

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه حکیم سنواری

دانشکده مهندسی

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

ارزیابی روش میانگین گیری شعاع قطرات در مدل سازی لاگرانژی-ویلری جریان تراکم پذیر و فراصوت بخار تر

استاد راهنما :

دکتر احسان امیری راد

استاد مشاور:

دکتر محمدرضا مه پیکر

پژوهشگر :

ماکان طالبی صومعه سرائی

بهمن ۱۳۹۳



دانشگاه حکیم سبزواری

بسمه تعالی

صورت جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

با تلاوت آیاتی چند از کلام ا... مجید جلسه دفاع از پایان نامه ماکان طالبی صومعه سرائی، دانشجوی رشته مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، به شماره دانشجویی ۹۱۲۳۸۰۱۰۶۰ با عنوان ارزیابی روش میانگین گیری شعاع قطرات در مدل سازی لاگرانژی-اویلری جریان تراکم پذیر و فراصوت بخار تر، در ساعت مورخه در محل دانشکده فنی و مهندسی تشکیل گردید.

پس از استماع گزارش ارائه شده توسط دانشجو و استاد راهنما، هیات داوران و حاضران سئوالاتی را مطرح و آقای ماکان طالبی صومعه سرائی به دفاع از موضوع پرداخت و به سئوالات آنها پاسخ گفت.

سپس پایان نامه توسط هیات داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و نمره برابر درجه برای آن تعیین گردید.

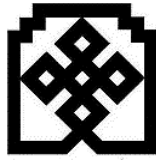
به این ترتیب ضمن تصویب پایان نامه مزبور از این تاریخ آقای ماکان طالبی صومعه سرائی به عنوان کارشناس ارشد در رشته مهندسی مکانیک شناخته می شود .

ردیف	نام و نام خانوادگی	سمت	امضا
۱	دکتر احسان امیری راد	استاد راهنما	
۲	دکتر اسماعیل لکزیان	استاد داور	
۳	دکتر محمدرضا مه پیکر	استاد مشاور	
۴	دکتر امیر بک خوشنویس	نماینده تحصیلات تکمیلی	

نام و نام خانوادگی وامضای مدیر گروه

رونوشت

- ۱- معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه جهت اطلاع
- ۲- معاونت پژوهشی دانشگاه جهت اطلاع
- ۳- آموزش دانشکده فنی و مهندسی جهت درج در پرونده دانشجو
- ۴- دانشجو



دانشگاه حکیم سبزواری

سوگند نامه دانش آموختگان دانشگاه حکیم سبزواری

به نام خداوند جان و خرد

کزین برتر اندیشه بر نگذرد

اینک که به خواست آفریدگار پاک، کوشش خویش و بهره گیری از دانش استادان و سرمایه های مادی و معنوی این مرز و بوم، توشه ای از دانش و خرد گردآورده ام، در پیشگاه خداوند بزرگ سوگند یاد می کنم که در به کارگیری دانش خویش، همواره بر راه راست و درست گام بردارم. خداوند بزرگ، شما شاهدان، دانشجویان و دیگر حاضران را به عنوان داورانی امین گواه می گیرم که از همه دانش و توان خود برای گسترش مرزهای دانش بهره گیرم و از هیچ کوششی برای تبدیل جهان به جایی بهتر برای زیستن، دریغ نورزم. پیمان می بندم که همواره کرامت انسانی را در نظر داشته باشم و همنوعان خود را در هر زمان و مکان تا سر حد امکان یاری دهم. سوگند می خورم که در به کارگیری دانش خویش به کاری که با راه و رسم انسانی، آیین پرهیزگاری، شرافت و اصول اخلاقی برخاسته از ادیان بزرگ الهی، به ویژه دین مبین اسلام، مبیانت دارد دست نیازم. همچنین در سایه اصول جهان شمول انسانی و اسلامی، پیمان می بندم از هیچ کوششی برای آبادانی و سرافرازی میهن و هم میهنانم فروگذاری نکنم و خداوند بزرگ را به یاری طلبم تا همواره در پیشگاه او و در برابر وجدان بیدار خویش و ملت سرافراز، بر این پیمان تا ابد استوار بمانم.

