

# مدل سازی بالستیک داخلی موتور سوخت جامد با در نظر گرفتن اثرات سوزش فرسایشی

الهام رضائیان پارسا<sup>۱</sup> و سیدمهدی میرساجدی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی فناوری های نوین، دانشگاه شهید بهشتی

\*تهران، ولنجک

m\_mirsajedi@sbu.ac.ir

در این تحقیق شبیه سازی بالستیک داخلی راکت موتور سوخت جامد بررسی شده است. میدان جریان شامل فضای داخل گرین و نازل است. معادلات متقارن محوری، تراکم پذیری و گذرای اویلر به عنوان معادلات حاکم و پدیده سوزش فرسایشی نیز پدیده ای مهم در موتورهای سوخت جامد، در نظر گرفته شده اند. به منظور شبیه سازی جریان از نرم افزار فلونت با در نظر گرفتن قابلیت شبکه متحرک استفاده شده است. فرض شبیه سازی سوزش فرسایشی مستلزم بهره گیری ویژه از UDF است که برای اولین بار مورد استفاده قرار می گیرد. نتایج به دست آمده و مقایسه آنها با سایر روش های عددی، نشان دهنده دقت فرضیات به کار رفته است.

واژه های کلیدی : موتور سوخت جامد، بالستیک داخلی، سوزش فرسایشی

## مقدمه

امروزه، با وجود استفاده وسیع از موتورهای سوخت مایع در صنایع موشکی، هنوز هم موتورهای سوخت جامد جایگاه ویژه ای، به عنوان پیشران اصلی یا شتاب دهنده های کمکی، دارند. از مهم ترین مشخصه های مورد نیاز در تحلیل عملکرد موتورهای سوخت جامد، نمودارهای فشار- زمان و توزیع فشار در محفظه احتراق است. واضح است که دقت نمودارهای یاد شده مهم است و بدین منظور لازم است تا غالب پدیده های مؤثر بر بالستیک داخلی موتور از جمله پدیده سوزش فرسایشی در نظر گرفته شود. به منظور شبیه سازی بالستیک داخلی تاکنون، روش های مختلفی ارائه شده است. برای مثال در مرجع [۱] به بررسی صفر بعدی بالستیک داخلی پرداخته شده است. شبیه سازی صفر بعدی بدین معناست که کل حجم داخل موتور در قالب یک حجم کنترل در نظر گرفته می شود و از تغییر پارامترهای مؤثر در طول موتور صرف نظر می شود. مراجع [۲ و ۳] به شبیه سازی یک بعدی بالستیک داخلی موتور با در نظر گرفتن برخی عوامل مؤثر پرداخته اند. در مرجع [۴] بالستیک داخلی موتور با

## اختصارات

$\rho$	چگالی [ $kg/m^3$ ]
$g$	شتاب گرانش [ $m/s^2$ ]
$P$	فشار [ $Pa$ ]
$V$	سرعت [ $m/s$ ]
$t$	زمان [ $s$ ]
$\dot{r}$	نرخ سوزش [ $m/s$ ]
$a$	ضریب ثابت نرخ سوزش [ $m/s$ ]
$n$	توان فشار در رابطه نرخ سوزش
$k$	ضریب سرعت

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد  
۲. استادیار (نویسنده مخاطب)

کامپایل کردن به نرم افزار فلونت متصل می شوند. تابع مورد استفاده در این تحقیق از طریق کامپایل کردن به نرم افزار متصل شده است.

## ابعاد موتور و مشخصات سوخت

موتور بررسی شده در این تحقیق، یک موتور سوخت جامد فرضی است و سوخت در نظر گرفته شده برای آن از نوع دوپایه است. ابعاد موتور و مشخصات سوخت در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱ - ابعاد موتور و مشخصات سوخت

۰/۱m	قطر خارجی موتور
۰/۰۴۵m	قطر داخلی موتور
۰/۰۴۰m	قطر گلوگاه
۰/۱m	قطر خروجی نازل
۱m	طول گرین
۰/۰۰۱۴۹۹m/s	ضریب ثابت در معادله نرخ سوزش (a)
۰/۴۲۵۵	توان فشار در معادله نرخ سوزش (n)
۲۴۰۶K	دمای شعله
۱۶۰۵kg/m <sup>3</sup>	چگالی سوخت

