



دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

شبیه‌سازی عددی جریان هوا و نشست ذرات مایکرو و نانو در بینی
انسان پس از عمل جراحی مجازی اسفنوئیدوتومی

استاد راهنما

دکتر امید ابوعلی

به کوشش

حجت بهمن زاده

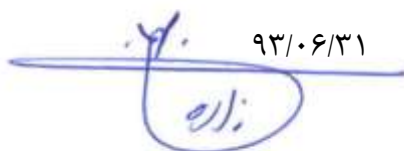
شهریور ۹۳

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

اظہارنامہ

اینجانب حجت بہمن زادہ (۹۰۰۳۸۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مہندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکدہ مہندسی مکانیک اظہار می‌کنم کہ این پایان نامہ حاصل پژوهش خودم بودہ و در جہایی کہ از منابع دیگران استفادہ نمودہ‌ام نشانی دقیق و مشخصات کامل آنرا نوشتہ‌ام. همچنین اظہار می‌کنم کہ موضوع پایان نامہ ام تکراری نیست و تعہد می‌نمایم بدون مجوز دانشگاہ دستاوردهای آنرا منتشر ننمودہ و یا در اختیار غیر قرار ندم. کلیہ حقوق این اثر مطابق با آیین نامہ فکری و معنوی متعلق بہ دانشگاہ شیراز است.

حجت بہمن زادہ

۹۳/۰۶/۳۱


به نام خدا

شبیه‌سازی عددی جریان هوا و نشست ذرات مایکرو و نانو در بینی انسان
پس از عمل جراحی مجازی اسفونئیدوتومی

به کوشش:

حجت بهمن زاده

پایان نامه ی:

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای

اخذ درجه ی کارشناسی ارشد

در رشته ی


مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)

دانشگاه شیراز

شیراز


جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی کمیته پایان نامه با درجه ی: عالی


دکتر امید ابوعلی، دانشیار مهندسی مکانیک (استاد راهنما)

دکتر محمد فرامرزی، دانشیار بخش گوش، حلق و بینی

دانشگاه علوم پزشکی شیراز (استاد مشاور)


دکتر محمدهادی اکبری، دانشیار مهندسی مکانیک (داور متخصص داخلی)

شهریور ۱۳۹۳

تقدیم به مہربان فرشتگانی کہ:

لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن،

عظمت رسیدن و تمام تجربہ ہای یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز آہناست

تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم

سپاسگزاری

با سپاس فراوان از راهنمایی‌ها و زحمات استاد محترم و گرانقدر جناب آقای دکتر امید ابوعلی که از ابتدای راه و در طی انجام این تحقیق، با راهنمایی‌های خود مرا در انجام این پژوهش یاری نمودند و جناب آقای دکتر محمد فرامرزی استاد محترم مشاور، که با هدایت و حمایت‌های بی دریغشان یاری‌ام نمودند و همچنین قدردانی و تقدیر از استاد بزرگوار، جناب آقای دکتر محمدهادی اکبری که زحمت داوری این اثر را برعهده گرفته‌اند.

چکیده

شبیه‌سازی عددی جریان هوا و نشست ذرات مایکرو و نانو در بینی انسان پس از عمل جراحی مجازی اسفنوئیدوتومی

