

# مدل‌سازی عددی و بررسی تجربی فرسایش ناشی از عبور جریان گاز داغ بر روی سطح

امیر ترابی

دانشگاه شهرکرد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

صالح اکبرزاده

دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک

مجتبی کاظمی اسفه

دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده مهندسی هوافضا

(دریافت مقاله: ۹۷/۰۳/۱۹ - پذیرش مقاله: ۹۸/۱۲/۲۰)

## چکیده

یکی از مهمترین مسایل در زمینه جریان گازهای بسیار داغ و واکنش دهنده اثر گذاری آنها روی سطوح مجاورشان است. این گازها به شدت خورنده بوده و باعث فرسایش شدید سطح می‌شوند. فرسایش تغییر شکل، تغییر زبری و حتی تغییر قابل ملاحظه اندازه‌های نسبی سطح را به همراه دارد. این پدیده‌ها می‌تواند جریان سیال را تحت تأثیر قرار داده و پیش بینی‌ها را در مورد آن با مشکل روبرو کند. بنابراین داشت تخمینی از میزان فرسایش سطوح مجاور گازهای داغ ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله مدلی برای تخمین میزان فرسایش در شیرها و مجاری که گازهای بسیار داغ از آنها عبور می‌کنند، ارائه شده است. این مدل براساس حل جریان سیال و معادله غلظت استوار است. نتایج حاصل از حل این معادلات در مدل ارائه شده به عنوان ورودی قرار گرفته و نرخ فرسایش موضعی هر موقعیت از سطح مجرا به عنوان خروجی بدست می‌آید. این مدل با استفاده از نتایج صحت سنجی شده قبلی و همچنین به صورت تجربی اعتبار سنجی شده است. نتایج بیانگر توانمندی قابل قبول مدل ارائه شده برای پیش بینی شرایط فرسایشی سطح تحت تأثیر گازهای داغ است.

واژه‌های کلیدی: شیر گاز داغ، فرسایش، معادله جریان.

## Numerical and Experimental Investigation of Erosion on Surface

Amir Torabi

Engineering Department, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Saleh Akbarzadeh

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

Majid Kazemi Esfeh

Aerospace Department, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

(Received 9 June 2018, accepted 10 March 2020)

### Abstract

One of the major concerns in the field of valves operating under severe conditions such as high temperature is their interaction with other surfaces. These valves are used to pass gas. These gasses are sometimes corrosive and can cause wear of the surface which in turn affect the geometry such as roughness etc. For precise utilities, even small change in the geometry highly affects its performance as well as their precision. Therefore, the ability to predict the wear in these valves is highly valuable. In this paper, a numerical model based on the solution of flow and concentration equations is developed to predict the wear in the surfaces which are adjacent to hot gases. The output of this model is used as input to another model to predict the wear. The predictions of this model are verified by comparing to other numerical models as well as experimental data. The predicted values are in accordance with experimental data with acceptable accuracy.

**Keywords:** hot valve, wear, flow equation.

**Email of Corresponding Author:** s.akbarzadeh@cc.iut.ac.ir.

## مقدمه

افزایش فشار محفظه و افزایش زبری سطح نازل، افزایش می‌یابد. کسوانی و همکاران با استفاده از مدل تحقیق قبل [۱] نرخ فرسایش نازل‌های بکار رفته در دو نوع موتور تخمین زده و با نتایج حاصل از آزمایشات عملی مقایسه نمودند [۲]. در این تحقیق تاثیر پارامترهای مختلف بر روی نرخ فرسایش در نازل‌ها بحث شده است. کسوانی و کو روند خوردگی و انتقال حرارت در امتداد نازل را نیز در مقاله دیگری مورد بررسی قرار دادند [۳]. در تحقیق جدید صحت سنجی داده‌های انتقال حرارت و همچنین نرخ خوردگی نازل در راستای طولی برای تکمیل تحقیقات قبلی آنها انجام شده است.

آچاریا و کو نرخ خوردگی نازل برای محدوده فشار ۷ تا ۵۵ مگاپاسکال برای دو نوع سوخت را تخمین زدند [۴]. یکی از سوخت‌ها غیر فلزی یا بدون عناصر فلزی و دیگری سوخت فلزی و یا حاوی عناصر فلزی بود. مدل عددی ارائه شده در این تحقیق کامل‌تر از مدل‌های ارائه شده در تحقیق‌های قبلی است و برای پیش‌بینی خوردگی در فشارهای بالا در نازل‌ها پیشنهاد گردید. چهار حالت برای واکنش‌های اکسیداسیون با یکدیگر مقایسه گردید و مشخص شد که نرخ فرسایش با فشار رابطه خطی دارد. از تفاوت‌های این تحقیق نسبت به کارهای ابتدایی کو و کسوانی می‌توان به بررسی سوخت دارای آلومینیوم علاوه بر سوخت بدون آلومینیوم اشاره کرد.

در مدل‌های معرفی شده تحقیقات [۴-۱] خوردگی در گلوگاه نازل به عنوان خروجی مطرح بود اما تاکره و یانگ سعی کردند مدلی برای تحقیق خوردگی در تمام مسیر نازل ارائه دهند [۵]. نتایج آنها نشان می‌دهد که حداکثر میزان خوردگی در دهانه نازل مشاهده می‌شود و بخار آب مهمترین عامل و پس از آن OH و CO<sub>2</sub> عوامل موثر در فرسایش سطح هستند. تاکره و یانگ کاری مشابه به تحقیق قبلی اما با استفاده از نازل‌هایی از جنس مواد نسوز نظیر تنگستن، رنیوم و مولیبدن انجام دادند [۶]. نتایج نشان

گازهای داغ در صنایع و کاربردهای مهندسی بسیار مورد توجه هستند. از جمله مسایل مرتبط با این سیالات، بررسی فرسایش سطح شیرهای گذر دهنده گازهای داغ است. با فرسایش این شیرها سطح مقطع دهانه عبور دهنده گاز بزرگتر شده و کلیه محاسبات دبی و سرعت جریان عبوری را دستخوش تغییر کرده و راندمان آنها را کاهش می‌دهد. شناخت بهتر و دقیق‌تر مکانیزم‌های فرسایش در این شیرها، پیش‌بینی میزان فرسایش در شرایط کاری متفاوت و همچنین یافتن راهی برای کاهش فرسایش در شیرها می‌تواند منجر به دستیابی به تکنولوژی شیرهای با راندمان و کارایی بالاتر باشد. از این رو تحقیقات پیوسته و دقیقی در این زمینه انجام شده است.

