بسم الله الرحمن الرحيم

١٠٨٢٧٣

دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)

شبیه سازی عددی جریان سیال و نشست ذرات در ابعاد مایکرو و نانو در هندسه واقعی از مجاری تنفسی بالایی انسان

توسط:
بهتاش توکلی

استاد راهنما:
دکتر امید ابوعلی

۱۳۸۷ /۹/ ۲۳

مرداد ۱۳۸۷

۱۰۸۲۷۳

به نام خدا

شبیه سازی عددی جریان سیال و نشست ذرات در ابعاد مایکرو و نانو در هندسه واقعی از مجاری تنفسی بالایی انسان

به وسیله ی:

بهتاش توکلی

پایان نامه
ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی
از فعالیت های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته ی:

مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)

از دانشگاه شیراز
شیراز
جمهوری اسلامی ایران

ارزشیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی

دکتر امید ابوعلی، استادیار بخش مهندسی مکانیک (رئیس کمیته).....
دکتر محمد مهدی علیشاهی، استاد بخش مهندسی مکانیک.....
دکتر محمد هادی اکبری، استادیار بخش مهندسی مکانیک.....
دکتر محمد هادی باقری، دانشیار بخش رادیولوژی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز.....
دکتر مهران یزدی، استادیار بخش مهندسی برق و الکترونیک.....

مردادماه ۱۳۸۷

تقدیم به پدر و مادرم،

به پاس محبتها و حمایتهای بی‌دریغشان

سپاسگزاری

شکر و سپاس خدای را که به من موهبت آموختن علم را عطا نمود.

اکنون که این رساله به پایان رسیده است بر خود لازم می‌دانم که از زحمات استاد ارجمندم آقای دکتر امید ابوعلی که همواره با راهنماییهای ارزشمند خود مرا یاری دادند و نقش عمده‌ای در به ثمر رسیدن این پایان‌نامه داشته‌اند، سپاسگزاری و قدردانی نمایم.

همچنین از اعضای محترم کمیته پایان‌نامه، آقایان دکتر علیشاهی، دکتر اکبری، دکتر باقری و دکتر یزدی که وقت ارزشمند خویش را در اختیار اینجانب قرار دادند، تشکر می‌نمایم.

از مسئولین محترم مرکز محاسبات سریع جناب آقای مهندس خواجه و خانم فالیزی که زحمات زیادی را برای اینجانب متحمل شدند تشکر می‌نمایم.

چکیده

شبیه سازی عددی جریان سیال و نشست ذرات در ابعاد مایکرو و نانو در هندسه واقعی از مجاری تنفسی بالایی انسان

به وسیله ی:

بهتاش توکلی

در این مطالعه، شکل واقعی از مجاری تنفسی بالایی انسان با استفاده از تصاویر پزشکی CT scan تهیه شده از یک فرد داوطلب و با پردازش آنها در نرم افزار MATLAB، به صورت یک هندسه سه بعدی در نرم افزار CATIA بازسازی و سپس این هندسه سه بعدی به کمک نرم افزار GAMBIT شبکه بندی شده است. با حل معادلات سه بعدی پیوستگی و ناویراستوکس میدان جریان در هندسه ساده سازی شده و واقعی از مجاری تنفسی بالایی انسان بدست آمده است. برای مدلسازی تلاطم از مدل های تلاطم دو معادله ای k-ω و مرتبه دوم انتقال تنش های رینولدز LRR، استفاده شده است. با بررسی انرژی جنبشی تلاطم و تنش های رینولدز در مدل های بازسازی شده از مجاری تنفسی، مشخص می شود که جریان هوا بر خلاف تصور اولیه، حتی در دبی کم ۱۵lit/min، متلاطم و غیرهمگن است.