## فرمول ها و روابط حاکم

همانگونه که قبلاً بیان شد، برای حل میدان جریان در این مسئله از معادلات متقارن محوری، تراکم پذیر و گذرای اویلر استفاده شده است.

$$\rho \bar{g} - \nabla p = \rho \frac{D\bar{V}}{Dt} \quad (1)$$

به منظور مدل سازی سوزش سطح سوخت از رابطه (۲) استفاده شده است.

$$\dot{r} = ap^n \quad (2)$$

همچنین برای شبیه سازی سوزش فرسایشی رابطه (۳) مورد استفاده قرار گرفته است.

$$\dot{r} = ap^n (1 + KV_{th}) \quad (3)$$

مقدار k در رابطه (۳) معمولاً بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۳ و مقدار  $V_{th}$  که معرف سرعت آستانه ای شروع پدیده سوزش فرسایشی است (با توجه به داده های مرجع [۶])، حدود ۲۰۰ m/s انتخاب می شود. در این مسئله، k برابر با ۰/۰۰۱۷ و  $V_{th}$  برابر با ۱۶۰ m/s در نظر گرفته شده است.

در نظر گرفتن میدان جریان دوبعدی / متقارن محوری حل شده و با نتایج میدان یک بعدی مقایسه شده است. در مرجع [۵] نیز حل میدان دوبعدی / متقارن محوری موتور با استفاده از نرم افزار فلونت ارائه شده است. فرض صورت گرفته در این مرجع بدین گونه است که کل سطح سوزش گرین به صورت یکنواخت عقب رفته است، بنابراین قابلیت مدل سازی پدیده سوزش فرسایشی وجود ندارد. در این تحقیق سعی شده است که با استفاده از نرم افزار فلونت و قابلیت شبکه متحرک آن، مدلی با در نظر گرفتن سوزش فرسایشی برای بالستیک داخلی موتورهای سوخت جامد ارائه شود.

برای حل میدان جریان در نرم افزار فلونت از معادلات متقارن محوری، تراکم پذیر و گذرای اویلر استفاده شده است. همچنین برای مدل کردن تغییرات سطح سوخت بر اثر سوزش با استفاده از شبکه متحرک، یک «تابع تعریف شده توسط کاربر»، (UDF)، به فلونت متصل شده است.

## تابع تعریف شده توسط کاربر

یکی از قابلیت های مفید نرم افزار فلونت، امکان اتصال «تابع تعریف شده توسط کاربر» به نرم افزار است. این توابع را که می توان با زبان ++C برنامه نویسی کرد، این امکان را فراهم می کند که کاربر بتواند تنظیمات دلخواه خود را از طریق آنها، اعمال کند.

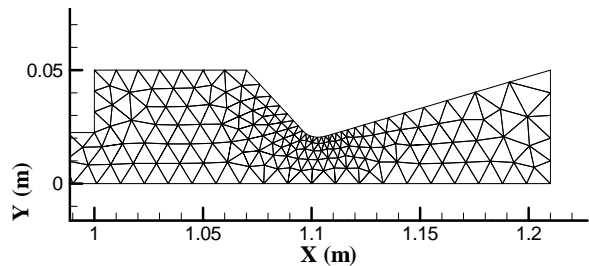
برای برنامه نویسی این نوع توابع، ماکروهایی در زبان ++C در نظر گرفته شده است که در راهنمای نرم افزار فلونت توضیحات کاملی درباره آنها آمده است. در این تحقیق نیز، برای تعریف کردن حرکت سطح سوخت بر اثر سوزش، از یک تابع تعریف شده توسط کاربر استفاده شده است. مرجع [۵] نمونه ای از چنین مدل سازی را با استفاده از ماکروی حرکت مرکز ثقل<sup>۴</sup> ارائه کرده است. ضعف این مدل در این است که با استفاده از این ماکرو تمام سطح به صورت یکپارچه و صلب، با نرخ سوزش مرکز جرم آن می سوزد و نقاط روی سطح مورد نظر نسبت به هم حرکت ندارند. بنابراین امکان مدل کردن سوزش فرسایشی وجود ندارد. وجه تمایز این تحقیق در استفاده از ماکروی حرکت شبکه<sup>۵</sup> است که امکان حرکت نقاط شبکه روی سطح سوخت را متناسب با نرخ سوزش در هر کدام از آنها فراهم می کند و بدین ترتیب مدل سازی سوزش فرسایشی ممکن می شود.

