

شبیه سازی عددی جت اجکتور مادون صوت

محسن طاهریان^{۱*}، سیف اله سعدالدین^۲ و محمد صادق ولی پور^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: اجکتور، زاویه واگرایی دیفیوزر، قطر خروجی دیفیوزر، راندمان اجکتور، شبیه سازی عددی.</p>	<p>یکی از ساده ترین وسایلی که برای مکش و پمپ کردن سیال بکار می روند جت اجکتورها هستند. در این تحقیق با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به شبیه سازی عددی جت اجکتور مادون صوت هوا-هوا پرداخته شده است. معادلات ناویراستوکس، پیوستگی و انرژی با شرایط مرزی بدون لغزش در دیواره حاکم می باشند. شبیه سازی عددی به صورت سه بعدی صورت گرفته و جریان پایا، لزج و مغشوش فرض شده است. به منظور شبیه سازی اغتشاشات از معادلات ناویراستوکس میانگین گیری شده رینولدز $K-\epsilon$ RNG، $K-\epsilon$ Standard و $K-\omega$ Realizable SST استفاده شده است. ضریب اجکتینگ برای نسبت های فشار متفاوت پارامتر موثری بود که از آن برای صحت گذاری نتایج عددی استفاده گردید. میزان خطا برای مدل توربولانسی $K-\epsilon$ RNG کمینه بوده لذا در ادامه، از این مدل به منظور شبیه سازی اغتشاشات استفاده شده است. پس از معتبر سازی نتایج به بررسی پارامتر هندسی تأثیر قطر خروجی دیفیوزر و زاویه واگرایی بر کارایی جت اجکتور مادون صوت هوا-هوا پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد که علاوه بر زاویه واگرایی، قطر خروجی دیفیوزر تأثیر قابل توجهی بر عملکرد و راندمان این نوع دستگاهها دارد.</p>

۱- مقدمه

جت اجکتور، که اغلب جت پمپ (هنگامی که سیال ورودی مایع باشد) نیز خوانده می شود، وسیله ای است که بدون هرگونه استفاده از تجهیزات متحرک، جریان فشار پایین را به داخل جت اجکتور توسط جریان پرفشار ورودی مکش می کند. این وسیله به طور گسترده ای در صنایع شیمیایی به خصوص بخار و هوای فشرده، تخلیه گازهای خورنده و دود (شکل ۱)، خروج هوا از کندانسور،

تبخیر، خلأ، تقطیر و تبلور، تبرید، تصفیه، خشک کردن، تهویه هوا، پمپاژ حجم زیادی از هوا یا بخار در فشار پایین [۱]، اختلاط هوا و گاز قابل اشتعال در کوره ها، تقویت رانش برای جت آگزوز هواپیما، کاهش سر و صدا از آگزوز موتور جت، سیستم نیروی محرکه هلی کوپتر، ایجاد خلأ عمیق با اجکتورهای هوای طبقه ای، و به عنوان تقویت کننده در قسمت مکش پمپ های خلأ حلقه مایع (شکل ۲) مورد استفاده قرار می گیرند [۲]. آن ها به دلیل نداشتن هیچ گونه قطعه متحرک مکانیکی هزینه کمتری دارند، برای سیالات قابل دسترس مورد استفاده قرار می گیرند و قابل اطمینان در سرویس دهی هستند.

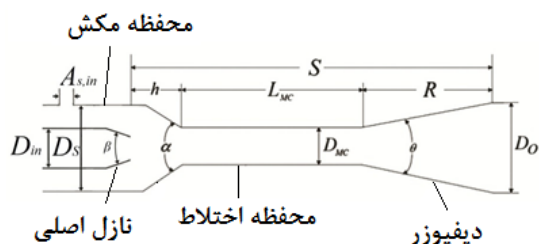
* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.taherian@gmail.com

۱. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان، گروه مکانیک، سمنان، ایران

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۳. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

استاتیک و کاهش تلفات در ورودی مورد استفاده قرار می گیرند.



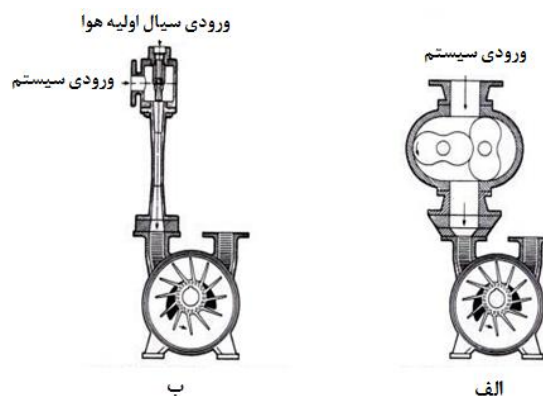
شکل ۳- طرحواره جت اجکتور

نحوه عملکرد جت اجکتور انجام عمل مکش بر اثر تغییر مومنتوم می باشد. یعنی ابتدا سیال فشار بالا که به آن سیال اولیه گویند به داخل نازل هدایت می شود و فشار آن تا حدی کاهش می یابد. در نازل هد فشار سیال تبدیل به هد سرعت و افزایش مومنتوم سیال اولیه می شود. در واقع جریان خروجی از نازل فشار بسیار پایینی را در خروجی نازل ایجاد می کند که این امر خود باعث ایجاد فشار پایین در بخش اختلاط می شود. با توجه به فشار بالای سیال ثانویه ورودی و اختلاف آن با جریان خروجی از نازل، سیال ثانویه به داخل مکیده می شود. در نتیجه سیال ثانویه با سیال اولیه داخل اجکتور ترکیب می شود و در ادامه همراه با سیال اولیه از قسمت تخلیه به بیرون تخلیه می گردد. در واقع هرچه سرعت سیال خروجی از نازل بیشتر باشد گرادیان فشار محوری ایجاد شده بزرگ تر بوده و قدرت مکش افزایش می یابد. بنابراین این سرعت بستگی به میزان خلأ لازم دارد.

ایده استفاده از اجکتور برای اولین بار در سال ۱۸۵۲ توسط جمیز جان عملی شد [۲]. کرل به بررسی پارامترهایی نظیر همگرایی، واگرایی، طول و قطر بخش دیفیوزر پرداخت و نمودارهایی برای طراحی این نوع دستگاه ها ارائه داد [۱]. ریفات و عمر [۳] و سان و ایمس [۴] به مطالعه تأثیر موقعیت نازل بر عملکرد جت اجکتور مافوق پرداختند. آن ها دریافتند که موقعیت نازل تأثیر زیادی بر عملکرد اجکتور دارد چرا که تعیین کننده فاصله ای است که در آن جریان محرک و ثانویه به طور



شکل ۱- جت اجکتور مادون صوت برای تخلیه گازهای حاصل از محصولات احتراق کوره صنایع فولاد



شکل ۲- الف) بوستر پمپ به عنوان تقویت کننده در قسمت مکش پمپ های خلأ حلقه مایع ب) اجکتور به عنوان تقویت کننده در قسمت مکش پمپ های خلأ حلقه مایع [۲].

همان گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است جت اجکتور شامل نازل اصلی، محفظه مکش، محفظه اختلاط و دیفیوزر می باشد. شایان ذکر است محفظه اختلاط و نازل ورودی (جریان اولیه) از اجزای اصلی این دستگاه محسوب می شوند. در حالت کلی دیفیوزر و نازل جریان مکش (جریان ثانویه) به ترتیب به منظور بازیابی فشار

از جمله پارامترهای هندسی موثر بر عملکرد جت اجکتور قطر و زاویه همگرایی محفظه مکش، طول و قطر محفظه اختلاط، قطر خروجی دیفیوزر و زاویه واگرایی آن، مکان قرارگیری نازل و ابعاد هندسی نازل می‌باشند. در این قسمت به بررسی پیشینه پژوهش و منابع در مورد جت اجکتورهای مافوق و مادون صوت که تأثیر این پارامترها را مد نظر قرار داده بودند، اشاره‌ای شد و ابعاد هندسی این دو نوع جت اجکتور بررسی شده توسط محققین در جدول ۱ و ۲ ارائه گردید. هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر برخی از پارامترهای هندسی به روش دینامیک سیالات محاسباتی بر عملکرد این نوع دستگاه‌ها می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات بسیار اندکی بر روی اجکتورهای مادون صوت هوا-هوا انجام شده است. لذا هدف کلی از انجام این تحقیق بررسی تأثیر پارامترهای هندسی توسط نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی، فلوئنت، بر عملکرد اجکتورهای مادون صوت هوا-هوا می‌باشد. از آنجایی که ثابت در نظر نگرفتن نسبت قطر خروجی دیفیوزر به قطر محفظه اختلاط (D_o/D_{MC}) و زاویه واگرایی در عملکرد این نوع دستگاه‌ها تأثیر گذار می‌باشد بررسی آن امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر زاویه واگرایی برای مقادیر متفاوتی از نسبت قطر خروجی دیفیوزر به قطر محفظه اختلاط بر عملکرد آن با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی، فلوئنت، می‌باشد.

