



مدلسازی عددی تغییرات شکل و دمای شعله غیرپیش آمیخته و تولید NO، CO_۲ و CO در حضور میدان مغناطیسی غیریکنواخت

علی سعیدی^{*}، علیرضا جعفری بیناج، جواد خادم

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده:	تأثیر میدان مغناطیسی بر احتراق مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. از آن جایی که تأثیر میدان مغناطیسی بر جریان گاز و فرآیند احتراق از طریق نیروی الکترومغناطیسی حجمی است، نیاز به حل عددی و شبیه‌سازی الکترومغناطیسی میدان جریان برای حصول نحوه توزیع میدان مغناطیسی می‌باشد. پژوهش حاضر به بررسی عددی تغییرات شکل و دمای شعله غیرپیش آمیخته و تولید گونه‌های NO، CO _۲ و CO در حضور میدان مغناطیسی غیریکنواخت می‌پردازد. به این منظور دو دسته معادلات الکترومغناطیسی و مکانیک سیالات، انتقال حرارت و احتراق به صورت یکپارچه حل شده‌است. نتایج نشان می‌دهد نیروی حجمی مغناطیسی وارد بر گونه‌های پارامغناطیس (اکسیژن و هوا) و دیامغناطیس (متان و محصولات احتراق) بر شکل شعله، دمای شعله و انتشار گونه‌ها تأثیر دارد. اعمال میدان مغناطیسی کاهنده باعث باریک و کشیده شدن شکل شعله و افزایش دمای شعله و اعمال میدان مغناطیسی افزایش دما باعث کوتاه شدن و پخش شدن (قارچی شدن) نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی می‌گردد. علاوه بر این با اعمال میدان مغناطیسی بر جریان گاز می‌توان تولید آلاینده‌های CO و NO را تغییر داد به نحوی که در میدان مغناطیسی کاهنده تولید آلاینده NO و CO کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان با اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت شکل و دمای شعله را در کنار تولید آلاینده‌ها کنترل نمود.
تاریخچه داوری:	دریافت: بازنگری: پذیرش: ارائه آنلاین:
کلمات کلیدی:	احتراق میدان مغناطیسی شعله دما آلاینده

۱- مقدمه

گرمایش زمین و انتشار آلاینده‌ها، کنترل فرآیند احتراق را در جهت کاهش تولید گازهای مخرب و افزایش عملکرد جزء بحران‌های مهم بشری قرار داده است. گاز طبیعی به عنوان سوختی پاک با رشد روزافزون مصرف، بیش از ۲۳/۷ درصد تأمین انرژی در جهان را به خود اختصاص داده است [۱]. استفاده از میدان مغناطیسی^۱ در جهت کنترل میدان جریان و سینتیک احتراق با هدف افزایش بازدهی و کاهش انتشار آلاینده‌ها موضوع شناخته شده و در عین حال کمتر مورد توجه قرار گرفته‌ای است [۲].

مایکل فارادی در سال ۱۸۴۷، نخستین بار تأثیر میدان مغناطیسی را بر شعله شمع مشاهده نمود [۳]. وی با نزدیک کردن یک آهنربا به شعله‌ی شمع، انحراف شعله در جهت دور شدن از آهنربا را مشاهده نمود. این تأثیر را می‌توان در شکل ۱ مشاهده نمود.

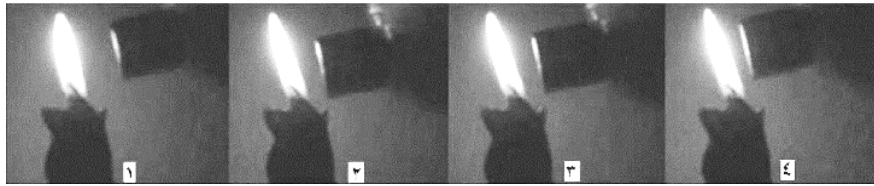
فرار شعله‌ی شمع از آهنربا به دلیل قابلیت‌های متفاوت مغناطیس‌پذیری مواد در میدان مغناطیسی است. بر اساس نحوه‌ی قرارگیری الکترون‌ها، ماده به سه دسته‌ی پارامغناطیس، دیامغناطیس و فرومغناطیس دسته‌بندی می‌شوند.

