

## احتراق ذرات سوخت زیست توده در یک واحد تولید همزمان توان و حرارت مقیاس کوچک

سید علیرضا مصطفوی<sup>۱\*</sup>، محمد شیرازی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

a-mostafavi@araku.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک، اراک، ایران

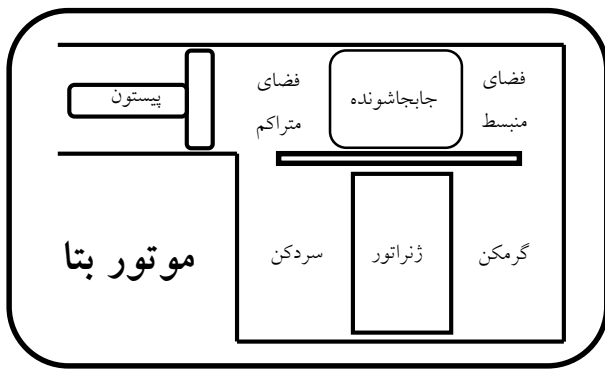
mb.shirazi11@gmail.com

**چکیده:** به منظور افزایش قیمت انرژی و کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر چون ذرات ریز زیست توده در واحدهای کوچک تولید همزمان برق و گرما در موتور استرلینگ توسعه یافته است. در این واحدها سوخت زیست توده در یک محفظه احتراق خارجی سوخته و حرارت آن به سیال عامل سیکل استرلینگ داده می‌شود. از این رو فرایند احتراق ذرات نقش بسزایی در عملکرد سیکل استرلینگ داشته و شبیه‌سازی این گونه محفظه‌های احتراق به کمک دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند در بهینه‌سازی محفظه احتراق مفید بوده و اولین گام در طراحی این موتورها باشد. در این تحقیق، محفظه احتراق یک موتور استرلینگ مربوط به یک واحد تولید همزمان برق و حرارت با توان تولید برق ۵۵ کیلووات شبیه‌سازی شده و تأثیر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بیانگر آن است که تطابق خوبی بین نتایج و مشاهدات تجربی وجود دارد و با افزایش مقدار هوای ثانویه به میزان مشخصی می‌توان دمای گازهای خروجی را برای افزایش بازده موتور استرلینگ به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. کاهش قطر ذرات احتراقی باعث افزایش تبخیر ذرات و نرخ احتراق شده، دما در خروجی را افزایش می‌دهد. افزایش میزان سرعت به هنگام تزریق ذره در ورودی میزان سوزش ذره احتراقی را کاهش داده چون مقداری از آن بدون سوزش کامل محفظه را ترک می‌کنند.

**واژه‌های کلیدی:** زیست توده، موتور استرلینگ، ذرات میکرو، محفظه احتراق، مدل‌سازی عددی.

## ۱. مقدمه

که یک انتهای آن گرم و انتهای دیگر آن سرد است. گاز به‌وسیله جابه‌جاکننده از یک انتها به انتهای دیگر منتقل می‌شود. جابه‌جاکننده همانند پیستون بزرگی است که قطر آن کوچک‌تر از قطر سیلندر بوده و فقط گاز را داخل سیلندر جابه‌جا می‌کند و حجم گاز موجود در سیلندر را تغییر نمی‌دهد و کار فقط توسط پیستون قدرت تولید می‌شود. با حرکت پیستون تعویض وقتی فشار موتور به مقدار ماکزیمم می‌رسد، پیستون قدرت با انبساط گاز حرکت کرده و انرژی میل‌لنگ را افزایش داده و آن را به حرکت درمی‌آورد [۵]. راندمان این نوع موتورها تابع دمای محیط گرم در قسمتی است که سیال عامل حرارت جذب می‌کند و بدیهی است که هر گونه افزایش در این دما باعث افزایش حرارت جذبی توسط سیال عامل سیکل استرلینگ شده و راندمان سیکل افزایش می‌یابد. این دما در سیکلی که با سوخت زیست‌توده کار می‌کند، دمای دود خروجی از محفظه احتراق است و عواملی که باعث افزایش این دما شوند، افزایش راندمان سیکل را نیز منجر خواهند شد. بنابراین گام اول در طراحی واحدهای تولید همزمان توان و حرارت سیکل استرلینگ با سوخت زیست‌توده، طراحی محفظه احتراق است که دمای حداکثر را در خروجی محفظه منجر شود. در این تحقیق به مطالعه و شبیه‌سازی محفظه احتراق با سوخت ذرات ریز زیست‌توده مورد استفاده در یک سیکل استرلینگ همزمان تولید توان و حرارت ۵۵ کیلووات پرداخته می‌شود.