در نهایت حرکت ذرات مایکرو با حل معادلات حرکت ذرات از دیدگاه لاگرانژی و توزیع ذرات نانو با حل معادله غلظت ذرات از دیدگاه اویلری مورد تحقیق قرار گرفته است. با بررسی درصد و مکان نشست ذرات در نواحی مختلف مجاری تنفسی مشخص می شود که به خصوص توزیع جرمی ذرات مایکرو کاملاً به میدان جریان و نیز تغییرات شکل هندسی مجاری تنفسی وابسته است و عامل اصلی انتشار ذرات در این ابعاد، مقدار ممنتوم آنها می باشد. نتایج حل عددی در هندسه واقعی مجاری تنفسی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و نشان می دهد که اغلب ذرات بزرگ، با قطر ایرودینامیکی بیشتر از ۱۲μm در نواحی دهان و حلق می نشینند و ذرات کوچک، در ابعاد ۱ تا ۳μm، بر روی حنجره و نای نیز نشست می کنند که این روند نشست محلی در مدلسازی هندسه ساده سازی شده از مجاری تنفسی مشاهده نمی شود و ضعف شبیه سازی در هندسه ساده سازی شده را نشان می دهد. ذرات نانو تحت تاثیر حرکات تصادفی در میدان جریان پخش می شوند و بر خلاف ذرات درشت، در ابعاد مایکرومتر، با افزایش قطر ذرات و نیز دبی تنفسی، نشست ذرات کاهش می یابد. حل عددی توزیع جرمی و نشست ذرات نانو در مجرای تنفسی واقعی انسان که برای اولین بار در منابع علمی به آن اشاره می شود، نشان می دهد که بیش از ۵۰٪ از ذرات ۱nm و نیز بیش از ۱۰٪ از ذرات ۳nm با توجه به نوع فعالیت فرد، بر روی دیواره مجاری تنفسی نشست می کنند. عبور ذرات نشست نکرده به نواحی پایین تر مجاری تنفسی انسان از نقطه نظر دارورسانی و نشست ذرات سمی در این نواحی حائز اهمیت می باشد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: معرفی	۱
۱-۱ مقدمه	۱
۱-۲ اهمیت بررسی نشست ذرات در مجاری تنفسی	۲
۱-۳ علم ذرات معلق در هوا	۴
۱-۴ سیستم تنفسی انسان	۵
۱-۵ پرتونگاری کامپیوتری (Computed Tomography Scanning) CTScan	۶
۱-۶ جریان متلاطم	۷
فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته	۹
۲-۱ مدل های ایده آل	۹
۲-۱ مدل های واقعی	۱۲
فصل سوم: روش حل و معادلات حاکم	۱۶
۳-۱ بازسازی هندسه واقعی	۱۶
۳-۱-۱ پرتونگاری کامپیوتری	۱۶

عنوان

صفحه

۳-۱-۲ پردازش تصویر ۱۹

۳-۱-۳ بازسازی هندسه سه بعدی به کمک نرم افزار CATIA ۲۱

۳-۱-۴ تولید شبکه ۲۳

۳-۱-۴-۱ مطالعه شبکه ۲۵

۳-۲ حل میدان جریان ۲۶

۳-۲-۱ مقدمه ۲۶

۳-۲-۲ معادلات حاکم ۲۷

۳-۲-۲-۱ معادلات بقایی سیال ۲۷

۳-۲-۳ مدل های تلاطم ۲۸

۳-۲-۳-۱ مدل $k-\omega$ ۲۸

۳-۲-۳-۲ مدل انتقال تنش رینولدز LRR ۳۱

۳-۳ معادله حرکت ذره ۳۴

۳-۳-۱ ذرات در ابعاد مایکرومتر ۳۴

۳-۳-۱-۱ تاثیر نوسانات سرعت میدان جریان متلاطم بر توزیع ذرات مایکرو در دیدگاه لاگرانژی ۳۶