کو و کسوانی مدلی به بررسی روند فرسایش در نازل‌های C/C پرداخته و مدلی برای آن ارائه داده‌اند [۱]. در این مدل، فرسایش ناشی از واکنش‌های شیمیایی و نفوذ ماده در نازل مورد بررسی قرار گرفته است که در نهایت این دو عامل میزان فرسایش کلی را مشخص می‌کنند. برای این کار معادلات مربوط به فاز گازی و حالت جامد مورد بررسی قرار گرفته است. از نظر کو و کسوانی مهم‌ترین عناصری که موجب ایجاد فرسایش در نازل می‌شوند آب و دی اکسید کربن هستند که هر دو از محصولات احتراقند. توجه شود که بیشتر گازهای داغ نیز ناشی از چنین پدیده‌ای هستند. با عبور جریان گاز داغ دو حالت فرسایش در نازل رخ می‌دهد. اولین حالت مربوط به زمانی است که دمای سطح نازل کم است (یعنی ابتدای فرایند) در این حالت بیشتر واکنش‌های شیمیایی باعث فرسایش در نازل خواهند شد و حالت دیگر مربوط به زمانی است که دمای سطح نازل بسیار بالاست که پس از مدت زمانی اندک از آغاز حرکت گاز داغ رخ می‌دهد. در حالت دوم پدیده نفوذ پدیده غالب در فرسایش خواهد شد. کو و کسوانی همچنین نشان دادند که نرخ فرسایش با افزایش تمرکز عناصر اکسید کننده در محصولات احتراق خروجی،

تاکره و همکاران با بررسی بیشتر جزئیات نظیر حل چندفازی جریان، مدل سازی توربولانس و احتراق آلومینیوم موجود در سوخت مدل نظری/عددی دقیقی برای فرسایش مکانیکی ارائه دادند و با کمک آن مدل‌های تجربی را کالیبره کردند [۱۲]. صباغ و همکاران استفاده از نانوکامپوزیت در بدنه رفتار فرسایشی آن را بحث کردند [۱۳] و لیو و همکاران اثر اضافه کردن سرامیکهایی را در کامپوزیت کربن/کربن بررسی کردند [۱۴].

برای افزایش محدوده کاری و نیروی حرکتی در سیستم‌های آینده، درک صحیح و دقیقی از پروسه خوردگی در نازل‌ها و تهیه مدلی برای کاهش ماده از آن‌ها کاملاً مورد نیاز است. با توجه به پیچیدگی زیاد خوردگی در نازل‌ها و همچنین به دلیل وجود عوامل بسیار در مدل سازی های تئوری آن‌ها، انجام تحقیقات مختلف در این بخش و مقایسه نتایج حاصل از آن‌ها با خروجی های حاصل از آزمایشات واقعی ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین در این مقاله تلاش شده است مدلی عددی با شبیه سازی کامل معادلات حاکم برای فرسایش یک شیر داغ که هندسه آن به طور مشخص با مجرای همگرا و اگر متفاوت است ارائه شود که پارامترهای مختلف نظیر دما، سطح و جنس شیر و غیره امکان دخالت داشته باشند. این مدل با نتایج تجربی صحت سنجی شده است و می‌تواند برای تحقیقات جدید در این حوزه مورد استفاده قرار گیرد.

### معادلات حاکم بر جریان در نازل

جریان درون نازل از نوع جریان یک سیال با دمای بالاست که واکنش‌های شیمیایی در آن در حال انجام است. بنابراین معادلات حاکم بر جریان عبارتند از معادلات پیوستگی جرم، مومنتوم، غلظت عناصر، انتالپی، انرژی جنبشی و معادله حالت که به ترتیب به صورت ریاضی برای این مسئله در معادلات (۱-۷) بیان شده‌اند.

می‌دهد که نرخ فرسایش نازل‌هایی از جنس تنگستن بسیار کم‌تر از نازل‌های از جنس گرافیت است و مقداری نزدیک به نرخ فرسایش نازل‌هایی با جنس رنیوم دارد. کمترین نرخ فرسایش مربوط به نازل‌هایی از جنس مولیبدن است که البته با توجه به دمای ذوب پائین آن (۲۸۹۰ درجه کلوین) برای شرایط کاری با دمای کم‌تر از ۲۴۰۰ درجه کلوین مناسب هستند. اونس و همکاران میزان فرسایش نازل از جنس گرافیت G90 را بررسی کردند [۷]. آپاریا و کو یک برنامه عددی برای آنالیز پارامتری مربوط به فرسایش نازل گرافیتی بر اساس فشار کاری و همچنین عناصر موجود در محصولات احتراق بدست آوردند [۸]. با بررسی پارامترهای مختلف مشخص گردید که میزان تاثیر گذاری بر روی نرخ فرسایش نازل به ترتیب مربوط به دمای شعله، فشار گاز عبوری و تمرکز عناصر اکسیدکننده است. لین نیز فرسایش مربوط به خوردگی نازل‌های گرافیتی را بررسی کرده است [۹]. برای کاهش نرخ فرسایش بحرانی نازل در سیستم تخلیه، گازهایی با دمای کم به قسمت بالایی گلوبی نازل تزریق شده است. این روش نه تنها باعث کاهش تمرکز تجمع ذرات اکسیدی شده بلکه کاهش دمای محفظه اصلی احتراق را نیز در پی داشته است. در سال‌های اخیر بیانچی و همکاران تحقیقات گسترده‌ای را روی تحلیل فرسایش دهانه خروجی راکت‌ها برای بهبود پیش رانش آنها انجام داده است [۱۰]. این یک نمونه از کاربردهای بررسی اثر حرکت گاز داغ در نازل محسوب می‌گردد. نتایج تحلیل آنها نشان داد که نرخ فرسایش برای سوخت‌های فلزی از نفوذ محدود و برای سوخت‌های غیر فلزی سینتیک محدود است. بیانچی و همکاران در کار دیگری با توجه به اهمیت دهانه نازل و تأثیر فوق العاده‌ای که روی فشار محفظه احتراق و پیش‌رانش می‌گذارد، اثر شعاع انحنای دهانه را روی فرسایش ترموشیمیایی نازل گرافیتی برای یک سوخت فلزی بررسی کردند [۱۱]. نتایج حاکی از کاهش نرخ فرسایش در شعاع انحنای کوچکتر بود.

