

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک تبدیل انرژی

بررسی و شبیه سازی عددی تاثیر جریان سیال بر ذرات ریز جامد کروی شکل

نگارنده: عبدالرضا فلاح زرین کلایی

استاد راهنما:

دکتر علی سررشته داری

شهریور ۱۳۹۵



فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای عبدالرضا فلاح زرین کلایی به شماره ۹۲۱۰۹۵۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی و شبیه سازی تاثیر جریان سیال بر ذرات ریز جامد کروی شکل که در تاریخ ۹۵/۶/۱۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: خوب - امتیاز ۱۴) <input checked="" type="checkbox"/>	دفاع مجدد <input type="checkbox"/>	مردود <input type="checkbox"/>
نوع تحقیق: نظری <input checked="" type="checkbox"/>	عملی <input type="checkbox"/>	

- ۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)
 ۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)
 ۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر علی سررشته داری	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	_____	_____	_____
۳- استاد مشاور	_____	_____	_____
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر خالقی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر پوریا اکبرزاده	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر شاهمردان	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر شاهمردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تشکر و قدردانی:

در این پایان‌نامه از استاد راهنما، جناب آقای دکتر سررشته‌داری، که در تمامی مراحل تدوین آن، به بنده کمک و راهنمایی کردند، همچنین از خانواده خودم، که مرا در طی مراحل تحصیل یاری نمودند، تشکر می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب **عبدالرضا فلاح زرین کلایی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سیستم‌های انرژی دانشکده

مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بررسی و شبیه سازی عددی تاثیر**

جریان سیال بر ذرات ریز جامد کروی شکل تحت راهنمایی دکتر علی سررشته داری متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافته‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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

چکیده

در این پایان‌نامه، شبیه‌سازی حرکت ذرات در جریان سیال در یک کوپلینگ یک‌طرفه در شرایط سندبلاست ایمپلنت‌های دندان‌ی انجام شده است. شبیه‌سازی به منظور بررسی خصوصیات و ویژگی‌های ذرات در موقعیت‌های مختلف انجام گرفته است. اساساً، ایمپلنت باید از مواد زیست‌سازگار با محیط بدن انسان ساخته شود. تیتانیوم برای چنین برنامه‌های کاربردی به دلیل ترکیبی از مقاومت در برابر خوردگی بالا، وزن کم و خواص مکانیکی خوب آن ایده‌آل است. ساختار سستی تیتانیوم پزشکی و دندانپزشکی متخلخل نیست؛ این ساختار متراکم ایمپلنت می‌تواند منجر به یک عدم تطابق بین مدول یانگ ایمپلنت تیتانیوم و قشر طبیعی شود. مورفولوژی ایمپلنت نقش بسیار مهمی در تماس استخوان - ایمپلنت دارد و می‌تواند روند ادغام ایمپلنت را بالا ببرد. ایمپلنت‌های دندان‌ی به دلیل استفاده از تیتانیوم غیر متخلخل، سطح تماس کمی با استخوان ایجاد می‌کنند، برای ایجاد سطح تماس بیشتر با استخوان، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود، که روش سندبلاست در بین روش‌های دیگر، به دلیل ایجاد زبری بهتر و سطح تماس بیشتر، برای بررسی انتخاب شد. برای شبیه‌سازی عددی، از نرم‌افزار OpenFOAM و مدل لاگرانژی injectorSolidParticleFoam استفاده شده است. برای بررسی صحت و دقت مطالعه‌ها از مقایسه روش عددی و تحلیلی در جریان استوکس استفاده شد. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق مشاهده شد که کاهش قطر ذره و حرکت قطری به سمت مرکز لوله برای تزریق ذره باعث افزایش سرعت و انرژی جنبشی آن شد، همچنین برای ذره آلومینا سرعت کمتر از ذره سیلیکون کارباید است ولی انرژی جنبشی آلومینا در مقایسه با سیلیکون کارباید بیش تر است.

واژه‌های کلیدی: سندبلاست، ایمپلنت، اویلری-لاگرانژی، شبیه‌سازی، OpenFOAM.

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۵	۲-۱- اجزای تشکیل‌دهنده ایمپلنت دندان
۵	۳-۱- مزایای ایمپلنت
۷	۴-۱- روشهای ایجاد سطح زبر در ایمپلنت
۷	۱-۴-۱- ایجاد زبری در سطح ایمپلنتها توسط اسپری پلاسما تیتانیوم (TPS)
۸	۲-۴-۱- ایجاد زبری در سطح ایمپلنت توسط سندبلاست
۱۰	۳-۴-۱- استفاده از مواد بلاست کننده با خاصیت استئوکانداکتیو
۱۰	۴-۴-۱- ایجاد زبری در سطح ایمپلنت با استفاده از روش اسید اچ
۱۱	۵-۴-۱- تکنیک اسید اچ دو مرحله‌ای غوطه‌ور نمودن ایمپلنتهای تیتانیومی
۱۱	۶-۴-۱- تغییر سطحی با فلوراید (Fluoride treatment)
۱۲	۷-۴-۱- ایجاد زبری در سطح ایمپلنتها به وسیله آندکاری
۱۳	۸-۴-۱- پوشش کلسیم فسفات CaP coating
۱۳	۵-۵-۱- ذرات مورد استفاده در فرآیند سندبلاست
۱۳	1-5-1- سیلیسیم کارباید (SiC)
۱۵	۲-۵-۱- آلومینا (Al ₂ O ₃)
۱۹	فصل ۲: مروری بر ادبیات تحقیق
۲۰	۱-۲- مطالعه‌ها درباره سندبلاست
۲۳	۲-۲- روش اوپلری لاگرانژی
۲۷	فصل ۳: روش تحقیق
۲۸	۱-۳- تعریف مسئله
۲۹	۲-۳- تعاریف
۲۹	۱-۲-۳- کوپلینگ یک، دو و چهارطرفه
۳۰	۳-۳- نیروهای وارد بر حرکت ذرات جامد
۳۰	۱-۳-۳- نیروی درگ
۳۱	۲-۳-۳- نیروی جرم اضافه شده
۳۱	۳-۳-۳- نیروی گرانش و شناوری
۳۱	۴-۳-۳- نیروی باست

۳۲	..... ۳-۳-۵- نیروی مگنوس
۳۲	..... ۳-۴-۴- معادلات حاکم
۳۲	..... ۳-۴-۱- معادلات در قالب اویلری
۳۲	..... ۳-۴-۲- معادلات در قالب لاگرانژی
۳۴	..... ۳-۵- مراحل ساخت ایمپلنت دندان
۳۶	..... ۳-۶- openFOAM
۳۶	..... ۳-۶-۱- مرور تاریخی بر openFOAM
۳۷	..... ۳-۷- بررسی استقلال از شبکه
۴۳	فصل ۴: نتایج و تفسیر آنها
۴۴	..... ۴-۱- اعتبارسنجی حلگر
۵۰	..... ۴-۲- نتایج شبیهسازی عددی
۱۱۷	فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهاد
۱۱۸	..... ۵-۱- نتیجهگیری
۱۱۸	..... ۵-۱-۱- تاثیر قطر ذره بر روی سرعت و انرژی جنبشی
۱۱۸	..... ۵-۱-۲- تاثیر دانسیته ذرات بر سرعت و انرژی جنبشی آن
۱۱۹	..... ۵-۱-۳- تاثیر موقعیت قطری ذره بر سرعت و انرژی جنبشی
۱۲۰	..... ۵-۲- جمع بندی نتایج
۱۲۰	..... ۵-۳- پیشنهادها
۱۲۱	کتابنامه

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) تصویری از ایمپلنت و دندان..... ۳
- شکل (۲-۱) تصویری از اجزا مختلف ایمپلنت..... ۵
- شکل (۳-۱) نمای میکروسکوپ الکترونی نشان دهنده تغییرات سطحی ایمپلنت با فلوراید است ۱۲
- شکل (۴-۱) سختی نوپ ۱۰۰ گرم..... ۱۴
- شکل (۱-۳) تصویر یک دستگاه سندبلاست و ایمپلنت..... ۲۸
- شکل (۲-۳) تصویر بالا ایمپلنت قبل از سندبلاست، تصویر پایین ایمپلنت بعد از سندبلاست..... ۲۹
- شکل (۳-۳) هندسه شبیه سازی..... ۳۷
- شکل (۴-۳) شبکه اول (۴۰۰ سلول) خط، شبکه دوم (۳۰۰۰ سلول) خط و نقطه..... ۳۸
- شکل (۵-۳) شبکه دوم (۳۰۰۰ سلول) خط، شبکه سوم (۶۷۵۰ سلول) خط چین..... ۳۹
- شکل (۶-۳) شبکه سوم (۶۷۵۰ سلول) خط، شبکه چهارم (۹۰۰۰ سلول) خط چین..... ۴۰
- شکل (۷-۳) سرعت هر چهار شبکه به صورت یکجا..... ۴۱
- شکل (۱-۴) تزریق ذره به جریان در لحظه ۳/۰۰۳ و سرعت اولیه صفر..... ۴۵
- شکل (۲-۴) ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی..... ۴۶
- شکل (۳-۴) ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی..... ۴۷
- شکل (۴-۴) ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی..... ۴۷
- شکل (۵-۴) ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی..... ۴۸
- شکل (۶-۴) ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی..... ۴۹
- شکل (۷-۴) ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی..... ۴۹
- شکل (۸-۴) خط جریان سیال..... ۵۱
- شکل (۹-۴) خط مسیر ذره از موقعیت اولیه تزریق ۰/۰۰۲۵..... ۵۱
- شکل (۱۰-۴) خط مسیر ذره از موقعیت اولیه تزریق ۰/۰۰۰۵..... ۵۲
- شکل (۱۱-۴) خط مسیر ذره از موقعیت اولیه تزریق ۰/۰۰۱۲۵..... ۵۲
- شکل (۱۲-۴) سرعت ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر..... ۵۶
- شکل (۱۳-۴) انرژی جنبشی ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر..... ۵۶
- شکل (۱۴-۴) سرعت ذره آلومینا با قطر ۱۰۰ میکرومتر..... ۶۱
- شکل (۱۵-۴) انرژی جنبشی ذره آلومینا با قطر ۱۰۰ میکرومتر..... ۶۱
- شکل (۱۶-۴) سرعت ذره آلومینا با قطر ۱۵۰ میکرومتر..... ۶۶

- شکل (۴-۱۷) انرژی جنبشی ذره آلومینا با قطر ۱۵۰ میکرومتر ۶۶
- شکل (۴-۱۸) سرعت ذره سیلیکون کارباید با قطر ۵۰ میکرومتر ۷۰
- شکل (۴-۱۹) انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید با قطر ۵۰ میکرومتر ۷۰
- شکل (۴-۲۰) سرعت ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۰۰ میکرومتر ۷۵
- شکل (۴-۲۱) انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۰۰ میکرومتر ۷۵
- شکل (۴-۲۲) سرعت ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۵۰ میکرومتر ۸۱
- شکل (۴-۲۳) انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۵۰ میکرومتر ۸۱
- شکل (۴-۲۴) سرعت ذره آلومینا در موقعیت ۰/۰۰۰۵ ۸۵
- شکل (۴-۲۵) انرژی جنبشی ذره آلومینا در موقعیت ۰/۰۰۰۵ ۸۵
- شکل (۴-۲۶) سرعت ذره آلومینا در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵ ۸۸
- شکل (۴-۲۷) انرژی جنبشی ذره آلومینا در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵ ۸۸
- شکل (۴-۲۸) سرعت ذره آلومینا در موقعیت ۰/۰۰۲۵ ۹۱
- شکل (۴-۲۹) انرژی جنبشی ذره آلومینا در موقعیت ۰/۰۰۲۵ ۹۱
- شکل (۴-۳۰) سرعت ذره سیلیکون کارباید در موقعیت ۰/۰۰۰۵ ۹۴
- شکل (۴-۳۱) انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید در موقعیت ۰/۰۰۰۵ ۹۴
- شکل (۴-۳۲) سرعت ذره سیلیکون کارباید در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵ ۹۷
- شکل (۴-۳۳) انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵ ۹۷
- شکل (۴-۳۴) سرعت ذره سیلیکون کارباید در موقعیت ۰/۰۰۲۵ ۱۰۰
- شکل (۴-۳۵) انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید در موقعیت ۰/۰۰۲۵ ۱۰۰
- شکل (۴-۳۶) سرعت ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵ ۱۰۲
- شکل (۴-۳۷) انرژی جنبشی ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵ ۱۰۲
- شکل (۴-۳۸) سرعت ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۲۵ ۱۰۴
- شکل (۴-۳۹) انرژی جنبشی ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۲۵ ۱۰۴
- شکل (۴-۴۴) سرعت ذرات با قطر ۱۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵ ۱۱۲
- شکل (۴-۴۵) انرژی جنبشی ذرات با قطر ۱۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵ ۱۱۲
- شکل (۴-۴۶) سرعت ذرات با قطر ۱۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۲۵ ۱۱۵
- شکل (۴-۴۷) انرژی جنبشی ذرات با قطر ۱۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۲۵ ۱۱۵

فهرست جداول

جدول (۱-۳) حداکثر سرعت در مقطع مورد نظر و تعداد سلول هر شبکه.....	۴۱
جدول (۱-۴) درصد خطا محاسبه ضریب درگ با روش‌های تحلیلی و عددی در شرایط مختلف ..	۵۰
جدول (۲-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	
.....	۵۳
جدول (۳-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	
.....	۵۴
جدول (۴-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	
.....	۵۴
جدول (۵-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	
.....	۵۵
جدول (۶-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	
.....	۵۵
جدول (۷-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	
.....	۵۷
جدول (۸-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	
.....	۵۸
جدول (۹-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	
.....	۵۹
جدول (۱۰-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	
.....	۵۹
جدول (۱۱-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	
.....	۶۰
جدول (۱۲-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	
.....	۶۲
جدول (۱۳-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	
.....	۶۳

جدول (۴-۱۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	۰/۰۰۲۵
۶۴	
جدول (۴-۱۵) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	۰/۰۰۳۷۵
۶۴	
جدول (۴-۱۶) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق	۰/۰۰۴۵
۶۵	
جدول (۴-۱۷) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق	۰/۰۰۰۵
۶۷	
جدول (۴-۱۸) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق	۰/۰۰۱۲۵
۶۷	
جدول (۴-۱۹) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق	۰/۰۰۲۵
۶۸	
جدول (۴-۲۰) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق	۰/۰۰۳۷۵
۶۸	
جدول (۴-۲۱) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق	۰/۰۰۴۵
۶۹	
جدول (۴-۲۲) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق	۰/۰۰۰۵
۷۱	
جدول (۴-۲۳) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق	۰/۰۰۱۲۵
۷۲	
جدول (۴-۲۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق	۰/۰۰۲۵
۷۲	
جدول (۴-۲۵) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق	۰/۰۰۳۷۵
۷۳	
جدول (۴-۲۶) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق	۰/۰۰۴۵
۷۴	
جدول (۴-۲۷) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق	۰/۰۰۰۵
۷۶	

جدول (۴-۲۸) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۱۲۵.....	۷۷
جدول (۴-۲۹) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۲۵.....	۷۸
جدول (۴-۳۰) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۳۷۵.....	۷۹
جدول (۴-۳۱) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۴۵.....	۸۰
جدول (۴-۳۲) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر	۸۲
جدول (۴-۳۳) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۱۰۰ میکرومتر	۸۳
جدول (۴-۳۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۱۵۰ میکرومتر	۸۴
جدول (۴-۳۵) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر	۸۶
جدول (۴-۳۶) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۱۰۰ میکرومتر	۸۶
جدول (۴-۳۷) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۱۵۰ میکرومتر	۸۷
جدول (۴-۳۸) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر..	۸۹
جدول (۴-۳۹) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۱۰۰ میکرومتر.	۸۹
جدول (۴-۴۰) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۱۵۰ میکرومتر.	۹۰
جدول (۴-۴۱) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۵۰ میکرومتر.....	۹۲
جدول (۴-۴۲) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۰۰ میکرومتر.....	۹۲
جدول (۴-۴۳) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۵۰ میکرومتر.....	۹۳
جدول (۴-۴۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۵۰ میکرومتر.....	۹۵
جدول (۴-۴۵) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۰۰ میکرومتر.....	۹۵
جدول (۴-۴۶) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۵۰ میکرومتر.....	۹۶

- جدول (۴-۴۷) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۵۰ میکرومتر..... ۹۸
- جدول (۴-۴۸) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۰۰ میکرومتر..... ۹۸
- جدول (۴-۴۹) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۵۰ میکرومتر..... ۹۹
- جدول (۴-۵۰) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا..... ۱۰۱
- جدول (۴-۵۱) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید..... ۱۰۱
- جدول (۴-۵۲) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا..... ۱۰۳
- جدول (۴-۵۳) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید..... ۱۰۳
- جدول (۴-۵۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا..... ۱۰۵
- جدول (۴-۵۵) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید..... ۱۰۶
- جدول (۴-۵۶) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا..... ۱۰۸
- جدول (۴-۵۷) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید..... ۱۰۸
- جدول (۴-۵۸) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا..... ۱۱۰
- جدول (۴-۵۹) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید..... ۱۱۱
- جدول (۴-۶۰) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا..... ۱۱۳
- جدول (۴-۶۱) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید..... ۱۱۴
- جدول (۴-۶۲) نتایج تزریق پنج ذره آلومینا به قطر ۵۰ میکرومتر..... ۱۱۶

علائم و نشانه‌ها

چگالی سیال	ρ_f	ضریب درگ	C_D
چگالی ذره	ρ_p	قطر ذره	D_p
ویسکوزیته سیال	μ_f	نیرو	F
زمان استراحت ذره	τ_p	نیروی براونی	F_B
مقیاس زمانی کولموگروف	τ_k	نیروی درگ	F_D
		نیروی گرانش و شناوری	F_g
		شتاب گرانش	G
		عدد ماخ	Ma
		جرم ذره	m_p
		فشار	P
		رینولدز ذره	Re_p
		زمان	t
		سرعت سیال	U
		سرعت ذره	U_p
		موقعیت ذره	X_p
		موقعیت قطری ابتدایی	Y_i
		موقعیت قطری در فاصله ۲ سانتی‌متری از نازل	Y_j

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱- مقدمه

به پیچ ساخته شده از جنس تیتانیوم، ایمپلنت گفته می شود، که در استخوان فک کاشته می شود و جایگزین دندان از دست رفته می شود. در تعریف عمومی، ایمپلنت دندانی، وسیله ای است که از مخاط دهان عبور کرده و در استخوان مربوط در دهان قرار می گیرد. ایمپلنت، دارای قابلیت تطابق و سازندگی همانند دندان طبیعی بوده و حتی جهت حمایت از سایر پروتزهای ثابت و متحرک مورد استفاده قرار می گیرد. امروزه ایمپلنت برای این به کار می رود که همانند یک دندان طبیعی زیبا و کاراست و دوامی برابر با دندان طبیعی دارد. شایان ذکر است که در بسیاری از بیماران، بی دندانی به علت اثراتی که بر عملکرد دهانی و شرایط روحی و روانی بیمار می گذارد، نوعی معلولیت محسوب می شود. ایمپلنت های دندانی یک درمان موثر به منظور بازگرداندن ظاهر، گفتار و سلامت بیماران به جای بخشی از ریشه دندان است، که به طور طبیعی از دست رفته است [۱ و ۲]. ایمپلنت های دندانی به طور کامل داخل استخوان فک قرار می گیرد و از یک پروتز دندانی پزشکی حمایت می کند [۱]. در طول دهه گذشته، علاقه جهانی به ایمپلنت های دندانی افزایش یافته است، که برای درمان حدود یک میلیون نفر در هر سال در جهان استفاده می شود [۳]. افزایش تقاضا برای ایمپلنت های دندانی را می توان بیشتر به توانایی آنها در بازیابی کامل دندان، افزایش قابل توجه در میانگین سنی جمعیت جهان، تعداد بیشتر افراد مسن در جامعه و آگاهی عمومی بالاتر نسبت داد [۱].

¹ Implant



شکل (۱-۱) تصویری از ایمپلنت و دندان

همانطور که در شکل (۱-۱) دیده می شود، ایمپلنت دندانی در واقع نقش ریشه دندان را ایفا می کند. ایمپلنت های دندانی با توجه به شکل، زبری سطح، درمان سطح و نوع ارتباط با بخش پروتز دسته بندی می شوند. طول و قطر ایمپلنت های دندانی تجاری در دسترس، با توجه به شرایط بالینی متفاوت است. به عنوان مثال، ابعاد تاج استوانه ای ایمپلنت های دندانی از محدوده ۳/۲۵ - ۶/۰ میلی متر قطر و ۵ - ۱۸ میلی متر در طول است [۱].

اساساً، ایمپلنت باید از مواد زیست سازگار با محیط بدن انسان ساخته شود. تیتانیوم^۱ و آلیاژهای آن به عنوان مواد با بیشترین انتخاب در ایمپلنت های ارتوپدی و دندانی، به دلیل خواص مکانیکی برجسته و زیست سازگاری، گزارش شده است. تیتانیوم برای چنین برنامه های کاربردی به دلیل ترکیبی از مقاومت در برابر خوردگی بالا، وزن کم و خواص مکانیکی خوب آن ایده آل است [۴]. حضور لایه چسبنده و محافظ اکسید تیتانیوم بر سطح این فلز، مقاومت خوردگی عالی حتی تا دمای ۵۳۵ درجه سانتی گراد را تامین می کند [۵]. در بین آلیاژها و موادی که برای ساخت و تهیه کاشتنی های بدن به کار می رود، تیتانیوم و آلیاژهای آن خاصیت همبندی با استخوان را دارند و ضمن ترویج رشد استخوان، امکان رشد استخوان از روی سطح به درون حفره های کاشتنی را میسر می سازند، در

^۱ Titanium

حالی که در مورد سایر فلزات، بافت رشته‌ای موسوم به غشاء، اطراف کاشتنی (بین استخوان و کاشتنی)، پدید می‌آید که برای طول عمر و دوام کاشتنی مضر است [۴]. نیروهای اعمال شده بدون هیچگونه تحریک پاتولوژیکی از کاشتنی عبور کرده و به استخوان انتقال می‌یابند. تیتانیوم در تماس با مایعات بدن به سرعت لایه اکسیدی رویین تشکیل می‌دهد و خوردگی زیستی را متوقف می‌سازد [۶]. با این حال، مدول یانگ این مواد بیشتر از بافت کانی (کانبافت) است [۷]. علاوه بر این ساختار سنتی تیتانیوم پزشکی و دندانپزشکی متخلخل نیست؛ این ساختار متراکم ایمپلنت می‌تواند منجر به یک عدم تطابق بین مدول یانگ ایمپلنت تیتانیوم (۱۱۰ گیگا پاسکال) و قشر طبیعی (۱۷-۲۰ گیگا پاسکال) و استخوان اسفنجی (حدود ۴ گیگا پاسکال) شود [۸-۱۰]. مدول یانگ بالا ایمپلنت‌های تیتانیومی، منجر به بارگذاری ناکافی بافت استخوان زیرین می‌شود [۱۱]. از آنجا که استخوان یک بافت زنده است، که به طور مداوم توسط سلول‌های استخوانی در پاسخ به سیگنال‌های خارجی اصلاح می‌شود، کاهش بارگذاری مکانیکی به تحلیل استخوان، سست شدن ایمپلنت و در نهایت شکست، که به خصوص یک مشکل برای ایمپلنت‌های ارتوپدی در گذشته بوده است، منجر می‌شود [۱۰]. روش دیگر، بیش بارگذاری است، که تنش‌های زیاد در مناطق محلی استخوان، می‌تواند منجر به آغاز تحلیل شود [۱۱].

براین اساس، بسیاری از تلاش‌ها برای توسعه مواد با خواص مکانیکی بسیار سازگارتر با بافت استخوان انجام شد. بسیاری از این مطالعات در بهینه سازی ویژگی‌های مهم فعل و انفعالات بین سطح ایمپلنت و استخوان است. پیشرفت‌ها در طراحی ایمپلنت‌های ارتوپدی و دندانپزشکی به ساخت، ساختارهای تیتانیومی متخلخل جدید کمک کرد. مورفولوژی^۱ ایمپلنت نقش بسیار مهمی در تماس استخوان - ایمپلنت دارد و می‌تواند روند ادغام ایمپلنت را بالا ببرد [۱۲].

با این وجود، کاشت دندان، همراه با ایمپلنت، مواجه با محدودیت‌های خاص است، به ویژه، هنگامی که در افراد سیگاری، افراد دیابتی، بیماران مسن مبتلا به پوکی استخوان و مردم با تراکم استخوان پایین، مانند عدم تعامل بیولوژیکی و ثبات سطحی با بافت استخوان استفاده می‌شود [۱۳].

¹ Morphology

۲-۱- اجزای تشکیل دهنده ایمپلنت دندانی

- ریشه (فیکسچر)
- تاج (آباتمنت)
- کاور اسکرو
- هیلینگ آباتمنت یا Gingival Former
- پیچ اتصال آباتمنت به فیکسچر
- قطعات اتصال ریشه به دست دندان locator /ball & socket
- پلاستیک آباتمنت برای ساخت آباتمنت با اشکال خاص و دلخواه



شکل (۲-۱) تصویری از اجزا مختلف ایمپلنت

۳-۱- مزایای ایمپلنت

- ۱- کاهش زمان کاشت دندان
- ۲- کاهش درد بعد از کاشت دندان
- ۳- کاهش تورم بعد از کاشت دندان

- ۴- بهترین روش برای بیماران سیگاری
- ۵- بهترین روش برای بیماران دیابتی
- ۶- بهترین روش برای بیماران که عرض استخوان بسیار کمی دارند و به آنها جراحی های وسیع پیوند استخوان پیشنهاد شده است.
- ۷- بهترین روش برای بیماران که ارتفاع استخوان کمی دارند و به آنها جراحی های پیشرفته جابجایی عصب پیشنهاد شده است.
- ۸- بهترین روش برای کسانی که نیاز به روکش فوری دارند.
- ۹- بهترین روش برای کسانی که ترس از جراحی کاشت دندان دارند.
- ۱۰- جلوگیری از تحلیل استخوان بعد از کاشت دندان
- ۱۱- کاهش خونریزی بعد از کاشت دندان
- ۱۲- استفاده از غذای طبیعی بلافاصله بعد از کاشت دندان
- ۱۳- انجام کارهای عادی روزمره بلافاصله بعد از کاشت دندان
- ۱۴- حفظ لثه بین دندانی و در نتیجه ایجاد زیبایی در دندان های جلو و جلوگیری از گیر غذایی در دندان های عقب.

ویژگی های سطح ایمپلنت تیتانیوم، در روند ادغام ایمپلنت در اتصال، گسترش و تکثیر سلول حاکم است. در نهایت، تعیین کننده کیفیت پیوند، بین بافت استخوان تازه رشد کرده و ایمپلنت است [۴]. بنابراین در سال های اخیر تلاش قابل توجهی از پژوهشگران در توسعه روش های موثر اصلاح سطح برای ارتقا روند ادغام ایمپلنت انجام شده است. بسیاری از تکنیک هایی که استفاده می شوند، یکی از فرآیندهای زیر و یا ترکیبی از آنها است: پاشش پلاسما، سندبلاست، اسید اچ و آنودایز [۴].

یک نوع خاص از این فرآیند، به نام SLA^1 (مخفف "سندبلاست کردن تجهیزات با دانه های بزرگ و اسیدشویی")، ترکیبی از اثرات مثبت سندبلاست و اسیدشویی برای ایجاد سطح ماکروسکوپی خشن و میکرو چاله است. توسط برخی از محققان نشان داده شد، که روش SLA می تواند عملکرد بیولوژیکی سطح، تمایز سلول های بنیادی، بقای سلول های استخوان ساز و تکیه گاه استخوان را

¹ Sand Blast Large Grit Acid Wash

افزایش دهد [۴].

علاوه بر این، از ایمپلنت با سطح درمان SLA در آزمایش‌های بالینی ایمپلنت‌های دندان‌نی طول عمر بسیار بالایی پیدا شد: ۹۸/۷ درصد بعد از ۱۵/۲ ماه و ۹۵/۴۱ درصد بعد از ۵ سال از کاشت [۴].

۴-۱- روش‌های ایجاد سطح زبر در ایمپلنت

۴-۱-۱- ایجاد زبری در سطح ایمپلنت‌ها توسط اسپری پلاسما تیتانیوم (TPS)

یک روش بهینه برای به دست آوردن مورفولوژی و توپوگرافی سطح می‌باشد. مزیت پوشش پلاسما در این است که باعث متخلخل شدن سطوح ایمپلنت‌ها می‌شود، که در نتیجه استخوان می‌تواند به آسانی در آن نفوذ کند. استوایتگریشن^۱ برای سطوح خشن با ساختار باز (Open Structure) بین ۵۰-۴۰۰ میکرومتر، با بالاترین سرعت و به طور مؤثر اتفاق می‌افتد [۱۴]. در این روش ذرات تیتانیومی بر روی سطح ایمپلنت‌ها پرتاب می‌شوند و سپس متراکم شده و با هم ترکیب می‌شوند و یک لایه به ضخامت ۳۰ میکرومتر ایجاد می‌کنند. که در ضخامت ۴۰-۵۰ میکرومتر به یک ضخامت یکنواخت می‌رسد. پوشش‌های TPS به طور میانگین، خشونت سطحی در حدود ۷ میکرومتر دارند، که منجر به افزایش ناحیه سطح ایمپلنت می‌شود. این توپوگرافی^۲ سه بعدی، منجر به افزایش استحکام کششی، در حد فاصل ایمپلنت- استخوان می‌شود [۱۵]. یون‌های فلزی ممکن است، در نتیجه ساییدگی و سایش و تجزیه ایمپلنت آزاد شده و امکان دارد دارای پتانسیل کار سینوژنیک^۳ موضعی و سیستمیک باشند. به هر حال عوارض موضعی و سیستمیک آزاد شدن یون‌های تیتانیوم، به طور کلی شناخته نشده‌اند [۱۶]. مطالعات نشان داده‌اند، که حد فاصل استخوان ایمپلنت در سطوح TPS سریع‌تر از ایمپلنت‌های ماشینی شده، تشکیل می‌شود. سطوح خشن که توسط TPS و سندبلاست و یا اسید اچ به دست می‌آیند، در مقایسه با ایمپلنت‌های ماشینی شده میزان مقاومت گشتاور برشی بالاتری دارند [۱۷].

¹ Osseointegration

² Topography

³ Synvzhnyk

در مطالعات انجام یافته که واکنش انواع ایمپلنت‌های با پوشش‌های (هیدروکسی آپاتیت) HA و TPS را در مواجهه با التهاب و پری‌ایمپلنتایتیس ایجاد شده، به طریق مصنوعی مورد بررسی قرار دادند، پاسخ‌های مشابه‌ای مشاهده شد و نتایج آماری به دست آمده از این تحقیقات، هیچ اختلاف معنی‌داری در وقوع پری‌ایمپلنتایتیس را نشان ندادند [۱۸]. البته در مطالعه دیگری، سطوح پوشش داده شده با TPS در مقایسه با سطوح صاف، بیشتر مستعد پری‌ایمپلنتایتیس بودند [۱۹]. به دلیل این‌که مطالعات اندکی در این رابطه وجود دارد و با توجه به نتایج ضد و نقیض، باید تحقیقات بیشتر و گسترده‌تری در رابطه با تاثیر خصوصیات سطحی ایمپلنت، در گسترش التهاب و پری‌ایمپلنتایتیس انجام گیرد.

۱-۴-۲- ایجاد زبری در سطح ایمپلنت توسط سندبلاست

روش دیگری برای خشن نمودن سطوح تیتانیوم، شامل بلاست کردن ایمپلنت‌ها با ذرات سرامیکی سخت می‌باشد. سندبلاست یک روش آماده‌سازی سطح، برای ایمپلنت‌های دندان تیتانیومی است، که برای بهبود اتصال ایمپلنت و استخوان استفاده می‌شود. ذرات سرامیکی از میان یک لوله با سرعت بالا، به وسیله هوای متراکم پرتاب می‌شوند. بسته به اندازه ذرات سرامیک، سطوح با خشونت‌های متفاوت، می‌توانند بر روی ایمپلنت‌های تیتانیومی تولید شوند [۱۶]. ماده بلاست باید از نظر شیمیایی با ثبات بوده و از نظر زیستی سازگار باشد و نباید مانع استئواینترگریشن ایمپلنت‌های تیتانیومی شود. انواع مختلف ذرات سرامیکی مانند آلومینا، اکسید تیتانیوم، سیلیکون کارباید و ذرات فسفات کلسیم، مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۷].

در پروتز دندان، سندبلاست با ذرات آلومینا به‌طور گسترده برای پردازش بسترهای فلزی، تمیز کردن سطح از آلاینده‌های آلی و ایجاد بی‌نظمی‌های سطحی که موجب تقویت اتصال مکانیکی با مواد روکش می‌شود و افزایش ظرفیت خیس شوندگی زیرسازی فلزی استفاده می‌شود. برآورد شده که سندبلاست سطح کل یک لایه فلز را تا ۶/۵ برابر افزایش می‌دهد و استحکام باند فلزی و سرامیک آلیاژهای دندان را نیز افزایش می‌دهد.

آلومینا (Al_2O_3) که غالباً به‌عنوان یک ماده بلاست کننده استفاده می‌شود، سطوح با خشونت متفاوت

تولید می‌کند. به هر حال ماده بلاست کننده اغلب در داخل سطح ایمپلنت فرو رفته و بقایای آن حتی بعد از حمام اولتراسونیک^۱، استریلیزاسیون^۲ و غیرفعال سازی توسط اسید، باقی می‌ماند. آلومینا در اسید نامحلول بوده و به همین دلیل به سختی از سطح تیتانیوم برداشته می‌شود. در تعدادی از موارد این ذرات به داخل بافت‌های اطراف رها شده و با استئوایتگريشن ایمپلنت‌ها تداخل پیدا می‌کنند. تنوع شیمیایی سطح ایمپلنت ممکن است مقاومت نسبت به خوردگی تیتانیوم را در محیط فیزیولوژیک^۳ کاهش دهد [۲۰]. اکسید تیتانیوم نیز برای بلاست کردن ایمپلنت‌های دندان تیتانیومی استفاده می‌شود. ذرات اکسید تیتانیوم، با میانگین اندازه ۲۵ میکرومتر، به طور متوسط یک سطح خشن در دامنه ۱-۲ میکرومتر، بر روی ایمپلنت‌های دندان ایجاد می‌کنند. سایر مطالعات میزان موفقیت کلینیکی بالایی برای ایمپلنت‌های سندبلاست تیتانیومی تا ۱۰ سال بعد از گذاشتن ایمپلنت، نشان داده‌اند [۱۹].

رجایی و همکاران در مورد تاثیر عملیات سطحی مکانیکی و شیمیایی ایمپلنت‌های تیتانیومی، بر چسبندگی و بقای سلول‌های فیبروبلاست^۴ انجام گرفت، نتایج کشت سلولی نشان داد، که در نمونه‌های سندبلاست شده، به دلیل تخلخل بیشتر نسبت به سطوح اسید اچ شده، تراکم سلولی بیشتری در فصل مشترک آنها با محیط سلولی، دیده می‌شود [۲۱].

در گذشته مطالعاتی بر روی اثرات سندبلاست بر روی سطح تیتانیوم، مانند ایجاد زبری، تنش پسماند، میکرو ساختار زیر سطحی و آلودگی نهایی انجام شده است. در میان این اثرات، اصلاح زبری سطح تیتانیوم و آلیاژهای آن، اثر مثبت اصلی سندبلاست در نظر گرفته شده است. از این رو، روند سندبلاست، با توجه به اثرات زبر کنندگی آن در ایجاد سطح زبری میکرو و یا ماکرو در سطح تیتانیوم، طراحی شده است [۲۲-۲۳].

¹Ultrasonic

²sterilization

³physiologic

⁴Fibroblast

۱-۴-۳- استفاده از مواد بلاست کننده با خاصیت استئوکانداکتیو

راه حل سوم برای ایجاد خشونت در ایمپلنت‌های تیتانیومی، استفاده از مواد بلاست کننده با خاصیت استئوکانداکتیو و سازگار با محیط و قابل جذب است. کلسیم فسفات مانند هیدروکسی آپاتیت، بتاتری کلسیم فسفات و ترکیب‌های آن از مواد بلاست کننده مفید می‌باشند. این مواد قابل جذب منجر به سطح تیتانیومی خالص، تمیز و دارای ساختار مشخص می‌شوند [۲۴].

لایه‌های آپاتیت که برای پوشش سطح ایمپلنت استفاده می‌شوند، باعث بهبود پاسخ استخوان می‌شوند. اخیراً در یک مطالعه، خصوصیات سطحی و قدرت استخوانی تولید شده با استفاده از یک روش بلاست کننده هیدروکسی آپاتیت، با سرعت بسیار بالا، مورد بررسی قرار گرفته شد و نشان داده شد، که در این نوع ایمپلنت‌ها، خشونت سطحی و کریستالی شدن و ترشوندگی افزایش یافت [۲۵ و ۲۶].

مطالعات تجربی تأیید کرده‌اند که تماس استخوان به ایمپلنت با این سطوح در مقایسه با سطوح ماشین شده بیشتر است. همچنین مطالعات تجربی تأیید کرده‌اند، در صورت ایجاد استئوآینتگریشن، تماس استخوان با ایمپلنت مشابه سایر سطوح بلاست شده می‌باشد [۲۷].

