

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی

بررسی اثر ناهمواری سطح بر عملکرد روانکاری در یاتاقانهای لغزشی پله ای

استاد راهنما: محمود خداداد سریزدی

استاد مشاور: اصغر دشتی رحمت آبادی

پژوهش و نگارش: محمد هادی قناعتیان

مهر ماه ۱۳۸۸

این اثر ناچیز تقدیم می شود به محققانی که با تلاشی خستگی ناپذیر در راستای
بالندگی این مرز و بوم می کوشند.

برتر و بزرگ است خدایی که اندیشه های ژرف، حقیقت ذات او را نمی توانند درک کنند و گمان زیرک ها آن را نمی یابد. آغازی است که نهایی ندارد تا به آخر برسد و پایانی ندارد تا ایام او سپری گردد. (نهج البلاغه خطبه ۹۴)

با تشکر از زحمات جناب آقای دکتر خداداد و جناب آقای دکتر دشتی که با راهنمایی های خود مرا در انجام این اثر یاری نمودند.

و با تشکر از اساتید محترم دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه یزد و بخش مهندسی مکانیک دانشگاه شیراز که راهنمایی های ایشان راهگشای انجام این پروژه بوده است.

چکیده

در تئوریهای مربوط به مسائل روانکاری، سطوح یاتاقان را صاف و بدون زبری و ناهمواری در نظر می گیرند، در حالی که چنین فرضی در عمل صحت ندارد. همواره نشان داده شده در حالاتی که زبری هم مرتبه با ضخامت فیلم سیال باشد، تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای عملکرد خواهد داشت. برای یافتن پارامترهای عملکرد یاتاقانها نیاز به حل معادلات روانکاری می باشد. حل تحلیلی این معادلات بدون ساده سازی های مورد نیاز، اغلب بسیار دشوار است. با اضافه شدن زبری به مسأله، نیاز به استفاده از روشهای عددی بیشتر آشکار می شود. بررسی کارهای انجام شده در زمینه زبری سطح نشان می دهد که برخی از آنها مربوط به تخمین پروفیل مناسب برای زبری و برخی دیگر مربوط به ارائه تئوری های مختلف برای بررسی این پدیده می باشد. هندسه سطح آنچنان نامنظم است که گاه ناگزیر به استفاده از مدل های آماری خواهیم بود. از روشهای عددی قابل استفاده در مسائل میدانی، روش المان محدود است. در این پروژه با استفاده از روش المان محدود و تشکیل فرم ضعیف معادلات حاکم و ایجاد ماتریسهای سختی مربوطه، به بررسی تأثیر زبری سطح بر پارامترهای عملکرد از جمله فشار، ظرفیت تحمل بار عمودی و مماسی و نیروی برشی در یاتاقانهای لغزشی پله ای پرداخته می شود. در این نوع یاتاقانها در صورتی که زبری نداشته باشیم، با استفاده از ساده سازی، حل تحلیلی معادلات، ممکن است. در این حالت، پروفیل فشار، خطی می باشد. پس از یافتن پروفیل فشار حاصل از اثر زبری، تغییر در پارامترهای عملکرد، بر حسب تغییر ارتفاع و طول موج زبری به ازای ضخامت های مختلف فیلم سیال به دست خواهد آمد. ابتدا برنامه کامپیوتری برای حالت بدون زبری ایجاد شده و سپس برنامه برای حالت یاتاقان دارای سطح زبر، تعمیم داده خواهد شد. افزایش تعداد المانها در برنامه ها، امکان افزایش دقت جواب را فراهم می آورد. مسأله به ازای دو پروفیل زبری مختلف، بررسی و نتایج با هم مقایسه می شود. نتایج به دست آمده با تحقیقات انتشار یافته تطابق خوبی نشان می دهد.