به کوشش

حجت بهمن زاده

در تحقیق حاضر، اثرات جراحی اسفنوئیدوتومی بر میدان جریان هوا و نشست ذرات در ابعاد مایکرو و نانو در مجاری بینی انسان و سینوس اسفنوئید مورد بررسی قرار گرفت. یک مدل واقعی از مجاری بینی شامل حفره و سینوس‌های اطراف آن با استفاده از مجموعه تصاویر سی‌تی اسکن متعلق به فردی سالم بازسازی گردید. سپس، جراحی مجازی اسفنوئیدوتومی به روش آندوسکوپیک بر روی مجرای سمت چپ و سینوس اسفنوئید انجام شد. میدان جریان هوا برای سیکل تنفسی کامل (دم و بازدم) تحت شرایط استراحت برای دبی‌های مختلف به صورت زمانمند شبیه‌سازی گردید. برای مدل‌سازی انتقال و نشست ذرات استنشاقی، دیدگاه‌های لاگراتژی و اوپلری به ترتیب برای ذرات با ابعاد مایکرومتر و نانومتر مورد استفاده قرار گرفت. نشست ذرات در حفره بینی و به‌ویژه در ناحیه اسفنوئید برای حالت‌های قبل و بعد از جراحی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که جراحی اسفنوئیدوتومی باعث افزایش ورود جریان هوا به ناحیه سینوس گردیده که خود موجب افزایش نفوذ و نشست ذرات در این ناحیه می‌گردد. ذرات مایکرو پس از جراحی حداکثر تا قطر ۲۵ میکرون قابلیت نفوذ به داخل سینوس اسفنوئید را دارا بوده که از میان آنها ذرات ۱۰ میکرونی بیشترین میزان نشست را در این ناحیه دارند. نتایج بررسی نشست ذرات در ابعاد نانو نیز نشان می‌دهد که ذرات ۱-۵۰ نانومتر نیز پس از عمل جراحی قادر به نفوذ به ناحیه اسفنوئید بوده که با افزایش قطر ذره از مقدار نشست آنها کاسته می‌شود. همچنین محدوده‌ی اعتبار فرض جریان شبه دائم در حل میدان جریان در حفره بینی بر اساس عدد بی بعد استروهل تعیین گردید و مقایسه‌ای نیز بین نشست ذرات تحت شرایط جریان سیکلی و جریان ثابت معادل آن انجام شد.

کلیدواژه‌ها: مجرای بینی، سینوس اسفنوئید، جراحی مجازی، اسفنوئیدوتومی، ذرات مایکرو و نانو، جریان غیردائمی.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول: مقدمه
۱	
۱	۱-۱ آناتومی بینی و حفره بینی انسان
۶	۲-۱ فیزیولوژی بینی و حفره بینی انسان
۸	۳-۱ بیماری سینوزیت
۸	۴-۱ سینوس اسفنوئید و سینوزیت
۹	۵-۱ جراحی اسفنوئیدوتومی
۹	۶-۱ پرتونگاری کامپیوتری (سی تی اسکن)
۱۲	۷-۱ اهمیت دینامیک سیالات محاسباتی در شبیه‌سازی جراحی‌ها
۱۳	۸-۱ اهداف تحقیق
	فصل دوم: مبانی نظری تحقیق
۱۵	
۱۵	۱-۲ جریان آرام یا مغشوش

۱۶	۲-۲ جریان دائمی و غیردائمی
۱۷	۳-۲ اصول دینامیک ذره
۱۸	۱-۳-۲ نیروهای وارد بر ذره
۱۸	۱-۳-۲ نیروی درگ
۲۵	۲-۳-۲ نیروی لیفت
۲۶	۳-۳-۲ نیروی براونی
۲۷	۴-۳-۲ نیروی جاذبه
۲۸	۴-۲ تشریح حرکت ذره
۲۹	۱-۴-۲ روش لاگرانژی
۳۱	۲-۴-۲ روش اویلری
۳۲	۵-۲ ارتباط معادلات سیال و ذره
۳۴	۶-۲ قطر ذرات

فصل سوم: مروری بر تحقیقات گذشته

۳۶	
۳۷	۱-۳ جریان دائمی
۳۷	۱-۱-۳ میدان جریان
۴۲	۲-۱-۳ نشست ذرات
۵۰	۲-۳ جریان غیردائمی

فصل چهارم: روش تحقیق و معادلات حاکم

۵۵	
۵۵	۱-۴ بازسازی مدل‌های هندسی
۵۵	۱-۱-۴ کلیات ساخت مدل هندسی از تصاویر پزشکی
۵۶	۱-۱-۴ تهیه تصاویر پزشکی
۵۸	۲-۱-۴ تعیین مرزها و نواحی
۵۹	۳-۱-۴ ساختن مدل به صورت حجم یا سطح