۱-۴-۴- ایجاد زبری در سطح ایمپلنت با استفاده از روش اسید اچ

اسید اچ کردن با اسیدهای قوی، مانند HCL, H₂SO₄, HNO₃ و HF روش دیگری برای ایجاد خشونت ایمپلنت‌های دندانی تیتانیومی می‌باشند. اسید اچ بر روی سطوح تیتانیومی سوراخ‌های کوچک با قطر ۰/۵-۲ میکرومتر ایجاد کرده و باعث بهبود استئوآینتگریشن می‌شود [۲۸]. این روش، خشونت و زبری یکنواختی ایجاد کرده و منطقه سطحی فعال را افزایش داده و چسبندگی زیستی^۱ را بهبود می‌دهد. این حالت باعث کاهش انرژی سطحی شده و از آنجایی که هیچ ذره‌ای در سطح باقی نمی‌ماند، احتمال آلودگی را کاهش می‌دهد. این نوع از سطح نه فقط باعث تسهیل گیر سلول‌های استئوژنیک^۲ می‌شود، بلکه اجازه مهاجرت سلول‌ها به سطوح ایمپلنت را هم می‌دهد [۲۹].

¹ bioadhesion

² Osteogenic

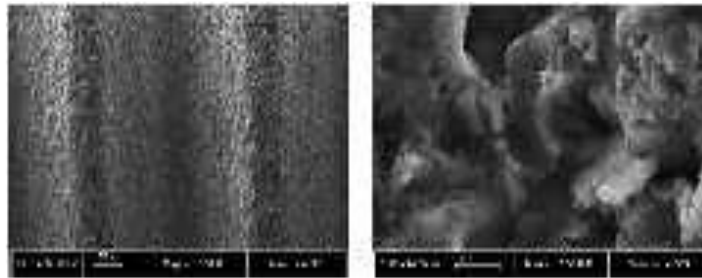
۱-۴-۵- تکنیک اسید اچ دو مرحله‌ای غوطه‌ور نمودن ایمپلنت‌های تیتانیومی

برای چندین دقیقه در مخلوطی از HCl و H₂SO₄ غلیظ شده، که در دمای بالای ۱۰۰ درجه گرم می‌شود (اسید اچ دو مرحله‌ای) خشونت سطحی میکروسکوپی تولید می‌کند. این نوع از سطح، باعث تسریع در سرعت استئواینگریشن با موفقیت بلند مدت بیش از سه سال می‌شود [۳۰]. در ناحیه پری ایمپلنت، استخوان woven با تراکم^۱ نازک، به‌داخل ایمپلنت‌ها وارد می‌شوند [۳۱]. فرضیه این مطالعات این بود، که ایمپلنت‌های اسید اچ شده دو مرحله‌ای، توپوگرافی ویژه‌ای دارند، که می‌توانند به داربست فیبرینی بچسبند و چسبندگی سلول‌های استئوژنیک را تسریع کنند و در نتیجه منجر به تسریع رسوب استخوان شوند. قابلیت ترشوندگی سطح، همچنین باعث تسریع چسبندگی فیبرین می‌شود. این چسبندگی فیبرین باعث هدایت تماسی برای مهاجرت استئوبلاست‌ها در طول سطح می‌شود. سطوح اسید اچ دو مرحله‌ای، در مطالعات تجربی، تماس استخوان- ایمپلنت (BIC) بیشتر و تحلیل استخوان کمتری را نسبت به سطوح ماشین شده و یا TPS نشان می‌دهند [۳۲].

۱-۴-۶- تغییر سطحی با فلوراید (Fluoride treatment)

روش دیگر ایجاد خشونت سطحی شامل قرار گرفتن ایمپلنت‌های تیتانیومی در محلول‌های فلوراید است. تیتانیوم با یون‌های فلوراید واکنش می‌دهد و منجر به تشکیل انواع محلول‌های مختلفی TiF₄ می‌شود. آنچنان که در شکل (۱-۳) دیده می‌شود، سطح تولید شده، توپوگرافی با خشونت میکروسکوپی دارد. این روش هم باعث تولید خشونت سطحی شده و هم تولید ترکیب فلوراید با قابلیت ترکیب با استخوان برای استئواینترگریشن مطلوب ایمپلنت‌های دندانی دارد. این روش میزان تمایز استئوبلاست‌ها را در مقایسه با نمونه‌های کنترل افزایش می‌دهد [۳۳].

¹ Trabecula



شکل (۳-۱) نمای میکروسکوپ الکترونی نشان دهنده تغییرات سطحی ایمپلنت با فلوراید است

ایمپلنت‌های با سطوح فلورایددار، همچنین در مقابل نیروهای push-out مقاومت بیشتری دارند و مقاومت گشتاور خارج‌سازی بالاتری در مقایسه با ایمپلنت‌های کنترل نشان داده‌اند [۳۴]. با وجود این، روش‌های شیمیایی ممکن است خواص مکانیکی تیتانیوم را کاهش دهند. برای مثال اسید اچ می‌تواند منجر به شکنندگی تیتانیوم شده و ترک‌های میکروسکوپی بر روی سطوح آن ایجاد کند، که این مسئله باعث کاهش گشتاور خستگی ایمپلنت می‌شود [۳۳].

۱-۴-۷- ایجاد زبری در سطح ایمپلنت‌ها به وسیله آندکاری

با استفاده از روش آندکاری، توپوگرافی و ترکیب لایه اکسید سطحی ایمپلنت را می‌توان تغییر داد. روند اکسیداسیون آندی یک روش الکتروشیمیایی است که باعث افزایش لایه و خشونت سطحی می‌شود. آندکاری خصوصیات لایه اکسید را تغییر داده و باعث افزایش سازگاری زیستی می‌شود [۳۴]. همچنین، سطوح متخلخل در اندازه‌های نانو و یا میکروسکوپی ممکن است بوسیله غوطه‌ورسازی تیتانیوم در اسیدهای قوی (HF , HNO_3 , H_3PO_4 , H_2SO_4) در دانسیته بالای ۲۰۰ یا پتانسیل الکتریکی (۱۰۰ ولت) تولید شود. نتیجه آندکاری، ایجاد لایه اکسید با ضخامت به بیش از ۱۰۰۰ نانومتر بر روی تیتانیوم می‌باشد و از سوی دیگر این لایه اکسید در سمت دیگر حل یا تجزیه می‌شود. تجزیه لایه اکسید در طول جریان الکتریسیته باعث ایجاد تخلخل‌هایی در حد نانو و یا میکروسکوپی بر روی سطوح تیتانیوم می‌شود [۳۵].

دو مکانیسم برای توضیح استئوایتگریشن در این ایمپلنت‌ها بیان شده‌است، قفل مکانیکی از طریق

رشد استخوان در تخلخل‌ها و بان‌دینگ بیوشیمیایی. در مطالعات دیگر ایجاد تغییر در ترکیب شیمیایی لایه اکسید تیتانیوم با ترکیب منیزیوم، کلسیم، سولفور و فسفر مورد آزمایش قرار گرفته است و مشخص شده است که ترکیب منیزیوم به لایه اکسید تیتانیوم منجر به گشتاور خارج سازی بیشتر در مقایسه با سایر یون‌ها می شود.

۱-۴-۸- پوشش کلسیم فسفات CaP coating

برای دهه‌های متمادی، ایمپلنت‌های دندانی با فسفات کلسیم پوشانده می شدند. این موضوع به خوبی شناخته شده است که متعاقب گذاشتن ایمپلنت، رهاسازی فسفات کلسیم در داخل ناحیه پری ایمپلنت منجر به افزایش درجه اشباع مایعات بدن شده و متعاقب آن ته نشینی و رسوب آپاتیت بیولوژیکی بر روی سطوح ایمپلنت اتفاق می افتد. این لایه آپاتیت بیولوژیک ممکن است حاوی پروتئین‌های اندورنوس بوده و به عنوان ماتریکسی برای اتصالات و رشد سلولی استئوژنیک استفاده شود [۳۶]. از آنجایی که ثبات بیولوژیکی ایمپلنت‌های تیتانیومی به بافت استخوانی با پوشش فسفات کلسیم سریع‌تر از زمانی است که بدون آن باشد، پس به نظر منطقی می رسد که پروسه‌های بهبود استخوان در اطراف ایمپلنت در نتیجه تشکیل لایه آپاتیت بیولوژیکی ذکر شده، افزایش یابد [۳۶ و ۳۷].

۱-۵-۵- ذرات مورد استفاده در فرآیند سندبلاست

۱-۵-۱- سیلیسیم کارباید (SiC)

سیلیسیم کارباید ماده‌ای کریستالین (بلوری) با وزن مولکولی $40/07$ است، که از لحاظ رنگ از زرد کم‌رنگ یا سبز تا سیاه است. که این رنگ‌ها وابسته به نوع ناخالصی‌های آن‌ها است. احتمالاً بهترین خاصیت شناخته شده‌ی سیلیسیم کارباید، سختی (hardness) است. سختی سیلیسیم کارباید اغلب دارای وضعیت $9/5$ در مقیاس موهس است. میانگین اطلاعات سختی نوپ، زیر بار 100 گرم، با

نشان گذار الماس که در آزمایشگاه شرکت کربوران دوم تعیین شده است در شکل (۴-۱) آمده است.

Sapphire	۲۰۱۳
Fused cast Alumina	۲۲۵۹
Sic.dense , self-bonded	۲۷۴۰
SiC.black crystal	۲۸۳۹
SiC.green crystal	۲۸۷۵
Born carbide	۳۴۹۱

شکل (۴-۱) سختی نوپ ۱۰۰ گرم

این ارقام نشان دهنده‌ی میانگین چندین اندازه گیری هستند ، تفاوت تست‌ها بر روی سیلیسیم کارباید احتمالاً به علت این حقیقت است که این ماده سختی بیشتری در یک جهت دارد. بیشترین مصرف این ماده در بخش ادوات و ابزارآلات ساینده است. این ماده در اشکال مختلف، جهت فرآیند برش استفاده می‌شود. این ماده را با مواد آلی و غیر آلی مخلوط و برای براده برداری از سطوح مختلف استفاده می‌کنند. در بخش نسوز نیز به علت ضریب انبساط کم ، رسانایی گرمایی بالا و خنثی بودن شیمیایی و فیزیکی سیلیسیم کارباید به‌عنوان یک ماده‌ی پر ارزش برای استفاده در بخش نسوزها استفاده می‌شود. همچنین این ماده کاربردهای فراوان دیگری دارد که به‌صورت تیتروار بیان می‌گردد.

۱ - صنعت ساینده‌ها (Abrasives).

۲ - پوشش‌های سطحی (Wear surfaces).

۳ - نسوزها (Refractories).

۴ - الکترونیک و کاربردهای الکتریکی (Electrical application).

۵ - متالورژی (Metallurgical application).

۱-۵-۲- آلومینا (Al_2O_3)

اکسید آلومینیوم از خانواده ترکیبات غیرآلی با فرمول شیمیایی Al_2O_3 است. این اکسید، یک اکسید آفوتتر مهم است و نام‌های تجاری متنوعی مانند آلومینا، کوراندوم و... دارد. نام‌های تجاری متنوع اکسید آلومینیوم، نشان دهنده‌ی گستره‌ی وسیع استفاده از این ماده در صنعت است.

ویژگی‌های کلیدی آلومینا

- ۱- استحکام فشاری بالا.
- ۲- سختی بالا.
- ۳- مقاومت به سایش بالا.
- ۴- مقاومت در برابر حملات شیمیایی حتی در دماهای بالا.
- ۵- رسانایی گرمایی بالا.
- ۶- مقاومت در برابر شک حرارتی.
- ۷- دیرگدازی بالا.
- ۸- مقاومت دی الکتریک بالا.
- ۹- مقاومت الکتریکی بالا حتی در دماهای بالا.
- ۱۰- شفافیت در برابر فرکانس‌های اشعه میکروویو.
- ۱۱- ماده اولیه آن به سهولت قابل دسترسی است و قیمت آن دارای نوسان شدید نیست.

کاربردهای آلومینا

آلومینا در زمینه‌های مختلف صنعتی کاربرد دارد. در ادامه اشاره‌ای به برخی از کاربردهای آن داریم:

• دیرگذاها

صنعت دیرگذا، وظیفه ساخت قطعات یا مواد دیرگذاز مصرفی در سایر صنایع را بر عهده دارد. معمولاً کاربرد دیرگذاها از دمای بالاتر از ۴۰۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد مطرح هستند و از این دما به بالا کم‌کم شرایط سخت می‌شود. در شرایط کاری سخت مانند صنعت فولاد

سازی، تولید محصول در شرایطی همچون فرآیند کربن زدایی، کوره بلند، تاندیش‌های مختلف انجام می‌شود. در این صنایع کوره‌های مختلف و پاتیل‌های فراوانی استفاده می‌شوند. از این رو تنوع مواد دیرگداز مصرفی در این بخش‌ها زیاد است. مذاب‌های عبوری از این دیرگدازها، دارای دمایی در محدوده ۱۵۵۰-۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند که در این شرایط خوردگی به علت تلاطمات مذاب بالاست. بنابراین نسوزهای مورد استفاده در این بخش‌ها بسیار خاص و حساس هستند. این دیرگدازها باید مقاومت به خوردگی، شوک پذیری، مقاومت حرارتی و دوام مناسبی داشته باشند. اگرچه مواد دیرگداز مصرفی در برخی صنایع مانند صنعت فولاد و شیشه‌سازی موادی با دوام هستند ولی به‌خاطر شرایط سخت کاری سریعاً فرسوده می‌شوند و نیاز به تعمیر و جایگزینی دارند.

از آلومینا می‌توان در ساخت نسوزهای شکل‌دار و بی‌شکل استفاده کرد. انواع مختلفی از نسوزها که بر پایه آلومینا تولید می‌شوند عبارت‌اند از: آجرهای آلومینایی، کامپوزیت‌های آلومینایی، دیرگدازهای آلومینا-مولیت، دیرگدازهای آلومینا-اسپینل، دیرگدازهای آلومینا-گرافیت. در کنار آلومینا می‌توان فازهای دیگری مانند مولیت و اسپینل را داشته باشیم. در واقع آلومینا مقاومت به خوردگی خوبی دارد اما در برابر مذاب و سرباره به سرعت خورده می‌شود از این رو برای افزایش مقاومت به خوردگی آن از مواد کربنی استفاده می‌شود. نسوزهای آلومینا-گرانیت به خاطر پدید آمدن خاصیت عدم‌ترشوندگی خواص مقاومتی در برابر خوردگی خوبی دارند. آلومینا شوک پذیری خوبی ندارد در واقع شوک پذیری آن در حد متوسط است. برای افزایش مقاومت در برابر شوک حرارتی می‌توانیم از فازهای دیگر (به شکل کامپوزیت) در آلومینا استفاده کنیم. مثلاً افزودن مولیت به آلومینا باعث بهبود خواص شوک‌پذیری آن می‌شود.

• ساینده‌ها

همان‌طور که قبلاً اشاره شد آلومینا دارای سختی بالایی است. در مقیاس موس عدد ۹ به آلومینا تعلق دارد و در واقع پس از الماس که سختی آن ۱۰ است، قرار دارد. به‌خاطر سختی بالای این ماده از آن در تولید ابزارهای برنده و ساینده‌ها استفاده می‌شود.

• کاربردهای الکتریکی

آلومینا استحکام دی الکتریک بالایی دارد و می تواند به عنوان پایه مدار، عایق شمع اتومبیل، پوشش لامپ های بخار سدیم از آن استفاده کرد. کاربرد آلومینا در مدارهای با فرکانس بالا اهمیت پیدا می کند. در واقع گرمای پدید آمده در این مدارها می تواند مواد متداول مانند پلاستیک را ذوب کرده و تنها مواد سرامیکی هستند که می توانند در این شرایط تحمل داشته باشند.

• کاربردهای بیومتریالی

آلومینا از لحاظ شیمیایی یک اکسید آمفوتر و خنثی است. به خاطر وجود این ویژگی، آلومینا مقاومت به خوردگی مناسبی دارد. محیط بدن موجودات زنده محیطی خورنده است و در صورت عدم تناسب میان یک ایمپلنت و بدن، بدن آن را دفع می کند. این دفع کردن به همراه تحریک سیستم دفاعی بدن بر علیه ماده خارجی است، از این رو نوع ماده مورد استفاده در ساخت ایمپلنت و پروتز بسیار مهم می باشد. آلومینا دارای دو ویژگی است که توانسته خود را به عنوان یک ماده زیست سازگار مطرح کند. این دو ویژگی عبارتند از:

۱- آلومینا از لحاظ شیمیایی خنثی است.

۲- آلومینا با محیط بدن سازگاری دارد.

از این رو آلومینا می تواند کاربردهای بیومتریالی خوبی داشته باشد. البته آلومینا نیز مانند سایر سرامیک ها ماده ای ترد است و استحکام کششی آن پایین است. از این رو در هنگام استفاده از سرامیک ها (آلومینا) در ساخت پروتزها با مشکل ابعادی روبرو هستیم. در واقع نمی توانیم هر قطعه ای با هر ابعادی را از جنس سرامیکی تهیه کنیم. به صورت کلی اگر قطعه ما کوچک باشد مانند دندان و یا استخوان های کوچک ما می توانیم از سرامیک استفاده کنیم اما اگر استخوان ما بزرگ باشد استخوان ران یا ساق پا دیگر نمی توانیم از سرامیک در ساخت آن استفاده کنیم.

از پوشش های آلومینایی برای بهبود خواص سطحی ایمپلنت ها و پروتزهای فلزی استفاده می شود. در واقع فلزات مواد زیست سازگاری نیستند که با افزوده شدن پوشش آلومینایی این

مشکل برطرف شود. به خاطر خواص سایشی مناسب آلومینا از آن در تولید مفاصل سرامیکی بهره گرفته می شود. امروزه بسیاری از افرادی که تصادف کرده اند، راه رفتن دوباره خود را مدیون این مفاصل سرامیکی هستند.

- کاربردهای ویژه

علاوه بر کاربردهای گسترده ای که در مورد آلومینا گفتیم، برخی از کاربردهای آلومینا خاص هستند. مثلاً در سیستم های صنعتی که مایعات با دمای بالا در حال انتقال هستند ما نیاز به واشرها و درزگیرهایی هستیم که نمی توان آن ها را از جنس لاستیک تهیه کرد. این نوع واشرها از جنس آلومینایی هستند. همچنین کاشی های مورد استفاده در شاتل های فضایی از جنس آلومینا هستند. آلومینا به خاطر خواص زیر برای ساخت کاشی های شاتل فضایی مناسب است:

۱- نقطه ذوب بالا.

۲- مقاومت به سایش خوب.

۳- استحکام مناسب.

شاتل های فضایی در هنگام گذر از جو زمین باید بر اصطکاک جو غلبه کنند در این میان علاوه بر اصطکاک، دما نیز بالاست. از این رو نیاز است تا سطح شاتل فضایی به طور مناسبی عایق کاری گردد. آلومینا گزینه مناسبی برای این کاربرد است. در یک شاتل فضایی حدود ۳۰۰۰۰ کاشی استفاده شده است.

فصل ۲:

مروری بر ادبیات تحقیق

۲-۱- مطالعه‌ها درباره سندبلاست

تعداد کمی از محققان، اثر پارامترهای فرآیند SLA بر نرخ فرسایش و زبری سطح یک هدف را مطالعه کرده‌اند. پارک و همکاران با استفاده از ذرات آلومینا، اثر تغییر زاویه برخورد، بر زبری شیشه‌های Soda-Lime را بررسی کردند [۳۸]. مشاهده شد که با افزایش زاویه حمله (به ۹۰ درجه)، زبری سطح افزایش یافت. زمانی که زاویه برخورد به سمت ۹۰ درجه می‌رود، نیروی اثر نرمال، برای حذف تراشه‌های بزرگتر و افزایش زبری سطح بالاتر می‌رود. آنها همچنین تنوع زبری، به عنوان تابعی از فاصله رویارویی و زاویه برخورد را مورد مطالعه قرار دادند. در فاصله رویارویی کمتر سرعت (انرژی جنبشی) ذرات برای کمک به حذف ذرات بزرگتر و افزایش زبری، بیشتر بود [۳۸].

همچنین، بوزید^۱ و بوادیا^۲ تحقیقاتی بر روی اثر زاویه برخورد، بر روی زبری و فرسایش سطح در یک فرآیند سندبلاست انجام دادند [۳۹]. مشاهده شد که افزایش مدت زمان بلاست (به عنوان مثال، افزایش ذره تعریف شده) منجر به آسیب بیشتر سطح و زبری بالاتر می‌شود. آنها همچنین دریافتند که، زبری در امتداد عرض در طول سندبلاست، در زوایای برخورد مختلف، کاملاً متقارن بوده و حداکثر آن در مرکز است. کاهش زاویه برخورد باعث کاهش میزان زبری می‌شود، که با مطالعه‌های پارک مطابقت دارد [۳۸].

عملکرد مکانیکی مواد ایمپلنت که اهمیت فوق‌العاده‌ای در استفاده آن در ایمپلنت دارد، به کیفیت سطح نیز بستگی دارد. هر چند، پیش بینی اثر زبری سطح با درمان SLA بر خواص مکانیکی، به ویژه، عمر خستگی یک کار چالش برانگیز است. از یک طرف، سطوح خشن برای خواص مکانیکی مواد زیان آور می‌باشد. چاله‌ها و بی‌نظمی‌ها ایجاد تمرکز تنش می‌کنند. مدودف و همکاران، تاثیر ذرات در طول دوره بلاست، برای تولید یک لایه نزدیک به سطح با ساختار تغییر یافته و تنش فشاری بالا، که ممکن است گسترش ترک خستگی را به تاخیر بیاورد را نشان دادند [۴].

¹ Bouzid

² Bouaouadja

در اواخر سال ۱۹۸۰ یک سری از مطالعه‌ها جهت ارزیابی سطوح تغییر یافته تیتانیوم شروع شد. هدف از این مطالعه‌ها گسترش سطوح تیتانیومی غیر پوششی^۱ بود که بتواند جایگزین سطح اسپری پلاسمای تیتانیوم^۲ برای کاربرد کلینیکی در بیماران شود. مطالعه هیستومتریکی^۳ توسط بوزر^۴، پنج سطح تیتانیومی مختلف را در استخوان‌های بلند خوک‌های آزمایشگاهی ارزیابی کرد و نشان داد که تشکیل استخوان بر روی سطح سندبلاست-اسید اچ (SLA) هنگامی که با سطح TPS و سطوح پالیش شده مقایسه شد، بیشتر بود [۱۵].

در مطالعه بیومکانیکالی که توسط ویلک^۵ و همکارانش در ارتباط با مقایسه میزان گشتاور برداشتی^۶ در ایمپلنت‌های تیتانیومی با سطوح مختلف در گوسفند انجام شد، نشان داده شد که در سطح SLA این میزان در طی دوره ترمیم ۶ ماهه به پانزده برابر اولیه افزایش می‌یابد (۴۰N/cm و ۶۰۰N/cm) [۴۰]. مزایای سطح SLA در مقایسه با TPS در طی دوره ترمیم توسط کوچران^۷ با انجام مطالعه هیستومتریکی روی مندیبل سگ تشریح شده است. خصوصیات استئوفیلیک سطح SLA در مطالعه‌های *In vitro* که سطوح مختلف تیتانیومی را در کشت‌های بافتی حاوی سلول‌های بیشتر استئوبلاست بررسی کرده‌اند تایید شده است. بر اساس نتایج این مطالعه‌های تجربی که در بالا بدان اشاره شد مطالعه‌های کلینیکی برای ایمپلنت‌های SLA بعد از دوره ترمیم ۶ هفته‌ای شروع شد. یافته‌های کلینیکی از دوره کنترل سه ساله نتایج مطلوبی را از میزان موفقیت حدود ۹۹ درصد از این نوع ایمپلنت‌ها نشان داد [۴۱].

ترمیم استخوان اطراف ایمپلنت‌های تیتانیومی، بوسیله سطح تیتانیوم تحت تاثیر قرار می‌گیرد. ویلک و همکاران (۱۹۹۰)، اثرات مکانیکی ترمیم استخوان، برای ایمپلنت با درمان‌های مختلف سطح را بررسی کردند، که حداکثر حذف گشتاور برای سطوح SLA نشان داده شد [۴۲].

ویژگی‌های سطح ایمپلنت‌های تیتانیومی تاثیر مستقیم بر روی یکپارچه‌سازی با بافت نرم و سخت دارد و رادیوگرافی تنها روش غیر تهاجمی برای ارزیابی واکنش استخوان است. در مطالعه‌ای کوچران

¹ Non-coated

² TPS

³ Hystometric

⁴ Buser

⁵ Wilke

⁶ Removal torque

⁷ Cochran

و همکاران (۱۹۹۶)، ایمپلنت‌های تیتانیومی با سطح TPS و SLA را در یک مدل فک پایین سگ تحت شرایط بارگذاری شده و بدون بار، برای بیش از ۱۵ ماه بررسی و مقایسه کردند. که ایمپلنت‌های SLA در درمان‌های اولیه مزایای بیشتر و تحلیل استخوان کمرستال کمتری نشان دادند [۴۳].

در بسیاری از تحقیقات مربوط به ایمپلنت‌های تیتانیومی، بر روی ویژگی‌های سطح تمرکز می‌شود و میزان تماس استخوان با ایمپلنت نشان داده می‌شود. کوچران و همکاران^۱ (۱۹۹۸)، ایمپلنت‌های SLA و TPS را تحت شرایط بارگذاری و بدون بار در داخل بدن مورد بررسی قرار دادند. تماس ایمپلنت با استخوان برای ایمپلنت‌های SLA بدون بارگذاری در مقابل ایمپلنت‌های TPS بدون بار، پس از سه ماه و پس از دوازده ماه بارگذاری به طور معنی‌داری بیشتر بود، اما برای بارگذاری بعد از سه ماه، تفاوت زیادی مشاهده نشد [۴۴].

پس از معرفی SLA، یکی دیگر از سطح ایمپلنت اسید اچ شده، استئوتیت^۲ به بازار معرفی شد، اما هیچ داده‌ای برای مقایسه آن و دیگر سطوح تیتانیوم زبر در دسترس نبود. به همین خاطر بوزر و همکاران^۳ (۱۹۹۸)، مقایسه‌ای بین ایمپلنت‌های با سطح اسید اچ (Osseotite)، و ایمپلنت‌های با سطح سندبلاست و اسید اچ شده (SLA) با اندازه‌گیری مقادیر گشتاور حذف شده، انجام دادند. میانگین زبری برای سطح SLA بیشتر بود، همچنین میانگین گشتاور حذف شده برای ایمپلنت‌های SLA در مقایسه با ایمپلنت‌های استئوتیت به طور قابل توجهی بیشتر بود [۴۵].

سطح تیتانیوم SLA در مقابل سطح TPS جانشینی استخوان بیشتری نشان داده است. بوزر و همکاران (۱۹۹۹)، مقاومت برشی رابط برای ایمپلنت‌های SLA، TPS و ماشین‌کاری شده، در داخل بدن را مورد بررسی قرار دادند. گشتاور حذف شده برای SLA و TPS به طور قابل توجهی بیشتر بود، و برای SLA در مقابل TPS در ۴ هفته، بیشتر بود [۴۶].

¹ Cochran et al.

² Osseotite

³ Buser et al.

۲-۲- روش اویلری لاگرانژی

دینامیک سیالات محاسباتی به طور فزاینده برای فهم دینامیک جریان دو فازی مملو از ذره استفاده می شود. علت اصلی آن بهبود الگوریتم های عددی، مدل های فیزیکی و افزایش قدرت محاسباتی است که باعث می شود استفاده از شبکه با وضوح بالا امکان پذیر باشد. دو روش اساسا متفاوت، لاگرانژی و اویلری، برای شبیه سازی رفتار ذرات معلق وجود دارد.

شبیه سازی جریان گاز- جامد در صنایع شیمیایی برای توصیف فرآیندهای مانند ترک خوردگی سیالات کاتالیستی (FCC) (داز^۱، بودرز^۲، مارین^۳ و هندریکس^۴ ۲۰۰۳)، جذب گازهای پشته (داز، د ویلد^۵، هندریکس، مارین، ویرندیلس^۶ و همکاران، ۲۰۰۴؛ ویجندلا^۷، هندریکس و مارین، ۲۰۰۹)، و احتراق زغال سنگ (ون دی ولدن^۸، باینس^۹، دوگان^{۱۰} و مک موردو^{۱۱}، ۲۰۰۷) حیاتی است. در جریان بستر سیال، فاز گاز، فاز حامل است، در حالی که ذرات جامد به عنوان فاز پراکنده رفتار می کنند. د ویلد، ون انگلانت^{۱۲}، هندریکس و مارین (۲۰۰۵ و ۲۰۰۷) مشاهده های تجربی در یک جریان رقیق خیز پله سرد گاز- جامد با ورودی جانبی را ارائه کردند. برای شبیه سازی جریان خیز پله و طراحی هندسه خیز پله، دینامیک سیالات محاسباتی^{۱۳} (CFD) یکی از ابزارهای مهم است [۴۷].

در مدل سازی جریان خیز پله گاز- جامد، اغلب دو نوع روش در متون پیدا شده است. رویکرد اول روش اویلری- اویلری (مدل دو سیال)، روش دوم که روش اویلری- لاگرانژی است. در هر دو روش، فاز گاز یا فاز حامل یک فاز پیوسته در نظر گرفته می شود. روش اویلری- اویلری در کار

¹ Das

² Baudrez

³ Marin

⁴ Heynderickx

⁵ De Wilde

⁶ Vierendeels

⁷ Vegendla

⁸ Van de Velden

⁹ Baeyens

¹⁰ Dougan

¹¹ McMurdo

¹² Van engelandt

¹³ computational fluid dynamics

گیداسپو^۱ (۱۹۹۴)، دیک^۲، ویرندیلز^۳، هندریکس، د ویلد و و مارین (۲۰۰۲)، د ویلد و مارین و هندریکس (۲۰۰۳)، د ویلد، ویرندیلز و همکاران (۲۰۰۵)، د ویلد، ون انگلانت و همکاران (۲۰۰۵)، داز و همکاران (۲۰۰۳)، داز، د ویلد، هندربکس، مارین، ویرندیلز و همکاران (۲۰۰۴)، داز، د ویلد، هندریکس و مارین (۲۰۰۴)، بن یحیی^۴، سیاملال^۵ و ابراین^۶ (۲۰۰۵)، جیرادیلوک^۷، گیداسپو، دامرونکلرد^۸، کوبس^۹ و مستوفی^{۱۰} (۲۰۰۵) و چالرمسینسون^{۱۱}، پیومسومبون^{۱۲} و گیداسپو (۲۰۰۹)، اجرا شده است. در این روش، فاز جامد یک فاز پیوسته در نظر گرفته می شود. روش اوپلری-لاگرانژی در کار دهانونجای^{۱۳} (۲۰۰۳) و دین^{۱۴}، ون سینت آنالاند^{۱۵}، ون در هوف^{۱۶} و کوئپر^{۱۷} (۲۰۰۷) اجرا شده است. در این روش، فاز جامد ذرات، توسط ذرات شبیه سازی شده است. بنابراین، فاز جامد، فاز پراکنده در نظر گرفته می شود. به منظور کاهش هزینه های محاسباتی مربوط به این روش لاگرانژی، معادله سرعت انتقال تابع چگالی احتمال^{۱۸} (PDF) برای فاز جامد در کار مینیر^{۱۹} و پیرانو^{۲۰} (۲۰۰۱) و چیارو^{۲۱} و مینیر (۲۰۰۸) معرفی شده است. معادله PDF با استفاده از روش ذرات مفهومی / محاسباتی حل شده است. در استفاده از روش PDF می توانید از یک روش لاگرانژی که در آن ذرات فیزیکی به وسیله ذرات فرضی جایگزین شده است، برای حل مجموعه ای از معادله ها استفاده

¹ Gidaspow

² Dick

³ Vierendeels

⁴ Benyahia

⁵ Syamlal

⁶ O'Brien

⁷ Jiradilok

⁸ Damronglerd

⁹ Kobes

¹⁰ Mostofi

¹¹ Chalermisinsuwan

¹² Piumsomboon

¹³ Dhanunjay

¹⁴ Deen

¹⁵ Van Sint Annaland

¹⁶ Van der Hoef

¹⁷ Kuipers

¹⁸ probability density function

¹⁹ Minier

²⁰ Peirano

²¹ Chibbaro

شود. مزیت اصلی روش اویلری- لاگرانژی این واقعیت است که هیچ مدل سازی از ترم انتقالی و ترم منبع در معادله PDF نیاز نمی باشد [۴۷].

وقتی که نتایج شبیه سازی به دست آمده با استفاده از روش اویلری- اویلری با داده های تجربی موجود توسط دوپلد و همکاران^۱ (۲۰۰۵) مقایسه شد، تفاوت قابل ملاحظه ای برای خیز پله با یک ورودی مواد جامد جانبی یافت شد. این تفاوت ها به طور جدی در هنگام استفاده از روش اویلری- لاگرانژی کاهش می یابد [۴۷].

مقایسه ای بین روش لاگرانژی و اویلری در پیش بینی حرکت ذرات با اندازه میکرونی در جریان آرام توسط سعیدی و همکاران^۲ (۲۰۱۴) صورت گرفت [۴۸]. در این مطالعه سه مورد مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمد و عدم تطابق بین روش لاگرانژی و اویلری برای غلظت های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی تایید می کنند که غلظت ذرات کم تر از حداقل مقدار، حدود 10^5 m^{-2} ، نتایج حاصل از این دو رویکرد به صورت قابل توجهی با یکدیگر متفاوت هستند و از این رو رویکرد اویلری نمی تواند به عنوان یک جایگزین برای روش لاگرانژی برای غلظت های کم استفاده شود. اگرچه نتایج مسائل لاگرانژی ممکن است با افزایش زمان شبیه سازی به اویلری همگرا شود، اما این وضعیت فرضی است و واقعی نیست [۴۸]. در کاری که در سال ۲۰۱۳ توسط دیانا کاراگیار^۳ و هنریک انگلارت^۴ انجام شد، توانایی ردیابی لاگرانژی ذرات برای پیش بینی میزان رسوب در لوله ها و لوله های با مانع بررسی شد. اندازه قطره یکی از پارامترهای ورودی است که بخش عمده ای از فرایند رسوب را تعریف می کند. رابطه جدیدی که در این کار برای برآورد اندازه قطره پیشنهاد شده، پیرو آنالیز سیستماتیک تجربی اندازه قطره در جریان دوفازی حلقوی است. مدل ردیابی لاگرانژی ذرات قابلیت خوبی در پیش بینی مواردی که اندازه قطره مشخص است از خود نشان داد. با این حال، هنگامی که اندازه قطره تخمین زده می شود، خطا در محاسبه نرخ رسوب بالا می رود. پراشانت خار و همکاران^۵ (۲۰۱۵) قطرات و ذرات اندازه محدود را در جریان چندفازی مدل کردند.

¹ De Wilde, et al.

² Saidi, et al.

³ Diana Caraghiaur

⁴ Henryk Anglart

⁵ Prashant Khar et al.

روش نقطه ذره متداول برای پردازش فاز پراکنده در یک میدان جریان پیوسته، با در نظر گرفتن اثر اندازه محدود، با استفاده از یک درونیابی گوسی از نقاط لاگرانژی در میدان اویلری، برای حل مسأله توسعه داده شد. روش پیشنهادی آزمون سه مدل جریان مختلف در یک چاقوب عددی براساس شبیه سازی گردابه ای بزرگ^۱ تلاطم بسته است. نخست، جریان بر روی یک استوانه با عدد رینولدز ۳۹۰۰ و فشار یک اتمسفر شبیه سازی شد. نتایج تطابق خوبی با داده های تجربی برای سرعت متوسط جهت جریان و فرکانس انتشار گردابه نشان داد. مورد دوم، تزریق جت دیزل در محیط ساکن روی محدوده فشار ۱/۱-۵ مگاپاسگال بود. عمق نفوذ جت با اندازه گیری ها مطابقت می کرد. عمق نفوذ با افزایش فشار محفظه، با توجه به افزایش نیروی درگ در محیط متراکم تر کاهش می یابد. در نهایت، تزریق جت آب و استون به جریان متقاطع هوا در فشار یک اتمسفر بررسی شد. نفوذ جت و قطر متوسط سوتر قطرات مایع در مقایسه با اندازه گیری ها به خوبی محاسبه شد [۴۹]. در کاری دیگر لی لیو^۲ و مصطفی باریگو^۳ (۲۰۱۵) از روش ردیابی لاگرانژی ذرات برای بررسی سوسپانسیون های پلی دیسپرس^۴ که به صورت مکانیکی آشفته شدند استفاده کردند. مخلوط جامد- مایع از پنج بخش اندازه ذرات در آب تشکیل شده و غلظت کل در محدوده ۲/۴ - ۲۳/۶ درصد حجمی (۵ - ۴۰ درصد وزنی) است. میدان جریان کل و توزیع فضایی فاز مایع و هر اندازه از ذره با استفاده از روش ردیابی لاگرانژی انتشار پوزیترون ذرات برای هر جز از جریان دوفازی حل شد، نتایج، در قالب نقشه های سرعت محلی، غلظت مواد جامد و سرعت لغزشی متوسط ارائه شد. دقت اندازه گیری از طریق موازنه جرم شش جز و محاسبات پیوستگی جرم تایید شد [۵۰].

¹ Large Eddy Simulation (LES)

² Li Liu

³ Mostafa Barigou

⁴ Polydisperse

فصل ٣:

روش تحقیق

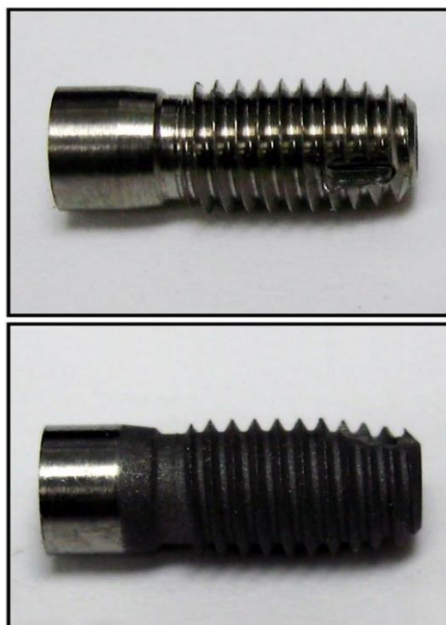
۳-۱- تعریف مسئله

در این تحقیق سعی می شود، عملکرد دستگاه سندبلاست (شکل (۳-۱))، مخصوص کاربردهای دندانپزشکی، شبیه سازی شود. روند کاری این دستگاه به این گونه است که، هوای تحت فشار همراه با ریز ساینده هایی مانند آلومینا، از طریق نازل به ایمپلنت اسپری می شوند.