۲- بیان مسئله

۲-۱- مدلسازی هندسی

در این تحقیق از ابعاد جت اجکتور مادون صوت هوا-هوا ساخته شده توسط ژنگ و همکاران [۱۹] به عنوان هندسه مدل عددی استفاده شده است (جدول ۲). نسبت طول محفظه اختلاط به قطر آن $۴/۶$ ، نسبت قطر خروجی

کامل با هم آمیخته می‌شوند. یاداو و همکاران [۵] با استفاده از شبیه سازی عددی جت اجکتور مافوق صوت گاز-مایع به بررسی تاثیر موقعیت نازل، قطر محفظه مکش و زاویه همگرایی آن بر عملکرد پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مقدار بهینه زاویه همگرایی محفظه مکش بین محدوده $۳۰-۱۰$ درجه می‌باشد. در جدول ۱ ابعاد پارامترهای هندسی اجکتور مافوق صوت گاز-گاز و گاز-مایع بررسی شده توسط محققین ارائه شده است. در جدول ۱ شکل و مقادیر زاویه همگرایی محفظه مکش، α ، جت اجکتور مافوق صوت گاز-گاز و گاز-مایع بررسی شده توسط محققین ارائه شده است. با توجه به جدول ۱ چن و همکاران مقدار بهینه L_{MC}/D_{MC} زاویه واگرایی دیفیوزر، θ ، و زاویه همگرایی محفظه مکش، α ، جت اجکتور مافوق صوت را به ترتیب ۵، $۲/۸۶$ و ۲۸ درجه گزارش کردند [۱۷]. لی و همکاران [۱۸] با استفاده از روش عددی، نسبت طول به قطر محفظه اختلاط را بر عملکرد برای اجکتور مافوق صوت گاز-مایع و گاز-گاز مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مقدار بهینه این پارامتر هندسی را در محدوده ۲-۱ برای اجکتور گاز-مایع و ۷-۵ برای اجکتور گاز-گاز معرفی کردند.

ژنگ و همکاران [۲۰] به بررسی تجربی و عددی موقعیت نازل بر اجکتور مادون صوت پرداختند. نتایج کار آن‌ها حاکی از این می‌باشد که به ازای هر یک از شرایط عملیاتی و هندسی اجکتور یک فاصله بهینه وجود دارد که به ازای آن فاصله ضریب اجکتینگ ماکزیمم می‌شود و انحراف از آن باعث کاهش این ضریب می‌گردد. میکائیل و همکاران [۲] به بررسی تجربی تأثیر پارامترهای هندسی مختلفی بر عملکرد جت اجکتور مادون صوت هوا-هوا پرداختند. آن‌ها در این تحقیق تعداد نازل ورودی، محل قرار گیری نازل، طول محفظه اختلاط و زاویه واگرایی دیفیوزر با فرض ثابت بودن نسبت قطر خروجی دیفیوزر به قطر محفظه اختلاط مورد بررسی قرار دادند. ابعاد مربوط به اجکتور مادون صوت هوا-هوای بررسی شده توسط محققین در جدول ۲ گرد آوری شده است.

از نرم افزار گمبیت ایجاد شده است. شبکه‌های ایجاد شده اغلب سازمان یافته و در ناحیه کوچکی از ورودی در قسمت مکش غیر سازمان یافته می‌باشد که در شکل ۵ نشان داده شده است. به منظور بررسی تأثیر زاویه واگرایی و قطر خروجی دیفیوزر، ابعاد بکار رفته برای مدل‌سازی هندسی در جدول ۳ آورده شده است.

دیفیوزر به قطر محفظه اختلاط ۲/۷۲، نسبت قطر خروجی نازل به قطر محفظه اختلاط ۰/۴۳، نسبت مساحت قسمت مکش ورودی به محفظه اختلاط ۰/۸۵، زاویه همگرایی محفظه مکش ۳۲ درجه و زاویه واگرایی دیفیوزر ۱۲/۵ درجه می‌باشد. مدل‌سازی هندسی (شکل ۴) و شبکه بندی (شکل ۵) به صورت سه بعدی با استفاده

جدول ۱- پارامترهای هندسی جت اجکتور مافوق صوت بررسی شده توسط محققین

مرجع	محقق	سال	نوع	L_{MC}/D_{MC}	h/D_{MC}	$(D_{MC}/D_N)^2$	ورودی به محفظه مکش	α (deg.)	θ (deg.)
[۶]	کرمرس و بینکرس	۲۰۰۱	گاز- مایع	۲-۱۰	-	۲/۱-۹	مخروطی	-	۳
[۷]	الگزلی و همکاران	۲۰۰۲	گاز- مایع	۱۰	۲/۷۲	-	مخروطی	-	۷
[۸]	گمیسنس و همکاران	۲۰۰۴	گاز- مایع	۰/۵-۱/۳	-	-	مخروطی	-	-
[۹]	روسلی و همکاران	۲۰۰۵	گاز- گاز	۵	۵	۲/۵	مخروطی	۱۰	۷
[۱۰]	لای و چریستفیدس	۲۰۰۵	گاز- گاز	۱/۱	۲/۱۷	-	مخروطی	۲۴	۴
[۱۱]	دس و بیسوس	۲۰۰۶	گاز- مایع	۷/۷۶	-	۱۵/۵-۵۹/۵	-	-	۸/۶
[۱۲]	سریوبرکول و همکاران	۲۰۰۷	گاز- گاز	۱-۶	-۶/۸	۵/۶-۱۰	بیضوی ملایم	-	۱۰
[۱۳]	ورقا و همکاران	۲۰۰۹	گاز- گاز	۷/۲	۱/۱	۲۰/۹، ۱۶/۳، ۱۳/۵	مخروطی	۴	۸/۳
[۱۴]	ورقا و همکاران	۲۰۰۹	گاز- گاز	۴	۱/۵۴*	۲۶/۴	مخروطی	-	۹/۵
[۱۵]	ژو و همکاران	۲۰۰۹	گاز- گاز	۳/۷۵	متغیر	۸/۱۶	مخروطی	-۵۳/۱۳	۵/۷۲
[۱۶]	چن و همکاران	۲۰۱۱	گاز- گاز	۵*	-	(۱/۷) ^۲ *	مخروطی	۲۸*	۲/۸۶*
[۱۷]	لی و همکاران	۲۰۱۲	گاز- گاز	۰-۹	۰-۰/۳۶	۳۰، ۶۰، ۹۰	مخروطی	-	-
[۱۸]	افرنرنا و همکاران	۲۰۱۲	گاز- گاز	۶	متغیر	۶۸، ۹۰، ۱۲۴، ۱۸۴	مخروطی	۲/۲	۶/۷
						۵۳، ۶۲			

علامت * نشان دهنده‌ی مقدار بهینه می‌باشد.

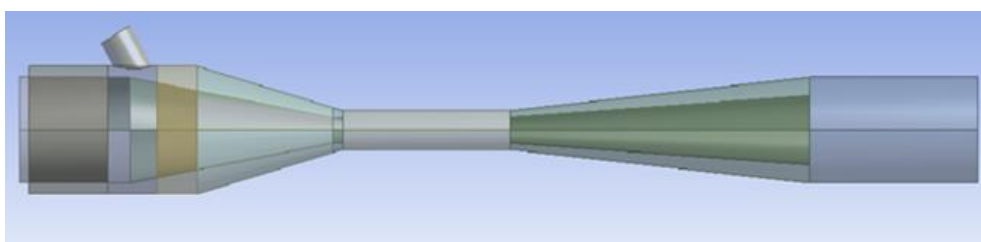
جدول ۲- پارامترهای هندسی جت اجکتور مادون صوت گاز-گاز بررسی شده توسط محققین

ردیف	ابعاد اجکتور	میکائیل و همکاران [۲]	ژنگ و همکاران [۱۹]	موسوی [۲۰]
۱	L_{MC}/D_{MC}	۰.۹/۷۶، ۰.۴/۷۶، ۰.۱/۷۶ ۱۴/۷۶	۴/۶	۳.۷، ۱.۰
۲	h/D_{MC}	۰.۳، ۰.۱، ۰.۰	۰.۱۳، ۰.۲۶، ۰.۳۹، ۰.۵۲	متغیر
۳	D_O/D_{MC}	۱/۹۳	۲/۷۲	۱/۸۴
۴	A_N/A_{MC}	۰/۰.۵۷	۰/۴۳	۰/۱۲۹۶، ۰/۱۹۳۶، ۰/۳۱۳۶
۵	$A_{S,in}/A_{MC}$	۰/۳۳	۰/۸۵	۳/۵
۶	α (deg.)	۸۹/۲۸	۳۲	۲۸/۹
۷	θ (deg.)	۰.۰، ۱.۰، ۱۴.۰، ۲۴.۰*	۱۲/۵	۱۰، ۸، ۶
۸	β (deg.)	۸	۲۱	۳۴/۲۱، ۲۹/۳۵، ۲۴/۴۵
۹	D_S/D_{MC}	۳/۴۳	۳/۳	۲/۳۲
۱۰	D_{in}/D_{MC}	۰/۳۳	۲/۷۲	۰/۸۸

* θ برابر با صفر، حالت بدون دیفیوزر است.