- ۶۰ ۲-۱-۴ بازسازی مدل هندسی حفره بینی قبل از جراحی
- ۶۳ ۳-۱-۴ بازسازی مدل هندسی حفره بینی پس از جراحی
- ۶۵ ۴-۱-۴ مقایسه هندسی مدل‌های قبل و بعد از عمل جراحی مجازی
- ۶۹ ۲-۴ شبکه بندی مدل‌های هندسی
- ۶۹ ۱-۲-۴ ویژگی‌های شبکه غیرساختار یافته
- ۷۰ ۲-۲-۴ روش مثلث‌بندی Delaunay
- ۷۲ ۳-۲-۴ شبکه بندی مدل حفره بینی و سینوس‌ها
- ۷۲ ۴-۲-۴ استقلال از شبکه
- ۷۴ ۳-۴ معادلات حاکم
- ۷۴ ۱-۳-۴ معادلات حاکم بر جریان سیال
- ۷۴ ۲-۳-۴ معادلات حاکم بر حرکت ذره
- ۷۵ ۱-۲-۳-۴ ذرات در ابعاد میکرومتر
- ۷۷ ۲-۲-۳-۴ ذرات در ابعاد نانومتر
- ۷۸ ۳-۳-۴ شرایط مرزی و روش حل

فصل پنجم: نتایج

- ۸۳ ۱-۵ بررسی و مطالعه‌ی شبکه محاسباتی
- ۸۷ ۲-۵ بررسی و مطالعه‌ی گام زمانی حل زمانمند میدان جریان
- ۹۰ ۳-۵ میدان جریان
- ۹۰ ۱-۳-۵ خطوط جریان
- ۹۰ ۲-۳-۵ مقدار جریان هوای ورودی به سینوس اسفنوئید
- ۹۳ ۳-۳-۵ کانتور سرعت
- ۹۶ ۴-۵ نشست ذرات در حفره بینی و سینوس اسفنوئید
- ۹۶ ۱-۴-۵ نشست ذرات در ابعاد میکرو
- ۹۶ ۱-۱-۴-۵ مطالعه‌ی تعداد ذره تزریق شده در هر گام زمانی

۹۸	۲-۱-۴-۵ بررسی و مطالعه‌ی گام زمانی تزریق ذرات به جریان
۹۹	۳-۱-۴-۵ صحت سنجی نتایج نشست ذرات میکرو
۱۰۲	۴-۱-۴-۵ نشست کلی ذرات در مقیاس میکرو
۱۰۷	۵-۱-۴-۵ نشست ناحیه‌ای ذرات میکرو در حفره‌ی بینی
۱۱۰	۶-۱-۴-۵ نشست ذرات میکرو در سینوس اسفنوئید
۱۱۳	۷-۱-۴-۵ نمایش گرافیکی نشست ذرات میکرو
۱۱۶	۲-۴-۵ نشست ذرات با ابعاد نانو
۱۱۶	۱-۲-۴-۵ صحت سنجی نتایج نشست ذرات نانو
۱۱۸	۲-۲-۴-۵ شار نشست ذرات نانو در حفره بینی
۱۲۰	۳-۲-۴-۵ نشست کلی ذرات نانو در حفره بینی
۱۲۴	۴-۲-۴-۵ نشست ناحیه‌ای ذرات نانو در حفره‌ی بینی
۱۲۷	۵-۲-۴-۵ نشست ذرات نانو در سینوس اسفنوئید
۱۳۳	۳-۴-۵ بررسی جریان شبه دائمی
۱۴۰	۴-۴-۵ مقایسه نشست ذرات در جریان سیکلی و جریان ثابت

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱۴۷	۱-۶ نتیجه‌گیری
۱۵۱	۲-۶ پیشنهادها
۱۵۲	منابع و مآخذ