مولکول ماده پارامغناطیس در وضعیت اورتو^۲ است که عدد کوانتومی فرد یا سطوح انرژی فرد را اشغال می‌نماید. این مواد کاتالیست مناسبی برای بسیاری از واکنش‌ها بوده و جهت اسپین در مولکول‌های آنها اثرات مشخص بر خواص فیزیکی و رفتار مولکولی ماده دارد [۴]. گشتاور ماده‌ی پارامغناطیس در راستای میدان خارجی، باعث جذب ماده‌ی پارامغناطیس به سمت میدان قوی‌تر می‌شود. اکسیژن مهم‌ترین گاز پارامغناطیس موجود در هوا است. گازهای حاصل از احتراق شامل مونواکسید کربن، دی‌اکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن و بخار آب خاصیت دیامغناطیسی دارند. مواد دیامغناطیس توسط هر دو قطب آهن‌ربا دفع شده و به سمت میدان ضعیف‌تر حرکت می‌کنند. مواد فرومغناطیس با ایجاد گشتاور مغناطیسی موازی در اثر برهم‌کنش تبدلی، باعث القای خاصیت آهن‌ربایی در حضور میدان مغناطیسی می‌شوند. در جدول ۱ قابلیت مغناطیس‌شوندگی چند گونه مهم احتراق متان-هوا آورده شده است. در این میان مشاهده می‌گردد که اکسیژن دارای قابلیت مغناطیس‌شوندگی بالایی می‌باشد که به همین واسطه هوا هم دارای قابلیت بالایی از مغناطیس‌شوندگی است.

در بین گونه‌های تولید شده در احتراق متان-هوا، تنها دو دسته دیامغناطیس و پارامغناطیس وجود دارد که نیروی مغناطیسی حجمی وارد شده بر اکسیژن به عنوان ماده پارامغناطیس نسبت به سایر گونه‌ها بسیار

1 Magnetic field

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ali.saeedi@birjand.ac.ir



شکل ۱: انحراف شعله با نزدیک کردن آهن ربا

جدول ۱: قابلیت مغناطیسی شونددگی چند گونه گاز در شرایط استاندارد

نوع گاز	قابلیت مغناطیسی شونددگی X_i (m ² /kg)
CH ₄	-۹/۶×۱۰ ^{-۹}
O ₂	+۱/۴×۱۰ ^{-۶}
Air	+۰/۳×۱۰ ^{-۶}
H ₂ O	-۹/۱×۱۰ ^{-۹}
CO	-۴/۴×۱۰ ^{-۹}
CO ₂	-۶×۱۰ ^{-۹}

بزرگتر است، به نحوی که نقش اساسی در تعیین رفتار هوا در میدان مغناطیسی را دارد [۵].

یوانو^۱ و هاراد^۲ [۶]، بصورت آزمایشگاهی احتراق الکل در حضور کاتالیست با میدان مغناطیسی به اندازه ۱/۴-۰/۵ تسلا و گرادیان T/m ۲۰-۲۰۰ را بررسی نموده و افزایش دمای ۱۰۰-۲۰۰ °C را مشاهده نمودند.

یوانو [۷] دور شدن شعله از میدان و خاموشی شعله‌ی شمع بعد از اعمال میدان مغناطیسی افزایش یافته را به صورت آزمایشگاهی مشاهده نمود. او از یک آهن‌ربای الکتریکی با قطب‌های استوانه‌ای استفاده کرد و شمع را در قسمت پایینی قطب‌ها که میدان افزایش یافته است، قرار داد. بزرگی میدان ۱/۵ تسلا و گرادیان آن ۵۰-۳۰۰ تسلا بر متر در راستای عمود بر محور قطب‌ها بود. با اعمال میدان به شعله‌ی شمع، شعله در مدت کوتاهی از میدان دفع شده و حتی خاموش شد. او برای این مشاهده از اصطلاحات دیوار اکسیژن یا پرده مغناطیسی^۳، که به معنای قطبی شدن هوای بین دو قطب آهن‌ربا و ایجاد مانع برای حرکت گازها از میان قطب‌های آهن‌ربا است، استفاده کرد.

