دانشگاه سیستان و بلوچستان

تحصیلات تکمیلی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد در مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

عنوان:

تحلیل عددی و بهینه‌سازی رشد نانولوله‌های کربنی با روش رسوب بخار شیمیایی در فشار اتمسفر

اساتید راهنما:

دکتر امین بهزادمهر

دکتر طاهره فنایی

استاد مشاور:

دکتر حسین آتشی

تحقیق و نگارش:

بابک زاهد

(این پایان‌نامه از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان بهره‌مند شده است)

بهمن ۱۳۹۱

بسمه تعالی

این پایان‌نامه با عنوان **تحلیل عددی و بهینه‌سازی رشد نانولوله‌های کربنی با روش رسوب بخار شیمیایی در فشار اتمسفر** قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد **مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی** توسط دانشجو **بابک زاهد** با راهنمایی اساتید پایان نامه **دکتر امین بهزادمهر و دکتر طاهره فنایی** تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می‌باشد.

بابک زاهد

این پایان نامه ۶ واحد درسی شناخته می شود و در تاریخ ..... توسط هیئت داوران بررسی و درجه ..... به آن تعلق گرفت.

نام و نام خانوادگی	**امضاء**	**تاریخ**

استاد راهنما:

استاد راهنما:

استاد مشاور:

داور ۱:

داور ۲:

نماینده تحصیلات تکمیلی:

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب بابک زاهد تعهد می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان‌نامه پیش از این برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه سیستان و بلوچستان می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: بابک زاهد

امضاء

تقدیم به:

پدرم؛

که وجودش، استواری قدم‌هایم است.

سپاسگزاری

بر خود لازم می دانم از حمایت های دکتر امین بهزادمهر، دکتر طاهره فنایی و دکتر حسین آتشی، که در طول این دوره برای من بیش از استاد بودند، قدردانی کنم.

همچنین از دوستان بزرگوارم، حسین احتشامی و حسن آذرکیش که از مصاحبت و همفکری ایشان بهره بردم و تمامی کسانی که به نحوی در انجام این پایان نامه یاری ام کردند، تشکر می کنم.

چکیده

نانولوله‌های کربنی به دلیل خواص فیزیکی، حرارتی و الکتریکی فوق‌العاده، در طراحی قطعات الکترونیکی و میکروالکترومکانیکی، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از مهمترین تنگناها در تولید این نانوماده، تولید بالا با قیمت موثر می‌باشد که موضوع تحقیق بسیاری از پژوهشگران در دهه اخیر است. یکی از پرکاربردترین روش‌های تولید نانولوله کربنی، روش رسوب بخار شیمیایی (CVD) است که تولید نانولوله کربنی در حجم زیاد را امکان‌پذیر می‌سازد. نرخ تولید در این روش به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. این پژوهش با استفاده از تحلیل عددی، به بررسی و مدل‌سازی پدیده‌های حاکم در تولید نانولوله‌ی کربنی در راکتور CVD می-پردازد. در تحلیل نتایج، علاوه بر نرخ تولید، یکنواختی طول نانولوله‌های کربنی تولید شده نیز به عنوان پارامتری مهم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه تاثیر دمای کوره، نرخ جریان مخلوط گاز ورودی، غلظت هیدروکربن ورودی، فشار، دمای مخلوط گاز ورودی و دمای پیش‌گرمکن، بر میزان تولید نانولوله کربنی مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج تحلیل می‌گردد. در جهت بهینه‌سازی روش مورد استفاده، در مرحله بعد با استفاده از روش تاگوچی، شرایط بهینه برای رسیدن به نرخ تولید بالاتر نانولوله انتخاب می‌شود. نتایج و تحلیل‌های بدست آمده، قابل استفاده در صنایع مرتبط با تولید نانولوله کربنی است و تاثیر بسزایی در فهم رفتار و چگونگی رشد نانولوله کربنی و در نتیجه حل تنگنای این حوزه، مبنی بر تولید بالا با قیمت موثر، خواهد داشت.

