تلفات کمتری را نسبت به بقیه نقاط دارا می‌باشد.

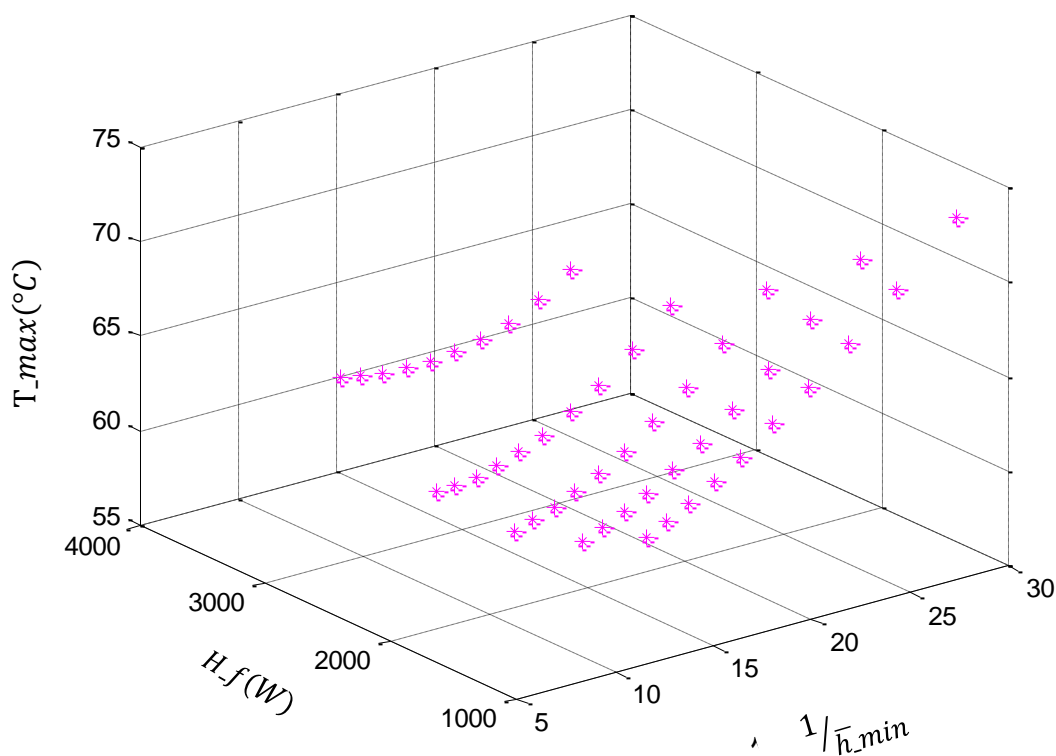


شکل ۴-۲۰ منحنی پرتو یا تاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۴۰ درجه سانتی‌گراد با روش MOPSO.

شکل ۴-۲۱ بیان می‌دارد که در دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد حداکثر دما، نسبت به دماهای دیگر بیشتر است.

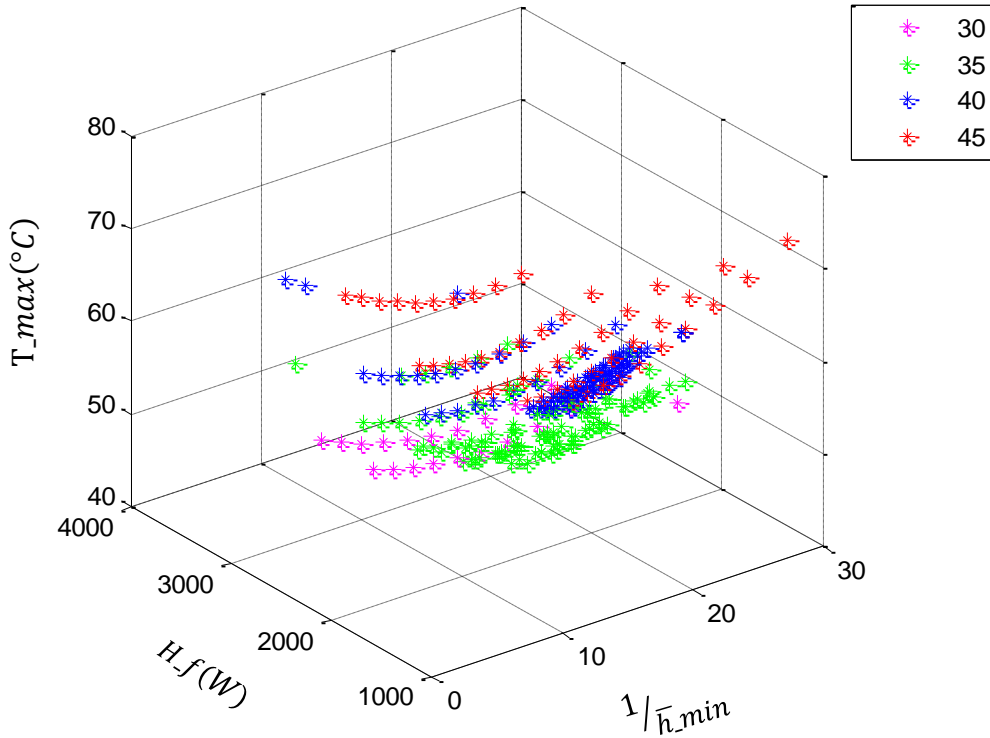
برای مقایسه بهتر، شکل ۴-۲۳ برای هر سه تابع هدف و دماهای ورودی مختلف نمایش داده شده