شکل (۳-۱) تصویر یک دستگاه سندبلاست و ایمپلنت

حداکثر فشار کاری در این دستگاه، ۱۰ بار است، که در این شبیه سازی برای این که بتوان جریان را تراکم ناپذیر در نظر گرفت (برای این که بتوان جریان یک سیال تراکم پذیر، مانند هوا را تراکم ناپذیر در نظر گرفت، باید عدد ماخ کمتر از 0.3 ($Ma < 0.3$) باشد)، حداکثر فشار در $3/6$ بار محدود شده است، که در نتیجه آن سرعت جریان هوای ورودی به کانال ۲۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته می شود.



شکل (۲-۳) تصویر بالا ایمپلنت قبل از سندبلاست، تصویر پایین ایمپلنت بعد از سندبلاست

این شبیه سازی با استفاده از نرم افزار OpenFOAM انجام می شود، و با استفاده از روش لاگرانژی سعی در ردیابی ذره و مشخص کردن خصوصیات آن می شود.

۲-۳- تعاریف

۱-۲-۳- کوپلینگ یک، دو و چهار طرفه

غلظت ذرات تعامل بین دو فاز را تحت تاثیر قرار می دهد. در یک سوسپانسیون رقیق فاصله بین دو ذره P_i و P_j بزرگتر از ده برابر قطر ذره است. در غیر این صورت سوسپانسیون متراکم نامیده می شود.

در مورد سوسپانسیون رقیق با کسر حجمی ذرات کم تر از 10^{-6} ، اثرات ذرات در اغتشاش قابل اغماض است. این یک کوپلینگ یک طرفه است: جریان، ذرات را تحت تاثیر قرار می دهد، اما ذرات بر جریان (اصطلاح منبع اضافی در معادله مومنتوم صرف نظر شده است) تاثیر نمی گذارد.

هنگامی که کسر حجمی بیش تر است ($\text{volfrac} \in [10^{-6}; 10^{-3}]$) ذرات اغتشاش را افزایش می دهد (اگر $\tau_p/\tau_k > 10^2$) و یا باعث اتلاف اغتشاش می شود (اگر $\tau_p/\tau_k < 10^2$) (که در آن τ_k مقیاس زمانی کولموگروف^۱ است و τ_p زمان استراحت ذره است). این کوپلینگ دوطرفه است و ترم منبع در معادله مومنتوم اضافه شده است.

برای یک سوسپانسیون غلیظ تعاملات ذره ذره، نیز باید محاسبه شود. این کوپلینگ چهارطرفه نامیده می شود.

۳-۳- نیروهای وارد بر حرکت ذرات جامد

به منظور پیش بینی دقیق انتقال ذرات، لازم است کلیه عوامل مؤثر بر حرکت و جابجائی ذرات بررسی شود. مهم ترین فاکتورهایی که بر انتقال ذرات جامد مؤثرند، عبارتند از:

(۱) نیروهای هیدرودینامیکی و وزن ذرات، (۲) برخورد ذرات با مرزهای جامد، (۳) اثر آشفتگی جریان بر حرکت و پراکندگی ذرات.

ذرات مورد استفاده در سراسر این پایان نامه جامد و کروی است. برای هر گام زمانی فرایند حل مسئله، نیروی وارد بر هر ذره محاسبه شد و قانون دوم حرکت نیوتون برای هر یک از ذرات تنها برای پیدا کردن سرعت و موقعیت جدید آن حل شد. مدل های نیروی مختلف و سهم آن ممکن است با توجه به نیازها و خواسته های کاربران انتخاب شود.

۳-۳-۱- نیروی درگ^۲

نیروی پسا، مسلماً مهم ترین سهم را در نیروی خالص وارد بر یک ذره در سیال دارد. مدل درگ برپایه عدد رینولدز ذرات، که عدد رینولدز براساس قطر ذرات D_p ، ویسکوزیته سیال و تفاوت سرعت بین

¹ Kolmogorov

² Drag

ذرات و سیال حامل به نام سرعت لغزش است، استوار است. سرعت سیال حامل U را می توان به عنوان سرعت متوسط در سلول و یا درونیابی مقدار آن از سلول شبکه و همسایگان آن محاسبه کرد.

۳-۳-۲- نیروی جرم اضافه شده

نیروی جرم اضافی، اینرسی اضافه شده به سیستم، ناشی از شتاب جسمی است که می خواهد بخشی از حجم سیال را جابجا کند. چون جسم و سیال نمی توانند به صورت همزمان فضای فیزیکی یکسانی را اشغال کنند. نیروی جرم اضافه شده، همچنین به عنوان نیروی جرم مجازی شناخته شده است، که یک نیروی نشات گرفته از شتاب ذره از طریق سیال حامل است.

۳-۳-۳- نیروی گرانش و شناوری

گرانش و خاصیت شناوری به صورت یک نیروی تکی که نیروی خالص از خاصیت شناوری و گرانش است، رفتار می کند

$$F_g = m_p g \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \quad (1-3)$$

۳-۳-۴- نیروی باست

نیروی باست نشان دهنده حرکت نسبی بین ذرات و لایه مرزی مرتبط با آن است. این نیرو همچنین گاهی اوقات نیروی تاریخ سیال و یا فقط نیروی تاریخ نامیده می شود. از آنجایی که در شبیه سازی ارائه شده در این پایان نامه، $1 \ll \rho_f / \rho_p$ است، این نیرو با خیال راحت حذف می شود.

۳-۳-۵- نیروی مگنوس

نیروی مگنوس حاصل پدیده‌های مختلفی مانند اثر برنولی و تشکیل لایه مرزی در محیط اطراف جسم متحرک می‌باشد. به دلیل برخوردهای مکرر ذرات با دیوار، ذرات می‌توانند با سرعت‌های زاویه‌ای بالائی بچرخند و در سیال لزج یک نیروی عمود بر امتداد سرعت و یک گشتاور ایجاد کنند. چون در این پایان نامه از چرخش ذرات صرف نظر می‌شود، نیروی مگنوس نیز نادیده گرفته می‌شود.

۳-۴-۳- معادلات حاکم

۳-۴-۳-۱- معادلات در قالب اویلری

معادلات ناویر استوکس تراکم‌ناپذیر بر فاز سیال (فاز پیوسته) حاکم است.

$$\nabla \cdot U = 0$$

(۲-۳)

$$\rho_f \frac{\partial U}{\partial t} + \rho_f (U \cdot \nabla) U = -\nabla P + \mu_f \nabla^2 U + \rho_f g \quad (۳-۳)$$

که در آن U ، P ، ρ_f و μ_f سرعت، فشار، چگالی و ویسکوزیته سیال هستند.

۳-۴-۳-۲- معادلات در قالب لاگرانژی

ذره P با موقعیت مرکز X_p ، قطر D_p ، سرعت U_p و چگالی ρ_p تعریف شده است. که جرم ذره به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$m_p = \frac{1}{6} \rho_p \pi D_p^3 \quad (4-3)$$

در یک قاب لاگرانژی، بردار موقعیت هر ذره X_p از معادله زیر محاسبه می شود.

$$\frac{dX_p}{dt} = U_p \quad (5-3)$$

و معادله حرکت نیوتون بر حرکت ذرات حاکم است:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = \sum F \quad (6-3)$$

در جریان رقیق، نیروی غالب وارد بر ذرات نیروی درگ F_D فاز سیال است: ما از نیروی مگنوس ذرات (با فرض چرخش کوچک ذرات در مقایسه با جابجایی ذرات) و نیروهای دیگر مانند جرم افزوده، ترم تاریخ باست، صرف نظر کردیم.

$$\sum F = F_D + m_p g \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) + F_B \quad (7-3)$$

عدد رینولدز ذرات به صورت زیر تعریف می شود:

$$Re_p = \frac{\rho_f D_p |U - U_p|}{\mu_f} \quad (8-3)$$

نیروی پسا می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$F_D = -m_p \frac{U_p - U}{\tau_p} \quad (9-3)$$

زمان استراحت ذرات τ_p مدت زمان لازم برای یک ذره، برای پاسخ به تغییرات در سرعت جریان محلی است.

$$\tau_p = \frac{4}{3} \frac{\rho_p D_p}{\rho_f C_D |U - U_p|} \quad (10-3)$$

که در آن تعریف استاندارد، ضریب درگ C_D ، به صورت زیر است:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} & \text{اگر } Re_p \leq 0.1 \\ \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{1}{6} Re_p^{2/3}\right) & \text{اگر } 0.1 \leq Re_p \leq 1000 \\ 0.44 & \text{اگر } Re_p \geq 1000 \end{cases} \quad (11-3)$$

ضریب درگ، برای یک کره جامد، در عدد رینولدز پایین توسط قانون استوکس به صورت تحلیلی محاسبه می شود. برای Re_p بالاتر با تصحیح غیرخطی تجربی با در نظر گرفتن هر دو اثر ویسکوز و اینرسیایی گسترش داده شد. برای مقادیر بالایی از Re_p ، اثرات اینرسی بر اثرات ویسکوزیته غلبه می کند؛ ضریب درگ مستقل از عدد رینولدز می شود و یک مقدار ثابت به تصویب می رسد. از آنجا که سرعت سیال U ، در قاب اویلری محاسبه می شود، برای محاسبه نیروی درگ در قاب لاگرانژی لازم است که، سرعت آن در موقعیت ذره، از نقاط شبکه همسایه درونیابی شود.

۳-۵- مراحل ساخت ایمپلنت دندان

فلز تیتانیوم از فلزهای Non-Precious محسوب می شود و هزینه بالای آن به دلیل مراحل متعدد تولید می باشد، از طرف دیگر بعضی از این مراحل دست ساز بوده و هنوز مکانیزه نشده است. ابتدا باید فلز تیتانیوم توسط حرارت به گرید مورد نظر رسیده باشد، و یا آلیاژ آن تهیه شود، بعد از آن مفتول هایی با قطرهای لازم ساخته می شود، این قطرها به اندازه قطر ایمپلنت هایی است که باید تولید شود. بعد از این مرحله مفتول ساخته شده به طول های مورد نظر تقسیم می شود که این اندازه ایمپلنت دندان را تعیین می کند.

از این قسمت به بعد هزینه تولید بالا می رود، زیرا قطعه های برش خورده باید تک تک به ماشین CNC وصل شده و سطح خارجی و داخلی آن تراشیده شود. هرچه گرید تیتانیوم سخت تر باشد، میزان فرسودگی فرزهای الماسی بیشتر خواهد بود و در نتیجه باید زودتر تعویض شوند. عدم تعویض فرزهای ماشین تراش باعث می شود رزوه های ایمپلنت دندان چه در داخل و چه در خارج آن دقت لازم را نداشته باشند.

حالا باید ایمپلنت‌ها سندبلاست شوند، برای این کار از ذرات مختلفی مثل اکسید آلومینیوم استفاده می‌شود. برای کیفیت بهتر پودر مصرف شده از یک سو وارد مخزن سندبلاست شده و توسط مکنده بعد از عملیات از سوی دیگر خارج می‌شود و هرگز نباید این پودر دوباره استفاده شود. کمپانی‌هایی که این کار را انجام می‌دهند، حتما تاثیر منفی آن را در کیفیت سندبلاست خود می‌بینند.

بعد از سندبلاست، تیتانیوم برای اسید شویی ارسال می‌شود. در اینجا برای اینکه داخل فیکسچر آسیب نبیند، باید سطح داخلی آن توسط تفلون پوشانده شود، انجام این مرحله مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد می‌شود.

پس از اسید شویی ایمپلنت شسته می‌شود و برای بسته‌بندی ارسال می‌شود. پس از بسته‌بندی اولیه، ایمپلنت برای استریل کردن با اشعه گاما ارسال می‌شود و سپس جهت بسته‌بندی نهایی و شماره سریال گذاری وارد آخرین مرحله تولید می‌شوند.

ایمپلنت‌ها باید سندبلاست شوند، تا سطح جانبی آنها بزرگ‌تر شود (شکل (۳-۲)). تشکیل استخوان در خلل و فرج ایمپلنت دندان باعث می‌شود که، ایمپلنت به استخوان جوش بخورد، درست مثل چسبیدن کامپوزیت به مینای دندان، که به این پدیده استوایتنگریشن گفته می‌شود.

در استوایتنگریشن، پیوند شیمیایی بین تیتانیوم و استخوان وجود ندارد و اتصال فقط فیزیکی می‌باشد و این درگیری به اندازه‌ای زیاد است که تیتانیوم به استخوان کاملا جوش خورده به نظر می‌رسد، طوری که، بعد از زمان استوایتنگریشن، حدود ۴۰۰ نیوتون نیرو لازم است تا، ایمپلنت از استخوان جدا شود.

SLA یک روش قدیمی برای سندبلاست کردن ایمپلنت است، که امروزه هم همین روش استفاده می‌شود. حرف S برای Sand blast، حرف L برای Large grit به معنای دانه‌های درشت سندبلاست و حرف A برای واژه Acid wash به کار رفته است. به طور مختصر یعنی اینکه پس از تراشیده شدن ایمپلنت در ماشین CNC، باید سندبلاست شود و سپس با اسید شستشو شود تا موادی که روی ایمپلنت مانده، شسته شوند.

۳-۶- openFOAM

openFOAM یک جعبه ابزار شبیه سازی، برای حل هر دو معادله دیفرانسیل جزئی ثابت و وابسته به زمان (PDE ها) با استفاده از روش حجم محدود (FVM) است. اگرچه عمدتاً به عنوان یک بسته CFD برای شبیه سازی انواع مختلف جریان استفاده می شود، می توان آن را برای هرگونه مسئله مکانیک محیط پیوسته که در آن FVM می تواند استفاده شود، استفاده کرد. توانایی شبیه سازی گسسته، ذرات لاگرانژی در openFOAM موجود است.

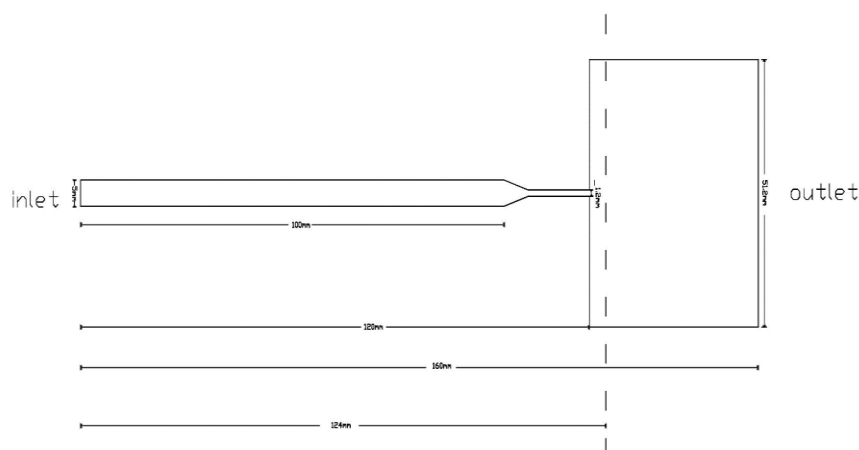
۳-۶-۱- مرور تاریخی بر openFOAM

همان طور که قبلاً ذکر شد، openFOAM، ابزاری برای شبیه سازی مسائل بقا با FVM است. گسترش آن اوایل سال ۱۹۹۰ به عنوان کد در خانه، در کالج امپریال لندن آغاز شد، و کد تنها به عنوان جعبه ابزار FOAM در آن زمان شناخته شده بود. آن در میان اولین ابزارهای علمی شبیه سازی در زبان ++C شی گرا بود، که همچنان در آن زمان در حال توسعه بود (اولین پیش نویس برای یک ++C استاندارد توسط ISO در سال ۱۹۹۵ منتشر شد و نسخه نهایی در سال ۱۹۹۸ آماده شد). علاوه بر این طراحی شی گرا کد، همچنین آن در بین اولین کدهای CFD استفاده کننده از مش چند وجهی بود. همان گونه که در کد کامل شده هست، بسته شبیه سازی تجاری، توسط شرکت Nabla Ltd فروخته شد. کتابخانه اصلی حل کننده ها با فایل های باینری توزیع شد، و فایل های سرفصلی (Header) به مشتریان اجازه ایجاد حل خود و پیوند آن با هسته را می دهد. به هر حال، در سال ۲۰۰۴ کل پکیج FOAM به عنوان منبع باز، تحت مجوز عمومی همگانی GNU، توسط شرکت openCFD Ltd آزاد شد، که به هر کسی برای استفاده، تغییر و توزیع کپی از کد منبع، اجازه می دهد. نام کد پس از آن به openFOAM تغییر یافت. پس از آن، در سال ۲۰۱۱، شرکت SGI، openCFD را به دست آورد و کد منبع را به بنیاد به تازگی ایجاد شده openFOAM انتقال داد تا اطمینان حاصل شود که کد برای همیشه آزاد و منبع باز باقی می ماند. شرکت openCFD همچنان به توسعه کد منبع و ارائه پشتیبانی های تجاری ادامه می دهد. سپتامبر ۲۰۱۲، openCFD به شرکت فرانسوی ESI فروخته شد.

۳-۷- بررسی استقلال از شبکه

در شکل (۳-۳) طول کانال به همراه نازل ۱۲ سانتی متر است. قطر کانال ۵ میلی متر و قطر نازل نیز ۱/۲ میلی متر است. فاصله بهینه قرارگیری ایمپلنت از نازل، معمولاً ده برابر قطر نازل است، که در نتیجه در فاصله ۱/۲ سانتی متر قرار می گیرد، که در این شبیه سازی خصوصیات و مشخصات نازل در فاصله بین صفر تا دو سانتی متری نازل بررسی شد.

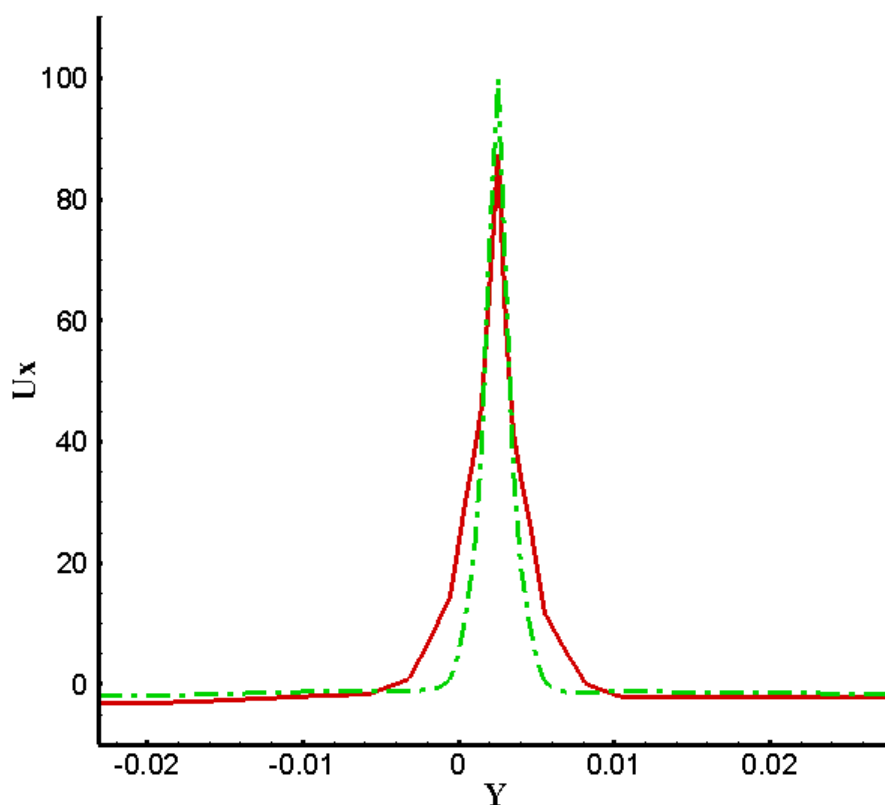
برای این که هندسه مسئله از شبکه مستقل شود، سرعت در راستای x در یک مقطع عرضی به فاصله ۰/۱۲۴ متر از ابتدای کانال با استفاده از چهار شبکه مختلف (۴۰۰ سلول، ۳۰۰۰ سلول، ۶۷۵۰ سلول و ۹۰۰۰ سلول) محاسبه شد، که در دو حالت آخر تطابق خوبی به دست آمد که نشان از مستقل شدن شبکه دارد.



شکل (۳-۳) هندسه شبیه سازی

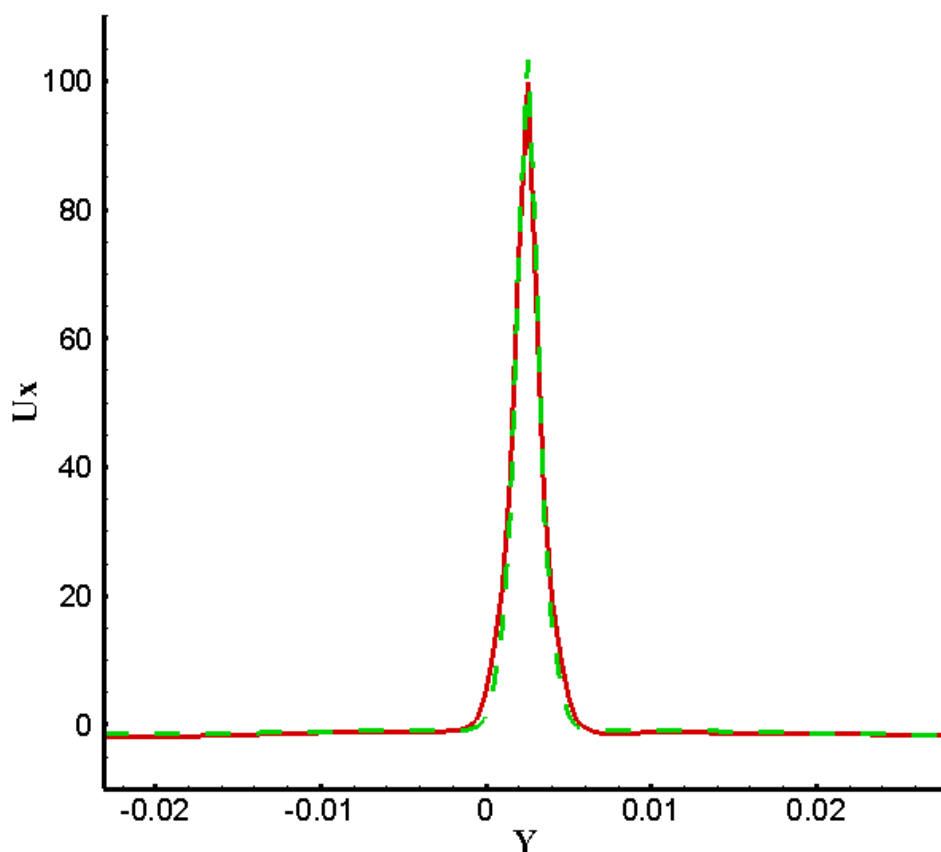
ابتدا سرعت در شبکه اول (۴۰۰ سلول) و دوم (۳۰۰۰ سلول) در مقطع مورد نظر به دست آمد و با هم مقایسه شد که مقدار و چگونگی آن در شکل (۳-۴) آمده است، که در آن محور افقی محور y

موقعیت عرضی در فاصله ۰/۱۲۴ از ابتدا لوله و محور عمودی سرعت در راستای x در فاصله ۰/۱۲۴ از ابتدای لوله است.



شکل (۳-۴) شبکه اول (۴۰۰ سلول) خط ، شبکه دوم (۳۰۰۰ سلول) خط و نقطه

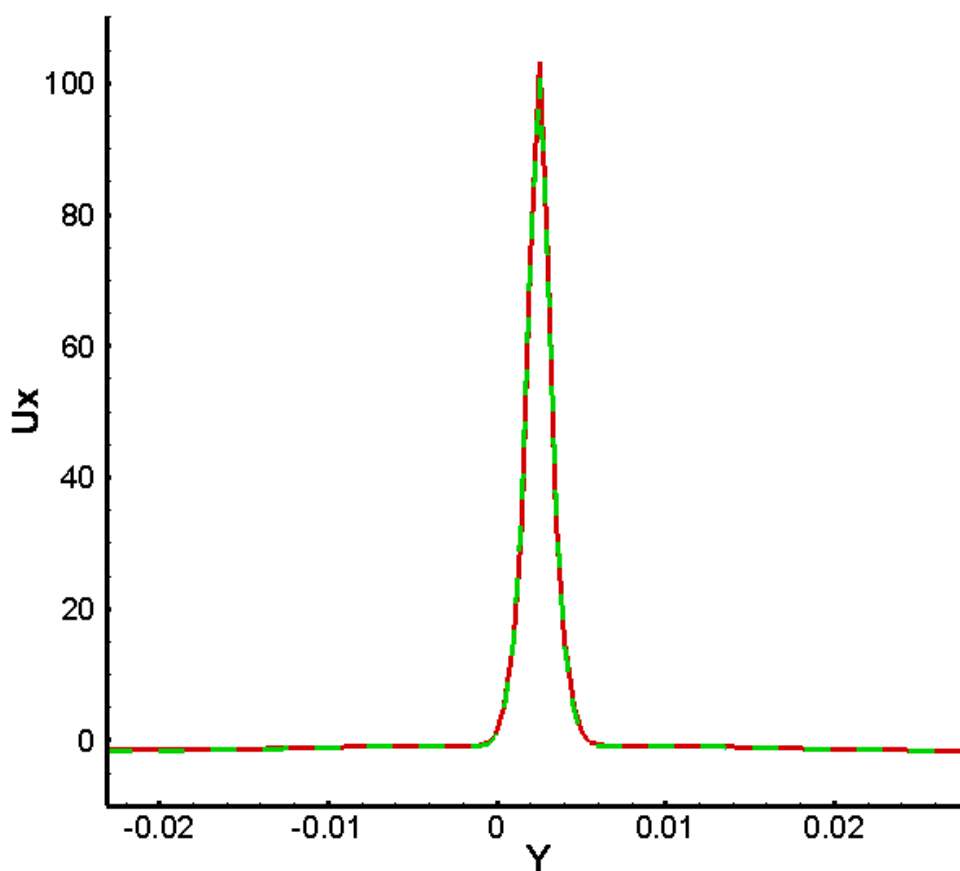
همانطور که در شکل (۳-۴) مشخص است، اختلاف بین دو شبکه زیاد است، در نتیجه شبکه مستقل نشده است، به همین خاطر از شبکه سوم (۶۷۵۰ سلول) استفاده می شود. سرعت با شبکه سوم محاسبه شد و با حالت دوم مقایسه شد که در شکل (۳-۵) مشاهده می شود، که در آن محور افقی محور y موقعیت عرضی در فاصله ۰/۱۲۴ از ابتدا لوله و محور عمودی سرعت در راستای x در فاصله ۰/۱۲۴ از ابتدای لوله است.



شکل (۵-۳) شبکه دوم (۳۰۰۰ سلول) خط ، شبکه سوم (۶۷۵۰ سلول) خط چین

همانطور که از شکل (۵-۳) مشخص می شود نتایج بسیار بهتر و نزدیکتری به دست آمد، ولی همچنان اختلاف ناچیزی وجود دارد، لذا برای بهبود نتایج این بار شبکه سوم را با شبکه چهارم (۹۰۰۰ سلول) مقایسه می شود.

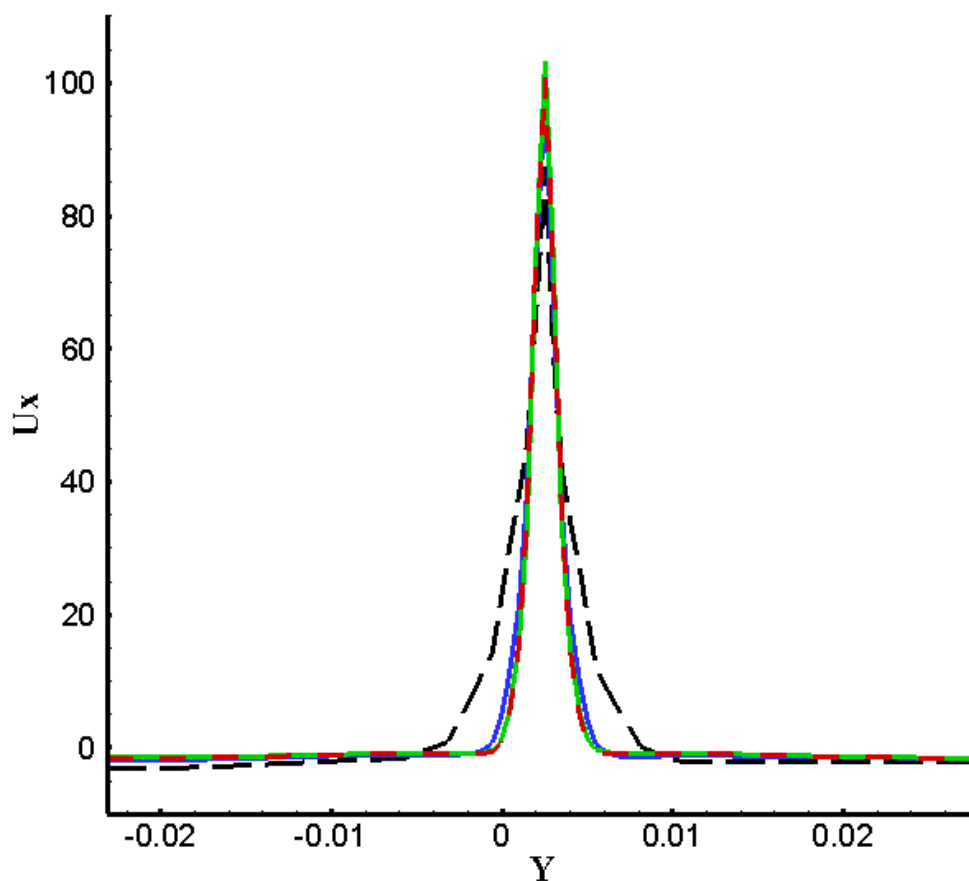
با محاسبه سرعت با استفاده از شبکه چهارم و مقایسه آن با شبکه سوم، نتایج زیر (شکل (۶-۳)) به دست می آید، که در آن محور افقی محور Y موقعیت عرضی در فاصله 0.124 از ابتدا لوله و محور عمودی سرعت در راستای X در فاصله 0.124 از ابتدای لوله است.



شکل (۶-۳) شبکه سوم (۶۷۵۰ سلول) خط ، شبکه چهارم (۹۰۰۰ سلول) خط چین

همانطور که در شکل (۶-۳) مشاهده می شود انطباق خوبی بین داده های دو شبکه وجود دارد، که نتیجه می شود، که حل از شبکه مستقل شده است.

در جدول (۱-۳) و شکل (۷-۳) همچنین اطلاعات هر چهار شبکه به صورت یکجا آمده است، که در آن محور افقی محور Y موقعیت عرضی در فاصله 0.124 از ابتدا لوله و محور عمودی سرعت در راستای x در فاصله 0.124 از ابتدای لوله است.



شکل (۳-۷) سرعت هر چهار شبکه به صورت یکجا

جدول (۳-۱) حداکثر سرعت در مقطع مورد نظر و تعداد سلول هر شبکه

شبکه	تعداد سلول	حداکثر سرعت
M1	۴۰۰	۸۷/۲۸۵
M2	۳۰۰۰	۹۹/۶۰۸
M3	۶۷۵۰	۱۰۳/۱۰۵
M4	۹۰۰۰	۱۰۰/۷۲۵

فصل ۴:

نتایج و تفسیر آنها

۱-۴- اعتبارسنجی حلگر

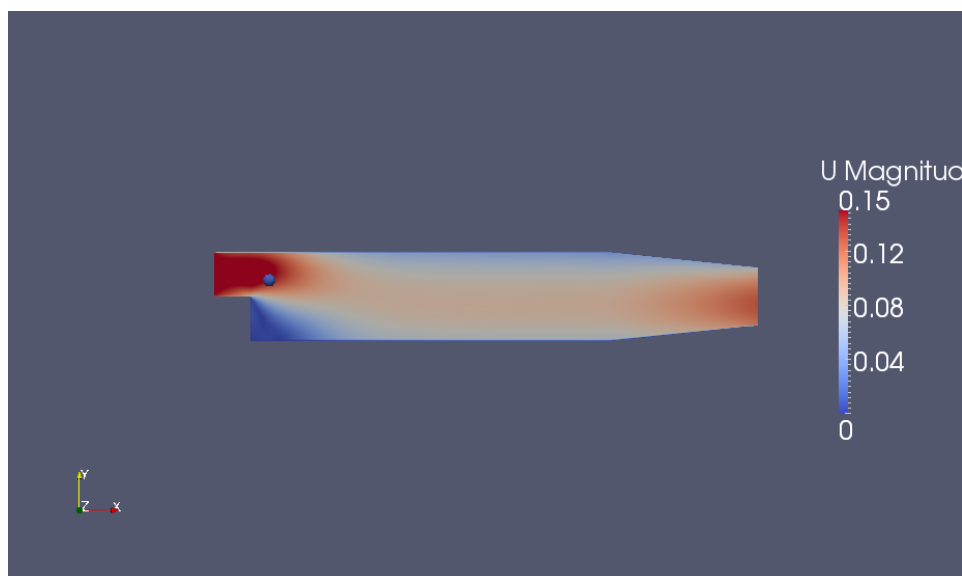
برای تایید حلگر تصمیم گرفته شد، که ضریب درگ ذره به دو روش عددی و تحلیلی در یک جریان استوکس محاسبه و با هم مقایسه شود. چون برای جریان استوکس (جریان آرام با رینولدز کمتر از یک) حل تحلیلی دقیق وجود دارد، برای تایید حلگر از این جریان استفاده شد. یک بار به صورت عددی با حلگر injectorSolidParticleFoam در نرم افزار OpenFOAM و یک بار نیز به صورت تحلیلی با رابطه های مربوط به جریان استوکس، ضریب درگ محاسبه شد. رابطه تحلیلی برای محاسبه ضریب درگ در جریان استوکس به صورت زیر است:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (1-4)$$

که رینولدز ذره (Re_p) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Re_p = \frac{|U_f - U_p| d_p}{\nu_f} \quad (2-4)$$

که در آن U_f سرعت جریان سیال، U_p سرعت ذره، d_p قطر ذره و ν_f ویسکوزیته سیال می باشد. برای بررسی ضریب درگ، پنج گام زمانی اولیه (۰/۰۰۳، ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۹، ۰/۰۱۲، ۰/۰۱۵) بعد از تزریق ذره بررسی می شود. چون از سرعت محلی سیال استفاده نمی شود و در گام های اولیه تزریق، موقعیت ذره، نزدیک به ورودی جریان است، لذا سرعت جریان در این منطقه به سرعت ورودی جریان نزدیک تر است و خطای محاسبه ضریب درگ در روش تحلیلی کمتر می شود. در زیر تصویر آن قابل مشاهده است:



شکل (۴-۱) تزریق ذره به جریان در لحظه ۳۰۰۰/۰۰۳ و سرعت اولیه صفر

توجه شود که در هر یک از این حالات باید رینولدز در محدوده جریان استوکس، یعنی $Re_p \leq 1$ قرار گیرد، به همین خاطر از مقادیر زیر استفاده شده است. به عنوان مثال اگر قطر ذره یک میلی متر در نظر گرفته شود برای برقراری شرط جریان استوکس باید سرعت جریان در محدوده کمتر از 0.1 m/s باشد.

برای این کار حالت‌های مختلفی در نظر گرفته شد، چون هم بتوان تاثیر پارامترهای مختلف همچون سرعت جریان، قطر و چگالی ذره را مشاهده نمود و هم در حالت‌های مختلف ضریب درگ محاسبه شده از هر دو روش مقایسه شوند.