شکل (۱): موتور استرلینگ نوع بتا

جریان‌های واکنشی نیز از جمله مسائلی هستند که حل تحلیلی مربوط به آن‌ها میسر نیست، به‌ویژه این مسئله زمانی که جریان چند فاز و تداخل بین فازها وجود داشته باشد، سخت‌تر نیز می‌شود. اگر ذره احتراقی به‌صورت ذرات جامد باشد، تقریباً حل دقیق مسئله غیرممکن است، زیرا احتراق ذرات جامد پدیده‌های مختلفی را طی می‌کند تا بتواند به‌عنوان سوخت عمل کرده و انرژی گرمایی تولید کند. به همین دلیل در این تحقیق از نرم‌افزار فلونت<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی

محدودیت منابع انرژی و مشکلات ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، فرصتی مناسب برای کاربرد و توسعه انرژی تجدیدپذیر فراهم آورده که زیست‌توده از مهم‌ترین این منابع انرژی است. استفاده از منابع زیست‌توده، یکی از مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین راه‌حل‌های تأمین نیازهای اساسی انرژی افرادی است که در مناطق دورافتاده زندگی می‌کنند [۱]. این منابع جزء منابع تجدیدشونده‌اند، چراکه با بهره‌گیری از این منابع مجدداً به‌طور طبیعی رشد و نمو پیدا می‌کنند ضمن اینکه تولید دی‌اکسیدکربن این منابع در چرخه کربن موجود رخ داده و تولید گازهای گلخانه‌ای نمی‌کند. تکنولوژی‌های مختلفی برای تولید الکتریسیته با احتراق زیست‌توده وجود دارد. برای نیروگاه‌های کوچک تا حدود ۱۰۰ کیلووات با استفاده از موتور استرلینگ، برای واحدهای نیروگاهی متوسط بین ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلووات با استفاده از توربین بخار و موتور بخار و در نهایت برای تولید بیش از دو هزار کیلووات و در مقیاس‌های بزرگ نیروگاهی می‌توان با استفاده از توربین بخار برق تولید کرد [۲]. اما از آنجایی که چگالی انرژی زیست‌توده پایین است و همچنین همه‌جا در دسترس است، استفاده در مقیاس کوچک در سیکل استرلینگ<sup>۱</sup> بیشتر مد نظر می‌باشد [۳].

اولین واحد تولید همزمان برق و گرما با سیال آلی در سال ۱۹۹۹ در اروپا ساخته شد و در طول هشت سال توسعه یافت و بهینه‌سازی شد. موتورهای دوار با سوخت زیست‌توده نیز در سال ۲۰۰۳ در نیروگاه هاربرگ شروع و بعد از چهار سال به بهره‌برداری رسید، اما توسعه موتورهای استرلینگ در این زمینه به چند سال اخیر برمی‌گردد. کانگترگل به بررسی موتورهای استرلینگ پرداخت که با انرژی خورشیدی کار می‌کنند. در این نوع موتورها به‌دلیل اینکه احتراق در منبع خارجی صورت می‌گیرد، از هر نوع منبع حرارتی می‌توان برای گرمایش سیال عامل سیکل استفاده کرد و در مکان‌هایی که انرژی خورشید در دست است این منبع به‌عنوان جایگزینی خوب برای سوخت‌های فسیلی معرفی می‌شود [۴]. اما به‌دلیل هزینه راه‌اندازی و همچنین مشکل دائمی نبودن انرژی خورشید باز هم زیست‌توده به‌عنوان سوختی مناسب برای گرمایش سیال عامل در سیکل استرلینگ مطرح است. موتورهای استرلینگ نوع بتا موتورهایی با ساختار کلاسیک‌اند که از گذشته تا به امروز مورد توجه قرار گرفته‌اند.

مطابق شکل (۱) این موتورها دارای یک پیستون قدرت و یک جابه‌جاکننده هستند و مشخصه اصلی آن‌ها دارا بودن یک سیلندر است

1. Stirling Cycle

2. Fluent

محفظه احتراق یک موتور استرلینگ که با سوخت زیست توده در یک واحد تولید همزمان برق و گرما در مقیاس کوچک کار می کند، استفاده شده است.

## ۲. معادلات حاکم

مطالعات پایه در فیزیک سیالات منجر به یافتن معادلات حاکم بر جریان سیال توسط ناویر و استوکس<sup>۱</sup> در سال های ۱۸۲۳-۱۸۴۵ شد. این معادلات به همراه معادله حالت و سایر معادلات مستخرج از مدل های فیزیکی، دستگاه معادلاتی را تشکیل می دهند که با حل آن می توان حرکت سیال را در شرایط مختلف پیش بینی کرد. این معادلات غیر خطی بوده و به هم مرتبط اند که حل آن ها را با مشکلات مختلفی همراه می سازد. حل تحلیلی جامع این معادلات در حال حاضر در دست نیست. روش های محاسبات عددی تا حدودی محدودیت های پیش روی روش های تحلیلی در حل معادلات حاکم را مرتفع می سازند. مدل سازی فرایندهای ترموشیمیایی شامل تشریح جریان سیال، انتقال جرم و حرارت و واکنش های شیمیایی می شود. احتراق ذرات ریز جامد شامل معادلات مربوط به فاز پیوسته (سیال) و فاز گسسته (جامد) است. در احتراق ذرات ریز، به دلیل پایین بودن درصد حجمی ذرات جامد (کمتر از ۱۲ درصد)، می توان از اثر فاز جامد روی درصد جرمی سیال صرف نظر کرد.

### ۲.۱.۱. معادلات فاز پیوسته

معادلات حاکم بر فاز پیوسته شامل معادله پیوستگی، ممتوم و آنتالپی می شود [۶].