فهرست شکل‌ها

شماره و عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ ساختار اسکلتی جمجمه انسان که در آن حفره بینی و استخوانهای صورت نشان داده می شود.	۲
شکل ۲-۱ نمای جانبی و خارجی بینی که در آن ساختار غضروفی و استخوانی به همراه جهت های آناتومی نشان داده می شود.	۳
شکل ۳-۱ ساختار داخلی حفره بینی	۴
شکل ۴-۱ دیواره جانبی حفره بینی و توربینیت ها	۵
شکل ۵-۱ سینوسهای اطراف بینی و موقعیت هر یک از آنها نسبت به حفره بینی	۶
شکل ۶-۱ سه نوع مختلف اسکنرهای پرتونگاری کامپیوتری و روش کار آنها	۱۰
شکل ۷-۱ صفحات آناتومی و تعریف موقعیتهای	۱۱
شکل ۸-۱ تصاویر سی تی اسکن	۱۲
شکل ۱-۲ پیش بینی مدل های مختلف برای ضریب درگ ذره کروی	۲۰
شکل ۲-۲ شماتیک حرکت ذره در جریان هوا	۲۲
شکل ۳-۲ شماتیک نیروی لیفت وارد بر ذره در جریان برشی	۲۶

- شکل ۴-۲ حرکت براونی ذره تحت تاثیر برخورد مولکولهای سیال با آن در مسیری اتفاقی شکل می‌گیرد. ۲۷
- شکل ۵-۲ توصیف لاگرانژی و اوپلری حرکت ذره در میدان جریان ۲۸
- شکل ۶-۲ جریانهای رقیق و غلیظ تشریح شده توسط کوپرس (۲۰۰۰). الف- جریانهای رقیق، به طور متوسط کمتر از یک ذره در یک سلول محاسباتی حضور دارد؛ ب- جریان غلیظ، نسبتاً تعداد ذرات زیادی در یک سلول محاسباتی حضور دارند؛ پ- جریان های رقیق یا غلیظ، تعداد زیادی از سلولهای محاسباتی تنها یک ذره را در برمی‌گیرند. ۳۱
- شکل ۷-۲ بیان اوپلری از کسرهای حجمی و حجمهای اشغال شده توسط جریان دوفازی شامل فاز پیوسته و گسسته. ۳۲
- شکل ۸-۲ معادلات سیال و ذره و همبستگی بین آنها ۳۳
- شکل ۹-۲ بازه قطر برای انواع ذرات ۳۴
- شکل ۱-۳ مدل کامپیوتری مسیر هوایی بینی و اتصال آن به فارینکس که توسط کلی و همکاران (۲۰۰۰) استفاده شد. ۳۸
- شکل ۲-۳ مدل محاسباتی استفاده شده توسط Hörschler و همکاران (۲۰۰۱) ۳۹
- شکل ۳-۳ مدل بکار رفته توسط ون و همکاران (۲۰۰۸) و شبکه بندی آن ۴۱
- شکل ۴-۳ مدل آزمایشگاهی کلی و همکاران (a,b2004) ۴۳
- شکل ۵-۳ مدل سه بعدی حفره بینی برای آنالیز محاسباتی ساخته شده توسط زمانخان و همکاران (۲۰۰۶). ۴۴
- شکل ۶-۳ نمونه ای از نتایج بدست آمده توسط گروه شروتتر و همکاران (۲۰۱۱) ۴۶
- شکل ۷-۳ مدل استفاده شده توسط فرهادی قلاتی و همکاران (۲۰۱۲) ۴۸
- شکل ۸-۳ مدل استفاده شده توسط ابوعلی و همکارانش (۲۰۱۲) ۵۰
- شکل ۱-۴ الف) مقادیر مقیاس خاکستری تبدیل شده به واحدهای هانسفیلد ب) نمایش یک پیکسل (فضای دو بعدی) و یک وُکسل (فضای سه بعدی) ۵۷
- شکل ۲-۴ تصویر مقیاس خاکستری بصورت رقمی با ردیف x و ستون y و تابع مقیاس خاکستری $f(x,y)$ برای هر پیکسل ۵۸
- شکل ۳-۴ محیط نرم افزار میمیکس به همراه تصاویر خام سی تی اسکن از سه نمای روبرو، جانب و بالا ۶۰