است. این نمودار بیان می‌دارد که منحنی پرتوی روغن با دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دماهای ورودی دیگر و منحنی پرتو با دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر از منحنی‌های دیگر قرار دارد. ولی نمی‌توان با اطمینان گفت که روغن با دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد بهترین عملکرد و روغن با دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد بدترین عملکرد را دارد. زیرا بعضی از ذرات با دمای ورودی ۳۰ درجه توسط ذرات دیگر مغلوب می‌شوند و بالعکس برای دما ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد، ذرات توانایی مغلوب کردن بعضی ذرات دیگر را دارند.



شکل ۴-۲۱ منحنی پرتو یا تاقان کفشک لولایی با ۵ کفشک و توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد با روش MOPSO.

دمای ورودی زوغن (درجه سانتی گراد)



شکل ۴-۲۲ منحنی پرتویاتاقان کفشک ثابت با ۵ کفشک و توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن به ازای دمای ورودی مختلف روغن با روش MOPSO.

این منحنی‌ها به ازای متغیرهای تصمیم مختلفی رسم شدند؛ که در جدول ۴-۱۲ آورده شده است. همانطور که در جدول آمده است با افزایش دمای ورودی روغن حداکثر دمای فیلم افزایش می‌یابد همچنین می‌توان گفت برای یاتاقانی با این شرایط نسبت طول به قطر ۰/۴ مقدار مناسبی می‌باشد ولی ضریب لقی برای روغن با دمای ورودی مختلف، متفاوت می‌باشد.

جدول ۴-۱۲ متغیرهای تصمیم یاتاقان کفشک لولایی با توابع هدف اتلاف حرارتی، بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن با روش MOPSO.

تلفات حرارتی (وات)	بیشترین دما (درجه سانتی گراد)	معکوس ضخامت فیلم روغن(بی بعد)	نسبت طول به قطر (بی بعد)	ضریب لقی (میکرون)	دمای ورودی روغن (درجه سانتی گراد)
۲۰۱۰/۷۶۳	۵۷/۳۳۶	۱۷/۰۲	۰/۴	۳۰۰	۳۰
۲۱۶۹/۷۷۹	۵۴/۸۷۰	۱۵/۵۲	۰/۴۳۲	۳۰۰	
۲۰۲۸/۷۱۹	۶۳/۱۷۸	۱۳/۷۸۰	۰/۴	۲۱۱/۱۱	۳۵
۲۱۹۶/۱۱۴	۶۱/۰۳	۱۲/۷۲۵	۰/۴۳۲	۲۱۱/۱۱	
۲۲۰۶/۵۶۷	۶۸/۶۷۵	۱۱/۲۸۲	۰/۴۳	۱۵۵/۵۵	۴۰
۳۴۴۳/۱۰۳	۶۳/۰۴۸	۹/۱۱۲	۰/۶۶	۱۵۵/۵۵	
۱۷۰/۱/۷۱	۷۳/۵۵۱	۱۲/۲۴۶	۰/۴	۱۵۵/۵۵	۴۵
۱۸۴۴/۳۱۱	۷۱/۶۸۲	۱۱/۴۷۸	۰/۴۳	۱۵۵/۵۵	

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتیجه‌گیری:

بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و با توجه به سازگار بودن این روش با نوع مسئله، روش بسیار خوب و کارآمدی می‌باشد. متغیرهای تصمیم مسئله و دمای ورودی فیلم روغن تاثیر بسیار زیادی بر روی مقدار بهینه حداقل ضخامت فیلم روغن، حداکثر دمای ورودی و تلفات حرارتی دارد. در یاتاقان کفشک ثابت و با توابع هدف بیشترین دمای روغن و کمترین ضخامت فیلم روغن دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد از عملکرد بهتری برخوردار است. در یاتاقان کفشک لولایی نیز با این توابع هدف ذرات با دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد فیلم روغن، ذرات با دمای ورودی ۴۰ درجه سانتی‌گراد را مغلوب می‌کنند. اما بعضی از ذرات با دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد توسط ذرات با دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد مغلوب می‌شوند.