فهرست مطالب

فصل ۱. زبری سطح، مقدمه و مروری بر کارهای گذشته.....	۱
۱-۱. تعریف زبری سطح.....	۱
۲-۱. مشخصه های هندسی سطوح.....	۱
۳-۱. اندازه گیری زبری.....	۳
۴-۱. وسایل اندازه گیری بدون تماس.....	۴
۵-۱. سیستمهای اندازه گیری.....	۵
۶-۱. مروری بر کارهای گذشته.....	۶
۷-۱. بررسی برخی از روشها.....	۸
فصل ۲. روش المان محدود، مقدمه و فرمول بندی.....	۱۵
۱-۲. مقدمه.....	۱۵
۲-۲. روابط انتگرالی و روشهای وردشی.....	۱۶
۱-۲-۲. انتگرالهای وزنی.....	۱۶
۲-۲-۲. مسائل مقدار مرزی و مقدار اولیه.....	۱۷
۳-۲. تشکیل روابط ضعیف برای مسائل مقدار مرزی.....	۱۸
۱-۳-۲. مقدمه.....	۱۸
۲-۳-۲. انتگرال وزنی و تشکیل روابط ضعیف.....	۱۸
۳-۳-۲. شکل خطی و دو خطی.....	۲۱
۴-۲. روش المان محدود.....	۲۲
۱-۴-۲. مقدمه.....	۲۲
۲-۴-۲. فرمول بندی معادلات و یافتن ماتریسهای $F_i^{(e)}$ و $K_{ij}^{(e)}$	۲۴
۳-۴-۲. ماتریسهای $F_i^{(e)}$ و $K_{ij}^{(e)}$ به ازای $a(x)$ و $f(x)$ ثابت.....	۲۷
۴-۴-۲. ترکیب معادلات.....	۲۸
۵-۴-۲. محاسبه ماتریس $\{P\}$	۳۱
۶-۴-۲. معادلات دامنه.....	۳۱
فصل ۳. روانکاری و معادلات حاکم.....	۳۳
۱-۳. مقدمه.....	۳۳
۲-۳. شیوه های روانکاری.....	۳۳
۳-۳. معادله رینولدز.....	۳۵
۱-۳-۳. به دست آوردن معادله رینولدز با استفاده از قوانین جریان لزج و اصل بقا جرم.....	۳۵
۲-۳-۳. شکل های تعدیل یافته استاندارد معادله رینولدز.....	۳۷

۳۸	..... ۴-۳. روابط حاکم بر یاتاقانهای کف گرد هیدرودینامیکی
۳۹	..... ۱-۴-۳. مکانیزم توسعه فشار
۴۱	..... ۲-۴-۳. تئوری عمومی یاتاقانهای کف گرد
۴۵	..... ۳-۴-۳. یاتاقان کشویی پله موازی
۴۹	فصل ۴. فرمول بندی المان محدود معادلات مربوط به یاتاقانهای لغزشی پله ای
	..... ۱-۴. مقایسه فرم کلی معادلات دو بعدی مرتبه دو تک متغیره با فرم تعدیل یافته معادله
۴۹	..... رینولدز
۵۰	..... ۲-۴. فرمولاسیون المان محدود برای مسأله مقدار مرزی یک بعدی مرتبه دو [۳۶]
۵۰	..... ۱-۲-۴. فرم اصلی معادله، شرایط مرزی و توابع شکل
۵۲	..... ۲-۲-۴. فرم تضعیف شده معادلات با استفاده از روش گالریکن
۵۶	..... ۳-۴. فرمول بندی المان محدود برای یاتاقان لغزشی
۵۶	..... ۱-۳-۴. ماتریس سختی هر المان
۵۷	..... ۲-۳-۴. ماتریس سختی کل
۵۸	..... ۴-۴. فرمول بندی المان محدود برای یاتاقان های لغزشی پله ای با سطوح زبر:
۵۸	..... ۱-۴-۴. ماتریس های المان
۶۰	..... ۲-۴-۴. ماتریس های المان به ازای توابع شکل خطی
۶۰	..... ۳-۴-۴. ماتریس های کلی
۶۱	..... ۴-۴-۴. شرایط مرزی
۶۳	فصل ۵. روند انجام پروژه، برنامه های کامپیوتری و نتایج
۶۳	..... ۱-۵. روند انجام پروژه:
۶۳	..... ۱-۱-۵. برنامه المان محدود مربوط به یاتاقان لغزشی صاف (smooth.m)
	..... ۲-۱-۵. برنامه المان محدود مربوط به یاتاقان لغزشی با پروفیل های سینوسی و بتا
۶۴	..... (bettaeq.m و sineq.m)
۶۵	..... ۲-۵. شرح برنامه های کامپیوتری
۶۵	..... ۱-۲-۵. برنامه smooth.m
۶۷	..... ۲-۲-۵. برنامه sineq.m
۶۸	..... ۳-۲-۵. برنامه bettaeq.m
۶۹	..... ۴-۲-۵. برنامه singeneral.m
۷۰	..... ۵-۲-۵. برنامه bettageneral.m
۷۰	..... ۳-۵. نتایج و بررسی نمودارها
۷۱	..... ۱-۳-۵. مقایسه عملکرد یاتاقان در حالات بدون زبری و دارای زبری