کلمات کلیدی: نانولوله کربنی، رسوب بخار شیمیایی، تحلیل عددی، نرخ تولید، بهینه‌سازی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱
پیشگفتار ۲
اهداف پژوهش ۳
روش انجام تحقیق ۴
ساختار پایان‌نامه ۴
فصل دوم: مروری بر پژوهش‌های انجام شده ۶
مقدمه ۷
مروری بر پژوهش‌های مهم اخیر ۷
فصل سوم: بررسی تئوری تحلیلی رشد نانولوله کربنی با روش رسوب بخار شیمیایی.. ۱۲
نانولوله کربنی ۱۳
مکانیزم رشد نانولوله کربنی ۱۴
روش‌های تولید نانولوله کربنی ۱۶
روش رسوب بخار شیمیایی ۱۶
پدیده‌های رسوب بخار شیمیایی ۱۸
مزایا و معایب روش رسوب بخار شیمیایی ۱۹
انواع روش رسوب بخار شیمیایی ۱۹
روش رسوب بخار شیمیایی در فشار اتمسفر ۲۱
فرآیندهای رسوب بخار شیمیایی در فشار اتمسفر ۲۳
روابط حاکم بر پدیده‌های رسوب بخار شیمیایی در فشار اتمسفر ۲۴
جمع‌بندی ۳۲
فصل چهارم: بررسی تئوری عددی رشد نانولوله کربنی با روش رسوب بخار شیمیایی. ۳۳
مقدمه ۳۴
اهمیت روش‌های تحلیل عددی ۳۴
ساده‌سازی‌های مدل ۳۶
معادلات دیفرانسیل جزیی جریان سیال و انتقال حرارت ۳۸

عنوان **صفحه**

معادلات غلظت گونه‌ها و واکنش‌های شیمیایی در فاز گازی و سطحی ۴۰
معادلات غلظت گونه‌ها ۴۰
نفوذ معمولی ۴۱
نفوذ حرارتی ۴۲
واکنش‌های فاز گازی ۴۳
واکنش‌های سطح ۴۳
معادلات نهایی برای غلظت گونه‌ها ۴۴
مکانیزم‌ها و واکنش‌های شیمیایی ۴۵
معادلات حالت ۴۵
شرایط مرزی ۴۵
سطوح بدون واکنش ۴۵
سطوح واکنش‌دهنده ۴۶
جریان ورودی ۴۶
جریان خروجی ۴۷
روش‌های حل عددی ۴۸
گسسته‌سازی معادلات عمومی انتقال با روش حجم محدود ۴۹
جمع‌بندی ۵۰
فصل پنجم: تعریف مسئله و مدل‌سازی رشد نانولوله کربنی با روش رسوب بخار شیمیایی ۵۱
هندسه مسئله ۵۲
تعریف مسئله ۵۲
معادلات حاکم مسئله ۵۳
مکانیزم‌ها و واکنش‌های شیمیایی مسئله ۵۴
روش حل عددی مسئله ۵۶
استقلال شبکه ۵۶
اعتبارسنجی ۶۰
جمع‌بندی ۶۰
فصل ششم: نتایج مدل‌سازی و بحث ۶۲
مطالعه تاثیر دمای کوره بر نرخ رشد و یکنواختی طول نانولوله کربنی ۶۳
مطالعه تاثیر نرخ جریان مخلوط گاز ورودی بر نرخ رشد و یکنواختی طول نانولوله کربنی ۷۱
مطالعه تاثیر غلظت هیدروکربن ورودی بر نرخ رشد و یکنواختی طول نانولوله کربنی ۷۸
مطالعه تاثیر فشار بر نرخ رشد و یکنواختی طول نانولوله کربنی ۸۴

