

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک طراحی کاربردی

بررسی عملکرد یاتاقانهای گازی ژورنال ورقه‌ای نوع برگی - موجی

استاد راهنما دکتر اصغر دشتی

استاد مشاور دکتر محمد رضا فاضل

پژوهش و نگارش سعید قربانی سینی

آذر ماه ۱۳۹۰

چکیده

کاربرد یاتاقانهای گازی در میکروتوربوماشینها پیچیدگی‌ها و هزینه‌های تعمیراتی سیستم را کاهش می‌دهد و نیز راندمان و طول عمر دستگاه را افزایش می‌دهد. از سال ۱۹۶۰ تاکنون یاتاقانهای ورقه‌ای گازی با و یا بدون ورقهای پشتی به علت اصطکاک کم آنها در ماشین آلات دوار با اندازه کوچک به کار می‌رفته‌اند. درمقایسه با یاتاقانهای غلطشی این یاتاقانها با سرعت سطوح بسیار بالا با کارایی بالایی کار می‌کنند، اما عیب ذاتی این یاتاقانها ظرفیت تحمل بار پائین آنها نسبت به سایر یاتاقانهای با روانکار تراکم‌ناپذیر می‌باشد. در این راستا توسط محققین روشهای مختلفی جهت افزایش ظرفیت یاتاقان پیشنهاد گردیده است، که در این پروژه از روش سه برگی نمودن ساختار انعطاف‌پذیر که برگها در راستای محیطی دارای انعطاف هستند، استفاده شده است.

جهت تحلیل عملکرد یاتاقانها روش پذیرفته شده حل معادله رینولدز می‌باشد. در این راستا برای دو روش تقریبی یاتاقان کوتاه و یاتاقان طویل حل تحلیلی وجود دارد و برای حالات دیگر جهت تحلیل عملکرد یاتاقان از روشهای عددی مانند المان محدود و تفاضل محدود استفاده گردیده است.

جهت شبیه سازی عددی معادله رینولدز می توان از روش میان‌یابی مشتق استفاده نمود، که در آن مشتق جزئی یک تابع با توجه به یک دستگاه مختصات به صورت یک مجموع از ضرایب خطی مقادیر تابع در همه نقاط شبکه بیان می شود. حاصل این تحلیل، بدست آمدن توزیع فشار روانکار داخل یاتاقان می باشد.

در تحقیق حاضر با استفاده از روش درونیابی مشتق دو رهیافت مورد بررسی قرار گرفته است، که شامل بررسی اثر انعطاف پذیری پوسته یاتاقان در راستای محیطی بر روی ظرفیت حمل بار و همچنین با توجه به اینکه یاتاقانهای چند برگی در شرایط آلوده بودن روانکار کمتر از یاتاقانهای یک برگ دچار آسیب می‌شوند سه برگی بودن پوسته داخلی یاتاقان بر روی ظرفیت حمل بار آن مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج بدست آمده نشانگر آن است که برای یاتاقان صلب ظرفیت حمل بار کاهش می‌یابد و این دو رهیافت فاقد کارایی جهت افزایش ظرفیت حمل بار یاتاقان صلب می‌باشد.

فهرست عناوین

- فصل اول - تاریخچه..... ۱
- ۱-۱- مقدمه..... ۱
- ۲-۱- نسل‌های یاتاقانهای هوایی..... ۳
- ۳-۱- تاریخچه مختصر کارهای انجام شده..... ۵
- فصل دوم - روش درونیابی مشتق..... ۷
- ۱-۲- مقدمه..... ۷
- ۲-۲- محاسبه ضرایب وزنی برای مشتق مرتبه اول..... ۹
- ۱-۲-۲- رهیافتهای بلمن..... ۹
- ۲-۲-۲- رهیافت کوان و چانگ..... ۱۰
- ۳-۲-۲- رهیافت عمومی شو..... ۱۱
- ۳-۲- انتخاب مکان نقاط شبکه..... ۱۲
- ۱-۳-۲- شبکه با فاصله یکسان بین تمامی نقاط..... ۱۲
- ۲-۳-۲- روش پیشنهادی چبیشف، گوس و لوباتو برای فواصل نقاط شبکه..... ۱۳
- ۳-۳-۲- روش پیشنهادی برت و مالیک برای فواصل مساوی در بین نقاط داخلی شبکه..... ۱۳
- ۴-۳-۲- روش پیشنهادی برت و مالیک برای فواصل نامساوی..... ۱۴
- ۵-۳-۲- روش ریشه‌های چند جمله‌ای چبیشف نوع اول..... ۱۴
- ۶-۳-۲- روش ریشه‌های چند جمله‌ای چبیشف نوع دوم..... ۱۵
- ۴-۲- اعمال شرایط مرزی..... ۱۵
- ۱-۴-۲- تکنیک δ ۱۵
- ۲-۴-۲- اصلاح ماتریس ضرایب وزنی..... ۱۶
- ۳-۴-۲- قرار دادن شرایط مرزی به صورت مستقیم درون معادلات حاکم مجزا شده..... ۱۷
- فصل سوم - تحلیل عملکرد یاتاقان ورقه‌ای گازی یک‌برگ..... ۱۹