۲-۳-۵. تغییر پارامترهای عملکرد یاتاقان در اثر افزایش ضریب ارتفاع زبری به ازای ضخامت	
های مختلف فیلم سیال	۷۷
۳-۳-۵. تغییر پارامترهای عملکرد یاتاقان در اثر کاهش طول موج زبری به ازای ضخامت	
های مختلف فیلم سیال	۸۶
۴-۳-۵. خلاصه نتایج، بحث و پیشنهادات	۸۸
منابع و مراجع:	۹۲

فهرست اشکال

۲	شکل ۱-۱. مشخصه هندسی سطوح
۳	شکل ۱-۲. اندازه گیری سوزنی
۴	شکل ۱-۳. خطا در پروفیل سطح
۵	شکل ۱-۴. سیستم متوسط
۶	شکل ۱-۵. متوسط ده نقطه
۶	شکل ۱-۶. کوچکترین مربعات
۱۰	شکل ۱-۷. پروفیل زبری در یاتاقان لغزشی
۱۲	شکل ۱-۸. بررسی زبری سطح در دو وجه یاتاقان
۲۵	شکل ۲-۱. شماره گذاری المانها و گره ها
۲۸	شکل ۲-۲. مدل سه المانی
۳۶	شکل ۳-۱. دبی های ورودی و خروجی
۳۹	شکل ۳-۲. نمایه سرعت بین دو سطح صاف
۴۰	شکل ۳-۳. نمایه سرعت بین دو سطح ناموازی
۴۲	شکل ۳-۴. یاتاقان و کفشک
۴۳	شکل ۳-۵. مولفه نیروهای مماسی و برشی
۴۶	شکل ۳-۶. نمودار فشار در یاتاقان پله ای
۵۱	شکل ۴-۱. تقسیم دامنه به n المان

فهرست نمودارها

- نمودار ۵-۱. توزیع فشار بدون بعد در یاتاقان لغزشی پله ای ۷۱
- نمودار ۵-۲. توزیع فشار بدون بعد در یاتاقان لغزشی با سطح شیب دار ۷۲
- نمودار ۵-۳. توزیع فشار بر روی سطوح پایینی و بالایی یاتاقان ۷۳
- نمودار ۵-۴. فشار در راستای y در مقطع ورودی یاتاقان ۷۴
- نمودار ۵-۵. فشار در راستای y در مقطع خروجی یاتاقان ۷۴
- نمودار ۵-۶. سرعت افقی در راستای y در مقطع ورودی یاتاقان ۷۵
- نمودار ۵-۷. سرعت افقی در راستای y در مقطع خروجی یاتاقان ۷۵
- نمودار ۵-۸. مقایسه فشار ماکزیمم و ظرفیت تحمل بار عمودی در پروفیل‌های سینوسی و بتا به ازای تغییر در ضریب ارتفاع زبری ۷۶
- نمودار ۵-۹. مقایسه فشار ماکزیمم و ظرفیت تحمل بار عمودی در پروفیل‌های سینوسی و بتا به ازای تغییر در طول موج زبری ۷۷
- نمودار ۵-۱۰. تغییرات فشار ماکزیمم بر حسب ضریب ارتفاع در پروفیل سینوسی به ازای ضخامت های مختلف فیلم سیال ۷۸
- نمودار ۵-۱۱. تغییرات فشار ماکزیمم بر حسب ضریب ارتفاع در پروفیل بتا به ازای ضخامت های مختلف فیلم سیال ۷۸
- نمودار ۵-۱۲. تغییرات ظرفیت تحمل بار مماسی بر حسب ضریب ارتفاع در پروفیل سینوسی به ازای ضخامت های مختلف فیلم سیال ۸۰
- نمودار ۵-۱۳. تغییرات ظرفیت تحمل بار مماسی بر حسب ضریب ارتفاع در پروفیل بتا به ازای ضخامت های مختلف فیلم سیال ۸۱
- نمودار ۵-۱۴. تغییرات نیروی برشی در سطح بالایی بر حسب ضریب ارتفاع در پروفیل سینوسی ۸۲