۶۱	تعیین نواحی و مرزهای مربوط به حفره و سینوس های یک طرف بینی	شکل ۴-۴
۶۲	تعیین نواحی نواحی و مرزهای تعیین شده در چند برش به عنوان نمونه	شکل ۵-۴
۶۲	مدل سه بعدی استخراج شده از مجاری سمت چپ بینی به عنوان مدل قبل از جراحی	شکل ۶-۴
۶۳	موقعیت حفره بینی و سینوس ها نسبت به صورت	شکل ۷-۴
۶۴	قسمت های بریده شده در جراحی با رنگ قرمز در برش های مختلف سی تی اسکن نشان داده شده است.	شکل ۸-۴
۶۶	مدل هندسی حفره بینی و سینوس ها (الف) قبل از جراحی (ب) بعد از جراحی مجازی	شکل ۹-۴
۶۶	محل برش های افقی برای مقایسه تغییرات مجاری قبل و بعد از جراحی	شکل ۱۰-۴
۶۷	مقایسه سطح مقطع برش های مختلف برای حالت های قبل و بعد از جراحی	شکل ۱۱-۴
۶۸	تغییرات دهانه ی اسفنوئید بعد از جراحی در نمای سه بعدی	شکل ۱۲-۴
۶۸	تقسیم بندی مدل حفره بینی به بخش های مختلف	شکل ۱۳-۴
۷۱	یک شبکه مثلثی بر اساس مثلث بندی Delaunay. دواير رنگی ارتباط بین نقاط مثلثی و عدم حضور نقاط گرهی خارجی داخل دایره را نشان می دهد.	شکل ۱۴-۴
۷۳	ساختار شبکه هیبریدی شامل المانهای چهار وجهی و لایه های منشوری برای مقاطع مختلف مدل به همراه بزرگنمایی	شکل ۱۵-۴
۷۹	شرط مرزی ناحیه حلق بینی برای دبیهای مختلف	شکل ۱۶-۴
۸۵	شبکه سطح برای دهلیز و دریچه بینی (ناحیه ورودی بینی) (الف) شبکه درشت اولیه (ب) بعد از ریز کردن شبکه	شکل ۱-۵
۸۵	موقعیت پاره خط های تعریف شده برای مطالعه شبکه	شکل ۲-۵
۸۶	مقایسه پارامتر سرعت بی بعد در چهار شبکه با تعداد سلول های مختلف	شکل ۳-۵
۸۷	موقعیت نقاط تعریف شده جهت مطالعه ی گام زمانی	شکل ۴-۵
۸۸	تغییرات سرعت در نقاط مختلف به ازای گام های زمانی متفاوت	شکل ۵-۵
۸۹	تغییرات اندازه سرعت در دو نقطه ی بحرانی برای سه سیکل تنفسی متوالی	شکل ۶-۵
۹۱	خطوط جریان در لحظه ی بیشینه ی جریان دم و بازدم برای تنفس با بیشینه دبی ۷/۵ لیتر بر دقیقه	شکل ۷-۵