اؤکی^۴ [۸] آزمایشاتی با شعله نفوذی گاز بوتان را در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت انجام داد و تغییراتی در افزایش انتشار رادیکال‌های CH، OH، C₂ و دمای شعله مشاهده نمود.

واکایاما^۵ [۹] تأثیر گرادیان میدان مغناطیسی غیریکنواخت بر احتراق

متان در هوا را مورد بررسی قرار داد. هنگامی که سوخت در مسیر یک میدان مغناطیسی کاهنده جریان می‌یابد، احتراق تحت تأثیر قرار گرفته و تحریک شده و کاهش ارتفاع شعله و افزایش دمای آن را مشاهده کرد.

واکایاما [۱۰] برای تحقیقات در حوزه‌ی تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر جریان گاز از اصطلاح آیرودینامیک مغناطیسی^۶ استفاده کرد. تغییرات القا شده توسط میدان مغناطیسی در سرعت گاز اکسیژن وابسته به علامت گرادیان میدان مغناطیسی است. زمانی که گاز اکسیژن در مسیر یک میدان افزایش یافته جریان یابد سرعت آن اضافه شده و با حرکت در یک میدان کاهنده سرعت آن کم می‌شود.

فوجیتا^۷ و همکاران [۱۱] تأثیر میدان مغناطیسی بر شعله‌ی نفوذی آرام در محیطی با شرایط بی‌وزنی را بررسی کردند. در شرایط گرانش معمولی اثرات شناوری غالب هستند اما در شرایط بی‌وزنی که شناوری وجود ندارد، اثرات میدان مغناطیسی بسیار مشهودتر، خصوصاً برای میدان‌های ضعیف، خواهد بود. آن‌ها پایداری یک شعله در شرایط بی‌وزنی را بر اساس عدد بی بعد گراشوف متناظر برای نیروی اعمال شده از طریق میدان بررسی و حدی از این عدد را به عنوان معیاری برای پایدار ماندن شعله گزارش نمودند.

بیکر و سایتو^۸ [۱۲] تأثیر یک میدان مغناطیسی یکنواخت بر خصوصیات تعادلی احتراق را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در یک محدوده مشخص دمایی یک میدان مغناطیسی کسر مولی محصولات اصلی را کاهش می‌دهد و کسر مولی محصولات فرعی را افزایش می‌دهد. همچنین کسر مولی تعادلی NO با افزایش القای مغناطیسی از ۰ تا ۰/۰۴ تسلا ناگهان کاهش می‌یابد.

بیکر و کالورت^۹ [۱۳] مطالعه‌ی آزمایشگاهی شعله‌ی نفوذی آرام در حضور یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت را انجام دادند. آن‌ها در یک میدان کاهنده کاهش ارتفاع شعله را مشاهده نمودند.

کینوشیتا^{۱۰} و همکاران [۱۴] شعله نفوذی آرام هیدروژن را در حضور میدان مغناطیسی به صورت عددی مدل کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، با اعمال میدان مغناطیسی، جابجایی در اطراف شعله تحریک و تشدید می‌شود. همچنین شعله با حضور میدان مغناطیسی در شرایط بی‌وزنی، همانند شعله

6 Magnetic Aerodynamics
7 Fujita
8 Baker and K. Saito
9 Baker and M. E. Calvert
10 Kinoshita

1 Ueno
2 Harad
3 Magnetic Curtain
4 Aoki
5 Wakayama

مغناطیسی غیر یکنواخت می‌پردازد. به این منظور شبیه‌سازی عددی شعله پخشی آرام متان-هوا در حضور میدان مغناطیسی غیریکنواخت انجام شده و تغییراتی که در مشخصات هندسی شعله، دما و نرخ تولید آلاینده‌ها ایجاد می‌گردد، مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- معادلات حاکم