نام و نام خانوادگی و امضای دانشجو

تاییدیه ی صحت و اصالت نتایج

بسمه تعالی

اینجانب ماکان طالبی صومعه سرائی به شماره دانشجویی ۹۱۲۳۸۰۱۰۶۰ رشته مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می نمایم که کلیه نتایج این پایان نامه حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف و موارد نسخه برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده ام در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مولفان و مصنفان، قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی ضوابط و مقررات آموزشی پژوهشی و انضباطی...) با اینجانب رفتار خواهد شد. و حق هر گونه اعتراض در خصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می نمایم. در ضمن مسئولیت هر گونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضا:

مجوز بهره برداری از پایان نامه

بهره برداری از این پایان نامه در چهار چوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می شود بلامانع است:

- بهره برداری از این پایان نامه برای همگان بلامانع است.
- بهره برداری از این پایان نامه با اخذ مجوز از استاد راهنما بلامانع است.
- بهره برداری از این پایان نامه تا تاریخ ممنوع است.

استاد راهنما:

تاریخ:

امضاء:

تقدیم به پدر و مادر مهربان و زحمتکشم

و برادران عزیزم.

چو بخشایش پاک یزدان بود دم آتش و آب یکسان بود

حکیم ابوالقاسم فردوسی

گویی شوی بی دست و پا، چوگان او پایت شود در پیش سلطان می دوی، کین سر ربانی است این

آن آب باز آمد به جو، بر سنگ زن اکنون سبو سجده کن و چیزی مگو، کین بزم سلطانی است این

مولوی

امروز نه آغاز و نه انجام جهان است ای بس غم و شادی که پس پرده نهان است

گر مرد رهی غم مخور از دوری و دیری دانی که رسیدن هنر گام زمان است

ه. الف. سایه

با سپاس فراوان از دکتر احسان امیری راد و دکتر محمدرضا مه پیکر که با راهنمایی و مشاوره ایشان این تحقیق انجام شده است.

همچنین سپاسگزارم از دکتر اسماعیل لکزیان که درس‌های مباحث ویژه (جریان دوفازی) و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) را در خدمت ایشان گذرانده و برای انجام این پایان نامه آماده شدم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	چکیده
۲.....	فصل اول مقدمه
۳.....	۱-۱. پیشگفتار
۵.....	۲-۱. جریان چگالشی بخار در نازل همگرا-واگرا
۶.....	۳-۱. اهداف این رساله
۸.....	فصل دوم مروری بر مطالعات انجام شده
۹.....	۱-۲. تاریخچه مطالعات جریان دوفازی
۱۰.....	۲-۲. مروری بر مطالعات پدیده جوانه‌زایی و مدلسازی چگالش
۱۱.....	۳-۲. مروری بر مطالعات مدلسازی رشد قطره
۱۲.....	۴-۲. مروری بر مطالعات روش‌های میانگین‌گیری قطرات
۱۳.....	۵-۲. مروری بر تحقیقات آزمایشگاهی جریان چگالشی بخار
۱۴.....	۶-۲. مروری بر روش‌های حل جریان چگالشی بخار
۱۸.....	فصل سوم معادله جوانه‌زایی
۱۹.....	۱-۳. پیشگفتار
۲۰.....	۲-۳. نظریه جوانه‌زایی کلاسیک
۲۰.....	۳-۳-۱-۱-۲. جنبه ترمودینامیکی پدیده جوانه‌زایی

- ۲۲..... ۲-۱-۲-۳. جنبه سینماتیکی پدیده جوانه‌زایی
- ۲۸..... ۳-۱-۲-۲. نتایج نظریه جوانه‌زایی کلاسیک
- ۲۹..... ۳-۳. اصلاحات معادله جوانه‌زایی کلاسیک
- ۲۹..... ۱-۳-۳. اصلاح فشار معادله کلاسیک
- ۲۹..... ۱-۱-۳-۳. اصلاح کورتنی
- ۳۰..... ۲-۱-۳-۳. اصلاح گیرشیک-چیو
- ۳۱..... ۲-۳-۳. اصلاح دمای معادله کلاسیک
- ۳۱..... ۱-۲-۳-۳. اصلاح کانتروویتز
- ۳۱..... ۲-۲-۳-۳. اصلاح ولک
- ۳۲..... ۴-۳. مدل جوانه‌زایی هیل
- ۳۴..... فصل چهارم مدل رشد قطره
- ۳۵..... ۱-۴. پیشگفتار
- ۳۵..... ۲-۴. دسته‌بندی رژیم‌های جریان بر اساس عدد ندسن
- ۳۶..... ۳-۴. انواع مدل‌های رشد قطره
- ۳۷..... ۱-۳-۴. مدل هرتز-ندسن
- ۳۷..... ۲-۳-۴. مدل هیل
- ۳۸..... ۳-۳-۴. مدل وگنر
- ۳۸..... ۴-۳-۴. مدل گرماسی
- ۳۹..... ۵-۳-۴. مدل باختر-زیدی