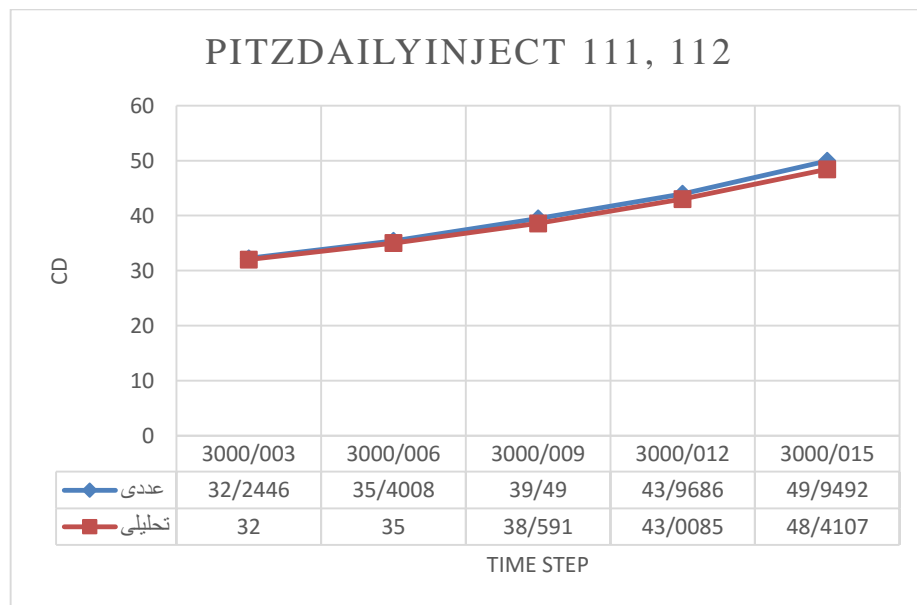
دو سرعت جریان مختلف ($U_1 = 0.15 \text{ m/s}$ و $U_2 = 0.2 \text{ m/s}$)، سه قطر مختلف برای ذره ($d_1 = 5e-6 \text{ m}$ ، $d_2 = 4e-6 \text{ m}$ ، $d_3 = 3e-6 \text{ m}$) و دو چگالی مختلف ذره ($\rho_1 = 1000 \text{ kg/m}^3$ و $\rho_2 = 2700 \text{ kg/m}^3$) که هر کدام از این حالت‌ها با یک عدد سه رقمی مشخص می‌شود، مثلاً برای سرعت جریان $U_1 = 0.15 \text{ m/s}$ و قطر ذره $d_1 = 5e-6 \text{ m}$ و چگالی $\rho_1 = 1000 \text{ kg/m}^3$ به صورت `pitzDailyInject` نامگذاری می‌شود. 111

برای حل عددی سرعت جریان ورودی با توجه به حالت‌های مختلف مشخص می‌شود، سیال حامل آب در نظر گرفته شد و ویسکوزیته سیال برابر $\nu = 1e-6$ است. بر روی دیواره‌ها شرط عدم لغزش برقرار است. حل ابتدا با استفاده از حلگر `simpleFoam` برای 3000 گام زمانی ($\Delta t = 1$) انجام می‌شود

تا اطمینان حاصل شود که سیال به حالت پایا می رسد، سپس از گام ۳۰۰۰ تا ۳۰۰۰/۳ ($\Delta t = 0/003$) با حلگر injectorSolidParticle حل می شود. ذره در گام زمانی ۳۰۰۰ تا ۳۰۰۰/۰۰۳ با سرعت اولیه صفر در جریان تزریق می شود.

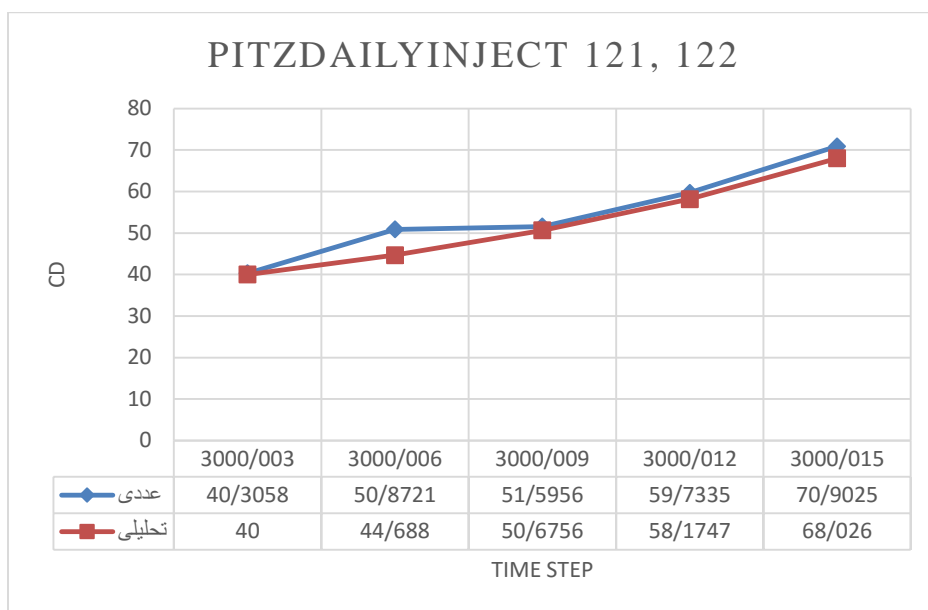
همچنین در محاسبات همانطوری که پیش بینی می شد (چون چگالی ذره در فرمول های محاسبه ضریب درگ نقشی ندارد)، مشاهده شد که تغییر چگالی ذره تاثیری در ضریب درگ ندارد، لذا در نمودارها هر دو حالت با چگالی مختلف در یک نمودار به نمایش در آمده اند.

شکل (۲-۴)، ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی با سرعت جریان ورودی m/s $U_1 = 0/15$ ، قطر ذره $d_1 = 5e-6 m$ و چگالی های $\rho_1 = 1000 kg/m^3$ و $\rho_2 = 2700 kg/m^3$ را در پنج گام اولیه (۰/۰۰۳، ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۹، ۰/۰۱۲، ۰/۰۱۵) نشان می دهد. در شکل های زیر محور افقی گام زمانی و محور عمودی ضریب درگ ذره را نشان می دهد.



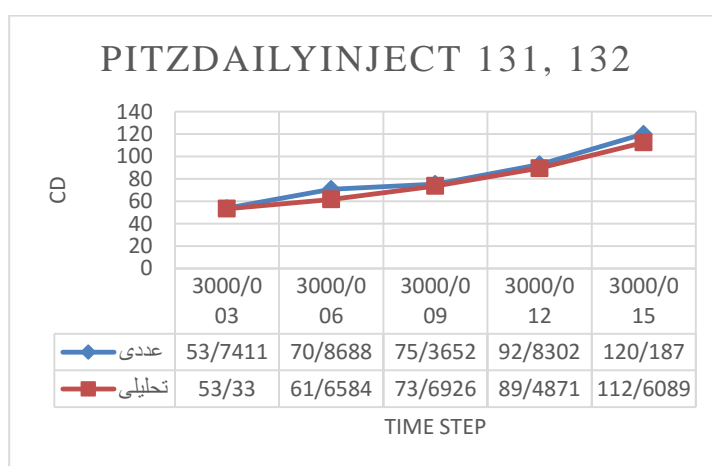
شکل (۲-۴) ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی

شکل (۳-۴)، ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی با سرعت جریان ورودی m/s $U_1 = 0/15$ ، قطر ذره $d_2 = 4e-6 m$ و چگالی های $\rho_1 = 1000 kg/m^3$ و $\rho_2 = 2700 kg/m^3$ را در پنج گام اولیه (۰/۰۰۳، ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۹، ۰/۰۱۲، ۰/۰۱۵) نشان می دهد.



شکل (۳-۴) ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی

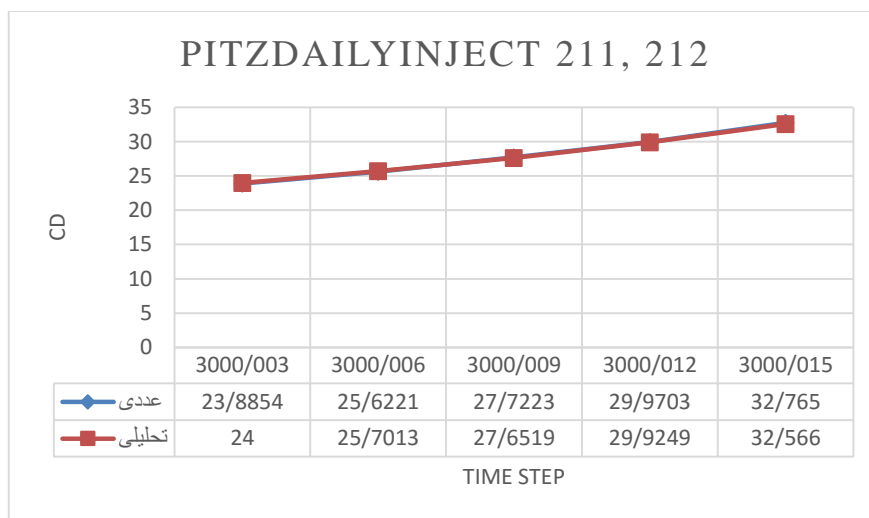
شکل (۴-۴)، ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی با سرعت جریان ورودی m/s $U_1 = 0.15$ ، قطر ذره $d_3 = 3e-6 m$ و چگالی های $\rho_1 = 1000 kg/m^3$ و $\rho_2 = 2700 kg/m^3$ را در پنج گام اولیه (۰/۰۰۳، ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۹، ۰/۰۱۲، ۰/۰۱۵) نشان می دهد.



شکل (۴-۴) ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی

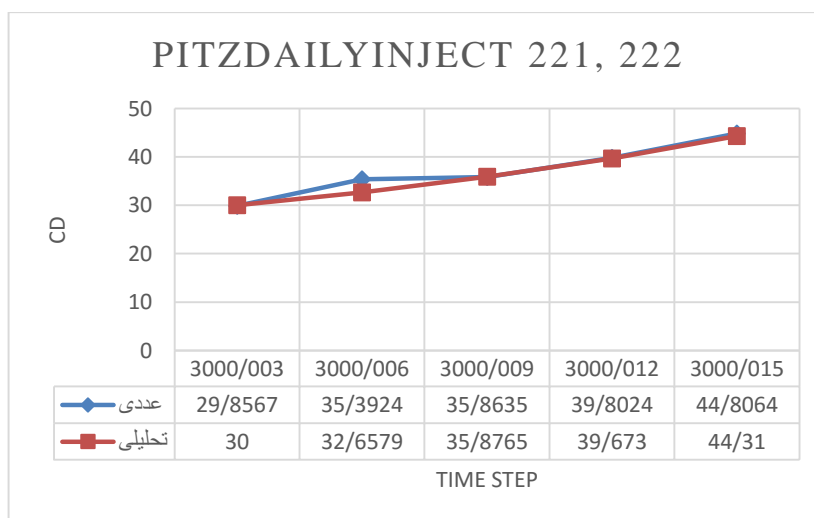
شکل (۵-۴)، ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی با سرعت جریان ورودی m/s

$U_2 = 0.2$ ، قطر ذره $d_1 = 5e-6$ m و چگالی های $\rho_1 = 1000 \text{ kg/m}^3$ و $\rho_2 = 2700 \text{ kg/m}^3$ را در پنج گام اولیه (0.003، 0.006، 0.009، 0.012، 0.015) نشان می دهد.



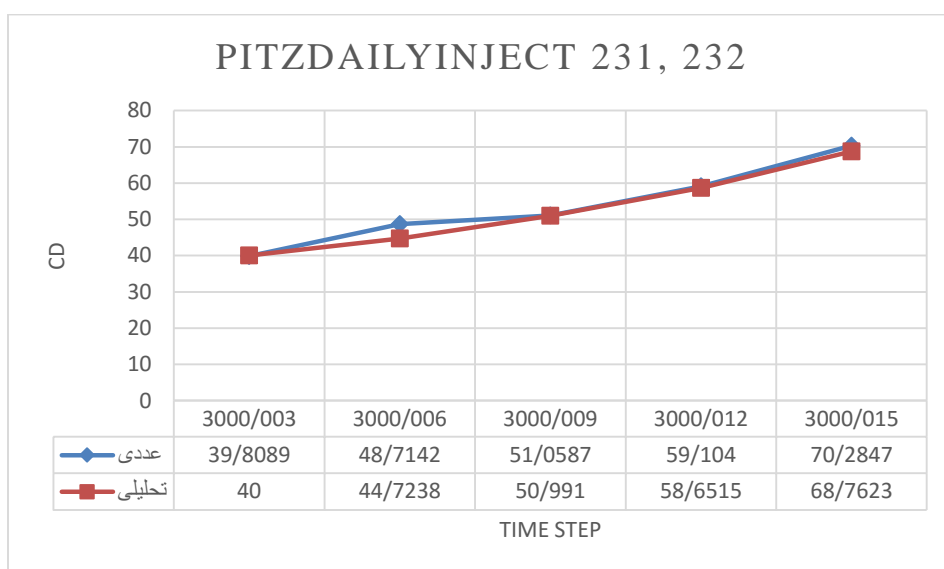
شکل (۴-۵) ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی

شکل (۴-۶)، ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی با سرعت جریان ورودی m/s $U_2 = 0.2$ ، قطر ذره $d_2 = 4e-6$ m و چگالی های $\rho_1 = 1000 \text{ kg/m}^3$ و $\rho_2 = 2700 \text{ kg/m}^3$ را در پنج گام اولیه (0.003، 0.006، 0.009، 0.012، 0.015) نشان می دهد.



شکل (۴-۶) ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی

شکل (۴-۷)، ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی با سرعت جریان ورودی m/s ، قطر ذره $d_3 = 3e-6 m$ و چگالی های $\rho_1 = 1000 kg/m^3$ و $\rho_2 = 2700 kg/m^3$ را در پنج گام اولیه (۰/۰۰۳، ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۹، ۰/۰۱۲، ۰/۰۱۵) نشان می دهد.



شکل (۴-۷) ضریب درگ به دست آمده از روش های عددی و تحلیلی

جدول (۴-۱) درصد خطا در مراحل مختلف را نشان می دهد که درصد بالای خطا در برخی از مراحل به خاطر عبور از یک سلول به سلول دیگر است که در این بین CD در دو مرحله محاسبه می شود که یک بار از سلول اول تا مرز و مرحله بعدی از مرز تا ذره در سلول دوم است، که چون در حالت عددی سرعت ذره برای محاسبه CD سرعت ذره در مرز در نظر گرفته می شود، ولی در حل تحلیلی ما همان سرعت ذره در سلول اول را در نظر می گیریم. که همین عاملی می شود تا اختلاف CD محاسبه شده از دو روش در برخی از زمان ها زیاد باشد. اگر بخواهیم از سرعت محلی سیال برای محاسبه رینولدز استفاده کنیم، باید سرعت محلی را از روش عددی و با استفاده از نرم افزار محاسبه کنیم، که در صورت انجام چنین کاری جواب های به دست آمده کاملاً مطابق با جواب های حل عددی می باشد.

برای محاسبه درصد خطا، تفاضل ضریب درگ به دست آمده از هر دو روش، بر ضریب درگ به دست آمده از روش تحلیلی، تقسیم و درصد ضرب شده است.

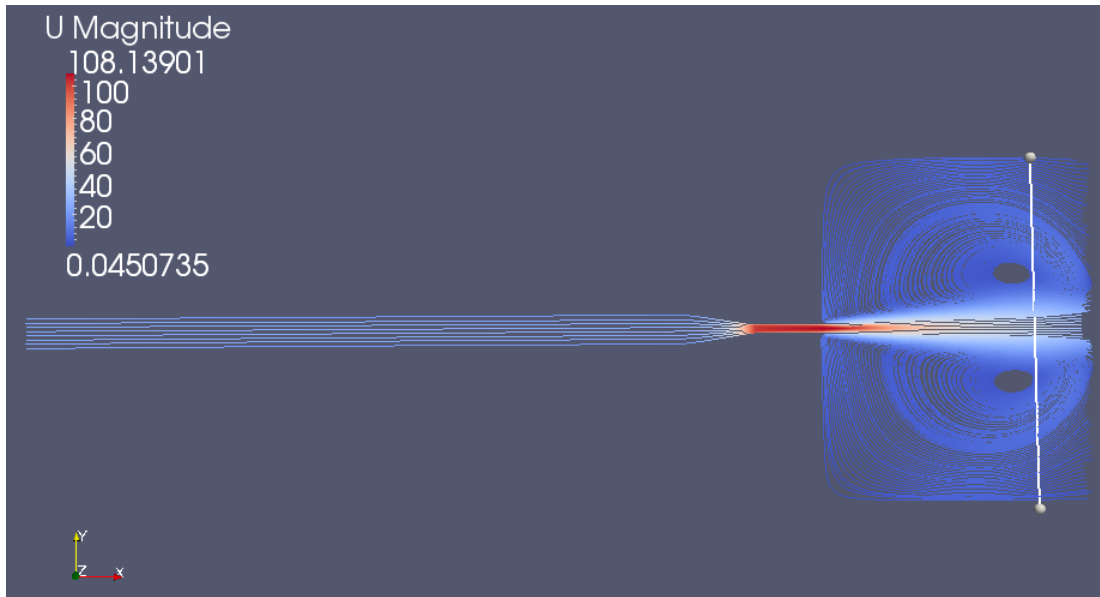
جدول (۴-۱) درصد خطا محاسبه ضریب درگ با روشهای تحلیلی و عددی در شرایط مختلف

۳۰۰۰/۰۱۵	۳۰۰۰/۰۱۲	۳۰۰۰/۰۰۹	۳۰۰۰/۰۰۶	۳۰۰۰/۰۰۳	
۳/۱۷	۲/۲۳	۲/۳۳	۱/۱۴۵	۰/۷۶۴	PDI 111,112
۴/۲۲	۲/۶۸	۱/۸۱	۱۳/۸۳	۰/۷۶۴	PDI 121,122
۶/۷۲	۳/۷۳	۲/۲۶	۱۴/۹۳	۰/۷۷	PDI 131,132
۰/۶۱	۰/۱۵۱	۰/۲۵۴	۰/۳۱	۰/۴۷۷	PDI 211,212
۱/۱۲	۰/۳۳	۰/۰۳۶	۸/۳۷	۰/۴۷۷	PDI 221,222
۲/۲۱	۰/۷۷	۰/۱۳	۸/۹۲	۰/۴۸	PDI 231,232

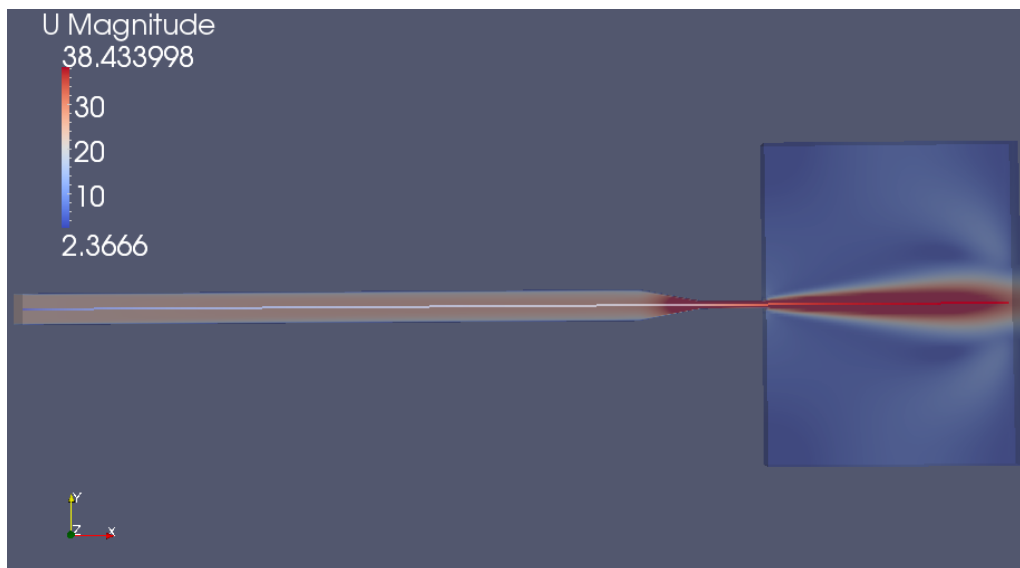
همانطور که در جدول (۴-۱) مشاهده می شود، برای یک مورد خاص با گذشت زمان، درصد خطای محاسبه ضریب درگ بیش تر می شود که علت آن تغییر سرعت و موقعیت ذره است که با جابجایی ذره، فاصله آن با ورودی بیش تر می شود، در نتیجه اختلاف سرعت محلی سیال با سرعت ورودی بیشتر می شود. در یک زمان مشخص با افزایش سرعت ورودی جریان درصد خطا کمتر می شود.

۴-۲- نتایج شبیه سازی عددی

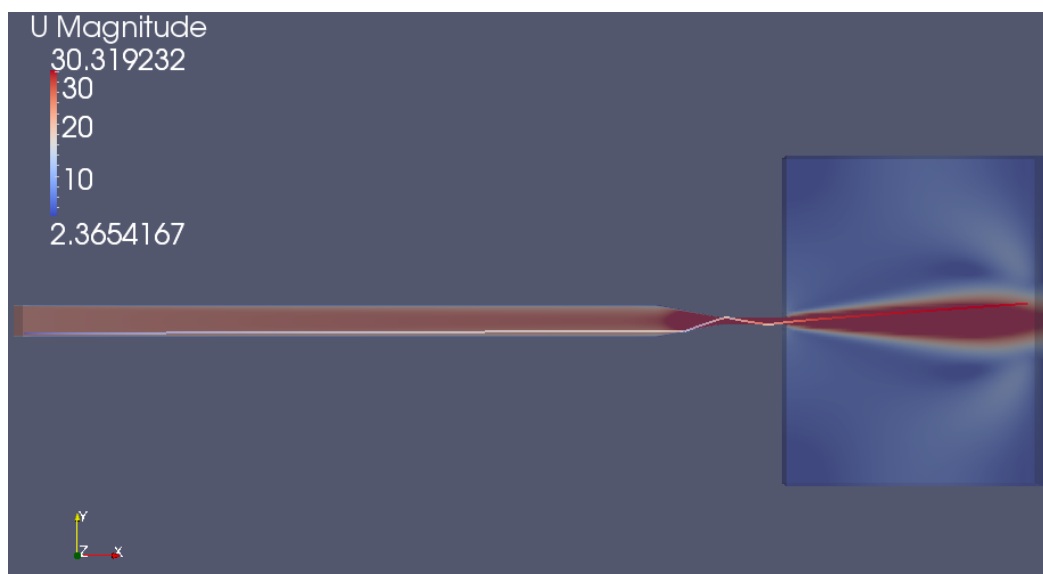
در این شبیه سازی، یک ذره در کانال در موقعیتها، قطرها و دانسیته مختلف تزریق و ردگیری شد که نتایج و اطلاعات آن در زیر آمده است. کانال دارای قطر پنج میلی متر است، که طول آن به همراه طول نازل دوازده سانتی متر می باشد. قطر نازل نیز ۱/۲ میلی متر است. در شکل های زیر می توان خط جریان سیال و خط مسیر ذره در سه موقعیت ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱۲۵ و ۰/۰۰۲۵ را مشاهده کرد.



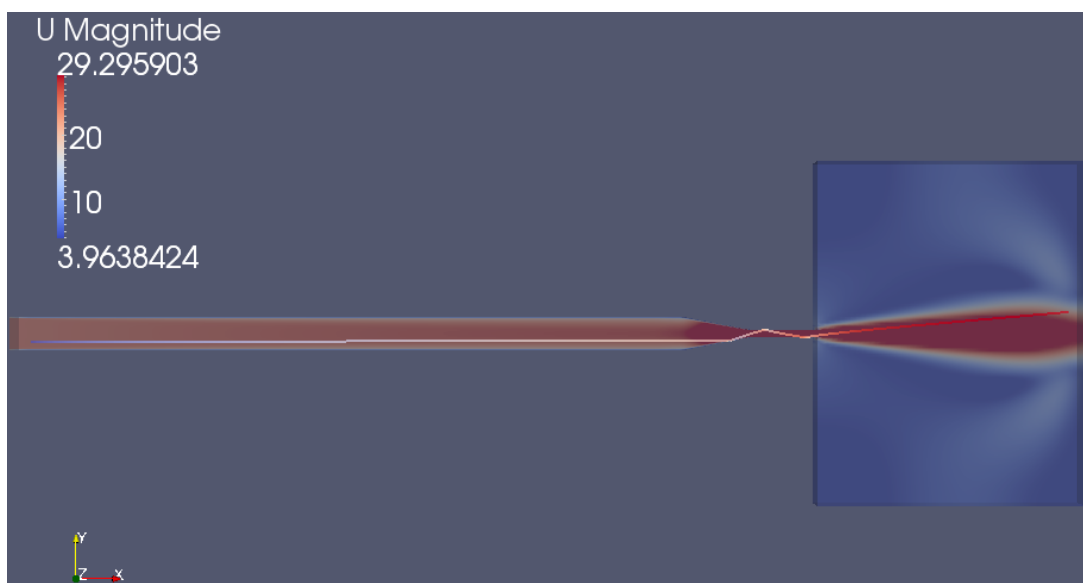
شکل (۴-۸) خط جریان سیال



شکل (۴-۹) خط مسیر ذره از موقعیت اولیه تزریق ۰/۰۰۲۵



شکل (۴-۱۰) خط مسیر ذره از موقعیت اولیه تزریق ۰/۰۰۰۵



شکل (۴-۱۱) خط مسیر ذره از موقعیت اولیه تزریق ۰/۰۰۱۲۵

در این شبیه سازی از دو نوع مختلف ذره (آلومینا و سیلیکون کارباید) با سه قطر مختلف (۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ میکرومتر) در پنج موقعیت عرضی مختلف (۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱۲۵، ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۳۷۵، ۰/۰۰۴۵) استفاده شد.

ذره‌های آلومینا و سیلیکون کارباید جزو پر استفاده‌ترین ذرات در سندبلاست دندانپزشکی است، قطرهای مختلف استفاده شده نیز به همین ترتیب جزو بازه‌های مختلف قطر استفاده شده در بیشتر تحقیقات و کارهای دندانپزشکی است که بازه‌ای از ۳۰ تا ۲۵۰ میکرومتر را شامل می‌شود. در جداول، x فاصله از انتهای نازل، U_x سرعت ذره در راستای x و K انرژی جنبشی ذره می‌باشد. در شکل‌ها محور افقی فاصله از نازل و محور عمودی در نمودار سرعت نشان دهنده سرعت در راستای x ذره و در نمودار انرژی جنبشی نشان دهنده انرژی جنبشی ذره است. جدول‌های (۲-۴) تا (۶-۴) اطلاعات مربوط به سرعت و انرژی جنبشی در موقعیت‌های مختلف تزریق ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر را نشان می‌دهد.

جدول (۲-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق ۰/۰۰۰۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۵/۹۶۵	۲۴/۹۱	۰/۵۲
۶/۳۱۴	۲۵/۴۴	۰/۶۴۶
۶/۴۷۵	۲۵/۸۴	۰/۷۷۳
۶/۶۱۸	۲۶/۰۷	۰/۹۰۳
۶/۶۹۰	۲۶/۲۹	۱/۰۳۴
۶/۷۹۳	۲۶/۴۴	۱/۱۶۵
۶/۸۹۸	۲۶/۶۰	۱/۲۹۸
۶/۹۷۰	۲۶/۷۶	۱/۴۳۱
۷/۰۱۹	۲۶/۸۵	۱/۵۶۵
۷/۰۸۰	۲۶/۹۵	۱/۶۹۹
۷/۱۱۰	۲۷/۰۳	۱/۸۳۴
۷/۱۶۵	۲۷/۱۲	۱/۹۷۰

جدول (۳-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق ۰/۰۰۱۲۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۵/۸۸۱	۲۴/۶۴	۰/۶۱۳
۶/۱۱۵	۲۵/۰۲	۰/۷۳۷
۶/۱۸۵	۲۵/۲۴	۰/۸۶۲
۶/۳۴	۲۵/۴۹	۰/۹۸۹
۶/۳۸۹	۲۵/۶۴	۱/۱۱۷
۶/۵۱۷	۲۵/۸۱	۱/۲۴۵
۶/۵۵۹	۲۵/۹۰	۱/۳۷۴
۶/۵۸۹	۲۵/۹۹	۱/۵۰۴
۶/۶۴۸	۲۶/۰۸	۱/۶۳۴
۶/۶۹۴	۲۶/۱۶	۱/۷۶۴
۶/۷۰۷	۲۶/۲۰	۱/۸۹۵

جدول (۴-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق ۰/۰۰۲۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۹/۹۸۵	۳۲/۱۷۵	۰/۵۷۷
۱۰/۴۱۳	۳۲/۸۴۶	۰/۷۳۹
۱۰/۷۶۲	۳۳/۳۹۲	۰/۹۰۴
۱۱/۰۴۸	۳۳/۸۳۷	۱/۰۷۲
۱۱/۲۸۵	۳۴/۲۰۲	۱/۲۴۱
۱۱/۴۸۲	۳۴/۵۰۳	۱/۴۱۳
۱۱/۶۴۸	۳۴/۷۵۳	۱/۵۸۶
۱۱/۷۸۸	۳۴/۹۶۲	۱/۷۶۰
۱۱/۹۶۰	۳۵/۱۳۸	۱/۹۳۵

جدول (۴-۵) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق

۰/۰۰۳۷۵

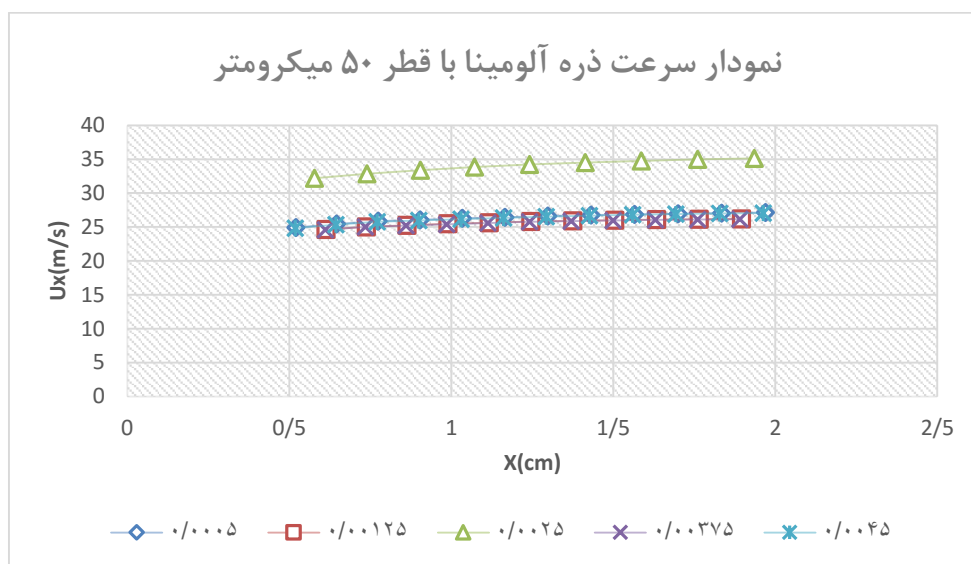
$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۵/۸۷۴	۲۴/۶۰۶	۰/۶۱۰
۶/۱۰۵	۲۴/۹۹۵	۰/۷۳۴
۶/۱۷۱	۲۵/۲۰۸	۰/۸۵۹
۶/۲۹۸	۲۵/۳۹۷	۰/۹۸۶
۶/۳۵۸	۲۵/۵۷۲	۱/۱۱۳
۶/۴۹۰	۲۵/۷۴۸	۱/۲۴۱
۶/۵۳۹	۲۵/۸۵۳	۱/۳۷
۶/۵۷۸	۲۵/۹۶۶	۱/۴۹۹
۶/۶۲۶	۲۶/۰۳۷	۱/۶۲۹
۶/۶۶۷	۲۶/۱۰۹	۱/۷۶۰
۶/۶۸۵	۲۶/۱۵۸	۱/۸۹۰

جدول (۴-۶) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق

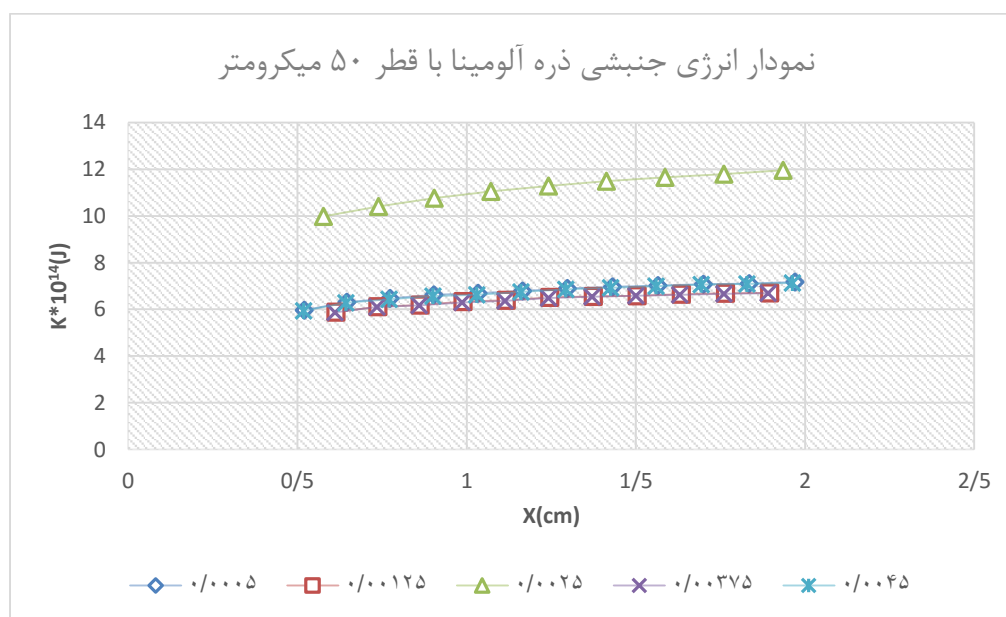
۰/۰۰۴۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۵/۹۳۷	۲۴/۸۳۷	۰/۵۱۸
۶/۲۸۲	۲۵/۳۶۵	۰/۶۴۳
۶/۴۲۶	۲۵/۷۵۷	۰/۷۷۰
۶/۵۶۳	۲۵/۹۵۸	۰/۸۹۹
۶/۶۲۳	۲۶/۱۵۰	۱/۰۲۹
۶/۷۴۳	۲۶/۳۳۶	۱/۱۶۱
۶/۸۵۹	۲۶/۵۲۰	۱/۲۹۳
۶/۹۲۶	۲۶/۶۷۸	۱/۴۲۵
۶/۹۸۶	۲۶/۷۸۵	۱/۵۵۹
۷/۰۶۴	۲۶/۹۱۳	۱/۶۹۳
۷/۰۸۶	۲۶/۹۸۴	۱/۸۲۸
۷/۱۳۶	۲۷/۰۶۴	۱/۹۶۳

شکل (۱۲-۴) و (۱۳-۴) نمودار سرعت و انرژی جنبشی ذره در راستای x مربوط به ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر و در موقعیت‌های متفاوت عمودی ورودی (به ترتیب ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱۲۵، ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۳۷۵، ۰/۰۰۴۵) است.



شکل (۱۲-۴) سرعت ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر



شکل (۱۳-۴) انرژی جنبشی ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر

جدول‌های (۷-۴) تا (۱۱-۴) اطلاعات مربوط به سرعت و انرژی جنبشی در موقعیت‌های مختلف تزریق ذره آلومینا با قطر ۱۰۰ میکرومتر را نشان می‌دهد.