#### ۲.۱.۱.۱. معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$S_m$  ترم چشمه ناشی از افزوده شدن جرم از فاز جامد به واسطه تجزیه حرارتی ذرات است. معادله پیوستگی برای کسر جرمی گونه های مختلف براساس رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_j + R_i + S_h \quad (2)$$

پخش جرمی  $\vec{J}_j$  از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\vec{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i \quad (3)$$

#### ۲.۱.۱.۲. معادله مومتوم

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4)$$

تانسور تنش برابر خواهد بود با:

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (5)$$

### ۲.۱.۳. معادله انرژی

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) \\ & = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \end{aligned} \quad (6)$$

$E$  انرژی کل سیال  $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$  و  $h$  نیز آنتالپی کل است. در یک سیستم شامل چندین جزء به صورت  $h = \sum_j Y_j h_j$  تعریف می شود. ترم دوم سمت راست انرژی منتقل شده ناشی از پخش اجزای مختلف در محیط سیال است. ترم سوم نیز دربرگیرنده تولید انرژی ناشی از تلفات لزجت بوده و ترم آخر نیز تولید انرژی ناشی از واکنش های شیمیایی احتراق و اثرات تشعشع است.  $K_{eff}$  ضریب هدایت حرارتی مؤثر سیال است که مجموع ضریب هدایت حرارتی مولکولی و ضریب هدایت حرارتی مغشوش ناشی از جنبش ادی ها<sup>۲</sup> می باشد. ضریب هدایت حرارتی مغشوش نیز با استفاده از عدد پرانتل<sup>۳</sup> مغشوش و لزجت مغشوش تعیین می شود.

$$K_{turb} = \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \quad (7)$$

$$K_{eff} = K_{molecular} + K_{turb}$$

پخش جرمی  $\vec{J}_i$  در جریان درهم نیز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\vec{J}_i = -\left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \quad (8)$$

عدد اشمیت توربولانس  $Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t}$  هم نسبت انتقال مومتوم به انتقال جرم ناشی از جنبش ادی هاست که منجر به تعیین ضریب پخش توربولانس می شود. ترم آخر بیانگر انتقال حرارت جابه جایی بین سیال و ذرات فاز پراکنده، انتقال حرارت تشعشعی در داخل جریان و انرژی آزاد شده در فرایند احتراق در فاز گاز و احتراق چار<sup>۴</sup> است.

### ۲.۱.۴. معادله توربولانس<sup>۵</sup> جریان

توربولانس از مهم ترین نقاط در مدل سازی است. جریان توربولانس به اختلاط و واکنش دهنده کمک می کند. در مدل سازی ها روش متوسط گیری ناویر استوکس (RANS) مورد استفاده قرار گرفت. در این میان از مدل توربولانسی k-epsilon که بیشترین مدل استفاده شده در احتراق است، استفاده شده که معادلات انرژی جنبشی و نرخ اضمحلال<sup>۶</sup> عبارت اند از [۷]:

2. Eddy  
3. Prandtl Number  
4. Char Combustion  
5. Turbulence  
6. Eddy Dissipation Rate

1. Navier-Stokes

دمای یک ذره نماینده محاسبه شده و به صورت تابعی از زمان تعیین می شود. معادله حاکم در این دیدگاه عبارت است از [۱۱]:

$$\frac{d\vec{V}_p}{dt} = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} (\vec{V} - \vec{V}_p) + \vec{g} \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} + \vec{F}_p \quad (۱۵)$$

نیروهای وارد بر ذره به جز جاذبه و درگ است. تغییرات دما برحسب زمان نیز از حل معادله بقای انرژی ذره به دست می آید:

$$m_p C_p \frac{dT_d}{dt} = (\dot{Q}_d + \dot{m}Q) \quad (۱۶)$$

$\dot{Q}_d$  مجموع نرخ انتقال حرارت جابه جایی و تشعشع به ذره و  $\dot{m}$  نرخ تبخیر یا سوزش ذره است که در ادامه بیشتر درباره آن بحث خواهد شد. معادله (۱۷) در ناحیه ای که رطوبت تبخیر می شود یا واکنش های تجزیه حرارتی و احتراق رخ می دهد، شامل ترم های واکنشی یا اکسیداسیون هم خواهد شد:

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_\infty^4 - T_p^4) + \frac{dm_p}{dt} Q \quad (۱۷)$$

$h$  ضریب انتقال حرارت جابه جایی است که توسط رابطه رنر و مارشال به دست می آید:

$$Nu = \frac{hd_p}{k_\infty} = 2 + 0.6Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (۱۸)$$

$\theta$  دمای سطوح تشعشع کننده به ذره مانند دمای دیواره کوره است. این معادله زمانی برقرار است که شرایط زیر برقرار باشد:

$$T_p < T_{pyr} \quad (۱۹)$$

$$m_p < (1 - f_{v0} - f_{comb})m_{p0}$$

$f_{v0}$  درصد مواد فرار موجود در ذره خشک،  $f_{comb}$  درصد چار قابل سوزش و  $m_{p0}$  جرم اولیه ذره در ورود به محفظه است.  $\frac{dm_p}{dt}$  نرخ تبخیر رطوبت، تولید مواد فرار یا نرخ سوزش و به طور کلی نرخ کاهش جرم ذره جامد در نواحی مختلف محدوده حل و  $Q$  حرارت مورد نیاز یا تولید حرارت در طی فرایندهای فوق به ازای واحد جرم واکنش دهنده هاست. نرخ تغییرات جرم در هر ناحیه نیز بستگی به مکانیزم واکنش و مدل سینتیکی مورد نظر دارد و فرم دقیق معادلات نرخ تغییر جرم که تعیین کننده ترم های برهم کنش دو فاز گاز و جامد است به نوع ذره و خواص ترموشیمیایی آن بستگی دارد که در جدول (۱) آورده شده است.