- نمودار ۵-۱۵. تغییرات نیروی برشی در سطح پایینی بر حسب ضریب ارتفاع در پروفیل سینوسی
 ۸۳
- نمودار ۵-۱۶. تغییرات نیروی برشی در سطح بالایی بر حسب ضریب ارتفاع در پروفیل بتا
 ۸۳
- نمودار ۵-۱۷. تغییرات نیروی برشی در سطح پایینی بر حسب ضریب ارتفاع در پروفیل بتا
 ۸۴
- نمودار ۵-۱۸. تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب ضریب ارتفاع در پروفیل بتا
 ۸۴
- نمودار ۵-۱۹. تغییرات افت قدرت بر حسب ضریب ارتفاع در پروفیل بتا
 ۸۵
- نمودار ۵-۲۰. تغییرات نرخ جریان حجمی بر حسب ضریب ارتفاع در پروفیل بتا
 ۸۵
- نمودار ۵-۲۱. تغییرات دما بر حسب ضریب ارتفاع در پروفیل بتا
 ۸۶
- نمودار ۵-۲۲. تغییرات دما بر حسب ضریب ارتفاع در پروفیل بتا
 ۸۶
- نمودار ۵-۲۳. تغییرات فشار ماکزیمم بر حسب افزایش تعداد طول موج زبری در پروفیل بتا
 ۸۷

فهرست جداول

- جدول ۱. مقادیر فشار ماکزیمم بدون بعد به ازای ضریب ارتفاع زبری ۰,۳ در دو پروفیل سینوسی
 و بتا
 ۷۹
- جدول ۲. مقادیر بار مماسی به ازای ضریب ارتفاع زبری ۰,۳
 ۸۱
- جدول ۳. مقادیر فشار ماکزیمم بدون بعد به ازای ضریب ارتفاع ۰,۳
 ۸۷

فصل ۱. زبری سطح، مقدمه و مروری بر کارهای گذشته

۱-۱. تعریف زبری سطح

در بررسی مسائل روانکاری، حل مسائل مربوطه بدون در نظر گرفتن ناهمواریهای سطح انجام می شود، در حالی که در واقع، سطوح یاتاقان به طور کامل صاف نبوده و دارای ناهمواری می باشد. هر چند دقت زیادی در هنگام ساخت در مورد صیقلی بودن سطوح به کار می رود اما سرعت افزایش تولید و روشهای جدید از قبیل برش پلاسما، فرسایش جرقه و ... مشخصات مربوط به سطوح را تغییر می دهند. سطوح صیقلی شده نیز در مقیاس اتمی، کاملاً صاف نیستند. در روانکاری، این زبری ها بین ۰,۱ تا $10 \mu m$ است. این در حالی است که قطر اتمهای معمولی بین ۰,۰۰۰۱ تا $0,001 \mu m$ می باشد. حتی سطوح کاملاً صیقلی وقتی با میکروسکوپ مشاهده شوند، شکلی ناصاف دارند. این سطوح از قسمتهای دارای پستی و بلندی تشکیل شده است که به آنها زبری گفته می شود.

۱-۲. مشخصه های هندسی سطوح

هندسه واقعی سطح به حدی پیچیده است که با تعداد محدودی از پارامترها نمی توان آن را به خوبی بیان کرد [۱]. هرچه تعداد این پارامترها بیشتر باشد امکان بیان دقیق تری از شکل سطح

ممکن خواهد بود [۲]. برای آنالیز تأثیرات زبری سطح، مهندسين نیاز به دانستن مشخصه های سطح دارند، اما برای تعریف این مشخصه ها نیاز به پارامترهای بسیار زیادی می باشد. به طور کلی مشخصه های هندسی سطوح را به سه قسمت عمده تقسیم بندی می کنند:

۱. خطای شکل: به علت خطا در فرآیند ساخت، ممکن است سطوح از فرم تعیین شده از پیش خارج شوند.

۲. موجی بودن: موجهای نسبتاً بلند که همراه با ارتعاشات نا خواسته در سیستمهای ماشین ابزار به وجود می آیند.