جدول (۷-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق ۰/۰۰۰۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۵۷۵	۱۶/۲۵۲	۰/۵۳۷
۲/۶۰۱	۱۶/۳۶۰	۰/۶۱۹
۲/۶۳۷	۱۶/۴۶۶	۰/۷۰۱
۲/۶۷۱	۱۶/۵۶۹	۰/۷۸۳
۲/۶۹۸	۱۶/۶۵۱	۰/۸۶۶
۲/۷۲۵	۱۶/۷۲۸	۰/۹۴۹
۲/۷۴۷	۱۶/۷۹۲	۱/۰۳۳
۲/۷۶۷	۱۶/۸۵۱	۱/۱۱۷
۲/۸۰۲	۱۶/۹۰۷	۱/۲۰۱
۲/۸۲۱	۱۶/۹۶۵	۱/۲۸۶
۲/۸۴۰	۱۷/۰۲۵	۱/۳۷۱
۲/۸۵۱	۱۷/۰۶۳	۱/۴۵۶
۲/۸۶۱	۱۷/۰۹۴	۱/۵۴۱
۲/۸۷۱	۱۷/۱۲۶	۱/۶۲۷
۲/۸۸۲	۱۷/۱۵۹	۱/۷۱۲
۲/۸۹۲	۱۷/۱۹۳	۱/۷۹۸
۲/۹۰۳	۱۷/۲۲۵	۱/۸۸۴
۲/۹۱۰	۱۷/۲۴۸	۱/۹۷۰

جدول (۴-۸) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق
۰/۰۰۱۲۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۴۷۲	۱۵/۸۷۱	۰/۵۳۳
۲/۴۹۳	۱۵/۹۷۹	۰/۶۱۲
۲/۵۳۰	۱۶/۰۸۸	۰/۶۹۲
۲/۵۵۷	۱۶/۱۶۸	۰/۷۷۳
۲/۵۸۴	۱۶/۲۴۸	۰/۸۵۴
۲/۶۱۶	۱۶/۳۲۸	۰/۹۳۵
۲/۶۳۰	۱۶/۳۸۲	۱/۰۱۷
۲/۶۴۷	۱۶/۴۳۳	۱/۰۹۹
۲/۶۶۳	۱۶/۴۸۰	۱/۱۸۱
۲/۶۷۸	۱۶/۵۲۵	۱/۲۶۳
۲/۶۹۴	۱۶/۵۶۶	۱/۳۴۶
۲/۷۰۲	۱۶/۵۹۷	۱/۴۲۹
۲/۷۱۲	۱۶/۶۲۶	۱/۵۱۲
۲/۷۲۱	۱۶/۶۵۳	۱/۵۹۵
۲/۷۲۹	۱۶/۶۷۸	۱/۶۷۸
۲/۷۴۲	۱۶/۶۹۵	۱/۷۶۲
۲/۷۴۷	۱۶/۷۱۳	۱/۸۴۵
۲/۷۵۳	۱۶/۷۳۲	۱/۹۲۹

جدول (۴-۹) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق

۰/۰۰۲۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۴/۶۸۴	۲۱/۹۸۸	۰/۵۶۲
۴/۷۹۲	۲۲/۳۳۲	۰/۶۷۳
۴/۸۹۳	۲۲/۶۳۹	۰/۷۸۵
۵/۰۶۹	۲۲/۹۱۰	۰/۸۹۸
۵/۱۴۷	۲۳/۱۵۱	۱/۰۱۳
۵/۲۸۵	۲۳/۳۶۵	۱/۱۲۹
۵/۳۴۶	۲۳/۵۵۷	۱/۲۴۶
۵/۴۵۶	۲۳/۷۳۰	۱/۳۶۴
۵/۵۰۵	۲۳/۸۸۶	۱/۴۸۳
۵/۵۹۵	۲۴/۰۲۸	۱/۶۰۳
۵/۶۳۶	۲۴/۱۵۷	۱/۷۲۳
۵/۷۱۱	۲۴/۲۷۵	۱/۸۴۴
۵/۷۴۵	۲۴/۳۸۴	۱/۹۶۵

جدول (۴-۱۰) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق

۰/۰۰۳۷۵

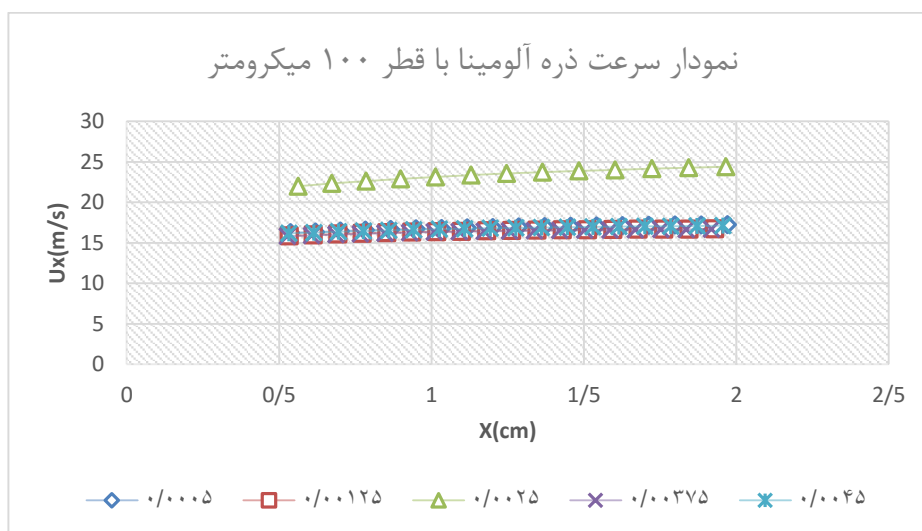
$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۴۵۴	۱۵/۸۰۸	۰/۵۲۷
۲/۴۷۵	۱۵/۹۰۹	۰/۶۰۶
۲/۵۰۷	۱۶/۰۰۷	۰/۶۸۶
۲/۵۳۸	۱۶/۰۹۹	۰/۷۶۶
۲/۵۶۷	۱۶/۱۸۷	۰/۸۴۷
۲/۵۹۹	۱۶/۲۷۱	۰/۹۲۸
۲/۶۱۴	۱۶/۳۲۷	۱/۰۰۹
۲/۶۳۳	۱۶/۳۸۵	۱/۰۹۱
۲/۶۴۷	۱۶/۴۲۵	۱/۱۷۳
۲/۶۶۱	۱۶/۴۶۷	۱/۲۵۵

۲/۶۷۷	۱۶/۵۱۰	۱/۳۳۸
۲/۶۸۵	۱۶/۵۴۱	۱/۴۲۰
۲/۶۹۵	۱۶/۵۷۱	۱/۵۰۳
۲/۷۰۳	۱۶/۵۹۵	۱/۵۸۶
۲/۷۱۱	۱۶/۶۱۹	۱/۶۶۹
۲/۷۲۰	۱۶/۶۴۲	۱/۷۵۲
۲/۷۲۵	۱۶/۶۶۱	۱/۸۳۵
۲/۷۳۱	۱۶/۶۷۹	۱/۹۱۸

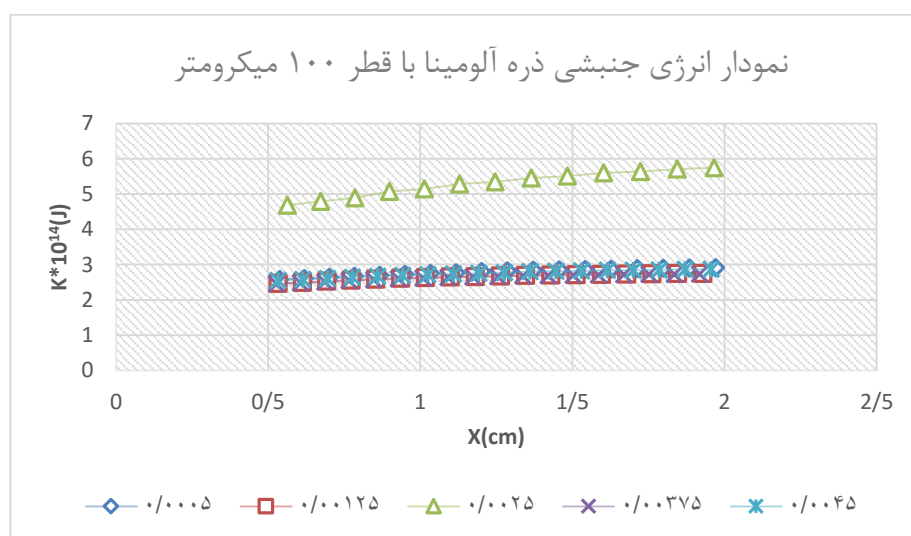
جدول (۴-۱۱) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق
۰/۰۰۴۵

K*10¹⁴(J)	Ux(m/s)	X(cm)
۲/۵۵۰	۱۶/۱۶۶	۰/۵۳۲
۲/۵۷۵	۱۶/۲۶۸	۰/۶۱۳
۲/۶۰۷	۱۶/۳۶۵	۰/۶۹۵
۲/۶۳۸	۱۶/۴۵۸	۰/۷۷۷
۲/۶۶۷	۱۶/۵۴۵	۰/۸۵۹
۲/۶۹۴	۱۶/۶۲۶	۰/۹۴۲
۲/۷۱۴	۱۶/۶۸۶	۱/۰۲۵
۲/۷۳۴	۱۶/۷۴۵	۱/۱۰۹
۲/۷۵۳	۱۶/۸۰۱	۱/۱۹۲
۲/۷۶۹	۱۶/۸۴۷	۱/۲۷۶
۲/۸۰۱	۱۶/۹۰۳	۱/۳۶۱
۲/۸۱۲	۱۶/۹۳۹	۱/۴۴۵
۲/۸۲۳	۱۶/۹۷۵	۱/۵۳۰
۲/۸۳۶	۱۷/۰۱۷	۱/۶۱۵
۲/۸۴۴	۱۷/۰۴۱	۱/۷
۲/۸۵۳	۱۷/۰۷۰	۱/۷۸۵
۲/۸۶۳	۱۷/۱۰۲	۱/۸۷۱
۲/۸۷۰	۱۷/۱۲۴	۱/۹۵۶

شکل (۴-۱۴) و (۴-۱۵) نمودار سرعت و انرژی جنبشی ذره در راستای x، مربوط به ذره آلومینا با قطر صد میکرومتر و در موقعیت‌های متفاوت عمودی ورودی (به ترتیب ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱۲۵، ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۳۷۵، ۰/۰۰۴۵) است.



شکل (۴-۱۴) سرعت ذره آلومینا با قطر ۱۰۰ میکرومتر



شکل (۴-۱۵) انرژی جنبشی ذره آلومینا با قطر ۱۰۰ میکرومتر

جدول‌های (۴-۱۲) تا (۴-۱۶) اطلاعات مربوط به سرعت و انرژی جنبشی در موقعیت‌های مختلف تزریق ذره آلومینا با قطر ۱۵۰ میکرومتر را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۱۲) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق
۰/۰۰۰۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۱/۵۱۴	۱۲/۴۳۱	۰/۵۰۸
۱/۵۵۵	۱۲/۶۱۵	۰/۶۹۵
۱/۵۷۱	۱۲/۶۶۵	۰/۷۵۸
۱/۵۹۳	۱۲/۷۳۰	۰/۸۸۵
۱/۵۹۳	۱۲/۷۶۴	۰/۹۴۹
۱/۶۱۳	۱۲/۸۲۷	۱/۰۷۷
۱/۶۳۱	۱۲/۸۸۵	۱/۲۰۵
۱/۶۳۲	۱۲/۹۰۸	۱/۲۷۰
۱/۶۳۸	۱۲/۹۲۹	۱/۳۳۴
۱/۶۵۱	۱۲/۹۷۰	۱/۴۶۴
۱/۶۵۸	۱۲/۹۹۳	۱/۵۲۹
۱/۶۵۹	۱۳/۰۱۰	۱/۵۹۴
۱/۶۶۵	۱۳/۰۲۸	۱/۶۵۹
۱/۶۶۸	۱۳/۰۴۲	۱/۷۲۴
۱/۶۷۳	۱۳/۰۵۶	۱/۷۸۹
۱/۶۷۷	۱۳/۰۷۱	۱/۸۵۴
۱/۶۷۸	۱۳/۰۸۴	۱/۹۲۰
۱/۶۸۲	۱۳/۰۹۷	۱/۹۸۵

جدول (۴-۱۳) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق
۰/۰۰۱۲۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۱/۴۶۹	۱۲/۲۵۹	۰/۵۴۹
۱/۵۰۶	۱۲/۳۷۵	۰/۶۷۲
۱/۵۲۴	۱۲/۴۲۸	۰/۷۳۴
۱/۵۴۰	۱۲/۵۱۸	۰/۸۵۸
۱/۵۵۱	۱۲/۵۵۲	۰/۹۲۱
۱/۵۷۳	۱۲/۶۴۹	۱/۱۱۰
۱/۵۸۶	۱۲/۶۷۶	۱/۱۷۳
۱/۵۸۸	۱۲/۶۹۶	۱/۲۳۶
۱/۵۹۴	۱۲/۷۱۵	۱/۳
۱/۶۰۰	۱۲/۷۳۵	۱/۳۶۴
۱/۶۰۱	۱۲/۷۵۳	۱/۴۲۷
۱/۶۱۳	۱۲/۷۸۹	۱/۵۵۵
۱/۶۱۶	۱۲/۸۰۱	۱/۶۱۹
۱/۶۲۰	۱۲/۸۱۳	۱/۶۸۳
۱/۶۲۰	۱۲/۸۲۶	۱/۷۴۷
۱/۶۲۴	۱۲/۸۳۸	۱/۸۱۱
۱/۶۲۸	۱۲/۸۵۱	۱/۸۷۵
۱/۶۳۱	۱۲/۸۶۱	۱/۹۴۰

جدول (۴-۱۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق
۰/۰۰۲۵

K*10¹⁴(J)	Ux(m/s)	X(cm)
۲/۹۴۴	۱۷/۴۶۰	۰/۵۷۲
۳/۰۱۴	۱۷/۶۸۰	۰/۶۵۹
۳/۰۷۸	۱۷/۸۸۲	۰/۷۴۸
۳/۱۳۸	۱۸/۰۶۷	۰/۸۳۷
۳/۱۹۳	۱۸/۲۳۶	۰/۹۲۸
۳/۲۹۱	۱۸/۵۳۳	۱/۱۱۱
۳/۳۷۵	۱۸/۶۶۳	۱/۲۰۴
۳/۴۱۲	۱۸/۷۸۴	۱/۲۹۸
۳/۴۴۸	۱۸/۸۹۷	۱/۳۹۲
۳/۴۸۲	۱۹/۰۰۲	۱/۴۸۶
۳/۵۱۳	۱۹/۰۹۹	۱/۵۸۱
۳/۵۴۳	۱۹/۱۹۱	۱/۶۷۷
۳/۵۹۸	۱۹/۲۷۶	۱/۷۷۳
۳/۶۲۳	۱۹/۳۵۶	۱/۸۶۹
۳/۶۴۷	۱۹/۴۳۳	۱/۹۶۶

جدول (۴-۱۵) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق
۰/۰۰۳۷۵

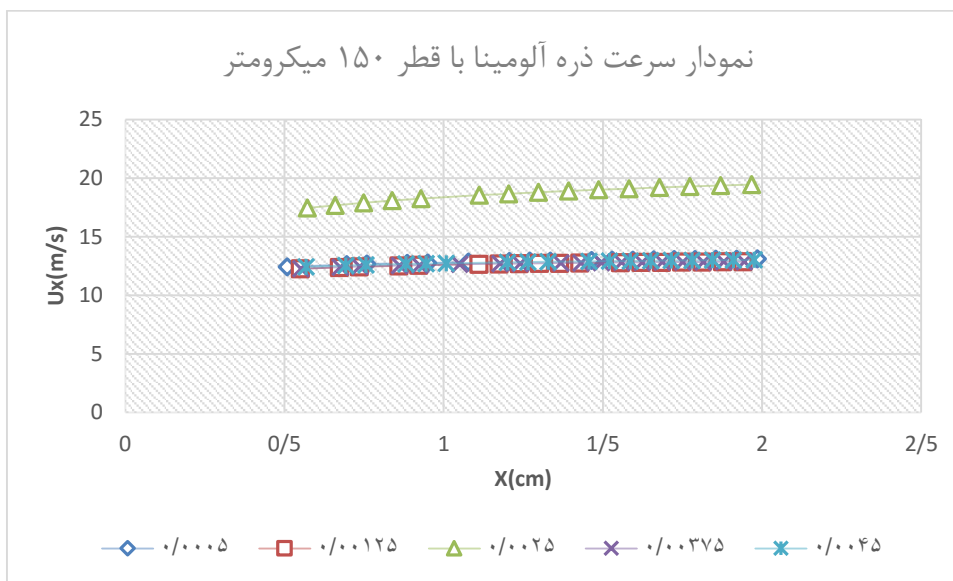
K*10¹⁴(J)	Ux(m/s)	X(cm)
۱/۴۷۰	۱۲/۲۶۲	۰/۵۵۱
۱/۵۰۸	۱۲/۳۸۵	۰/۶۷۵
۱/۵۲۸	۱۲/۴۴۷	۰/۷۳۷
۱/۵۴۴	۱۲/۵۳۶	۰/۸۶۱
۱/۵۷۶	۱۲/۶۳۹	۱/۰۵
۱/۵۹۰	۱۲/۶۹۱	۱/۱۷۷
۱/۵۹۱	۱۲/۷۱۱	۱/۲۴

۱/۶۰۳	۱۲/۷۴۵	۱/۳۶۷
۱/۶۰۳	۱۲/۷۶۳	۱/۴۳۱
۱/۶۰۸	۱۲/۷۷۹	۱/۴۹۵
۱/۶۱۵	۱۲/۷۹۷	۱/۵۵۹
۱/۶۱۸	۱۲/۸۱۰	۱/۶۲۳
۱/۶۲۳	۱۲/۸۲۶	۱/۶۸۷
۱/۶۲۳	۱۲/۸۳۸	۱/۷۵۱
۱/۶۲۶	۱۲/۸۴۹	۱/۸۱۵
۱/۶۳۰	۱۲/۸۶۰	۱/۸۷۹
۱/۶۳۴	۱۲/۸۷۴	۱/۹۴۳

جدول (۴-۱۶) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا در موقعیت تزریق
۰/۰۰۴۵

K*10¹⁴(J)	Ux(m/s)	X(cm)
۱/۵۱۹	۱۲/۴۳۰	۰/۵۶۸
۱/۵۳۶	۱۲/۵۳۳	۰/۶۹۲
۱/۵۵۲	۱۲/۵۸۶	۰/۷۵۵
۱/۵۷۶	۱۲/۶۶	۰/۸۸۱
۱/۵۷۶	۱۲/۶۹۴	۰/۹۴۵
۱/۵۸۷	۱۲/۷۲۹	۱/۰۰۸
۱/۶۱۲	۱۲/۸۱۰	۱/۱۹۹
۱/۶۱۳	۱۲/۸۳۳	۱/۲۶۴
۱/۶۲۰	۱۲/۸۵۴	۱/۳۲۸
۱/۶۳۳	۱۲/۸۹۳	۱/۴۵۶
۱/۶۳۸	۱۲/۹۱۳	۱/۵۲۱
۱/۶۳۹	۱۲/۹۲۹	۱/۵۸۵
۱/۶۴۵	۱۲/۹۴۷	۱/۶۵۰
۱/۶۵۴	۱۲/۹۷۸	۱/۷۸۰
۱/۶۵۷	۱۲/۹۸۸	۱/۸۴۵
۱/۶۵۷	۱۳/۰۰۱	۱/۹۱۰
۱/۶۶۱	۱۳/۰۱۳	۱/۹۷۵

شکل (۴-۱۶) و (۴-۱۷) نمودار سرعت و انرژی جنبشی ذره در راستای x مربوط به ذره آلومینا با قطر صد و پنجاه میکرومتر و در موقعیت‌های متفاوت عمودی ورودی (به ترتیب $0/0005$ ، $0/00125$ ، $0/0025$ ، $0/00375$ ، $0/0045$) است.



شکل (۴-۱۶) سرعت ذره آلومینا با قطر ۱۵۰ میکرومتر



شکل (۴-۱۷) انرژی جنبشی ذره آلومینا با قطر ۱۵۰ میکرومتر

جدول‌های (۴-۱۷) تا (۴-۲۱) اطلاعات مربوط به سرعت و انرژی جنبشی در موقعیت‌های مختلف تزریق ذره سیلیکون کارباید با قطر ۵۰ میکرومتر را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۱۷) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۰۵

K*10¹⁴(J)	Ux(m/s)	X(cm)
۵/۷۷۲	۲۷/۲۹۵	۰/۵۵۶
۶/۱۰۹	۲۷/۹۷۸	۰/۶۹۳
۶/۳۶۳	۲۸/۴۸۱	۰/۸۳۴
۶/۵۴۰	۲۸/۸۰۲	۰/۹۷۷
۶/۶۶۰	۲۹/۰۳۶	۱/۱۲۱
۶/۷۲۶	۲۹/۲۷۲	۱/۲۶۷
۶/۸۱۴	۲۹/۴۳۴	۱/۴۱۴
۶/۹۰۳	۲۹/۶۰۲	۱/۵۶۱
۶/۹۶۰	۲۹/۷۰۹	۱/۷۰۹
۷/۰۰۹	۲۹/۸۰۲	۱/۸۵۸

جدول (۴-۱۸) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۱۲۵

K*10¹⁴(J)	Ux(m/s)	X(cm)
۵/۷۵۱	۲۶/۹۴۹	۰/۶۲۳
۵/۹۷۰	۲۷/۵۰۷	۰/۷۵۹
۶/۱۳۰	۲۷/۸۴۷	۰/۸۹۷
۶/۱۹۳	۲۸/۰۸۵	۱/۰۳۶
۶/۳۲۷	۲۸/۳۴۳	۱/۱۷۷
۶/۴۲۰	۲۸/۵۱۵	۱/۳۱۹
۶/۴۹۴	۲۸/۶۵۷	۱/۴۶۲
۶/۵۴۴	۲۸/۷۵۲	۱/۶۰۶
۶/۵۶۸	۲۸/۸۴۵	۱/۷۴۹
۶/۶۱۶	۲۸/۹۳۵	۱/۸۹۴

جدول (۴-۱۹) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۲۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۹/۶۴۲	۳۵/۱۰۶	۰/۶۵۵
۱۰/۰۰۰	۳۵/۷۹۷	۰/۸۳۱
۱۰/۲۹۲	۳۶/۳۴۳	۱/۰۱۱
۱۰/۵۲۸	۳۶/۷۷۶	۱/۱۹۴
۱۰/۸۰۳	۳۷/۱۲۰	۱/۳۷۸
۱۰/۹۴۹	۳۷/۳۹۹	۱/۵۶۴
۱۱/۰۷۱	۳۷/۶۲۵	۱/۷۵۲
۱۱/۲۱۷	۳۷/۸۱	۱/۹۴

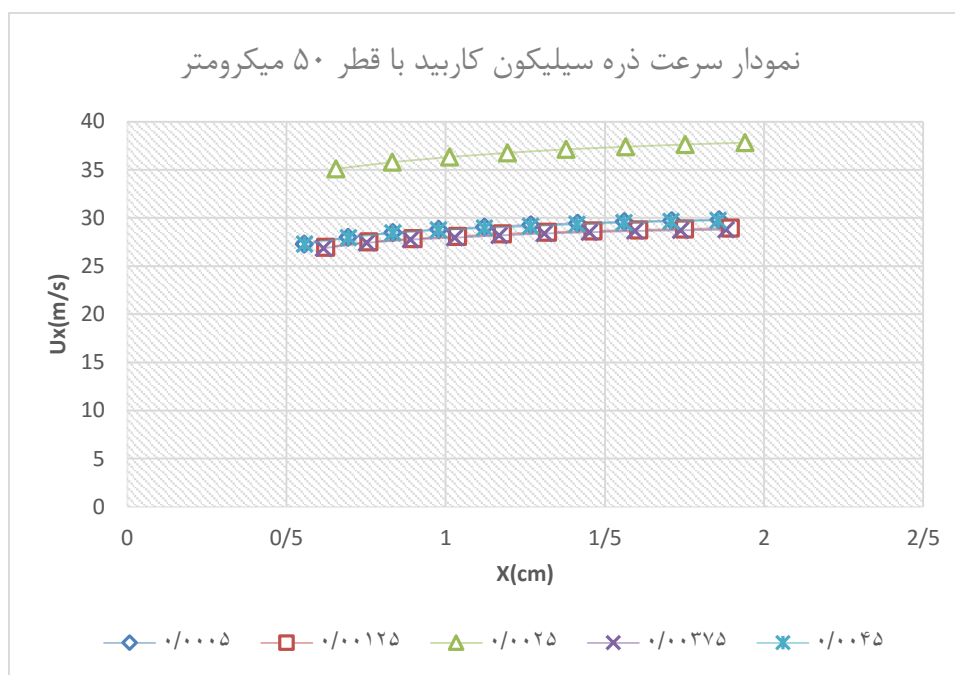
جدول (۴-۲۰) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۳۷۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۵/۷۱۶	۲۶/۸۴۹	۰/۶۱۵
۵/۹۳۴	۲۷/۴۱۲	۰/۷۵۱
۵/۹۳۴	۲۷/۷۴۶	۰/۸۸۹
۶/۰۹۳	۲۷/۹۶۶	۱/۰۲۸
۶/۱۴۶	۲۸/۱۷۴	۱/۱۶۸
۶/۲۵۷	۲۸/۳۷۳	۱/۳۰۹
۶/۳۶۱	۲۸/۵۲۲	۱/۴۵۱
۶/۴۶۸	۲۸/۶۳۴	۱/۵۹۴
۶/۵۰۸	۲۸/۷۰۵	۱/۷۳۷
۶/۵۴۹	۲۸/۷۸۲	۱/۸۸۱

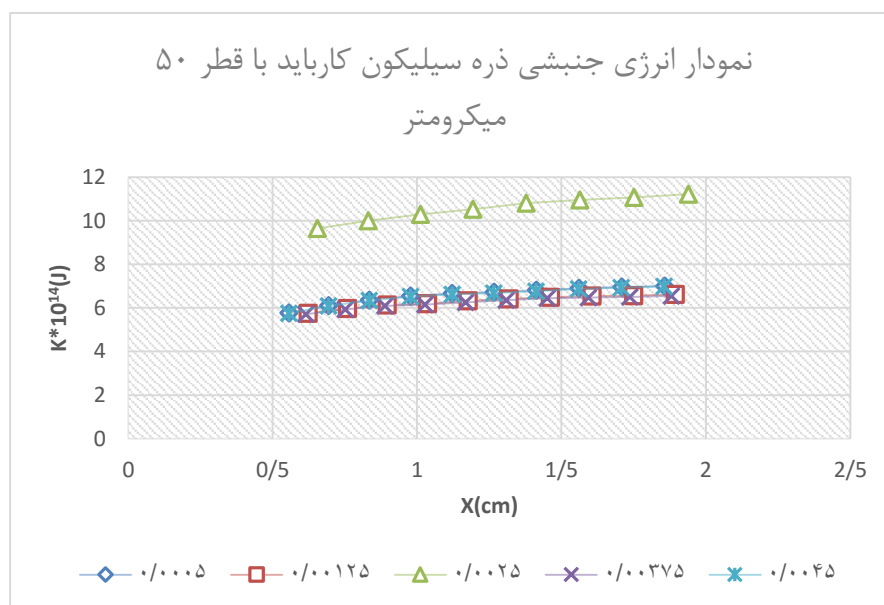
جدول (۴-۲۱) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۴۵

$K*10^{14}(J)$	$Ux(m/s)$	$X(cm)$
۵/۷۵۶	۲۷/۲۷۲	۰/۵۵۶
۶/۰۹۱	۲۷/۹۴۹	۰/۶۹۴
۶/۳۴۸	۲۸/۴۴۷	۰/۸۳۴
۶/۵۲۲	۲۸/۷۶۱	۰/۹۷۷
۶/۶۲۵	۲۸/۹۵۷	۱/۱۲۱
۶/۶۷۴	۲۹/۱۵۷	۱/۲۶۶
۶/۷۷۴	۲۹/۳۴۵	۱/۴۱۲
۶/۸۶۷	۲۹/۵۲۳	۱/۵۵۹
۶/۹۲۶	۲۹/۶۳۳	۱/۷۰۷
۶/۹۸۵	۲۹/۷۵۰	۱/۸۵۵

شکل (۴-۱۸) و (۴-۱۹) نمودار سرعت و انرژی جنبشی ذره در راستای X مربوط به ذره سیلیکون کارباید با قطر پنجاه میکرومتر و در موقعیت‌های متفاوت عمودی ورودی (به ترتیب ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱۲۵، ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۳۷۵، ۰/۰۰۴۵) است.



شکل (۴-۱۸) سرعت ذره سیلیکون کارباید با قطر ۵۰ میکرومتر



شکل (۴-۱۹) انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید با قطر ۵۰ میکرومتر

جدول‌های (۴-۲۲) تا (۴-۲۶) اطلاعات مربوط به سرعت و انرژی جنبشی در موقعیت‌های مختلف تزریق ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۰۰ میکرومتر را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۲۲) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۰۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۵۳۴	۱۷/۹۴۴	۰/۵۴۷
۲/۶۳۷	۱۸/۲۳۶	۰/۷۲۷
۲/۶۵۶	۱۸/۳۱۵	۰/۸۱۹
۲/۶۸۰	۱۸/۴۱۰	۰/۹۱۰
۲/۷۰۷	۱۸/۵۱۱	۱/۰۰۳
۲/۷۳۴	۱۸/۶۱۱	۱/۰۹۵
۲/۷۵۳	۱۸/۶۷۹	۱/۱۸۸
۲/۸۰۴	۱۸/۸۱	۱/۳۷۶
۲/۸۲۱	۱۸/۸۷۵	۱/۴۷۰
۲/۸۳۹	۱۸/۹۳۶	۱/۵۶۴
۲/۸۴۸	۱۸/۹۷۵	۱/۶۵۹
۲/۸۵۸	۱۹/۰۱۴	۱/۷۵۴
۲/۸۷۸	۱۹/۰۵۳	۱/۸۴۹
۲/۸۸۸	۱۹/۰۹۳	۱/۹۴۴

جدول (۴-۲۳) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۱۲۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۴۵۵	۱۷/۵۴۷	۰/۵۶۵
۲/۵۲۴	۱۷/۸۲۱	۰/۷۴۱
۲/۵۴۶	۱۷/۹۱۰	۰/۸۳۰
۲/۵۷۲	۱۸/۰۰۸	۰/۹۲
۲/۶۰۲	۱۸/۱۰۸	۱/۰۱۰
۲/۶۱۷	۱۸/۱۷۱	۱/۱۰۱
۲/۶۳۴	۱۸/۲۳۲	۱/۱۹۲
۲/۶۸۳	۱۸/۳۶۴	۱/۳۷۴
۲/۶۹۲	۱۸/۳۹۹	۱/۴۶۶
۲/۷۰۰	۱۸/۴۳۲	۱/۵۵۸
۲/۷۰۹	۱۸/۴۶۵	۱/۶۵۰
۲/۷۱۷	۱۸/۴۹۷	۱/۷۴۳
۲/۷۳۰	۱۸/۵۲۵	۱/۸۳۵
۲/۷۳۶	۱۸/۵۴۴	۱/۹۲۸

جدول (۴-۲۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۲۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۴/۳۸۱	۲۳/۷۰۱	۰/۵۰۰
۴/۴۹۶	۲۴/۱۳۴	۰/۶۱۹
۴/۶۹۶	۲۴/۵۱۴	۰/۷۴۱
۴/۷۸۴	۲۴/۸۴۵	۰/۸۶۴
۴/۹۳۷	۲۵/۱۳۵	۰/۹۸۸
۵/۰۰۵	۲۵/۳۸۸	۱/۱۱۴
۵/۱۲۳	۲۵/۶۱۲	۱/۲۴۱
۵/۲۲۶	۲۵/۸۱۰	۱/۳۷۰
۵/۲۷۲	۲۵/۹۸۷	۱/۴۹۹
۵/۳۵۵	۲۶/۱۴۶	۱/۶۲۹
۵/۴۲۷	۲۶/۲۸۸	۱/۷۶۰
۵/۴۶۰	۲۶/۴۱۷	۱/۸۹۲

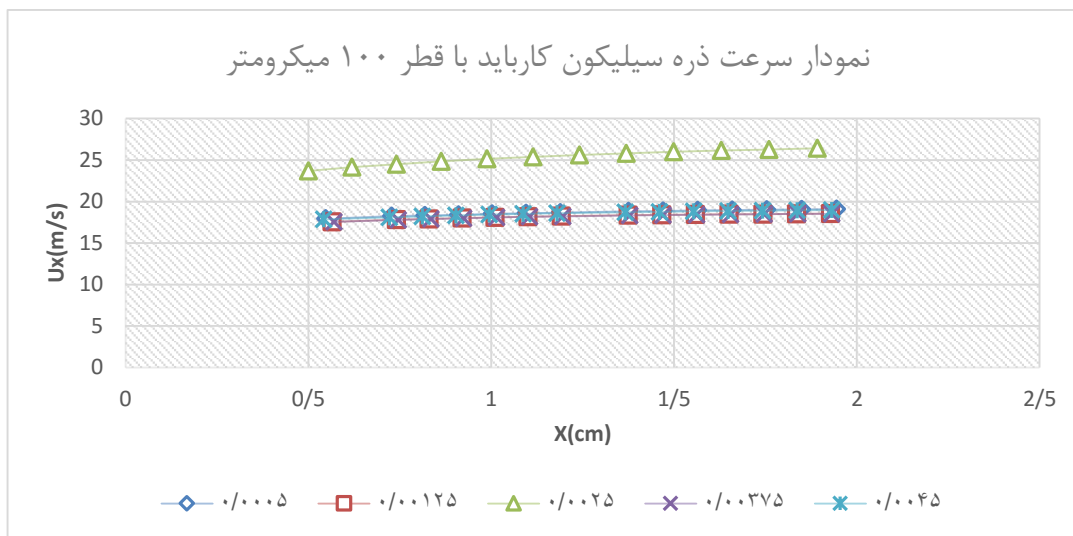
جدول (۴-۲۵) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۳۷۵

K*10¹⁴(J)	Ux(m/s)	X(cm)
۲/۴۵۵	۱۷/۵۵۱	۰/۵۷۰
۲/۵۰۹	۱۷/۷۷۶	۰/۷۴۶
۲/۵۳۹	۱۷/۸۸۹	۰/۸۳۵
۲/۵۶۷	۱۷/۹۹۵	۰/۹۲۵
۲/۵۹۸	۱۸/۰۹۳	۱/۰۱۵
۲/۶۱۳	۱۸/۱۶۰	۱/۱۰۵
۲/۶۳۱	۱۸/۲۲۴	۱/۱۹۶
۲/۶۷۴	۱۸/۳۳۴	۱/۳۷۹
۲/۶۸۳	۱۸/۳۷۰	۱/۴۷۰
۲/۶۹۳	۱۸/۴۰۹	۱/۵۶۲
۲/۷۰۴	۱۸/۴۴۸	۱/۶۵۴
۲/۷۱۱	۱۸/۴۷۵	۱/۷۴۷
۲/۷۲۳	۱۸/۵۰۱	۱/۸۳۹
۲/۷۲۹	۱۸/۵۲۳	۱/۹۳۲

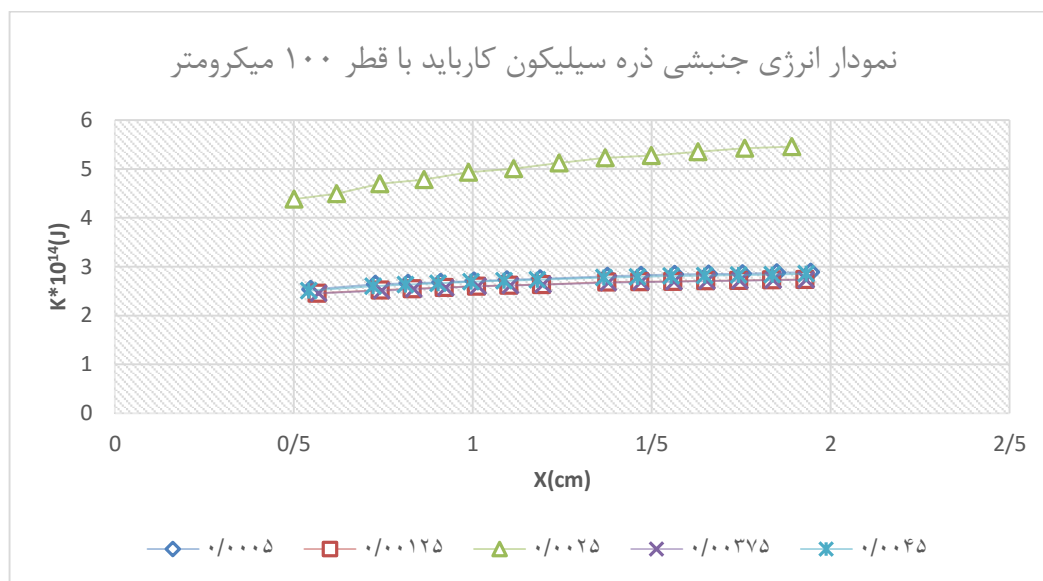
جدول (۴-۲۶) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۴۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۵۰۸	۱۷/۸۵۴	۰/۵۴۲
۲/۶۰۲	۱۸/۱۰۳	۰/۷۲۱
۲/۶۳۱	۱۸/۲۱۷	۰/۸۱۲
۲/۶۶۰	۱۸/۳۳۲	۰/۹۰۳
۲/۶۹۰	۱۸/۴۴۲	۰/۹۹۵
۲/۷۱۱	۱۸/۵۲۱	۱/۰۸۷
۲/۷۳۰	۱۸/۵۹۲	۱/۱۸
۲/۷۷۶	۱۸/۷۰۹	۱/۳۶۶
۲/۷۹۱	۱۸/۷۶۸	۱/۴۶
۲/۸۰۸	۱۸/۸۳۰	۱/۵۵۴
۲/۸۱۸	۱۸/۸۷۰	۱/۶۴۸
۲/۸۲۹	۱۸/۹۱۱	۱/۷۴۲
۲/۸۳۹	۱۸/۹۴۹	۱/۸۳۷
۲/۸۵۷	۱۸/۹۸۳	۱/۹۳۲

شکل (۴-۲۰) و (۴-۲۱) نمودار سرعت و انرژی جنبشی ذره در راستای X مربوط به ذره سیلیکون کارباید با قطر صد میکرومتر و در موقعیت‌های متفاوت عمودی ورودی (به ترتیب ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱۲۵، ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۳۷۵، ۰/۰۰۴۵) است.