همچنین می توان این توابع را به گونه ای نوشت که نتایج حاصل از حل، در هر گام یا با فاصله چند گام زمانی، در یک فایل با فرمت دلخواه، چاپ شود. این قابلیت امکان بررسی دقیق تر نتایج را فراهم می سازد. این نوع توابع از دو طریق تفسیر کردن یا

3. User Defined Function
4. CG motion
5. Grid motion

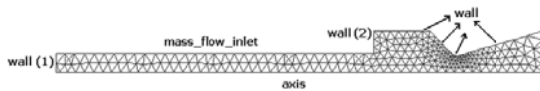
## روش حل

اولین گام در حل میدان، شبکه‌بندی درون آن است. در این تحقیق، مدل موتور و شبکه‌بندی آن با استفاده از نرم‌افزار گمیت ساخته شده و آخرین شبکه مورد استفاده دارای ۴۵۴ نقطه محاسباتی است. قسمتی از هندسه و شبکه‌بندی موتور در شکل (۱) مشاهده می‌شود.



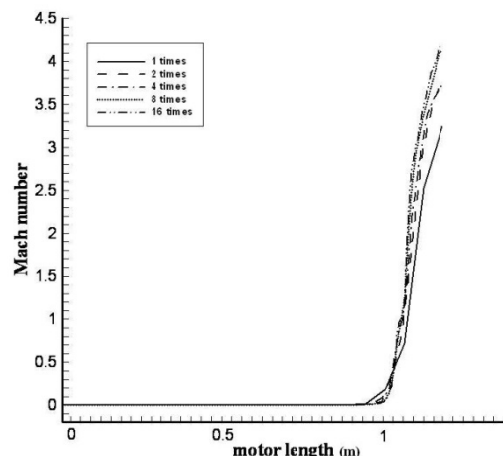
شکل ۱- هندسه و شبکه‌بندی موتور در ناحیه نازل

شرایط مرزی برای حل مسئله، مطابق با شکل (۲) انتخاب شده است.



شکل ۲- شرایط مرزی انتخاب شده برای حل مسئله

به منظور یافتن شبکه بهینه و به دست آمدن جواب‌های قابل اعتماد، شبکه‌بندی اولیه طی چهار مرحله ریز شده و جواب‌های حاصل از آنها با هم مقایسه شده است. سپس با توجه به مقایسه انجام شده و مطابق با شکل (۳)، شبکه‌ای که سه مرحله از شبکه اولیه ریزتر بود به عنوان شبکه بهینه انتخاب شد. برای حل، از ویرایش دوبعدی فلونت با دقت مضاعف استفاده شده است.



شکل ۳- مقایسه عدد ماخ در طول موتور در پنج شبکه مختلف

همانگونه که قبلاً نیز بیان شد، برای حل مسئله از شبکه متحرک استفاده شده است. به این ترتیب که سطح سوزش گرین، دیواره انتهایی موتور (که با شماره ۱ در شکل (۲) مشخص شده است) و دیواره بین سطح گرین و قسمت همگرای نازل (که با شماره ۲ در شکل (۲) مشخص شده است)، به عنوان سطوح دارای شبکه متحرک انتخاب شده‌اند. در پنجره Dynamic Mesh Zones در فلونت، سطح سوزش گرین (با توجه به UDF که برای حل به فلونت متصل شده است) با گزینه User-Defined و دیواره‌های ۱ و ۲ با گزینه Deforming مشخص شده‌اند. به این ترتیب در سطح سوزش، هرکدام از نقاط شبکه‌بندی متناسب با مقدار فشار در همان نقطه تغییر مکان می‌دهند. در دیواره‌های ۱ و ۲ نیز، فقط با توجه به تغییر مکان نقاط ابتدایی و انتهایی سطح گرین، تغییر طول حاصل می‌شود.

