

## شبیه‌سازی جریان غیر همدمای لاستیک در میکسر بنبوری با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

محمد فلاحتی قاهره<sup>۱</sup> و زهرا منصورپور<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴ - دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲)

**چکیده-** اختلاط یکی از مراحل اولیه و ضروری در فرآیند صنعتی ساخت لاستیک است. هدف اصلی اختلاط شامل ترکیب مواد، افزودن انرژی برای شکستن پیوندهای مولکولی و ادغام مواد با هوا است. پارامترهای عملیاتی مختلفی در کیفیت اختلاط تأثیرگذار است. تحقیق حاضر بر روی شبیه‌سازی غیر همدمای اختلاط لاستیک در یک میکسر بنبوری انجام شده است. مطالعات عددی سه‌بعدی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به منظور دسترسی به اثر پارامترهای عملیاتی مختلف انجام شده است. حرکت روتورها در محاسبات از طریق تکنیک مش لغزان انجام شده است و روش حجم سیال مبتنی بر رویکرد اوپلری برای ردیابی سطح مشترک بین فاز لاستیکی و هوا استفاده شده است. مدل ویسکوزیته غیر نیوتنی کریو-یاسودا همراه با یک فرمول آرنیوس برای تعیین ویسکوزیته وابسته به دمای لاستیک استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ویسکوزیته بالای لاستیک منجر به گرمایش ویسکوز می‌شود. این پدیده، به‌ویژه در ناحیه باریک بین نوک روتور و دیواره که نرخ برش بالایی وجود دارد موثر است و این عامل بر ویسکوزیته و ویژگی‌های جریان لاستیک تأثیر می‌گذارد.

واژه‌های کلیدی: اختلاط، دینامیک سیالات محاسباتی، گرمایش ویسکوز، لاستیک، بنبوری.

## Simulation of Non-Isothermal Flow of Rubber in Banbury Mixer Using Computational Fluid Dynamics

M. Falahati<sup>1</sup> and Z. Mansourpour<sup>2\*</sup>

1-Master's student, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran

2-Associate Professor, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran

**Abstract:** Mixing is one of the first and necessary steps in the industrial process of rubber production. The main purpose of mixing involves combining materials, adding energy to break the molecular bonds, and combining materials with air. Executive operation is effective in the mixing quality. The present research is on the non-isothermal simulation of mixing in a Banbury mixer. Three-dimensional numerical studies, using computational fluid dynamics, have been carried out in order to use different

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mansourp@ut.ac.ir

operational parameters. The movement of the surfaces in the calculations has been considered through the sliding mesh technique, and the fluid volume method has been used in the Eulerian approach to track the interface between the rubber phase and air. The Carreau-Yasuda non-Newtonian viscosity model, along with an Arrhenius formula, has been used to determine the temperature-dependent viscosity of rubber. The results of this research show that the high viscosity of rubber becomes viscous when heated. This phenomenon is especially in the narrow area between the tip of the rotor and the wall, where there is a higher shear, and this factor affects the viscosity and flow characteristics of the rubber.

**Keywords:** mixing, computational fluid dynamics, viscous heating, rubber, banbury.

## فهرست علائم

تسور اتلاف ویسکوز	$\tau : \nabla V$	دینامیک سیالات محاسباتی	CFD
تسور تنش ویسکوز	$\tau$	گرمایش ویسکوز	$q_{gen}$
تسور نرخ کرنش	$D$	ویسکوزیته	$\mu$
ماتریس ترانهاد بردار سرعت	$V^T$	سرعت	$U$
ویسکوزیته صفر	$\mu_0$	نرخ برش	$\dot{\gamma}$
ویسکوزیته بی نهایت	$\mu_\infty$	چگالی	$\rho$
ثابت زمانی استراحت	$\lambda$	زمان	$t$
ثابت پاورلا	$n$	بردار سرعت	$V$
انرژی فعال‌سازی	$\alpha$	تسور تنش کوشی	$\sigma$
دمای مرجع	$T_\alpha$	شتاب جاذبه	$g$
عدد رینولدز	$Re$	ضریب حرارت ویژه	$C_p$
		ضریب هدایت رسانی	$k$

## ۱- مقدمه

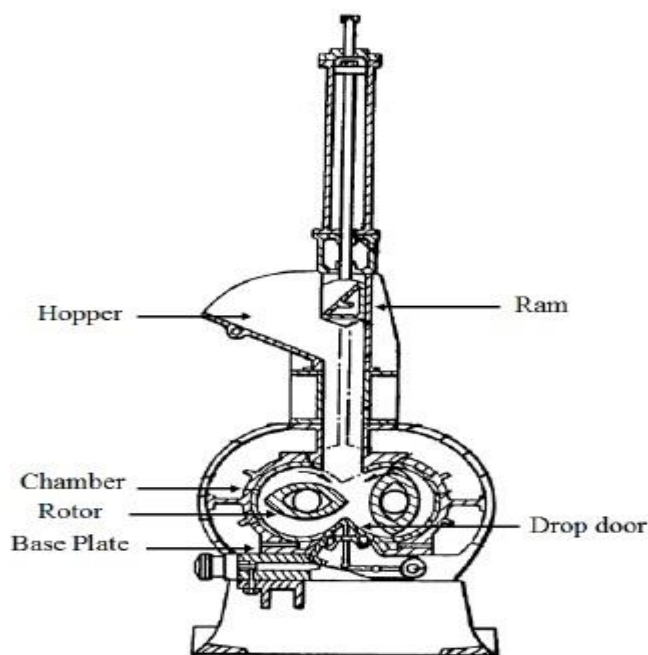
ویژگی لاستیک و همچنین محصول نهایی را تغییر دهد و همچنین ممکن است بر خود دستگاه اختلاط تأثیر منفی بگذارد. از این رو تجزیه و تحلیل عددی، تحت شرایط غیر هم‌دمای مهم است [۶]. به‌طور کلی دستگاه‌های اختلاط دستگاه‌های مکانیکی متشکل از یک جفت روتور و یک محفظه اختلاط هستند. انواع مختلفی از دستگاه‌های اختلاط برای اختلاط مواد بسیار ویسکوز وجود دارد (به شماره ثبت اختراع ایالات متحده مراجعه شود: US1689990 A، US1260684 A، US2067458 A، US2015618 A، US5158725 A و US2694224 A). این دستگاه‌ها از نظر اندازه، جهت‌گیری روتور، تعداد روتورها و محفظه‌های اختلاط و غیره متفاوت هستند. در این میان، محفظه اختلاط مجهز به روتورهای غیر همسان گرد افقی، نوع اساسی دستگاه اختلاط است که در آن مواد با نیروی گرانش و حرکت چرخشی روتورها به دام می‌افتند [۷ و ۸]. عوامل متعددی مانند

لاستیک ماده اولیه برای فرآیند تولید تایر است که عمدتاً از محصولات فرعی نفتی سنتز می‌شود [۱]. لاستیک همچنین می‌تواند به‌طور طبیعی به‌عنوان شکلی از لاتکس، عمدتاً از درختان لاستیک برداشت شود [۲]. یکی از مراحل اولیه در فرآیند تولید تایر، اختلاط لاستیک با سایر ترکیبات به‌منظور به دست آوردن محصول نهایی مطلوب است. اختلاط فرآیندی است برای افزایش برخی از خواص مهندسی اولیه مانند خواص مکانیکی، شیمیایی، فیزیکی با کاهش غیریکنواختی مواد تشکیل‌دهنده که در واقع برای کیفیت محصول نهایی ضروری هستند [۳]. به دلیل ویسکوزیته بالای لاستیک، فرآیند اختلاط همیشه در یک رژیم جریان آرام رخ می‌دهد [۴]. این ویسکوزیته بالا همچنین منجر به اتلاف گرمای ویسکوزیته داخلی می‌شود [۵]. گرمای اضافی تولیدشده ممکن است

اندازه و شکل دستگاه اختلاط، سرعت چرخش روتورها، تعداد روتورها، ضریب پرشدگی مواد داخل محفظه، نسبت سرعت اصطکاک بین روتورها، زاویه فاز روتورها و فشار رام در تعیین راندمان اختلاط و توزیع یکنواخت مواد در داخل محفظه اختلاط، موثر هستند. [۹-۱۱]. آگاهی از این عوامل در بهبود کیفیت محصول نهایی ضروری است. راندمان اختلاط بر اساس پراکندگی و توزیع پرکننده‌ها تعیین می‌شود [۸]. ذرات/قطرات آگلومرات‌ها توسط کشش سطحی و نیروهای منسجم در کنار هم نگه‌داشته می‌شوند. تعادل بین نیروهای مولکولی داخلی و نیروهای برهم زننده خارجی نقش مهمی در تجزیه چنین آگلومرات‌هایی به ذرات ریزتر دارد که به فرآیند آن پراکندگی می‌گویند. هنگامی که ذرات بزرگ‌تر به اجزای جزئی تجزیه می‌شوند، این اجزای کوچک‌تر به ایجاد توزیع مناسب در حوزه کمک می‌کنند. فرآیندی که روتورها به‌طور مکرر اجزای جزئی را به‌منظور افزایش همگنی فضایی سیستم در داخل محفظه پخش می‌کند، اختلاط توزیعی نامیده می‌شود. در شکل (۱) طرحی از یک میکسر داخلی ارائه شده است.

در پژوهش‌های پیشین مطالعات تجربی و عددی متعددی برای تعیین کیفیت و کارایی اختلاط انجام شده است. به‌طور تجربی، تکنیک‌هایی مانند میکروسکوپ نوری، مقاومت الکتریکی و میکروسکوپ الکترونی در گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۸-۱۳]. به عنوان مثال، کیفیت اختلاط به شرایط عملیاتی و خواص مواد بستگی دارد که به‌طور تجربی توسط کاتن و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت [۱۳]. اثرات ضریب پرشدگی برای میکسرهای مختلف غیر درهم فرورونده یا مماسی توسط وایت [۱۴] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها از یک میکسر مقیاس آزمایشگاهی برای محاسبه گشتاور و نرخ چرخش استفاده کردند که نتایج آن با نتایج نظری مقایسه شد. توه و همکاران [۱۵] به‌طور تجربی تأثیر زاویه پیچش روتور بر اختلاط لاستیک را بررسی کردند. آن‌ها از سه نوع مختلف روتور برای مطالعه خود استفاده کردند. اثر سرعت روتور در گرمایش ویسکوز برای اختلاط یک مذاب پلیمری توسط

صلاح‌الدین و همکاران مورد مطالعه تجربی قرار گرفت [۱۸]. آن‌ها از یک میکسر داخلی برای به دست آوردن نتایج تجربی استفاده کردند و سپس این نتایج را با شبیه‌سازی‌های عددی مقایسه کردند. اگرچه آزمایش‌ها می‌توانند اطلاعات ارزشمند زیادی را با داده‌های واقعی ارائه دهند، اما هنوز بسیار دشوار و پرهزینه هستند. از سوی دیگر، شبیه‌سازی عددی برای چنین مسائلی به‌ویژه با توسعه رایانه‌های قدرتمندتر و روش‌های عددی دقیق‌تر که امروزه در دسترس هستند، امکان‌پذیرتر و مقرون به‌صرفه‌تر است. چندین محقق در بررسی عددی، این نوع اختلاط بسیار ویسکوز را مورد مطالعه قرار داده‌اند. چنگ و ماناس [۱۹] یک مدل المان محدود دوبعدی را برای مطالعه سرعت و میدان فشار در میکسر بنبوری توسعه دادند. اثرات شکاف نوک روتور، سرعت روتور و نسبت سرعت روی میکسر بنبوری بررسی شد. داس و همکاران همچنین یک مدل سه‌بعدی با استفاده از روش حجم محدود برای تجزیه و تحلیل اثر زاویه فاز روتور و نسبت سرعت روتورها بر میدان سرعت و فشار توسعه دادند [۹ و ۱۱]. آن‌ها همچنین فرض کردند که محفظه در حالت هم‌دم باشد و محفظه اختلاط تا حدی با لاستیک پر شده است. آن‌ها از روش حجم سیال<sup>۱</sup> (VOF) برای محاسبه سطح آزاد بین لاستیک و هوا استفاده کردند. یک مدل نیمه‌پر شده از نوع دوبعدی درهم فرورونده توسط ناصحی و قریشی با استفاده از روش اجزای محدود همراه با روش اویلر-لاگرانژ برای ردیابی سطح آزاد مورد مطالعه قرار گرفت [۲۰]. تمام مطالعات قبلی به دلیل سادگی، شرایط هم‌دم را فرض می‌کردند؛ اما در واقعیت به دلیل اتلاف ویسکوزیته ناشی از ویسکوزیته بالای لاستیک، حفظ حالت هم‌دم غیرممکن است. از این رو بررسی رفتار غیر هم‌دمای اختلاط لاستیک ضروری است. مالکین یک مدل ریاضی برای ارزیابی اتلاف حرارت داخلی و تأثیر آن بر کیفیت اختلاط دو میکسر روتور، با فرض یک محفظه کاملاً پر، توسعه داد [۶]. یک محفظه اختلاط کاملاً پر شده توسط بای و همکاران برای مطالعه توزیع دما و مکانیسم انتقال حرارت مدل‌سازی شد [۲۱]. اثر سرعت روتور بر



شکل ۱- سطح مقطع میکسر داخلی [۱۲].