۳۹	۶-۳-۴. مدل هرتز-ندسن-اسمولدرز
۴۰	۷-۳-۴. مدل کالمالا
۴۰	۸-۳-۴. مدل یانگ
۴۱	۹-۳-۴. مدل پترز-پایکرت
۴۱	۴-۴. معادلات رشد قطره در مدل باختر - زیدی
۴۲	۱-۴-۴. انتقال جرم
۴۳	۲-۴-۴. انتقال انرژی
۴۴	فصل پنجم میانگین گیری شعاع قطرات
۴۵	۱-۵. پیشگفتار
۴۵	۲-۵. روش های محاسباتی تک شعاعی و چندشعاعی
۴۶	۳-۵. محاسبه سطح و حجم کل قطرات در روش محاسباتی تک شعاعی
۴۷	۴-۵. روش های میانگین گیری شعاع قطرات
۴۷	۱-۴-۵. روش میانگین سطحی
۴۸	۲-۴-۵. روش میانگین حجمی
۴۹	۳-۴-۵. روش میانگین ساوتر
۵۱	فصل ششم روش حل لاگرانژی-اویلری
۵۲	۱-۶. پیشگفتار
۵۲	۲-۶. دلایل استفاده از مدل لاگرانژی-اویلری یک بعدی
۵۳	۳-۶. معادلات دینامیک گاز حاکم بر جریان
۵۳	۱-۳-۶. معادله بقای جرم
۵۴	۲-۳-۶. معادله حالت فاز بخار

۵۵	۳-۳-۶. عدد ماخ
۵۵	۴-۳-۶. معادله بقای مومنتوم
۵۶	۵-۳-۶. معادله بقای انرژی
۵۶	۴-۶. فرضیات به کار رفته در تنظیم معادلات دینامیک گاز
۵۷	۵-۶. روند حل ترکیبی در روش لاگرانژی-اویلری
۵۸	۶-۶. روش حل معادلات حاکم در برنامه کامپیوتری
۵۸	۱-۶-۶. حل دستگاه معادلات دینامک گاز در حالت دوفازی
۵۹	۲-۶-۶. حل دستگاه معادلات دینامک گاز در حالت تکفازی
۶۰	۳-۶-۶. انتگرال گیری معادلات جریان در نقطه صوتی
۶۱	۷-۶. محاسبه دبی جرمی عبور کننده از شیپوره
۶۳	فصل هفتم بررسی نتایج و نتیجه گیری
۶۴	۱-۷. پیشگفتار
۶۴	۲-۷. نازل های مورد بررسی
۶۴	۱-۲-۷. نازل های یانگ
۶۶	۲-۲-۷. نازل های مور
۶۷	۳-۷. معادلات مختلف جوانه زایی
۷۳	۴-۷. روش های مختلف میانگین گیری
۷۹	۵-۷. مقایسه کمی توزیع فشار و شعاع محاسباتی با داده های تجربی
۷۹	۱-۵-۷. انحراف معیار توزیع فشار محاسباتی

- ۲-۵-۷. خطای نسبی شعاع محاسباتی ۸۰
- ۶-۷. مقایسه معیارهای کمی مورد استفاده جهت بررسی نتایج ۸۰
- ۷-۷. نتیجه گیری ۹۰
- ۸-۷. ارائه پیشنهادهایی برای آینده ۹۲
- منابع ۹۳
- پیوست الف. هندسه‌ها و شرایط مرزی مورد استفاده از نازل یانگ [۲] ۱۰۱
- الف-۱. نازل A یانگ ۱۰۱
- الف-۲. نازل B یانگ ۱۰۵