عنوان **صفحه**

مطالعه تاثیر دمای مخلوط گاز ورودی بر نرخ رشد و یکنواختی طول نانولوله کربنی ۹۲
مطالعه تاثیر دمای پیش‌گرمکن بر نرخ رشد و یکنواختی طول نانولوله کربنی ۹۳
جمع‌بندی ۹۵
فصل هفتم: بهینه‌سازی با روش طراحی آزمایش ۱۰۰
طراحی آزمایش ۱۰۱
اهداف طراحی آزمایش ۱۰۱
مفاهیم اولیه ۱۰۲
انواع روش‌های طراحی آزمایش ۱۰۳
روش تاگوچی ۱۰۴
فرآیندهای طراحی آزمایش ۱۰۶
مرحله برنامه‌ریزی ۱۰۶
مرحله اجرایی ۱۰۷
مرحله تجزیه و تحلیل ۱۰۸
تحلیل واریانس ۱۰۸
روش استاندارد ۱۰۹
شاخص دقت ۱۱۰
انتخاب شرایط بهینه ۱۱۱
مسئله حاضر ۱۱۲
طراحی آزمایش‌های پژوهش حاضر ۱۱۲
نتایج ۱۱۴
مطالعه نرخ تولید کلی نانولوله در ناحیه کنترل شده با انتقال جرم ۱۱۵
مطالعه نرخ تولید کلی نانولوله در ناحیه کنترل شده با واکنش ۱۱۹
مطالعه یکنواختی نانولوله در ناحیه کنترل شده با انتقال جرم ۱۲۴
مطالعه یکنواختی نانولوله در ناحیه کنترل شده با واکنش ۱۲۸
جمع‌بندی ۱۳۱
فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۳۲
نتیجه‌گیری ۱۳۳
پیشنهادات ۱۳۵
مراجع ۱۳۶
ضمیمه‌ها ۱۳۹

فهرست جدول ها

عنوان جدول **صفحه**

جدول ۴-۱. گسسته‌سازی معادلات انتقال مدل ۵۰

جدول ۵-۱. ثابت‌های آرنیوس واکنش‌ها ۵۵

جدول ۵-۲. بررسی تاثیر شبکه‌بندی راستای X بر میانگین دما و سرعت محوری روی محور و نرخ تولید کلی نانولوله‌کربنی ۵۸

جدول ۵-۳. بررسی تاثیر شبکه‌بندی راستای X بر پروفیل‌های دما و سرعت محوری در شروع منطقه کوره و نمودار نرخ رشد محلی نانولوله‌کربنی ۵۸

جدول ۵-۴- بررسی تاثیر شبکه‌بندی راستای Y بر میانگین دما و سرعت محوری روی محور و نرخ تولید کلی نانولوله‌کربنی ۶۰

جدول ۵-۵- بررسی تاثیر شبکه‌بندی راستای Y بر پروفیل‌های دما و سرعت محوری در شروع منطقه کوره و نمودار نرخ رشد محلی نانولوله‌کربنی ۶۰

جدول ۷-۱- انتخاب ستون فاکتورها ۱۱۳

جدول ۷-۲- انتخاب سطوح فاکتورها ۱۱۳

جدول ۷-۳- اثر اصلی کل فاکتورهای بررسی شده در ناحیه کنترل شده با انتقال جرم بر تولید نانولوله کربنی ۱۱۶

جدول ۷-۴- تحلیل واریانس کل فاکتورهای بررسی شده در ناحیه کنترل شده با انتقال جرم بر تولید نانولوله ۱۱۶

جدول ۷-۵- تحلیل واریانس در ناحیه کنترل شده با انتقال جرم بر تولید نانولوله با حذف فاکتورهای کم اهمیت ۱۱۸

جدول ۷-۶- بهینه‌سازی نرخ تولید نانولوله کربنی در ناحیه کنترل شده با انتقال جرم ۱۱۸

عنوان جدول **صفحه**

جدول ۷-۷- اثر اصلی فاکتورهای بررسی شده در ناحیه کنترل شده با واکنش بر تولید نانولوله کربنی ۱۲۱

جدول ۷-۸- تحلیل واریانس کل فاکتورهای بررسی شده در ناحیه کنترل شده با واکنش بر تولید نانولوله ۱۲۲