- ۱-۳- بدست آوردن معادله رینولدز استاندارد برای یاتاقانهای مدور..... ۱۹
- ۱-۱-۳- بقاء مومنتوم..... ۲۰
- ۲-۱-۳- بقاء جرم..... ۲۱
- ۲-۳- معادله رینولدز تراکم پذیر یک بعدی..... ۲۲
- ۱-۲-۳- مراحل حل عددی..... ۲۳
- ۲-۲-۳- ضخامت فیلم سیال روانکار..... ۲۵
- ۳-۲-۳- محاسبه ظرفیت حمل بار و نیز زاویه تمایل یاتاقان..... ۲۶
- ۴-۲-۳- فلوچارت نحوه تحلیل یاتاقان صلب یک بعدی..... ۲۷
- ۵-۲-۳- فلوچارت نحوه تحلیل یاتاقان انعطاف پذیر یک بعدی..... ۲۸
- ۳-۳- معادله رینولدز تراکم پذیر دوبعدی..... ۳۰
- ۱-۳-۳- مراحل حل عددی..... ۳۱
- ۲-۳-۳- ضخامت فیلم سیال روانکار..... ۳۴
- ۳-۳-۳- محاسبه ظرفیت حمل بار و نیز زاویه تمایل یاتاقان..... ۳۴
- ۴-۳-۳- فلوچارت نحوه تحلیل یاتاقان صلب دو بعدی..... ۳۵
- ۵-۳-۳- مقایسه نتایج..... ۳۵
- ۶-۳-۳- فلوچارت نحوه تحلیل یاتاقان انعطاف پذیر دو بعدی..... ۳۷
- ۷-۳-۳- نتایج تحلیل یاتاقان انعطاف پذیر دوبعدی..... ۳۸
- فصل چهارم- تحلیل عملکرد یاتاقان ورقه‌ای گازی سه‌برگ..... ۴۱
- ۱-۴- مقدمه..... ۴۱
- ۲-۴- معادله رینولدز تراکم پذیر یک بعدی..... ۴۱
- ۱-۲-۴- ضخامت فیلم سیال روانکار..... ۴۲
- ۲-۲-۴- محاسبه ظرفیت حمل بار و نیز زاویه تمایل یاتاقان..... ۴۳
- ۳-۲-۴- فلوچارت نحوه تحلیل یاتاقان صلب و انعطاف پذیر یک بعدی..... ۴۴
- ۳-۴- معادله رینولدز تراکم پذیر دوبعدی..... ۴۸
- ۱-۳-۴- ضخامت فیلم سیال روانکار..... ۴۹

۴۹.....	۴-۳-۲- فلوجارت نحوه تحلیل یاتاقان صلب و انعطاف پذیر دو بعدی.....
۵۵.....	۴-۴- مقایسه نتایج.....
۵۹.....	فصل پنجم - جمع بندی و نتیجه گیری.....
۶۲.....	مراجع.....
۶۵.....	پیوست-۱- (فلوجارت تحلیل یاتاقان صلب).....
۶۶.....	پیوست-۲- (فلوجارت تحلیل یاتاقان انعطاف پذیر).....

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- طرح های کلی دو نمونه یاتاقان گازی ورقه‌ای..... ۲
- شکل ۲-۱- نحوه قرار دادن شیمز زیر ورقه‌های موجدار..... ۳
- شکل ۳-۱- یاتاقان ورقه‌ای برگی..... ۴
- شکل ۴-۱- یاتاقان ورقه‌ای موجی..... ۴
- شکل ۵-۱- نسل دوم یاتاقان های ورقه‌ای هوایی..... ۴
- شکل ۶-۱- نسل سوم یاتاقانهای ورقه ای هوایی..... ۵
- شکل ۱-۲- شبکه‌بندی با فواصل یکسان بین تمامی نقاط..... ۱۲
- شکل ۲-۲- شبکه‌بندی با استفاده از روش پیشنهادی چیشف، گوس و لوباتو برای فواصل نقاط شبکه..... ۱۳
- شکل ۳-۲- شبکه‌بندی با استفاده از روش پیشنهادی برت و مالیک برای فواصل مساوی بین نقاط داخلی شبکه..... ۱۳
- شکل ۴-۲- شبکه‌بندی با استفاده از روش پیشنهادی برت و مالیک برای فواصل نامساوی بین نقاط داخلی شبکه..... ۱۴
- شکل ۵-۲- شبکه‌بندی با استفاده از روش پیشنهادی ریشه های چند جمله‌ای چیشف نوع اول..... ۱۴
- شکل ۶-۲- شبکه‌بندی با استفاده از روش پیشنهادی ریشه های چند جمله‌ای چیشف نوع دوم..... ۱۵
- شکل ۱-۳- نمای کلی یاتاقان لغزشی..... ۲۰
- شکل ۲-۳- شکل کلی یک ژورنال بیرینگ ورقه ای..... ۲۲
- شکل ۳-۳- طرح کلی یک یاتاقان ژورنال گازی صلب..... ۲۶