مجهز به دو روتور غیرمماسی است. شکل (۲) نمای سه‌بعدی محفظه اختلاط را نشان می‌دهد. به علت تأثیر نیروی گرانش، در ابتدا لاستیک در پایین محفظه و هوا بالای آن قرار می‌گیرد.

## ۲-۲ شرایط و پارامترهای فیزیکی

ضریب پرتشدگی را می‌توان به‌عنوان نسبت حجم فضای اشغال‌شده توسط لاستیک به کل حجم موجود برای اشغال در محفظه تعریف کرد. برای این تحقیق ضریب پرتشدگی ۰/۷۵ انتخاب شد. روتورها در زاویه فاز با یکدیگر کار می‌کنند. تفاوت در موقعیت زاویه‌ای بین دو روتور باعث تسهیل حرکت بهتر مواد و در نتیجه توزیع بهتر پرکننده‌ها می‌شود.

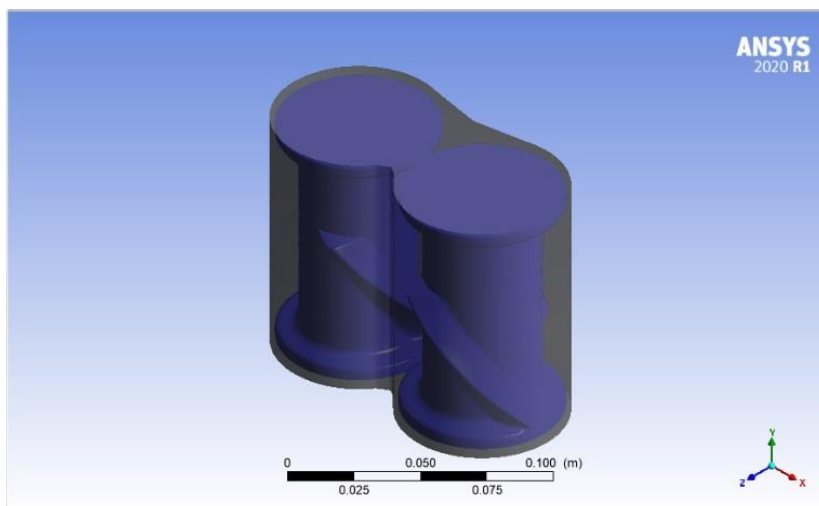
برای این تحقیق زاویه فاز ۴۵ درجه (شکل ۳) در نظر گرفته شد. مسئول ایجاد فشار در میکسر، رام است. رام همیشه در بالای محفظه اختلاط قرار دارد و به ایجاد فشار درون محفظه در طول فرآیند تغذیه کمک می‌کند. فشار عملیاتی ۱ bar در نظر گرفته شد. برای شرایط غیر همدما، دمای عملیاتی ۲۹۸ K و دمای اولیه لاستیک و هوا ۳۱۳ K انتخاب

اختلاط توسط پودیال و همکاران با توسعه یک مدل دوبعدی غیر همدما در یک محفظه نیمه‌پر تحلیل شد [۲۲]. به‌غیر از ارائه یک سناریوی واقعی‌تر، مزایای دیگری برای مدل‌سازی یک محفظه اختلاط غیر همدمای پرتشده وجود دارد. چنین مدلی می‌تواند در پیش‌بینی زمان کار مداوم دستگاه، قبل از گرم شدن بیش‌ازحد تجهیزات و همچنین تخریب مواد مفید باشد. لذا در این مطالعه، هندسه بنبوری با توجه به مرجع موجود، با استفاده از شبکه بندی بهینه ایجاد شد. خواص مواد، معادلات حاکم و پارامترهای فیزیکی نیز تعیین شدند. هدف اصلی مطالعه حاضر توسعه یک مدل سه‌بعدی برای ارزیابی اثرات گرمایش ویسکوز<sup>۲</sup> در سیال غیر نیوتنی کاریو-یاسودا<sup>۳</sup> در واحد بنبوری و مطالعه الگوی تغییرات دما، سرعت و فشار در شرایط غیر همدما است.

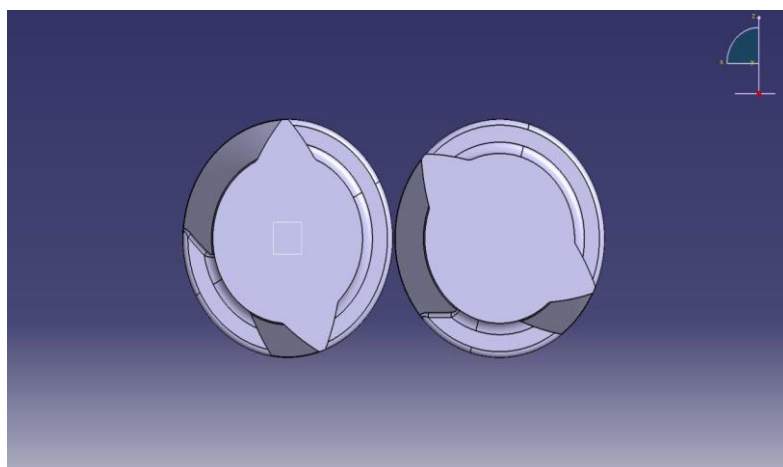
## ۲- تعریف مسئله

### ۱-۲- هندسه

هندسه مورد نظر در این مطالعه، شامل یک محفظه اختلاط



شکل ۲- نمای سه‌بعدی روتورها و محفظه اختلاط.



شکل ۳- موقعیت قرارگیری بال‌های روتور نسبت به هم (زاویه فاز).

که از انتهای مخالف سرچشمه می‌گیرند. این نوع روتورها در ترکیب مواد پلیمری مانند لاستیک و پلاستیک با تقویت‌کننده‌های آن‌ها بسیار رایج هستند. مشخصات دقیق هندسه سه‌بعدی روتور دوباله در جدول (۱) داده شده است.

### ۳-۲ خواص مواد

مواد مورد استفاده و خواص آن‌ها طبق مطالعات قبلی انتخاب شده است [۱۷، ۱۹ و ۲۴]. لاستیک سیال غیرقابل تراکم و سیال غیرنیوتونی است. ویسکوزیته لاستیک با مدل کاریو- یاسودا مدل‌سازی شد [۲۵]. برای مدل‌سازی هوا و لاستیک

شد. انتخاب دمای اولیه لاستیک به این منظور است که در این دما لاستیک نه تنها به قدر کافی خنک باشد بلکه شکننده هم نباشد.

سرعت بهینه روتور به طراحی روتورها و همچنین موادی که باید مخلوط شوند بستگی دارد. به منظور به حداکثر رساندن توزیع مواد در دامنه، روتورها با سرعت کمتری می‌چرخند تا ویسکوزیته ماده کاهش نیابد. روتور سمت چپ ساعت‌گرد و روتور سمت راست پادساعت‌گرد و هر دو با سرعت برابر  $20 \text{ rpm}$  می‌چرخند. میکسر مورد استفاده بنبوری<sup>۴</sup> و از نوع دوباله است. هر یک از این روتورها دارای دو بال بلند مارپیچی هستند

جدول ۱- مشخصات طراحی روتور دوباله [۲۳].

مقادیر	مشخصات هندسی
۱/۵۸	نسبت طول روتور به قطر روتور
۳۸ درجه	زاویه مارپیچ اولین بال بلند
۴۵ درجه	زاویه مارپیچ دومین بال بلند
۹۷ درجه	زاویه پیچش اولین بال بلند
۱۰۹ درجه	زاویه پیچش دومین بال بلند
۰/۷۳	نسبت طول اولین بال بلند
۰/۶۴	نسبت طول دومین بال بلند
۰ درجه	موقعیت جهت‌گیری زاویه‌ای اولین بال بلند
۱۷۳ درجه	موقعیت جهت‌گیری زاویه‌ای دومین بال بلند

(۳) بیان شده است:

$$\rho = \sum_i \rho_i \alpha_i \quad (۱)$$

$$\mu = \sum_i \mu_i \alpha_i \quad (۲)$$

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (V \rho C_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \tau : \nabla V \quad (۳)$$

که در اینجا  $\rho$  معرف چگالی،  $t$  زمان،  $V$  بردار سرعت،  $\sigma$  تانسور تنش،  $g$  شتاب جاذبه،  $C_p$  حرارت ویژه،  $T$  دما و  $k$  ضریب هدایت رسانشی است. تانسور تولید  $\tau : \nabla V$  معرف اتلاف ویسکوز است و  $T$  تانسور تنش ویسکوز است که توسط رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$\tau = 2\mu D \quad (۴)$$

$D$  تانسور نرخ کرنش است که توسط رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$D = \frac{1}{2} [\nabla V + \nabla V^T] \quad (۵)$$

از آنجاکه ویسکوزیته غیرنیوتونی لاستیک وابسته به نرخ برش و دما است، می‌توان با مدل کاریو-یاسودا آن را تخمین زد که با استفاده از رابطه (۶) تعریف شده است:

$$\mu = \mu(\dot{\gamma}) = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left( 1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right)^{(n-1)/2} \quad (۶)$$

در این رابطه ثابت معادله  $n=0.4$ ، ویسکوزیته برشی صفر  $\mu_0$  برابر با  $100000 \text{ Pa.s}$ ، ویسکوزیته برشی بی‌نهایت  $\mu_\infty$  برابر با  $1 \text{ Pa.s}$  و ثابت زمانی استراحت  $\lambda$  برابر  $10$  ثانیه در نظر

ویسکوز یک تکنیک چند فازی انتخاب شد. یک چالش دیگر مربوط به تفاوت بسیار زیاد در خواص است؛ مخصوصاً ویسکوزیته بین لاستیک و هوا. نسبت ویسکوزیته بین فازهای لاستیک و هوا از مرتبه  $10^1$  است که پیچیدگی بیشتری را به‌ویژه از نظر همگرایی، دقت و ثبات حل اضافه می‌کند. محور چرخش عمودی (محور  $y$ ) در نظر گرفته می‌شود و به دلیل جاذبه، در ابتدای کار، لاستیک در پایین محفظه قرار می‌گیرد. در واقعیت ترکیب لاستیک موجود در محفظه اختلاط حاوی موادی مانند پرکننده‌ها، آنتی اکسیدها، روغن و غیره است که برای خواص مطلوب ماده نهایی مهم است و اختلاط در چند مرحله انجام می‌شود؛ اما برای سادگی فرض می‌شود که ترکیب لاستیک یکنواخت است، هیچ‌گونه واکنش شیمیایی نیز انجام نمی‌شود و اختلاط در یک مرحله انجام می‌شود. خصوصیات غیرنیوتنی و فیزیکی و حرارتی لاستیک به ترتیب در جداول (۲) و (۳) نشان داده شده است.