بهینه‌سازی با تابع هدف کمترین ضخامت فیلم روغن و اتلاف حرارتی برای یاتاقان کفشک ثابت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد دارای منحنی پرتو بهتری می‌باشد و از عملکرد مطلوبی برخوردار است. لذا انتخاب دما ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای دمای ورودی روغن زمانیکه این دو تابع از اهمیت خاصی برخوردار باشد، مناسب می‌باشد. در یاتاقان کفشک لولایی نیز دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دماهای

ورودی دیگر قرار دارد در نتیجه روغن با این دمای ورودی در این شرایط مناسب نمی‌باشد. همچنین منحنی دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر از بقیه‌ی دماها قرار گرفته است. منحنی پرتو با دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد با وجود اینکه کمترین ضخامت فیلم روغن آن نسبت به دماهای ورودی دیگر بیشتر است تلفات حرارتی آن زیاد می‌باشد.

در یاتاقان کفشک ثابت زمانی که توابع هدف مسئله اتلاف حرارتی و بیشترین دمای روغن در نظر گرفته شود. بعضی از ذرات در دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد، بعضی از ذرات در دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد را مغلوب می‌کند، ولی بیشتر ذرات در این دو دما هیچ‌گونه برتری نسبت به یکدیگر ندارند. و هر دو دما از یک مقدار متوسط بیشترین دما و اتلاف حرارتی برخوردارند. اما روغن با دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد با وجود اینکه بیشترین دمای آن نسبت به دماهای ورودی دیگر کمترین مقدار را دارا می‌باشد اما تلفات حرارتی آن زیاد می‌باشد. در دمای ۴۰ درجه نیز تلفات حرارتی، کم و بیشترین دما دارای مقدار زیادی است. در یاتاقان کفشک لولایی نیز، روغن با دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به روغن با دمای ورودی ۳۵ و ۴۵ از عملکرد بهتری برخوردار است.

در یاتاقان کفشک ثابت زمانی که هر سه تابع هدف بهینه می‌شوند دمای ورودی ۴۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دماهای ورودی ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد دارای بیشترین حداقل ضخامت فیلم روغن و حداکثر دمای کمتری است. و هیچکدام از این دماها برتری‌ای نسبت به یکدیگر ندارند. این در حالی است که دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد کمترین تلفات حرارتی را نسبت به دماهای دیگر دارا می‌باشد اما حداکثر دمای روغن و حداقل ضخامت فیلم روغن در این دمای ورودی مقدار مناسبی را نسبت به دماهای ورودی دیگر ندارد. می‌توان گفت که در این نمودار هیچکدام از دماها برتری‌ای نسبت به یکدیگر ندارند. در یاتاقان کفشک لولایی نیز روغن با دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دماهای ورودی دیگر و منحنی پرتو با دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر از منحنی‌های دیگر قرار دارد. ولی نمی‌توان با

اطمینان گفت که روغن با دمای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد بهترین عملکرد و روغن با دمای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد بدترین عملکرد را دارد. زیرا بعضی از ذرات با دمای ورودی ۳۰ درجه توسط ذرات دیگر مغلوب می‌شوند و بالعکس برای دما ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد، ذرات توانایی مغلوب کردن بعضی ذرات دیگر را دارند.

انتخاب پارامترهای مسئله بستگی به نیاز طراح و شرایط مسئله دارد با توجه به اینکه مسئله نسبت به این پارامترها حساسیت بالایی دارد با انتخاب درست و بهینه می‌توان به بهبود عملکرد یاتاقان‌ها کمک بزرگی انجام داد.

پیشنهادها:

کارهایی که می‌توان در آینده انجام داد به صورت موردی در زیر ذکر گردیده است:

- بهینه‌سازی یاتاقان‌های ژورنال با در نظر گرفتن تغییر شکل کفشک‌ها و اضافه نمودن این تابع به توابع هدف مسئله، با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات.
- بررسی تاثیر دیگر پارامترهای ورودی بر روی یاتاقان‌های ژورنال با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات.
- بهینه‌سازی دیگر یاتاقان‌ها با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات.
- افزایش ابعاد مسئله در بهینه‌سازی یاتاقان‌ها با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات.
- بهینه‌سازی با دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مقایسه بین روش ازدحام ذرات و روش‌های بهینه‌سازی دیگر.