جدول ۷-۹- تحلیل واریانس در ناحیه کنترل شده با واکنش بر تولید نانولوله با حذف فاکتورهای کم اهمیت ۱۲۳

جدول ۷-۱۰- بهینه‌سازی نرخ تولید نانولوله کربنی در ناحیه کنترل شده با واکنش ۱۲۳

جدول ۷-۱۱- اثر اصلی فاکتورهای بررسی شده در ناحیه کنترل شده با انتقال جرم بر یکنواختی طول نانولوله ۱۲۵

جدول ۷-۱۲- تحلیل واریانس کل فاکتورهای بررسی شده در ناحیه کنترل شده با انتقال جرم بر تولید نانولوله ۱۲۶

جدول ۷-۱۳- تحلیل واریانس در ناحیه کنترل شده با واکنش بر یکنواختی طول نانولوله با حذف فاکتورهای کم‌اهمیت ۱۲۶

جدول ۷-۱۴- بهینه‌سازی یکنواختی طول نانولوله کربنی در ناحیه کنترل شده با انتقال جرم ۱۲۷

جدول ۷-۱۵- اثر اصلی فاکتورهای بررسی شده در ناحیه کنترل شده با واکنش بر یکنواختی طول نانولوله ۱۲۹

جدول ۷-۱۶- تحلیل واریانس کل فاکتورهای بررسی شده در ناحیه کنترل شده با واکنش بر یکنواختی نانولوله ۱۳۰

جدول ۷-۱۷- تحلیل واریانس در ناحیه کنترل شده با واکنش بر تولید نانولوله با حذف فاکتورهای کم اهمیت ۱۳۰

جدول ۷-۱۸- بهینه‌سازی یکنواختی طول نانولوله کربنی در ناحیه کنترل شده با واکنش ۱۳۱

فهرست شکل ها

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۳-۱. مدل رشد راس ۱۵

شکل ۳-۲. مدل رشد پایه ۱۶

شکل ۳-۳. طرح شماتیک راکتور رسوب بخار شیمیایی ۲۱

شکل ۳-۴. دو نوع از راکتورهای رسوب بخار شیمیایی در فشار اتمسفر ۲۲

شکل ۳-۵. مراحل فرآیند رسوب بخار شیمیایی در فشار اتمسفر ۲۴

شکل ۳-۶. منطقه سطح زیرلایه و نمایش غلظت‌ها و شارهای گونه‌های واکنش‌دهنده ۲۴

شکل ۳-۷. وابستگی دمایی سرعت رشد ۲۷

شکل ۳-۸. لایه‌مرزی تشکیل شده روی زیرلایه ۲۸

شکل ۳-۹. هندسه تصحیح شده راکتور برای کاهش تاثیرات لایه‌مرزی ۳۰

شکل ۳-۱۰. تاثیر کاهش فشار بر ناحیه‌های دمایی نرخ رشد ۳۱

شکل ۵-۱. هندسه راکتور رسوب بخار شیمیایی افقی ۵۲

شکل ۵-۲. شبکه بندی در ناحیه خروجی راکتور ۵۷

شکل ۵-۳. شبکه بندی در ناحیه ورودی راکتور ۵۷

شکل ۵-۴. بررسی تاثیر افزایش سلول در راستای X، بر روی نرخ تولید کلی نانولوله‌کربنی در منطقه کوره ۵۸

شکل ۵-۵. بررسی تاثیر افزایش سلول در راستای X، بر روی میانگین سرعت محوری و دما روی محور راکتور ۵۸

شکل ۵-۶. بررسی تاثیر افزایش سلول در راستای Y، بر روی نرخ تولید کلی نانولوله‌کربنی در منطقه کوره ۵۹

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۵-۷- بررسی تاثیر افزایش سلول در راستای Y، بر روی میانگین سرعت محوری و دما روی محور راکتور ۵۹

شکل ۵-۸- اعتبارسنجی مدل با کار اندو و همکاران ۶۱

شکل ۶-۱- نرخ رشد محلی نانولوله‌های کربنی در بازه‌ی دمایی ۹۷۵-۱۱۵۰ کلوین در کوره ۶۴