## ۲-۴ معادلات حاکم

جهت حل عددی ارائه شده در این مقاله، معادلات جرم، مومنتوم و انرژی به شکل هم‌زمان حل شده‌اند. شرط معادله پیوستگی یا بقای جرم در رابطه (۱)، بقای مومنتوم در رابطه (۲) و برای شرایط غیر هم‌دما حاکم بر مسئله معادله بقای انرژی یعنی رابطه

جدول ۲- خواص فیزیکی و شرایط عملیاتی لاستیک [۲۶].

خواص فیزیکی	مقدار (واحد)
چگالی	۱۱۰۰ (kg/m <sup>3</sup> )
ضریب هدایت حرارتی	۰/۲۵۰ (w/m.k)
ظرفیت گرمایی ویژه	۱۴۰۰ (J/kg.k)
وزن مولکولی	۱۸۰۱۵۲ (kg/kmol)

جدول ۳- خواص و شرایط عملیاتی هوا [۲۶].

خواص فیزیکی	مقدار (واحد)
چگالی	۱/۱۸۴ (kg/m <sup>3</sup> )
ویسکوزیته	۱/۷۸۹e-۵ (kg/m.s)
ضریب هدایت حرارتی	۰/۰۲۴ (w/m.k)
ظرفیت گرمایی ویژه	۱۰۰۶/۴۳۰ (J/kg.k)
وزن مولکولی	۲۸/۹۹۶ (kg/kmol)

آرنیوس را برای تابع ویسکوزیته وابسته به دما یعنی  $H(T)$  نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، ویسکوزیته با افزایش دما کاهش می‌یابد و سرعتی که در آن این کاهش اتفاق می‌افتد، به خود  $H(T)$  بستگی دارد. همچنین وابستگی ویسکوزیته به دما و نرخ برش در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است.

به خاطر گرانش زیاد غیر نیوتنی لاستیک، منطقه باریک بین نوک روتور و دیوار محفظه نسبت به بقیه محفظه سرعت برش بسیار بالایی را تجربه می‌کند. نرخ برشی شدید در ناحیه باریک روتور و دیواره مقدار زیادی گرمایش ویسکوز ایجاد می‌کند. از نظر ریاضی، میزان تولید گرمای ویسکوز توسط رابطه (۱۰) زیر بیان می‌شود [۲۹]:

$$q_{gen} = \mu U^2 \quad (10)$$

جایی که  $\mu$  ویسکوزیته غیر نیوتنی لاستیک وابسته به برش و دما و  $U$  سرعت متوسط جریان لاستیک است.

در روش حجم سیال (VOF) شبیه‌سازی دو یا چند سیال غیرقابل نفوذ در یکدیگر با استفاده از حل معادلات مومنتوم و مسیریابی کسر حجمی هر یک از سیالات در دامنه محاسباتی، امکان‌پذیر است. این مدل برای جریان‌های دو یا چند فازی

گرفته شده است [۹-۱۱]. در اینجا  $\dot{\gamma}$  نرخ برش است که طبق رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2D:D} \quad (7)$$

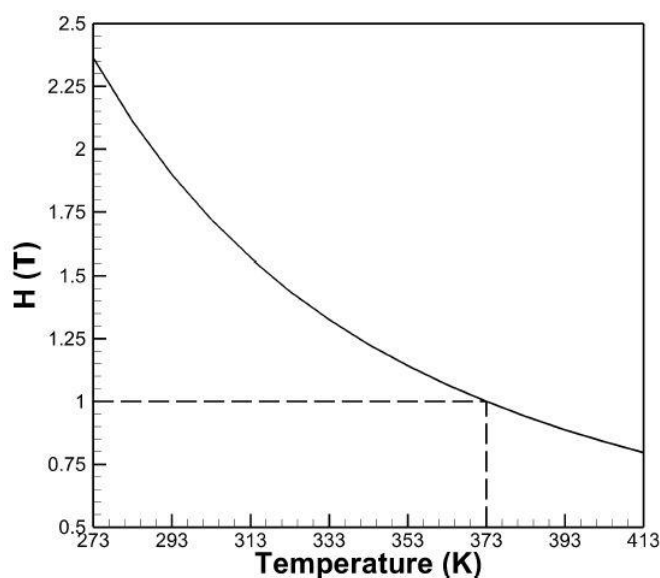
همچنین، باید توجه کرد که ترکیبات لاستیکی درواقع دارای رفتار ویسکوالاستیک هستند [۲۷] ولی پاسخ ویسکوالاستیک آن‌ها به‌منظور کاهش پیچیدگی محاسباتی، از نظر راه‌حل قابل‌بررسی، در نظر گرفته نشده است. از سوی دیگر، برای یک فرآیند اختلاط غیر هم‌دما، مانند آنچه در این مطالعه در نظر گرفته شده است اثر ترکیبی نرخ برش و دما برای تغییر ویسکوزیته لاستیک باید نظر گرفته شود. بنابراین، ویسکوزیته کل لاستیک به این صورت تعریف می‌شود:

$$\mu = \mu(\dot{\gamma})H(T) \quad (8)$$

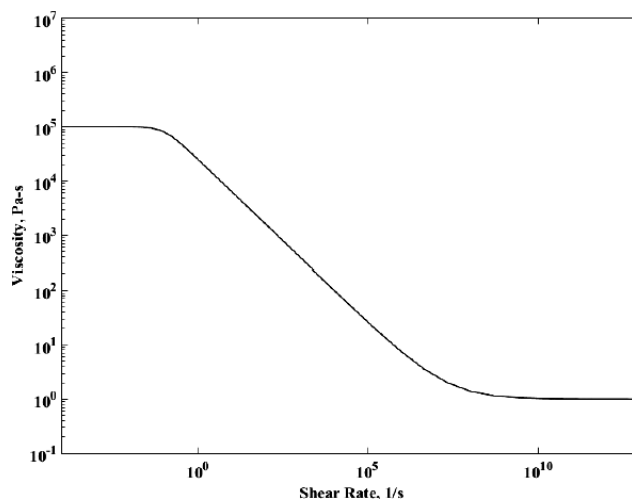
که در آن  $H(T)$  ویسکوزیته ناشی از دما به تنهایی است. مقدار  $H(T)$  طبق قانون دقیق آرنیوس محاسبه شده است و چنین بیان می‌شود [۲۸]:

$$H(T) = \exp\left[\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\alpha}\right)\right] \quad (9)$$

در اینجا  $\alpha$  انرژی فعال‌سازی و برابر  $876 \text{ k}$  و  $T_\alpha$  دمای مرجع و برابر با  $373 \text{ K}$  در نظر گرفته شد [۳۵]. شکل (۴) قانون دقیق



شکل ۴- ویسکوزیته وابسته به دما یا قانون دقیق آرنیوس؛ خط چین نشان دهنده  $T_\alpha$  است که در آن  $H(T) = 1$  است [۲۸].



شکل ۵- تغییر ویسکوزیته غیر نیوتنی لاستیک با نرخ برش بر اساس مدل کاریو-یاسودا [۲۸].

فاز هیچ تداخل یا تنیدگی در همدیگر ندارند، باید سطح مشترک آن‌ها را ردیابی کرد. سطح مشترک با مدل کسر حجمی سیال VOF، که بر روی شبکه اولرین ثابت شده است، حل می‌شود. دو فاز مختلف (لاستیک و هوا) توسط یک معادله پیوستگی و مومنتوم تنظیم می‌شوند، اما کسر حجمی (کسری از حجم سیال در سلول به عنوان تابعی از حجم کل سلول) هر فاز در سلول جداگانه در کل دامنه محاسباتی حساب می‌شود.

غیرقابل نفوذ بکار می‌رود. برای هر فاز اضافه‌شده، متغیر کسر جرمی فاز در المان محاسباتی منظور می‌شود. به‌طور کلی در هر حجم کنترل، مجموع کسرهای حجمی باید برابر یک باشد. از آنجاکه کسر حجمی هر یک از فازها در هر المانی مشخص هست، بنابراین متغیرها و ویژگی‌های جریان در هر المان بر اساس کسر حجمی فازها محاسبه می‌شود. محفظه مدل شده در این تحقیق چون شامل لاستیک و هوا است درحالی که این دو



Fluent meshing استفاده شد. برای این هندسه از مش‌های بی‌سازمان چندوجهی پلی هیدرال یا لانه‌زنبوری به تعداد ۲۰۰۰۰۰ سلول، استفاده شد. برای بررسی استقلال از مش، ۵۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰۰، ۴۰۰۰۰۰ مش استفاده شد. درصد خطا بین تعداد مش ۲۰۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰۰ حدود ۴٪ بود. این درصد خطا برای محاسبه سرعت روتور در امتداد محور عمود بر محور چرخش روتورها بود و مقدار خطای بین نمودارها در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد. بنابراین در شبیه‌سازی از ۲۰۰۰۰۰ مش استفاده شد. در شکل (۶) نمای برش خورده و مش سطح روتور نشان داده شده است.

برای مناطق نوک روتور و دیواره به علت ایجاد گرادیان‌های فشار و سرعت که نقش مهمی در تولید گرمایش ویسکوز دارند مش دقیق‌تر و ریزتری استفاده شد به همین دلیل برای ناحیه اطراف هردو روتور مش لایه‌مرزی با ایجاد دو لایه انتخاب شد. از تکنیک Body of influence استفاده شد تا مش‌های محل اتصال دو روتور ریزتر ریخته شود. مزیت استفاده از مش پلی هیدرال وضوح و دقت بهتر نسبت به مش‌های دیگر با تعداد سلول‌های کمتر است. سلول‌های چندوجهی نه تنها تعداد کلی سلول‌ها را کاهش می‌دهند بلکه با زمان شبیه‌سازی کمتر همگرایی سریع‌تر و قوی‌تری دارند. همچنین، با تعداد قابل‌مقایسه سلول، نتایج به‌دست‌آمده روی هر مش چندوجهی در مقایسه با مش چهاروجهی دقیق‌تر است [۳۱]. یک گام زمانی کوچک زمان شبیه‌سازی را می‌تواند بدون بهبود نتایج افزایش دهد و یک گام زمانی بزرگ نیز می‌تواند منجر به واگرایی در حل مسئله شود. گام زمانی با توجه به عدد کورانت  $(\text{courant} = \frac{u\Delta t}{\Delta x})$ ، سرعت روتورها و اندازه سلول‌ها حدس زده شد و سپس همگرایی مورد بررسی قرار گرفت تا گام زمانی بهینه (استقلال از گام زمانی) به دست آید. لازم به ذکر است که عدد کورانت در روش حجم محدود جهت همگرایی بهتر باید عددی بین ۰ و ۱ در نظر گرفته شود. در این مطالعه عدد کورانت برابر ۰/۲ در نرم‌افزار وارد شده است. برای شبیه‌سازی حرکت دوار روتورها از روش شبکه لغزان<sup>۵</sup>