$$\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} - \rho \varepsilon \quad (۹)$$

$$\rho u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right\} + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۱۰)$$

مقادیر ثوابت تجربی معادلات فوق عبارت است از:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92$$

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (۱۱)$$

## ۵.۱.۲. معادله انتقال تشعشع

معادله انتقال تشعشع عبارت است از [۸]:

$$\frac{dI(r, s)}{ds} = -\beta I(r, s) + S(r, s) \quad (۱۲)$$

$I$  شدت تشعشع است و مدل DO معادله انتقال تشعشع را در جهت  $S$  به عنوان یک تابع میدانی در نظر می گیرد. بنابراین معادله انتقال تشعشع به شکل زیر تبدیل می شود:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(s, s') d\Omega' \quad (۱۳)$$

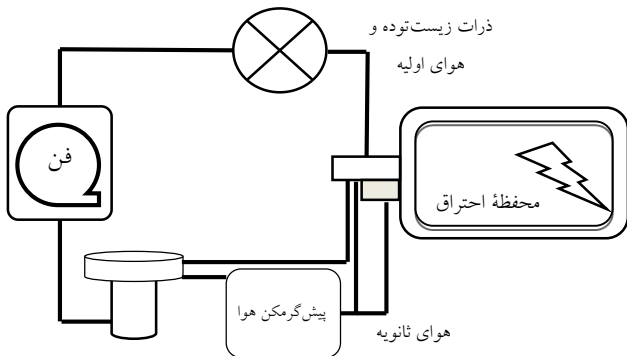
$\vec{r}$  بردار موقعیت،  $\vec{s}$  بردار جهت،  $\vec{s}'$  جهت بردار انعکاس،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن،  $T$  دمای محلی و  $\Omega'$  زاویه جامد است. مدل DO معادله انتقال تشعشع را برای تعداد محدودی از زوایای جامد گسسته حل می کند که هر کدام مربوط به یک بردار جهتی  $S$  می شود. در این مدل سازی، برای ضریب جذب مقدار ثابت  $1/5 \text{ m}^{-1}$  در نظر گرفته شده است. پس از حل معادله تشعشع، مقدار انرژی تشعشعی به عنوان ترم چشمه به معادله انرژی اضافه می شود. مقدار این چشمه با استفاده از فلاکس تشعشعی به دست می آید [۹-۱۰]:

$$S_{rad} = -\nabla q_r \quad (۱۴)$$

## ۲.۲. معادلات فاز گسسته ذرات

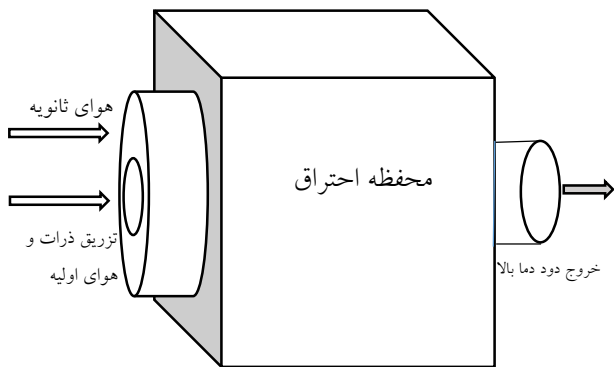
ذرات ریز به عنوان فاز گسسته در نظر گرفته می شود که به دلیل کوچک بودن کسر حجمی (کمتر از ۱۲ درصد) به صورت لاگرانژی مدل می شود. بدیهی است که در صورت افزایش کسر حجمی ذرات از این میزان دیگر امکان استفاده از مدل لاگرانژی نبوده و ذرات جامد نیز مانند سیال، یک فاز پیوسته ثانویه به حساب آمده و باید از مدل های اوبرلی استفاده شود. در دیدگاه اوبرلی، تاریخچه جرم، سرعت و

واحد تولید برق و گرما تأمین کننده گرمای مورد نیاز موتور استرلینگ در قسمت گرم موتور می باشد.



شکل (۲): طرحواره نیروگاه و محفظه احتراق

محفظه احتراق مدنظر نیز در شکل (۳) آورده شده است که ذرات از مرکز محفظه به داخل تزریق شده و هوای اولیه از اطراف و هوای ثانویه نیز از بالای محفظه وارد می شود. دود دما بالا نیز از مرکز محفظه و انتهای سمت راست خارج و وارد مبدل حرارتی گرم سیکل استرلینگ می شود.