شکل ۶-۲- نرخ رشد محلی نانولوله‌های کربنی در بازه‌ی دمایی ۱۲۰۰-۱۳۰۰ کلوین در کوره ۶۴

شکل ۶-۳- میزان یکنواختی نانولوله‌های کربنی در بازه‌ی دمایی ۹۷۵-۱۱۵۰ کلوین در کوره ۶۵

شکل ۶-۴- میزان یکنواختی نانولوله‌های کربنی در بازه‌ی دمایی ۱۲۰۰-۱۳۰۰ کلوین در کوره ۶۵

شکل ۶-۵- نرخ رشد کلی نانولوله‌های کربنی در مقابل معکوس دما در بازه‌ی دمایی ۹۷۵-۱۱۵۰ کلوین کوره ۶۷

شکل ۶-۶-الف- غلظت گونه‌های داخل راکتور روی محور راکتور در دمای کوره‌ی ۱۰۰۰ کلوین ۶۹

شکل ۶-۶-ب- غلظت گونه‌های داخل راکتور روی محور راکتور در دمای کوره‌ی ۱۰۵۰ کلوین ۶۹

شکل ۶-۶- ج- غلظت گونه‌های داخل راکتور روی محور راکتور در دمای کوره‌ی ۱۱۰۰ کلوین ۶۹

شکل ۶-۶- د- غلظت گونه‌های داخل راکتور روی محور راکتور در دمای کوره‌ی ۱۱۵۰ کلوین ۶۹

شکل ۶-۷- توزیع غلظت اگزایلن، بی‌بعد شده با غلظت ورودی، در راکتور، در دماهای کوره ۷۰

شکل ۶-۸- توزیع دما در راکتور، در دماهای مختلف کوره ۷۰

شکل ۶-۹- نرخ رشد محلی نانولوله‌های کربنی با نرخ‌های جریان ورودی متفاوت در منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم ۷۲

شکل ۶-۱۰- نرخ رشد محلی نانولوله‌های کربنی با نرخ‌های جریان ورودی متفاوت در منطقه دمایی کنترل شده با واکنش سطحی ۷۲

شکل ۶-۱۱- نرخ رشد کلی نانولوله‌های کربنی در مقابل نرخ جریان در دو منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش سطحی ۷۳

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۶-۱۲- میزان یکنواختی نانولوله‌های کربنی در مقابل نرخ جریان در دو منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش سطحی ۷۳

شکل ۶-۱۳- توزیع غلظت اگزایلن، بی‌بعد شده با غلظت ورودی، در راکتور، در نرخ‌های جریان مختلف ۷۴

شکل ۶-۱۴- الف- غلظت گونه‌های داخل راکتور روی محور راکتور در نرخ جریان ۲۳۰ sccm ۷۵

شکل ۶-۱۴- ب- غلظت گونه‌های داخل راکتور روی محور راکتور در نرخ جریان ۵۷۵ sccm ۷۵

شکل ۶-۱۴- ج- غلظت گونه‌های داخل راکتور روی محور راکتور در نرخ جریان ۲۲۹۰ sccm ۷۵

شکل ۶-۱۴- د- غلظت گونه‌های داخل راکتور روی محور راکتور در نرخ جریان ۵۷۳۰ sccm ۷۵

شکل ۶-۱۵- توزیع دما در راکتور، در نرخ‌های جریان متفاوت ۷۶

شکل ۶-۱۶- توزیع سرعت در راکتور، در نرخ‌های جریان متفاوت ۷۷

شکل ۶-۱۷- خطوط جریان در راکتور، در نرخ‌های جریان متفاوت ۷۸

شکل ۶- ۱۸- نرخ رشد محلی نانولوله‌های کربنی با غلظت‌های متفاوت اگزایلن ورودی، در منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم ۷۹

شکل ۶- ۱۹- نرخ رشد محلی نانولوله‌های کربنی با غلظت‌های متفاوت اگزایلن ورودی، در منطقه دمایی کنترل شده با واکنش ۷۹