۳. زبری: علاوه بر موارد فوق، بی نظمی هایی نیز در فرآیند تولید و برش ممکن است اتفاق افتد که باعث ایجاد زبری می شوند. (شکل ۱-۱)



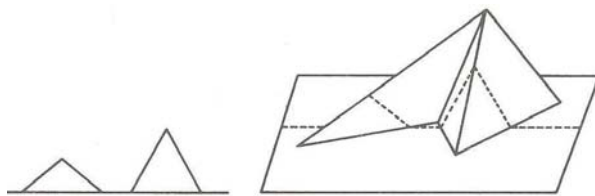
شکل ۱-۱. مشخصه هندسی سطوح [۳]

در واقع، زبری به عنوان یک تغییر هندسی در نظر گرفته می شود. بین طبقه بندی های فوق، نمی توان تمایز زیادی قائل شد. در بررسی مسائل مربوط به سطوح زبر، هم جهت عمودی (دامنه زبری) و هم جهت افقی (طول موج زبری) حائز اهمیت است.

در بررسی تأثیرات ناشی از زبری سطوح، دو مسأله از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مسأله اول در مورد تشخیص هندسه سطح می باشد که بایستی بتوان تخمینی هرچه دقیق تر از پروفیل واقعی سطح، ارائه داد که یا بایستی با استفاده از اندازه گیریهای مربوطه این کار را انجام داد و یا با استفاده از نتایج تجربی و با استفاده از توابع تصادفی و یا روشهای آماری، تقریبی از پروفیل سطح، مطرح کرد. مسأله دوم، نحوه محاسبات مربوط به تأثیر زبری در معادلات حاکم بر جریان روانکاری سیال می باشد.

۳-۱. اندازه گیری زبری

در اندازه گیری میزان صیقل سطح، از دو روش عمومی استفاده می شود. در یکی از روشها که روش تماسی نام دارد با استفاده از تکنیک سوزنی به اندازه گیری زبری سطح می پردازند. روش دیگر، روش بدون تماس می باشد. در روش اندازه گیری سوزنی، نوک سوزن به صورت عمودی، در راستای عرض سطح، حرکت می کند. این حرکت تبدیل به ولتاژ الکتریکی می شود که این ولتاژ یا به صورت آنالوگ و یا پس از تبدیل به دیجیتال مورد استفاده قرار می گیرد. آبات^۱ و فایرستون^۲ این روش را در سال ۱۹۳۳ ارائه کردند. نوک سوزن از جنس الماس بوده و دارای شعاع $2 \mu m$ و بار استاتیکی وارده کمتر از $0,0007 N$ می باشد. با توجه به بزرگ بودن شعاع نوک سوزن در قیاس با زبری های معمولی، نمی توان شکلی واقعی از سطح را به دست آورد. برای مثال ممکن است در این اندازه گیری، شکلی قله مانند به دست آید اما این قله، خود در دامنه یک قله بزرگتر قرار داشته باشد. (شکل ۱-۲)

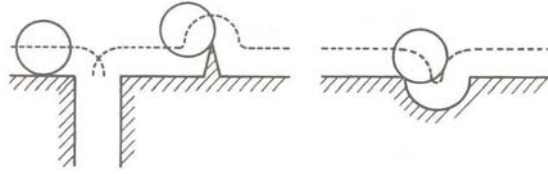


شکل ۱-۲. اندازه گیری سوزنی [۳]

مشکل دیگر در مورد اندازه گیری سوزنی، آن است که حرکت سوزن در حین اندازه گیری ممکن است منجر به از بین رفتن پروفیل واقعی سطح شود، به این شکل که باعث باز شدن قله ها و یا باریکتر شدن دره ها خواهد شد. (شکل ۱-۳)

¹ Abbot

² Firestone



شکل ۱-۳. خطا در پروفیل سطح [۳]

۴-۱. وسایل اندازه گیری بدون تماس

در اندازه گیری بدون تماس از وسایل مختلفی می توان استفاده کرد:

۱. وسایل بادی:

در این روش، اندازه گیری بر اساس نشت هوا صورت می گیرد، بدین طریق که یک توپی دارای روزنه هوا، بر روی سطح قرار داده می شود و با اندازه گیری میزان جریان هوا، تغییرات در زبری مشخص می شود.