برای شروع حل، مقدار فشار اولیه ۱۰ اتمسفر و مقدار دمای اولیه ۱۵۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. حل به صورت ناپایا و با گام زمانی ۰/۰۰۰۱ ثانیه انجام شده است. میدان جریان به شکل متقارن محوری مدل‌سازی شده و گسسته‌سازی آن از نوع بالادست مرتبه اول است. معادلات به صورت coupled حل شده‌اند. به منظور همگرایی جواب‌ها در هر گام زمانی، تعداد ۱۰۰ تکرار انجام شده است.

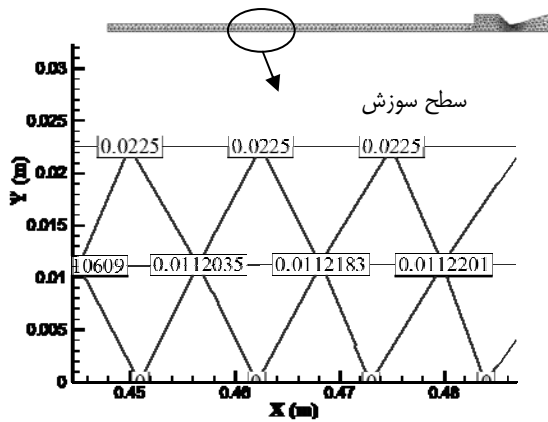
## نتیجه‌گیری

از عوامل مهم در تأثیر سوزش فرسایشی علاوه بر نسبت سطح سوزش به گلوگاه،  $A_b/A_t$ ، نسبت سطح عبوری جریان به سطح گلوگاه،  $A_p/A_t$  نیز مهم است. در این تحقیق موتوری با نسبت سطح عبوری جریان به سطح مقطع گلوگاهی برابر با ۱/۲۱ انتخاب شده تا اثرات این پدیده در آن کاملاً مشهود باشد.

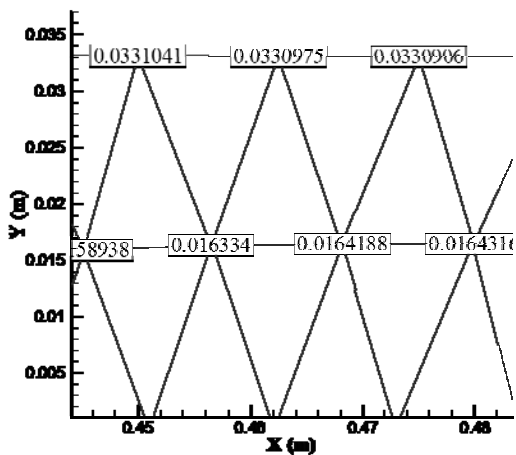
بر اثر سوزش فرسایشی، فشار موتور در لحظات اولیه به شدت بالا می‌رود و سپس با شیب ملایم‌تری نرخ صعودی خود را ادامه می‌دهد تا جایی که سطح سوزش و در پی آن فشار موتور به حداکثر مقدار خود می‌رسند. سپس به دلیل آنکه سوخت در مجاورت نازل تمام می‌شود، سطح کلی سوزش کم شده و منحنی تغییرات فشار با شیبی ملایم شروع به کاهش می‌کند. بعد از اتمام سوخت، نرخ کاهش فشار با شیب تندتری ادامه یافته تا موتور تخلیه می‌شود.

در شکل (۴)، مختصه  $y$  نقاط بر روی سطح سوخت قبل از شروع سوزش مشاهده می‌شود. پس از سوزش سوخت و عقب‌روی سطح سوزش و در صورت اعمال مدل سوزش فرسایشی، انتظار می‌رود که نقاط در مجاورت نازل بیشتر عقب رفته باشند. در عین حال در صورت عدم اعمال این مدل و به دلیل بالابودن فشار در

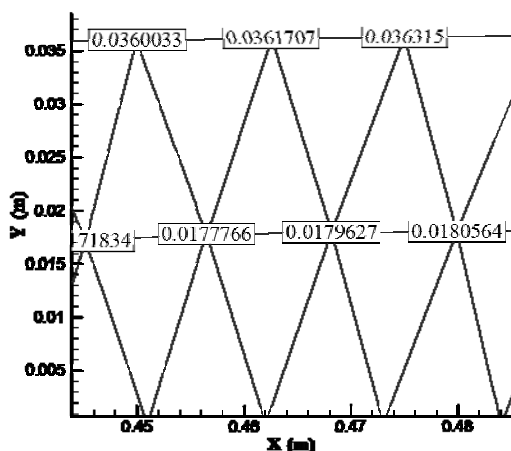
به دست آوردن نمودارهای مرجع اهمیتی ندارند، بنابراین می‌توانند به عنوان یکی دیگر از منابع خطا لحاظ شوند.