فهرست علائم و نشانه‌ها

مساحت سطح مقطع جریان	A
دسته متشکل از g مولکول	A_g
ضرایب ویريال	B_1, B_2, B_3, B_4, B_5
سرعت صوت	C
ضریب چگالش دسته g ام	C_g
ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت	C_p
ضریب دیفیوژن	D
قطر هیدرولیکی	D_e
ضریب تبخیر دسته g ام	E_g
ضریب صطکاک	f
تعداد مولکول‌های موجود در دسته g ام، در شرایط غیر تعادلی	f_g
انتالپی فاز بخار	h_G
انتالپی فاز مایع	h_L
به‌عنوان نرخ خالص تبدیل جوانه با تعداد g به جوانه با تعداد $g + 1$	I_g
نرخ جوانه‌زایی (نرخ تشکیل قطرات بر واحد حجم و زمان)	J
ثابت بولتزمن	k
عدد ندسن	Kn
گرمای نهان چگالش	L

مسیر آزاد متوسط مولکولی	\bar{l}
جرم یک قطره	m
عدد ماخ	Ma
جرم فاز بخار	M_G
جرم فاز مایع	M_L
تعداد جوانه‌های ایجاد شده با اندازه g مولکول	N_g
عدد نوسلت	Nu
فشار	P
فشار بخار	P_G
فشار اشباع بخار در دمای T_G	$P_s(T_G)$
ضریب چگالش	q_c
شعاع بحرانی	r^*
شعاع بحرانی	r_c
ثابت جهانی گازها	R
نسبت فوق اشباع	S
عدد اشمیت	Sc
محیط تر شده کانال	S_p
دمای فاز بخار	T_G
دمای فاز مایع	T_L

دمای اشباع در فشار P_G	$T_s(P_G)$
سرعت فاز بخار	U_G
سرعت فاز مایع	U_L
کسر تری	w
عدد ماخ به توان دو	Z
عدد زلدویچ	Z
چگالی فاز بخار	ρ_G
چگالی فاز مایع	ρ_l
ضریب رسانش	κ
تنش برشی در دیواره	τ_w
کسر خشکی	ζ
انرژی آزاد گیس	ΔG
درجه فوق اشباع	ΔT
کشش سطحی	Σ