در این تحقیق به منظور تحلیل جریان احتراق از معادلات پیوستگی، اندازه‌ی حرکت و بقای انرژی و معادله‌ی غلظت گونه‌ها استفاده گردیده است که اثر میدان مغناطیسی به شکل یک نیروی حجمی به معادله‌ی مومنتوم اضافه گردیده که در ادامه به تشریح معادلات میدان جریان و میدان مغناطیسی پرداخته شده است.

۲-۱- معادلات جریان و انرژی

در حالیکه متغیر وابسته به وسیله Φ نشان داده شود، معادله دیفرانسیل کلی به شکل رابطه‌ی زیر می‌باشد [۲۲]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho u\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S \quad (1)$$

که در رابطه‌ی (۱)، Γ ضریب پخش و S جمله چشمه می‌باشد. کمیت‌های Γ و S به معنای خاص به کار برده شده برای Φ ، بستگی دارند. معادله‌ی پیوستگی:

$$\text{div}(\rho u) = 0 \quad (2)$$

معادله‌ی مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial y}(\rho u\Phi) + \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x}(x\rho v\Phi) = \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial y}\right) + \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x}\left(x\Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + S_\Phi \quad (3)$$

ρ نشان دهنده‌ی چگالی و Φ در معادله‌ی مومنتوم بیانگر سرعت، جمله‌ی چشمه‌ی شامل ترم‌های دیگر غیر از ترم جابجایی و ترم هدایت می‌شود. روابط (۴) و (۵) به ترتیب نشان‌دهنده‌ی در دو جهت y و x می‌باشد.

$$S_\Phi = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\mu}{x} \frac{\partial v}{\partial y} - \quad (4)$$

$$\frac{2}{3}\left[\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{v}{x}\right)\right] + F_b + F_y$$

$$S_\Phi = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\mu}{x} \frac{\partial v}{\partial x} - 2\mu \frac{v}{x} \quad (5)$$

$$-\frac{2}{3}\left[\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{v}{x}\right)\right] + F_x$$

μ نشان دهنده‌ی لزجت می‌باشد. رابطه‌ی (۶) بیانگر نیروی شناوری می‌باشد که به عنوان جمله‌ای در رابطه‌ی (۴) بکار رفته است.

$$F_b = (\rho_f - \rho_{air})g \quad (6)$$

در شرایط معمولی بدون میدان مغناطیسی پایدار می‌ماند.

شینودا^۱ و همکاران [۱۵] توزیع رادیکال OH در یک شعله‌ی پیش‌آمیخته‌ی متان-هوا تحت تأثیر اعمال میدان مغناطیسی را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد، تأثیر میدان بر رادیکال OH در محیط گاز نیتروژن به مراتب کمتر از محیط هوا می‌باشد.

گیلارد^۲ و همکاران [۱۶] اثر میدان مغناطیسی بر بلند شدن شعله نفوذی گاز متان را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که کاهش در میزان بلند شدن شعله بسیار وابسته به حضور یک گرادیان مغناطیسی قوی است. هر چه گرادیان قوی‌تر باشد، علاوه بر این که می‌توان بلند شدن شعله را کاهش داد، جریان سوخت را نیز بیش‌تر می‌نماید.

گیلون^۳ و همکاران [۱۷] بلند شدن شعله‌ی آرام نفوذی متان-هوا را برای محدوده‌ی گسترده‌ای از سرعت‌های متان و هوا بررسی نمودند. تغییر در میزان بلند شدن شعله با اعمال میدان کاملاً مشهود بود.