خواص سیال از توابع خواص فازهای تشکیل‌دهنده آن و کسر حجمی آن‌ها به دست می‌آید، مانند:

$$\rho = \sum_i \rho_i \alpha_i \quad (11)$$

$$\mu = \sum_i \mu_i \alpha_i \quad (12)$$

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad (i=1,2) \quad (13)$$

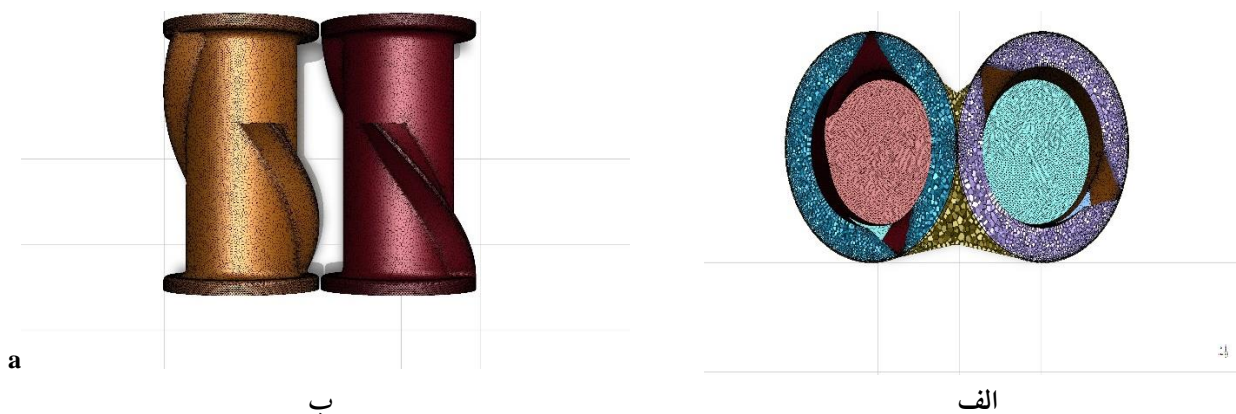
که در آن  $\rho_i$ ،  $\mu_i$  و  $V_i$  به ترتیب چگالی، ویسکوزیته دینامیکی و حجم فاز  $i$  هستند. در اینجا کسر حجمی  $\alpha_i$  مربوط به مقدار فاز لاستیکی است، درحالی‌که  $\alpha_r$  مربوط به فاز هوا است به‌طوری‌که  $\alpha_r + \alpha_i = 1$  بنابراین حجم‌های کنترل با  $\alpha_r = 1$  به‌طور کامل با لاستیک و حجم‌های کنترل با  $\alpha_r = 1$  با هوا پر می‌شوند. سطح آزاد از حجم‌های کنترل با  $\alpha_i$  بین صفر تا یک تشکیل شده است که معمولاً مقدار ۰/۴ تا ۰/۵ را می‌گیرد [۳۰]. در غیاب هرگونه منبع/چشمه برای تکامل کسر حجمی، فرمول VOF توسط این رابطه زیر معرفی می‌شود:

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} + \nabla \cdot \nabla C_m = 0 \quad (14)$$

که  $C_m$  کسر حجمی فاز  $m$  است.

## ۲-۵ مدل محاسباتی

برای هندسه سه‌بعدی موردنظر در این مطالعه، یک شبیه‌سازی گذرا، غیر هم‌دما و تراکم ناپذیر برای محفظه اختلاط، که از ترکیبات لاستیکی یک‌دست و تا ۷۵٪ درصد پر شده است، با استفاده از کد CFD در نسخه ANSYS Fluent 2020 R1 انجام شد. شتاب جاذبه (درجهت منفی محور  $y$ ) و نیروهای حجمی در نظر گرفته شدند و لاستیک در پایین و هوا در بالای محفظه قرار گرفت. روتورها با نسبت سرعت اصطکاک برابر می‌چرخند. روتور سمت چپ همیشه با سرعت ۲۰ دور بر دقیقه و ساعت‌گرد (حول محور  $y$ ) می‌چرخد. روتور سمت راست نیز با توجه به نسبت سرعت اصطکاک پادساعت‌گرد می‌چرخد. یک شبکه حجم محدود برای دامنه سیال اطراف هر روتور و همچنین برای دامنه سیال خارج از این دامنه‌ها ایجاد شد. برای مش زنی این هندسه پیچیده از نرم‌افزار



شکل ۶- نمای برش خورده از مقطع هندسه در الف) صفحه xz و ب) صفحه yz.

استفاده شد. مدل شبکه لغزان اجازه می‌دهد تا یک مساله با نواحی متحرک نسبت به همدیگر، حل و مدل‌سازی شود. این حرکت نسبی می‌تواند به صورت انتقالی و یا چرخشی باشد. حرکت نسبی اجزا ساکن و متحرک مساله را به صورت ناپایا درمی‌آورد. درواقع مش‌های ثابت و متحرک با مرزهای مشترک که همان سطوح اینترفیس<sup>۶</sup> هستند روی هم می‌لغزند و شبیه‌سازی مسئله انجام می‌شود. به این منظور یک فضای استوانه مانند در اطراف هر روتور با فاصله خیلی نزدیک ایجاد می‌شود. ناحیه بین استوانه و روتور می‌چرخد، درحالی‌که بقیه ناحیه سیال ثابت می‌ماند، درنتیجه یک فصل مشترک یا اینترفیس بین این مناطق سیال ایجاد می‌شود به طوری‌که جرم و انرژی می‌تواند از طریق اینترفیس منتقل شود. ارتفاع هر روتور ۱۰۰ mm طراحی شد. فاصله بین نوک روتور و دیواره‌های ناحیه محاسباتی ۳/۷۵ mm انتخاب شد. شرایط مرزی بدون لغزش روی مرزهای محفظه و دیواره روتور اعمال می‌شود، یعنی سیال روی دیواره روتور دارای سرعتی یکسان با خود روتور خواهد بود و سیال روی دیواره محفظه دارای سرعت صفر خواهد بود. در شبیه‌سازی‌ها فرض می‌شود که یک رام در بالای روتور وجود دارد که فشار ثابت برابر فشار اتمسفر را اعمال می‌کند. همچنین، هیچ واکنش شیمیایی برای مواد لاستیکی در طول شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده است.

استفاده شد. مدل شبکه لغزان اجازه می‌دهد تا یک مساله با نواحی متحرک نسبت به همدیگر، حل و مدل‌سازی شود. این حرکت نسبی می‌تواند به صورت انتقالی و یا چرخشی باشد. حرکت نسبی اجزا ساکن و متحرک مساله را به صورت ناپایا درمی‌آورد. درواقع مش‌های ثابت و متحرک با مرزهای مشترک که همان سطوح اینترفیس<sup>۶</sup> هستند روی هم می‌لغزند و شبیه‌سازی مسئله انجام می‌شود. به این منظور یک فضای استوانه مانند در اطراف هر روتور با فاصله خیلی نزدیک ایجاد می‌شود. ناحیه بین استوانه و روتور می‌چرخد، درحالی‌که بقیه ناحیه سیال ثابت می‌ماند، درنتیجه یک فصل مشترک یا اینترفیس بین این مناطق سیال ایجاد می‌شود به طوری‌که جرم و انرژی می‌تواند از طریق اینترفیس منتقل شود. ارتفاع هر روتور ۱۰۰ mm طراحی شد. فاصله بین نوک روتور و دیواره‌های ناحیه محاسباتی ۳/۷۵ mm انتخاب شد. شرایط مرزی بدون لغزش روی مرزهای محفظه و دیواره روتور اعمال می‌شود، یعنی سیال روی دیواره روتور دارای سرعتی یکسان با خود روتور خواهد بود و سیال روی دیواره محفظه دارای سرعت صفر خواهد بود. در شبیه‌سازی‌ها فرض می‌شود که یک رام در بالای روتور وجود دارد که فشار ثابت برابر فشار اتمسفر را اعمال می‌کند. همچنین، هیچ واکنش شیمیایی برای مواد لاستیکی در طول شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده است. استوانه‌هایی که در اطراف هر روتور ایجاد شدند، با نام

$$Re = \frac{\rho U_t D_r}{\mu} < 10 \quad (15)$$

عدد رینولدز بر اساس خواص لاستیک محاسبه می‌شود.  $\rho$  چگالی لاستیک،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی لاستیک،  $U_t$  سرعت مماسی نوک روتور و  $D_r$  بیشترین قطر روتور است. برای مواقعی که سرعت روتورها باهم برابر نباشد از بیشترین سرعت مماسی نوک روتورها برای محاسبه عدد رینولدز استفاده می‌شود.

ضریب کشش سطحی بین لاستیک و هوا ۰/۰۱۹ انتخاب شد هرچند که این نیرو در مقابل نیروهای ویسکوز نقش بسیار کمی دارند [۳۲]. برای حل معادلات انتقال مربوط به سرعت و فشار از حلگر گسسته سازی جریان استفاده شد. برای اتصال و کوپلینگ معادلات فشار و سرعت از روش Simple استفاده شد. گسسته سازی مکانی و زمانی معادله انتقال مومنتوم به ترتیب مرتبه دوم و مرتبه اول است. گسسته سازی معادله انرژی نیز از مرتبه دوم است. برای حل جریان چند فازي هوا و لاستیک، که هردو میدان سرعت خود را دارند اما میدان فشار یکسانی دارند،

لاستیک توسط بال‌های روتور که عامل اصلی جابه‌جایی این فاز است به قسمت‌های فوقانی محفظه نفوذ کرده و متقابلاً هوا نیز به پایین محفظه نفوذ می‌کند. شکل (۷-ب) ویسکوزیته لاستیک در سطح روتورها را نشان می‌دهد. در لبه‌ها، سطوح بالایی و پایینی روتورها کمترین ویسکوزیته و در بدنه روتورها بیشترین ویسکوزیته مشاهده می‌شود. البته در سطح بالایی روتورها به علت وجود هوا ویسکوزیته به مراتب کمتری نسبت به سطح پایینی و لبه‌های روتورها دارد. ویسکوزیته طبق رابطه (۸) متأثر از نرخ برش و دما است و هر کجا نرخ کرنش بالاتر و دما بیشتر باشد، ویسکوزیته بیشتر کاهش می‌یابد بنابراین طبق این نتیجه مشاهدات بالا را می‌توان توجیه نمود.