منابع

- [1] S. Yang, C. Kim, and W. Lee, "Tribology international prevention of fluttering fatigue damage in a tilting pad journal bearing," vol. 42, pp. 816–822, 2009.
- [2] M. Solides and L. Cnrs, "Thermohydrodynamic design. charts for tilting-pad journal bearings," vol. 118, no. January, pp. 232–238, 1996.
- [3] P. Taylor, A. A. Raimondi, and J. Boyd, "A solution for the finite journal bearing and its application to analysis and design : I," no. August 2015, 2011.
- [4] Nadia Nedjah, "Multi-objective swarm intelligent systems", vol. 261. 2010.
- [5] S. Boedo and S. L. Eshkabilov, "Optimal shape design of steadily loaded journal bearings using genetic algorithms," *Tribol. Trans.*, vol. 46, no. 1, pp. 134–143, 2003.
- [6] S.K. Talluri and H.Hirani, "Parameter optimization of journal bearing using genetic algorithm," *Tribol. Trans.*, vol. 2, no. 1, pp. 7–21, 2003.
- [7] H. Saruhan, K. Rouch, and C. Roso, "Design Optimization of Tilting-Pad Journal Bearing Using a Genetic Algorithm," *Int. J. Rotating Mach.*, vol. 10, no. 4, pp. 301–307, 2004.
- [8] H. Hirani and N. P. Suh, "Journal bearing design using multiobjective genetic algorithm and axiomatic design approaches," *Tribol. Int.*, vol. 38, no. 5, pp. 481–491, 2005.
- [9] S. Gupta, R. Tiwari, and S. B. Nair, "Multi-objective design optimisation of rolling bearings using genetic algorithms," *Mech. Mach. Theory*, vol. 42, no. 10, pp. 1418–1443, 2007.
- [10] S. Arabia, "Optimum design of hydrostatic journal bearings Part I: Maximum load capacity," pp. 155–161, 1984.
- [11] H. Hashimoto and K. Matsumoto, "Improvement of operating characteristics of high-

speed hydrodynamic journal bearings by optimum design: part i— formulation of methodology and its application to elliptical bearing design,” *J. Tribol.*, vol. 123, no. 2, p. 305, 2001.

- [12] J. Ghorbanian, M. Ahmadi, and R. Soltani, “Design predictive tool and optimization of journal bearing using neural network model and multi-objective genetic algorithm,” *Sci. Iran.*, vol. 18, no. 5, pp. 1095–1105, 2011.
- [13] H. Hirani and T. V. V. L. N. Rao, “Optimization of journal bearing groove geometry using genetic algorithm,” *NaCoMM03, IIT Delhi, India*, vol. 1, pp. 1–9, 2003.
- [14] L. Roy and S. K. Kakoty, “Optimum groove location of hydrodynamic journal bearing using genetic algorithm,” *Adv. Tribol.*, vol. 2013, 2013.
- [15] A. a. Elsharkawy and L. H. Guedouar, “Inverse solution for finite journal bearings lubricated with couple stress fluids,” *Tribol. Int.*, vol. 34, pp. 107–118, 2001.
- [16] L. Tudose and C. Stanescu, “Optimal design of rolling-contact bearings via evolutionary algorithms,” no. April, pp. 1–13, 2011.
- [17] F. Salem, “Optimum design of hydrostatic journal bearings part ii : minimum power losses,” 1984.
- [18] T. C. and R. Beightler, C.S, Lo, “Optimal design by geometric programming,” *J. Eng. Ind. Trans. ASME*, pp. 191–196, 1970.
- [19] M. Clerc and J. Kennedy, “The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 1, pp. 58–73, 2002.
- [20] R. L. Escobar, “Parameter prediction in dynamic analysis using response surface method and multi-objective genetic algorithms vulkan do brasil,” vol. 2, no. 2, 2007.
- [21] Hait. Saruhan “Design Optimization Of Mechanical Systems Using Genetic algorithms,” vol.2, no. Tenimuz, pp.77-84,2003.
- [22] D. Bunnag and M. Sun, “Genetic algorithm for constrained global optimization in continuous variables,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 171, pp. 604–636, 2005.
- [23] J. Moore and R. Chapman, “Application of particle swarm to multiobjective optimization,” *Dep. Comput. Sci. Softw. Eng. Dep. Auburn Univ.*, pp. 1–4, 1999.
- [24] C. W. Reynolds, “Flocks , Herds , and Schools : A distributed behavioral model 1.”
- [25] A. Hoorfar, “Evolutionary programming in electromagnetic optimization: A review,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 3 I, pp. 523–537, 2007.