شکل (۳): طرحواره محفظه احتراق و محل جریان های جرمی

محفظه احتراق به ۷۶۵ هزار حجم کنترل تقریباً یکنواخت تقسیم شده و معادلات حاکم در نرم افزار فلونت به روش حجم محدود گسسته سازی و حل شده است [۱۴]. مسیر حرکت ذرات و عوامل اصلی مؤثر در آن چون محل تزریق ذرات و شرایط مرزی سرعتی، تعیین کننده جزئیات شرایط شعله است. ذرات در عبور از حجم کنترل موجود در فاز پیوسته باعث انتقال جرم، مومنتوم و انرژی به فاز پیوسته می شوند. مقادیر این کمیت ها در هر حجم کنترل باید پس از هر بار حل فاز گسسته ذرات محاسبه و برای مرحله بعدی حل تکرار در فاز پیوسته تعیین شود. در صورتی که برهمکنش ذرات دوراچه در نظر گرفته شود، بدیهی است که معادلات فاز پیوسته سیال و معادلات فاز گسسته ذرات همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده است کوپل بوده و باید همزمان حل شوند؛ یعنی محاسبه ترم های برهمکنش

جدول (۱): خصوصیات ذرات زیست توده

مقدار	واحد	خواص
۷۰۰	$\text{kg.m}^{-3}$	چگالی
۲۳۱۰	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	ضریب هدایت حرارتی
۰/۱۷۳	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	ضریب هدایت حرارتی
۴۰۰	K	دمای تجزیه ذره جامد
۸۰	%	درصد مواد فرار
۲۰	$\text{s}^{-1}$	ثابت فرایند تجزیه حرارتی

### ۱.۲.۲ مدل احتراقی

روش اتلاف ادی به عنوان بهترین روش برای مدل سازی احتراق بدون شعله ذرات با هزینه محاسباتی بسیار پایین تر از روش های پیچیده دانسیته احتمال با تعداد واکنش های زیاد مد نظر قرار می گیرد. در این روش، زمان مشخصه واکنش شیمیایی مستقل از سینتیک واکنش و برابر با زمان مشخصه ادی خواهد بود. بر این اساس، مگنوسن [۱۲-۱۳] برای ارتباط بین توربولانس و واکنش های شیمیایی مدل اتلاف ادی را ارائه داد. در مدل او نرخ واکنش شیمیایی متناسب با زمان مشخصه ادی های  $K/\epsilon$  تعریف شده و هر جا که توربولانس در جریان وجود دارد  $K/\epsilon > 0$  واکنش شیمیایی برقرار خواهد بود. اگر واکنش های دخیل در احتراق طبق رابطه زیر بیان شوند:

$$\sum_{i=1}^N v'_{i,r} M_i \leftrightarrow \sum_{i=1}^N v''_{i,r} M_i \quad (20)$$

$v'_{i,r}$  ضریب استوکیومتری اجزا در واکنش های رفت،  $v''_{i,r}$  ضریب استوکیومتری اجزا در واکنش های برگشت،  $M_i$  گونه جرمی نام موجود در واکنش ها و  $N$  نیز تعداد کل واکنش های موجود در سینتیک مورد نظر است. نرخ کلی واکنش شیمیایی کوچک ترین مقدار به دست آمده از یکی از روابط زیر است [۱۲-۱۳]:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min \left( \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{\omega,R}} \right) \quad (21)$$

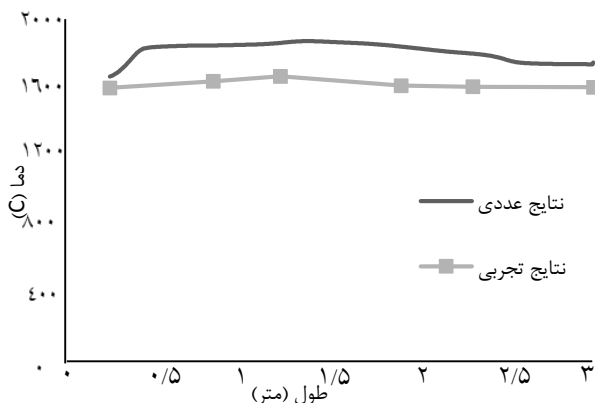
$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} A B \rho \frac{\epsilon \sum_p Y_p}{k \sum_j v'_{j,r} M_{\omega,j}}$   
 $Y_R$  کسر جرمی محصولات،  $Y_P$  کسر جرمی واکنش دهنده ها و  $M_{\omega,i}$  نیز جرم مولکولی جزء نام است. ثوابت تجربی  $A$  برابر با ۴ و  $B$  برابر با ۰/۵ هستند.

### ۳. نتایج

محفظه احتراق شبیه سازی شده در شکل (۲) نشان داده شده است. محفظه به شکل استوانه با قطر یک متر و طول سه متر است که در یک

ترم‌های منبع در معادلات بقای سیال تغییر کرده و حال باید معادلات جدیدی در فاز سیال حل شوند که پاسخ‌های موجود برای مقادیر کمیت‌ها در فاز سیال با مقدار واقعی معادلات جدید فاصله بیشتری پیدا کرده و مقدار باقیمانده‌ها پس از هر تکرار فاز ذرات افزایش خواهد یافت. بنابراین در این روند سعی و خطا همواره یک نوسان در مقدار باقی مانده‌ها مشاهده خواهد شد که منجر به دشواری زیادی در روند همگرایی مسئله شده و همگرایی حل نیازمند تکرار زیادی است. در بعضی از ابعاد شبکه نیز مقدار متوسط باقی مانده‌های همه معادلات و یا بعضی از معادلات از حد معینی پایین تر نخواهد آمد و به‌ازای هر تعداد زیاد تکرار هیچ‌گاه حل همگرا نخواهد شد. به عبارتی دامنه نوسانات باقی مانده‌ها پس از هر تکرار در فاز ذرات بسیار زیاد است و فقط افزایش باقی مانده‌ها پس از هر تکرار در فاز پیوسته تا تکرار بعدی جبران می‌شود. به این سبب معیار همگرایی در این شرایط براساس رسیدن به یک مقدار ثابت در دما، کسر حجمی دی‌اکسیدکربن و اکسیژن در نقاط خاصی به‌ویژه در ناحیه واکنش که گرادیان‌ها بیشتر است، در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که تعداد تکرار در فاز سیال پیش از هر تکرار در فاز ذرات در روند همگرایی نیز تأثیر گذاشته و در روند حل نیاز به تغییر آن است. هرچند مقدار مناسب آن وابسته به اندازه شبکه نیز می‌باشد، به‌طور کلی در مسئله مورد نظر تعداد ۱۰۰ تکرار انتخاب خوبی است.