شکل ۶-۲۰- نرخ رشد کلی نانولوله‌های کربنی در مقابل غلظت ورودی اگزایلن در دو منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش سطحی ۷۹

شکل ۶-۲۱- میزان یکنواختی نانولوله‌های کربنی در مقابل غلظت ورودی اگزایلن در دو منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش سطحی ۷۹

شکل ۶-۲۲- الف- غلظت گونه‌های داخل راکتور روی محور راکتور در غلظت ورودی اگزایلن ۱۰۰۰ ppm در دمای ۹۷۵ درجه کلوین برای کوره ۸۰

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۶-۲۲- ب- غلظت گونه‌های داخل راکتور روی محور راکتور در غلظت ورودی اگزایلن ۲۰۰۰ ppm در دمای ۹۷۵ درجه کلوین برای کوره ۸۰

شکل ۶-۲۲- ج- غلظت گونه‌های داخل راکتور روی محور راکتور در غلظت ورودی اگزایلن ۳۰۰۰ ppm در دمای ۹۷۵ درجه کلوین برای کوره ۸۰

شکل ۶-۲۲- د- غلظت گونه‌های داخل راکتور روی محور راکتور در غلظت ورودی اگزایلن ۴۰۰۰ ppm در دمای ۹۷۵ درجه کلوین برای کوره ۸۰

شکل ۶-۲۳- توزیع غلظت اگزایلن (C_8H_{10})، بی‌بعد شده با غلظت ورودی، در راکتور، در غلظت‌های ورودی مختلف اگزایلن ۸۱

شکل ۶-۲۴- الف- نرخ رشد کلی نانولوله‌های کربنی در مقابل معکوس دما در بازه‌ی دمایی ۹۷۵-۱۱۵۰ کلوین کوره با غلظت ورودی ۲۰۰۰ ppm اگزایلن ۸۳

شکل ۶-۲۴- ب- نرخ رشد کلی نانولوله‌های کربنی در مقابل معکوس دما در بازه‌ی دمایی ۹۷۵-۱۱۵۰ کلوین کوره با غلظت ورودی ۳۷۵۰ ppm اگزایلن ۸۳

شکل ۶-۲۴- ج- نرخ رشد کلی نانولوله‌های کربنی در مقابل معکوس دما در بازه‌ی دمایی ۹۷۵-۱۱۵۰ کلوین کوره با غلظت ورودی ۵۰۰۰ ppm اگزایلن ۸۳

شکل ۶-۲۵- میزان یکنواختی نانولوله‌های کربنی در مقابل دما در بازه‌ی دمایی ۹۷۵-۱۱۵۰ کلوین کوره با غلظت‌های ورودی ۲۰۰۰، ۳۷۵۰ و ۵۰۰۰ ppm اگزایلن ۸۳

شکل ۶- ۲۶- تغییرات شاخص بی‌بعد بازه‌ی عمودی نمودار نرخ تولید کلی در مقابل معکوس دما برای غلظت‌های متفاوت ورودی اگزایلن در دو ناحیه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش ۸۴

شکل ۶- ۲۷- تغییرات شاخص بی‌بعد بازه‌ی افقی نمودار نرخ تولید کلی در مقابل معکوس دما برای غلظت‌های متفاوت ورودی اگزایلن در دو ناحیه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش ۸۴

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۶- ۲۸- نرخ رشد محلی نانولوله‌های کربنی با تغییر فشار، در منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم ۸۵

شکل ۶- ۲۹- نرخ رشد محلی نانولوله‌های کربنی با تغییر فشار، در منطقه دمایی کنترل شده با واکنش ۸۵

شکل ۶-۳۰- نرخ رشد کلی نانولوله‌های کربنی در مقابل فشار در دو منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش سطحی ۸۶

شکل ۶-۳۱- میزان یکنواختی نانولوله‌های کربنی در مقابل فشار در دو منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش سطحی ۸۶