جدول ۳- ابعاد بکار رفته برای مدل سازی هندسی در این تحقیق

ابعاد اجکتور						ردیف
۴/۶	۴/۶	۴/۶	۴/۶	۴/۶	۴/۶	۱
۱/۶۱	۱/۶۱	۱/۶۱	۱/۶۱	۱/۶۱	۱/۶۱	۲
۱/۹۳	۱/۹۳	۱/۹۳	۱/۹۳	۱/۹۳	۱/۹۳	
۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	
۳/۱	۳/۱	۳/۱	۳/۱	۳/۱	۳/۱	
۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳	۳
۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۴
۳۲	۳۲	۳۲	۳۲	۳۲	۳۲	۵
۱۶	۱۴	۱۲/۵	۱۰	۵	۳	۶
۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۷



شکل ۴- مدل سازی هندسی جت اجکتور



شکل ۵- شبکه ایجاد شده به صورت سه بعدی

۲-۲- معادلات حاکم

وجود آمده است لذا در این حالت مسئله حل جریان مغشوش به صورت روشی برای حل این تنش رینولدز در خواهد آمد یعنی باید مقدار این تنش رینولدز را به طریقی محاسبه و در معادله RANS وارد نمود. یک روش کلی برای این کار استفاده از تئوری بوزینسک می باشد که تنش های رینولدز در این روش به صورت زیر توسط گرادیان های سرعت میانگین محاسبه می شوند [۲۴]:

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (۸)$$

چندین مدل توربولانسی برای محاسبه ویسکوزیته مغشوش وجود دارد. مزیت تئوری بوزینسک هزینه نسبتاً پایین محاسبات به واسطه ویسکوزیته مغشوش می باشد. همان گونه که در قبل اشاره شد در تحقیق حاضر به منظور شبیه سازی اغتشاشات از معادلات ناویراستوکس

میانگین گیری شده رینولدز K-ε Standard, K-ε Realizable.RNG و K-ω SST موجود در نرم افزار

Fluent استفاده شده است [۲۴]. در مدل های K-ε و K-ω برای محاسبه انرژی جنبشی توربولانس (k)، و نرخ اتلاف انرژی توربولانس (ε)، یا نرخ اتلاف مخصوص (ω)، دو معادله حل می شود و در این حالت ها ویسکوزیته مغشوش (μ_t) فقط تابعی از K و ε و یا K و ω می باشد [۲۴].

۲-۴- پارامترهای موثر

پارامترهای موثر اطلاعاتی مقدماتی و روابطی هستند که به کمک آن ها می توان عملکرد و عوامل موثر بر عملکرد این نوع دستگاه ها را مورد تحلیل و ارزیابی قرار داد. این پارامترهای عملگر عبارتند از:

نسبت فشار: به صورت نسبت اختلاف فشار خروجی دیفیوزر با ورودی مکش به اختلاف فشار ورودی با خروجی دیفیوزر تعریف می شود [۲].

$$R_d = (P_d - P_s) / (P_i - P_d) \quad (۹)$$

جریان درون جت اجکتور پایا، تراکم پذیر، لزج و مغشوش بوده لذا از معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و معادله حالت گاز کامل برای سیال عامل هوا که در ادامه حاضر گردیده اند استفاده شده است.

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (۱)$$

معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i' u_j'}) \quad (۲)$$

که در معادله ۲ S_{ij} تانسور تنش اصلی و δ_{ij} تانسور واحد هستند.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (۳)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (۴)$$

که در معادله ۴، K_{eff} ضریب هدایت گرمایی موثر، (τ_{ij})_{eff} تانسور تنش موثر و μ_{eff} ویسکوزیته موثر می باشد.

$$K_{eff} = K + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (۵)$$

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (۶)$$

معادله حالت گاز کامل:

$$P = \rho RT \quad (۷)$$

۲-۳- مدل سازی اغتشاش

معادلات ۱ و ۲ به معادلات ناویراستوکس میانگین گیری شده رینولدز معروف هستند. این معادلات همان شکل معادلات ناویراستوکس کامل را دارند و متغیرهای موجود در این معادلات به صورت میانگین و متوسط کل می باشند. فقط ترم اضافی که در این معادله ۲ ظاهر شده است عبارت (-ρ u_i' u_j') می باشد که به تنش رینولدز معروف است و به واسطه مغشوشیت جریان به

نسبت طول محفظه اختلاط به قطر ۴/۶، نسبت قطر خروجی دیفیوزر به قطر محفظه اختلاط ۲/۷۲، نسبت قطر خروجی نازل به قطر محفظه اختلاط ۰/۴۳، نسبت مساحت قسمت مکش ورودی به محفظه اختلاط ۰/۸۵، زاویه همگرایی محفظه مکش ۳۲ درجه و زاویه واگرایی دیفیوزر ۱۲/۵ درجه بدست آمده است. با توجه به جدول ۴ با افزایش تعداد شبکه از ۳۲۵۱۶۵ به تعداد ۶۳۷۴۵۱ سلول میزان ضریب اجکتینگ به اندازه ۰/۵ درصد تغییر میکند که این تغییر ناچیز می باشد لذا تعداد شبکه برای ابعاد هندسی ذکر شده در بالا ۳۲۵۱۶۵ در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- بررسی استقلال از شبکه

تعداد شبکه	ضریب اجکتینگ
۷۳۲۳۳	۰/۳۱۱
۱۵۱۷۲۳	۰/۳۴۲
۳۲۵۱۶۵	۰/۳۶۹
۶۳۷۴۵۱	۰/۳۷۱

۳-۲- صحه‌گذاری و اعتبار سنجی

از نقطه نظر مدل‌سازی کامپیوتری، مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود معیاری برای صحه‌گذاری و اعتبار سنجی نتایج می‌باشد. در این راستا نتایج تجربی بدست آمده از آزمایشات ژنگ و همکاران [۱۹] به عنوان مرجع تجربی استفاده شده است. به منظور شبیه‌سازی اغتشاشات ریفات و عمر [۳] از معادلات ناویراستوکس میانگین‌گیری شده رینولدز $K-\varepsilon$ Standard و $K-\varepsilon$ RNG استفاده نمودند و نشان دادند که مدل $K-\varepsilon$ RNG نتایج نزدیک‌تری با کار آزمایشگاهی دارد و همچنین همگرایی آن نیز سریع‌تر می‌باشد. یاداو و همکاران [۵] نیز به شبیه‌سازی عددی جت اجکتور مافوق صوت گاز-مایع پرداختند و نتیجه گرفتند که مدل $K-\varepsilon$ RNG از مدل $K-\varepsilon$ Standard دارای دقت بیشتری می‌باشد. ورقا و همکاران با استفاده از مدل توربولانسی $K-\varepsilon$ Realizable به شبیه‌سازی عددی جت اجکتور توسط کد تجاری فلونت پرذاختند [۱۴ و ۱۵]. ژو و همکاران با

ضریب اجکتینگ: به صورت نسبت دبی جرمی سیال ثانویه به نسبت دبی جرمی سیال اولیه تعریف می‌شود [۱۹].

$$E_{jc} = \dot{M}_s / \dot{M}_i \quad (10)$$

راندمان اجکتور: راندمان اجکتور به صورت نسبت انرژی انتقال یافته به جریان ثانویه به انرژی انتقال یافته از جریان اولیه تعریف می‌گردد [۲].

$$\eta_{ej} = \frac{\rho_s Q_s (P_d - P_s)}{\rho_i Q_i (P_i - P_d)} = E_{jc} \cdot R_d \quad (11)$$