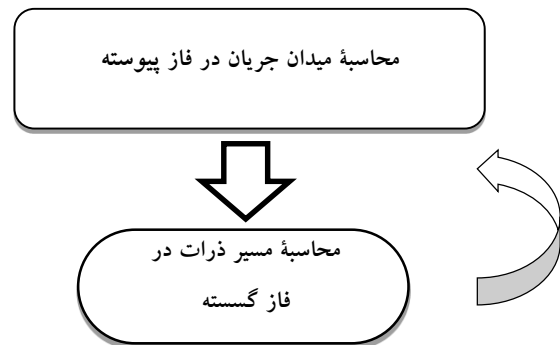
در شکل (۵)، توزیع دما در راستای محور محفظه رسم شده و مقایسه با نتایج تجربی بیانگر این است که مدل اتلاف ادی به‌خوبی می‌تواند بیانگر جزئیات و ساختار شعله ذرات ریز زیست توده باشد.



شکل (۵): نمودار دما بر حسب مکان و مقایسه با نتایج تجربی [۱۵]

با کاهش اندازه ذرات جامد میزان تبخیر مواد فرار افزایش یافته، در نتیجه نرخ واکنش‌های احتراقی مواد فرار در محفظه نیز افزایش یافته و دما در طول محفظه افزایش خواهد یافت. نمودار ارائه شده در شکل (۶) به‌خوبی مؤید این مطلب است. با کاهش قطر ذرات از ۳۰۰ به

منجر به یک سیکل سعی و خطا شده تا اینکه همگرایی حل حاصل شود.



شکل (۴): نحوه سعی و خطا در حل معادلات جریان و فاز ذرات

در انتگرال‌گیری معادلات فاز گسسته ذرات، تعیین گام زمانی و همچنین زمان کل انتگرال‌گیری یا تعداد کل بازه‌های انتگرال‌گیری ضروری است. یک راه ساده، استفاده از بازه زمانی ثابت است که یک تقریب خوب می‌تواند از تقسیم اندازه کوچک‌ترین مش به حداکثر سرعت جریان به دست آید. برای صحت نتایج و اعمال اثرات متقابل دو فاز، گام زمانی باید به‌گونه‌ای انتخاب شود تا مسیر جدید ذره در ورودی و خروجی هر حجم کنترل فاز پیوسته محاسبه شود. بنابراین گام زمانی عبارت است از:

$$\Delta t^* = \frac{l}{u_p} \quad (22)$$

که  $l$  طول سلول و  $u_p$  سرعت ذره است. برای افزایش دقت محاسبات می‌توان گام زمانی را کوچک‌تر اختیار کرد به‌گونه‌ای که در هر حجم کنترل،  $\lambda$  بار مسیر ذره تعیین و معادلات حاکم انتگرال‌گیری شود. در این صورت گام زمانی عبارت خواهد شد از:

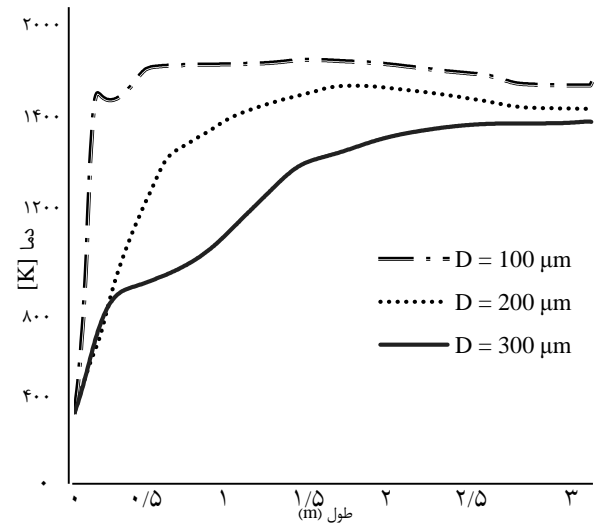
$$\Delta t = \frac{\Delta t^*}{\lambda} \quad (23)$$

تعداد کل بازه‌های انتگرال‌گیری نیز باید بیشتر از تعداد کل سلول‌ها در جهت جریان غالب ضریب  $\lambda$  باشد که مقدار  $\lambda$  در این مسئله، ۵ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در ابتدا ذکر شد، حل مسئله مورد نظر نیازمند چندین بار حل معادلات هر دوفاز بوده تا اینکه مقدار باقی مانده‌ها در فاز پیوسته از حد معین مد نظر کمتر شود. مقدار بی‌بعد باقی مانده برای هر معادله بقای کمیت  $a_p \Phi = \sum_{nb} a_{nb} \Phi_{nb} + b$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R^{\Phi} = \frac{\sum_{cell p} \sum_{nb} |a_{nb} \Phi_{nb} + b - a_p \Phi|}{\sum_{cell p} |a_p \Phi|} \quad (24)$$