۳-۳-۲ ذرات در ابعاد نانومتر ۳۸

۳-۴ شرایط مرزی ۳۹

۳-۴-۱ شرایط مرزی در نزدیکی دیواره در مدل تلاطم k-ω ۳۹

۳-۴-۲ شرایط مرزی در نزدیکی دیواره در مدل تلاطم انتقال تنشهای رینولدز ۴۱

۳-۴-۳ شرایط مرزی در نزدیکی دیواره مربوط به فاز ذرات ۴۵

۳-۵ روشهای عددی 45

عنوان | صفحه

۳-۵-۱ روش حل تفکیکی ۴۶

۳-۵-۲ فرم ضمنی حل معادلات ۴۷

۳-۵-۳ مجزا سازی ۴۸

۳-۵-۴ ضرائب زیر تخفیف ۴۹

۳-۵-۵ وابستگی سرعت- فشار ۵۰

فصل چهارم- بررسی نتایج ۵۲

۴-۱ هندسه ایده آل مجاری تنفسی بالایی انسان ۵۲

۴-۱-۱ میدان جریان در هندسه ایده آل از مجاری تنفسی بالایی ۵۲

۴-۱-۲ نشست ذرات مایکرو در هندسه ایده آل ۵۷

۴-۱-۳ نشست ذرات نانو در هندسه ایده آل ۶۶

۴-۲ هندسه واقعی مجاری تنفسی بالایی انسان ۶۹

۴-۲-۱ میدان جریان در هندسه واقعی مجاری تنفسی بالایی ۶۹

۴-۲-۱-۱ انرژی جنبشی تلاطم ۷۴

۴-۲-۱-۲ بررسی ویژگی غیر ایزوتروپیک میدان جریان ۷۹

۴-۲-۲ ذرات مایکرو ۸۲

۴-۲-۲-۱ نشست کلی ذرات مایکرو ۸۲

۴-۲-۲-۲ نشست محلی ذرات در ابعاد مایکرومتر بدون در نظر گرفتن پخش تلاطم ۸۵

۴-۲-۲-۳ نشست محلی ذرات در ابعاد مایکرومتر با در نظر گرفتن پخش تلاطم ۸۸

عنوان | صفحه

۴-۲-۲-۴ مقایسه میزان نشست ذرات مایکرو در دبی های مختلف تنفسی ۹۱

۴-۲-۲-۵ تاثیر ضریب C_L بر پخش تلاطم و نشست ذرات مایکرو ۹۲

۴-۲-۲-۶ تاثیر حل میدان جریان توسط مدلهای تلاطم k-ω و انتقال تنشهای رینولدز LRR بر توزیع ذرات مایکرو ۹۳

۴-۲-۲-۷ نمایش محل نشست ذرات مایکرو بر روی دیواره مجاری تنفسی واقعی انسان ۹۴

۴-۲-۳ نشست ذرات نانو ۱۰۲

۴-۲-۳-۱ مقایسه میزان نشست ذرات نانو در هندسه ایده آل و واقعی از مجاری تنفسی انسان ۱۰۵

۴-۲-۴ مقایسه درصد نشست کلی ذرات مایکرو و نانو ۱۰۶

فصل پنجم- جمع بندی و پیشنهادات ۱۰۸

۵-۱ جمع بندی ۱۰۸

۵-۱-۱ هندسه ایده آل ۱۰۸

۵-۱-۲ هندسه واقعی ۱۰۹

۵-۲ پیشنهادات ۱۱۱

مراجع ۱۱۳

پیوست ۱ الگوریتم پردازش تصویر ۱۱۷

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱) هندسه بازسازی شده از مجاری تنفسی بالایی انسان در نماهای مختلف	۲
شکل (۱-۲) آلودگی هوا در شهرها و محیط های صنعتی	۳
شکل (۱-۳) نمونه ای از دمنده های ذرات دارویی	۴
شکل (۱-۴) (الف) سیستم تنفسی انسان (ب) کیسه های هوا	۵
شکل (۱-۶) (الف) نمای بیرونی یک نمونه دستگاه CTScan (ب) نمای قطعات داخلی دستگاه (ج) روش پرتونگاری با اشعه X	۷
شکل (۲-۱) (الف) مجرای تنفسی بالایی انسان مورد استفاده در آزمایش Cheng و همکاران (ب) نتایج آزمایش Cheng و همکاران که نشست ذرات مایکرو برای دبی های مختلف را نشان می دهد	۹
شکل (۲-۲) هندسه بازسازی شده از مجاری تنفسی بالایی توسط Stapelton و همکاران (۲۰۰۰)	۱۰
شکل (۲-۳) هندسه ساده سازی شده Zhang و همکاران (a-۲۰۰۲)	۱۰
شکل(۲-۴) هندسه بازسازی شده مربوط به مجاری تنفسی شش بیمار مختلف توسط نرم افزار تجاری Materialise	۱۳

عنوان | صفحه

شکل (۲-۵) هندسه واقعی بازسازی شده از مجرای تنفسی بالایی انسان توسط Jayaraju و همکاران (۲۰۰۷) ۱۳

شکل (۲-۶) هندسه بازسازی شده از مجاری تنفسی انسان توسط Breuer و همکاران (۲۰۰۷) ۱۴

شکل (۳-۱) نمونه ای از تصویر محوری مجاری تنفسی گرفته شده توسط دستگاه MRI ۱۶

شکل (۳-۲) تصاویر پزشکی CTScan از مجاری تنفسی بالایی یک فرد داوطلب ۱۸

شکل (۳-۳) شکل های (الف)، (ب)، (ج) تصاویر پزشکی مجرای تنفسی از نمای Coronal با فاصله های چند میلیمتری (د) تصویر ورودی دهان از نمای Coronal ۱۹