آگروال^۴ و همکاران [۱۸] تأثیر میدان مغناطیسی روی دما و پروفیل دمای شعله‌ی نفوذی را توسط تداخل سنج تالپوت^۵ بررسی کردند. این بررسی در میدان مغناطیسی همگن، میدان مغناطیسی گرادیانی به سمت بالا افزایش یافته و کاهنده انجام گرفته و مشاهدات ثبت شده نشان داد که دمای شعله تحت تأثیر میدان مغناطیسی گرادیانی به سمت بالا کاهنده، افزایش یافته است ولی تحت تأثیر میدان مغناطیسی گرادیانی به سمت بالا افزایش یافته است می‌یابد. و همچنین مشاهده شد که تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت قابل چشم‌پوشی و ناچیز است.

طبق بررسی پیشینه تحقیقات انجام شده به طور کلی اثر میدان مغناطیسی بر احتراق غیرپیش‌آمیخته مثبت ارزیابی گردیده و می‌توان از کاربردهای آن به نرخ اختلاط بهتر سوخت و هوا و نزدیک شدن احتراق به یک واکنش کامل و در نتیجه کاهش آلاینده‌ها و بهتر سوختن اشاره نمود. از طرفی با کنترل نیروی حجمی الکترومغناطیسی وارد بر جریان گاز می‌توان با میدان مغناطیسی اعمالی به فرآیند احتراق پروفیل هندسه شعله، دمای بیشینه‌ی شعله و محل آن را نیز تنظیم نمود. بررسی کم هزینه جوانب کمتر شناخته شده فرآیند احتراق غیر پیش‌آمیخته در حضور میدان مغناطیسی غیریکنواخت مستلزم شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی مجموعه معادلات مکانیک سیالات، واکنش‌های شیمیایی و بقاء گونه‌ها و معادلات الکترومغناطیس است. این معادلات به طور پیچیده و تأثیرگذاری به هم وابسته هستند که تغییر رفتار آیرودینامیک جریان گاز در اثر نیروی حجمی الکترومغناطیسی، تغییر اختلاط سوخت و هوا و حتی تغییرات در تعادل انرژی آزاد گیسب بخشی از اثرات متقابل جریان گاز، میدان مغناطیسی و احتراق است. از این رو پژوهش حاضر به بررسی عددی شعله آرام غیر پیش‌آمیخته‌ی متان در حضور میدان

- 1 Shinoda
- 2 Gilard
- 3 Gilon
- 4 Agarwal
- 5 Talbot interferometer

در رابطه‌ی (۱۵)، مغناطیس‌پذیری حجمی مواد، ثابت کوری، چگالی و نشان دهنده‌ی دما می‌باشد. نیروی حجمی کلین، در داخل یک سیال به صورت رابطه‌ی زیر بیان می‌شود.

$$F_{mag} = \mu_0 M \nabla H \quad (16)$$

نفوذ پذیری مغناطیسی خلاء، مغناطیس‌کنندگی سیال و قدرت میدان مغناطیسی را در رابطه‌ی (۱۶) نشان می‌دهد. مغناطیس‌کنندگی مواد متناسب با قدرت میدان مغناطیسی است و بصورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$M = XH \quad (17)$$

حال به تعریف چگالی شار مغناطیسی که یک پارامتر مؤثر در نیروی میدان مغناطیسی می‌باشد، پرداخته می‌شود که روابط زیر ارتباط آن با مغناطیس‌کنندگی مواد را نشان می‌دهد.

$$\vec{B} = \mu_0 (M + H) = \mu_0 (1 + X) H \quad (18)$$

برای مواد پارامغناطیس و دیامغناطیس، نیروی کلین با توجه به روابطی که بیان گردید به شکل کلی رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$F_{mag} = \frac{X}{\mu_0 (X + 1)} \vec{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{X + 1} \vec{B} \right) \quad (19)$$