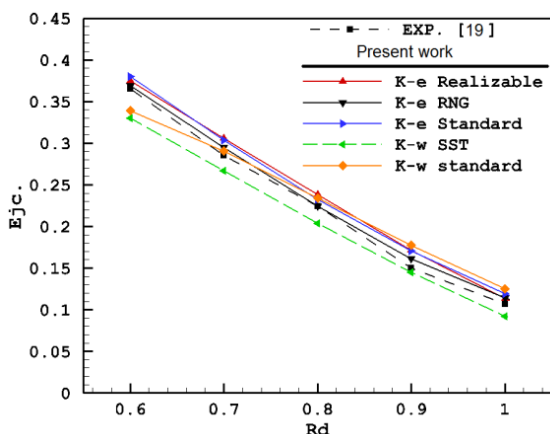
۳- حل عددی

۳-۱- شرایط مرزی و روند حل

مناسب برای حل معادلات حاکم بر جریان داخل جت اجکتور هوا-هوا مادون صوت از نرم‌افزار فلونت بهره برده شده است. برای ورودی سیال‌های اولیه و ثانویه از شرط مرزی فشار ورودی و برای خروجی جت اجکتور از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است. دیواره را عایق فرض کرده و شرط عدم لغزش برای آن در نظر گرفته می‌شود. از الگوریتم SIMPLE برای محاسبه‌ی ارتباط بین فشار و سرعت، همچنین به ترتیب برای جداسازی ترم‌های جابه‌جایی و درون‌یابی فشار از طرح‌های اختلاف بالا دست مرتبه‌ی دوم و استاندارد استفاده شده است. به دلیل تراکم پذیر بودن جریان، خواص گاز ایده‌آل برای تغییرات چگالی هوا در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت گرمایی ویژه و قابلیت هدایت گرمایی را ثابت فرض نموده، ویسکوزیته متغیر و بر اساس قانون توانی مدل شده است [۱۹]. معیار همگرایی با مقدار باقی‌مانده 10^{-6} برای معادله انرژی و 10^{-4} برای دیگر معادلات تنظیم شده است. همچنین در مدل‌سازی عددی به منظور رفع کردن خطای ناشی از درشتی شبکه و استقلال جواب‌ها از تعداد شبکه، شبکه‌هایی با تعداد سلول متفاوت مورد بررسی قرار گرفته و پارامتر ضریب اجکتینگ برای نسبت فشار ۰/۶ و

در این تحقیق به منظور صحت گذاری نتایج در ابتدا به شبیه سازی عددی جت اجکتور مادون صوت با استفاده از مدل های توربولانسی $K-\varepsilon$ ، $K-\varepsilon RNG$ ، $K-\varepsilon Standard$ ، $K-\omega SST$ و $K-\omega Standard Realizable$ پرداخته شده است. شکل ۶ نشان دهنده ی تغییرات ضریب اجکتینگ بر حسب نسبت فشار برای مدل های توربولانسی متفاوت می باشد.

میزان خطای ضریب اجکتینگ حاصل از نتایج مدل های مختلف توربولانسی کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی ژنگ و همکاران [۱۹] محاسبه و در جدول ۵ ارائه گردیده است. با توجه به جدول مقایسه بین نتایج حاصل از حل عددی و نتایج تجربی نشان می دهد که خطا برای ضریب اجکتینگ بدست آمده از مدل های توربولانسی $K-\varepsilon Standard$ ، $K-\varepsilon RNG$ ، $K-\varepsilon Realizable$ و $K-\omega Standard$ به ترتیب برابر با ۷/۰۴، ۳/۴۸، ۷/۰۲ و ۱۱ درصد بوده و تطابق بسیار خوبی بین آنها وجود دارد. این میزان خطا برای مدل توربولانسی $K-\varepsilon RNG$ کمینه بوده لذا از این مدل به منظور شبیه سازی اغتشاشات استفاده می گردد.



شکل ۶- تغییرات ضریب اجکتینگ بر حسب نسبت فشار

جدول ۵- خطای حاصل از حل عددی حاضر با نتایج

آزمایشگاهی ژنگ و همکاران [۱۹]

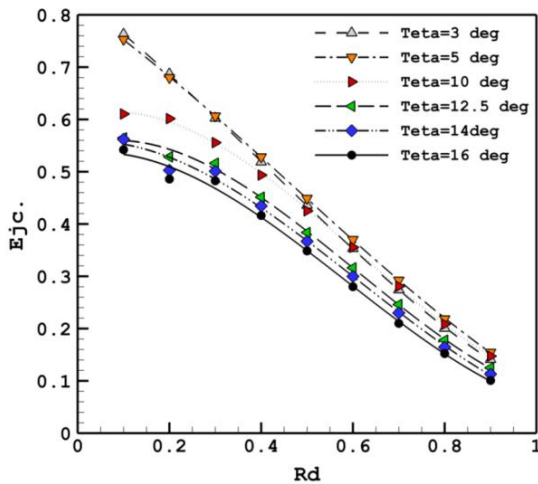
$K-\varepsilon$ Realizable	$K-\varepsilon$ RNG	$K-\varepsilon$ Standard	$K-\omega$ SST	$K-\omega$ standard
7.02 %	3.48%	7.04 %	10 %	11 %

استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی تأثیر مکان قرار گیری نازل و زاویه همگرایی محفظه مکش بر عملکرد پرداختند. به منظور شبیه سازی اغتشاشات از سه مدل توربولانسی $K-\varepsilon Realizable$ ، $K-\varepsilon RNG$ و $K-\omega SST$ موجود در نرم افزار فلونت ۶/۲ بهره بردند و نتیجه گرفتند که مدل $K-\varepsilon RNG$ دارای نتایج دقیق تری می باشد [۱۶]. افزونترنا و همکاران با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی تأثیر هندسه نازل بر عملکرد جت اجکتور بخار مورد استفاده در سیکل تبرید پرداختند. به منظور شبیه سازی اغتشاشات از دو مدل توربولانسی $K-\varepsilon$ و $K-\omega SST Realizable$ موجود در نرم افزار فلونت ۶/۳ بهره بردند و نتیجه گرفتند که مدل $K-\varepsilon Realizable$ دارای نتایج دقیق تری می باشد [۱۸]. برتسیویکز و همکاران با استفاده از نرم افزار فلونت ۶/۲ به شبیه سازی عددی سه بعدی جت اجکتور مافوق صوت پرداختند. به منظور شبیه سازی اغتشاشات از مدل های توربولانسی $K-\varepsilon Standard$ و $K-\omega SST$ استفاده کردند و بیان داشتند که مدل $K-\omega SST$ از توافق کمتری با نتایج آزمایشگاهی نسبت به مدل توربولانسی $K-\varepsilon Standard$ برخوردار می باشد [۲۱]. لی و همکاران از مدل توربولانسی $K-\varepsilon RNG$ به منظور شبیه سازی جت اجکتور به صورت متقارن محوری توسط نرم افزار فلونت ۶/۳/۲۶ بهره بردند [۲۲]. لانگ و همکاران با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی تأثیر ساختار نازل های متفاوت بر عملکرد جت اجکتور پرداختند. به منظور شبیه سازی اغتشاشات از سه مدل توربولانسی $K-\varepsilon Standard$ ، $K-\varepsilon RNG$ و $K-\varepsilon Realizable$ موجود در نرم افزار فلونت ۶/۳ بهره بردند و نتیجه گرفتند که مدل $K-\varepsilon Realizable$ دارای نتایج دقیق تری می باشد [۲۳]. مقایسه ای نیز بین نتایج مدل $K-\varepsilon Standard$ و $K-\varepsilon RNG$ با نتایج آزمایشگاهی در اجکتور مادون صوت هوا- هوا توسط ژنگ و همکاران [۱۹] انجام شد و نتیجه گرفتند که مدل $K-\varepsilon RNG$ دارای دقت بالاتری می باشد.