$$\frac{\partial}{\partial x}(r\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(r\rho v) = 0 \quad (۱)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left( r \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{dp}{dx} \quad (۲)$$

$$\rho u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_i}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left( r \left( \frac{\mu}{Sc} \right)_{eff} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) \quad (۳)$$

$$\rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho v \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left( \left( \frac{\mu}{Pr} \right)_{eff} \frac{\partial H}{\partial y} + \left[ \mu_{eff} - \left( \frac{\mu}{Pr} \right)_{eff} \right] \frac{\partial u^2/2}{y} \right) \quad (۴)$$

$$\rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left( r \left( \mu_{eff} + \frac{\mu}{c} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \rho \epsilon \quad (۵)$$

$$\rho u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left( r \left( \mu_{eff} + \frac{\mu}{c} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + C\mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \frac{\epsilon}{k} - C\rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (۶)$$

$$P = \beta R_u T / W \quad (۷)$$

نازل می‌باشند. به کمک رابطه زیر می‌توان مقدار  $p_{i,s}$  را محاسبه کرد.

$$p_{i,s} = p_s \times Y_{i,s} \times \frac{W_{mix,s}}{W_i} \quad (۱۱)$$

که  $p_s$  فشار گاز بر روی سطح نازل،  $Y_{i,s}$  غلظت عناصر موجود بر روی سطح نازل،  $W_{mix,s}$  وزن مولی مخلوط گاز حاصل از احتراق و  $W_i$  وزن مولی عناصر موجود در محصول احتراق. به کمک رابطه زیر می‌توان  $K_i$  را نیز بدست آورد.

$$k_i = A_i \times T_s^b \times \exp\left(-\frac{E_i}{R_u \times T_s}\right) \quad (۱۲)$$

که  $A_i$  ثابتی مربوط به نرخ واکنش،  $T_s$  دمای سطح،  $E_i$  انرژی فعال‌سازی مربوط به هر واکنش و  $R_u$  ثابت گازها می‌باشد. از بین کمیت‌های بیان شده  $A_i$  و  $E_i$  از اطلاعات اعلام شده توسط کارفرما بدست می‌آید. به کمک موارد بیان شده می‌توان نرخ خوردگی شیمیایی را نیز محاسبه کرد.

### معادلات حاکم بر فرسایش شیر گاز داغ

فرسایش در شیر گاز داغ از دو نوع خوردگی که یکی به خاطر نفوذ و دیگری حاصل از واکنش‌های شیمیایی است بوجود می‌آید. پس برای محاسبه فرسایش کلی در این نوع شیرها باید مقادیر هر یک از این خوردگی‌ها محاسبه شود.

### خوردگی حاصل از نفوذ

به کمک رابطه زیر می‌توان نرخ خوردگی نفوذی را محاسبه کرد [۵].

$$\dot{r}_{c,d} = \frac{1}{\rho_c} \sum_{i=1}^N \dot{\omega}_i \times \frac{W_c}{W_i} \quad (۸)$$

که  $\dot{r}_{c,d}$  نرخ خوردگی نفوذی،  $\dot{\omega}_i$  نرخ جرمی تولید عناصر،  $\rho_c$  چگالی مربوط به جنس نازل،  $N$  تعداد عناصر موجود و موثر در محصول احتراق و  $W_c$  و  $W_i$  به ترتیب وزن مولی مربوط به نازل و هر یک از عناصر موجود در محصول احتراق می‌باشند. در رابطه فوق مقادیر مربوط به وزن مولی جزء ورودی‌ها که مقادیر آن‌ها معلوم می‌باشد. مقدار مربوط به نرخ جرمی تولید عناصر را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد [۵].

$$\dot{\omega}_i = -\rho \times D_i \times \dot{Y}_i \quad (۹)$$

که  $\rho$  چگالی گاز حاصل از محصول احتراق،  $D_i$  ضریب نفوذ عناصر موجود در محصولات احتراق در نازل و  $\dot{Y}_i$  نرخ غلظت عناصر موجود در محصولات احتراق می‌باشد. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان  $\dot{r}_{c,d}$  را بدست آورد.

### نرخ خوردگی شیمیایی

خوردگی شیمیایی از واکنش شیمیایی بین عناصر موجود در محصولات احتراق با جداره نازل بوجود می‌آید. به کمک

رابطه زیر می‌توان این کمیت را محاسبه کرد [۵و۴]

$$\dot{r}_{c,ch} = \frac{1}{\rho_c} \sum_{i=1}^N K_i \times p_{i,s}^n \quad (۱۰)$$

که  $\dot{r}_{c,ch}$  نرخ خوردگی شیمیایی،  $K_i$  ثابت نرخ واکنش مربوط به عناصر موجود در محصولات احتراق و  $p_{i,s}$  فشار جزئی عناصر موجود در محصولات احتراق بر روی سطح

## نرخ فرسایش

نرخ فرسایش کلی بوجود آمده در سطح مجرا را می توان به کمک رابطه زیر بدست آورد [۵].

$$\dot{r}_c = \min(\dot{r}_{c,d}, \dot{r}_{c,ch}) \quad (13)$$

با توجه به رابطه فوق مقدار فرسایش کلی همان مقدار کمینه بین دو خوردگی نفوذی و شیمیایی است.