شکل (۳-۴) (الف) تصویرپزشکی که توسط برنامه MATLAB خوانده شده است. (ب) تصویر متمرکز شده از مجرای تنفسی (ج) ماتریس سیاه-سفید از تصویر پزشکی (د) مرزهای دیواره مجرای تنفسی که نمایی از پیکسل های آن آورده شده است ۲۰

شکل (۳-۵) مراحل بازسازی هندسه مجرای تنفسی بالایی انسان توسط نرم افزار CATIA (الف) نقاط مرزی بدست آمده از پردازش تصویر (ب) پیمایش نقاط مرزی (ج) تولید منحنی مرزی (چ) سری منحنی های مرزی (ح) اتصال منحنی ها و تولید حجم (خ) نمایی از Epiglottis (د) تصویر از نمای جانبی مجرای تنفسی (ذ) تصویر سه نما از مجرای تنفسی ۲۲

شکل (۳-۶) نمایش شبکه تولید شده بر روی سطح مقطع های مختلف مجاری تنفسی که به ترتیب عبارتند از سطح مقطع (الف) حلق (ب) حنجره (ج) سینوسهای هرمی شکل (د) نای ۲۴

عنوان | صفحه

شکل (۳-۷) نمایی از حجم های مختلف با شبکه های متفاوت در ناحیه حنجره و گلو ۲۴

شکل (۳-۸) بررسی استقلال حل از تعداد شبکه (الف) مقایسه پروفیل سرعت عبوری از خط میانی مقطع حنجره (ب) مقایسه پروفیل سرعت عبوری از خط میانی مقطع نای ۲۵

شکل (۳-۹) مقایسه میزان نشست ذرات مایکرو که از حل معادلات در شبکه های ریز و درشت بدست آمده اند. ۲۶

شکل (۴-۱) مدل ساده سازی شده Zhang و همکاران (a-۲۰۰۲) ۵۲

شکل (۴-۲) کانتورهای سرعت در مجاری تنفسی ایده آل در دبی های (لف) ۱۵lit/min (ب) ۳۰lit/min (ج) ۶۰lit/min ۵۳

شکل (۴-۳) نمودار تغییرات مولفه تنش های رینولدز، $\overline{w'w'}, \overline{v'v'}, \overline{u'u'}$، بر روی دو خط L_1 و L_2 که به ترتیب از ناحیه های حلق و نای عبور می کنند. در دبی های (الف) ۱۵lit/min، (ب) ۳۰lit/min و (ج) ۶۰lit/min ۵۴

شکل (۴-۴) توزیع distortion در هندسه ایده آل مجاری تنفسی بالایی انسان برای دبی های (الف) ۱۵lit/min (ب) ۳۰lit/min و (ج) ۶۰lit/min ۵۶

شکل (۴-۵) دبی ۱۵lit/min (الف) بردارهای سرعت در صفحه میانی مجاری تنفسی در دبی ۱۵lit/min (ب) کانتور انرژی جنبشی تلاطم در مجاری تنفسی ساده سازی شده (ج) نشست ذرات با قطر ۳μm بر دیواره مجاری تنفسی ساده سازی شده (د) نشست ذرات با قطر ۱۰μm بر دیواره مجاری تنفسی ساده سازی شده ۵۸