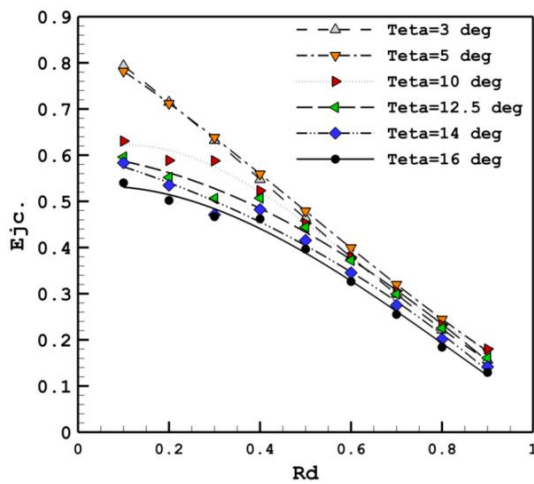
۴- بحث و بررسی نتایج

۴-۱- تغییرات ضریب اجکتینگ بر حسب نسبت فشار

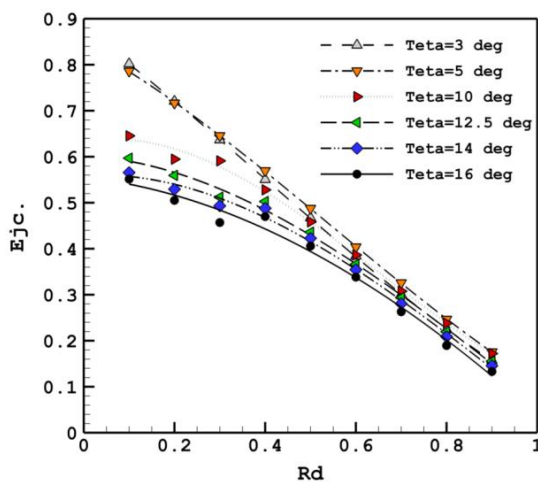
شکل‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ به ترتیب نشان دهنده‌ی تغییرات ضریب اجکتینگ بر حسب نسبت فشار برای نسبت قطر خروجی دیفیوزر به قطر محفظه اختلاط ۱/۶۱، ۱/۹۳، ۲/۷۲ و ۳/۱ می‌باشند. برای هر چهار نسبت D_O/D_{MC} با افزایش زاویه واگرایی دیفیوزر از ۳ به ۵ درجه تغییر قابل توجهی در ضریب اجکتینگ برای کلیه نسبت‌های فشار مشاهده نمی‌گردد. در ادامه با افزایش زاویه واگرایی دیفیوزر از ۵ به ۱۲/۵ درجه، ضریب اجکتینگ برای کلیه نسبت‌های فشار کاهش یافته و با افزایش بیشتر این زاویه از ۱۲/۵ به ۱۶ درجه تغییر قابل توجهی در آن مشاهده نمی‌گردد. همچنین قابل توجه می‌باشد که برای نسبت‌های فشار بیشینه ضریب اجکتینگ کمینه و برای نسبت‌های فشار کمینه این ضریب بیشینه می‌باشد که نتیجه بدست آمده مشابه بیان کرل [۱] و نتایج آزمایشگاهی مربوط به اجکتور مادون صوت هوا-هوا میکائیل و همکاران [۲] می‌باشد. کرل [۱] اظهار داشت که برای یک اجکتور هوا هنگامی که در فشار ورودی ثابتی کار می‌کند، با افزایش فشار مکش، جریان هوا کاهش می‌یابد. یعنی در حالت بیشینه مکش، عدم جریان هوا و در حالت بیشینه جریان هوا، مکش صفر وجود دارد.



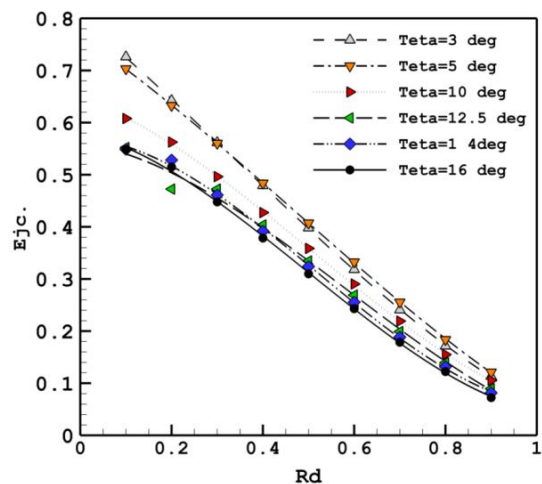
شکل ۸- تغییرات ضریب اجکتینگ بر حسب نسبت

فشار، $D_O/D_{MC} = 1/91$ 

شکل ۹- تغییرات ضریب اجکتینگ بر حسب نسبت

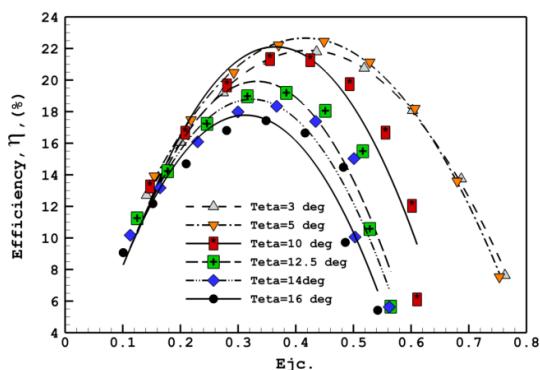
فشار، $D_O/D_{MC} = 2/72$ 

شکل ۱۰- تغییرات ضریب اجکتینگ بر حسب نسبت فشار،

 $D_O/D_{MC} = 3/1$ 

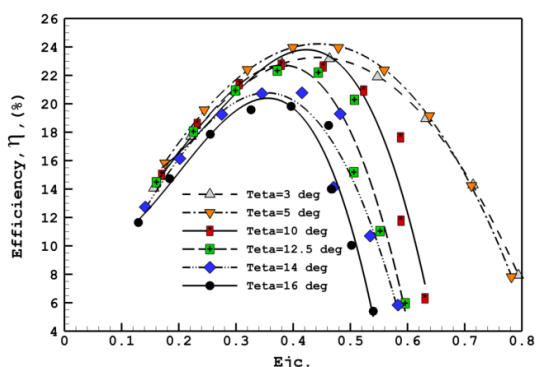
شکل ۷- تغییرات ضریب اجکتینگ بر حسب نسبت

فشار، $D_O/D_{MC} = 1/61$



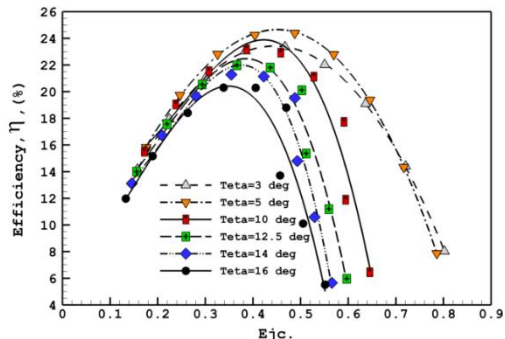
شکل ۱۲- تغییرات راندمان بر حسب ضریب اجکتینگ،

$$D_0/D_{MC} = 1/91$$



شکل ۱۳- تغییرات راندمان بر حسب ضریب اجکتینگ،

$$D_0/D_{MC} = 2/72$$



شکل ۱۴- تغییرات راندمان بر حسب ضریب اجکتینگ،

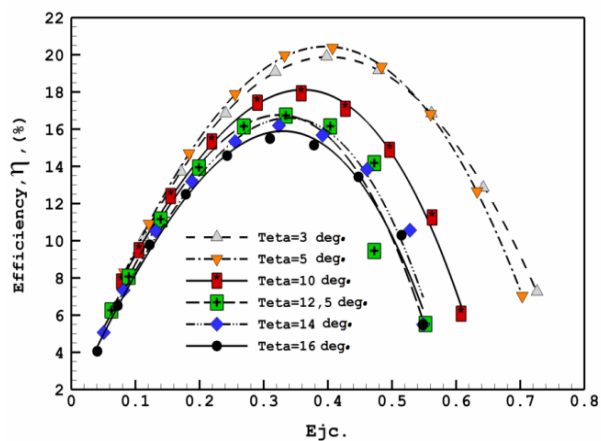
$$D_0/D_{MC} = 3/1$$

۴-۳- تغییرات راندمان بر حسب نسبت فشار

میزان تغییرات راندمان بر حسب نسبت فشار در زوایای واگرایی دیفیوزر ۳، ۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۴ و ۱۶ درجه برای نسبت قطر خروجی دیفیوزر به قطر محفظه اختلاط ۱/۶۱، ۱/۹۳، ۲/۷۲ و ۳/۱ به ترتیب در شکل های ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ رسم گردیده است. با توجه به شکل های ۷ الی ۱۰ برای نسبت های فشار بیشینه ضریب اجکتینگ کمینه و برای نسبت های فشار کمینه این ضریب بیشینه می باشد

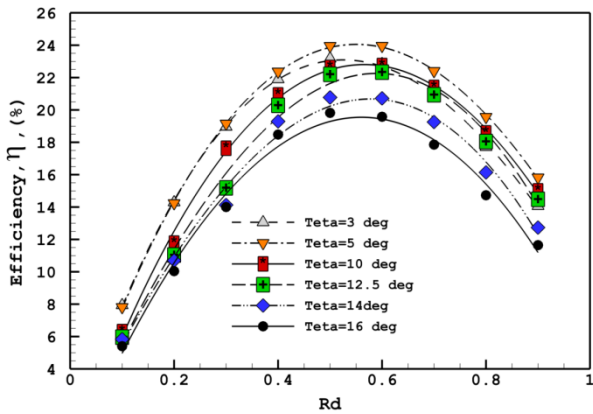
۴-۲- تغییرات راندمان بر حسب ضریب اجکتینگ

میزان تغییرات راندمان بر حسب ضریب اجکتینگ در زوایای واگرایی دیفیوزر ۳، ۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۴ و ۱۶ درجه برای نسبت قطر خروجی دیفیوزر به قطر محفظه اختلاط ۱/۶۱، ۱/۹۳، ۲/۷۲ و ۳/۱ به ترتیب در شکل های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ رسم گردیده است. با توجه به شکل های ۷ الی ۱۰ برای نسبت های فشار بیشینه ضریب اجکتینگ کمینه و برای نسبت های فشار کمینه این ضریب بیشینه می باشد و از آنجایی که از حاصلضرب نسبت فشار در ضریب اجکتینگ راندمان بدست می آید، با توجه به شکل های ۱۱ الی ۱۴ پر واضح می باشد که تغییرات راندمان بر حسب ضریب اجکتینگ با افزایش ضریب اجکتینگ ابتدا افزایش یافته و در ضریب اجکتینگ خاصی به مقدار بیشینه خود می رسد و سپس با افزایش بیشتر آن از مقدار خاص راندمان کاهش می یابد. برای هر چهار نسبت D_0/D_{MC} میزان راندمان برای زاویه واگرایی دیفیوزر ۳، ۵، ۱۰ و دیگر زوایا به ترتیب در ضریب اجکتینگ حدود ۰/۴۵، ۰/۴، ۰/۳۵ و ۰/۳۵ بیشینه می باشد. همچنین در شکل های ۱۱ الی ۱۴ مشاهده می شود برای هر چهار نسبت D_0/D_{MC} با افزایش زاویه واگرایی دیفیوزر از ۳ به ۵ درجه راندمان برای کلیه ضرایب اجکتینگ اندکی افزایش یافته و با افزایش این زاویه از ۵ به ۱۶ درجه میزان راندمان کاهش می یابد. واضح است که برای ضریب اجکتینگ بیشینه میزان راندمان کمینه می باشد.