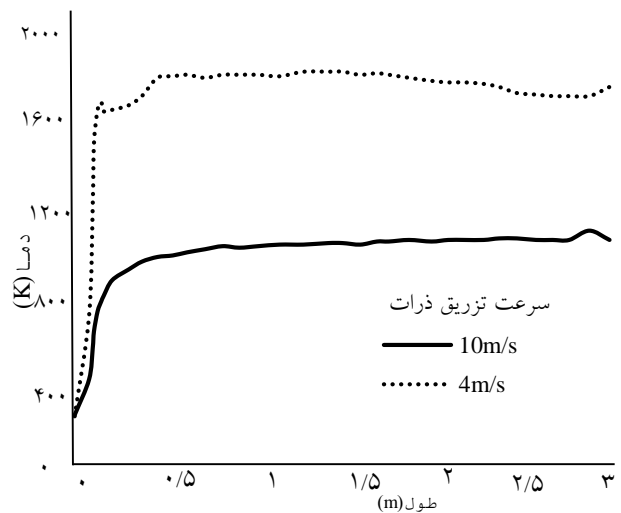
در سیکل سعی و خطا می‌توان تعیین کرد که بعد از چندین تکرار در محاسبه میدان جریان سیال، یک بار مسیر ذرات در فاز گسسته مورد بررسی قرار گیرد. بدیهی است که پس از هر تکرار در فاز، ذرات

۱۰۰ میکرومتر دمای ماکزیمم در محفظه و همچنین دمای گازهای خروجی از محفظه افزایش خواهد یافت.



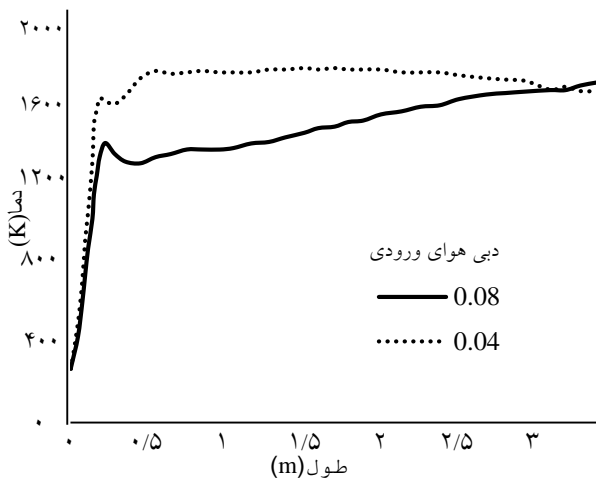
شکل (۶): نمودار تغییرات دمای محفظه با تغییر اندازه ذرات

هرچند چگونگی تغییر دمای گازهای موجود در محفظه احتراق با تغییر در سرعت ورودی ذرات به محفظه، به ابعاد محفظه و همچنین دیگر پارامترهای هیدرودینامیکی و حرارتی محفظه بستگی دارد، در این تحقیق افزایش این میزان از سرعت از ۴ متر بر ثانیه به ۱۰ متر بر ثانیه باعث می‌شود تا مقدار قابل توجهی از ذرات جامد بدون آنکه تبخیر شده و در محفظه بسوزند، به دلیل سرعت زیاد و همراستایی ورودی ذرات و خروجی از محفظه خارج شده و دمای محفظه کاهش یابد؛ این موضوع به وضوح در شکل (۷) قابل مشاهده است.



شکل (۷): نمودار تغییرات دمای با تغییرات ذرات ورودی به محفظه

افزایش در میزان هوای ورودی نیز در حالت کلی می‌تواند اثرات متفاوتی در توزیع دما و ساختار شعله بگذارد. در این محفظه با توجه به اینکه هوای ثانویه از قسمت بالایی وارد می‌شود، در ابتدای محفظه باعث افزایش جرم گازها و کاهش دمای محفظه به ازای حرارت تولیدی ثابت در آن ناحیه خواهد شد. اما در خروجی محفظه که در حالت قبل مقداری مواد فرار به دلیل کمبود اکسیژن، نسوخته از محفظه خارج می‌شد حال با افزایش درصد اکسیژن، سوخته و دما در خروجی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. با توجه به هدف ما که ایجاد دمای بالا در خروجی محفظه است، افزایش دبی هوای ثانویه همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، عاملی مؤثر بوده که افزایش راندمان سیکل استرلینگ را منجر خواهد شد.