شکل ۴- مختصه y نقاط شبکه‌بندی قبل از شروع سوزش



شکل ۵- مختصه y نقاط شبکه‌بندی در سوزش بدون فرسایش ۲/۳ ثانیه پس از شروع سوزش



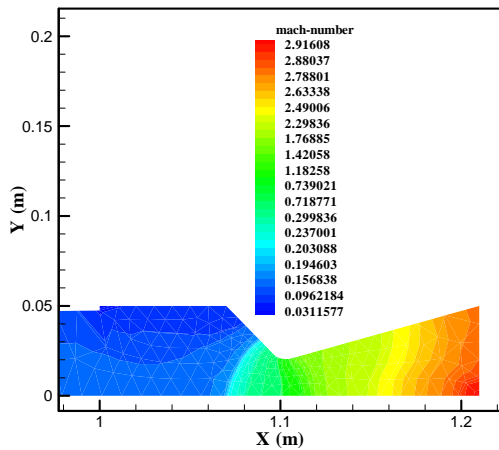
شکل ۶- مختصه y نقاط شبکه‌بندی در سوزش با فرسایش ۲/۳ ثانیه پس از شروع سوزش

ابتدای موتور، عقب‌نشینی سطح در این ناحیه بیشتر خواهد بود. چگونگی حرکت سطح گرین در هنگام حل در شکل‌های (۵) و (۶)، با ارائه مختصات نقاط روی این سطح در دو حالت بدون فرسایش و با فرسایش نشان داده شده‌اند. با مقایسه این شکل‌ها با شکل (۴)، که مربوط به قبل از شروع سوزش است، می‌توان مقدار سوزش سطح و تغییر مکان نقاط روی آن را ملاحظه کرد. مشاهده می‌شود که در شکل (۵) به دلیل اینکه سوزش بدون فرسایش است، نقاط دور از نازل فشار بیشتری دارند، بنابراین بیشتر تغییر مکان داده‌اند؛ در حالی که در شکل (۶) چون سوزش با فرسایش در نظر گرفته شده است، نقاط نزدیک به نازل، در لحظات اولیه فشار بیشتری داشته، به همین دلیل بیشتر تغییر مکان داده‌اند.

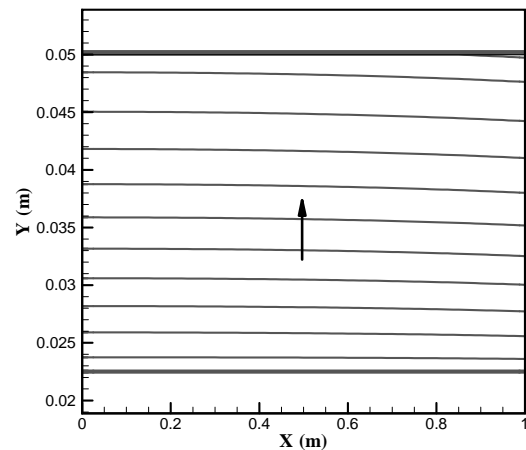
در شکل‌های (۷) و (۸)، عقب‌روی سطح گرین در طی سوزش بدون در نظر گرفتن فرسایش و سوزش با فرسایش نشان داده شده است. در این شکل‌ها سطح گرین با فاصله‌های زمانی یکسان (به جز در ابتدا و انتهای سوزش) در طی سوزش ترسیم شده است.

به منظور مقایسه سرعت سیال در ناحیه نازل و همچنین مقایسه عدد ماخ در خروجی، در دو حالت بدون فرسایش و با فرسایش، در شکل‌های (۹) و (۱۰)، خطوط هم‌تراز ماخ در موتور در یک زمان، نشان داده شده‌اند. در شکل (۱۱) نیز نمودارهای عدد ماخ در طول محور موتور، در دو حالت، با هم مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که اثرات فرسایش روی سرعت سیال، بیشتر در سطح گرین در نزدیکی نازل خودنمایی می‌کند و در ناحیه نازل، دو نمودار تقریباً برهم منطبق هستند.