فهرست جداول

- جدول ۷-۱. شرایط مرزی مورد استفاده از نازل A یانگ [۲] ۶۵
- جدول ۷-۲. شرایط مرزی مورد استفاده از نازل B یانگ [۲] ۶۶
- جدول ۷-۳. شرایط مرزی نازل‌های A و B مور [۳] ۶۷
- جدول ۷-۴. انحراف معیار *۱۰۰ محاسبه شده برای توزیع فشار معادلات مختلف جوانه‌زایی در ترکیب با روش میانگین سطحی، در نازل‌های یانگ [۲] ۸۶
- جدول ۷-۵. انحراف معیار *۱۰۰ محاسبه شده برای توزیع فشار معادلات مختلف جوانه‌زایی در ترکیب با روش میانگین حجمی، در نازل‌های یانگ [۲] ۸۷
- جدول ۷-۶. انحراف معیار *۱۰۰ محاسبه شده برای توزیع فشار معادلات مختلف جوانه‌زایی در ترکیب با روش میانگین ساوتر، در نازل‌های یانگ [۲] ۸۸
- جدول ۷-۷. انحراف معیار توزیع فشار *۱۰۰، و درصد خطای نسبی شعاع محاسباتی در نازل A مور [۳] ۸۹
- جدول ۷-۸. انحراف معیار توزیع فشار *۱۰۰، و درصد خطای نسبی شعاع محاسباتی در نازل B مور [۳] ۸۹
- جدول ۷-۹. میانگین درصد خطای نسبی شعاع محاسباتی روش‌های گوناگون میانگین‌گیری در ترکیب با معادلات جوانه‌زایی تأیید شده، در نازل‌های مور [۳] ۹۰
- جدول ۷-۱۰. متوسط انحراف معیار *۱۰۰ برای توزیع فشار روش‌های گوناگون میانگین‌گیری در ترکیب با معادلات جوانه‌زایی تأیید شده، برای ۱۸ مورد تجربی [۳و۲] ۹۰
- جدول الف ۱. نقاط هندسی نازل A یانگ ۱۰۲
- جدول الف ۲. نتایج تجربی توزیع فشار نازل A یانگ در شرایط مرزی مختلف ۱۰۳
- جدول الف ۳. نقاط هندسی نازل B یانگ ۱۰۵
- جدول الف ۴. نتایج تجربی توزیع فشار نازل B یانگ در شرایط مرزی مختلف ۱۰۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ الف. نمودار توزیع نسبت فشار، و ب. نمودار انتالپی بر حسب انتروپی در طول نازل ۵
- شکل ۱-۳. نمودار حالت بخار آب فوق اشباع ۱۹
- شکل ۲-۳. نمودار دما بر حسب انتروپی تشکیل قطره آب از بخار ۲۱
- شکل ۱-۴. مدل رشد قطره لانگیمور ۳۶
- شکل ۱-۶. المان حجم کنترل سیال ۵۲
- شکل ۱-۷. هندسه نازل A یانگ [۲] ۶۵
- شکل ۲-۷. هندسه نازل B یانگ [۲] ۶۵
- شکل ۳-۷. هندسه نازل A مور [۳] ۶۶
- شکل ۴-۷. هندسه نازل B مور [۳] ۶۷
- شکل ۵-۷. توزیع فشار حاصل از معادله کلاسیک و اعمال اصلاحات معادله جوانه‌زایی بر آن، در ترکیب با روش میانگین ساوتر در شرط مرزی و هندسه نازل B26 یانگ، $P_0=150.6\text{kPa}$ ، $T_0=409.3\text{K}$ [۲] ۶۸
- شکل ۶-۷. درجه فوق اشباع حاصل از معادله کلاسیک و اعمال اصلاحات معادله جوانه‌زایی بر آن، در ترکیب با روش میانگین ساوتر در شرط مرزی و هندسه نازل B26 یانگ، $P_0=150.6\text{kPa}$ ، $T_0=409.3\text{K}$ [۱] ۶۹
- شکل ۷-۷. نرخ جوانه‌زایی حاصل از معادله کلاسیک و اعمال اصلاحات معادله جوانه‌زایی بر آن، در ترکیب با روش میانگین ساوتر در شرط مرزی و هندسه نازل B26 یانگ، $P_0=150.6\text{kPa}$ ، $T_0=409.3\text{K}$ [۱] ۶۹
- شکل ۸-۷. تعداد قطرات بر واحد زمان حاصل از معادله کلاسیک و اعمال اصلاحات معادله جوانه‌زایی بر آن، در ترکیب با روش میانگین ساوتر در شرط مرزی و هندسه نازل B26 یانگ، $P_0=150.6\text{kPa}$ ، $T_0=409.3\text{K}$ [۱] ۷۰
- شکل ۹-۷. توزیع کسر تری حاصل از معادله کلاسیک و اعمال اصلاحات معادله جوانه‌زایی بر آن، در ترکیب با روش میانگین ساوتر در شرط مرزی و هندسه نازل B26 یانگ، $P_0=150.6\text{kPa}$ ، $T_0=409.3\text{K}$ [۱] ... ۷۰