عنوان	صفحه
شکل (۴-۶) دبی ۳۰lit/min (الف) بردارهای سرعت در صفحه میانی مجاری تنفسی در دبی ۳۰lit/min (ب) کانتور انرژی جنبشی تلاطم در مجاری تنفسی ساده سازی شده (ج) نشست ذرات با قطر ۳μm بر دیواره مجاری تنفسی ساده سازی شده (د) نشست ذرات با قطر ۱۰μm بر دیواره مجاری تنفسی ساده سازی شده	۵۹
شکل (۴-۷) دبی ۶۰lit/min (الف) بردارهای سرعت در صفحه میانی مجاری تنفسی در دبی ۶۰lit/min (ب) کانتور انرژی جنبشی تلاطم در مجاری تنفسی ساده سازی شده (ج) نشست ذرات با قطر ۳μm بر دیواره مجاری تنفسی ساده سازی شده (د) نشست ذرات با قطر ۱۰μm بر دیواره مجاری تنفسی ساده سازی شده	۶۰
شکل (۴-۸) نمودار نشست ذرات مایکرو در مجاری تنفسی ساده سازی شده و مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی میدان جریان به کمک مدل های k-ω، انتقال تنشهای رینولدز LRR در تحقیق حاضر، شبیه سازی Zhang و همکاران (۲۰۰۳) و نتایج آزمایش Cheng و همکاران (۱۹۹۹) (الف) دبی ۱۵lit/min (ب) ۳۰lit/min (ج) ۶۰lit/min	۶۳
شکل (۴-۹) مقایسه میزان نشست ذرات مایکرو در ناحیه های مختلف مجاری تنفسی با توجه به نتایج بدست آمده از (الف) آزمایش Cheng و همکاران (۱۹۹۹) (ب) شبیه سازی عددی Zhang و همکاران (۲۰۰۲-a) با استفاده از مدل اصلاح یافته دلخواه k-ω	۶۵
شکل (۴-۱۰) کانتور انتشار تراکم ذرات با قطر ایرودینامیکی ۱nm به ترتیب در دبی های (الف) ۱۵lit/min (ب) ۳۰lit/min (ج) ۶۰lit/min	۶۶
شکل (۴-۱۱) کانتور انتشار تراکم ذرات با قطر ایرودینامیکی ۳nm به ترتیب در دبی های (الف) ۱۵lit/min (ب) ۳۰lit/min (ج) ۶۰lit/min	۶۷

عنوان صفحه

شکل (۴-۱۲) نمودار درصد نشست ذرات بر حسب قطر ذره در ابعاد نانومتر ۶۷

شکل (۴-۱۳) مقایسه درصد نشست ذرات نانو در دبی ۶۰lit/min بین مدل انتقال تنش های رینولدز در این مطالعه و مدل k-ω به کار رفته در شبیه سازی Zhang و همکاران (۲۰۰۴) ۶۸

شکل (۴-۱۴) ابعاد واقعی از سطح مقطع هایی که کانتورهای سرعت بر روی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. ۷۰

شکل (۴-۱۵) کانتور سرعت در دبی ۱۵lit/min بر روی سطح مقطع های محوری (axial) و نیز صفحه جانبی که از وسط مجاری تنفسی بالایی عبور داده شده است. ۷۱

شکل (۴-۱۶) کانتور سرعت در دبی ۳۰lit/min بر روی سطح مقطع های محوری (axial) و نیز صفحه جانبی که از وسط مجاری تنفسی بالایی عبورداده شده است. ۷۲

شکل (۴-۱۷) کانتور سرعت در دبی ۶۰lit/min بر روی سطح مقطع های محوری (axial) و نیز صفحه جانبی که از وسط مجاری تنفسی بالایی عبورداده شده است. ۷۳

شکل (۴-۱۸) نمای سه بعدی و سطح مقطع هایی از مجرای تنفسی بالایی انسان که انرژی جنبشی تلاطم برای سه دبی ۱۵lit/min، ۳۰lit/min و ۶۰lit/min در آن ها نشان داده شده است. ۷۵

شکل (۴-۱۹) انرژی جنبشی تلاطم در مقاطع دو بعدی از مجرای تنفسی در دبی ۱۵lit/min در نمای جانبی از مجرای تنفسی. A و B مقاطعی از دهان، C و D مقاطعی از حلق، E مقطعی از Epiglottis، F، G و H مقاطعی از حنجره و I و J مقاطعی از نای هستند که کانتورهای انرژی جنبشی تلاطم در آنها نمایش داده شده است. ۷۶

عنوان | صفحه

شکل (۴-۲۰) انرژی جنبشی تلاطم در مقاطع دو بعدی از مجرای تنفسی در دبی ۳۰lit/min در نمای جانبی از مجرای تنفسی. A و B مقاطعی از دهان، C و D مقاطعی از حلق، E مقطعی از Epiglottis، F، G و H مقاطعی از حنجره و I و J مقاطعی از نای هستند که کانتورهای انرژی جنبشی تلاطم در آنها نمایش داده شده است. ۷۷