در شکل (۷-پ) دما در سطح روتورها نشان داده شده است. مشخص است که در سطح تیغه‌های روتور، قسمت‌های بالایی و پایینی روتورها دمای بیشتری مشاهده می‌شود. علت تغییرات دما در غیاب هرگونه شرط مرزی حرارتی، چشمه یا چاه گرمایی به علت ترم اتلاف ویسکوز در رابطه (۳) است. نرخ برش وارد بر لاستیک به سرعت روتورها بستگی دارد. در تحقیقات قبلی نشان داده شده است هرچه سرعت روتورها بیشتر باشد، نرخ برشی بیشتر خواهد بود [۳۵]. نرخ برش که مسئول اصلی گرمایش ویسکوز است منجر به افزایش دما و کاهش ویسکوزیته می‌شود. طبق رابطه (۱۰) گرمایش ویسکوز به ویسکوزیته و سرعت جریان بستگی دارد. طبق شکل (۷-ب) در سطح لبه‌ها نسبت به بدنه روتور ویسکوزیته کمتری مشاهده شد اما سرعت جریان در لبه‌ها نسبت به بدنه بالاتر است و چون، طبق رابطه (۱۰)، اثر سرعت جریان نسبت به ویسکوزیته، به علت اینکه از مرتبه دو می‌باشد، بیشتر است پس در سطح لبه‌ها نسبت به بدنه گرمایش ویسکوز بیشتری وجود خواهد داشت که منجر به دمای بیشتر می‌شود. قسمت پایینی روتور نسبت به قسمت بالای آن دمای بیشتری دارد زیرا طبق شکل (۷-الف) کسر حجمی لاستیک در پایین محفظه بیشترین و در بالای محفظه کمترین است یعنی در پایین محفظه لاستیک و بالای محفظه هوا است بنابراین ویسکوزیته سطح پایین بسیار

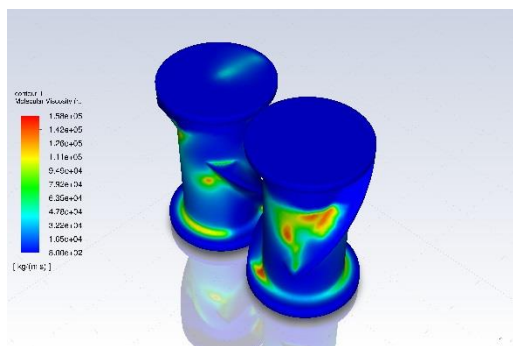
از یک مدل چند فازی VOF استفاده می‌شود. برای به دست آوردن یک رابط تیز بین دو سیال غیرقابل ترکیب مانند هوا و لاستیک، از طرح ضابط ایتترفیس‌ها با وضوح بالا (HRIC) برای ترم‌های رسانی در معادله انتقال VOF استفاده می‌شود [۳۳]. علاوه بر این، از مدل نیروی سطحی پیوسته (CSF) برای محاسبه نیروی کشش سطحی استفاده می‌شود [۳۴]. برای همگرایی بهتر نیز عدد کورانت  $0.2$  انتخاب شد. شبیه‌سازی برای ۱۵ دور چرخش یا ۴۵ ثانیه انجام شد.

### ۳- نتایج

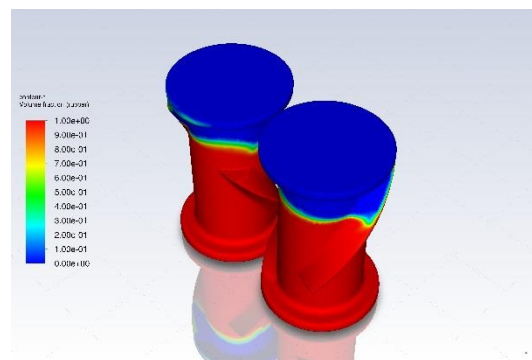
#### ۳-۱ اثرات دمایی

به دلیل گران‌روی بسیار زیاد لاستیک، انرژی مکانیکی روتور به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود که معمولاً به‌عنوان گرمایش ویسکوز شناخته می‌شود. در واقعیت روتورها و دیواره محفظه باید به‌گونه‌ای سرد شوند که دمای پلیمر از دمای بحرانی عبور نکند. با این حال، ممکن است که خنک‌کننده خارجی برای خنثی کردن اثر مخرب افزایش دمای داخلی کافی نباشد و بنابراین دمای پلیمر در صورت افزایش مدت‌زمان اختلاط افزایش یابد. دمای بحرانی دمایی است که در آن تخریب فیزیکی و شیمیایی پلیمر اتفاق می‌افتد. افزایش دما در حین اختلاط بستگی به پارامترهای مختلف مانند سرعت چرخش روتورها، بازده انتقال حرارت از پلیمر مذاب به محفظه و دیواره روتور، ویسکوزیته مواد، زمان اختلاط، فاکتور پرشدگی، فشار اعمال‌شده و غیره دارد. در مطالعه حاضر اثر خنک کاری خارجی اعمال نشد (شرط مرزی حرارتی) تا اثرات گرمایش ویسکوز به‌خوبی درک شود.

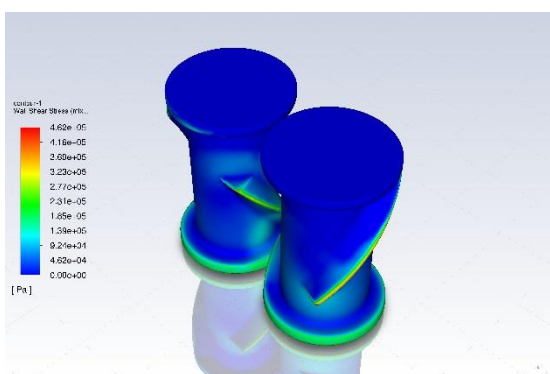
در شکل (۷) مقدار کسر حجمی، ویسکوزیته، دما و تنش برشی در سطح روتورها پس از سه ثانیه از شروع اختلاط یا یک دور چرخش روتورها نشان داده شده‌است. شکل (۷-الف) توزیع کسر حجمی لاستیک را نشان می‌دهد. در ابتدا لاستیک در پایین و هوا در بالای محفظه توزیع شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از سه ثانیه از شروع اختلاط، فاز



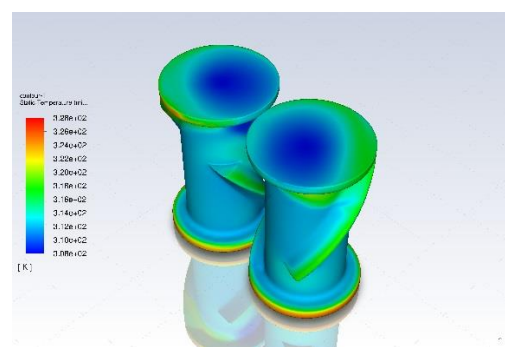
ب



الف



ت



پ

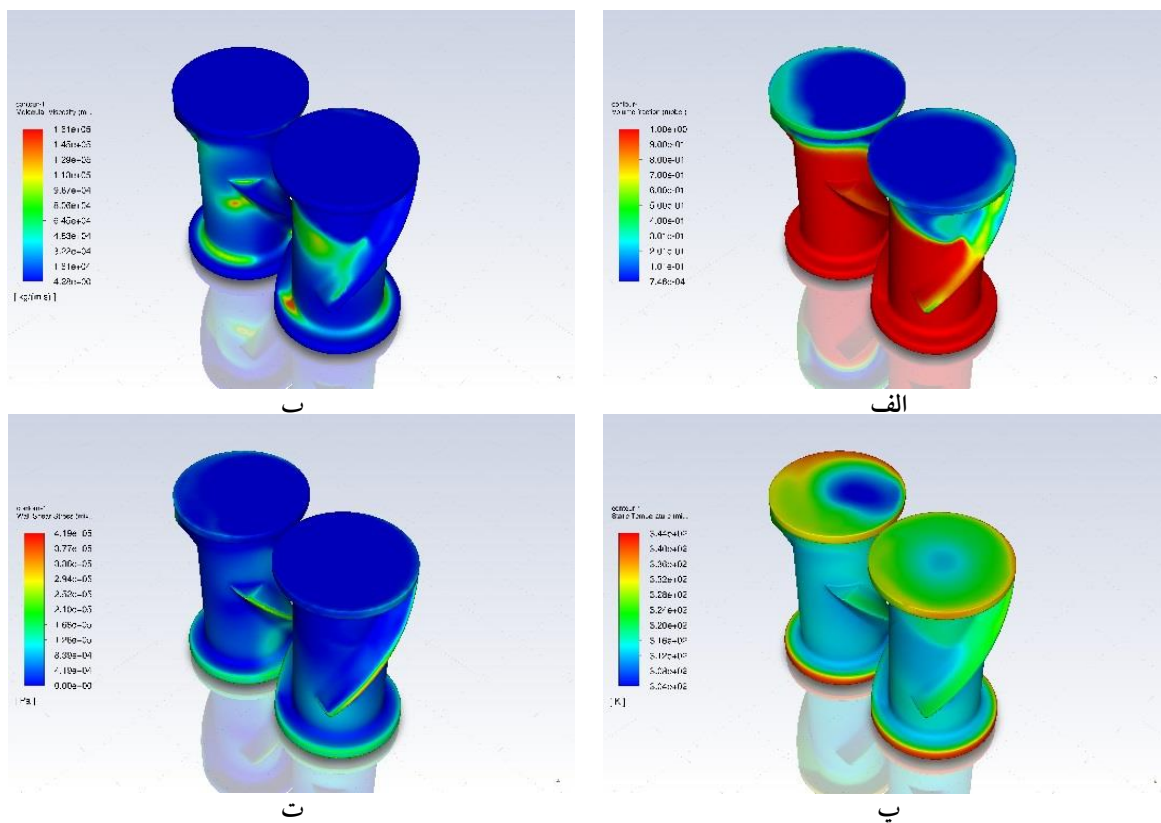
شکل ۷- (a) توزیع کسر حجمی (b) ویسکوزیته (c) دما (d) تنش برشی باگذشت ۳ ثانیه از زمان اختلاط.

بدنه بالاتر باشد. همچنین در سطح پایینی روتورها به علت ویسکوزیته بسیار زیاد لاستیک نیز تنش بالایی مشاهده می‌شود. در شکل‌های (۸) و (۹) نیز همان موارد بررسی شده در شکل (۷)، پس از ۱۲ و ۴۵ ثانیه پس از اختلاط، آورده شده است. پس از ۱۲ ثانیه از اختلاط، طبق انتظار و همان‌طور که در شکل (۸-الف) نشان داده شده است، فاز لاستیک و هوا پراکندگی بیشتری در یکدیگر پیدا کرده‌اند. سطوح منحنی و مارپیچی تیغه‌ها به نفوذ بیشتر دو فاز در یکدیگر کمک می‌کنند. باگذشت زمان و افزایش گرمایش ویسکوز، دما در سطوح روتور افزایش پیدا کرده است. این افزایش دما میانگین ویسکوزیته مخلوط را کاهش داده و باعث کاهش تنش برشی در سطح تیغه‌های روتورها نسبت به ثانیه سوم زمان اختلاط می‌شود.

پس از گذشت ۴۵ ثانیه طبق انتظار و همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، فاز لاستیک و هوا نفوذ تقریباً خوبی در یکدیگر داشته‌اند (شکل ۹-الف). دما در سطح روتورها (شکل ۹-پ) به علت گرمایش ویسکوز افزایش داشته است که منجر به