- شکل ۳-۴- منحنی ضخامت روانکار برای نسبت خارج از مرکزیت $0/6$ ۲۷
- شکل ۳-۵- منحنی فشار برای $\Lambda = 0.6, \epsilon = 0.6$ ۲۸
- شکل ۳-۶- منحنی توزیع فشار برای $\Lambda = 0.6, \epsilon = 0.6$ و $\alpha = 1$ ۲۹
- شکل ۳-۷- منحنی ضخامت فیلم روانکار برای $\Lambda = 0.6, \epsilon = 0.6$ و $\alpha = 1$ ۳۰
- شکل ۳-۸- منحنی توزیع فشار روانکار در یاتاقان صلب برای $\Lambda = 1, \epsilon = 0.6$ ۳۵
- شکل ۳-۹- منحنی توزیع فشار روانکار در یاتاقان انعطاف‌پذیر برای $\Lambda = 1, \epsilon = 0.6$ و $\alpha = 1$ ۳۷
- شکل ۳-۱۰- منحنی ضخامت فیلم روانکار در یاتاقان انعطاف‌پذیر برای $\Lambda = 1, \epsilon = 0.6$ و $\alpha = 1$ ۳۷
- شکل ۳-۱۱- نمودار تغییرات ظرفیت یاتاقان انعطاف‌پذیر بر حسب ضریب خارج از مرکزیت برای عدد انعطاف $\alpha = 1$ ۳۹
- شکل ۳-۱۲- نمودار تغییرات ظرفیت یاتاقان انعطاف‌پذیر بر حسب ضریب خارج از مرکزیت برای عدد انعطاف $\alpha = 0.5$ ۳۹
- شکل ۳-۱۳- نمودار تغییرات ظرفیت یاتاقان انعطاف‌پذیر بر حسب ضریب خارج از مرکزیت برای عدد انعطاف $\alpha = 0$ ۴۰
- شکل ۴-۱- شکل کلی یک یاتاقان ژورنال سه برگی..... ۴۳
- شکل ۴-۲- منحنی تغییرات فشار یاتاقان صلب برای $\epsilon = 0.8$ و $\Lambda = 1$ ۴۴
- شکل ۴-۳- منحنی ضخامت فیلم روانکار یاتاقان صلب برای $\epsilon = 0.8$ و $\Lambda = 1$ ۴۴
- شکل ۴-۴- منحنی تغییرات فشار یاتاقان صلب برای $\epsilon = 0.4$ و $\Lambda = 2$ ۴۵
- شکل ۴-۵- منحنی ضخامت فیلم روانکار یاتاقان صلب برای $\epsilon = 0.4$ و $\Lambda = 2$ ۴۵
- شکل ۴-۶- منحنی تغییرات فشار یاتاقان انعطاف‌پذیر برای $\epsilon = 0.8$ و $\Lambda = 1$ و $\alpha = 0$ ۴۶
- شکل ۴-۷- منحنی ضخامت فیلم روانکار یاتاقان انعطاف‌پذیر برای $\epsilon = 0.8$ و $\Lambda = 1$ و $\alpha = 0$ ۴۶