- شکل ۷-۱۰. شعاع میانگین حاصل از معادله کلاسیک و اعمال اصلاحات معادله جوانه‌زایی بر آن، در ترکیب با روش میانگین ساوتر در شرط مرزی و هندسه نازل B26 یانگ، $P_0=150.6\text{kPa}$ ، $T_0=409.3\text{K}$ [۱] ۷۱
- شکل ۷-۱۱. عدد ماخ حاصل از معادله کلاسیک و اعمال اصلاحات معادله جوانه‌زایی بر آن، در ترکیب با روش میانگین ساوتر در شرط مرزی و هندسه نازل B26 یانگ، $P_0=150.6\text{kPa}$ ، $T_0=409.3\text{K}$ [۱] ۷۲
- شکل ۷-۱۲. دمای فاز بخار حاصل از معادله کلاسیک و اعمال اصلاحات معادله جوانه‌زایی بر آن، در ترکیب با روش میانگین ساوتر در شرط مرزی و هندسه نازل B26 یانگ، $P_0=150.6\text{kPa}$ ، $T_0=409.3\text{K}$ [۱] ۷۲
- شکل ۷-۱۳. توزیع فشار حاصل از معادله هیل و اعمال اصلاحات معادله جوانه‌زایی بر آن، در ترکیب با روش میانگین ساوتر در شرط مرزی و هندسه نازل A5 یانگ، $P_0=142.4\text{kPa}$ ، $T_0=404\text{K}$ [۲] ۷۳
- شکل ۷-۱۴. مقایسه شعاع محاسباتی ناشی از روش‌های مختلف میانگین‌گیری در ترکیب با اصلاح گیرشیک-چیو بر مدل جوانه‌زایی هیل در نازل A مور [۳] ۷۴
- شکل ۷-۱۵. مقایسه شعاع محاسباتی ناشی از روش‌های مختلف میانگین‌گیری در ترکیب با اصلاح گیرشیک-چیو بر مدل جوانه‌زایی هیل در نازل B مور [۳] ۷۴
- شکل ۷-۱۶. مقایسه تعداد قطرات بر واحد زمان ناشی از روش‌های مختلف میانگین‌گیری در ترکیب با اصلاح گیرشیک-چیو بر مدل جوانه‌زایی هیل در نازل A مور [۳] ۷۵
- شکل ۷-۱۷. نرخ جوانه‌زایی ناشی از روش‌های مختلف میانگین‌گیری در ترکیب با اصلاح گیرشیک-چیو بر مدل جوانه‌زایی هیل در نازل A مور [۳] ۷۶
- شکل ۷-۱۸. درجه فوق سردی ناشی از روش‌های مختلف میانگین‌گیری در ترکیب با اصلاح گیرشیک-چیو بر مدل جوانه‌زایی هیل در نازل A مور [۳] ۷۶
- شکل ۷-۱۹. کسر تری ناشی از روش‌های مختلف میانگین‌گیری در ترکیب با اصلاح گیرشیک-چیو بر مدل جوانه‌زایی هیل در نازل A مور [۳] ۷۷
- شکل ۷-۲۰. مقایسه فشار تجربی با توزیع فشار ناشی از روش‌های مختلف میانگین‌گیری در ترکیب با اصلاح گیرشیک-چیو بر مدل جوانه‌زایی هیل در نازل A مور [۳] ۷۸

شکل ۷-۲۱. دمای فاز بخار ناشی از روش‌های مختلف میانگین‌گیری در ترکیب با اصلاح گیرشیک-چیو بر مدل جوانه‌زایی هیل در نازل A مور [۳] ۷۸

شکل ۷-۲۲. عدد ماخ ناشی از روش‌های مختلف میانگین‌گیری در ترکیب با اصلاح گیرشیک-چیو بر مدل جوانه‌زایی هیل در نازل A مور [۳] ۷۹

شکل ۷-۲۳. مقایسه توزیع فشار تجربی با توزیع فشار حاصل از معادله هیل و اعمال اصلاحات معادله جوانه‌زایی بر آن، در ترکیب با روش میانگین ساوتر در شرط مرزی و هندسه نازل A5 یانگ، $T_0=404K$ ، $P_0=142.4kPa$ [۲] ۸۱

شکل ۷-۲۴. مقایسه توزیع فشار تجربی با توزیع فشار حاصل از معادله کلاسیک و اعمال اصلاحات معادله جوانه‌زایی بر آن، در ترکیب با روش میانگین ساوتر در شرط مرزی و هندسه نازل B26 یانگ، $T_0=409.3K$ ، $P_0=150.6kPa$ [۲] ۸۱

شکل ۷-۲۵. مقایسه شعاع تجربی با شعاع محاسباتی ناشی از روش‌های مختلف میانگین‌گیری در ترکیب با اصلاح گیرشیک-چیو بر مدل جوانه‌زایی هیل در نازل A مور [۳] ۸۲

شکل ۷-۲۶. مقایسه شعاع تجربی با شعاع محاسباتی ناشی از روش‌های مختلف میانگین‌گیری در ترکیب با اصلاح گیرشیک-چیو بر مدل جوانه‌زایی هیل در نازل B مور [۳] ۸۳

شکل الف ۱. هندسه نازل یانگ [۲] ۱۰۲