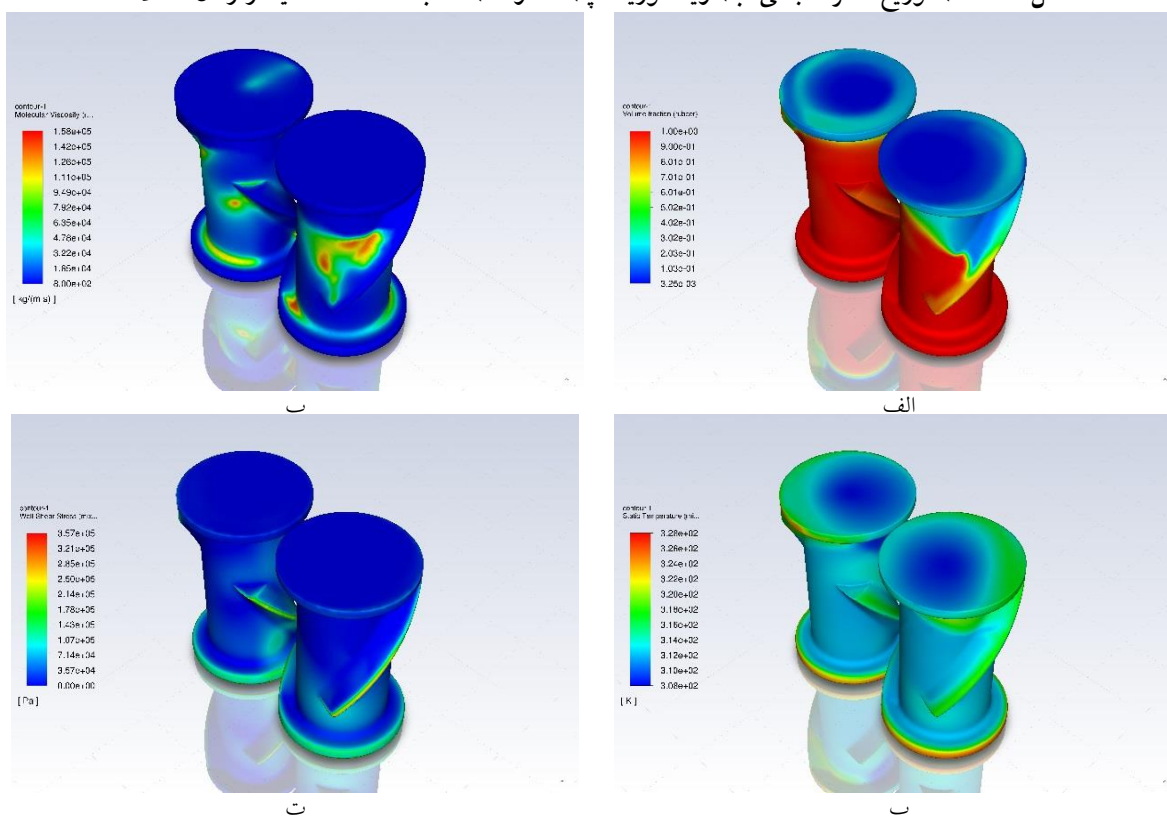
بیشتر از سطح بالایی بوده و در نتیجه گرمایش ویسکوز و دمای بیشتری مشاهده خواهد شد.

شکل (۷-ت) تنش برشی در سطح روتورها را نشان می‌دهد. به علت گرانروی زیاد غیرنیوتنی لاستیک، منطقه باریک بین نوک روتور و دیوار محفظه نسبت به بقیه محفظه سرعت برش بسیار بالایی را تجربه می‌کند. نرخ برشی شدید در ناحیه ورود روتور به محفظه مقدار زیادی گرمای ویسکوز ایجاد می‌کند و دمای داخلی میکسر را افزایش می‌دهد که به نوبه خود به‌طور قابل توجهی بر ویسکوزیته و ویژگی‌های ترمودینامیکی لاستیک و مواد پرکننده تأثیر می‌گذارد. بیشترین تنش برشی در سطح لبه‌های روتور مشاهده می‌شود. طبق رابطه (۴) تنش برشی به ویسکوزیته و نرخ کرنش بستگی دارد. ویسکوزیته در سطح لبه‌های روتور نسبت به بدنه بسیار کمتر است (حدود یک‌صدم) اما طبق بررسی‌های انجام شده نرخ کرنش در لبه‌ها نسبت به بدنه بسیار بالا است (حدود هزار برابر)؛ بنابراین باعث می‌شود که تنش در سطح لبه‌ها نسبت به



اتان

شکل ۸- الف) توزیع کسر حجمی (ب) ویسکوزیته (پ) دما و (ت) دما باگذشت ۱۲ ثانیه از زمان اختلاط.



شکل ۹- الف) توزیع کسر حجمی (ب) ویسکوزیته (پ) دما و (ت) تنش برشی باگذشت ۴۵ ثانیه از زمان اختلاط.

کاهش ویسکوزیته شده است. کاهش ویسکوزیته، تنش برشی در سطح روتورها را دستخوش تغییر کرده و منجر به کاهش آن می‌شود (شکل‌های ۹-ب و ۹-ت).

ویسکوزیته بالای لاستیک باعث گرمایش ویسکوز و نرخ برشی بالا می‌شود پس در کل طول چرخه اختلاط به علت پدیده گرمایش ویسکوز، دمای سیستم شروع به افزایش می‌کند. این عامل به همراه نرخ برشی بالا سبب کاهش ویسکوزیته و روان شدن آن می‌شود. کاهش گرانروی نیز باعث کمتر شدن درگیری سطوح تیغه‌های روتور با لاستیک شده و تنش برشی این قسمت‌ها را کاهش می‌دهد. طبق روابط (۶) و (۸) نیز ویسکوزیته متأثر از دما و نرخ برش است و طبق این روابط با افزایش دما و افزایش نرخ برش (افزایش سرعت روتورها) ویسکوزیته کاهش می‌یابد.

شواهد نشان داده است که افزایش کوچکی در درجه حرارت لاستیک، عواقب قابل توجهی بر سرعت واکنش، ویسکوزیته و حتی کیفیت محصول نهایی دارد. این افزایش دما باید کنترل شود تا از هرگونه آسیب، تخریب حرارتی و خرابی مواد لاستیک، محفظه و روتور جلوگیری شود [۳۵]. این امر می‌تواند تا حدودی از طریق خنک‌کننده مناسب خارجی انجام شود. نرخ برش بالا مسئول گرمایش ویسکوز است که دمای کلی سیستم را افزایش می‌دهد.

### ۳-۲ اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی نتایج تحقیق استیاک احمد [۲۶] انتخاب و نمودارهای مربوط به دمای متوسط، دمای بیشترین، ویسکوزیته مخلوط و سرعت مخلوط بررسی و مقایسه می‌شوند. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مقدار میانگین دمای مخلوط و حداکثر دمای مخلوط در دو تحقیق نشان داده شده است.

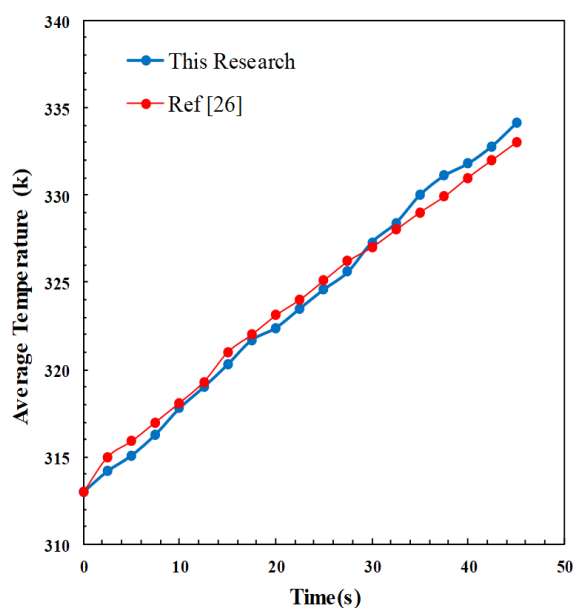
از آنجایی که لاستیک در نظر گرفته شده در اینجا بسیار ویسکوز است، انتظار می‌رود که به دلیل اصطکاک بین لایه‌های مختلف سیال، با استفاده از حرکت چرخشی، گرمای داخلی ایجاد کند؛ بنابراین انتظار می‌رود میانگین و حداکثر دما در دامنه

به‌مرور زمان برای این تولید گرما افزایش یابد. با توجه به نمودار میانگین دما و بیشترین دمای مخلوط (شکل‌های ۱۰ و ۱۱)، در غیاب هرگونه شرط مرزی حرارتی، چاه یا چشمه گرما، به علت پدیده گرمایش ویسکوز تغییر دما اتفاق خواهد افتاد.

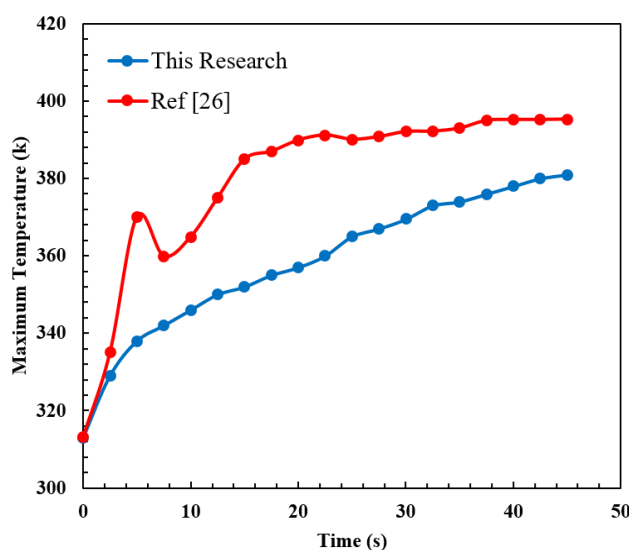
همچنین به علت تفاوت زاویه فاز در دو تحقیق (در تحقیق مرجع زاویه فاز ۱۸۰ در نظر گرفته شده است) انحراف‌ها در بیشترین دما زیاد است. این انحراف به دلیل درگیر شدن بیشتر لاستیک و تحت تنش قرار گرفتن آن و در نتیجه افزایش گرمایش ویسکوز و افزایش دما است. در شکل (۱۲) تأثیرات متقابل ویسکوزیته و دما برهم نشان داده شده است.

در مورد بیشترین دمای مخلوط در دوره‌های ابتدایی که ویسکوزیته مخلوط بیشتر است گرمایش ویسکوز بیشتری مشاهده می‌شود و به تبع آن مقدار افزایش دما در دوره‌های اولیه بیشتر خواهد بود. با کاهش ویسکوزیته به دنبال پدیده گرمایش ویسکوز، شیب افزایش دما هم به‌مرور زمان کاهش می‌یابد درحالی‌که دما حالت افزایشی دارد. تفاوت اصلی بین سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی، وابستگی ویسکوزیته به نرخ برش است. سیالات نیوتنی مستقل از نرخ برش هستند درحالی‌که سیالات غیر نیوتنی بسته به میزان سرعت برش ویسکوزیته متفاوتی از خود نشان می‌دهند. ویسکوزیته سیال معیار مقاومت آن در برابر تغییر شکل تدریجی در اثر تنش برشی است. هر چه ویسکوزیته بالاتر باشد، مقدار تنش برشی مورد نیاز برای داشتن همان تغییر شکل بیشتر خواهد بود.

با توجه به شکل (۱۲) که میانگین ویسکوزیته را نشان می‌دهد، به علت گرمایش ویسکوز و افزایش دما در طول چرخه اختلاط، روند نزولی دارد. این روند نزولی، یکنواخت نیست و در طول آن نوساناتی مشاهده می‌شود. چون ویسکوزیته هوا در مقابل لاستیک ناچیز است تأثیر آن در ویسکوزیته مخلوط را می‌توان ناچیز فرض کرد. نوسانات ویسکوزیته در طول چرخه نیز به این علت است که در طول چرخش روتورها، درصد زیادی از لاستیک تحت فشار از سمت روتورها قرار نمی‌گیرند (در قسمت اتصال دو اتاق‌ها)، بنابراین راکد مانده و ویسکوزیته میانگین مخلوط افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰- مقدار دمای متوسط مخلوط در طول چرخه اختلاط.



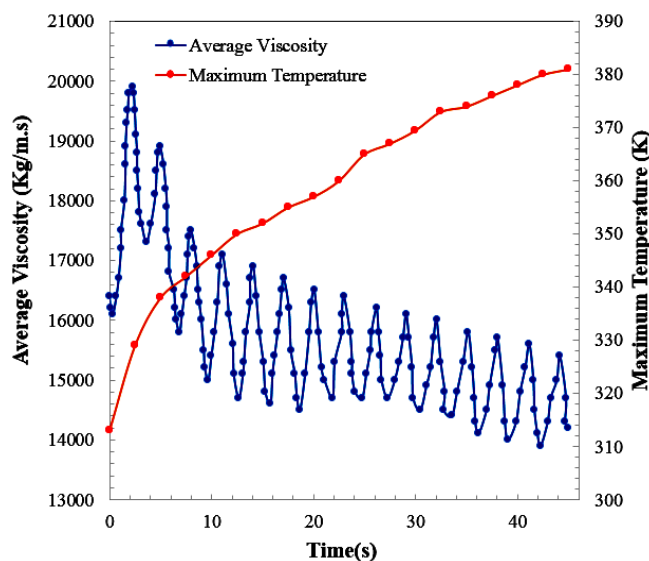
شکل ۱۱- بیشترین دما داخل مخلوط در طول چرخه اختلاط.