- شکل ۴-۸- منحنی تغییرات فشار یاتاقان انعطاف‌پذیر برای $\varepsilon=0.4$ و $\Lambda=2$ و $\alpha=0$ ۴۷
- شکل ۴-۹- منحنی ضخامت فیلم روانکار یاتاقان انعطاف‌پذیر برای $\varepsilon=0.4$ و $\Lambda=2$ و $\alpha=0$ ۴۷
- شکل ۴-۱۰- منحنی تغییرات فشار یاتاقان صلب برای $\varepsilon=0.8$ و $\Lambda=1$ ۴۹
- شکل ۴-۱۱- منحنی ضخامت فیلم روانکار یاتاقان صلب برای $\varepsilon=0.8$ و $\Lambda=1$ ۵۰
- شکل ۴-۱۲- منحنی تغییرات فشار یاتاقان صلب برای $\varepsilon=0.4$ و $\Lambda=2$ ۵۰
- شکل ۴-۱۳- منحنی ضخامت فیلم روانکار یاتاقان صلب برای $\varepsilon=0.4$ و $\Lambda=2$ ۵۱
- شکل ۴-۱۴- منحنی تغییرات فشار یاتاقان انعطاف‌پذیر برای $\varepsilon=0.8$ و $\Lambda=1$ و $\alpha=0.1$ ۵۲
- شکل ۴-۱۵- شکل دیگری از منحنی تغییرات فشار یاتاقان انعطاف‌پذیر برای $\varepsilon=0.8$ و $\Lambda=1$ و $\alpha=0.1$ ۵۳
- شکل ۴-۱۶- منحنی ضخامت فیلم روانکار یاتاقان انعطاف‌پذیر برای $\varepsilon=0.8$ و $\Lambda=1$ و $\alpha=0.1$ ۵۳
- شکل ۴-۱۷- منحنی تغییرات فشار یاتاقان انعطاف‌پذیر برای $\varepsilon=0.4$ و $\Lambda=2$ و $\alpha=0.1$ ۵۴
- شکل ۴-۱۸- منحنی ضخامت فیلم روانکار یاتاقان انعطاف‌پذیر برای $\varepsilon=0.4$ و $\Lambda=2$ و $\alpha=0.1$ ۵۴
- شکل ۴-۱۹- نمودار ظرفیت برحسب خارج از مرکزیت برای یاتاقان های صلب ۱ برگ و ۳ برگ ۵۵
- شکل ۴-۲۰- نمودار ظرفیت برحسب خارج از مرکزیت برای یاتاقان های انعطاف‌پذیر ۳ برگ برای $\alpha=1$ ۵۷
- شکل ۴-۲۱- نمودار ظرفیت برحسب خارج از مرکزیت برای یاتاقان های انعطاف‌پذیر ۳ برگ برای $\alpha=0.5$ ۵۷
- شکل ۴-۲۲- نمودار ظرفیت برحسب خارج از مرکزیت برای یاتاقان های انعطاف‌پذیر ۳ برگ برای $\alpha=0$ ۵۷

شکل ۵-۱- نمودار ظرفیت برحسب خارج از مرکزیت برای یاتاقان های صلب و انعطاف پذیر با

..... $\alpha=0.5$ ۶۰

شکل ۵-۲- نمودار زاویه تمایل برحسب خارج از مرکزیت برای یاتاقان های صلب و انعطاف پذیر با

..... $\alpha=0.5$ ۶۰

فهرست جداول

- جدول ۳-۱- مقایسه ظرفیت و زاویه تمایل برای یاتاقان صلب با روشهای مختلف.....۳۵
- جدول ۳-۲- نتایج حاصل از تحلیل عملکرد یاتاقان دوبعدی انعطاف‌پذیر در راستای محیطی یاتاقان.....۳۷
- جدول ۴-۱- مقایسه ظرفیت و زاویه تمایل برای یاتاقان صلب یک برگ و سه برگ.....۵۵
- جدول ۴-۲- عملکرد یاتاقان انعطاف‌پذیر دوبعدی سه برگ.....۵۶
- جدول ۵-۱- ظرفیت حمل بار یاتاقانهای صلب و انعطاف‌پذیر یک و سه برگ با $\alpha=0.5$۵۹
- جدول ۵-۲- زاویه تمایل یاتاقانهای صلب و انعطاف‌پذیر یک و سه برگ با $\alpha=0.5$۵۹

شرح علائم

A_{ik}^{θ}	ضریب مشتق مرتبه اول
$A_{ik}^{\theta\theta}$	ضریب مشتق مرتبه دوم
B_i^x	ضریب انتگرالگیری در راستای x
B_j^y	ضریب انتگرالگیری در راستای y
C	لقی یاتاقان، m
D	قطر داخلی یاتاقان، m
e	خارج از مرکزیت، m
e_r	خارج از مرکزیت یاتاقان صلب، m
h	ضخامت فیلم روانکار، m
h_r	ضخامت فیلم روانکار یاتاقان صلب، m
\bar{h}	فرم بدون بعد ضخامت فیلم روانکار
\bar{h}_{min}	ضخامت کمینه بدون بعد فیلم روانکار
\bar{h}_r	فرم بدون بعد ضخامت فیلم روانکار یاتاقان صلب
i	اندیس در راستای ژورنال
j	اندیس در راستای پهنای محوری یاتاقان
K_l	$\frac{\alpha C}{P_a}$
l_b	نصف طول ورقه موجدار، m
L	پهنای محوری یاتاقان، m
N_{θ}	تعداد تقسیمات در راستای ژورنال
N_y	تعداد تقسیمات در راستای پهنای محوری یاتاقان
p	فشار مطلق، pa
\bar{P}	فشار بدون بعد
\bar{P}_{max}	فشار بیشینه بدون بعد
P_a	فشار اتمسفر

S	طول گام ورقه موجدار، m
t	ضخامت ورقه موجدار، m
T	دمای گاز روانکار، K
\bar{T}	دمای بدون بعد
u	مولفه سرعت در راستای محیطی
v	مولفه سرعت در راستای محوری
w	مولفه سرعت در راستای شعاعی
\bar{W}	ظرفیت حمل بار بدون بعد یاتاقان
\bar{W}_{\parallel}	مولفه افقی ظرفیت حمل بار بدون بعد یاتاقان
\bar{W}_{\perp}	مولفه قائم ظرفیت حمل بار بدون بعد یاتاقان
y	مختصات در راستای ضخامت یاتاقان، m
\bar{y}	مختصات بدون بعد در راستای ضخامت یاتاقان