شکل (۴-۲۱) انرژی جنبشی تلاطم در مقاطع دو بعدی از مجرای تنفسی در دبی ۶۰lit/min در نمای جانبی از مجرای تنفسی. A و B مقاطعی از دهان، C و D مقاطعی از حلق، E مقطعی از Epiglottis، F، G و H مقاطعی از حنجره و I و J مقاطعی از نای هستند که کانتورهای انرژی جنبشی تلاطم در آنها نمایش داده شده است. ۷۸

شکل (۴-۲۲) دو خطی که صفحه میانی مجاری تنفسی را در ناحیه های حنجره (Larynx) و نای (Trachea) قطع می کنند. ۷۹

شکل (۴-۲۳) مقایسه مولفه های تنش های رینولدز در سه جهت اصلی مختصات دکارتی در ناحیه حنجره (Larynx) و در دبی های (الف) ۱۵lit/min (ب) ۳۰lit/min (ج) ۶۰lit/min ۸۰

شکل (۴-۲۴) مقایسه مولفه های تنش های رینولدز در سه جهت اصلی مختصات دکارتی در ناحیه نای (Trachea) و در دبی های (الف) ۱۵lit/min (ب) ۳۰lit/min (ج) ۶۰lit/min ۸۱

شکل (۴-۲۵) نمودار نشست ذرات مایکرو در هندسه واقعی از مجاری تنفسی بالایی انسان بر حسب قطر ذره به ترتیب در دبی های (الف) ۱۵lit/min (ب) ۳۰lit/min (ج) ۶۰lit/min ۸۵

شکل (۴-۲۶) نمودار درصد نشست محلی ذرات مایکرو در دهان، حلق، حنجره و نای بر حسب قطر ایرودینامیکی ذرات در دبی های (الف) ۱۵lit/min (ب) ۸۷

۳۰lit/min (ج) ۶۰lit/min

عنوان

صفحه

شکل (۴-۲۷) نمودار درصد نشست محلی ذرات مایکرو حاصل از نتایج Cheng و همکاران (۱۹۹۹) بر حسب قطر ایرودینامیکی ذرات در دبی ۳۰lit/min ۸۷

شکل (۴-28) نمودار درصد محلی نشست ذرات مایکرو با توجه به اثر پخش تلاطم بر توزیع ذرات در دهان، حلق، حنجره و نای بر حسب قطر ایرودینامیکی ذرات ۹۰

شکل (۴-۲۹) مقایسه میزان نشست ذرات مایکرو درمجاری تنفسی بالایی انسان در دبی های مختلف ۹۱

شکل (۴-۳۰) مقایسه تاثیر C_L بر میزان نشست ذرات مایکرو با توجه به تاثیر پخش تلاطم بر توزیع ذرات در دبی ۳۰lit/min ۹۲

شکل (۴-۳۱) مقایسه میزان نشست ذرات مایکرو با توجه به روش حل میدان جریان به کمک مدل های تلاطم k-ω و انتقال تنشهای رینولدز (LRR) به ترتیب در دبی های (الف) ۱۵lit/min (ب) ۶۰lit/min . نتایج آزمایشگاهی Grgric و همکاران (۲۰۰۴) در دبی ۹۰lit/min انجام شده است. ۹۴

شکل (۴-۳۲) محل نشست ذرات با قطرهای (الف) ۳μm (ب) ۷μm (ج) ۱۶μm در دبی ۱۵lit/min ۹۶

شکل (۴-۳۳) محل نشست ذرات با قطرهای (الف) ۳μm (ب) ۷μm (ج) ۱۶μm در دبی ۳۰lit/min ۹۷

شکل (۴-۳۴) محل نشست ذرات با قطرهای (الف) ۳μm (ب) ۷μm (ج) ۱۶μm در دبی ۶۰lit/min ۹۸

عنوان | صفحه

شکل (۴-۳۵) نمایش توزیع ذرات ۱μmدر داخل میدان جریان و همچنین تصویر بردارهای سرعت در دبی ۱۵lit/min. مقاطع انتخاب شده عبارتند از (الف) مقطعی از بالای نای (ب) محل تنگ شدن مجرا در گلو (ج) مقطع انتهایی حنجره (د) محل ورودی حنجره در انتهای epiglottis (ه) و (و) مقاطعی از حلق ۹۹

شکل (۴-۳۶) نمایش توزیع ذرات ۱μmدر داخل میدان جریان و همچنین تصویر بردارهای سرعت در دبی ۳۰lit/min. مقاطع انتخاب شده عبارتند از (الف) مقطعی از بالای نای (ب) محل تنگ شدن مجرا در گلو (ج) مقطع انتهایی حنجره (د) محل ورودی حنجره در انتهای epiglottis (ه) و (و) مقاطعی از حلق ۱۰۰