### ۲-۳ بررسی فشار

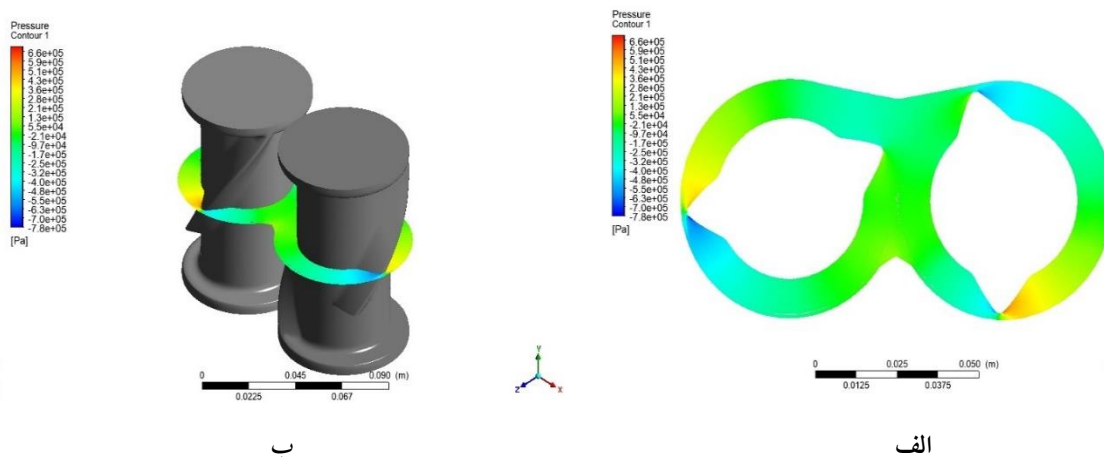
دامنه پخش نشوند؛ بنابراین با افزایش فشار، راندمان اختلاط توزیعی کاهش می‌یابد. کانتور فشار در یک مقطع از دامنه (وسط ارتفاع روتورها) در دور ۱۵ یا ۴۵ ثانیه پس از شروع در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین فشار در جلوی نوک روتور و کمترین فشار در عقب نوک روتور است. مناطق بین دو محفظه هم فشار زیادی متحمل نمی‌شوند. با ورود روتور به محفظه و به دلیل فاصله کم نوک

فشار نقش مهمی در اختلاط دارد. رام دستگاه مسئول ایجاد فشار اولیه بر محفظه اختلاط هست. با افزایش فشار نیروی وارده بر توده‌های جامد افزایش پیدا کرده و باعث خورد شدن این توده‌ها به ذرات ریز می‌شود، پس برای اختلاط پراکندگی مهم است. از طرفی افزایش فشار باعث می‌شود مواد به سطوح روتور و دیواره بچسبند و ذرات به‌طور مناسب و ایده‌آل در





شکل ۱۲- تغییرات ویسکوزیته مخلوط و دمای بیشترین مخلوط در طول چرخه اختلاط.



شکل ۱۳- کانتور فشار پس از ۱۵ دور چرخش در (a) صفحه  $\theta = 5^\circ$  و (b) مقطع همراه با روتورها.

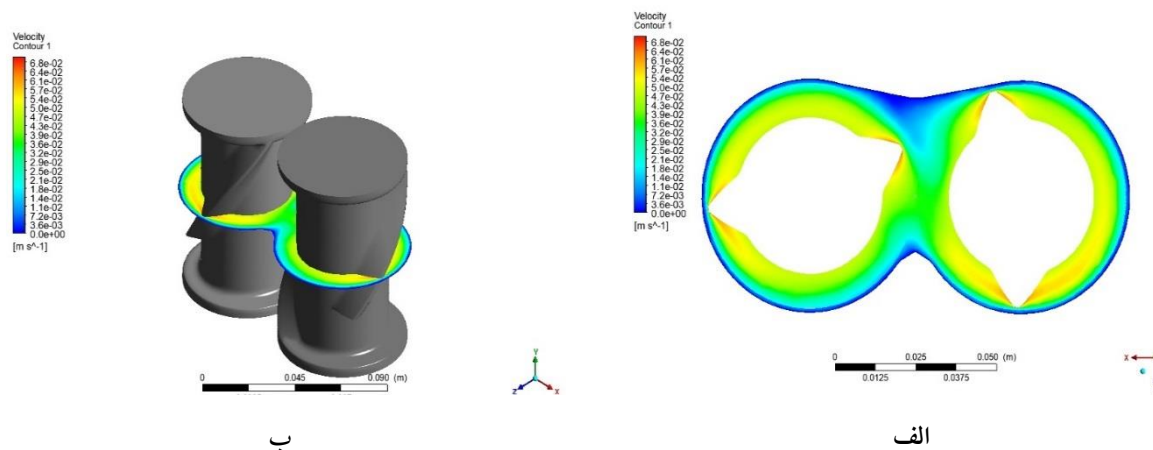
و ویسکوزیته مواد دارد. از آنجایی که روتورها در درجه اول مسئول تمام حرکت مواد در داخل محفظه هستند، حداکثر سرعت بیشتر روی سطح روتورها مشاهده می‌شود (شکل ۱۴). همان‌طور که برای همه موارد مشاهده شد، حداکثر سرعت که همان سرعت مماسی مرتبط با سرعت روتور است، در ناحیه نزدیک به نوک روتور رخ می‌دهد. موادی که به سطح روتور می‌چسبند سرعت برابری با سرعت روتور خواهند داشت. با توجه به شکل (۱۴) بیشترین سرعت را نوک روتور و مناطق اطراف آن تجربه می‌کنند. نواحی چسبیده به دیواره‌ها نیز راکد و

روتور تا دیواره‌ها، فشار به مواد افزایش می‌یابد. این فشار زیاد و کم به ترتیب در جلو و عقب نوک روتور منجر به گرادیان فشار زیادی شده که منجر به تنش برشی زیادی به مواد حاضر در اختلاط و خرد شدن توده‌های جامد درشت شده و راندمان اختلاط پراکندگی را افزایش می‌دهد. پس با توجه به اثر متناقض فشار بر روی اختلاط، تنظیم فشار مناسب جهت بهره‌وری بهینه ضروری است.

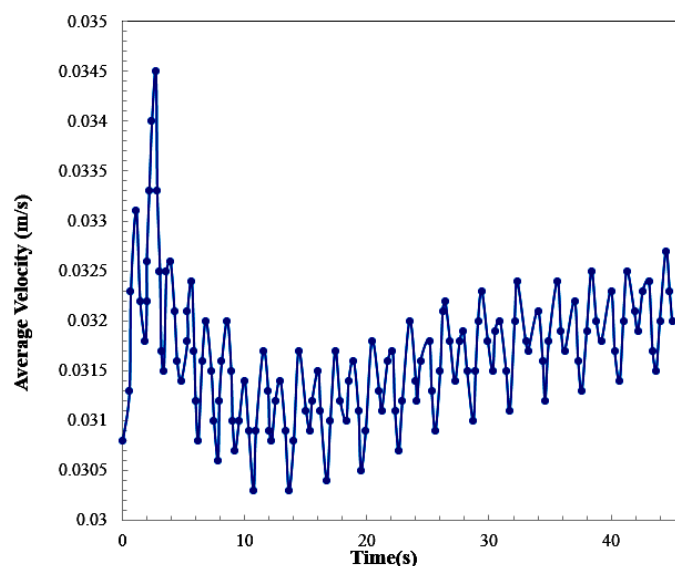
### ۳-۳ بررسی اثر سرعت

سرعت مواد در داخل محفظه بستگی به سرعت زاویه‌ای روتور





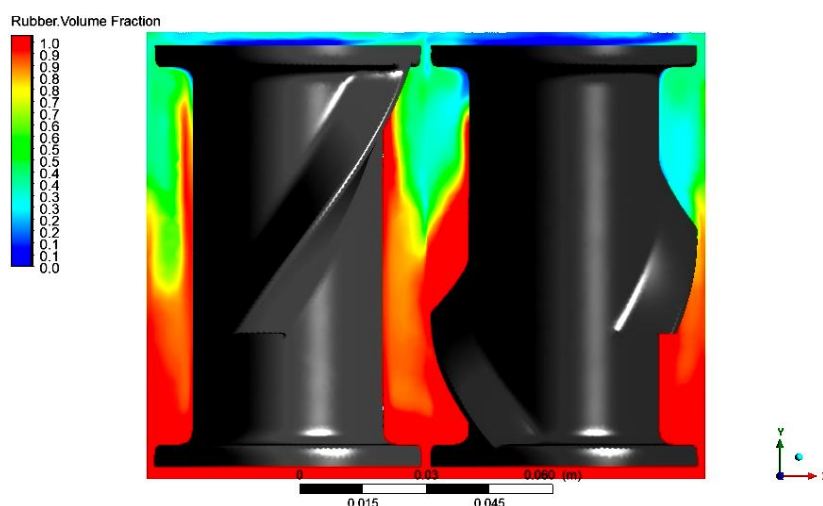
شکل ۱۴- کانتور سرعت پس از ۱۵ دور چرخش در (a) صفحه  $\gamma=0.5$  و (b) مقطع همراه با روتورها.



شکل ۱۵- تغییرات میانگین سرعت مخلوط در طول چرخه اختلاط.

داده شده است. واضح است که ابتدا سرعت مخلوط افزایش پیدا می کند اما در ادامه کاهش و سپس اندکی افزایش می یابد. در ابتدا هوا به طور کامل در بالا و لاستیک در پایین توزیع شده است. در ابتدای چرخش، کل هوای موجود به علت لزجت کم، سرعت بیشتری در مقایسه با لاستیک با لزجت بالا خواهد داشت و سرعت میانگین را افزایش می دهد. با گذشت زمان و ادغام دو فاز، هوا به داخل لاستیک نفوذ کرده و گیر می افتد و سرعت میانگین کاهش می یابد. از طرفی افزایش دما در طول چرخه ویسکوزیته را کاهش داده و منجر به سرعت بیشتر فاز

سرعتی تقریباً برابر صفر دارند. سرعتی که نوک روتور و سیال چسبیده به آن به علت شرط عدم لغزش تجربه می کند به شعاع روتور و سرعت زاویه ای روتور بستگی دارد. هرچه سرعت روتور بیشتر باشد تنش برشی که سیال تحمل می کند بیشتر است که منجر به افزایش دمای بیشتر می شود. بیشترین سرعت و جابه جایی در مواد در نوک روتور و کناره ها و دایره حول چرخش نوک روتورها اتفاق می افتد. همچنین کمترین سرعت ها متعلق به مواد چسبیده به دیواره های محفظه است. نحوه تغییرات میانگین سرعت مخلوط در شکل (۱۵) نشان



شکل ۱۶- توزیع کسر حجمی لاستیک پس از ۱۵ دور چرخش.