## الگوریتم مدل سازی نرخ فرسایش

حل معادلات حاکم که در بخش قبلی تشریح شد با استفاده از روش های تحلیلی امکان پذیر نیست و نیازمند روش های عددی خواهد بود. گام نخست تقسیم بندی هندسه یا مش بندی آن است. بدین ترتیب می توان روش های عددی را برای معادلات حاکم بر هر مش بیان کرد و مجموعه معادلات گسسته سازی شده برای هندسه یک مجموعه معادلات بدست می دهد که در قالب دستگاه های معادله برای بدست آوردن سرعت ها، دما و فشار قابل استفاده هستند. به خاطر تقارن محوری می توان از مش دو بعدی استفاده کرد و حجم معادلات را بسیار کاهش داد. در ابتدا هندسه خطوط جانبی ایجاد شده و سطح حاصل از برخورد این خطوط مش بندی می گردد. از آنجا که سرعت ها در این مسئله بسیار بالا هستند لایه مرزی باریک خواهد بود و بنابراین مش های این نواحی بسیار ریزتر انتخاب می شوند. با توجه به تغییرات احتمالی هندسه و شرایط جریان ترجیح به استفاده از یک نرم افزار با قابلیت انعطاف بالاست تا یک کد خاص تک منظوره که برای یک هندسه یا شرایط خاص ارایه شده باشد. نرم افزار فلونت برای تحلیل جریان های مختلف سیال مناسب و در دسترس است. این نرم افزار هندسه شبکه بندی شده ای را از یک نرم افزار تولید مش مانند گمبیت دریافت کرده و با انتخاب شرایط مرزی و تعریف روش های حل تحلیل خود را انجام می دهد. نرم افزار فلونت میدان سرعت، فشار و دما را در هندسه مش بندی شده بدست می دهد.

با توجه به سرعت بسیار بالای گاز داغ درون مجرا لایه مرزی بسیار نازکی روی سطح تشکیل می شود و اندازه

گذاری مش فضای حل برای مدل سازی کلیه اتفاقات نزدیک دیواره دشوار است. طبق راهنمای نرم افزار و توصیه متخصصین تعداد مش در لایه مرزی حدود ۲۵ تا ۳۰ مش انتخاب شده است. این تعداد مش می تواند اتفاقات نزدیک به دیواره را به حد قابل قبولی پیش بینی کند. توجه شود که خروجی این نرم افزار باید برای حل معادله غلظت جزئی استفاده شود. بنابراین در چند مقطع خروجی های مورد نیاز مانند سرعت، چگالی و ویسکوزیته توربولانس را از فلونت استخراج کرده و به عنوان ورودی برای یک برنامه کامپیوتری بکار می روند. در این کد معادله غلظت به روش اختلاف محدود در لایه مرزی حل شده است تا شیب تغییرات غلظت روی دیواره بدست آید.

## حل معادله غلظت

معادله غلظت مولکول  $k$  با جایگذاری  $k$  به جای  $i$  در معادله (۳) بدست می آید. برای حل معادله غلظت در ضخامت لایه مرزی باید از داده های گام هفتم در گسسته سازی اختلاف محدود این معادله بهره جست. طبق اصول گسسته سازی اختلاف محدود برای مشتق اول و دوم یک کمیت مانند  $Y$  نسبت به متغیر مستقل  $y$  روابط زیر برقرار است. با استفاده از روش اختلاف محدود داریم:

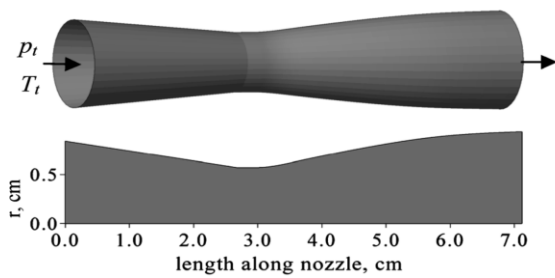
$$\frac{\partial Y_k}{\partial x} = \frac{(Y_k)_{i+1,j} - (Y_k)_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (14)$$

$$\frac{\partial Y_k}{\partial y} = \frac{(Y_k)_{i,j+1} - (Y_k)_{i,j-1}}{2\Delta y} \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 Y_k}{\partial y^2} = \frac{(Y_k)_{i,j+1} + (Y_k)_{i,j-1} - 2(Y_k)_{i,j}}{(\Delta y)^2} \quad (16)$$

برای هر نقطه رابطه ای بر اساس مقدار کمیت در آن نقطه و نقاط بالا و پایینش بدست می آید. این معادلات برای نقاط داخل لایه مرزی سرعت بدست می آیند. مرز این لایه به سادگی با مقایسه تغییرات مؤلفه افقی سرعت بدست می آید.

بنابراین معادله غلظت با فرض تغییرات اندک شعاع نازل نسبت به عرض لایه مرزی به صورت زیر گسسته می شود:



شکل ۱. هندسه حل نازل [۷].

محصولات احتراق با فشار  $P_t$  و دمای  $T_t$  وارد نازل می‌شود و به جو تخلیه می‌شود. دمای ورودی در تحلیل‌های انجام شده برابر  $3000\text{ K}$  و فشار ورودی برابر  $9/6\text{ MPa}$  است. دمای محیط برابر  $300\text{ K}$  در نظر گرفته شده است.