شکل (۸): نمودار تغییرات دمای با تغییر دبی هوای ورودی

#### ۴. نتیجه گیری

معضلات انرژی و محیط زیست ضرورت استفاده از انرژی‌های نو را ایجاد کرده است. از این بین، تکنولوژی‌های تولید همزمان برق و حرارت در موتور استرلینگ مد نظر طراحان قرار گرفته است تا با توجه به امکان استفاده از سوخت‌ها و منابع مختلف انرژی حرارتی به راه حل مفیدی برسند. یکی از سوخت‌های مورد استفاده، ذرات ریز زیست‌توده است که با سوختن ذرات در یک محفظه مجزا حرارتی ایجاد شده که حرارت در موتور مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. سوختن ذرات و فرایند احتراق در محفظه، اصلی‌ترین عامل مؤثر در راندمان سیستم مذکور است؛ لذا هر عاملی که باعث تغییر در بهبود فرایند احتراق و افزایش دمای خروجی محفظه شود، افزایش راندمان محفظه را به همراه خواهد داشت. مطالعه عددی محفظه مد نظر بیانگر این است که تبخیر ذرات ریزتر بیشتر صورت گرفته و گازهای بیشتری سوخته خواهد شد و در نتیجه، دمای خروجی محفظه احتراق افزایش خواهد یافت. دبی

سرعت سیال	$m.s^{-1}$	U	هوای ثانویه و سرعت تزریق ذرات به داخل هر محفظه احتراقی با توجه
نرخ جریان جرم ذره	kg	$m_p$	به اینکه چه تغییری در میزان و یا محل تبخیر و سوزش ذرات گذاشته،
گام زمانی	s	$\Delta t$	می تواند اثرات متفاوتی در دمای خروجی داشته باشد که تابع هندسه و
آنتالپی	$kJ.kg^{-1}$	H	همه پارامترهای فیزیکی مسئله است. در این محفظه افزایش هوای
گرمای مبادله شده	kJ	Q	اضافی باعث سوختن ذرات بیشتری شده دمای خروجی افزایش یافته
ضریب پخش	$a.d.c^{-1}$	$\sigma_s$	ولی افزایش سرعت تزریق ذرات باعث می شود تا مقدرای از ذرات،
شدت تابش	Cd	I	نسوخته خارج شده و مقدار احتراق در محفظه کاهش یافته و در نتیجه،
طول مسیر	m	S	دمای خروجی محفظه کاهش یابد.
ضریب جذب	$\alpha$	a	
ضریب شکست	$C.V^{-1}$	N	
ضریب استفان بولتزمن	$R.(ma)^{-1}$	$\sigma$	ویسکوزیته سیال $N.s.m^{-2}$ $\mu$
دمای محلی	K	T	دانسیته ذره $kg.m^{-3}$ $\rho_p$
			قطر ذره m $d_p$
			سرعت ذره $m.s^{-1}$ $u_p$

## ۵. علائم

## مراجع

- [1] Hatje, W., Ruhl, M., "Use of Biomass for Power and Heat Generation: Possibilities and Limits", Ecological Engineering, Vol. 16, pp. 41–49, 2000.
- [2] Nakamura, T., Nakagawa, K., Tanaka, M., Suzuki, A., Kaneuji, K., Kimoto, M., "Power Generation by Coal and Biomass Cofiring", Journal of thermal and nuclear power engineering society, Vol. 10, pp. 839-858, 2006.
- [3] Jensen, N., Werling, J., "CHP from Updraft Gasifier and Stirling Engine", Proceedings of 12th European Biomass Conference, pp. 131-149, 2002.
- [4] Kongtragool, B., Wongwises, S., "A Review of Solar-Powered Stirling Engines and Low Temperature Differential Stirling Engines", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 7, pp. 131–154, 2003.
- [5] Walker, G., *Stirling Engines*, Oxford, Clarendon Press, 1980
- [6] Adanez, J., Gayan, P., Diego, L., Labiano, F., Abad, A., "Combustion of Wood Chips in A CFBC: Modelling and Validation", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 42, No. 5, pp. 987–999, 2003.
- [7] Fletcher, D., Hayes, B., Chen, J., Joseph, S., "A CFD Based Combustion Model of An Entrained Flow "Biomass Gasifier", Applied Mathematical Modelling, Vol. 24, No. 3, pp. 165–182, 2000.
- [8] Lans, R., Pedersen, L., Jensen, A., Glarborg, P., Johansen, K. "Modelling and Experiments of Straw Combustion in A Grate Furnace", Biomass Bioenergy, Vol. 19, No. 3, pp. 199–208, 2000.
- [9] Srdjan, S., Leckner, B., Johnsson, F., "Characterization of Fluid Dynamics of Fluidized Beds by Analysis of Pressure Fluctuations", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 33, pp. 453–496, 2007.
- [10] Orsino, S., Tamura, M., Stabat, P., Costantini, S., Prado, O., Weber, R., "Excess Enthalpy Combustion of Coal", Results of HTAC 99, Technical Report IFRF, Doc. No. F46/y/3, IFRF Research Report, 2000.
- [11] Schaffel, N., Mancini, M., Szlek, A., Weber, R., "Mathematical Modeling of MILD Combustion of Pulverized Coal", Combustion and Flame Vol. 156 pp. 1771–1784, 2009.
- [12] Magnussen, B., Hjertager, B., "One Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion", 16th International symposium on combustion, Cambridge. The Comb. Inst, Pittsburgh, pp 719–729, 1976
- [13] Macohee, J., Sellier, M., Jermy, M., Tadulan, E., "CFD Modeling of Pulverized Coal Combustion in a Rotary Lime Kiln", Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 9-11 December 2009.
- [14] FLUENT 14 Users Guide, 2016.
- [15] Nishiyama, A., Shimojima, H., Ishikawa, A., Itaya, Y., Kamar, S., Moritomi, H., Mori, S., "Fuel and Emissions Properties of Stirling Engine Operated with Wood Powder", Fuel, Vol. 86, pp. 2333–2342, 2007.