۲. وسایل نوری:

در این روش، شدت نور لیزر منعکس شده بافت سطح را مشخص کرده و مقدار متوسطی را به ازای سطح به دست می دهد.

۳. دستگاههای میکروسکوپ الکترونی:

این روش، نسبت به روشهای نوری، روش دقیقتری است و علت آن، پرتوهای الکترون میکروسکوپی بسیار کوتاه در قیاس با نور است. از نمونه های الکترون میکروسکوپی می توان به الکترون میکروسکوپ انتقالی (TEM) و انعکاس الکترون میکروسکوپی (REM) اشاره کرد:

الف: الکترون میکروسکوپی انتقالی (TEM):

در این روش، الکترونها روی یک نمونه نازک برخورد کرده و یک سیستم لنزی با بزرگ و متمرکز کردن الکترونهای پخش شده، تصویری مجازی روی یک صفحه یا فیلم عکاسی ایجاد می کند. کاربرد این روش در مورد سطحهایی است که در آنها تغییرات ناشی از ساییدگی ایجاد شده باشد.

ب: انعکاس الکترون میکروسکوپی (REM):

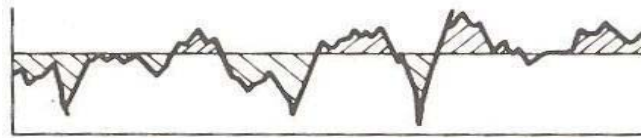
در این روش الکترونها پخش شده از روی سطح نمونه، به یک جمع کننده برخورد کرده و باعث ایجاد علامتی الکتریکی می شوند. با تبدیل این علامت، تصویری مجازی از سطح نمونه بر روی صفحه تصویر ایجاد خواهد شد.

در محاسبه پارامترهای مشخص کننده بافت سطح، تمامی اندازه گیریهای مربوط به ارتفاع، از یک خط مرجع، اندازه گیری می شوند. برای این کار از چند روش استفاده می شود که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد.

۵-۱. سیستمهای اندازه گیری

سیستم متوسط یا M :

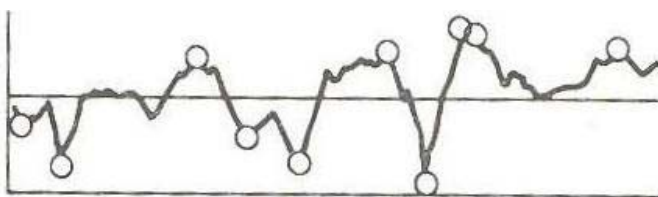
در این روش، خط متوسط را به عنوان مرکز محور نمایه در نظر می گیرند. بدین معنا که مساحت در بالا و پایین این خط، برابر خواهد بود. در این شکل با توجه به افقی بودن خط مرجع، امکان جبران خطای شکل یا کجی نمی باشد. (شکل ۱-۴)



شکل ۱-۴. سیستم متوسط [۳]

متوسط ده نقطه:

در این روش، پنج نقطه بلندی و پنج نقطه پستی در نظر گرفته می شود. (شکل ۱-۵)

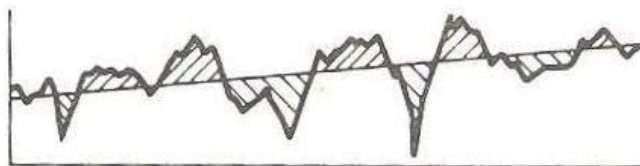


شکل ۱-۵. متوسط ده نقطه [۳]

کوچکترین مربعات:

این روش همانند سیستم M است با این تفاوت که خط مرجع، به جای افقی، شیب دار خواهد

بود. بنابراین در این روش، امکان جبران خطای شکل یا کجی می باشد. (شکل ۱-۶)



شکل ۱-۶. کوچکترین مربعات [۳]