- شکل ۵-۸ نرخ جریان وارد شده به سینوس اسفنجیویید طی یک سیکل تنفسی الف) قبل از جراحی (ب) پس از جراحی ۹۲
- شکل ۵-۹ نسبت هوای وارد شده به اسفنجیویید به هوای وارد شده به بینی در یک سیکل تنفس (پس از جراحی) ۹۲
- شکل ۵-۱۰ کانتورهای اندازه سرعت برای مقاطع مختلف در لحظه‌ی بیشینه جریان دم برای تنفس با بیشینه دبی ۷/۵ لیتر بر دقیقه ۹۴
- شکل ۵-۱۱ کانتورهای اندازه سرعت برای مقاطع مختلف در لحظه‌ی بیشینه جریان بازدم برای تنفس با بیشینه دبی ۷/۵ لیتر بر دقیقه ۹۵
- شکل ۵-۱۲ مقایسه نمودار نشست کلی به ازای تعداد ذرات مختلف تزریق شده ۹۷
- شکل ۵-۱۳ مقایسه نمودار نشست ناحیه‌ای به ازای تعداد ذرات مختلف تزریق شده الف) ۱ میکرون (ب) ۲۰ میکرون ۹۷
- شکل ۵-۱۳ (ادامه) ۹۸
- شکل ۵-۱۴ مقایسه نمودار نشست کلی به ازای گام های زمانی ۰/۱ و ۰/۰۵ ثانیه برای تزریق ذرات ۹۹
- شکل ۵-۱۵ مقایسه نتایج حل عددی نشست ذرات مایکرو با داده‌های تجربی و عددی برحسب پارامتر برخورد ۱۰۱
- شکل ۵-۱۶ مقایسه نمودار نشست کلی ذرات مایکرو در مدل‌های قبل (pre) و بعد (post) از جراحی برای نرخ‌های تنفسی مختلف ۱۰۳
- شکل ۵-۱۷ نشست کلی ذرات مایکرو به تفکیک فاز دم و بازدم برای مدل قبل از جراحی الف) ۵ L/min، ب) ۷/۵ L/min، ج) ۱۰ L/min ۱۰۵
- شکل ۵-۱۸ نشست کلی ذرات مایکرو به تفکیک فاز دم و بازدم برای مدل بعد از جراحی الف) ۵ L/min، ب) ۷/۵ L/min، ج) ۱۰ L/min ۱۰۶
- شکل ۵-۱۹ نشست ناحیه‌ای ذرات ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرونی برای مدل قبل از جراحی در تنفس با بیشینه دبی الف) ۵ L/min، ب) ۷/۵ L/min، ج) ۱۰ L/min ۱۰۸
- شکل ۵-۲۰ نشست ناحیه‌ای ذرات ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرونی برای مدل بعد از جراحی در تنفس با بیشینه دبی الف) ۵ L/min، ب) ۷/۵ L/min، ج) ۱۰ L/min ۱۰۹
- شکل ۵-۲۱ مقایسه‌ی نشست مایکرو ذرات در سینوس اسفنجیویید (بعد از عمل) به ازای دبی‌های مختلف ۱۱۰
- شکل ۵-۲۲ نشست ذرات مایکرو در اسفنجیویید بعد از جراحی به تفکیک فاز دم و بازدم در تنفس با بیشینه دبی الف) ۵ L/min، ب) ۷/۵ L/min، ج) ۱۰ L/min ۱۱۲

- شکل ۲۳-۵ الگوی نشست ذرات ۱، ۱۰ و ۲۰ میکرونی قبل و بعد از جراحی برای تنفس با بیشینه دبی ۱۰ L/min
- شکل ۲۴-۵ مقایسه نتایج حل عددی نشست ذرات نانو با داده‌های تجربی کلی و همکاران
- شکل ۲۵-۵ تغییرات شار نشست لحظه‌ای ذرات نانو بر دیواره‌ی حفره‌ی بینی به صورت درصد از کل نشست. الف) تنفس با بیشینه دبی ۵ لیتر بر دقیقه، ب) تنفس با بیشینه دبی ۷/۵ لیتر بر دقیقه، ج) تنفس با بیشینه دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه
- شکل ۲۶-۵ مقایسه نمودار نشست کلی ذرات نانو در مدل قبل از جراحی برای نرخ‌های تنفسی مختلف
- شکل ۲۷-۵ مقایسه نمودار نشست کلی ذرات نانو در مدل‌های قبل و بعد از جراحی برای نرخ‌های تنفسی مختلف
- شکل ۲۸-۵ نشست کلی ذرات نانو به تفکیک فاز دم و بازدم برای مدل قبل از جراحی با بیشینه دبی الف) ۵ L/min، ب) ۷/۵ L/min، ج) ۱۰ L/min
- شکل ۲۹-۵ نشست کلی ذرات نانو به تفکیک فاز دم و بازدم برای مدل بعد از جراحی با بیشینه دبی الف) ۵ L/min، ب) ۷/۵ L/min، ج) ۱۰ L/min
- شکل ۳۰-۵ نشست ناحیه‌ای ذرات ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ نانومتری برای مدل قبل از جراحی با بیشینه دبی الف) ۵ L/min، ب) ۷/۵ L/min، ج) ۱۰ L/min
- شکل ۳۱-۵ نشست ناحیه‌ای ذرات ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ نانومتری برای مدل بعد از جراحی با بیشینه دبی الف) ۵ L/min، ب) ۷/۵ L/min، ج) ۱۰ L/min
- شکل ۳۲-۵ تغییرات شار نشست لحظه‌ای ذرات نانو بر دیواره‌ی سینوس اسفنویید به صورت درصد از کل نشست
- شکل ۳۲-۵ (ادامه)
- شکل ۳۳-۵ نشست نرمالیزه شده ذرات نانو در تنفس با بیشینه دبی الف) ۵ لیتر بر دقیقه، ب) ۷/۵ لیتر بر دقیقه، ج) ۱۰ لیتر بر دقیقه.
- شکل ۳۳-۵ (ادامه)
- شکل ۳۴-۵ مقایسه‌ی نشست نانو ذرات در سینوس اسفنویید (بعد از عمل) به ازای دبی‌های مختلف
- شکل ۳۵-۵ نشست ذرات نانو در اسفنویید به تفکیک فاز دم و بازدم (بعد از جراحی) در تنفس با بیشینه دبی الف) ۵ L/min، ب) ۷/۵ L/min، ج) ۱۰ L/min
- شکل ۳۶-۵ مقایسه افت فشار بی بعد برای حل جریان غیردائمی و دائمی در فاز دم بر حسب دبی جریان