برای حل عددی در نرم افزار از مدل توربولانس اسپارلات آلماراس که از پیش فرض‌های نرم افزار فلونت بوده و برای جریان‌های با سرعت بالا جواب‌های قابل قبولی را در اختیار می‌گذارد استفاده شده است. استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر به خاطر کند شدن روند همگرایی و طولانی شدن زمان حل توصیه نمی‌شود. توجه به این نکته لازم است که حل معادله جریان یا شیب پروفیل سرعت در لایه مرزی به عنوان ورودی در معادله غلظت بکار می‌رود و تغییرات آن اثر آهسته‌ای در جواب این معادله دارد. با این حال مدل‌های دیگر نظیر کا اسیلون نیز به طور جنبی در حل مسئله بررسی شد که نتایج نهایی نرخ سایش برای مدل توربولانس‌های مزبور تفاوتی نداشته است. تنها زمان همگرایی با روش پیچیده‌تر بسیار طولانی‌تر شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل فلونت و نتایج منتشر شده قبلی همراهی کاملی بین آنها مشهود است و بنابراین می‌توان چنین استدلال کرد که نرم افزار فلونت به خوبی توانسته از عهده حل جریان برآید. در محل گلوگاه تغییرات سرعت در لایه مرزی به صورت زیر بدست می‌آید که در مقایسه با یافته‌های کو و همکاران در شکل (۲) نشان داده شده است و هم خوانی وجود دارد.

$$\rho_{i,j} u_{i,j} \left( \frac{(Y_k)_{i+1,j} - (Y_k)_{i-1,j}}{2\Delta x} \right) + \rho_{i,j} v_{i,j} \left( \frac{(Y_k)_{i,j+1} - (Y_k)_{i,j-1}}{2\Delta y} \right) = \left( \frac{\mu}{Sc} \right)_{eff} \times \left( \frac{(Y_k)_{i,j+1} + (Y_k)_{i,j-1} - 2(Y_k)_{i,j}}{(\Delta y)^2} \right) \quad (17)$$

$$0 = \frac{\rho_{i,j}}{4 \left( \frac{\mu}{Sc} \right)_{eff}} \frac{(\Delta y)^2}{\Delta x} u_{i,j} \left( (Y_k)_{i+1,j} - (Y_k)_{i-1,j} \right) + \left( \frac{\Delta y \rho_{i,j}}{4 \left( \frac{\mu}{Sc} \right)_{eff}} v_{i,j} - 1 \right) (Y_k)_{i,j+1} + \quad (18)$$

$$\left( \frac{\Delta y \rho_{i,j}}{4 \left( \frac{\mu}{Sc} \right)_{eff}} v_{i,j} + 1 \right) (Y_k)_{i,j-1} - (Y_k)_{i,j}$$

شرایط مرزی برای حل معادله غلظت عبارتست از:  
در سطح تماس فلز و گاز:

$$(\rho u Y_k)_g - \left( \rho D \frac{\partial Y_k}{\partial y} \right)_g = \dot{\omega}_k \quad (19)$$

در لبه لایه مرزی:

$$Y_k = (Y_k)_0 \quad (20)$$

برای حالتی که نرخ سایش نفوذی کنترل شده داشته باشیم، غلظت واکنش دهنده  $k$  در سطح فلز و گاز بسیار کوچک می‌شود و شرط مرزی به صورت زیر ساده خواهد شد:

$$(Y_k)_g = 0 \quad (21)$$

این مجموعه حل در یک قالب یک برنامه کامپیوتری نوشته شده است و نتیجه آن تغییرات غلظت در لایه مرزی و مشتق آن است.

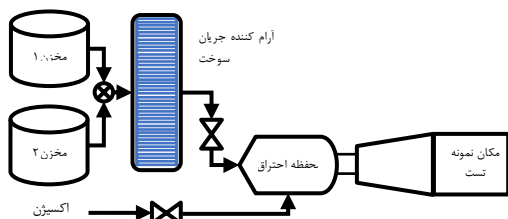
### صحت‌سنجی مدل

به منظور اطمینان از صحت مراحل مدل‌سازی، هندسه در نظر گرفته شده در فاز اعتبار بخشی همان هندسه‌ای است که توسط کو و شاگردانش در تحقیقات دنباله‌ای آنها استفاده شده است. شکل (۱) نمای سه بعدی و مقطع طولی آن را نشان می‌دهد. این نازل همگرا و اگر است که گلوگاه آن نزدیک به ورودی نازل است.

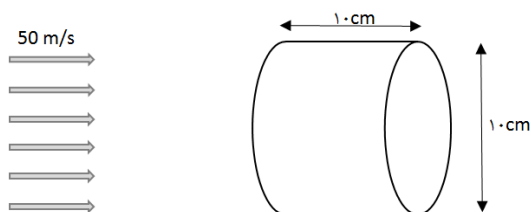
توجه شود در تحقیق کو و همکاران اثر آلومینوم در گاز نیز در نظر گرفته شده است و عامل بیشتر بودن نرخ سایش در این تحقیق نسبت به نتایج بدست آمده از کد شبیه سازی نیز همین موضوع است. البته همچنان اختلافها در حد قابل قبول است.

### بررسی تجربی

دستگاه استفاده شده برای بررسی تجربی مدل فرسایش پیش تر توسط کاظمی و جزووزیری در بررسی و طراحی یک تراستر گاز گرم بکار گرفته شده است [۱۵]. ساختار دستگاه آزمایشگاهی استفاده شده برای بررسی تجربی اثر عبور گاز داغ روی اجسام در شکل (۳) به صورت شماتیک نشان داده شده است. این دستگاه شامل دو مخزن حاوی سوخت، بخش آرام کننده جریان سوخت، محفظه احتراق و نازل خروجی محصولات گازی احتراق است. قطعه آزمایش بکار رفته در اعتبارسنجی مدل ارائه شده یک استوانه ساده مطابق شکل (۴) با قطر و طول اولیه ۱۰ سانتیمتر که در جریان یکنواختی از گاز داغ خروجی از نازل با سرعت ۵۰ متر بر ثانیه قرار دارد.