شکل (۴-۳۷) نمایش توزیع ذرات ۱μmدر داخل میدان جریان و همچنین تصویر بردارهای سرعت در دبی ۶۰lit/min مقاطع انتخاب شده عبارتند از (الف) مقطعی از بالای نای (ب) محل تنگ شدن مجرا در گلو (ج) مقطع انتهایی حنجره (د) محل ورودی حنجره در انتهای epiglottis (ه) و (و) مقاطعی از حلق ۱۰۱

شکل (۴-۳۸) مقایسه میزان نشست ذرات نانو در مجاری تنفسی بالایی انسان در دبی های مختلف ۱۰۳

شکل (۴-۳۹) توزیع غلظت ذرات با قطر ۱ نانومتر در در دبی های (الف) ۱۵lit/min (ب) ۳۰lit/min (ج) ۶۰lit/min ۱۰۳

شکل (۴-۴۰) توزیع غلظت ذرات با قطر ۳ نانومتر در دبی های (الف) ۱۵lit/min (ب) ۳۰lit/min (ج) ۶۰lit/min ۱۰۴

شکل (۴-۴۱) مقایسه میزان نشست ذرات در دبی های (الف) ۱۵lit/min و (ب) ۶۰lit/min در هندسه واقعی و ساده سازی شده از مجاری تنفسی بالایی انسان ۱۰۵

شکل (۴-۴۲) نمایش درصد نشست کلی ذرات در ابعاد مایکرومتر و نانومتر در هندسه واقعی از مجاری تنفسی و نیز در دبی های مختلف تنفسی انسان ۱۰۶

فهرست علائم

علامت	توضیح
A_i	مساحت سلول iام
A_f	مساحت سطح
C	غلظت ذرات
C_{D_p}	ضریب اصطکاک با درنظر گرفتن ضریب لغزش
C_D	ضریب اصطکاک
C_{slip}	ضریب لغزش
C_{D_p}	ضریب اصطکاک با درنظر گرفتن ضریب لغزش
C_D	ضریب اصطکاک
C_{slip}	ضریب لغزش
DF	درصد نشست ذرات
$\tilde{D}$	ضریب پخش موثر ذرات
$D_{T,ij}$	تانسور پخش تلاطم
$D_{L,ij}$	تانسور پخش آرام
d , d_p	قطر ایرودینامیکی ذره
d_m	قطر برخورد دو مولکول
d_e	قطر معادل شکل کروی ذره
E	ضریب ثابت تجربی
f_{β^s}	تابع پخش عرضی
G_k	ترم تولید انرژی جنبشی تلاطم
G_o	ترم تولید نرخ مخصوص پراکندگی
G_i	شتاب گرانش زمین
$J_{i,w}$	شار پخش ذرات بر دیواره
J'_f	تصحیح افزوده شده به نرخ جریان J^*_f

علامت	توضیح

علامت	توضیح
V	حجم سلول
u_i'	مولفه های نوسانی تلاطم
$\overline{u}$	سرعت متوسط زمانی
U	سرعت
u_i^p	مولفه های سرعت ذره
U_p	سرعت متوسط سیال در نقطه p
U^*	سرعت متوسط در نزدیکی دیواره
t_{cross}	زمان عبور ذره از هر گردابه
T_L	زمان مشخصه لاگرانژی
T	دمای مطلق
t	زمان
ΔS	بردار جابجایی از مرکز سلول اولیه به مرکز صفحه
S_{ij}'	تانسور نرخ کرنش
S_Φ	منبع تولید در واحد حجم
S_{ct}	اعداد متلاطم اشمیت
S_c	اعداد مولکولی اشمیت
$\vec{r}$	بردار مکان
Re_t	رینولدز تلاطم
Re_p	عدد رینولدز نسبی ذره
Q_{in}	دبی هوای ورودی
p^t	تصحیح فشار سلول
p	فشار
P_{ij}	تانسور تولید
N_i	تعداد
N_{faces}	تعداد صفحات محیط بر سلول
$\dot{m}_w$	شار جرمی ذرات برخورد کننده به دیواره
L_e	طول مشخصه گردابه
k_B	ثابت بولتزمن
k	انرژی تلاطم
J_f^*	شار وجه f