شکل (۴-۲۰) سرعت ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۰۰ میکرومتر



شکل (۴-۲۱) انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۰۰ میکرومتر

جدول‌های (۴-۲۷) تا (۴-۳۱) اطلاعات مربوط به سرعت و انرژی جنبشی در موقعیت‌های مختلف تزریق ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۵۰ میکرومتر را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۲۷) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۰۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۱/۴۹۶	۱۳/۷۷۳	۰/۵۳۹
۱/۵۳۲	۱۳/۹۰۸	۰/۶۷۸
۱/۵۴۸	۱۳/۹۶۸	۰/۷۴۷
۱/۵۷۶	۱۴/۰۷۷	۰/۸۸۷
۱/۵۷۷	۱۴/۱۲۲	۰/۹۵۸
۱/۵۹۷	۱۴/۲۰۱	۱/۰۹۹
۱/۶۰۷	۱۴/۲۳۸	۱/۱۷۰
۱/۶۱۷	۱۴/۲۷۶	۱/۲۴۲
۱/۶۳۰	۱۴/۳۲۷	۱/۳۸۵
۱/۶۳۶	۱۴/۳۵۱	۱/۴۵۶
۱/۶۴۳	۱۴/۳۷۷	۱/۵۲۸
۱/۶۴۴	۱۴/۳۹۹	۱/۶
۱/۶۴۹	۱۴/۴۲۰	۱/۶۷۲
۱/۶۵۶	۱۴/۴۴۱	۱/۷۴۴
۱/۶۵۹	۱۴/۴۵۹	۱/۸۱۶
۱/۶۶۳	۱۴/۴۷۶	۱/۸۸۸
۱/۶۶۷	۱۴/۴۹۲	۱/۹۶۱

جدول (۴-۲۸) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۱۲۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۱/۴۲۷	۱۳/۴۰۵	۰/۵۱۸
۱/۴۷۴	۱۳/۵۸۸	۰/۶۵۲
۱/۴۸۹	۱۳/۶۴۵	۰/۷۲۰
۱/۵۱۳	۱۳/۷۶۴	۰/۸۵۷
۱/۵۱۷	۱۳/۸۰۷	۰/۹۲۶
۱/۵۳۸	۱۳/۸۸۶	۱/۰۶۴
۱/۵۴۹	۱۳/۹۲۸	۱/۱۳۴
۱/۵۶۰	۱۳/۹۷۴	۱/۲۰۴
۱/۵۶۷	۱۴/۰۲۷	۱/۳۴۴
۱/۵۷۳	۱۴/۰۵۰	۱/۴۱۴
۱/۵۷۹	۱۴/۰۷۲	۱/۴۸۴
۱/۵۸۴	۱۴/۰۹۵	۱/۵۵۴
۱/۵۹۱	۱۴/۱۲۰	۱/۶۲۵
۱/۵۹۴	۱۴/۱۳۳	۱/۶۹۵
۱/۵۹۸	۱۴/۱۴۸	۱/۷۶۶
۱/۵۹۸	۱۴/۱۶۲	۱/۸۳۷
۱/۶۰۱	۱۴/۱۷۵	۱/۹۰۸
۱/۶۰۵	۱۴/۱۸۹	۱/۹۷۹

جدول (۴-۲۹) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۲۵

$K*10^{14}(J)$	$Ux(m/s)$	$X(cm)$
۲/۷۷۶	۱۸/۹۳۲	۰/۵۲۲
۲/۸۴۹	۱۹/۲۰۸	۰/۶۱۷
۲/۹۱۷	۱۹/۴۵۷	۰/۷۱۳
۳/۰۳۵	۱۹/۶۸۱	۰/۸۱۰
۳/۰۸۷	۱۹/۸۱۴	۰/۹۰۹
۳/۱۳۶	۲۰/۰۷	۱/۰۰۹
۳/۱۸۱	۲۰/۲۳۸	۱/۱۰۹
۳/۲۶۰	۲۰/۳۹۱	۱/۲۱۱
۳/۲۹۶	۲۰/۵۳۱	۱/۳۱۳
۳/۳۳۰	۲۰/۶۶۱	۱/۴۱۶
۳/۳۶۲	۲۰/۷۷۹	۱/۵۱۹
۳/۴۱۹	۲۰/۸۸۹	۱/۶۲۳
۳/۴۴۶	۲۰/۹۹۱	۱/۷۲۸
۳/۴۷۱	۲۰/۰۸۶	۱/۸۳۳
۳/۵۱۶	۲۰/۱۷۵	۱/۹۳۸

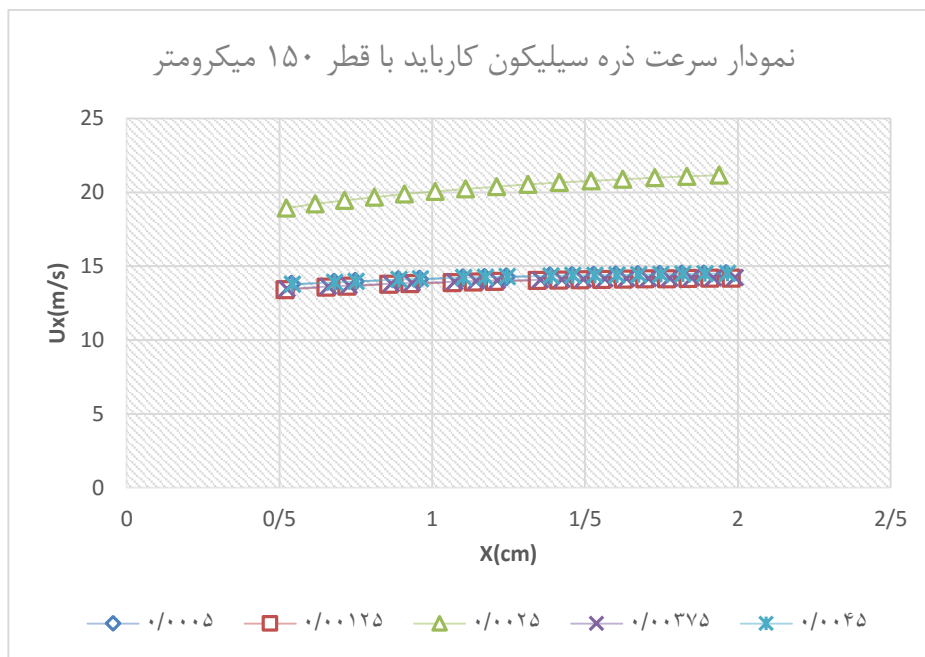
جدول (۴-۳۰) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۳۷۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۱/۴۴۱	۱۳/۴۷۴	۰/۵۲۴
۱/۴۷۹	۱۳/۶۲۲	۰/۶۶۰
۱/۴۹۹	۱۳/۶۹۷	۰/۷۲۸
۱/۵۲۳	۱۳/۸۱۲	۰/۸۶۵
۱/۵۲۷	۱۳/۸۵۷	۰/۹۳۴
۱/۵۵۲	۱۳/۹۵۲	۱/۰۷۳
۱/۵۶۰	۱۳/۹۸۴	۱/۱۴۳
۱/۵۷۰	۱۴/۰۲۵	۱/۲۱۳
۱/۵۷۷	۱۴/۰۷۵	۱/۳۵۳
۱/۵۸۳	۱۴/۰۹۸	۱/۴۲۴
۱/۵۸۸	۱۴/۱۱۷	۱/۴۹۴
۱/۵۹۳	۱۴/۱۳۷	۱/۵۶۵
۱/۵۹۹	۱۴/۱۵۹	۱/۶۳۶
۱/۶۰۳	۱۴/۱۷۴	۱/۷۰۶
۱/۶۰۷	۱۴/۱۹۲	۱/۷۷۷
۱/۶۱۰	۱۴/۲۰۳	۱/۸۴۸
۱/۶۱۰	۱۴/۲۱۶	۱/۹۱۹
۱/۶۱۳	۱۴/۲۲۸	۱/۹۹۰

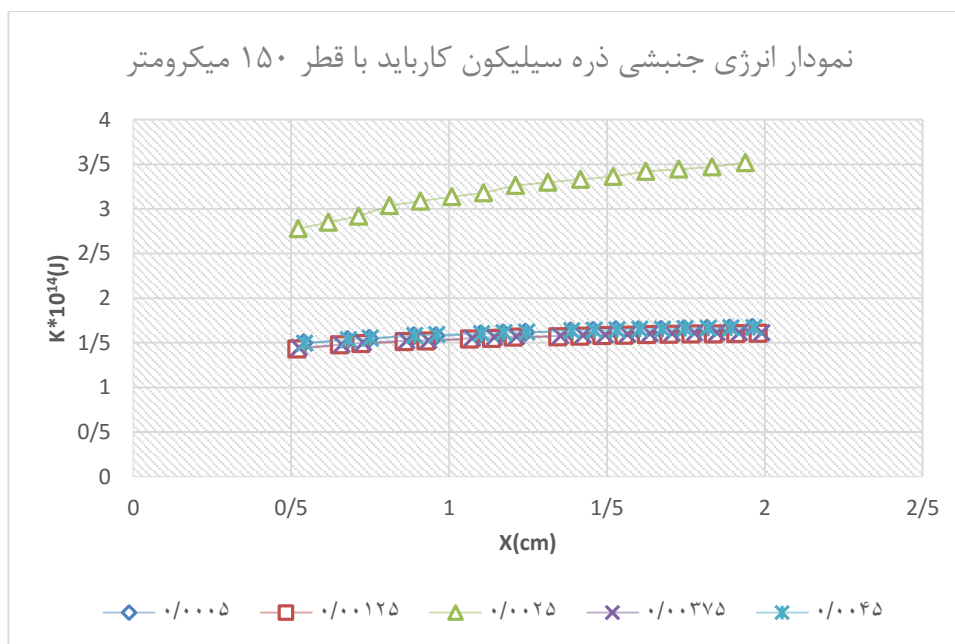
جدول (۴-۳۱) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید در موقعیت تزریق ۰/۰۰۴۵

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۱/۴۹۵	۱۳/۷۷۲	۰/۵۴۲
۱/۵۳۲	۱۳/۹۱۰	۰/۶۸۱
۱/۵۵۰	۱۳/۹۷۸	۰/۷۵۰
۱/۵۷۸	۱۴/۰۹۱	۰/۸۹۱
۱/۵۹۱	۱۴/۱۴۰	۰/۹۶۱
۱/۶۰۱	۱۴/۲۲۱	۱/۱۰۳
۱/۶۱۰	۱۴/۲۵۳	۱/۱۷۴
۱/۶۱۹	۱۴/۲۸۸	۱/۲۴۵
۱/۶۳۳	۱۴/۳۴۱	۱/۳۸۸
۱/۶۴۱	۱۴/۳۷۱	۱/۴۶۰
۱/۶۴۵	۱۴/۳۸۸	۱/۵۳۲
۱/۶۵۱	۱۴/۴۱۰	۱/۶۰۴
۱/۶۵۱	۱۴/۴۳۱	۱/۶۷۶
۱/۶۵۸	۱۴/۴۵۱	۱/۷۴۸
۱/۶۶۱	۱۴/۴۶۸	۱/۸۲۰
۱/۶۶۵	۱۴/۴۸۶	۱/۸۹۳
۱/۶۷۰	۱۴/۵۰۴	۱/۹۶۵

شکل (۴-۲۲) و (۴-۲۳) نمودار سرعت و انرژی جنبشی ذره در راستای X مربوط به ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۵۰ میکرومتر و در موقعیت‌های متفاوت عمودی ورودی (به ترتیب ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱۲۵، ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۳۷۵، ۰/۰۰۴۵) است.



شکل (۴-۲۲) سرعت ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۵۰ میکرومتر



شکل (۴-۲۳) انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۵۰ میکرومتر

جدول‌های (۴-۳۲) تا (۴-۳۴) اطلاعات تزریق ذره آلومینا در موقعیت عرضی ۰/۰۰۰۵ از ابتدای کانال با سه قطر مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومتر را نشان می‌دهند.

جدول (۴-۳۲) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۵/۹۶۵	۲۴/۹۱	۰/۵۲
۶/۳۱۴	۲۵/۴۴	۰/۶۴۶
۶/۴۷۵	۲۵/۸۴	۰/۷۷۳
۶/۶۱۸	۲۶/۰۷	۰/۹۰۳
۶/۶۹۰	۲۶/۲۹	۱/۰۳۴
۶/۷۹۳	۲۶/۴۴	۱/۱۶۵
۶/۸۹۸	۲۶/۶۰	۱/۲۹۸
۶/۹۷۰	۲۶/۷۶	۱/۴۳۱
۷/۰۱۹	۲۶/۸۵	۱/۵۶۵
۷/۰۸۰	۲۶/۹۵	۱/۶۹۹
۷/۱۱۰	۲۷/۰۳	۱/۸۳۴
۷/۱۶۵	۲۷/۱۲	۱/۹۷۰

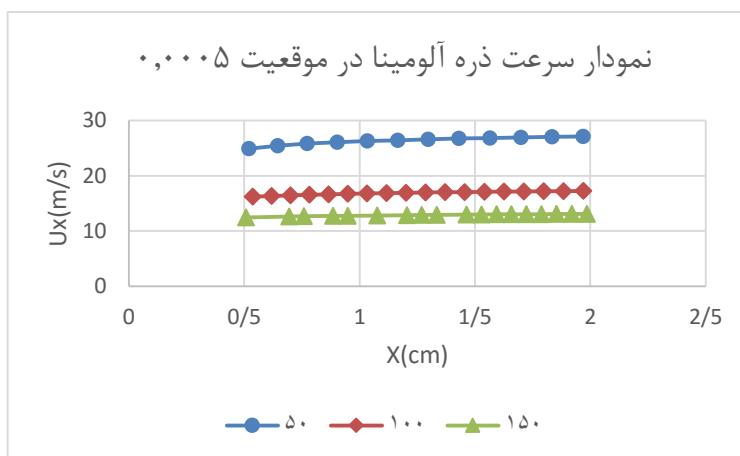
جدول (۴-۳۳) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۱۰۰ میکرومتر

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۵۷۵	۱۶/۲۵۲	۰/۵۳۷
۲/۶۰۱	۱۶/۳۶۰	۰/۶۱۹
۲/۶۳۷	۱۶/۴۶۶	۰/۷۰۱
۲/۶۷۱	۱۶/۵۶۹	۰/۷۸۳
۲/۶۹۸	۱۶/۶۵۱	۰/۸۶۶
۲/۷۲۵	۱۶/۷۲۸	۰/۹۴۹
۲/۷۴۷	۱۶/۷۹۲	۱/۰۳۳
۲/۷۶۷	۱۶/۸۵۱	۱/۱۱۷
۲/۸۰۲	۱۶/۹۰۷	۱/۲۰۱
۲/۸۲۱	۱۶/۹۶۵	۱/۲۸۶
۲/۸۴۰	۱۷/۰۲۵	۱/۳۷۱
۲/۸۵۱	۱۷/۰۶۳	۱/۴۵۶
۲/۸۶۱	۱۷/۰۹۴	۱/۵۴۱
۲/۸۷۱	۱۷/۱۲۶	۱/۶۲۷
۲/۸۸۲	۱۷/۱۵۹	۱/۷۱۲
۲/۸۹۲	۱۷/۱۹۳	۱/۷۹۸
۲/۹۰۳	۱۷/۲۲۵	۱/۸۸۴
۲/۹۱۰	۱۷/۲۴۸	۱/۹۷۰

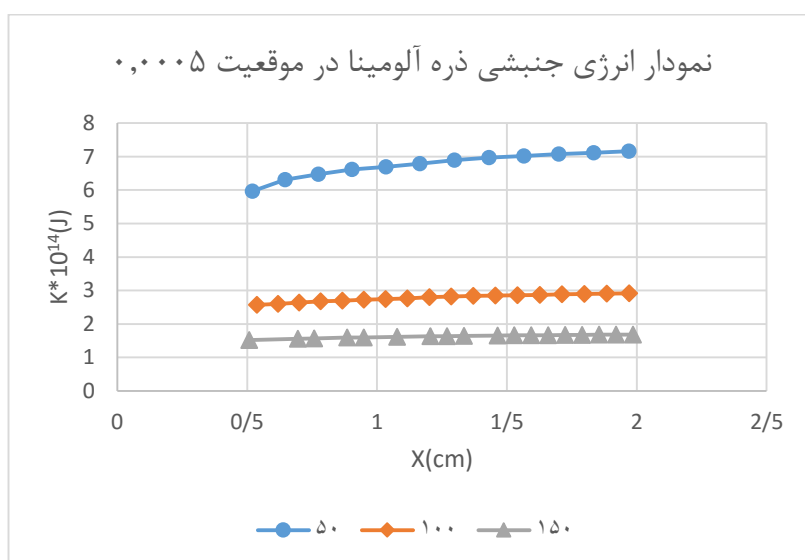
جدول (۴-۳۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۱۵۰ میکرومتر

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۱/۵۱۴	۱۲/۴۳۱	۰/۵۰۸
۱/۵۵۵	۱۲/۶۱۵	۰/۶۹۵
۱/۵۷۱	۱۲/۶۶۵	۰/۷۵۸
۱/۵۹۳	۱۲/۷۳۰	۰/۸۸۵
۱/۵۹۳	۱۲/۷۶۴	۰/۹۴۹
۱/۶۱۳	۱۲/۸۲۷	۱/۰۷۷
۱/۶۳۱	۱۲/۸۸۵	۱/۲۰۵
۱/۶۳۲	۱۲/۹۰۸	۱/۲۷۰
۱/۶۳۸	۱۲/۹۲۹	۱/۳۳۴
۱/۶۵۱	۱۲/۹۷۰	۱/۴۶۴
۱/۶۵۸	۱۲/۹۹۳	۱/۵۲۹
۱/۶۵۹	۱۳/۰۱۰	۱/۵۹۴
۱/۶۶۵	۱۳/۰۲۸	۱/۶۵۹
۱/۶۶۸	۱۳/۰۴۲	۱/۷۲۴
۱/۶۷۳	۱۳/۰۵۶	۱/۷۸۹
۱/۶۷۷	۱۳/۰۷۱	۱/۸۵۴
۱/۶۷۸	۱۳/۰۸۴	۱/۹۲۰
۱/۶۸۲	۱۳/۰۹۷	۱/۹۸۵

شکل‌های (۴-۲۴) و (۴-۲۵) نمودار سرعت و انرژی جنبشی در راستای X مربوط به ذره آلومینا در موقعیت عمودی تزریق ۰/۰۰۰۵ با قطرهای مختلف ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ میکرومتر است.



شکل (۴-۲۴) سرعت ذره آلومینا در موقعیت ۰/۰۰۰۵



شکل (۴-۲۵) انرژی جنبشی ذره آلومینا در موقعیت ۰/۰۰۰۵

جدول‌های (۴-۳۵) تا (۴-۳۷) اطلاعات تزریق ذره آلومینا در موقعیت عرضی ۰/۰۰۱۲۵ از ابتدای کانال با سه قطر مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومتر را نشان می‌دهند.

جدول (۴-۳۵) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۵/۸۸۱	۲۴/۶۴	۰/۶۱۳
۶/۱۱۵	۲۵/۰۲	۰/۷۳۷
۶/۱۸۵	۲۵/۲۴	۰/۸۶۲
۶/۳۴	۲۵/۴۹	۰/۹۸۹
۶/۳۸۹	۲۵/۶۴	۱/۱۱۷
۶/۵۱۷	۲۵/۸۱	۱/۲۴۵
۶/۵۵۹	۲۵/۹۰	۱/۳۷۴
۶/۵۸۹	۲۵/۹۹	۱/۵۰۴
۶/۶۴۸	۲۵/۰۸	۱/۶۳۴
۶/۶۹۴	۲۵/۱۶	۱/۷۶۴
۶/۷۰۷	۲۶/۲۰	۱/۸۹۵

جدول (۴-۳۶) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۱۰۰ میکرومتر

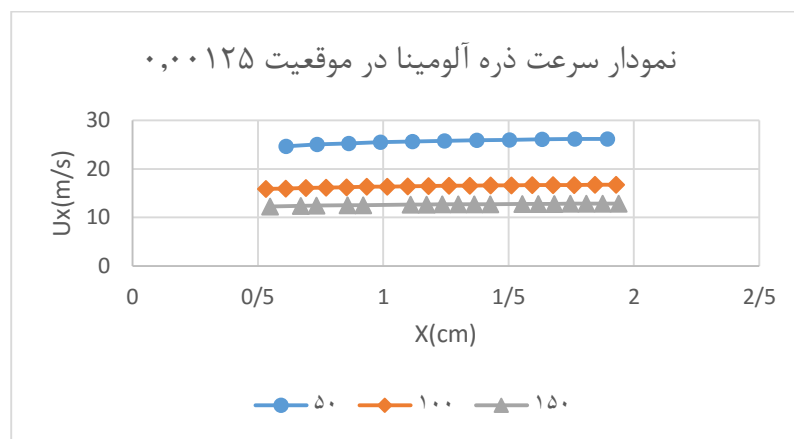
$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۴۷۲	۱۵/۸۷۱	۰/۵۳۳
۲/۴۹۳	۱۵/۹۷۹	۰/۶۱۲
۲/۵۳۰	۱۶/۰۸۸	۰/۶۹۲
۲/۵۵۷	۱۶/۱۶۸	۰/۷۷۳
۲/۵۸۴	۱۶/۲۴۸	۰/۸۵۴
۲/۶۱۶	۱۶/۳۲۸	۰/۹۳۵
۲/۶۳۰	۱۶/۳۸۲	۱/۰۱۷
۲/۶۴۷	۱۶/۴۳۳	۱/۰۹۹
۲/۶۶۳	۱۶/۴۸۰	۱/۱۸۱
۲/۶۷۸	۱۶/۵۲۵	۱/۲۶۳
۲/۶۹۴	۱۶/۵۶۶	۱/۳۴۶

۲/۷۰۲	۱۶/۵۹۷	۱/۴۲۹
۲/۷۱۲	۱۶/۶۲۶	۱/۵۱۲
۲/۷۲۱	۱۶/۶۵۳	۱/۵۹۵
۲/۷۲۹	۱۶/۶۷۸	۱/۶۷۸
۲/۷۴۲	۱۶/۶۹۵	۱/۷۶۲
۲/۷۴۷	۱۶/۷۱۳	۱/۸۴۵
۲/۷۵۳	۱۶/۷۳۲	۱/۹۲۹

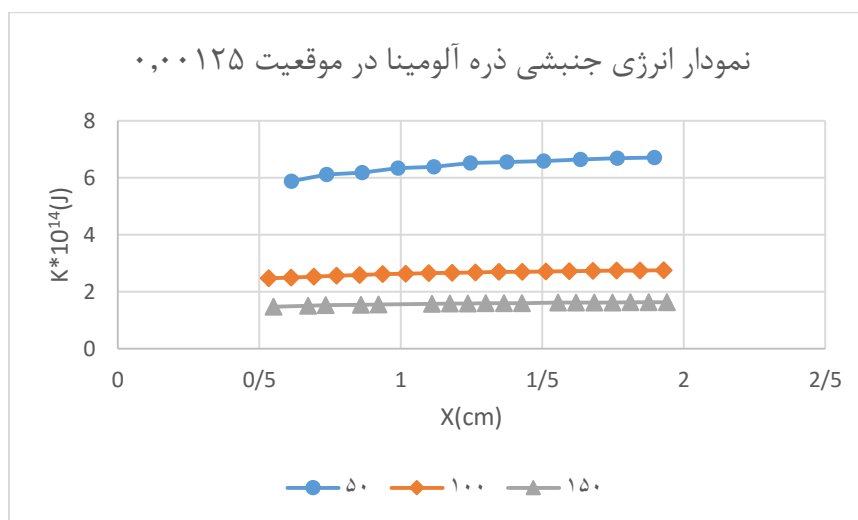
جدول (۴-۳۷) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۱۵۰ میکرومتر

K*10¹⁴(J)	Ux(m/s)	X(cm)
۱/۴۶۹	۱۲/۲۵۹	۰/۵۴۹
۱/۵۰۶	۱۲/۳۷۵	۰/۶۷۲
۱/۵۲۴	۱۲/۴۲۸	۰/۷۳۴
۱/۵۴۰	۱۲/۵۱۸	۰/۸۵۸
۱/۵۵۱	۱۲/۵۵۲	۰/۹۲۱
۱/۵۷۳	۱۲/۶۴۹	۱/۱۱۰
۱/۵۸۶	۱۲/۶۷۶	۱/۱۷۳
۱/۵۸۸	۱۲/۶۹۶	۱/۲۳۶
۱/۵۹۴	۱۲/۷۱۵	۱/۳
۱/۶۰۰	۱۲/۷۳۵	۱/۳۶۴
۱/۶۰۱	۱۲/۷۵۳	۱/۴۲۷
۱/۶۱۳	۱۲/۷۸۹	۱/۵۵۵
۱/۶۱۶	۱۲/۸۰۱	۱/۶۱۹
۱/۶۲۰	۱۲/۸۱۳	۱/۶۸۳
۱/۶۲۰	۱۲/۸۲۶	۱/۷۴۷
۱/۶۲۴	۱۲/۸۳۸	۱/۸۱۱
۱/۶۲۸	۱۲/۸۵۱	۱/۸۷۵
۱/۶۳۱	۱۲/۸۶۱	۱/۹۴۰

شکل های (۲۶-۴) و (۲۷-۴) نمودار سرعت و انرژی جنبشی در راستای X مربوط به ذره آلومینا در موقعیت عمودی تزریق ۰/۰۰۱۲۵ با قطرهای مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومتر است.



شکل (۲۶-۴) سرعت ذره آلومینا در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵



شکل (۲۷-۴) انرژی جنبشی ذره آلومینا در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵

جدول های (۳۸-۴) تا (۴۰-۴) اطلاعات تزریق ذره آلومینا در موقعیت عرضی ۰/۰۰۲۵ از ابتدای کانال با سه قطر مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومتر را نشان می دهند.

جدول (۴-۳۸) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۹/۹۸۵	۳۲/۱۷۵	۰/۵۷۷
۱۰/۴۱۳	۳۲/۸۴۶	۰/۷۳۹
۱۰/۷۶۲	۳۳/۳۹۲	۰/۹۰۴
۱۱/۰۴۸	۳۳/۸۳۷	۱/۰۷۲
۱۱/۲۸۵	۳۴/۲۰۲	۱/۲۴۱
۱۱/۴۸۲	۳۴/۵۰۳	۱/۴۱۳
۱۱/۶۴۸	۳۴/۷۵۳	۱/۵۸۶
۱۱/۷۸۸	۳۴/۹۶۲	۱/۷۶۰
۱۱/۹۶۰	۳۵/۱۳۸	۱/۹۳۵

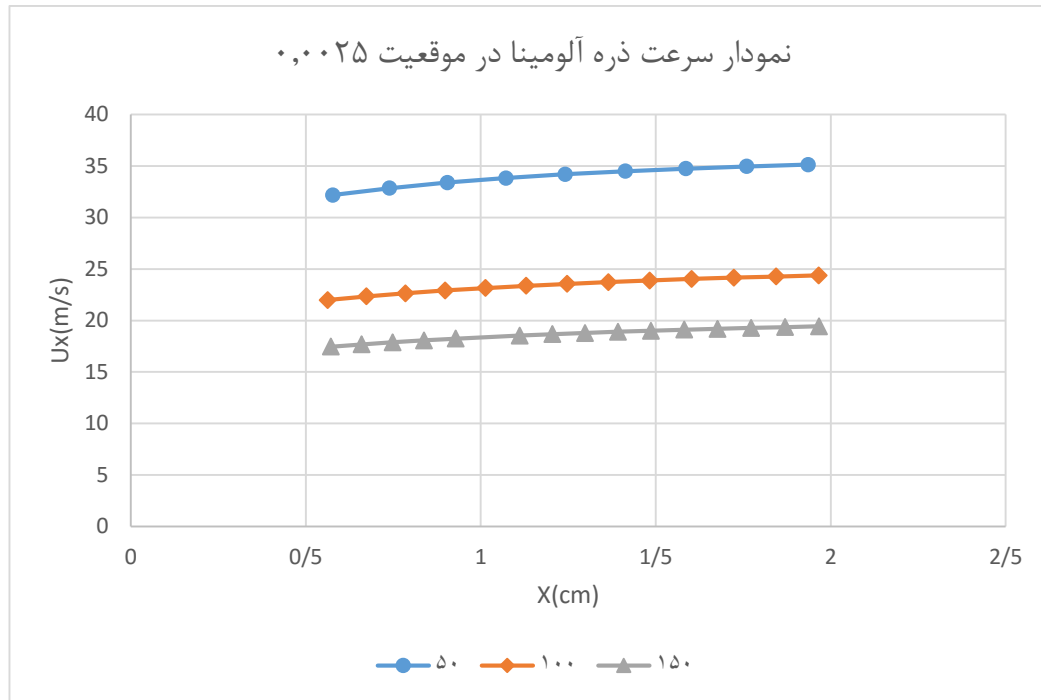
جدول (۴-۳۹) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۱۰۰ میکرومتر

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۴/۶۸۴	۲۱/۹۸۸	۰/۵۶۲
۴/۷۹۲	۲۲/۳۳۲	۰/۶۷۳
۴/۸۹۳	۲۲/۶۳۹	۰/۷۸۵
۵/۰۶۹	۲۲/۹۱۰	۰/۸۹۸
۵/۱۴۷	۲۳/۱۵۱	۱/۰۱۳
۵/۲۸۵	۲۳/۳۶۵	۱/۱۲۹
۵/۳۴۶	۲۳/۵۵۷	۱/۲۴۶
۵/۴۵۶	۲۳/۷۳۰	۱/۳۶۴
۵/۵۰۵	۲۳/۸۸۶	۱/۴۸۳
۵/۵۹۵	۲۴/۰۲۸	۱/۶۰۳
۵/۶۳۶	۲۴/۱۵۷	۱/۷۲۳
۵/۷۱۱	۲۴/۲۷۵	۱/۸۴۴
۵/۷۴۵	۲۴/۳۸۴	۱/۹۶۵

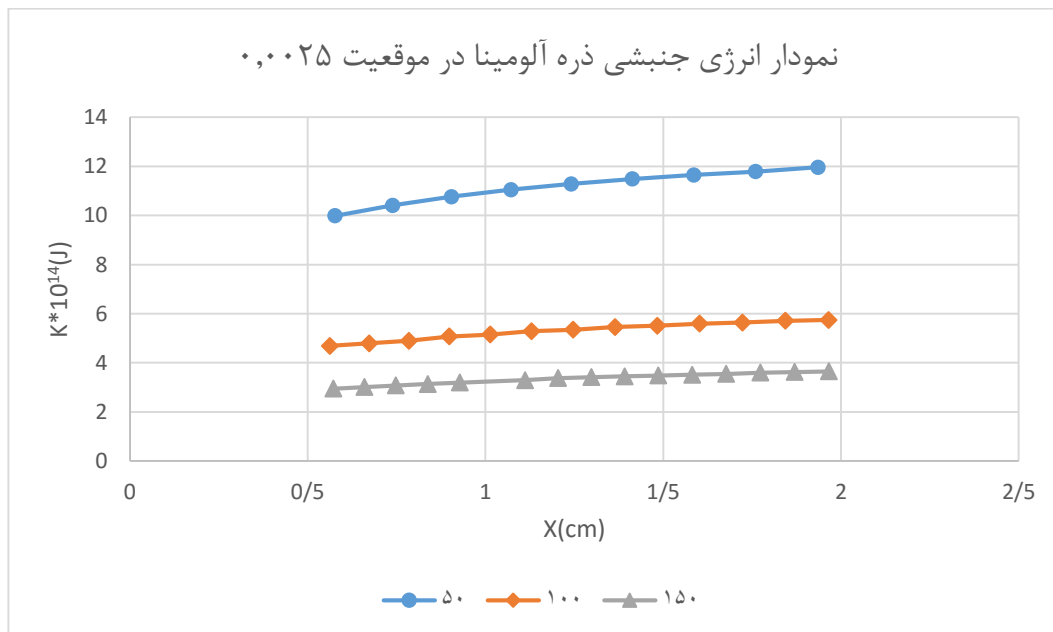
جدول (۴-۴۰) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا با قطر ۱۵۰ میکرومتر

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۹۴۴	۱۷/۴۶۰	۰/۵۷۲
۳/۰۱۴	۱۷/۶۸۰	۰/۶۵۹
۳/۰۷۸	۱۷/۸۸۲	۰/۷۴۸
۳/۱۳۸	۱۸/۰۶۷	۰/۸۳۷
۳/۱۹۳	۱۸/۲۳۶	۰/۹۲۸
۳/۲۹۱	۱۸/۵۳۳	۱/۱۱۱
۳/۳۷۵	۱۸/۶۶۳	۱/۲۰۴
۳/۴۱۲	۱۸/۷۸۴	۱/۲۹۸
۳/۴۴۸	۱۸/۸۹۷	۱/۳۹۲
۳/۴۸۲	۱۹/۰۰۲	۱/۴۸۶
۳/۵۱۳	۱۹/۰۹۹	۱/۵۸۱
۳/۵۴۳	۱۹/۱۹۱	۱/۶۷۷
۳/۵۹۸	۱۹/۲۷۶	۱/۷۷۳
۳/۶۲۳	۱۹/۳۵۶	۱/۸۶۹
۳/۶۴۷	۱۹/۴۳۳	۱/۹۶۶

شکل های (۴-۲۸) و (۴-۲۹) نمودار سرعت و انرژی جنبشی در راستای X مربوط به ذره آلومینا در موقعیت عمودی تزریق ۰/۰۰۲۵ با قطرهای مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومتر است.



شکل (۴-۲۸) سرعت ذره آلومینا در موقعیت ۰,۰۰۲۵



شکل (۴-۲۹) انرژی جنبشی ذره آلومینا در موقعیت ۰,۰۰۲۵

جدول های (۴-۴۱) تا (۴-۴۳) اطلاعات تزریق ذره سیلیکون کارباید در موقعیت عرضی ۰/۰۰۰۵ از ابتدای کانال با سه قطر مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومتر را نشان می دهند.

جدول (۴-۴۱) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۵۰ میکرومتر

$K*10^{14}(J)$	$Ux(m/s)$	$X(cm)$
۵/۷۷۲	۲۷/۲۹۵	۰/۵۵۶
۶/۱۰۹	۲۷/۹۷۸	۰/۶۹۳
۶/۳۶۳	۲۸/۴۸۱	۰/۸۳۴
۶/۵۴۰	۲۸/۸۰۲	۰/۹۷۷
۶/۶۶۰	۲۹/۰۳۶	۱/۱۲۱
۶/۷۲۶	۲۹/۲۷۲	۱/۲۶۷
۶/۸۱۴	۲۹/۴۳۴	۱/۴۱۴
۶/۹۰۳	۲۹/۶۰۲	۱/۵۶۱
۶/۹۶۰	۲۹/۷۰۹	۱/۷۰۹
۷/۰۰۹	۲۹/۸۰۲	۱/۸۵۸

جدول (۴-۴۲) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۰۰ میکرومتر

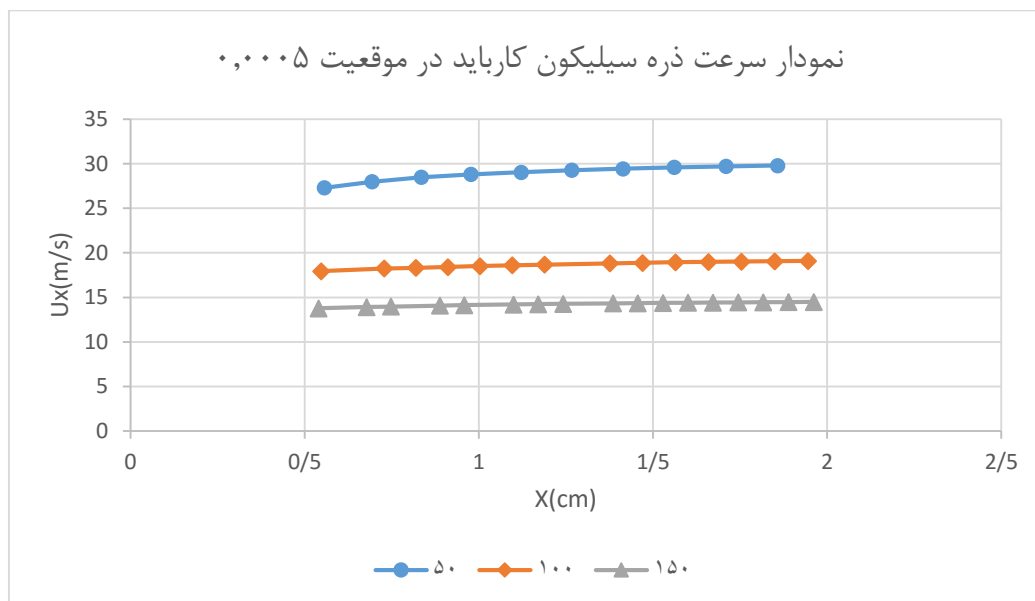
$K*10^{14}(J)$	$Ux(m/s)$	$X(cm)$
۲/۵۳۴	۱۷/۹۴۴	۰/۵۴۷
۲/۶۳۷	۱۸/۲۳۶	۰/۷۲۷
۲/۶۵۶	۱۸/۳۱۵	۰/۸۹
۲/۶۸۰	۱۸/۴۱۰	۰/۹۱۰
۲/۷۰۷	۱۸/۵۱۱	۱/۰۰۳
۲/۷۳۴	۱۸/۶۱۱	۱/۰۹۵
۲/۷۵۳	۱۸/۶۷۹	۱/۱۸۸
۲/۸۰۴	۱۸/۸۱	۱/۳۷۶
۲/۸۲۱	۱۸/۸۷۵	۱/۴۷۰

۲/۸۳۹	۱۸/۹۳۶	۱/۵۶۴
۲/۸۴۸	۱۸/۹۷۵	۱/۶۵۹
۲/۸۵۸	۱۹/۰۱۴	۱/۷۵۴
۲/۸۷۸	۱۹/۰۵۳	۱/۸۴۹
۲/۸۸۸	۱۹/۰۹۳	۱/۹۴۴

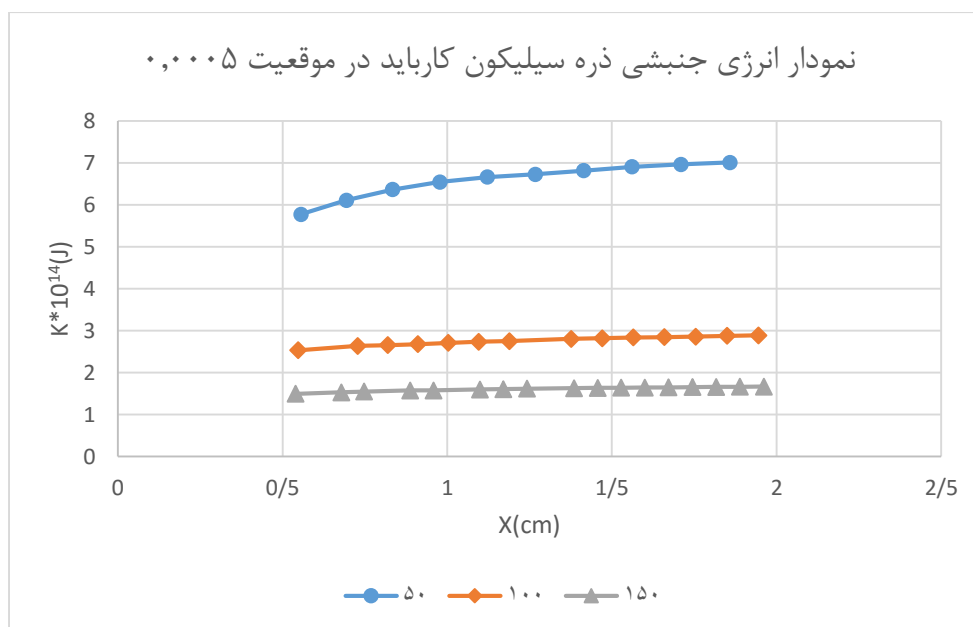
جدول (۴-۴۳) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۵۰ میکرومتر

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۱/۴۹۶	۱۳/۷۷۳	۰/۵۳۹
۱/۵۳۲	۱۳/۹۰۸	۰/۶۷۸
۱/۵۴۸	۱۳/۹۶۸	۰/۷۴۷
۱/۵۷۶	۱۴/۰۷۷	۰/۸۸۷
۱/۵۷۷	۱۴/۱۲۲	۰/۹۵۸
۱/۵۹۷	۱۴/۲۰۱	۱/۰۹۹
۱/۶۰۷	۱۴/۲۳۸	۱/۱۷۰
۱/۶۱۷	۱۴/۲۷۶	۱/۲۴۲
۱/۶۳۰	۱۴/۳۲۷	۱/۳۸۵
۱/۶۳۶	۱۴/۳۵۱	۱/۴۵۶
۱/۶۴۳	۱۴/۳۷۷	۱/۵۲۸
۱/۶۴۴	۱۴/۳۹۹	۱/۶
۱/۶۴۹	۱۴/۴۲۰	۱/۶۷۲
۱/۶۵۶	۱۴/۴۴۱	۱/۷۴۴
۱/۶۵۹	۱۴/۴۵۹	۱/۸۱۶
۱/۶۶۳	۱۴/۴۷۶	۱/۸۸۸
۱/۶۶۷	۱۴/۴۹۲	۱/۹۶۱

شکل های (۴-۳۰) و (۴-۳۱) نمودار سرعت و انرژی جنبشی در راستای X مربوط به ذره سیلیکون کارباید در موقعیت عمودی تزریق ۰/۰۰۰۵ با قطرهای مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومتر است.