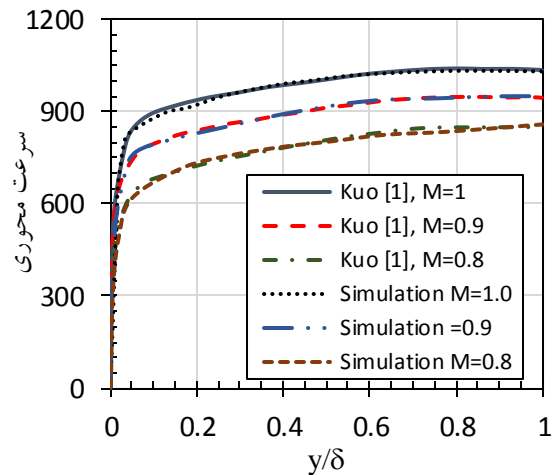


شکل ۳. شماتیک دستگاه بررسی تجربی.



شکل ۴. هندسه قطعه استفاده شده در بررسی تجربی.

از آنجا که فضای اطراف استوانه تأثیر گذار هستند باید در حل دخیل باشند؛ هندسه حل را به صورت یک مقطع مستطیلی ۵×۱۰ سانتیمتر بیرون کشیده از وسط لبه پایینی



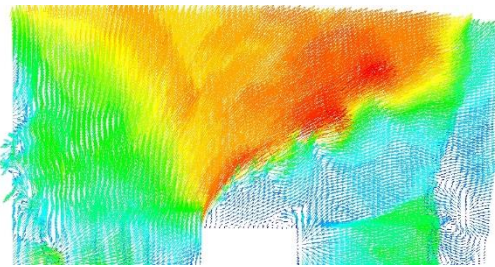
شکل ۲. پروفیل تغییرات سرعت در لایه مرزی: (الف) بدست آمده از فلوئنت، (ب) نتایج کو و همکاران.

با استفاده از نتایج بدست آمده از فلوئنت و به کارگیری آنها در کد تغییرات غلظت در لایه مرزی نتایج به صورت زیر بدست می آیند که با نتایج کو و همکاران مقایسه شده اند. شیب غلظت در نتایج کو و همکاران برای آب و دی اکسید کربن به ترتیب برابر ۰/۸ و ۰/۲ است و نتایج فلوئنت و کد متلب برابر ۰/۸۵ و ۰/۲۶ بدست آمده که در مجموع قابل قبول است.

مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل نرخ فرسایش و آنچه در کار تحقیقاتی کو و کسوانی آورده شده در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. مقایسه نتایج بدست آمده از محاسبه نرخ سایش

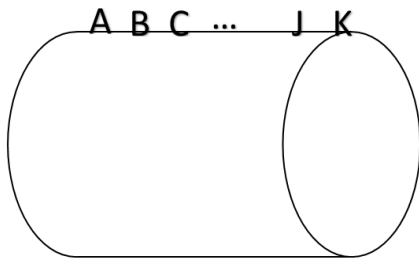
نرخ سایش بدست آمده از تحلیل	نرخ سایش بدست آمده از مقاله کو و همکاران	وزن مولکولی kg/kmol	غلظت CO <sub>2</sub>	غلظت H <sub>2</sub> O
۰/۱۹ mm/s	۰/۲۲ mm/s	۳۰/۱۰۱	۰/۰۴۲۸	۰/۱۴۱
۰/۱۳ mm/s	۰/۱۷ mm/s	۳۰/۶۷۵	۰/۰۲۷	۰/۱۰۶
۰/۰۸۵ mm/s	۰/۱۱ mm/s	۳۱/۲۴۵	۰/۰۱۶۱	۰/۰۷۳۳
۰/۰۵ mm/s	۰/۰۷ mm/s	۳۱/۷۹۵	۰/۰۰۹	۰/۰۴۹۸
۰/۰۲۷ mm/s	۰/۰۴ mm/s	۳۲/۲۹۵	۰/۰۰۴۶	۰/۰۲۵۷



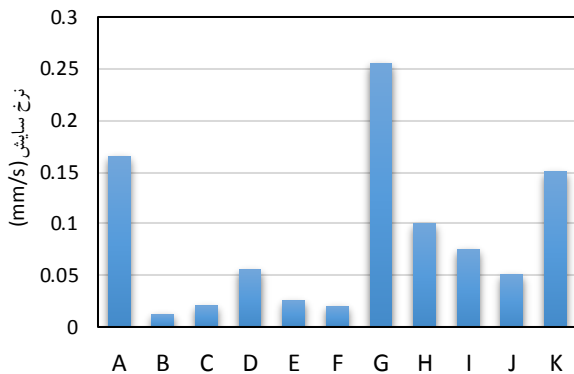
شکل ۵. نتایج حل جریان. (ج) بردار سرعت

شکل ۵. نتایج حل جریان.

اگر یازده نقطه به نام نقاط A تا K را مطابق شکل (۶) به فاصله یک سانتیمتر از یکدیگر روی استوانه در نظر بگیریم آنگاه از تحلیل نرخ سایش با توجه به جنس کربنی استوانه نرخ سایش مطابق شکل (۷) بدست می‌آید.



شکل ۶. نقاط مدنظر برای انجام تحلیل سایش.

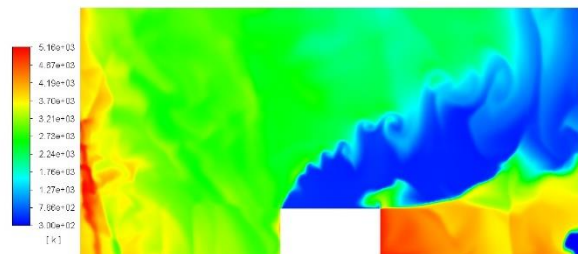


شکل ۷. نتایج مقدار فرسایش بدست آمده از انجام تحلیل سایش روی استوانه.