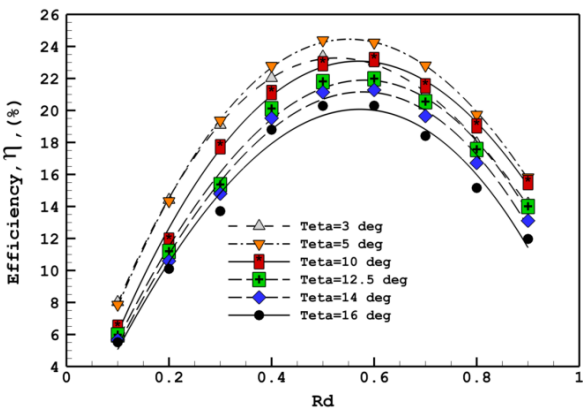


شکل ۱۵- تغییرات راندمان بر حسب ضریب اجکتینگ،

$$D_0/D_{MC} = 1/61$$



شکل ۱۷- تغییرات راندمان بر حسب نسبت فشار،
 $D_0/D_{MC} = 2/22$

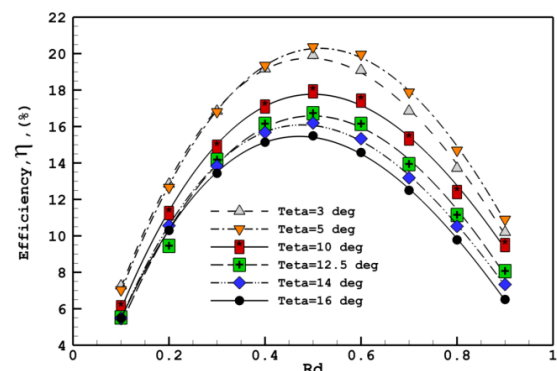


شکل ۱۸- تغییرات راندمان بر حسب نسبت فشار،
 $D_0/D_{MC} = 3/1$

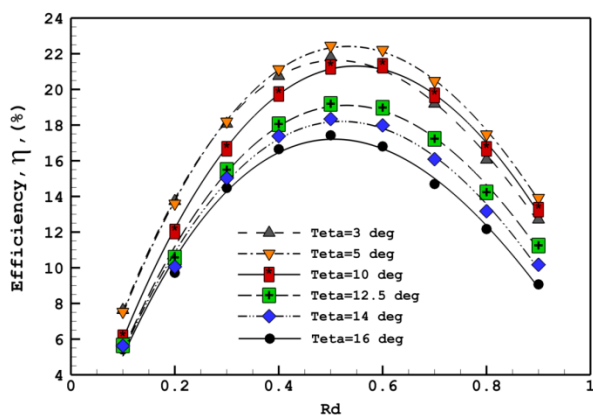
۴-۴- تغییرات راندمان بیشینه بر حسب زاویه واگرایی دیفیوزر

شکل ۱۹ نشان دهنده تغییرات راندمان بیشینه بر حسب زاویه واگرایی دیفیوزر برای D_0/D_{MC} های متفاوت می باشد. با توجه به شکل واضح می باشد که زاویه واگرایی دیفیوزر و D_0/D_{MC} تأثیر قابل توجهی بر کارایی دارند. با افزایش زاویه واگرایی دیفیوزر میزان راندمان بیشینه ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. همچنین با افزایش D_0/D_{MC} از $1/61$ به $2/22$ میزان راندمان بیشینه به طور متوسط حدود ۲۴ درصد افزایش می یابد و با افزایش بیشتر آن از $2/22$ به $3/1$ افزایش قابل توجهی در میزان راندمان مشاهده نمی گردد. برای تمامی نسبت های قطر

و از آنجایی که از حاصلضرب نسبت فشار در ضریب اجکتینگ راندمان بدست می آید، با توجه به شکل های ۱۵ الی ۱۸ پر واضح می باشد که تغییرات راندمان بر حسب نسبت فشار با افزایش نسبت فشار ابتدا افزایش یافته و در نسبت فشار خاصی به مقدار بیشینه خود می رسد و سپس با افزایش بیشتر آن از مقدار خاص راندمان کاهش می یابد. برای هر چهار نسبت D_0/D_{MC} میزان راندمان برای تمامی زوایای واگرایی دیفیوزر در نسبت فشار حدود $0/5$ بیشینه می باشد. همچنین همان گونه که مشاهده می شود برای هر چهار نسبت D_0/D_{MC} ، با افزایش زاویه واگرایی دیفیوزر از ۳ به ۵ درجه راندمان برای کلیه نسبت های فشار افزایش یافته و با افزایش این زاویه از ۵ به ۱۶ درجه میزان راندمان کاهش می یابد. پر واضح است که برای نسبت فشار کمینه میزان راندمان کمینه می باشد.



شکل ۱۵- تغییرات راندمان بر حسب نسبت فشار،
 $D_0/D_{MC} = 1/61$



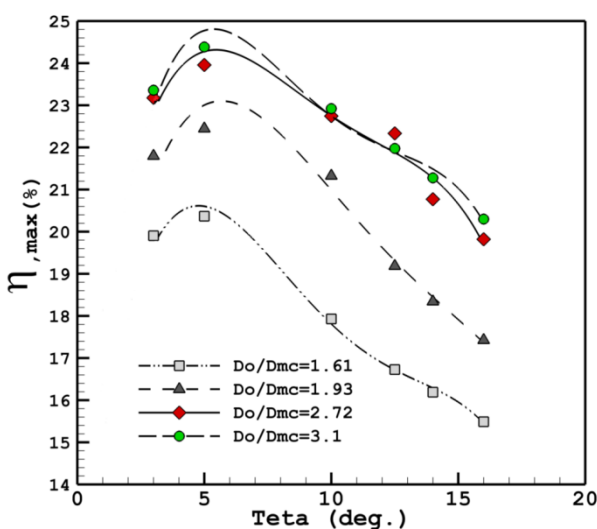
شکل ۱۶- تغییرات راندمان بر حسب نسبت فشار،
 $D_0/D_{MC} = 1/93$

سرعت شعاعی در خروجی دیفیوزر با زوایای واگرایی ۱۰ الی ۱۶ درجه برابر صفر نبوده و برای زوایای واگرایی ۳ و ۵ درجه در خروجی دیفیوزر به صفر می رسد. مشخص است که با افزایش زاویه واگرایی از ۳ درجه سرعت شعاعی در درون دیفیوزر افزایش می یابد. بزرگ ترین جریان شعاعی برای زاویه واگرایی دیفیوزر ۱۶ درجه و کمترین آن برای زاویه واگرایی ۳ و ۵ درجه است. افزایش سرعت شعاعی درون دیفیوزر نشان دهنده وجود بیشتر مقدار جریان شعاعی می باشد. بنابراین بزرگ بودن سرعت شعاعی به منزله ایجاد افت فشار، عاملی برای ایجاد جریان بازگشتی درون دیفیوزر، نیروی مقاوم برای اختلاط جریان ثانویه با جریان اولیه، عاملی مزاحم برای بازیابی فشار و همچنین باعث کاهش جریان از ورودی ثانویه می گردد. بنابراین در شکل های ۷ الی ۱۰ کاهش ضریب اجکتینگ با افزایش زاویه واگرایی از ۳ و ۵ درجه، ناشی از افزایش سرعت شعاعی می باشد. همچنین در شکل های ۱۱ الی ۱۸ کاهش راندمان اجکتور با افزایش زاویه واگرایی از ۳ و ۵ درجه ناشی از افزایش سرعت شعاعی می باشد.