حروف یونانی

α	عدد انعطاف پذیری، $(1 - v^2) \frac{2PaS}{CE} \left(\frac{lb}{t}\right)^3$
$\bar{\alpha}$	$\frac{\pi}{\lambda}$
β	$2\pi\Lambda$
ε	نسبت خارج از مرکزیت
Λ	عدد یاتاقان، $\left(\frac{D}{2C}\right)^2 \frac{6\omega\mu_0}{Pa}$
ψ	$\bar{p}h^3/2$
θ	مختصات در راستای ژورنال، rad
$\theta_{att.}$	زاویه تمایل بدون بعد یاتاقان
$\bar{\theta}$	مختصات بدون بعد در راستای ژورنال
ρ	چگالی kg/m^3
η	متغیر تصحیح

μ	ویسکوزیته
$\bar{\mu}$	ویسکوزیته بدون بعد
μ_0	ویسکوزیته مطلق
ν	ضریب پواسون
ω	دور محور، <i>RPM</i>

فصل اول - تاریخچه

۱-۱- مقدمه

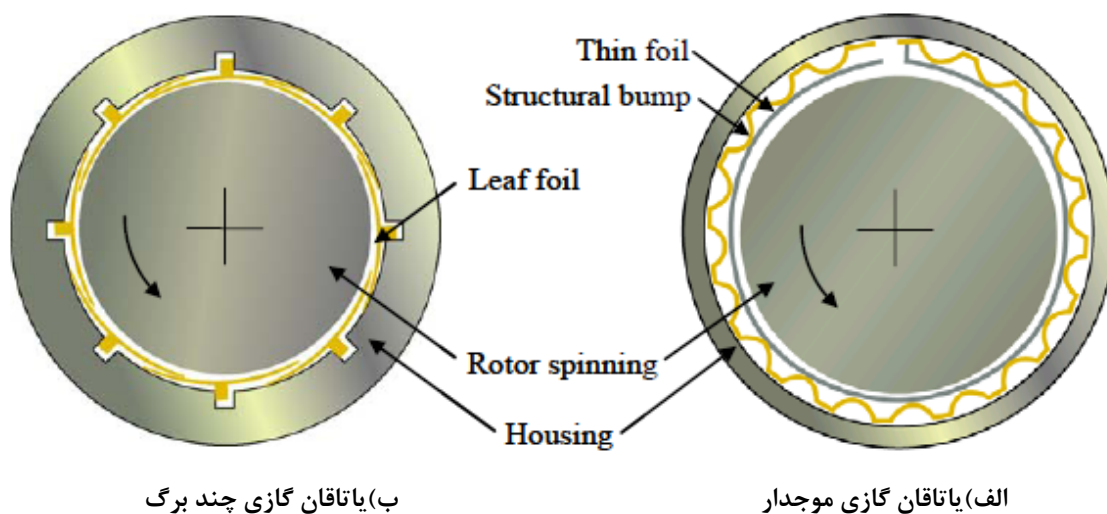
یاتاقانهای ژورنال منعطف^۱ که بعنوان یاتاقانهای ورقه‌ای شناخته می‌شوند توجه فراوانی طی سالهای اخیر بخاطر عملکرد منحصر بفرد و تنوع کاربرد به خود جلب نموده‌اند. کاربرد یاتاقانهای ورقه‌ای گازی^۲ (GFBS) در میکروتوربوماشینها پیچیدگی‌ها و هزینه‌های تعمیراتی سیستم را کاهش می‌دهد و نیز راندمان و طول عمر دستگاه را افزایش می‌دهد [۱-۲]. از سال ۱۹۶۰ تاکنون یاتاقانهای ورقه‌ای گازی با و یا بدون ورقه‌های پشتی به خاطر اصطکاک کم آنها در ماشین آلات دوار با اندازه کوچک به کار رفته‌اند. یاتاقانهای ورقه‌ای گازی، یاتاقانهای هیدرودینامیکی با پوسته انعطاف پذیرند و می‌توانند با هوای محیط یا هر گازی بعنوان سیال روانکار مورد استفاده قرار گیرند. در این نوع یاتاقان نیازی به سیستم روانکاری پیچیده نمی‌باشد و در نتیجه اولاً وزن اجزاء لازم جهت روانکاری بشدت کاهش یافته و ثانياً هزینه‌های نگهداشت پائین می‌آید. متداولترین روانکاری که در این نوع یاتاقان استفاده می‌گردد هوا می‌باشد که به حد وفور در دسترس بوده و می‌توان در دماهای فوق‌العاده بالا که روانکارهای پایه روغنی به صورت نمایی ویسکوزیته‌شان با دما پائین می‌آید و فاقد کارایی می‌باشند استفاده نمود. درمقایسه با یاتاقانهای غلطشی این یاتاقانها با سرعت سطوح بسیار بالا با کارایی فوق‌العاده بالایی کار می‌کنند. به عنوان مثال از دو دسته یاتاقان