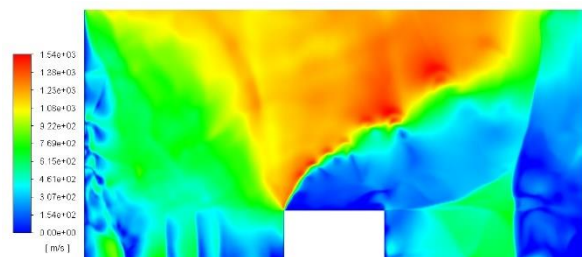
مدل سازی نشان می‌دهد در دو ناحیه ابتدا و مرکز قطعه فرسایش به شدت افزایش یافته است و نقاطی که بعد از آنها قرار دارند فرسایش کمتری را تجربه کردند. دلیل این اتفاق به جریان سیال حول جسم مربوط می‌شود. با برخورد سیال به قطعه استوانه‌ای به خاطر لبه تیز آن جریان نمی‌تواند سطح را دنبال کند و لذا از روی سطح بلند

یک مستطیل بزرگ‌تر با ابعاد ۵ برابر در نظر می‌گیریم. بزرگتر گرفتن هندسه عملاً افزایش تعداد مش و طولانی شدن حل را به دنبال خواهد داشت. تعداد مش استفاده شده برای حل روی جسم که احتمال تشکیل لایه مرزی وجود دارد بیشتر و در دور دست‌ها کمتر انتخاب می‌شود. تعداد مش استفاده شده در مدل سازی این هندسه حدود ۱۲۰۰۰۰ مش مربعی انتخاب شد تا همگرایی قابل قبولی در حل جریان دیده شد.

جریان را از سمت چپ به راست در نظر می‌گیریم که با سرعت ۵۰ متر بر ثانیه و با دمای ۴۰۰۰ درجه کلوین به صورت ورودی سرعت ثابت از مرز سمت چپ هندسه حل در حرکت است. مرزهای استوانه را نیز دیواره ثابت با شار ۹۰۰۰ وات بر متر مربع و ثابت زبری ۵۰ در نظر می‌گیریم. دو مرز پایینی را به صورت متقارن فرض کرده و مرز سمت راست و بالا را شرط فشار خروجی برابر با فشار جو در نظر گرفته‌ایم. نتایج حل عددی جریان به صورت تغییرات دما، فشار و بردارهای سرعت در شکل (۵) آورده شده است.

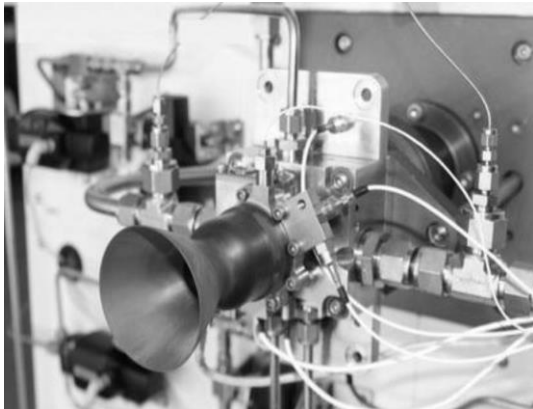


شکل ۸ (الف) توزیع دمای کل

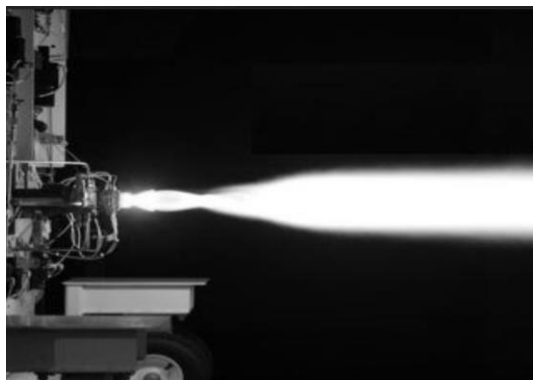


شکل ۸ (ب) توزیع سرعت





الف



ب

شکل ۸. الف) نمایی از دستگاه و خروجی محفظه احتراق.

ب) تصویر انجام آزمایش روی قطعه آزمون.

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

فرسایش ناشی از عبور جریان گاز بسیار داغ که همراه با واکنش‌های شیمیایی مؤثر همراه است در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت و یک مدل مبتنی بر شبیه‌سازی عددی جریان و معادلات غلظت ارائه گردید.

مدل ارائه شده معادله خوردگی را حل می‌کند که برای آن باید جریان سیال و معادله غلظت حل گردد. ورودی‌های مدل ارائه شده سرعت جریان، دمای جریان، ترکیب جریان، هندسه جریان، شرایط دیواره، جنس قطعات و ضرایب خوردگی هستند و خروجی آن میزان خرابی سطح است. از آنجا که هندسه و شرایط مرزی جریان حل جریان را کاملاً متفاوت از شرایط دیگر می‌کند مقایسه به منظور تأثیر پارامترها دشوار است. تغییر اندکی در سرعت ورودی و یا هندسه کاملاً شرایط جریان به خصوص در نزدیکی

می‌شود. بنابراین در نقطه ابتدایی که برخورد جریان شکل گرفته فرسایش شدید دیده می‌شود. در نقاط B تا E به خاطر جدا شدن جریان از روی سطح یک ناحیه با سرعت پایین در مجاورت سطح بوجود می‌آید که خود سبب کاهش فرسایش می‌گردد. جریان برخواسته از روی سطح دوباره در محل نقاط F و G به روی سطح باز می‌گردد و این بار با مؤلفه عمود به سطح بزرگتر که سبب فرسایش شدیدتری روی قطعه می‌گردد. پس از برخورد جریان در حالت متعادل‌تری قرار گرفته و فرسایش تقریباً برابر با مقدار میانگین را ایجاد می‌کند.