۱-۶. مروری بر کارهای گذشته

در این قسمت به مرور برخی از کارهای انجام شده در زمینه بررسی اثر زبری سطح و روشهای ارائه شده می پردازیم. از کارهای اخیر مرتبط با این پروژه، بررسی اثر زبری سطح بر روانکاری هیدرودینامیکی یاتاقانهای لغزشی پله ای در حالتی خاص می باشد [۴]. در این روش یک فرم عمومی ریاضیاتی برای مدل کردن زبری به وسیله متغیرهای تصادفی با انحراف معیار متوسط غیر صفر در نظر گرفته می شود. بر این اساس، فرم عمومی تر معادله رینولدز برای یاتاقانهای متخلخل استخراج شده و همچنین بین یاتاقانهای صاف و یاتاقان دارای زبری مقایسه انجام می شود. قسمتی از نتایج به دست آمده از این تحقیق، افزایش ظرفیت تحمل بار و کاهش ضریب اصطکاک را نشان می دهد. همان طور که اشاره شد در این تحقیق، یاتاقانهای متخلخل مبنای بررسی قرار گرفته است. در یاتاقانهای متخلخل به واسطه نوعشان، اثر زبری سطح بسیار مشهود و

غیر قابل چشم پوشی می باشد. صفحات در تئوری روانکاری هیدرودینامیکی، به طور کامل، صاف در نظر گرفته می شوند در حالی که در یاتاقانهای کاملاً صاف نیز در عمل زبری های بسیار کوچک باعث تغییر پارامترهای عملکرد یاتاقان خواهد شد. تاکنون، مدلهای متفاوتی برای زبری ارائه شده است. از نمونه آنها می توان به ارائه مدل المان محدود یک بعدی برای یاتاقانهای هیدرودینامیکی نام برد [۵]. در این تحقیق، زبری ها به دو شکل طولی و عرضی مدل شده اند. ضخامت فیلم سیال به عنوان یک متغیر تصادفی در نظر گرفته شده و مسأله در حالت پایدار بررسی شده است. نتایج به دست آمده تطابق مناسبی با مدل های ارائه شده تحلیلی قبلی نشان می دهد. از بررسی های اولیه انجام شده با روش المان محدود، حل المان محدود جریان غیر قابل تراکم در مسائل روانکاری است [۶]. این روش نسبت به روش های عددی دیگر مزایایی دارد. علاوه بر عمومیت آن نسبت به هندسه و تغییرات خواص میدان، تعریف شرایط مرزی بر مبنای فشار یا جریان و استفاده از شرایط تقارن از امتیازات دیگر آن می باشد. روش المان محدود در ابتدا در دهه ۱۹۵۰ به عنوان روشی برای حل مسائل سازه ای مورد بررسی قرار گرفت [۷]. این روش در سال ۱۹۶۳ به عنوان یک تکنیک عمومی برای حل مسائل الاستیک پیوسته، مطرح شد [۸]. و در نهایت در سال ۱۹۶۵ به عنوان روشی برای حل مسائل میدانی به کار رفت [۹]. کاربرد این روش در حل مسائل روانکاری نیز در این دسته قرار می گیرد [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵].

همواره نشان داده شده در حالاتی که زبری هم مرتبه با ضخامت فیلم سیال است، تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای عملکرد خواهد داشت [۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰]. از نمونه کارهای دیگر انجام شده در این زمینه بررسی اثر زبری های بسیار کوچک در روانکاری الاستوهیدرودینامیکی می باشد که در آن با استفاده از مدل عمومی رینولدز به کار رفته می توان تأثیر خلأ زایی را نیز در نظر گرفت. این مدل برای روانکاری هیدرودینامیکی نیز کاربرد دارد [۲۱]. همچنین در حالتی که با روانکاری الاستوهیدرودینامیکی مواجه هستیم، نیاز به حل همزمان معادله رینولدز و معادلات الاستیسیته خواهد بود [۲۲]. گاهی نیز تغییر خواص سیال به عنوان فاکتور موثر دیگر مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال افزودن مواد پلیمری به سیال روانکار باعث تغییر رفتار آن می شود که

در این حالت نیاز به استفاده از معادلات کلی تری برای بررسی مسأله می باشد [۲۳]. از کارهای دیگر انجام شده ارائه یک مدل المان محدود برای تماس عمودی سطوح زبر است [۲۴]. در این تحقیق نشان داده شده است که توزیع ارتفاع زبری تأثیر بیشتری نسبت به انحنای زبری دارد. این نتیجه برای یاتاقانهای لغزشی پله ای در پروژه حاضر نیز حاصل شده است.