^۱ Compliant

^۲ Gas Foil Bearings

ورقه‌ای- هوایی برگه‌ای^۱ و موجدار^۲، در ماشینهای سیکل هوایی^۳ (ACMs) صنایع هوایی استفاده می‌گردد که از موارد کاربرد این یاتاقانها در تست مقیاس مسوسکوپیک^۴ (مقیاسی بین ماکروسکوپیک و میکروسکوپیک) شبیه‌ساز موتور توربوجت می‌باشد [۳-۶]. شکل (۱-۱) دو نوع پیکربندی یاتاقان ورقه‌ای هوایی که یکی یاتاقان نوع چند برگگی و دیگری یاتاقان نوع نوار موجدار می‌باشد را نشان می‌دهد.

فشار هیدرودینامیکی در درون فاصله کم، فیلم میان شافت متحرک و ورقه صاف ایجاد می‌گردد. در یاتاقانهای گازی موجدار، ورقه‌های نوار موجدار، یک ورقه نازک رویی^۵ را پشتیبانی می‌کنند. در این نوع یاتاقان اثرات اصطکاک خشک بین ورقه‌های موجدار و ورقه رویی باعث تلف شدن انرژی یا بروز میرایی در یاتاقان می‌گردد. یاتاقانهای چند برگگی به علت اینکه ذاتاً ظرفیت بار پائینی دارند در ماشین آلات، دارای کاربرد کمی هستند [۶]، در حالیکه یاتاقانهای چند ورقه‌ای موجدار با ظرفیت بار تا ۶۸۰ kpa پاسخگوی بسیاری از نیازمندیهای ماشین آلات فاقد روغن می‌باشد [۷-۸].

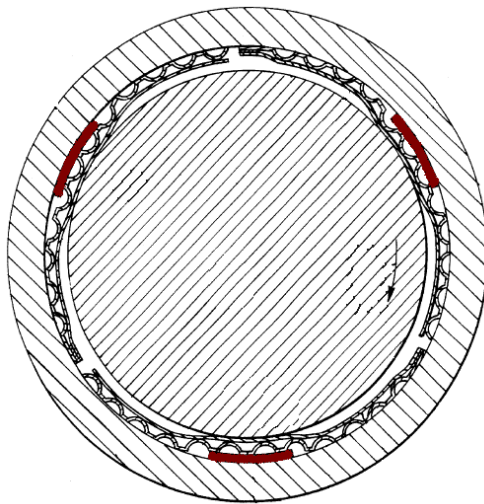


شکل ۱-۱- طرح های کلی دو نمونه یاتاقان گازی ورقه‌ای

به طور عمده ساختار تکیه‌گاه نقش غالب را در رفتار و عملکرد استاتیکی و دینامیکی یاتاقانهای گازی ورقه‌ای بازی می‌کند، به عنوان مثال به خاطر خیز الاستیک لایه‌های نوار موجدار تغییرات کمی در ضخامت فیلم در مقایسه با خارج از مرکز شدن ژورنال به وجود می‌آید [۹].

^۱ leaf GFBs
^۲ bump GFBs
^۳ Air Cycle Machines
^۴ Mesoscopic
^۵ Top foil

مدل کردن یاتاقانهای ورقه‌ای گازی به خاطر پیچیدگیهای مکانیکی لایه ورقه‌ای موجدار و نیز ساختار ورقه رویی دشوار است. ظرفیت بار استاتیکی و عملکرد دینامیکی در یاتاقانهای ورقه‌ای گازی بطور عمده به خصوصیات مواد ساختار الاستیک ساپورت وابسته می‌باشد. مدل‌های رایج شامل موجها به عنوان یک سختی معادل است که به صورت یکنواخت حول محیط یاتاقان، گسترده شده است و تغییر شکل الاستیک ورقه رویی و ورقه موجدار زیر آن را با فیلم گاز هیدرودینامیکی کوپل می‌نماید. اعمال پیش‌بار مکانیکی درون GFB اثر گوه هیدرودینامیک جهت ایجاد میدان فشار را افزایش می‌دهد [۱۰]. پیش‌بار مکانیکی با تغییر جزیی در ارتفاع ساپورت الاستیک قابل اعمال می‌باشد که ثمره آن لوب^۱ شکل شدن ورقه رویی بوده که سبب می‌گردد ورقه رویی و ساپورت زیرین آن دارای شعاع انحنا بزرگتری از سطح داخل GFB باشد [۱۰-۱۱] در هر صورت ساده و موثرترین روش جهت این کار مطابق شکل (۱-۲) قرار دادن شیمز^۲ فلزی زیر نوار موجدار و در تماس با محفظه داخلی یاتاقان می‌باشد [۱۰].