شکل (۳۰-۴) سرعت ذره سیلیکون کارباید در موقعیت ۰,۰۰۰۵



شکل (۳۱-۴) انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید در موقعیت ۰,۰۰۰۵

جدول های (۴-۴) تا (۴-۶) اطلاعات تزریق ذره سیلیکون کارباید در موقعیت عرضی ۰/۰۰۱۲۵ از ابتدای کانال با سه قطر مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومتر را نشان می دهند.

جدول (۴-۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۵۰ میکرومتر

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۵/۷۵۱	۲۶/۹۴۹	۰/۶۲۳
۵/۹۷۰	۲۷/۵۰۷	۰/۷۵۹
۶/۱۳۰	۲۷/۸۴۷	۰/۸۹۷
۶/۱۹۳	۲۸/۰۸۵	۱/۰۳۶
۶/۳۲۷	۲۸/۳۴۳	۱/۱۷۷
۶/۴۲۰	۲۸/۵۱۵	۱/۳۱۹
۶/۴۹۴	۲۸/۶۵۷	۱/۴۶۲
۶/۵۴۴	۲۸/۷۵۲	۱/۶۰۶
۶/۵۶۸	۲۸/۸۴۵	۱/۷۴۹
۶/۶۱۶	۲۸/۹۳۵	۱/۸۹۴

جدول (۴-۵) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۰۰ میکرومتر

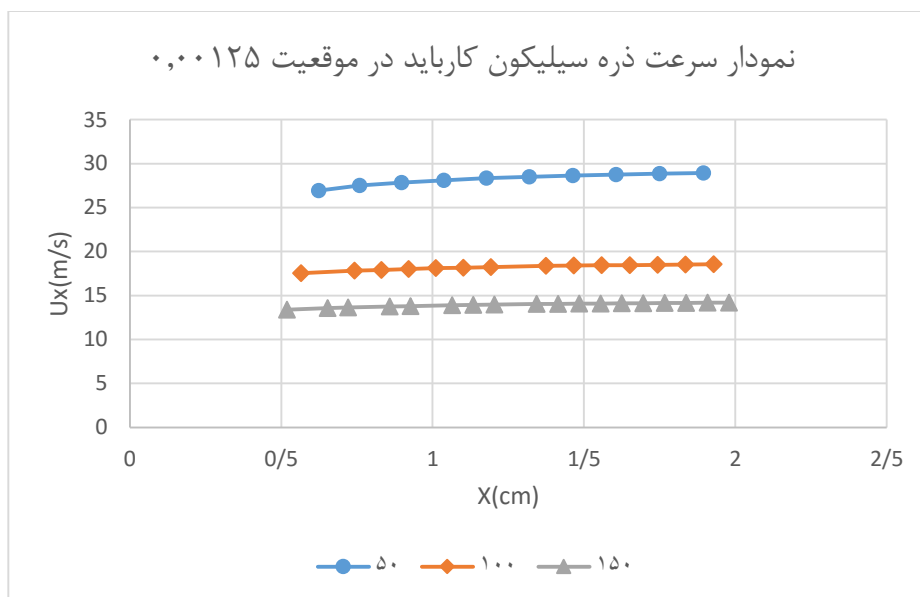
$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۴۵۵	۱۷/۵۴۷	۰/۵۶۵
۲/۵۲۴	۱۷/۸۲۱	۰/۷۴۱
۲/۵۴۶	۱۷/۹۱۰	۰/۸۳۰
۲/۵۷۲	۱۸/۰۰۸	۰/۹۲
۲/۶۰۲	۱۸/۱۰۸	۱/۰۱۰
۲/۶۱۷	۱۸/۱۷۱	۱/۱۰۱
۲/۶۳۴	۱۸/۲۳۲	۱/۱۹۲
۲/۶۸۳	۱۸/۳۶۴	۱/۳۷۴
۲/۶۹۲	۱۸/۳۹۹	۱/۴۶۶

۲/۷۰۰	۱۸/۴۳۲	۱/۵۵۸
۲/۷۰۹	۱۸/۴۶۵	۱/۶۵۰
۲/۷۱۷	۱۸/۴۹۷	۱/۷۴۳
۲/۷۳۰	۱۸/۵۲۵	۱/۸۳۵
۲/۷۳۶	۱۸/۵۴۴	۱/۹۲۸

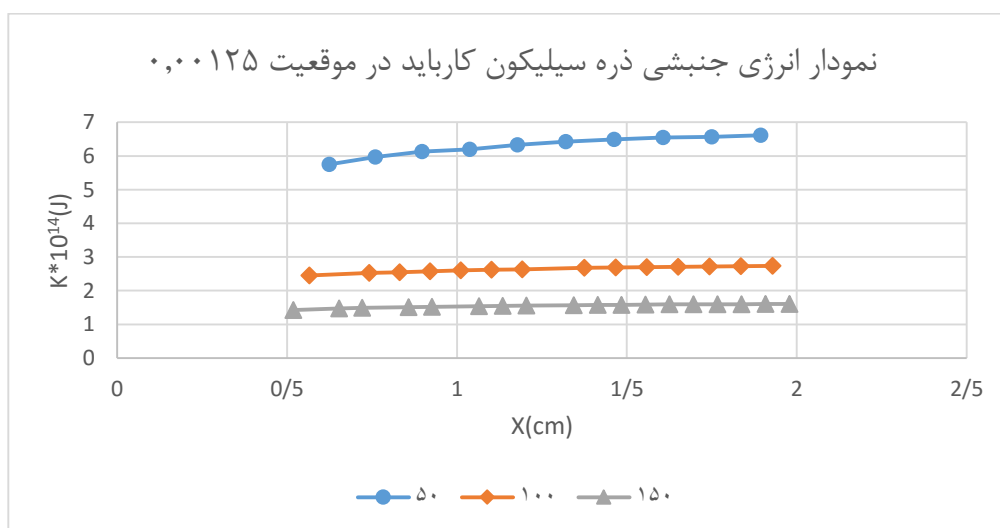
جدول (۴-۴۶) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۵۰ میکرومتر

K*10¹⁴(J)	Ux(m/s)	X(cm)
۱/۴۲۷	۱۳/۴۰۵	۰/۵۱۸
۱/۴۷۴	۱۳/۵۸۸	۰/۶۵۲
۱/۴۸۹	۱۳/۶۴۵	۰/۷۲۰
۱/۵۱۳	۱۳/۷۶۴	۰/۸۵۷
۱/۵۱۷	۱۳/۸۰۷	۰/۹۲۶
۱/۵۳۸	۱۳/۸۸۶	۱/۰۶۴
۱/۵۴۹	۱۳/۹۲۸	۱/۱۳۴
۱/۵۶۰	۱۳/۹۷۴	۱/۲۰۴
۱/۵۶۷	۱۴/۰۲۷	۱/۳۴۴
۱/۵۷۳	۱۴/۰۵۰	۱/۴۱۴
۱/۵۷۹	۱۴/۰۷۲	۱/۴۸۴
۱/۵۸۴	۱۴/۰۹۵	۱/۵۵۴
۱/۵۹۱	۱۴/۱۲۰	۱/۶۲۵
۱/۵۹۴	۱۴/۱۳۳	۱/۶۹۵
۱/۵۹۸	۱۴/۱۴۸	۱/۷۶۶
۱/۵۹۸	۱۴/۱۶۲	۱/۸۳۷
۱/۶۰۱	۱۴/۱۷۵	۱/۹۰۸
۱/۶۰۵	۱۴/۱۸۹	۱/۹۷۹

شکل های (۳۲-۴) و (۳۳-۴) نمودار سرعت و انرژی جنبشی در راستای x مربوط به ذره سیلیکون کارباید در موقعیت عمودی تزریق ۰/۰۰۱۲۵ با قطرهای مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومتر است.



شکل (۳۲-۴) سرعت ذره سیلیکون کارباید در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵



شکل (۳۳-۴) انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵

جدول های (۴۷-۴) تا (۴۹-۴) اطلاعات تزریق ذره سیلیکون کارباید در موقعیت عرضی ۰/۰۰۲۵ از ابتدای کانال با سه قطر مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومتر را نشان می دهند.

جدول (۴-۴۷) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۵۰ میکرومتر

K*10¹⁴(J)	Ux(m/s)	X(cm)
۹/۶۴۲	۳۵/۱۰۶	۰/۶۵۵
۱۰/۰۰۰	۳۵/۷۹۷	۰/۸۳۱
۱۰/۲۹۲	۳۶/۳۴۳	۱/۰۱۱
۱۰/۵۲۸	۳۶/۷۷۶	۱/۱۹۴
۱۰/۸۰۳	۳۷/۱۲۰	۱/۳۷۸
۱۰/۹۴۹	۳۷/۳۹۹	۱/۵۶۴
۱۰/۰۷۱	۳۷/۶۲۵	۱/۷۵۲
۱۰/۲۱۷	۳۷/۸۱	۱/۹۴

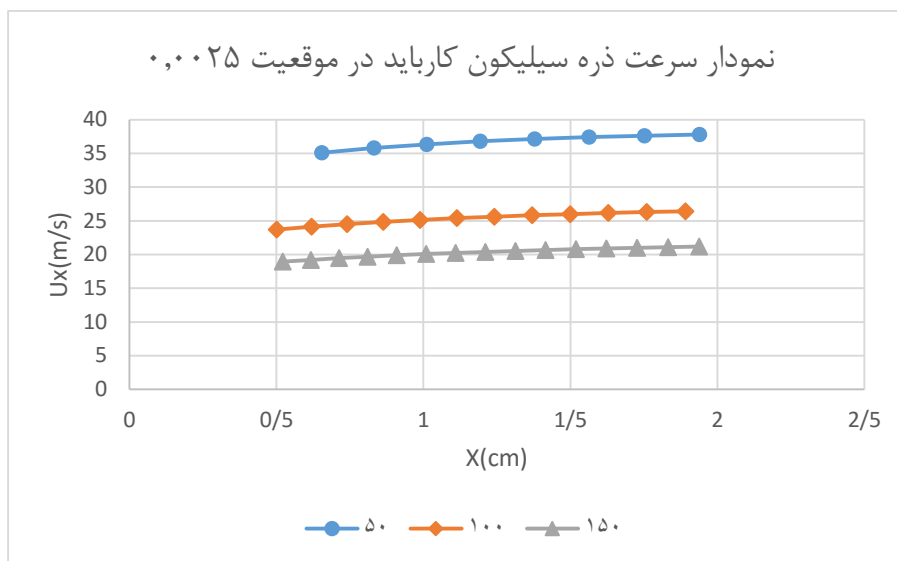
جدول (۴-۴۸) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۰۰ میکرومتر

K*10¹⁴(J)	Ux(m/s)	X(cm)
۴/۳۸۱	۲۳/۷۰۱	۰/۵۰۰
۴/۴۹۶	۲۴/۱۳۴	۰/۶۱۹
۴/۶۹۶	۲۴/۵۱۴	۰/۷۴۱
۴/۷۸۴	۲۴/۸۴۵	۰/۸۶۴
۴/۹۳۷	۲۵/۱۳۵	۰/۹۸۸
۵/۰۰۵	۲۵/۳۸۸	۱/۱۱۴
۵/۱۲۳	۲۵/۶۱۲	۱/۲۴۱
۵/۲۲۶	۲۵/۸۱۰	۱/۳۷۰
۵/۲۷۲	۲۵/۹۸۷	۱/۴۹۹
۵/۳۵۵	۲۶/۱۴۶	۱/۶۲۹
۵/۴۲۷	۲۶/۲۸۸	۱/۷۶۰
۵/۴۶۰	۲۶/۴۱۷	۱/۸۹۲

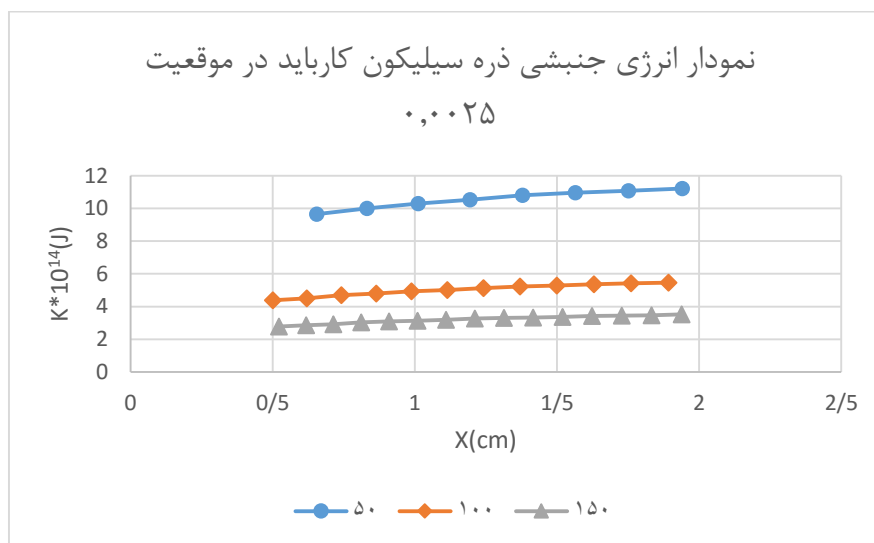
جدول (۴-۴۹) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید با قطر ۱۵۰ میکرومتر

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۷۷۶	۱۸/۹۳۲	۰/۵۲۲
۲/۸۴۹	۱۹/۲۰۸	۰/۶۱۷
۲/۹۱۷	۱۹/۴۵۷	۰/۷۱۳
۳/۰۳۵	۱۹/۶۸۱	۰/۸۱۰
۳/۰۸۷	۱۹/۸۸۴	۰/۹۰۹
۳/۱۳۶	۲۰/۰۷	۱/۰۰۹
۳/۱۸۱	۲۰/۲۳۸	۱/۱۰۹
۳/۲۶۰	۲۰/۳۹۱	۱/۲۱۱
۳/۲۹۶	۲۰/۵۳۱	۱/۳۱۳
۳/۳۳۰	۲۰/۶۶۱	۱/۴۱۶
۳/۳۶۲	۲۰/۷۷۹	۱/۵۱۹
۳/۴۱۹	۲۰/۸۸۹	۱/۶۲۳
۳/۴۴۶	۲۰/۹۹۱	۱/۷۲۸
۳/۴۷۱	۲۰/۰۸۶	۱/۸۳۳
۳/۵۱۶	۲۱/۱۷۵	۱/۹۳۸

شکل های (۴-۳۴) و (۴-۳۵) نمودار سرعت و انرژی جنبشی در راستای X مربوط به ذره سیلیکون کارباید در موقعیت عمودی تزریق ۰/۰۰۲۵ با قطرهای مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومتر است.



شکل (۴-۳۴) سرعت ذره سیلیکون کارباید در موقعیت ۰,۰۰۲۵



شکل (۴-۳۵) انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید در موقعیت ۰,۰۰۲۵

جدول‌های (۴-۵۰) و (۴-۵۱) اطلاعات تزریق ذره آلومینا و سیلیکون کارباید در موقعیت عرضی ۰,۰۰۱۲۵، از ابتدای کانال، با قطر ۵۰ میکرومتر را نشان می‌دهند.

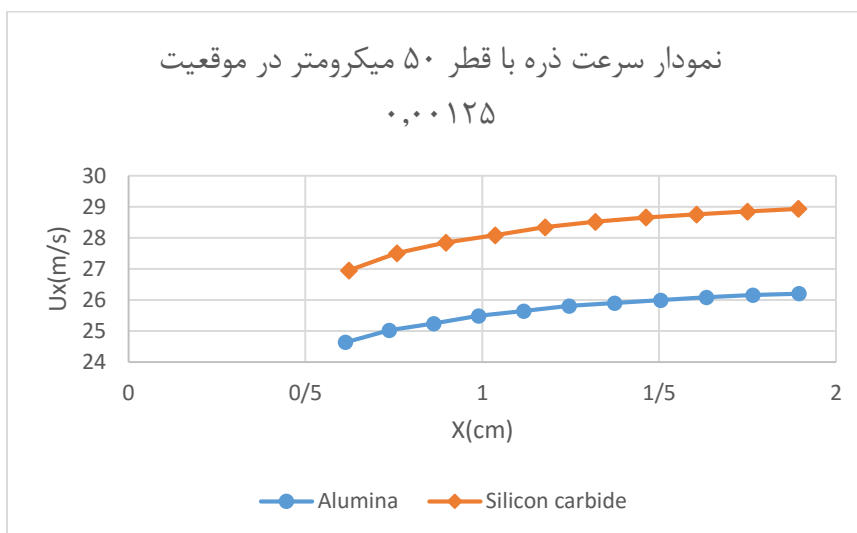
جدول (۴-۵۰) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۵/۸۸۱	۲۴/۶۴	۰/۶۱۳
۶/۱۱۵	۲۵/۰۲	۰/۷۳۷
۶/۱۸۵	۲۵/۲۴	۰/۸۶۲
۶/۳۴	۲۵/۴۹	۰/۹۸۹
۶/۳۸۹	۲۵/۶۴	۱/۱۱۷
۶/۵۱۷	۲۵/۸۱	۱/۲۴۵
۶/۵۵۹	۲۵/۹۰	۱/۳۷۴
۶/۵۸۹	۲۵/۹۹	۱/۵۰۴
۶/۶۴۸	۲۶/۰۸	۱/۶۳۴
۶/۶۹۴	۲۶/۱۶	۱/۷۶۴
۶/۷۰۷	۲۶/۲۰	۱/۸۹۵

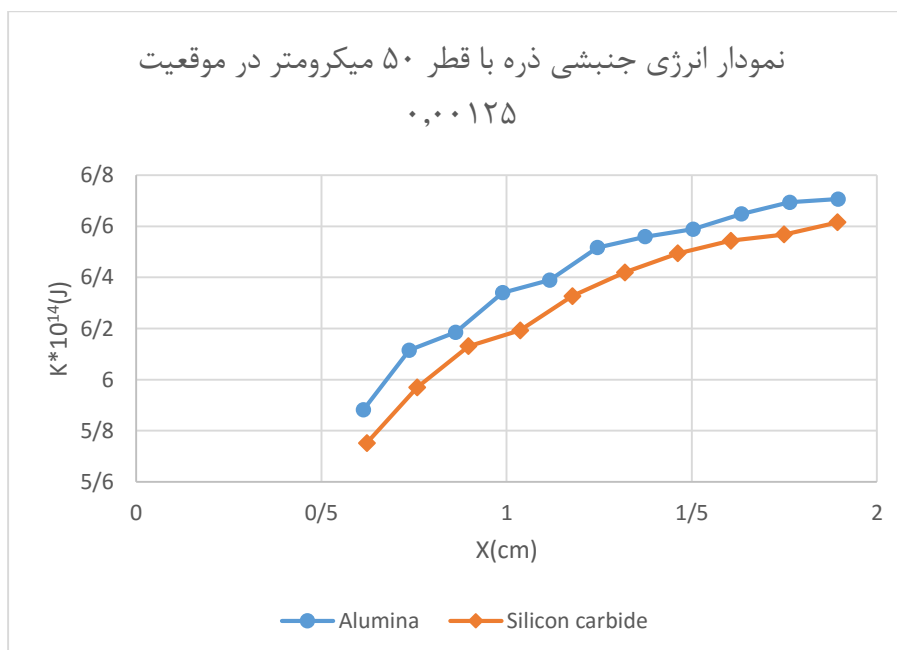
جدول (۴-۵۱) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۵/۷۵۱	۲۶/۹۴۹	۰/۶۲۳
۵/۹۷۰	۲۷/۵۰۷	۰/۷۵۹
۶/۱۳۰	۲۷/۸۴۷	۰/۸۹۷
۶/۱۹۳	۲۸/۰۸۵	۱/۰۳۶
۶/۳۲۷	۲۸/۳۴۳	۱/۱۷۷
۶/۴۲۰	۲۸/۵۱۵	۱/۳۱۹
۶/۴۹۴	۲۸/۶۵۷	۱/۴۶۲
۶/۵۴۴	۲۸/۷۵۲	۱/۶۰۶
۶/۵۶۸	۲۸/۸۴۵	۱/۷۴۹
۶/۶۱۶	۲۸/۹۳۵	۱/۸۹۴

شکل های (۴-۳۶) و (۴-۳۷) نمودار سرعت و انرژی جنبشی در راستای X مربوط به ذره آلومینا و سیلیکون کارباید در موقعیت عمودی تزریق ۰/۰۰۱۲۵ با قطر ۵۰ میکرومتر است.



شکل (۴-۳۶) سرعت ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵



شکل (۴-۳۷) انرژی جنبشی ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵

جدول‌های (۴-۵۲) و (۴-۵۳) اطلاعات تزریق ذره آلومینا و سیلیکون کارباید در موقعیت عرضی ۰/۰۰۲۵، از ابتدای کانال، با قطر ۵۰ میکرومتر را نشان می‌دهند.

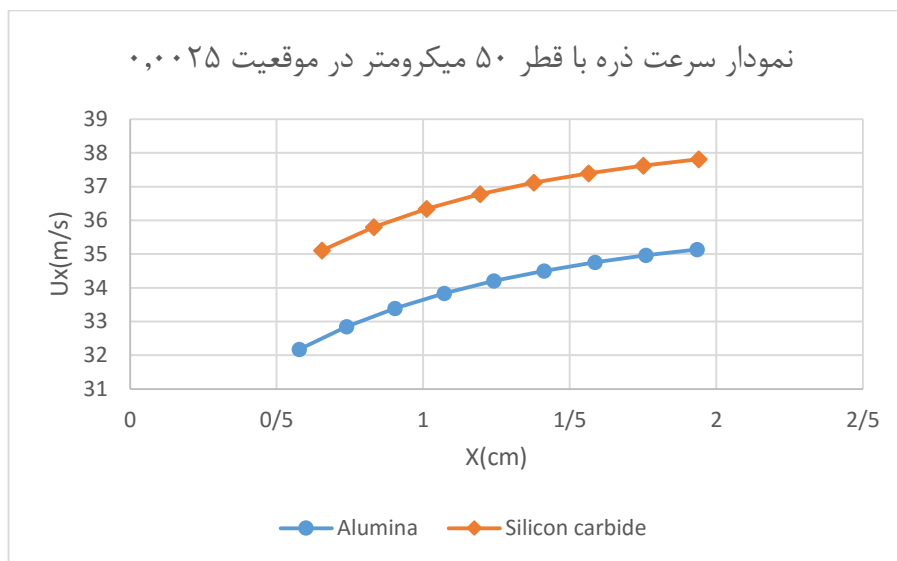
جدول (۴-۵۲) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۹/۹۸۵	۳۲/۱۷۵	۰/۵۷۷
۱۰/۴۱۳	۳۲/۸۴۶	۰/۷۳۹
۱۰/۷۶۲	۳۳/۳۹۲	۰/۹۰۴
۱۱/۰۴۸	۳۳/۸۳۷	۱/۰۷۲
۱۱/۲۸۵	۳۴/۲۰۲	۱/۲۴۱
۱۱/۴۸۲	۳۴/۵۰۳	۱/۴۱۳
۱۱/۶۴۸	۳۴/۷۵۳	۱/۵۸۶
۱۱/۷۸۸	۳۴/۹۶۲	۱/۷۶۰
۱۱/۹۶۰	۳۵/۱۳۸	۱/۹۳۵

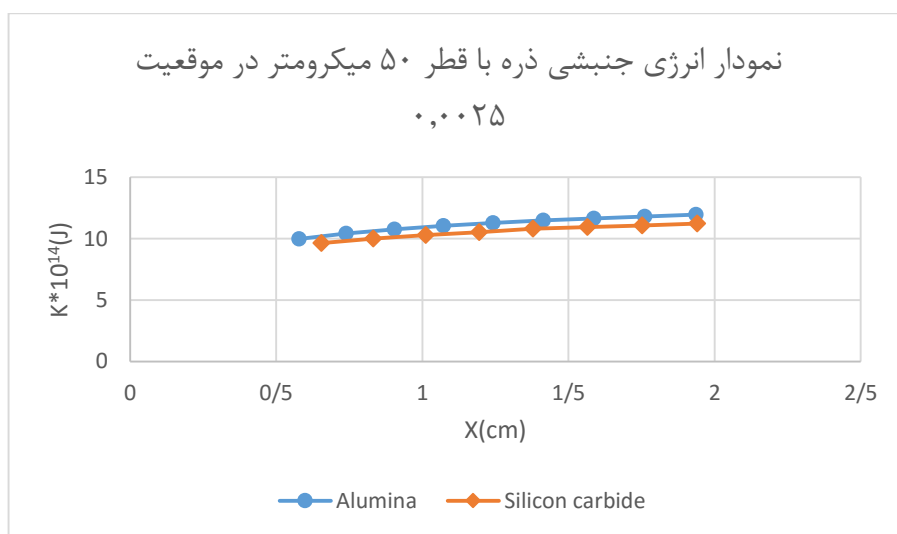
جدول (۴-۵۳) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۹/۶۴۲	۳۵/۱۰۶	۰/۶۵۵
۱۰/۰۰۰	۳۵/۷۹۷	۰/۸۳۱
۱۰/۲۹۲	۳۶/۳۴۳	۱/۰۱۱
۱۰/۵۲۸	۳۶/۷۷۶	۱/۱۹۴
۱۰/۸۰۳	۳۷/۱۲۰	۱/۳۷۸
۱۰/۹۴۹	۳۷/۳۹۹	۱/۵۶۴
۱۱/۰۷۱	۳۷/۶۲۵	۱/۷۵۲
۱۱/۲۱۷	۳۷/۸۱	۱/۹۴

شکل‌های (۴-۳۸) و (۴-۳۹) نمودار سرعت و انرژی جنبشی در راستای x مربوط به ذره آلومینا و سیلیکون کارباید در موقعیت عمودی تزریق ۰/۰۰۲۵ با قطر ۵۰ میکرومتر است.



شکل (۴-۳۸) سرعت ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۲۵



شکل (۴-۳۹) انرژی جنبشی ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۲۵

جدول‌های (۴-۵۴) و (۴-۵۵) اطلاعات تزریق ذره آلومینا و سیلیکون کارباید در موقعیت عرضی ۰/۰۰۱۲۵، از ابتدای کانال، با قطر ۱۰۰ میکرومتر را نشان می‌دهند.

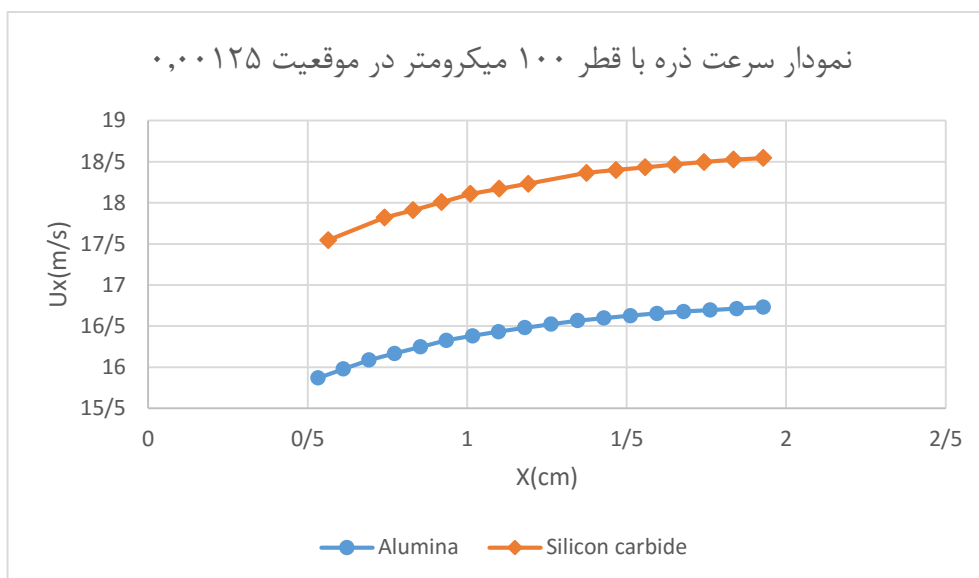
جدول (۴-۵۴) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۴۷۲	۱۵/۸۷۱	۰/۵۳۳
۲/۴۹۳	۱۵/۹۷۹	۰/۶۱۲
۲/۵۳۰	۱۶/۰۸۸	۰/۶۹۲
۲/۵۵۷	۱۶/۱۶۸	۰/۷۷۳
۲/۵۸۴	۱۶/۲۴۸	۰/۸۵۴
۲/۶۱۶	۱۶/۳۲۸	۰/۹۳۵
۲/۶۳۰	۱۶/۳۸۲	۱/۰۱۷
۲/۶۴۷	۱۶/۴۳۳	۱/۰۹۹
۲/۶۶۳	۱۶/۴۸۰	۱/۱۸۱
۲/۶۷۸	۱۶/۵۲۵	۱/۲۶۳
۲/۶۹۴	۱۶/۵۶۶	۱/۳۴۶
۲/۷۰۲	۱۶/۵۹۷	۱/۴۲۹
۲/۷۱۲	۱۶/۶۲۶	۱/۵۱۲
۲/۷۲۱	۱۶/۶۵۳	۱/۵۹۵
۲/۷۲۹	۱۶/۶۷۸	۱/۶۷۸
۲/۷۴۲	۱۶/۶۹۵	۱/۷۶۲
۲/۷۴۷	۱۶/۷۱۳	۱/۸۴۵
۲/۷۵۳	۱۶/۷۳۲	۱/۹۲۹

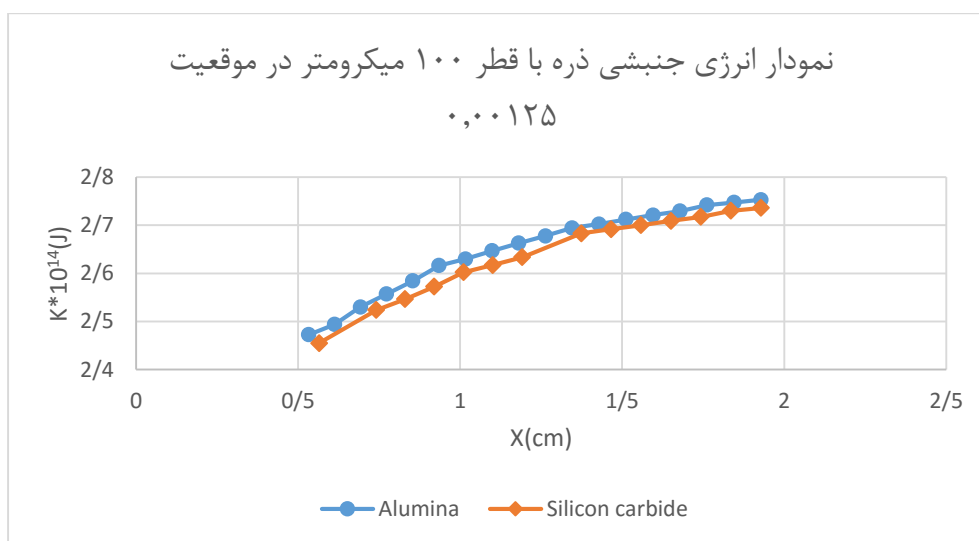
جدول (۴-۵۵) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۴۵۵	۱۷/۵۴۷	۰/۵۶۵
۲/۵۲۴	۱۷/۸۲۱	۰/۷۴۱
۲/۵۴۶	۱۷/۹۱۰	۰/۸۳۰
۲/۵۷۲	۱۸/۰۰۸	۰/۹۲
۲/۶۰۲	۱۸/۱۰۸	۱/۰۱۰
۲/۶۱۷	۱۸/۱۷۱	۱/۱۰۱
۲/۶۳۴	۱۸/۲۳۲	۱/۱۹۲
۲/۶۸۳	۱۸/۳۶۴	۱/۳۷۴
۲/۶۹۲	۱۸/۳۹۹	۱/۴۶۶
۲/۷۰۰	۱۸/۴۳۲	۱/۵۵۸
۲/۷۰۹	۱۸/۴۶۵	۱/۶۵۰
۲/۷۱۷	۱۸/۴۹۷	۱/۷۴۳
۲/۷۳۰	۱۸/۵۲۵	۱/۸۳۵
۲/۷۳۶	۱۸/۵۴۴	۱/۹۲۸

شکل های (۴-۴۰) و (۴-۴۱) نمودار سرعت و انرژی جنبشی در راستای x مربوط به ذره آلومینا و سیلیکون کارباید در موقعیت عمودی تزریق ۰/۰۰۱۲۵ با قطر ۱۰۰ میکرومتر است.



شکل (۴۰-۴) سرعت ذرات با قطر ۱۰۰ میکرومتر، در موقعیت ۰,۰۰۱۲۵



شکل (۴۱-۴) انرژی جنبشی ذرات با قطر ۱۰۰ میکرومتر، در موقعیت ۰,۰۰۱۲۵

جدول‌های (۴-۵۶) و (۴-۵۷) اطلاعات تزریق ذره آلومینا و سیلیکون کارباید در موقعیت عرضی ۰,۰۰۲۵، از ابتدای کانال، با قطر ۱۰۰ میکرومتر را نشان می‌دهند.

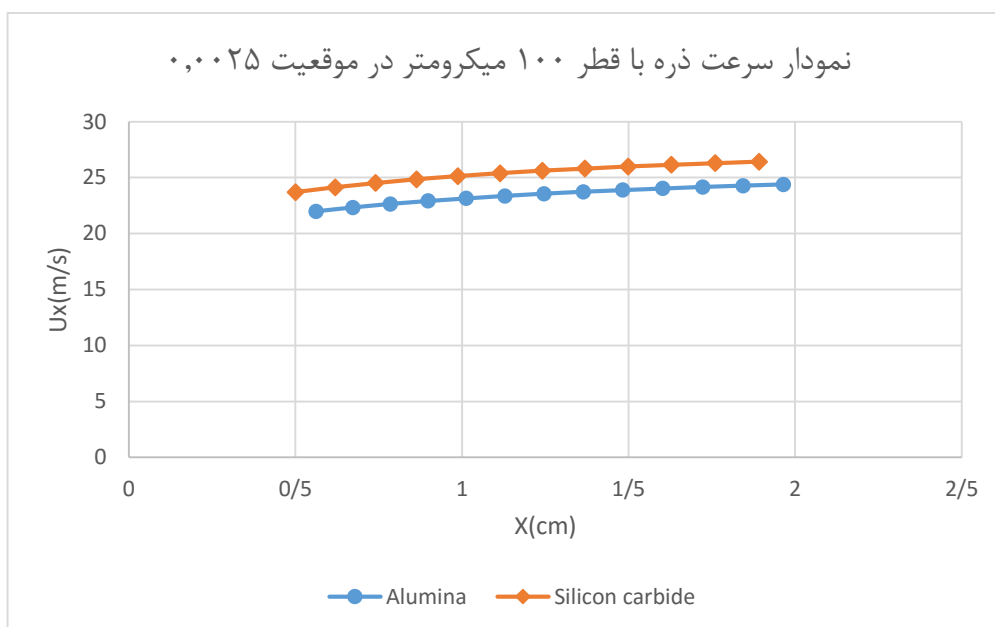
جدول (۴-۵۶) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۴/۶۸۴	۲۱/۹۸۸	۰/۵۶۲
۴/۷۹۲	۲۲/۳۳۲	۰/۶۷۳
۴/۸۹۳	۲۲/۶۳۹	۰/۷۸۵
۵/۰۶۹	۲۲/۹۱۰	۰/۸۹۸
۵/۱۴۷	۲۳/۱۵۱	۱/۰۱۳
۵/۲۸۵	۲۳/۳۶۵	۱/۱۲۹
۵/۳۴۶	۲۳/۵۵۷	۱/۲۴۶
۵/۴۵۶	۲۳/۷۳۰	۱/۳۶۴
۵/۵۰۵	۲۳/۸۸۶	۱/۴۸۳
۵/۵۹۵	۲۴/۰۲۸	۱/۶۰۳
۵/۶۳۶	۲۴/۱۵۷	۱/۷۲۳
۵/۷۱۱	۲۴/۲۷۵	۱/۸۴۴
۵/۷۴۵	۲۴/۳۸۴	۱/۹۶۵

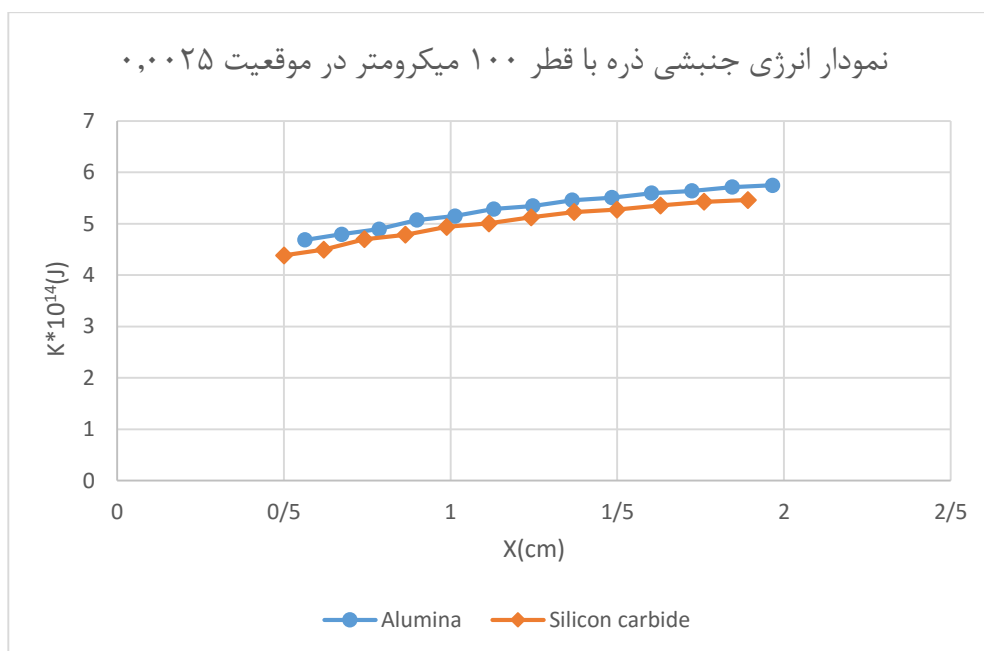
جدول (۴-۵۷) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۴/۳۸۱	۲۳/۷۰۱	۰/۵۰۰
۴/۴۹۶	۲۴/۱۳۴	۰/۶۱۹
۴/۶۹۶	۲۴/۵۱۴	۰/۷۴۱
۴/۷۸۴	۲۴/۸۴۵	۰/۸۶۴
۴/۹۳۷	۲۵/۱۳۵	۰/۹۸۸
۵/۰۰۵	۲۵/۳۸۸	۱/۱۱۴
۵/۱۲۳	۲۵/۶۱۲	۱/۲۴۱
۵/۲۲۶	۲۵/۸۱۰	۱/۳۷۰
۵/۲۷۲	۲۵/۹۸۷	۱/۴۹۹
۵/۳۵۵	۲۶/۱۴۶	۱/۶۲۹
۵/۴۲۷	۲۶/۲۸۸	۱/۷۶۰
۵/۴۶۰	۲۶/۴۱۷	۱/۸۹۲

شکل های (۴۲-۴) و (۴۳-۴) نمودار سرعت و انرژی جنبشی در راستای x مربوط به ذره آلومینا و سیلیکون کارباید در موقعیت عمودی تزریق ۰/۰۰۲۵ با قطر ۱۰۰ میکرومتر است.