با ملاحظه کارهای انجام شده در زمینه زبری سطح می توان به این نتیجه رسید که برخی از بررسی های انجام شده مربوط به در نظر گرفتن و تخمین پروفیل مناسب برای زبری و برخی دیگر مربوط به ارائه تئوری های مختلف برای بررسی این پدیده می باشد. هندسه سطح آنچنان نامنظم است که گاه ناگزیر به استفاده از مدل های آماری خواهیم بود. برای مثال، یک پروفیل ممکن است به صورت یک پروسه تصادفی مدل شده باشد [۲، ۲۵ و ۲۶].

از کارهای انجام شده در این زمینه بررسی تأثیر زبری سینوسی می باشد [۲۷]. از نمونه های دیگر، ارائه پروفیل های زبری به فرم منحنی هایی با دندان های اره ای شکل است [۲۸]. در تحقیقات دیگر، توزیع های دیگری برای زبری در نظر گرفته شده است که استفاده از توابع توزیع احتمال نمونه ای از آنهاست [۲۹]. در بسیاری از کارهای گذشته از این توابع برای تخمین پروفیل زبری استفاده شده است [۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۳۰].

در برخی دیگر از تحقیق ها به بررسی امکان استفاده از معادله رینولدز به عنوان معادله دیفرانسیل حاکم در یاتاقانها و برقراری شرایط لازم برای استفاده از این معادله پرداخته شده است [۳۱]. بسیاری از بررسی های مربوط به زبری سطح، بر مبنای معادله رینولدز صورت گرفته است [۱۶ و ۲۹ و ۳۰]. در حالات معمولی روانکاری می توان از این معادله برای بررسی مسأله زبری استفاده کرد. از فرض های این معادله آن است که طول یاتاقان بایستی بسیار بزرگتر از ضخامت فیلم سیال باشد. در غیر این صورت امکان استفاده از معادله رینولدز نخواهد بود. همچنین در حالتی که شیب محلی زبری زیاد باشد نیز این معادله کارآیی ندارد [۳۲].

۷-۱. بررسی برخی از روشها

در یکی از اولین تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر زبری سطح در عملکرد یاتاقانها، اثر زبری سطح بر روی ظرفیت تحمل بار و نیروی اصطکاک، مورد بررسی قرار گرفت. از طرفی بین طول موج و زبری تمایزی مطرح شد و در آن، زبری به عنوان یک کمیت که بتوان با یک تابع توزیع احتمال قابل دستیابی به وسیله آزمایش، آن را به دست آورد، ارائه گردید. در این بررسی زنگ^۱ و سیبل^۲ به این نتیجه رسیدند که بررسی زبری سطح، فرآیندی بسیار پیچیده تر از طول موج ناهمواریهاست و اثر بیشتری بر پارامترهای عملکرد روانکاری نسبت به اثر طول موج زبری دارد [۲۹]. آنها رفتار تحلیلی زبری را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه را به صورت عددی برای بیان میزان تأثیر زبری، نشان دادند. در این بررسی، که در مورد یاتاقانهای لغزشی به کار رفته است، زبری توسط تابع توزیع احتمال ارائه می شود که این تابع را معمولاً تابع توزیع گاما و یا بتا در نظر می گیرند که در این بررسی، از تابع بتا به فرم زیر استفاده شده:

$$f(\varepsilon) = \frac{15}{16c} \left(1 - \frac{\varepsilon^2}{c^2}\right)^2 \quad -c \leq \varepsilon \leq c \quad (1-1)$$

که مقدار این تابع به ازای ε های دیگر برابر صفر است. در رابطه بالا، ε ، انحراف زبری از مقدار متوسط سطح یاتاقان می باشد. با این روش، در واقع ضخامت لایه روانکار بر حسب این توابع بیان خواهد شد و در نهایت با جایگذاری در معادله رینولدز، فشار و در نتیجه مابقی پارامترهای عملکرد یاتاقان را می توان به دست آورد. در اینجا به اختصار، اشاره ای به روند محاسبات به کار رفته در [۲۹] می پردازیم.

یک یاتاقان لغزشی عریض که در آن از فشار در جهت عرض، dp/dz ، صرف نظر می شود،

در نظر بگیرید. (شکل ۱-۷)

معادله رینولدز به فرم زیر در خواهد آمد:

$$\frac{d}{dx} \left(H^3 \frac{dp}{dx} \right) = \Lambda_1 \frac{dH}{dx} \quad (2-1)$$

(در مورد نحوه به دست آمدن این معادله در فصلهای بعدی بحث خواهد شد.)

¹ Tzeng

² Saibel