شکل ۶-۳۲- کسر مولی C_8H_{10} در طول راکتور برای فشار ۸۷

شکل ۶-۳۳- کسر مولی C_7H_8 در طول راکتور برای فشار ۸۷

شکل ۶-۳۴- کسر مولی C_6H_6 در طول راکتور برای فشار ۸۸

شکل ۶-۳۵- کسر مولی CH_4 در طول راکتور برای فشار ۸۹

شکل ۶-۳۶- الف- نرخ رشد کلی نانولوله‌های کربنی در مقابل معکوس دما در بازه‌ی دمایی ۹۷۵-۱۱۵۰ کلوین کوره با فشار ۴۰۰ Torr ۹۰

شکل ۶-۳۶- ب- نرخ رشد کلی نانولوله‌های کربنی در مقابل معکوس دما در بازه‌ی دمایی ۹۷۵-۱۱۵۰ کلوین کوره با فشار ۷۶۰ Torr ۹۰

شکل ۶-۳۶- ج- نرخ رشد کلی نانولوله‌های کربنی در مقابل معکوس دما در بازه‌ی دمایی ۹۷۵-۱۱۵۰ کلوین کوره با فشار ۸۰۰ Torr ۹۰

شکل ۶-۳۷- میزان یکنواختی نانولوله‌های کربنی در مقابل دما در بازه‌ی دمایی ۹۷۵-۱۱۵۰ کلوین کوره با فشارهای ۴۰۰، ۷۶۰ و ۸۰۰ Torr ۹۰

شکل ۶-۳۸- نرخ رشد کلی نانولوله‌های کربنی در مقابل معکوس دما در بازه‌ی دمایی ۹۷۵-۱۱۵۰ کلوین کوره با فشار ۴۰۰ و ۸۰۰ Torr ۹۱

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۶- ۳۹- تغییرات شاخص بی‌بعد بازه‌ی عمودی نمودار نرخ تولید کلی در مقابل معکوس دما برای فشارهای متفاوت راکتور در دو ناحیه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش ۹۲

شکل ۶- ۴۰- تغییرات شاخص بی‌بعد بازه‌ی افقی نمودار نرخ تولید کلی در مقابل معکوس دما برای فشارهای متفاوت راکتور در دو ناحیه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش ۹۲

شکل ۶- ۴۱- نرخ رشد محلی نانولوله‌های کربنی با دماهای متفاوت ورودی، در منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم ۹۳

شکل ۶- ۴۲- نرخ رشد محلی نانولوله‌های کربنی با دماهای متفاوت ورودی، در منطقه دمایی کنترل شده با واکنش ۹۳

شکل ۶-۴۳- نرخ رشد کلی نانولوله‌های کربنی در مقابل دمای ورودی در دو منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش سطحی ۹۳

شکل ۶-۴۴- میزان یکنواختی نانولوله‌های کربنی در مقابل دمای ورودی در دو منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش سطحی ۹۳

شکل ۶- ۴۵- نرخ رشد محلی نانولوله‌های کربنی با دماهای متفاوت پیش‌گرمکن، در منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم ۹۴

شکل ۶- ۴۶- نرخ رشد محلی نانولوله‌های کربنی با دماهای متفاوت پیش‌گرمکن، در منطقه دمایی کنترل شده با واکنش ۹۴

شکل ۶-۴۷- نرخ رشد کلی نانولوله‌های کربنی در مقابل دمای پیش‌گرمکن در دو منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش سطحی ۹۴

شکل ۶-۴۸- میزان یکنواختی نانولوله‌های کربنی در مقابل دمای پیش‌گرمکن در دو منطقه دمایی کنترل شده با انتقال جرم و کنترل شده با واکنش سطحی ۹۴

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۷-۱- اثرات اصلی پارامترهای اصلی مورد بررسی بر نرخ تولید کلی نانولوله در ناحیه کنترل شده با انتقال جرم ۱۱۵