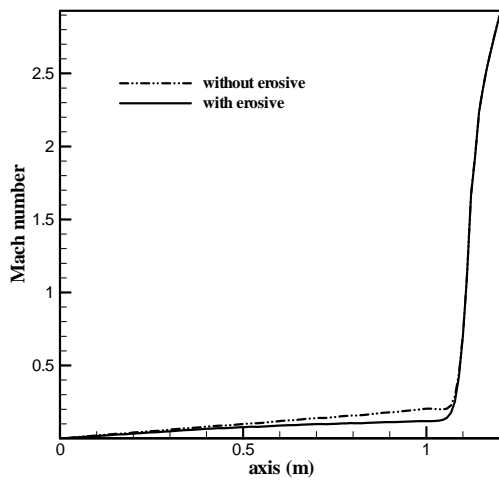
نمودار عملکرد موتور در دو حالت بدون در نظر گرفتن سوزش فرسایشی و با در نظر گرفتن آن در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همچنین در شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، نمودارهای عملکردی به دست آمده در دو حالت با در نظر گرفتن سوزش فرسایشی و بدون در نظر گرفتن آن، با مرجع [۳] که روشی یک‌بعدی است، مقایسه شده‌اند. هدف از این مقایسه، اطمینان از دقت استفاده از مدل Grid motion به جای CG motion است. همانگونه که در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مشاهده می‌شود، مقایسه نتایج در شکل (۱۳) در سوزش بدون فرسایش تطابق مناسبی میان نتایج وجود دارد. اختلاف موجود میان نمودارها، عمدتاً ناشی از اختلاف میان یک‌بعدی و دوبعدی بودن جریان است. اما در حالتی که فرسایش در نظر گرفته شده است، اختلاف زیادی میان نمودارها وجود دارد. این مسئله می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. برای مثال مدل استفاده شده در مرجع [۳] با مدل این تحقیق متفاوت است. علاوه بر این مشاهده شد که طول و زاویه قسمت‌های همگرا، واگرا و همچنین طول گلوگاه اثر مهمی بر نمودار عملکردی حاصل از این تحقیق می‌گذارند. این در حالی است که به دلیل یک‌بعدی بودن روش مرجع مورد اشاره، این پارامترها در



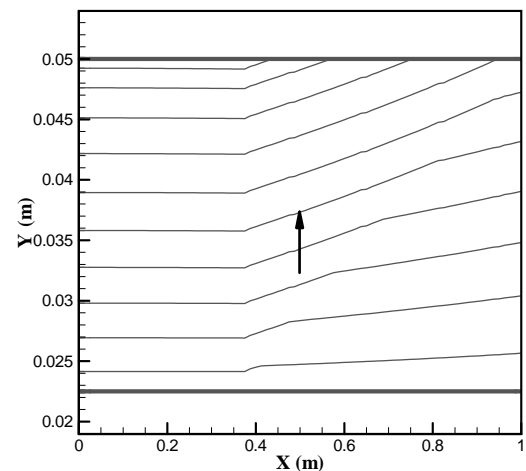
شکل ۶- کانتور عدد ماخ در ناحیه نازل در ثانیه سوم سوزش با فرسایش



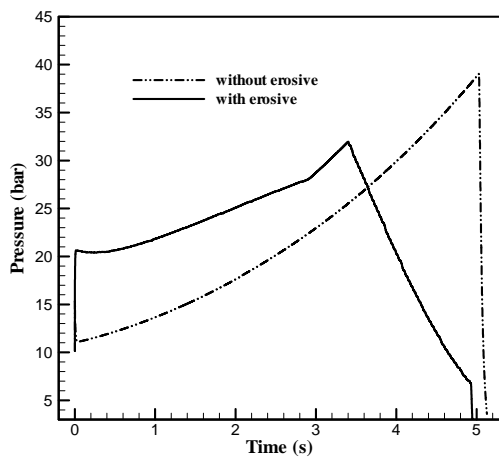
شکل ۷- عقب روی سطح گرین در سوزش بدون فرسایش