شکل ۱-۲- نحوه قرار دادن شیمز زیر ورقه‌های موجدار

۲-۱- نسل‌های یاتاقانهای هوایی

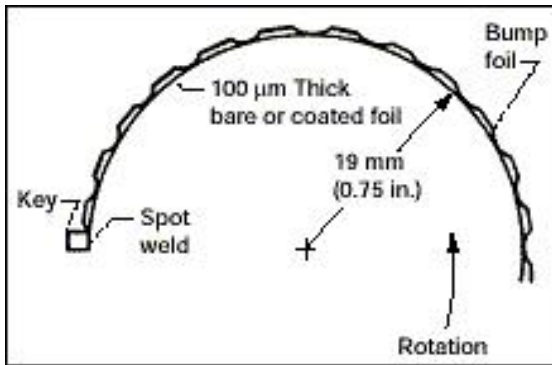
نسل اول یاتاقانهای ورقه‌ای مطابق شکل (۱-۳) از یک سری ورقه‌های برگ‌تخت^۳ یا مطابق شکل (۱-۴) از ورقه‌های موجدار^۴ ساخته شده‌اند که گام ورقه‌های موجدار در نسل اول این یاتاقانها در محیط یاتاقان یکنواخت است.

^۱ Lobe

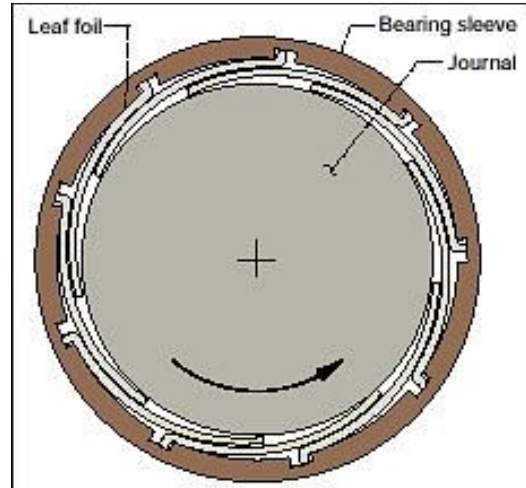
^۲ Shims

^۳ Leaf Foil

^۴ Bump Foil

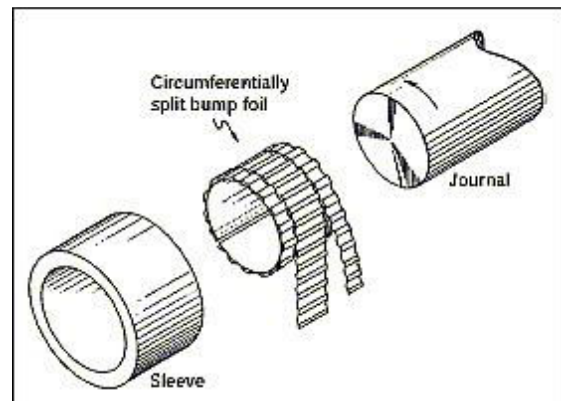
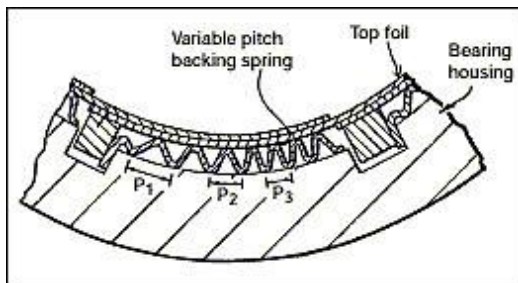


شکل ۱-۴- یاتاقان ورقه‌ای موجی



شکل ۱-۳- یاتاقان ورقه‌ای برگی

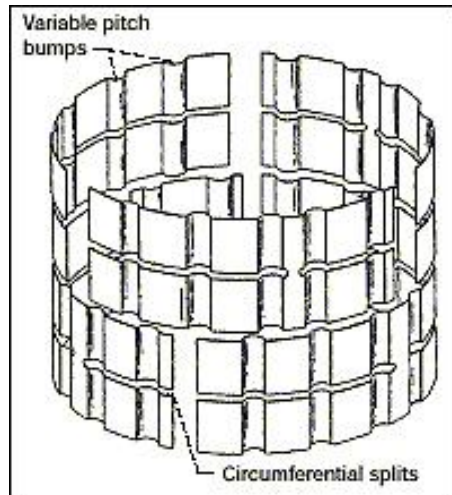
نسل دوم یاتاقانهای ورقه‌ای دارای مشخصه‌های تغییر شکل متغیر^۱ هستند و حول محور به طور محیطی مطابق شکل (۱-۵) مجزا می‌باشند، در این نسل طراحی یک ورقه موجی با گام متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱-۵- نسل دوم یاتاقانهای ورقه‌ای هوایی

نسل سوم طراحی که همانکون مورد استفاده قرار می‌گیرد دارای یک ورقه موجدار با گام متغیر و بصورت محیطی شکافدار مطابق شکل (۱-۶) است.