شکل۷-۲- نرخ رشد محلی بدست آمده با سطوح بهینه‌ی انتخاب شده برای نرخ تولید نانولوله کربنی در ناحیه کنترل شده با انتقال جرم ۱۱۹

شکل ۷-۳- اثرات اصلی پارامترهای اصلی مورد بررسی بر نرخ تولید کلی نانولوله در ناحیه کنترل شده با واکنش ۱۲۰

شکل۷-۴- نرخ رشد محلی بدست آمده با سطوح بهینه‌ی انتخاب شده برای نرخ تولید نانولوله کربنی در ناحیه کنترل شده با واکنش ۱۲۴

شکل ۷-۵- اثرات اصلی پارامترهای اصلی مورد بررسی بر یکنواختی نانولوله در ناحیه کنترل شده با انتقال جرم ۱۲۴

شکل۷-۶- نرخ رشد محلی بدست آمده با سطوح بهینه‌ی انتخاب شده برای یکنواختی طول نانولوله کربنی در ناحیه کنترل شده با انتقال جرم ۱۲۷

شکل ۷-۷- اثرات اصلی پارامترهای اصلی مورد بررسی بر یکنواختی طول نانولوله در ناحیه کنترل شده با واکنش ۱۲۸

شکل۷-۸- نرخ رشد محلی بدست آمده با سطوح بهینه‌ی انتخاب شده برای یکنواختی طول نانولوله کربنی در ناحیه کنترل شده با واکنش ۱۳۱

فهرست علائم

علامت	نشانه
A	مساحت سطح (m^2)
c	غلظت مولی (برای گاز ایده آل = PR/T) ($mole.m^{-3}$)
C_p	گرمای ویژه مخلوط گاز ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
$\mathbb{D}$	ضریب نفوذ چند جزیی موثر ($m^2.s^{-1}$)
$\mathbb{D}^T$	ضریب نفوذ گرمایی چند جزیی موثر ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
E_A	انرژی فعالسازی ($kJ.mole^{-1}$)
f	کسر مولی گونه ها
$\vec{g}$	بردار شتاب گرانشی ($m.s^{-2}$)
$\mathcal{G}$	نرخ رشد ($m.s^{-1}$)
H	انتالپی مولی ($J.mole^{-1}$)
I	تانسور واحد
$\vec{j}$	بردار شار جرمی نفوذی ($kg.m^{-2}.s^{-1}$)
$\vec{J}$	بردار شار مولی نفوذی ($mole.m^{-2}.s^{-1}$)
k_k	ثابت نرخ واکنش رو به جلو برای k امین واکنش همگن (Homogeneous)
k_{-k}	ثابت نرخ واکنش بازگشت برای k امین واکنش همگن
K	تعداد واکنش های فاز گاز

علامت	نشانه
K_k	ثابت تعادل برای k امین واکنش فاز گازی
L	تعداد واکنش های سطحی
m	جرم متوسط مولی $(kg.mole^{-1})$
M	تعداد گونه های سطح
$\vec{n}$	بردار یکه سرعت عمود بر دهانه جریان ورودی یا خروجی یا دیوار
N	تعداد گونه های گازی
N_A	عدد آووگادرو $(6.024\times10^{23}\ mole^{-1})$
P	فشار (Pa)
P^0	فشار استاندارد (Pa) (1.013×10^5)
Q	نرخ جریان حجمی در شرایط استاندارد
R	ثابت جهانی گازها $(8.314\ J.mole.K^{-1})$
$\mathcal{R}_k$	نرخ واکنش رو به جلو K امین واکنش فاز گازی $(mole.m^{-3}.s^{-1})$
$\mathcal{R}_{-k}$	نرخ واکنش بازگشت K امین واکنش فاز گازی $(mole.m^{-3}.s^{-1})$
$\mathcal{R}_l^s$	نرخ واکنش برای l امین واکنش سطح $(mole.m^{-2}.s^{-1})$
t	زمان (s)
T	دما (K)
T^0	دمای استاندارد (298.15 K)
$\vec{V}$	بردار سرعت
$\|\|x\|\|$	$0.5(\|x\|+x)$