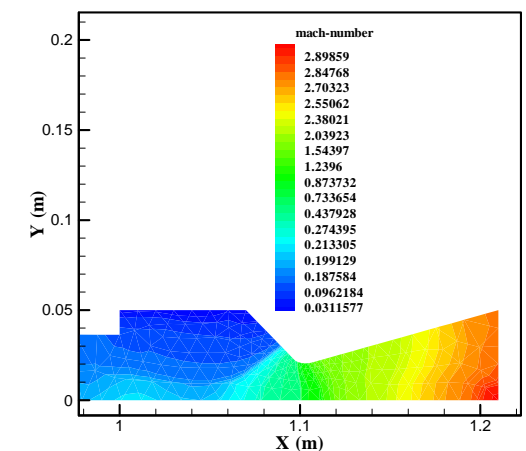
شکل ۱۰- مقایسه عدد ماخ در طول محور موتور در دو حالت بدون فرسایش و با فرسایش



شکل ۸- عقب روی سطح گرین در سوزش با فرسایش



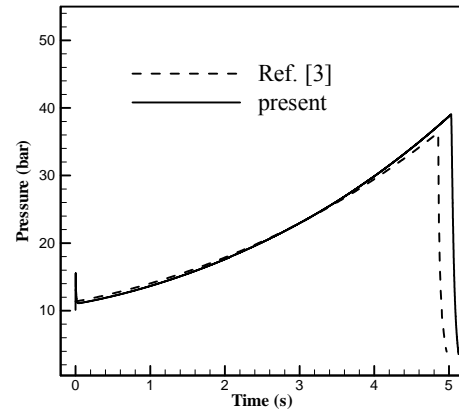
شکل ۱۲- نمودارهای به دست آمده برای عملکرد موتور در دو حالت بدون در نظر گرفتن سوزش فرسایشی و با در نظر گرفتن سوزش فرسایشی



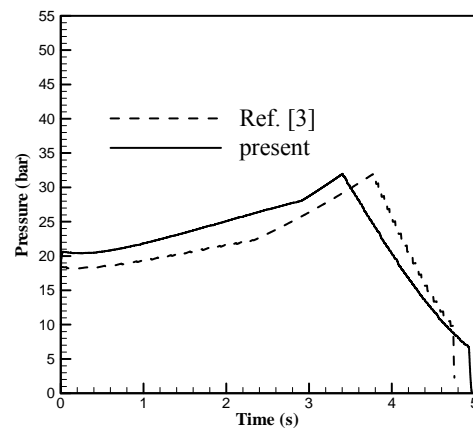
شکل ۹- کانتور عدد ماخ در ناحیه نازل در ثانیه سوم سوزش بدون فرسایش

## مراجع

- [1] Hajihosseini, H. R., "Zero Dimensional Simulation of Solid Rocket Motor Internal Ballistics," *The First Applied Conference of Aerospace Industrial Organization*, 2000 (In Persian).
- [2] Mirsajedi, S. M., "One Dimensional Simulation of Solid Rocket Motor Internal Ballistics," (M. Sc. Thesis), *Aerospace Dept., Amirkabir University*, 1998 (In Persian).
- [3] Amoli, A., and Mirsajedi, S. M., "Simulation of Multigrain and Erosive Burning in SRM According to Generalized Flow," *The Second Applied Conference of Aerospace Industrial Organization*, 2003 (In Persian).
- [4] Amoli, A., and Karimian, S. M. H., "Numerical Simulation of Internal Ballistics of Solid Rocket Motor Based on Unstructured Moving Mesh," *The First Applied Conference of Aerospace Industrial Organization*, 2000 (In Persian).
- [5] Razzaghi, B., "Numerical Simulation of Internal Ballistics of Solid Rocket Motor Based on Moving Mesh," (M. Sc. Thesis), *Aerospace Dept., Maleke Ashtar University*, 2007 (In Persian).
- [6] Barrere, M. and et.al., *Rocket Propulsion*, Amsterdam, Elsevier, 1960.



شکل ۱۳ - مقایسه منحنی فشار-زمان، بدون سوزش فرسایشی روش حاضر و مرجع [۳]



شکل ۱۴ - مقایسه منحنی فشار-زمان، با سوزش فرسایشی روش حاضر و مرجع [۳]