در شکل (۸ الف) نمایی از دستگاه و خروجی محفظه احتراق و در شکل (۸ ب) تصویری از آزمایش انجام گرفته روی قطعه نشان داده شده است. مشکلات متعددی در انجام آزمایش تجربی وجود دارد که مهمترین آنها ایجاد جریان گاز داغ بسیار گرم و بسیار پر سرعت است. این گاز با برخورد به قطعه تأثیر شدیدی دارد و باعث فرسایش نابودی سطح قطعه در مدت زمان کوتاهی می‌گردد. مدل سازی فرایندهایی که شدت اتفاق در آنها بالاست بسیار دشوار است. اگر تغییر سطح قطعه شدید باشد می‌تواند منجر به تغییر در هندسه سطح شده و شرایط جریان را به کل تغییر دهد. این امر باعث تغییر پیش بینی مدل می‌شود. از نتایج تحلیل می‌توان دید با آنکه نرخ سایش‌های متفاوتی برای نقاط مختلف روی قطعه بدست آمده ولی متوسط  $0.5 \text{ mm/s}$  برای بیشتر نقاط فرضی معقول است. جالب توجه است که اندازه گیری میزان فرسایش نمونه پس از اتمام آزمایش به صورت قابل توجهی برابر همین مقدار گزارش شده است.

*Propellant Rocket Motors*, Journal of Propulsion and Power, 25(1)(2009) 40-50.

7. B. Evans, K. Kuo, E. Boyd, A. Cortopassi, *Comparison of Nozzle Throat Erosion Behavior in a Solid-Propellant Rocket Motor and a Simulator*, (2009).

8. R. Acharya, K. K. Kuo, *Numerical simulation of graphite nozzle erosion with parametric analysis*, AIAA Paper, (2010) 6846.

9. C.-Y. Lin, *Important Findings and Observations of the Rocket Nozzle Erosion Processes and Theoretical/numerical Simulations*, Thesis, The Pennsylvania State University, (2010).

10. Daniele Bianchi, Francesco Nasuti, Marcello Onofri, and Emanuele Martelli, *Thermochemical Erosion Analysis for Graphite/Carbon-Carbon Rocket Nozzles*, Journal of Propulsion and Power, 27(1)(2011) 197-205.

11. Daniele Bianchi, Francesco Nasuti, and Marcello Onofri. *Radius of Curvature Effects on Throat Thermochemical Erosion in Solid Rocket Motors*, Journal of Spacecraft and Rockets, 52(2)(2015) 320-330.

12. Piyush Thakre, Rajesh Rawat, and Richard Clayton, *Mechanical Erosion of Graphite Nozzle in Solid-Propellant Rocket Motor*, Journal of Propulsion and Power, 29(3)(2013)593-601.

13. Samire Sabagh, Ahmad Arefazar, Ahmad Reza Bahramian, *Thermochemical erosion and thermophysical properties of phenolic resin/carbon fiber/graphite nanocomposites*, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 35 (2016) 1814-1825.

14. Yue Liu, Qiangang Fu, Beibei Wang, Yiwen Guan, Yang Liu, *Ablation behavior of C/C-SiC-ZrB<sub>2</sub> composites in simulated solid rocket motor plumes*, Journal of Alloys and Compounds, 727(2017) 135-145.

۱۵. مجید کاظمی اسفه، محمدعلی جزووزیری، تدوین

الگوریتم طراحی و ساخت یک تراسترگاز گرم و مقایسه با نتایج تجربی، نشریه دانش و فناوری هوافضا، سال سوم،

شماره دوم، (۱۳۹۳)، ۱۰۳-۱۱۷.

سطح را تغییر می دهد. راهکار مؤثری که برای اطمینان نسبی از اعتبار مدل وجود دارد مقایسه با نتایج تجربی است.

این مدل با استفاده از نتایج مقالات مشابه و همچنین به صورت تجربی صحت سنجی شد. نتایج این ارزیابی بیانگر توانمندی قابل قبول مدل در پیش بینی واقعیت می باشد. از آنجا که این مدل می تواند نرخ فرسایش و تغییر اندازه مجرا را پیش بینی کند برای طراحی سیستم هایی نظیر موتورهای موشک و هدایت کننده ها مورد استفاده قرار می گیرد. اگر در کاربردی نرخ سایش بیش از حد باشد که تغییر اندازه مجرا اثر قابل ملاحظه ای را روی جریان سیال بگذارد، در این صورت مدل استفاده شده باید با قرار گرفتن در یک چرخه محاسبه جریان با اندازه های هندسی تغییر یافته و سپس محاسبه نرخ فرسایش جدید اصلاح گردد. این چرخه پس از رسیدن به زمان نهایی حل یا کم بودن نرخ سایش در قیاس با اندازه هندسی متوقف می شود.

## مراجع

1. K. K. Kuo, S. T. Keswani, *A Comprehensive Theoretical Model for Carbon-Carbon Composite Nozzle Recession*, Combustion Science and Technology, 42(1985) 145-164.

2. S. T. Keswani, E. Andiroglu, J. D. Campbell, K. Kuo, *Recession behavior of graphitic nozzles in simulated rocket motors*, Journal of Spacecraft and Rockets, 22(1985) 396-397.

3. S. T. Keswani, K. K. Kuo, *Validation of an Aerothermochemical Model for Graphite Nozzle Recession and Heat-Transfer Processes*, Combustion Science and Technology, 47(1986) (1986).

4. R. Acharya, K. K. Kuo, *Effect of Chamber Pressure and Propellant Composition on Erosion Rate of Graphite Rocket Nozzle*, Journal of Propulsion and Power, 23(6) (2007) 1242-1254.

5. P. Thakre, V. Yang, *Chemical Erosion of Carbon-Carbon/Graphite Nozzles in Solid-Propellant Rocket Motors*, Journal of Propulsion and Power, 24(4)(2008) 822-833.

6. P. Thakre, V. Yang, *Chemical Erosion of Refractory-Metal Nozzle Inserts in Solid-*