- شکل ۳۷-۵ مقایسه افت فشار بی بعد برای حل جریان غیردائمی و دائمی بر حسب عدد استروهال ۱۳۵
- شکل ۳۷-۵ ادامه ۱۳۶
- شکل ۳۸-۵ تغییرات عدد استروهال نسبت به زمان ۱۳۷
- شکل ۳۹-۵ مقایسه افت فشار بی بعد برای حل جریان غیردائمی و دائمی در فاز بازدم بر حسب دبی جریان ۱۳۸
- شکل ۳۹-۵ ادامه ۱۳۹
- شکل ۴۰-۵ الگوی تنفسی برای دبی سیکلی با بیشینه‌ی ۱۰ لیتر بر دقیقه ۱۴۱
- شکل ۴۱-۵ مقایسه نشست ذرات میکرونی در حفره‌ی بینی در دبی سیکلی، دبی بیشینه و دبی میانگین ۱۴۱
- شکل ۴۲-۵ مقایسه نشست ذرات نانو در حفره‌ی بینی در دبی سیکلی و دبی میانگین ۱۴۲
- شکل ۴۳-۵ مقایسه نشست ذرات نانو در حفره‌ی بینی در دبی سیکلی، دبی میانگین و دبی معادل برای شدت تنفس‌های مختلف ۱۴۳
- شکل ۴۴-۵ مقایسه نشست ذرات نانو در سینوس اسفنوئید در دبی سیکلی، دبی میانگین و دبی معادل در شدت تنفس‌های مختلف ۱۴۴
- شکل ۴۴-۵ ادامه ۱۴۵

فهرست جداول

صفحه

شماره و عنوان

۲۱	تغییرات ضریب کانینگهام نسبت به قطر برای $\lambda = 0.07 \mu\text{m}$	جدول ۱-۲
۲۴	سرعت نهایی، زمان تخفیف، مسافت توقف برای ذره با چگالی واحد در هوا برای فشار ۱ اتمسفر و دما ۲۰ درجه سلسیوس	جدول ۲-۲
۷۸	ضریب نفوذ جرمی ذره برای قطرهای مختلف	جدول ۴-۱

فهرست نشانه های اختصاری

C	غلظت ذره
C_c	ضریب تصحیح کانینگهام
C_D	ضریب درگ
D	ضریب نفوذ ذره
D_H	قطر هیدرولیکی ورودی بینی
d_p	قطر ذره
F_D	نیروی درگ استوکس
F_{drag}	نیروی درگ
F_L	نیروی لیفت
g	شتاب گرانشی
k_B	ثابت بولتزمن
m	جرم ذره
Re	عدد بی بعد رینولدز
Re_p	عدد بی بعد رینولدز بر حسب اختلاف سرعت ذره و سیال
S	عدد بی بعد استروهل
St	عدد استوکس
T	دمای مطلق سیال
t	زمان
u	سرعت سیال

α عدد بی بعد ومرسلی
 λ مسافت آزاد متوسط
 μ ویسکوزیته دینامیکی سیال
 ν_g لزجت سینماتیکی هوا
 ρ_f چگالی سیال
 τ زمان تخفیف ذره
 ω فرکانس تنفس