شکل (۴۲-۴) سرعت ذرات با قطر ۱۰۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۲۵



شکل (۴۳-۴) انرژی جنبشی ذرات با قطر ۱۰۰ میکرومتر، در موقعیت ۰/۰۰۲۵

جدول‌های (۴-۵۸) و (۴-۵۹) اطلاعات تزریق ذره آلومینا و سیلیکون کارباید در موقعیت عرضی ۰/۰۰۱۲۵، از ابتدای کانال، با قطر ۱۵۰ میکرومتر را نشان می‌دهند.

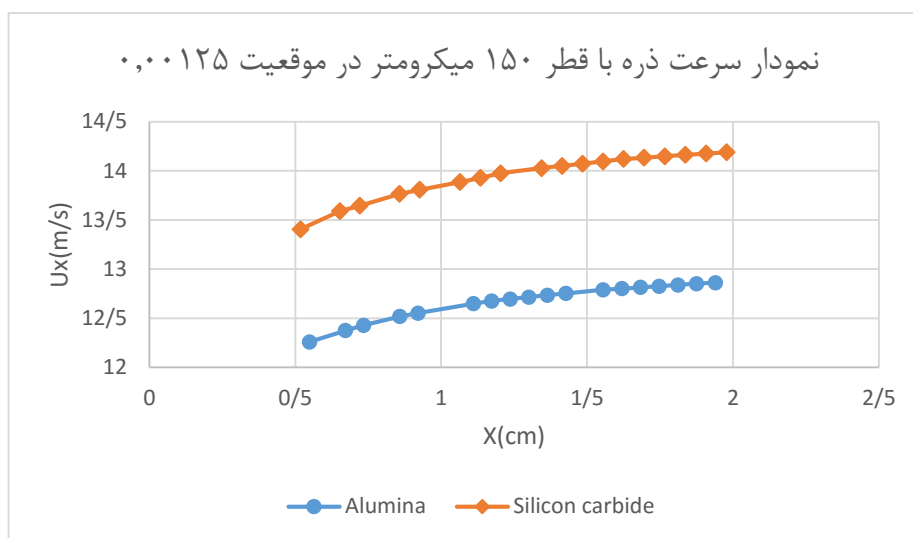
جدول (۴-۵۸) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۱/۴۶۹	۱۲/۲۵۹	۰/۵۴۹
۱/۵۰۶	۱۲/۳۷۵	۰/۶۷۲
۱/۵۲۴	۱۲/۴۲۸	۰/۷۳۴
۱/۵۴۰	۱۲/۵۱۸	۰/۸۵۸
۱/۵۵۱	۱۲/۵۵۲	۰/۹۲۱
۱/۵۷۳	۱۲/۶۴۹	۱/۱۱۰
۱/۵۸۶	۱۲/۶۷۶	۱/۱۷۳
۱/۵۸۸	۱۲/۶۹۶	۱/۲۳۶
۱/۵۹۴	۱۲/۷۱۵	۱/۳
۱/۶۰۰	۱۲/۷۳۵	۱/۳۶۴
۱/۶۰۱	۱۲/۷۵۳	۱/۴۲۷
۱/۶۱۳	۱۲/۷۸۹	۱/۵۵۵
۱/۶۱۶	۱۲/۸۰۱	۱/۶۱۹
۱/۶۲۰	۱۲/۸۱۳	۱/۶۸۳
۱/۶۲۰	۱۲/۸۲۶	۱/۷۴۷
۱/۶۲۴	۱۲/۸۳۸	۱/۸۱۱
۱/۶۲۸	۱۲/۸۵۱	۱/۸۷۵
۱/۶۳۱	۱۲/۸۶۱	۱/۹۴۰

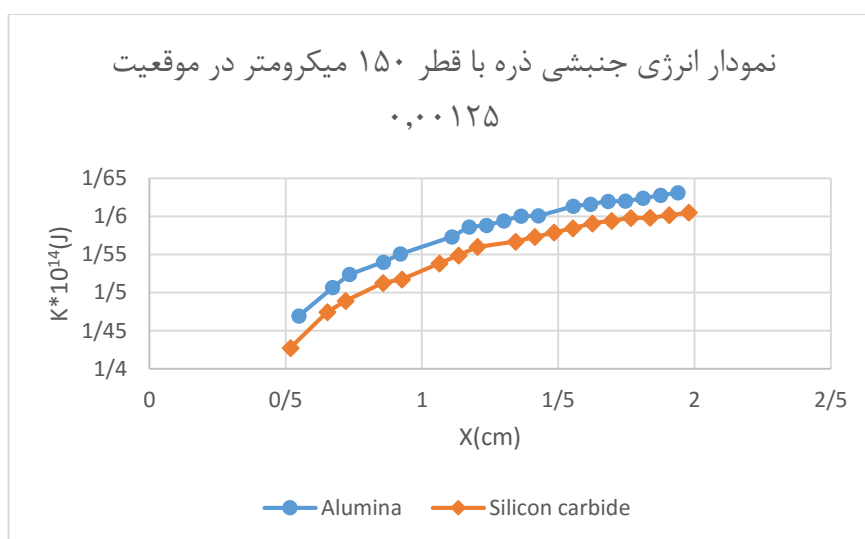
جدول (۴-۵۹) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۱/۴۲۷	۱۳/۴۰۵	۰/۵۱۸
۱/۴۷۴	۱۳/۵۸۸	۰/۶۵۲
۱/۴۸۹	۱۳/۶۴۵	۰/۷۲۰
۱/۵۱۳	۱۳/۷۶۴	۰/۸۵۷
۱/۵۱۷	۱۳/۸۰۷	۰/۹۲۶
۱/۵۳۸	۱۳/۸۸۶	۱/۰۶۴
۱/۵۴۹	۱۳/۹۲۸	۱/۱۳۴
۱/۵۶۰	۱۳/۹۷۴	۱/۲۰۴
۱/۵۶۷	۱۴/۰۲۷	۱/۳۴۴
۱/۵۷۳	۱۴/۰۵۰	۱/۴۱۴
۱/۵۷۹	۱۴/۰۷۲	۱/۴۸۴
۱/۵۸۴	۱۴/۰۹۵	۱/۵۵۴
۱/۵۹۱	۱۴/۱۲۰	۱/۶۲۵
۱/۵۹۴	۱۴/۱۳۳	۱/۶۹۵
۱/۵۹۸	۱۴/۱۴۸	۱/۷۶۶
۱/۵۹۸	۱۴/۱۶۲	۱/۸۳۷
۱/۶۰۱	۱۴/۱۷۵	۱/۹۰۸
۱/۶۰۵	۱۴/۱۸۹	۱/۹۷۹

شکل های (۴-۴۴) و (۴-۴۵) نمودار سرعت و انرژی جنبشی در راستای x مربوط به ذره آلومینا و سیلیکون کارباید در موقعیت عمودی تزریق ۰/۰۰۱۲۵ با قطر ۱۵۰ میکرومتر است.



شکل (۴-۴) سرعت ذرات با قطر ۱۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰,۰۰۱۲۵



شکل (۴-۵) انرژی جنبشی ذرات با قطر ۱۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰,۰۰۱۲۵

جدول‌های (۴-۶۰) و (۴-۶۱) اطلاعات تزریق ذره آلومینا و سیلیکون کارباید در موقعیت عرضی ۰/۰۰۲۵، از ابتدای کانال، با قطر ۱۵۰ میکرومتر را نشان می‌دهند.

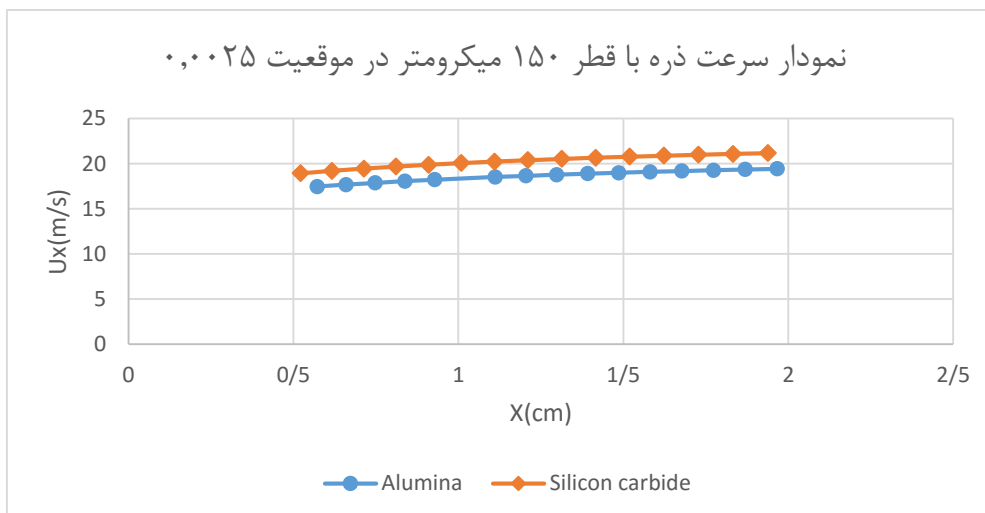
جدول (۴-۶۰) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره آلومینا

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$X(cm)$
۲/۹۴۴	۱۷/۴۶۰	۰/۵۷۲
۳/۰۱۴	۱۷/۶۸۰	۰/۶۵۹
۳/۰۷۸	۱۷/۸۸۲	۰/۷۴۸
۳/۱۳۸	۱۸/۰۶۷	۰/۸۳۷
۳/۱۹۳	۱۸/۲۳۶	۰/۹۲۸
۳/۲۹۱	۱۸/۵۳۳	۱/۱۱۱
۳/۳۷۵	۱۸/۶۶۳	۱/۲۰۴
۳/۴۱۲	۱۸/۷۸۴	۱/۲۹۸
۳/۴۴۸	۱۸/۸۹۷	۱/۳۹۲
۳/۴۸۲	۱۹/۰۰۲	۱/۴۸۶
۳/۵۱۳	۱۹/۰۹۹	۱/۵۸۱
۳/۵۴۳	۱۹/۱۹۱	۱/۶۷۷
۳/۵۹۸	۱۹/۲۷۶	۱/۷۷۳
۳/۶۲۳	۱۹/۳۵۶	۱/۸۶۹
۳/۶۴۷	۱۹/۴۳۳	۱/۹۶۶

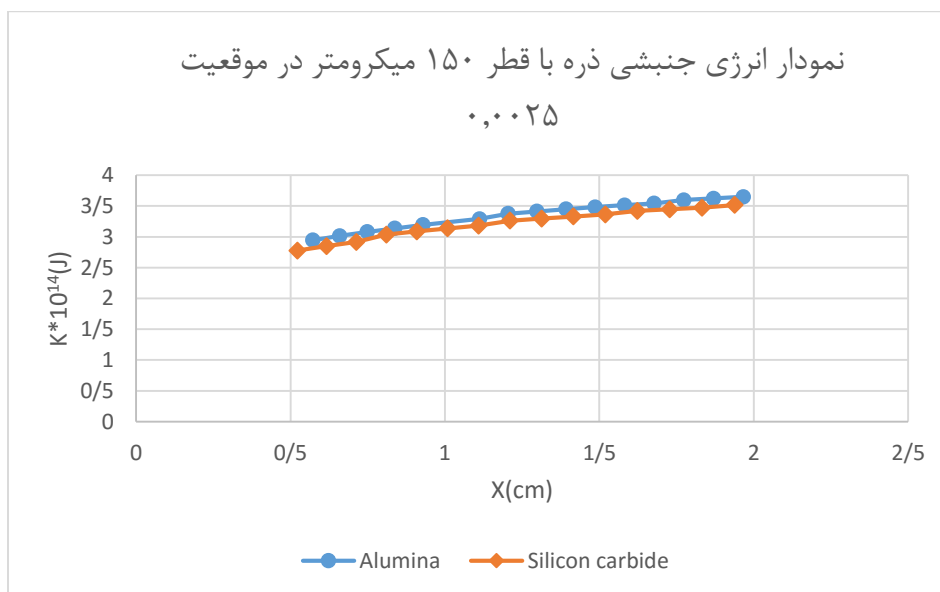
جدول (۴-۶۱) سرعت و انرژی جنبشی با توجه به فاصله از نازل، ذره سیلیکون کارباید

K*10¹⁴(J)	Ux(m/s)	X(cm)
۲/۷۷۶	۱۸/۹۳۲	۰/۵۲۲
۲/۸۴۹	۱۹/۲۰۸	۰/۶۱۷
۲/۹۱۷	۱۹/۴۵۷	۰/۷۱۳
۳/۰۳۵	۱۹/۶۸۱	۰/۸۱۰
۳/۰۸۷	۱۹/۸۱۴	۰/۹۰۹
۳/۱۳۶	۲۰/۰۷	۱/۰۰۹
۳/۱۸۱	۲۰/۲۳۸	۱/۱۰۹
۳/۲۶۰	۲۰/۳۹۱	۱/۲۱۱
۳/۲۹۶	۲۰/۵۳۱	۱/۳۱۳
۳/۳۳۰	۲۰/۶۶۱	۱/۴۱۶
۳/۳۶۲	۲۰/۷۷۹	۱/۵۱۹
۳/۴۱۹	۲۰/۸۱۹	۱/۶۲۳
۳/۴۴۶	۲۰/۹۹۱	۱/۷۲۸
۳/۴۷۱	۲۱/۰۸۶	۱/۸۳۳
۳/۵۱۶	۲۱/۱۷۵	۱/۹۳۸

شکل های (۴۶-۴) و (۴۷-۴) نمودار سرعت و انرژی جنبشی در راستای X مربوط به ذره آلومینا و سیلیکون کارباید در موقعیت عمودی تزریق ۰/۰۰۲۵ با قطر ۱۵۰ میکرومتر است.



شکل (۴-۴۶) سرعت ذرات با قطر ۱۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰,۰۰۲۵



شکل (۴-۴۷) انرژی جنبشی ذرات با قطر ۱۵۰ میکرومتر، در موقعیت ۰,۰۰۲۵

در جدول (۴-۶۲) نتایج تزریق پنج ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر که به طور همزمان و به صورت تصادفی تزریق شده‌اند، آمده است.

جدول (۴-۶۲) نتایج تزریق پنج ذره آلومینا به قطر ۵۰ میکرومتر

$K*10^{14}(J)$	$U_x(m/s)$	$Y_j(cm)$	$X(cm)$	$Y_i(cm)$
۳/۹۸	۲۰/۵۸	۰/۲۳	۲/۰۶	۰/۰۹۰۳
۳/۹۴	۱۹/۸۵	۰/۱۸	۲/۰۵	۰/۰۱۳۴
۷/۴۲	۲۸/۰۳	۰/۲۱	۲/۰۵	۰/۱۸۳
۳/۳۵	۱۸/۶۳	۰/۲۸۷	۲/۰۲	۰/۳۳۸
۳/۳۵	۱۸/۶۰	۰/۲۸۸	۲/۰۱	۰/۳۴

فصل ۵:

نتیجه گیری و پیشنهاد

۵-۱- نتیجه گیری

باتوجه به نتایج به دست آمده از شبیه سازی های انجام شده، می توان نتیجه گرفت که، چون در هنگام عبور از نازل سرعت جریان افزایش می یابد، در فاصله مورد بررسی ما، سرعت ذره تحت تاثیر جریان سیال، همواره در حال افزایش است، که در نتیجه، حداکثر سرعت و انرژی جنبشی، در حداکثر فاصله از نازل، رخ می دهد. پس می توان نتیجه گرفت، که بهترین فاصله قرارگیری ایمپلنت، در فرآیند سندبلاست، در فاصله ۲ سانتی متری از نازل است.

۵-۱-۱- تاثیر قطر ذره بر روی سرعت و انرژی جنبشی

برای ذره آلومینا و سیلیکون کارباید، در موقعیت قطری تزریق ذره مشخص، با افزایش قطر ذرات از ۵۰ میکرومتر تا ۱۵۰ میکرومتر سرعت و انرژی جنبشی ذرات کاهش می یابد، به طوریکه سرعت و انرژی جنبشی ذره آلومینا با قطر ۵۰ میکرومتر در فاصله ۲ سانتی متری از نازل به ترتیب برابر $27/12$ متر بر ثانیه و $10^{-14} \times 7/165$ ژول است که این میزان برای ذره با قطر ۱۵۰ میکرومتر به ترتیب $13/097$ متر بر ثانیه و $10^{-14} \times 1/682$ ژول می باشد، که البته این اختلاف برای ذره با قطر ۵۰ میکرومتر بیشتر است، یعنی اختلاف سرعت و انرژی جنبشی بین ذره با قطر ۵۰ میکرومتر و ۱۰۰ میکرومتر بیشتر از اختلاف بین ذره با قطر ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومتر است.

۵-۱-۲- تاثیر دانسیته ذرات بر سرعت و انرژی جنبشی آن

در نمودارهای به دست آمده برای یک قطر و یک موقعیت تزریق مشخص سرعت ذره سیلیکون کارباید نسبت به سرعت ذره آلومینا بیشتر است. به طوریکه سرعت ذره سیلیکون کارباید با قطر ۵۰ میکرومتر در مرکز کانال در فاصله $1/94$ سانتی متر از نازل برابر $37/81$ متر بر ثانیه است و سرعت ذره

آلومینا در فاصله ۱/۹۳۵ سانتی متر از نازل برابر ۳۵/۱۳۸ متر بر ثانیه است. و برای ذره با قطر ۱۰۰ میکرومتر و موقعیت ذره در مرکز کانال سرعت ذره سیلیکون کارباید در فاصله ۱/۸۹۲ سانتی متر از نازل برابر ۲۶/۴۱۷ متر بر ثانیه است و سرعت ذره آلومینا در فاصله ۱/۹۶۵ سانتی متر برابر ۲۴/۳۸ متر بر ثانیه است.

ولی انرژی جنبشی ذره آلومینا نسبت به ذره سیلیکون کارباید در قطر و موقعیت تزریق مشخص بیشتر است. به طوریکه انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید با قطر ۵۰ میکرومتر در مرکز کانال در فاصله ۱/۹۴ سانتی متر از نازل برابر $10^{-14} \times 11/217$ ژول است و انرژی جنبشی ذره آلومینا در فاصله ۱/۹۳۵ سانتی متر از نازل برابر $10^{-14} \times 11/960$ ژول است. و برای ذره با قطر ۱۰۰ میکرومتر و موقعیت ذره در مرکز کانال انرژی جنبشی ذره سیلیکون کارباید در فاصله ۱/۸۹۲ سانتی متر از نازل برابر $10^{-14} \times 5/460$ ژول است و انرژی جنبشی ذره آلومینا در فاصله ۱/۹۶۵ سانتی متر برابر $10^{-14} \times 5/745$ ژول است.

۵-۱-۳- تاثیر موقعیت قطری ذره بر سرعت و انرژی جنبشی

برای ذره با دانسیته و قطر مشخص بیشترین سرعت و انرژی جنبشی ذره در مرکز لوله اتفاق می افتد که به دلیل سرعت بالای جریان در مرکز لوله است، به طوریکه برای ذره آلومینا با قطر ۱۰۰ میکرومتر در فاصله ۱/۹۶۵ سانتی متر از نازل سرعت در مرکز کانال ۲۴/۳۸۴ متر بر ثانیه و در موقعیت ۰/۰۰۳۷۵ برابر ۱۶/۶۷۹ متر بر ثانیه است. علاوه بر این سرعت و انرژی جنبشی در موقعیت های قرینه (مثل ۰/۰۰۰۵ و ۰/۰۰۴۵) برابر است، که به خاطر تقارن جریان سیال در لوله می باشد. همچنین برای فاصله از دیواره ۰/۰۰۰۵ و ۰/۰۰۴۵ سرعت و انرژی جنبشی در موقعیت ۰/۰۰۱۲۵ و ۰/۰۰۳۷۵ بیشتر است، که دلیل آن مسیر حرکت آنها در داخل نازل و پس از خروج از نازل است.

۵-۲- جمع بندی نتایج

- حداکثر سرعت ذره در حداکثر فاصله از نازل رخ می دهد.
- حداکثر انرژی جنبشی ذره نیز در حداکثر فاصله از نازل رخ می دهد.
- حداکثر سرعت برای اندازه های مختلف ذره در ذره با قطر ۵۰ میکرومتر رخ می دهد.
- حداکثر انرژی جنبشی برای اندازه های مختلف ذره در ذره با قطر ۵۰ میکرومتر رخ می دهد.
- حداکثر سرعت ذره در موقعیت تزریق ذره از مرکز کانال رخ می دهد.
- حداکثر انرژی جنبشی ذره در موقعیت تزریق ذره از مرکز کانال رخ می دهد.

۵-۳- پیشنهادها

برای ادامه تحقیق در این زمینه موارد زیر پیشنهاد می گردد:

- ✓ بررسی تاثیر جریان سیال تراکم پذیر بر ذرات.
- ✓ بررسی تاثیر سرعت های مختلف جریان بر ذرات.
- ✓ بررسی تاثیر ذرات غیر کروی در نتایج.
- ✓ بررسی تاثیر نازل هایی با قطرهای متفاوت.

کتابنامه

مراجع

- [1] Elias, Carlos Nelson. "Factors affecting the success of dental implants." INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [2] Esposito, Marco, Jan Hirsch, Ulf Lekholm, and Peter Thomsen. "Differential diagnosis and treatment strategies for biologic complications and failing oral implants: a review of the literature." *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants* 14, no. 4 (1999): 473-490.
- [3] Le Guéhennec, Laurent, Assem Soueidan, Pierre Layrolle, and Yves Amouriq. "Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration." *Dental materials* 23, no. 7 (2007): 844-854.
- [4] Medvedev, A. E., Hoi-Pang Ng, Rimma Lapovok, Y. Estrin, T. C. Lowe, and V. N. Anumalasetty. "Effect of bulk microstructure of commercially pure titanium on surface characteristics and fatigue properties after surface modification by sand blasting and acid-etching." *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 57 (2016): 55-68.
- [5] Ishizawa, Hitoshi, and Makoto Ogino. "Formation and characterization of anodic titanium oxide films containing Ca and P." *Journal of biomedical materials research* 29, no. 1 (1995): 65-72.
- [6] Bronzino, Joseph D. *Biomedical engineering handbook*. Vol. 2. CRC press, 1999.
- [7] Teixeira, L. N., G. E. Crippa, L-P. Lefebvre, P. T. De Oliveira, A. L. Rosa, and M. M. Beloti. "The influence of pore size on osteoblast phenotype expression in cultures grown on porous titanium." *International journal of oral and maxillofacial surgery* 41, no. 9 (2012): 1097-1101.
- [8] Özcan, Mutlu, and Christoph Hämmerle. "Titanium as a reconstruction and implant material in dentistry: advantages and pitfalls." *Materials* 5, no. 9 (2012): 1528-1545.
- [9] Nouri, Alireza, Peter D. Hodgson, and Cui'E. Wen. *Biomimetic porous titanium scaffolds for orthopaedic and dental applications*. InTech, 2010.
- [10] Krishna, B. Vamsi, Susmita Bose, and Amit Bandyopadhyay. "Low stiffness porous Ti structures for load-bearing implants." *Acta biomaterialia* 3, no. 6 (2007): 997-1006.
- [11] Isidor, Flemming. "Influence of forces on peri-implant bone." *Clinical Oral Implants Research* 17, no. S2 (2006): 8-18.
- [12] Wally, Zena J., William van Grunsven, Frederik Claeysens, Russell Goodall, and Gwendolen C. Reilly. "Porous titanium for dental implant applications." *Metals* 5, no. 4 (2015): 1902-1920.
- [13] Cheng, Alice, Aiza Humayun, David J. Cohen, Barbara D. Boyan, and Zvi Schwartz. "Additively manufactured 3D porous Ti-6Al-4V constructs mimic trabecular bone structure and regulate osteoblast proliferation, differentiation and local factor production in a porosity and surface roughness dependent manner." *Biofabrication* 6, no. 4 (2014): 045007.
- [14] Al-Nawas, Bilal, Wilfried Wagner, and Knut A. Grötz. "Insertion torque and resonance frequency analysis of dental implant systems in an animal model with loaded implants." *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants* 21, no. 5 (2006).
- [15] Buser, D., R. K. Schenk, S. Steinemann, J. P. Fiorellini, C. H. Fox, and H. Stich. "Influence of surface characteristics on bone integration of titanium implants. A histomorphometric study in miniature pigs." *Journal of biomedical materials research* 25, no. 7 (1991): 889-902.
- [16] Browne, M., and P. J. Gregson. "Effect of mechanical surface pretreatment on metal ion release." *Biomaterials* 21, no. 4 (2000): 385-392.
- [17] Schneider, G. B., H. Perinpanayagam, M. Clegg, R. Zaharias, D. Seabold, J. Keller, and Clark Stanford. "Implant surface roughness affects osteoblast gene expression." *Journal of dental research* 82, no. 5 (2003): 372-376.
- [18] Tillmanns, Heinrich WS, Joachim S. Hermann, John C. Tiffée, Ann V. Burgess, and Roland M. Meffert. "Evaluation of three different dental implants in ligature-induced peri-implantitis in the

- beagle dog. Part II. Histology and microbiology." *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants* 13, no. 1 (1998): 59-68.
- [19] Zetterqvist, Lars, Sylvan Feldman, Bruce Rotter, Giampaolo Vincenzi, Jan L. Wennström, Andrea Chierico, Renée M. Stach, and James N. Kenealy. "A prospective, multicenter, randomized-controlled 5-year study of hybrid and fully etched implants for the incidence of peri-implantitis." *Journal of periodontology* 81, no. 4 (2010): 493-501.
- [20] Aparicio, Conrado, F. Javier Gil, Carlos Fonseca, Mario Barbosa, and Josep Anton Planell. "Corrosion behaviour of commercially pure titanium shot blasted with different materials and sizes of shot particles for dental implant applications." *Biomaterials* 24, no. 2 (2003): 263-273.
- [21] Rajaei, Ali. "Effect of Chemical and Mechanical Titanium Surface Treatment on fibroblast attachment and viability." *Res Dent Sci* 7, no. 4 (2011): 1-10.
- [22] Guo, Cecilia Yan, Alexander Tin Hong Tang, James Kit Hon Tsoi, and Jukka Pekka Matinlinna. "Effects of different blasting materials on charge generation and decay on titanium surface after sandblasting." *journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 32 (2014): 145-154.
- [23] Al Jabbari, Youssef S., Spiros Zinelis, and George Eliades. "Effect of sandblasting conditions on alumina retention in representative dental alloys." *Dental materials journal* 31, no. 2 (2012): 249-255.
- [24] Novaes Jr, Arthur B., Sérgio LS Souza, Paulo T. de Oliveira, and Adriana MMS Souza. "Histomorphometric analysis of the bone-implant contact obtained with 4 different implant surface treatments placed side by side in the dog mandible." *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants* 17, no. 3 (2002).
- [25] Aparicio, C., D. Rodriguez, and F. J. Gil. "Variation of roughness and adhesion strength of deposited apatite layers on titanium dental implants." *Materials Science and Engineering: C* 31, no. 2 (2011): 320-324.
- [26] Jung, Ui-Won, Ji-Wan Hwang, Da-Yae Choi, Kyung-Seok Hu, Mi-Kyung Kwon, Seong-Ho Choi, and Hee-Jin Kim. "Surface characteristics of a novel hydroxyapatite-coated dental implant." *Journal of periodontal & implant science* 42, no. 2 (2012): 59-63.
- [27] Müller, Wolf-Dieter, Ulrich Gross, Thomas Fritz, Christian Voigt, Peter Fischer, Georg Berger, Sigfried Rogaschewski, and Klaus-Peter Lange. "Evaluation of the interface between bone and titanium surfaces being blasted by aluminium oxide or bioceramic particles." *Clinical Oral Implants Research* 14, no. 3 (2003): 349-356.
- [28] Massaro, C., P. Rotolo, F. De Riccardis, E. Milella, A. Napoli, M. Wieland, M. Textor, N. D. Spencer, and D. M. Brunette. "Comparative investigation of the surface properties of commercial titanium dental implants. Part I: chemical composition." *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 13, no. 6 (2002): 535-548.
- [29] Braceras, I., M. A. De Maeztu, J. I. Alava, and C. Gay-Escoda. "In vivo low-density bone apposition on different implant surface materials." *International journal of oral and maxillofacial surgery* 38, no. 3 (2009): 274-278.
- [30] Cho, Sung-Am, and Kyung-Tae Park. "The removal torque of titanium screw inserted in rabbit tibia treated by dual acid etching." *Biomaterials* 24, no. 20 (2003): 3611-3617.
- [31] Trisi, Paolo, Richard Lazzara, Alberto Rebaudi, Walter Rao, Tiziano Testori, and Stephan S. Porter. "Bone-implant contact on machined and dual acid-etched surfaces after 2 months of healing in the human maxilla." *Journal of periodontology* 74, no. 7 (2003): 945-956.
- [32] Cochran, David L., Daniel Buser, Christian M. Ten Bruggenkate, Dieter Weingart, Thomas M. Taylor, Jean-Pierre Bernard, Françoise Peters, and James P. Simpson. "The use of reduced healing times on ITI® implants with a sandblasted and acid-etched (SLA) surface." *Clinical oral implants research* 13, no. 2 (2002): 144-153.
- [33] Yokoyama, Ken'ichi, Tetsuo Ichikawa, Hiroki Murakami, Youji Miyamoto, and Kenzo Asaoka. "Fracture mechanisms of retrieved titanium screw thread in dental implant." *Biomaterials* 23, no. 12 (2002): 2459-2465.

- [34] Gupta, Ankur, M. Dhanraj, and G. Sivagami. "Status of surface treatment in endosseous implant: a literary overview." *Indian journal of dental research* 21, no. 3 (2010): 433.
- [35] Sul, Young-Taeg, Carina Johansson, Ann Wennerberg, Lee-Ra Cho, Beom-Seok Chang, and Tomas Albrektsson. "Optimum Surface Properties of Oxidized Implants for Reinforcement of Osseointegration: Surface Chemistry, Oxide Thickness, Porosity, Roughness, and Crystal Structure." *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants* 20, no. 3 (2005).
- [36] Davies, John E. "Understanding peri-implant endosseous healing." *Journal of dental education* 67, no. 8 (2003): 932-949.
- [37] Milev, A., G. S. K. Kannangara, and B. Ben-Nissan. "Morphological stability of hydroxyapatite precursor." *Materials Letters* 57, no. 13 (2003): 1960-1965.
- [38] Park, Dong Sam, Myeong-Woo Cho, and Honghee Lee. "Effects of the impact angle variations on the erosion rate of glass in powder blasting process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 23, no. 5-6 (2004): 444-450.
- [39] Bouzid, Said, and Nourredine Bouaouadja. "Effect of impact angle on glass surfaces eroded by sand blasting." *Journal of the European Ceramic Society* 20, no. 4 (2000): 481-488.
- [40] Wilke, H. J., L. Claes, and S. Steinemann. "The influence of various titanium surfaces on the interface shear strength between implants and bone." *Advances in biomaterials* 9 (1990): 309-314.
- [41] Cochran, D. L., R. K. Schenk, A. Lussi, F. L. Higginbottom, and D. Buser. "Bone response to unloaded and loaded titanium implants with a sandblasted and acid-etched surface: a histometric study in the canine mandible." *Journal of biomedical materials research* 40, no. 1 (1998): 1-11.
- [42] Wilke, H. J., L. Claes, and S. Steinemann. "The influence of various titanium surfaces on the interface shear strength between implants and bone." *Advances in biomaterials* 9 (1990): 309-314.
- [43] Cochran, D. L., P. V. Nummikoski, F. L. Higginbottom, J. S. Hermann, S. R. Makins, and D. Buser. "Evaluation of an endosseous titanium implant with a sandblasted and acid-etched surface in the canine mandible: radiographic results." *Clinical Oral Implants Research* 7, no. 3 (1996): 240-252.
- [44] Cochran, D. L., R. K. Schenk, A. Lussi, F. L. Higginbottom, and D. Buser. "Bone response to unloaded and loaded titanium implants with a sandblasted and acid-etched surface: a histometric study in the canine mandible." *Journal of biomedical materials research* 40, no. 1 (1998): 1-11.
- [45] Buser, Daniel, Thomas Nydegger, Hans Peter Hirt, David L. Cochran, and Lutz-Peter Nolte. "Removal torque values of titanium implants in the maxilla of miniature pigs." *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants* 13, no. 5 (1998).
- [46] Buser, Daniel, Thomas Nydegger, Thomas Oxland, David L. Cochran, Robert K. Schenk, Hans Peter Hirt, Daniel Snétivy, and Lutz-Peter Nolte. "Interface shear strength of titanium implants with a sandblasted and acid-etched surface: A biomechanical study in the maxilla of miniature pigs." *Journal of biomedical materials research* 45, no. 2 (1999): 75-83.
- [47] Vegendla, SuryaNarayana Prasad, Geraldine J. Heynderickx, and Guy B. Marin. "Comparison of Eulerian-Lagrangian and Eulerian-Eulerian method for dilute gas-solid flow with side inlet." *Computers & Chemical Engineering* 35, no. 7 (2011): 1192-1199.
- [48] Saidi, M. S., M. Rismanian, M. Monjezi, M. Zendeabad, and S. Fatehiboroujeni. "Comparison between Lagrangian and Eulerian approaches in predicting motion of micron-sized particles in laminar flows." *Atmospheric Environment* 89 (2014): 199-206.
- [49] Caraghiaur, Diana, and Henryk Anglart. "Drop deposition in annular two-phase flow calculated with Lagrangian Particle Tracking." *Nuclear Engineering and Design* 265 (2013): 856-866.
- [50] Liu, Li, and Mostafa Barigou. "Lagrangian particle tracking in mechanically agitated polydisperse suspensions: Multi-component hydrodynamics and spatial distribution." *International Journal of Multiphase Flow* 73 (2015): 80-89.

Abstract:

In this thesis, motion of the particles' Simulation in the fluid flow is done in a one-way coupling in sandblasting dental implants. Simulation has been done to investigate the characteristics of the particles in different situations. Fundamentally, implant must be made of materials which compatible with the human body. Due to a combination of high corrosion resistance Low weight and good mechanical properties, Titanium is ideal. The structure of Medical and dental of traditional titanium is not porous. The dense structure of the implant can lead to a mismatch between Young's modulus implants and natural cortex. The morphology of the implant plays a vital role in the bone-implant surface and can enhance the integration process of implant. Due to the use of non-porous titanium dental implants, pose little contact with the bone's surface. To create more contact area with bone various methods are used. Due to better roughness and more Contact surface, blasting method among other methods was chosen. For numerical simulation OpenFoam software and Lagrangian method were used. To verify the correctness and accuracy of studies Comparison of analytical and numerical methods have been used in Stokes flow. According to simulations carried out in this study it was observed that reducing the particle diameter and move to the center tube for injecting particle leads increasing velocity and its kinetic energy. Also, for alumina particles, velocity is less than silicon carbide particles. But the kinetic energy of alumina is more compared with silicon carbide.

Keywords: Sandblasting, implants, Eulerian-Lagrangian,simulation,openFoam



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering
M.Sc. Thesis in Energy Systems Engineering

Study of fluid flow effects on small spherical particles

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Master of Science in Energy Conversion Engineering

By:
Abdolreza Fallah Zarrin kolaie

Supervisor:
Dr. Ali sarreshtehdari

September 2016