جهت محور  $z$  در نظر گرفته می‌شود. در حالت افقی، سطح مشترک هوا و لاستیک افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه اختلاط بهتری انجام می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

صنعت خودرو در قرن بیست و یکم در حال پیشرفت است. لاستیک یکی از اجزای اصلی خودرو است. عملکرد لاستیک‌ها بر عملکرد کلی خودرو تأثیر بسیار مهمی دارند. در صنایع تایر و فرآیند ساخت لاستیک، اولین مرحله اختلاط لاستیک با مواد مختلف است. با توجه به پارامترهای مختلفی که بر اختلاط تأثیر می‌گذارد، افزایش دما به دلیل گرمایش ویسکوز یکی از عوامل اصلی است که به‌طور قابل‌توجهی کیفیت محصول خروجی را تغییر می‌دهد. افزایش دما در حین اختلاط، ویسکوزیته و چندین پارامتر حرارتی دیگر را تغییر می‌دهد. همیشه باید دمای لاستیک را کنترل کرد تا از تخریب حرارتی و خرابی لاستیک جلوگیری شود. به علت هزینه زیاد آزمایش‌های تجربی، شبیه‌سازی عددی می‌تواند جایگزین خوبی برای بررسی بعضی از پارامترها در میکسرهای داخلی باشد. میکسرهای بنبوری یکی از محبوب‌ترین دستگاه‌های اختلاط لاستیک هستند که برای این شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. شبیه

لاستیک می‌شود و از طرفی دیگر، با توجه به چرخش روتورها، در زمان‌هایی از طول چرخه درصد قابل‌توجهی از لاستیک که در محل اتصال دو اتاقک هستند تحت تنش و فشار قرار نمی‌گیرند و ویسکوزیته افزایش می‌یابد که با این دلایل می‌توان نوسانات سرعت میانگین را توجیه نمود.

#### ۳-۴ کسر حجمی لاستیک

در این شبیه‌سازی ۷۵٪ درصد محفظه از لاستیک پر شد. برای نمایش سطح مشترک لاستیک و هوا و توزیع کسر حجمی لاستیک، یک صفحه عمود بر محور  $z$  و در وسط روتورها ایجاد شد و کانتر کسر حجمی لاستیک به همراه روتورها پس از ۱۵ دور چرخش در شکل (۱۶) نمایش داده شد. مشاهده می‌شود پس از ۱۵ دور چرخش هنوز مواد موجود در پایین محفظه جابه‌جایی و تحرکی نداشتند و به‌طور مؤثری در اختلاط شرکت نکردند، بنابراین زمان اختلاط به‌طور چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند. علت را می‌توان در سطح اولیه مشترک هوا و لاستیک جست‌وجو کرد. در شبیه‌سازی این تحقیق محور جاذبه در جهت منفی  $y$  در نظر گرفته شد یا به عبارتی روتورها عمودی و ایستاده می‌چرخند؛ اما در شبیه‌سازی‌ها توسط محققان دیگر روتورها افقی می‌چرخند یا به عبارتی جاذبه در

نمودارهای دمای میانگین، بیشترین دمای مخلوط و ویسکوزیته مخلوط استخراج و اعتبار سنجی شد. مشاهده شد که گرمایش ویسکوز تأثیر مهمی در الگوهای دمایی و ویسکوزیته جریان دارد. کانتورهای فشار، سرعت، کسر حجمی لاستیک نیز در دامنه تحلیل شدند و تأثیرات گرمایش ویسکوز بر سرعت جریان نیز تحلیل شد.

سازی ها در نرم افزار بسیار قوی انسیس فلوئنت و با استفاده از تکنیک حجم محدود انجام شدند. نتایج به دست آمده در این تحقیق ممکن است برای صنایع مختلف تایر مفید واقع شود. در این مطالعه شبیه سازی غیرهمدمای گرمایش ویسکوز که در سیالات غیر نیوتنی مسئله چالش برانگیزی است، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی با در نظر گرفتن جزئیات فیزیکی، مدل سازی شده است.

## واژه‌نامه

- |                    |                   |                 |
|--------------------|-------------------|-----------------|
| 1. volume of fluid | 3. carreau-yasuda | 5. sliding mesh |
| 2. viscous heating | 4. banbury        | 6. interface    |

## مراجع

1. Threadingham, D., Obrecht, W., Lambert, J., Happ, M., Oppenheimer-Stix, C., Dunn, J., Krüger, R., Brandt, H. D., Nentwig, W. and Rooney, N., "Rubber, 3. Synthetic" *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, 2000.
2. Agrawal, A. A., and Hastings, A. P., "Plant Defense by Latex: Ecological Genetics of Inducibility in the Milkweeds and a General Review of Mechanisms, Evolution, and Implications for Agriculture", *Journal of Chemical Ecology*, Vol. 45, No. 11-12, pp. 1004-1018, 2019.
3. Tadmor, Z., and Gogos, C. G., *Principles of Polymer Processing*, John Wiley & Sons, 2006.
4. Schobeiri, M. T., *Fluid Mechanics for Engineers: A Graduate Textbook*, Springer Science & Business Media, 2010.
5. Vajravelu, K., and Hadjinicolaou, A., "Heat Transfer in a Viscous Fluid Over a Stretching Sheet with Viscous Dissipation and Internal Heat Generation", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 20, No. 3, pp. 417-430, 1993.
6. Malkin, A. Y., Baranov, A., and Balinov, A., "Modeling Non-Isothermal Mixing in a Rotor Mixer", *International Polymer Processing*, Vol. 14, No. 2, pp. 115-121, 1999.
7. Alsteens, B., Avalosse, T., Legat, V., Marchal, T., and Slachmuylders, E., "Effect of the Full-Slip Condition along Rotors on the Mixing Efficiency of Internal Mixers", in *ANTEC 2003 Conference Proceedings*, 2003, pp. 173-177.
8. Cheng, J. J., and Manas-Zloczower, I., "Hydrodynamic Analysis of a Banbury Mixer 2-D Flow Simulations for the Entire Mixing Chamber", *Polymer Engineering & Science*, Vol. 29, No. 15, pp. 1059-1065, 1989.
9. Das, S. R., Dhakal, P., Poudyal, H., and Chandy, A. J., "Assessment of the Effect of Speed Ratios in Numerical Simulations of Highly Viscous Rubber Mixing in a Partially Filled Chamber", *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 89, No. 3, pp. 371-391, 2016.
10. Dhakal, P., Das, S. R., and Chandy, A. J., "Investigation of Fill Factor in Two-Wing Rotor Mixing of Rubber by Using Computational Fluid Dynamics", *Tire Science And Technology*, Vol. 45, No. 2, pp. 144-160, 2017.
11. Das, S., Poudyal, H., and Chandy, A., "Numerical Investigation of Effect of Rotor Phase Angle in Partially-Filled Rubber Mixing", *International Polymer Processing*, Vol. 32, No. 3, pp. 343-354, 2017.
12. Nortey, N. O., "Internal Batch Mixing Machines with Non-Intermeshing Rotors of Increased Performance", ed: Google Patents, 1988.
13. Cotton, G. R., "Mixing of Carbon Black with Rubber I. Measurement of Dispersion Rate by Changes in Mixing Torque", *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 118-133, 1984.
14. Kim, J. K., and White, J. L., "An Experimental and Theoretical Study of Starvation Effects on Flow and Mixing Elastomers in an Internal Mixer", *Nihon Reoroji Gakkaishi*, Vol. 17, No. 4, pp. 203-210, 1989.
15. Toh, M., Gondoh, T., Mori, T., and Mishima, M., "Mixing Characteristics of an Internal Mixer: Uniformity of Mixed Rubber", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 95, No. 1, pp. 166-172, 2005.
16. Limper, A., and Hesse, M., "Investigation of Rotor Blades and the Geometrical Effects on the Flow Behavior in Internal Mixer", in *European Rubber Research-Practical Improvements of the Mixing Process: SATPRO, ROTOR and Dust Stop:*

- International Conference*, 2005.
17. Collin, V., Peuvrel-Disdier, E., Alsteens, B., Legat, V., Avalosse, T., Otto, S., and Metwally, H., "Numerical and Experimental Study of Dispersive Mixing of Agglomerates", in *Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference 2006, ANTEC 2006*, 2006, Vol. 2, pp. Pages 908-912: Society of Plastics Engineers.
  18. Salahudeen, S. A., AlOthman, O., Elleithy, R. H., Al-Zahrani, S., and Rahmat, A. R. B., "Optimization of Rotor Speed Based on Stretching, Efficiency, and Viscous Heating in Non-Intermeshing Internal Batch Mixer: Simulation and Experimental Verification", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 127, No. 4, pp. 2739-2748, 2013.
  19. Cheng, J. and Manas-Zloczower, I., "Flow Field Characterization in a Banbury Mixer", *International Polymer Processing*, Vol. 5, No. 3, pp. 178-183, 1990.
  20. Nassehi, V., and Ghoreishy, M., "Modeling of Mixing in Internal Mixers with Long Blade Tips", *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, Vol. 20, No. 2, pp. 132-145, 2001.
  21. Bai, Y., Sundararaj, U., and Nandakumar, K., "Non-Isothermal Modeling of Heat Transfer Inside an Internal Batch Mixer", *AIChE Journal*, Vol. 57, No. 10, pp. 2657-2669, 2011.
  22. Ahmed, I., "Non-Isothermal Numerical Investigations of the Effect of Speed Ratio and Fill Factor in an Internal Mixer for Tire Manufacturing Process", University of Akron, 2018.
  23. Das, S. R., "Investigation of Design and Operating Parameters in Partially-Filled Rubber Mixing Simulations", University of Akron, 2016.
  24. Wu, S., "Calculation of Interfacial Tension in Polymer Systems", in *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, 1971, Vol. 34, No. 1, pp. 19-30: Wiley Online Library.
  25. Vingaard, M., Endelt, B. Ø., and de Claville Christiansen, J., "Implementation of a Material Model with Shear Rate and Temperature Dependent Viscosity", in *Proceedings of 6th European LS-DYNA User's Conference*, 2007, pp. 5.213-5.222.
  26. Ahmed, I. and Chandy, A. J., "3D Numerical Investigations of the Effect of Fill Factor on Dispersive and Distributive Mixing of Rubber under Non-Isothermal Conditions", *Polymer Engineering & Science*, Vol. 59, No. 3, pp. 535-546, 2019.
  27. Osswald, T. A. and Hernández-Ortiz, J. P., "Polymer Processing", *Modeling and Simulation*. Munich: Hanser, pp. 1-651, 2006.
  28. Schwaab, M. and Pinto, J. C., "Optimum Reference Temperature for Reparameterization of the Arrhenius Equation, Part 1: Problems Involving one Kinetic Constant", *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, No. 10, pp. 2750-2764, 2007.
  29. White, F. M. and Majdalani, J., *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, 2006.
  30. Liu, J., Li, F., Zhang, L., and Yang, H., "Numerical Simulation of Flow of Rubber Compounds in Partially Filled Internal Mixer", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 132, No. 35, 2015.
  31. Peric, M. and Ferguson, S., "The Advantage of Polyhedral Meshes", *Dynamics*, Vol. 24, No. 45, p. 504, 2005.
  32. Wu, S., "Calculation of Interfacial Tension in Polymer Systems", in *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, 1971, Vol. 34, No. 1, pp. 19-30, Wiley Online Library.
  33. Muzaferija, S., "A Two-Fluid Navier-Stokes Solver to Simulate Water Entry", in *Proceedings of 22nd Symposium on Naval Architecture*, 1999, 1999, pp. 638-651, National Academy Press.
  34. Brackbill, J. U., Kothe, D. B., and Zemach, C., "A Continuum Method for Modeling Surface Tension", *Journal of Computational Physics*, Vol. 100, No. 2, pp. 335-354, 1992.
  35. Poudyal, H., "Non-Isothermal Simulations of Partially-Filled Rubber Mixing for Tire Manufacturing Processes", University of Akron, 2018.