^۱ Variable Compliance



شکل ۱-۶- نسل سوم یاتاقانهای ورقه‌ای هوایی

۱-۳- تاریخچه مختصر کارهای انجام شده

در سال ۱۹۵۳ بلاک و ون‌راسوم^۱ [۱۲] ایده کلی یاتاقانهای ورقه‌ای^۲ را مطرح نمودند. مولفان نشان دادند که ضخامت فیلم در یاتاقانهای ورقه‌ای بیشتر از یاتاقانهای گازی صلب^۳ می‌باشد، لذا با توجه به این خصیصه می‌توان عملکرد این دسته یاتاقانها را بهبود داده و راه حلی برای مشکلات ناشی از انبساطهای حرارتی شافت و یاتاقان ارائه نمود. تجارب میدانی تا سال ۱۹۶۰ نشان داد GFBS بسیار مطمئن‌تر از یاتاقانهای غلطشی بکار رفته در ماشینهای سیکل هوایی در صنایع هوایی کار می‌کنند. از آن به بعد این یاتاقانها در بیشتر ACMS بکار رفته در صنایع نظامی و ساختمانی بکار برده شد [۳-۶].

حشمت^۴ و همکارانش در ابتدا تحلیلی از عملکرد استاتیکی یاتاقان ورقه‌ای انجام دادند. در این تحلیل فشار هیدرودینامیکی با خیز موضعی تکیه گاه ورقه‌ای کوپل می‌شود. در این مدل خیز موضعی با فشار نسبی متناسب بوده و نسبت تناسب بعنوان عدد انعطاف تعریف می‌گردد [۹ و ۱۳]. پنگ^۵ و کارپینو^۶ یک تحلیل تفاضل محدود جهت محاسبه ضرایب نیروهای میرا و سختی خطی شده ارائه نمودند. در این تحلیل هم از فیلم گازی و هم سختی معادل ساختار موجدار بصورت همزمان جهت حل معادله رینولدز، انتگرال گیری صورت می‌گیرد [۱۴-۱۵].

^۱ Blok and van Rossum

^۲ Foil Bearings

^۳ Rigid Gas Bearings

^۴ Heshmat

^۵ Peng

^۶ Carpino

یوردانوف^۱ یک روش ساده و سریع جهت طراحی یاتاقانهای ورقه‌ای گازی محوری ارائه نمود. در این روش از منحنی‌های یاتاقان گازی صلب در جهت مشخص کردن منحنی بهینه با بیشترین ظرفیت بار برای یاتاقان انعطاف‌پذیر گازی استفاده شده است. در این تحلیل از منحنی‌های ضخامت فیلم و توزیع فشار بهینه برای یاتاقان صلب جهت بدست آوردن پارامترهای یاتاقان انعطاف‌پذیر استفاده می‌گردد. در این روش با توجه باینکه از روش تکرار در بدست آوردن جواب استفاده نمی‌گردد، می‌توان سریع‌تر به جواب رسید [۱۶].

سن اندرس^۲ تحلیلی از جریان حجمی متلاطم مایع خنک کننده یک یاتاقان ورقه‌ای انجام داد. در این مدل از فشار محوری متوسط جهت کوپل نمودن میدان جریان و خیز ساختار موجدار استفاده گردیده است [۱۷].

لی^۳ و همکارانش اثر سختی موج بر عملکرد نیروهای استاتیکی و دینامیکی GFBS را مورد بررسی قرار دادند. در این تحلیل ورقه بالایی شبیه یک تیر در نظر گرفته شده است و موجهای زیر آن نیز بعنوان فنرهای خطی در نظر گرفته شده است [۱۸].

پنگ و خوانساری^۴ تحلیلی از حد ظرفیت بار GFBS با دور بی نهایت ارائه نمودند. اساس کار آنها از این قرار است که لقی یاتاقان و سفتی ورقه رویی و موجهای زیر آن تعیین کننده ظرفیت بار می‌باشد. از سوی دیگر جهت یکپارچگی مکانیکی یاتاقان و شافت، یاتاقان معمولاً پیش‌بار دار، جمع می‌گردد که این کار معمولاً یا با شیمز گذاری زیر ورقه موجدار یا با انطباق تداخلی زمان طراحی و ساخت صورت می‌گیرد که در این حالت قطر ژورنال از قطر داخلی ورقه رویی بیشتر می‌باشد. این پیش بار سبب تماس و بارگذاری اولیه یکنواخت روی ژورنال در زمان سکون شافت و متعاقب آن فشار یکنواخت روی ساختار انعطاف‌پذیر می‌گردد [۱۹].

^۱ Jordanoff

^۲ San Andrés

^۳ Lee

^۴ Khonsari