۴-۶- بررسی توزیع فشار درون جت اجکتور

شکل ۲۲ و ۲۳ نشان دهنده تغییرات فشار در راستای محور اجکتور برای زوایای واگرایی متفاوت، $2/72 = D_o/D_{MC}$ و $R_d=0/5$ است. همان گونه که مشاهده می شود بیشترین بازیاب فشار در قیمت دیفیوزر می باشد. همچنین بیشترین گرادیان محوری فشار برای دیفیوزر با زاویه واگرایی ۵ درجه می باشد. با افزایش زاویه واگرایی از ۵ درجه گرادیان محوری فشار کاهش یافته و در نتیجه میزان جریان کمتری از ورودی ثانویه وارد اجکتور می گردد که باعث کاهش ضریب اجکتینگ و راندمان اجکتور می شود. برای زاویه واگرایی ۱۶ درجه میزان گرادیان محوری فشار از صفحه خروجی نازل تا صفحه خروجی دیفیوزر کمتر بوده و در نتیجه کمترین راندمان و ضریب اجکتینگ را دارا می باشد.

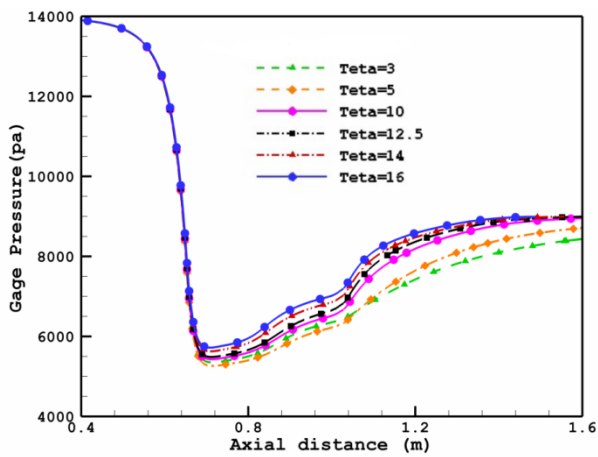
خروجی دیفیوزر به قطر محفظه اختلاط $1/61$ ، $1/93$ ، $2/72$ و $3/1$ بهترین کارایی مربوط به اجکتوری می باشد که حاوی زاویه واگرایی دیفیوزر ۵ درجه باشد که مقدار آن به ترتیب $20/37$ ، $22/45$ ، 24 و $24/38$ درصد است. کرل [۱] بیان داشت که بعد از قسمت گلوگاه یک واگرایی سریع نامطلوب می باشد و زاویه واگرایی مطلوب مورد استفاده را بین محدوده ۴ الی ۱۰ درجه معرفی کرد.



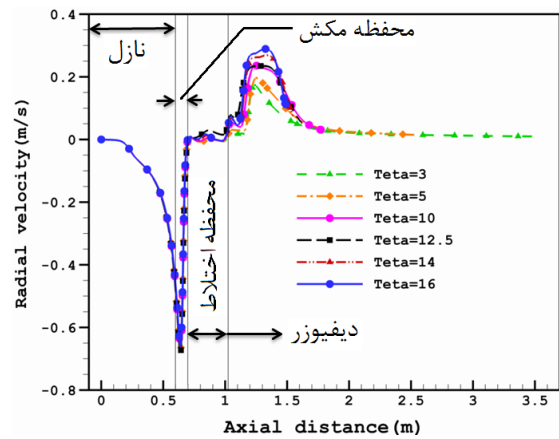
شکل ۱۹- تغییرات راندمان بیشینه بر حسب زاویه واگرایی دیفیوزر

۴-۵- بررسی توزیع سرعت شعاعی درون جت اجکتور

سرعت شعاعی در راستای محور اجکتور برای زوایای واگرایی متفاوت، $2/72 = D_o/D_{MC}$ و $R_d=0/5$ در شکل ۲۰ و ۲۱ در درون نازل، محفظه اختلاط و دیفیوزر رسم شده است. همانگونه که مشاهده می کنید سرعت شعاعی در محفظه مکش (مکانی بین صفحه خروجی نازل و ورودی محفظه اختلاط) دارای مقدار بیشینه خود می باشد که به دلیل اختلاط جریان های ثانویه و اولیه می باشد. بعد از وارد شدن جریان های اولیه و ثانویه به درون محفظه اختلاط سرعت شعاعی به مقدار صفر رسیده و بعد از وارد شدن جریان از محفظه اختلاط به درون دیفیوزر، به علت تغییر راستای جریان در دیفیوزر مولفه شعاعی سرعت بزرگتر می گردد. همچنین قابل توجه می باشد که



شکل ۲۳- تغییرات فشار در راستای محور اجکتور
(بزرگنمایی شده)

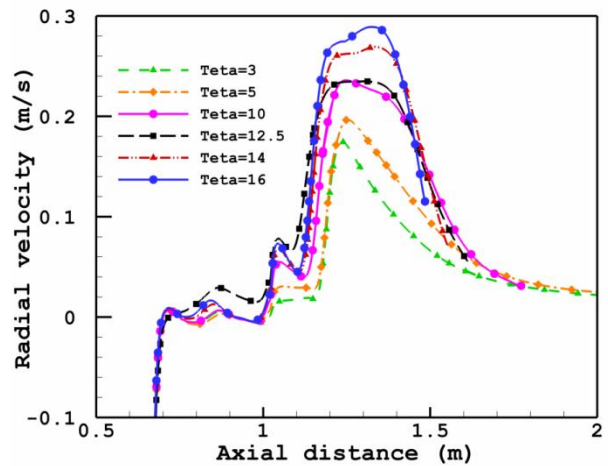


شکل ۲۰- تغییرات سرعت شعاعی در راستای محور اجکتور
برای کل اجکتور

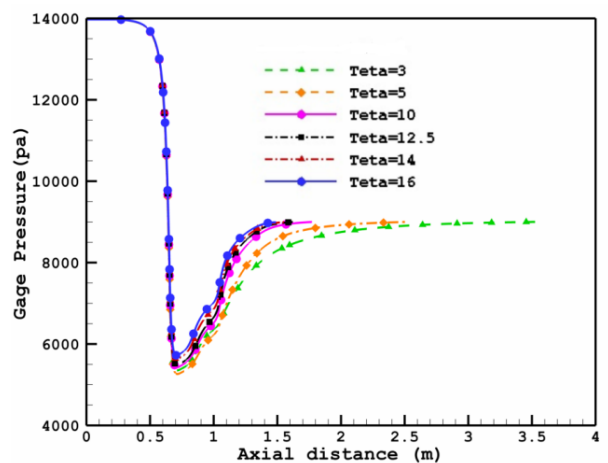
۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر زاویه واگرایی دیفیوزر و نسبت قطر خروجی آن به قطر محفظه اختلاط بر عملکرد جت اجکتور مادون صوت هوا-هوا پرداخته شده است. شبیه سازی عددی به صورت سه بعدی برای زاویه واگرایی دیفیوزر ۳، ۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۴ و ۱۶ درجه و نسبت ۳/۱ D_0/D_{MC} انجام شده است. با توجه به اینکه از دیفیوزر به عنوان یکی از اجزای فرعی اجکتور به منظور بازیابی فشار استفاده می‌گردد اما نتایج این بررسی نشان می‌دهد که علاوه بر زاویه واگرایی، قطر خروجی دیفیوزر تأثیر قابل توجهی بر عملکرد و راندمان این نوع دستگاه‌ها دارد. برخی از نتایج قابل توجه این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- بعد از معتبر سازی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود، دینامیک سیالات محاسباتی به جای انجام آزمایش، تأثیر پارامترهای هندسی از جمله زاویه واگرایی دیفیوزر و قطر خروجی را بر عملکرد به خوبی پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۲۱- تغییرات سرعت شعاعی در راستای محور اجکتور
(بزرگنمایی شده شکل ۲۰)



شکل ۲۲- تغییرات فشار در راستای محور اجکتور برای کل
اجکتور

میزان راندمان کمینه می‌باشد. همچنین برای هر چهار نسبت D_O/D_{MC} میزان راندمان برای زاویه واگرایی دیفیوزر ۳، ۵، ۱۰ و دیگر زوایا به ترتیب در ضریب اجکتینگ حدود ۰/۴۵، ۰/۴۵، ۰/۴ و ۰/۳۵ بیشینه می‌باشد.

• برای همه‌ی زوایای واگرایی دیفیوزر، با افزایش نسبت D_O/D_{MC} از ۱/۶۱ به ۲/۷۲ راندمان برای کلیه ضرایب اجکتینگ افزایش یافته و با افزایش این نسبت از ۲/۷۲ به ۳/۱ میزان راندمان به میزان اندکی افزایش می‌یابد.

• با افزایش D_O/D_{MC} از ۱/۶۱ به ۲/۷۲ میزان راندمان بیشینه به طور متوسط حدود ۲۴ درصد افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر آن از ۲/۷۲ به ۳/۱ افزایش قابل توجهی در میزان راندمان بیشینه مشاهده نمی‌گردد.

• برای تمامی نسبت‌های قطر خروجی دیفیوزر به قطر محفظه اختلاط ۱/۶۱، ۱/۹۳، ۲/۷۲ و ۳/۱ بهترین کارایی مربوط به اجکتوری می‌باشد که حاوی زاویه واگرایی دیفیوزر ۴ الی ۶ درجه باشد. کرل [۱] بیان داشت که بعد از قسمت گلوگاه یک واگرایی سریع نامطلوب می‌باشد و زاویه واگرایی مطلوب مورد استفاده را بین محدوده ۴ الی ۱۰ درجه معرفی کرد.