- [26] C. Intelligence and A. Introduction computational intelligence : an introduction chapter 3 : *Evolutionary Computing*, no. Part 2.
- [27] J. Kennedy and R. Mendes, "Population structure and particle swarm performance," *Proc. 2002 Congr. Evol. Comput. CEC 2002*, vol. 2, pp. 1671–1676, 2002.
- [28] R. C. Eberhart and Y. Shi, "Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization," *ep'98*, pp. 611–616, 1998.
- [29] R.C.Eberhat, *Computational intelligence pc tools*. 1996.
- [30] C. a. Coello Coello and M. S. Lechuga, "MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization," *Proc. 2002 Congr. Evol. Comput. CEC 2002*, vol. 2, pp. 1051–1056, 2002.
- [31] V. Kumar, "Multi-objective particle swarm optimization: an introduction," *smart comput. rev.*, vol. 4, no. 5, 2014.
- [32] C. a C. Coello, G. T. Pulido, and M. S. Lechuga, "Handling multiple objectives with particle swarm optimization," *Evol. Comput. IEEE Trans.*, vol. 8, no. 3, pp. 256–279, 2004.
- [33] K. Deb, "Multi-objective optimization using evolutionary algorithms," *john wiley & sons, ltd.* p. 497, 2001.
- [34] M. Engineering, "Performance characteristics of a misaligned single pad externally adjustable fluid-film bearing," 2008.
- [35] M. Testing, "Partial journal bearings with couple stress fluids : an approximate closed-form," vol. 2, no. Ii, pp. 21–26, 2012.
- [36] V. R. Nosov and L. Vibrs, "Short Journal Bearings With Misaligned Axes," no. 52, pp. 1–16.
- [37] G. W. Stachowiak and A. W. Batchelor, "Engineering tribology," p. 769. [36] C. M. Lewandowski, N. Co-investigator, and C. M. Lewandowski, *No Title No Title*, vol. 1. 2015.
- [38] Raimondi AA and Boyd J, "A solution for the finite journal bearing and its application to analysis and design ii," *ASLE Transactions*, 1(1): 174-193, 1958.
- [39] Reynolds O, "On the Theory of lubrication and its application to mr. beauchamp tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil," *philosophical transactions of the royal society*, 177: 157-234. 1886.
- [40] Sommerfeld A, "Zur hydrodynamische theorie der schmiermittelreibung," *zeitschrift*

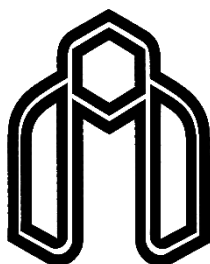
fur math. und phys., vol. 50, pp. 97–155, 1904.

- [41] B. Soediono, “Fluid film lubrication theory and design,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, p. 160, 1989.
- [42] P. Akbarzadeh, “Numerical study of thermohydrodynamic characteristics of oil tilting-pad journal bearings with a self-pumping fluid flow circulation,” *tribol. trans.*, vol. 58, no. 1, pp. 18–30, 2015.

Abstract

Optimization journal bearings are very important because of their numerous applications in various industries such as power plants, turbomachinery, electrical machinery, shipbuilding, and etc. this thesis focuses on the use of particle swarm algorithms in developing an efficient optimum design method for finite bearings and tilting-pad bearings. The approach optimizes based on minimum film thickness, power loss and maximum film temperature. Results are presented for oil with various inlet temperatures. also for finite journal bearings have been optimized for a different pad angle. In this thesis, a numerical three-dimensional thermo-hydrodynamic code has been developed to simulate the steady condition of tilting-pad journal bearing without restrictions on their size, especially length of bearings. In this program, Reynolds equations for oil flow in the gap between the shaft and the bearing pads are solved by using a numerical finite difference method with a successive over-relaxation scheme in this simulation. for closing the solution to the real conditions, oil viscosity changes with temperature is also taken into account.

Keywords: journal bearing, finite bearing, tilting-pad bearing, particle swarm optimization, MOPSO method.



دانشگاه صنعتی شاهرود

Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis in Energy Conversion Engineering

Optimization design parameters journal bearing

By:

Seyedeh Zahra Mikaeeli

Supervisor:

Dr. Pooriya Akbarzadeh

Advisor:

Dr. Morteza Rahimiyan

February 2016