فهرست علائم

A	مساحت، m^2
L	طول، m
D	قطر، m
h	فاصله صفحه خروجی نازل تا ورودی به محفظه اختلاط، m
\dot{M}	دبی جرمی، Kg/s
p	فشار، pa
E_{jc}	ضریب اجکتینگ

• مقایسه‌ی بین نتایج حاصل از حل عددی و نتایج تجربی نشان می‌دهد که خطا برای ضریب اجکتینگ بدست آمده از مدل‌های توربولانسی $K-\varepsilon$ Standard، $K-\varepsilon$ RNG، $K-\varepsilon$ Realizable، $K-\omega$ Standard و $K-\omega$ SST به ترتیب برابر با ۷/۰۴، ۳/۴۸، ۷/۰۲، ۱۱ و ۱۰ درصد بوده و تطابق بسیار خوبی بین آن‌ها وجود دارد. این میزان خطا برای مدل توربولانسی $K-\varepsilon$ RNG کمینه بوده لذا از این مدل به منظور شبه‌سازی اغتشاشات استفاده گشت.

• با افزایش زاویه واگرایی دیفیوزر از ۳ به ۵ درجه تغییر قابل توجهی (اندکی افزایش مشاهده می‌گردد) در ضریب اجکتینگ برای کلیه نسبت‌های فشار مشاهده نمی‌گردد. در ادامه با افزایش زاویه واگرایی دیفیوزر از ۵ به ۱۲/۵ درجه، ضریب اجکتینگ برای کلیه نسبت‌های فشار کاهش یافته و با افزایش بیشتر این زاویه از ۱۲/۵ به ۱۶ تغییر قابل توجهی در آن مشاهده نمی‌گردد.

• برای نسبت‌های فشار بیشینه ضریب اجکتینگ کمینه و برای نسبت‌های فشار کمینه این ضریب بیشینه می‌باشد که نتیجه بدست آمده مشابه بیان کرل [۱] و نتایج آزمایشگاهی مربوط به اجکتور مادون صوت هوا-هوا میکائیل و همکاران [۲] می‌باشد. با افزایش زاویه واگرایی از ۳ به ۵ میزان راندمان افزایش و با افزایش بیشتر آن به ۱۶ درجه میزان راندمان کاهش می‌یابد.

• برای هر چهار نسبت D_O/D_{MC} با افزایش زاویه واگرایی دیفیوزر از ۳ به ۵ درجه راندمان برای کلیه ضرایب اجکتینگ افزایش یافته و با افزایش این زاویه از ۵ به ۱۶ درجه میزان راندمان کاهش می‌یابد. برای ضریب اجکتینگ بیشینه

γ	نسبت گرمای ویژه	m^3/s	دبی حجمی، Q
ω	فرکانس آشفستگی، s^{-1}	K	دما، T
ε	نرخ اتلاف انرژی توربولانس، $m^2 \cdot s^{-3}$	$J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$	ثابت گاز ایده آل، R
زیرنویس		$J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، C_p
MC	محفظه اختلاط	$m^2 \cdot s^{-2}$	انرژی جنبشی جریان آشفته، k
O, d	خروجی دیفیوزر	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	هدایت گرمایی، K
N	خروجی نازل	علائم یونانی	
s	ورودی سیال ثانویه	kg/m^3	چگالی، ρ
i	ورودی اولیه یا جریان محرک	deg	زاویه همگرایی محفظه مکش، α
t	مغشوش	deg	زاویه واگرایی دیفیوزر، θ
eff	موثر		راندمان جت اجکتور، η_{ej}
i, j, k	بردار واحد در مختصات کارتزین	$Kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$	لزجت دینامیکی، μ
		$m^2 \cdot s^{-1}$	لزجت سینماتیکی، ν

۶- مراجع

- [1] Kroll, A.E. (1947). "The design of jet pumps". Chemical Engineering Progress, vol. 1, p. 21.
- [2] Meakhail, T., Zien, Y., Elsallak, M., AbdelHady, S. (2008). "Experimental study of the effect of some geometric variables and number of nozzles on the performance of a subsonic air-air ejector". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, vol. 222, pp. 809-818.
- [3] Riffat, S., Omer, S. (2001). "CFD modelling and experimental investigation of an ejector refrigeration system using methanol as the working fluid". International journal of energy research, vol. 25, pp.115-128.
- [4] Yadav, R.L., Patwardhan, A.W. (2008). "Design aspects of ejectors: Effects of suction chamber geometry". Chemical Engineering Science, vol. 63, pp. 3886-3897.
- [5] Li, C., Li, Y., Wang, L. (2012). "Configuration dependence and optimization of the entrainment performance for gas-gas and gas-liquid ejectors". Applied Thermal Engineering, vol. 48, pp. 237-248.
- [6] Cramers, P., Beenackers, A. (2001). "Influence of the ejector configuration, scale and the gas density on the mass transfer characteristics of gas-liquid ejectors". Chemical Engineering Journal vol. 82, pp.131-141.
- [7] Elgozali, A., Linek, V., Fialova, M., Wein, O., Zahradník, J. (2002). "Influence of viscosity and surface tension on performance of gas-liquid contactors with ejector type gas distributor". Chemical Engineering Science vol. 57, pp. 2987-2994.
- [8] Gamisans, X., Sarrà, M., Lafuente, F.J. (2004). "Fluid flow and pumping efficiency in an ejector-venturi scrubber". Chemical Engineering and Processing: Process Intensification vol. 43, pp. 127-136.

- [9] Rusly, E., Aye, L., Charters, W., Ooi, A. (2005). "CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system". *International Journal of Refrigeration* vol. 28, pp.1092-1101.
- [10] Li, M., Christofides, P.D. (2005). "Multi-scale modeling and analysis of an industrial HVOF thermal spray process". *Chemical Engineering Science* vol. 60, pp. 3649-3669.
- [11] Das, S.K., Biswas, M.N. (2006). "Studies on ejector-venturi fume scrubber". *Chemical Engineering Journal* vol. 119, pp. 153-160.
- [12] Sriveerakul, T., Aphornratana, S., Chunnanond, K. (2007). "Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. Validation of the CFD results". *International Journal of Thermal Sciences* vol. 46, pp. 812-822.
- [13] Sriveerakul, T., Aphornratana, S., Chunnanond, K. (2007). "Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 2. Flow structure of a steam ejector influenced by operating pressures and geometries". *International Journal of Thermal Sciences* vol. 46, pp. 823-833.
- [14] Varga, S., Oliveira, A.C., Diaconu, B. (2009). "Numerical assessment of steam ejector efficiencies using CFD". *International Journal of Refrigeration* vol. 32, pp. 1203-1211.
- [15] Varga, S., Oliveira, A.C., Diaconu, B. (2009). "Influence of geometrical factors on steam ejector performance—a numerical assessment". *International Journal of Refrigeration* vol. 32, pp. 1694-1701.
- [16] Zhu, Y., Cai, W., Wen, C., Li, Y. (2009). Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors. *Applied Thermal Engineering* pp. 29, vol. 898-905.
- [17] Chen, W., Chong, D., Yan, J., Liu, J. (2011). Numerical optimization on the geometrical factors of natural gas ejectors. *International Journal of Thermal Sciences* vol. 50, pp. 1554-1561.
- [18] Ruangtrakoon, N., Thongtip, T., Aphornratana, S., Sriveerakul, T. (2012). "CFD simulation on the effect of primary nozzle geometries for a steam ejector in refrigeration cycle". *International Journal of Thermal Sciences*.
- [19] Zhang, X., Jin, S., Huang, S., Tian, G. (2009). "Experimental and CFD analysis of nozzle position of subsonic ejector". *Frontiers of Energy and Power Engineering in China* vol. 3, pp. 167-174.
- [۲۰] موسوی، س.م.ص، (۱۳۸۹)، طراحی و ساخت جت اجکتور، رساله کارشناسی، دانشگاه سمنان.
- [21] Hemidi, A., Henry, F., Leclaire, S., Seynhaeve, J.-M., Bartosiewicz, Y. (2009). "CFD analysis of a supersonic air ejector. Part I: Experimental validation of single-phase and two-phase operation". *Applied Thermal Engineering* vol. 29, pp. 1523-1531.
- [22] Li, X., Wang, T., Day, B. (2010). "Numerical analysis of the performance of a thermal ejector in a steam evaporator". *Applied Thermal Engineering* vol. 30, pp. 2708-2717.
- [23] Yang, X., Long, X., Yao, X. (2012). "Numerical investigation on the mixing process in a steam ejector with different nozzle structures". *International Journal of Thermal Sciences* vol. 56, pp. 95-106.
- [24] Fluent 6.3.26 Documentation, Fluent User's Guide, 2006.