مغناطیس‌پذیری حجمی برای گازهای دیامغناطیس در حدود $X \cong -10^{-9}$ و برای گازهای پارامغناطیس در حدود $X \cong 10^{-6}$ می‌باشد. لذا ساده شده و شکل رابطه‌ی زیر می‌باشد:

$$F_{mag} = \frac{X}{\mu_0} \vec{B} \cdot \nabla \vec{B} \quad (20)$$

۳- هندسه‌ی مسئله

هندسه مورد نظر توسط ابزاری که در این فوم^۱ به نام بلاک مش^۲ وجود دارد، ایجاد گردیده است که دارای مشی ناهمگن بوده و در شکل ۲ نمای کلی از فضای حل، قابل مشاهده می‌باشد. دو آهن‌ربایی^۳ که در دو طرف شعله^۴ قرار گرفته است مطابق شکل ۳، تولید میدان مغناطیسی گرادیانی می‌کند. در نیمه‌ی پایینی آهن‌ربا یعنی از محدوده‌ی ۰/۵ تا ۰/۱ محور Y شکل ۵ میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد و نیمه بالایی آهن‌ربا شروع و تا مقدار بیشینه‌ی میدان افزایش می‌یابد و نیمه بالایی آهن‌ربا یعنی از محدوده‌ی ۰/۱ تا ۰/۱۵ محور Y شکل ۳ میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد (شدت میدان از بیش‌ترین مقدار شروع و تا کمترین مقدار کاهش می‌یابد) دارد. شکل ۳ توزیع میدان مغناطیسی و گرادیان آن را نشان می‌دهد. در شکل ۵-الف دو چگالی شار الکتریکی به اندازه‌های A/m^2 ۱۰۱۵۰۰ و A/m^2 ۳۰۱۵۰۰ باعث تولید مقادیر بیشینه‌ی میدان ۰/۸ تسلا و ۲/۴ تسلا شده‌اند. شکل ۳-ب توزیع گرادیان متناظر با دو میدان رسم شده در قسمت

چگالی گازهای داغ شعله و چگالی محیط هوا بر حسب kg/m^3 می‌باشد و همچنین دو جمله‌ی و به ترتیب نیروی میدان مغناطیسی در جهت محوری و در جهت شعاعی را نشان می‌دهد که در ادامه به آن‌ها به شکل ویژه پرداخته شده است.

معادله‌ی انرژی:

$$\rho \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{k}{C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{C_p} \sum_{i=1}^N h_i w_i + \frac{1}{C_p} \rho \sum_{i=1}^N Y_i f_i V_i \quad (7)$$

معادله‌ی غلظت گونه‌ها:

$$\rho \left(u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + w \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) = \rho D_i \left(\frac{\partial^2 Y_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y_i}{\partial y^2} \right) + \omega_i \quad (8)$$

معادله‌ی حالت:

$$p = \rho R T \sum_{i=1}^N \frac{Y_i}{M_i} \quad (9)$$

۲-۲ معادلات مربوط به میدان و نیروی مغناطیسی

برای مدل‌سازی میدان مغناطیسی از معادلات ماکسول بهره برده شده است. روابط (۱۰) و (۱۱) بیان‌کننده‌ی میدان الکترومغناطیس به وسیله‌ی معادلات ماکسول است [۲۱].

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (10)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \quad (11)$$

$$\nabla \cdot J = \rho \quad (12)$$

که B میدان مغناطیسی بر حسب تسلا (T)، H میدان القایی برای میدان مغناطیسی و J چگالی جریان الکتریکی (A/m^2) می‌باشد. همچنین برای H داریم:

$$H = \frac{1}{\mu} B \quad (13)$$

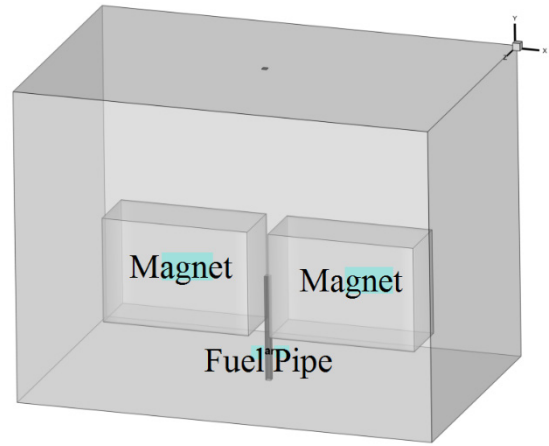
که μ قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی است. چگالی جریان (J) توسط رابطه‌ی (۱۴) بیان می‌شود:

$$\vec{J} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{B} \quad (14)$$

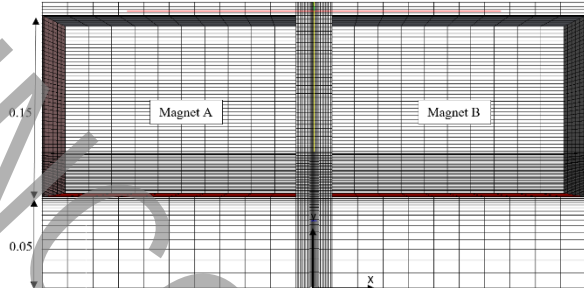
میدان روی مواد پارامغناطیس و دیامغناطیس به عنوان یک نیروی حجمی عمل می‌کند و این نیروی حجمی به عنوان نیروی کلین شناخته می‌شود. نیروهای حجمی کلین، به وسیله بر هم کنش‌های گرادیانی میدان مغناطیسی محلی با گشتاور دو قطبی مولکولی مغناطیس، القا می‌شوند. که متناسب با مغناطیس‌پذیری حجمی مواد است، و توسط قانون کوری بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$X = c \frac{\rho}{T} \quad (15)$$

- 1 OpenFOAM
- 2 BlockMesh
- 3 Magnet
- 4 Burner

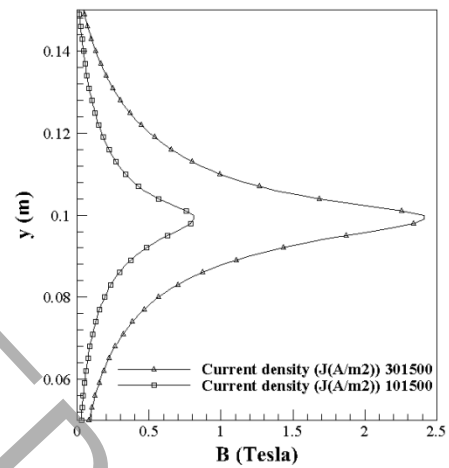


الف

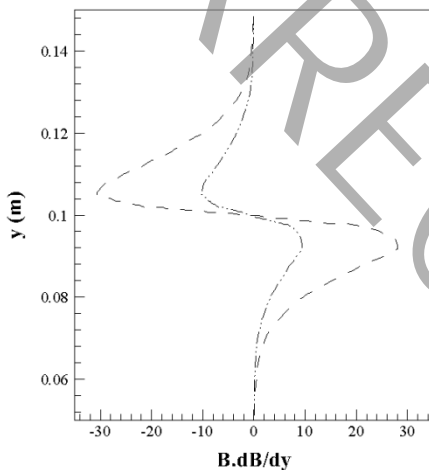


ب

شکل ۲: هندسه‌ی مورد مطالعه در تحقیق حاضر (الف) و نمایی برش خورده از مش‌بندی شبکه در حالت سه‌بعدی (ب)



الف



ب

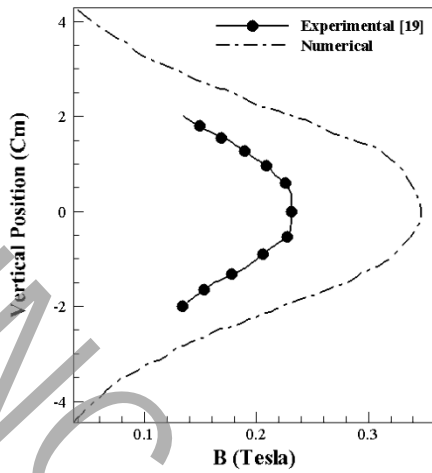
شکل ۳: توزیع میدان مغناطیسی شبیه‌سازی شده در اطراف شعله (الف) و توزیع گرادیان میدان مغناطیسی (ب)

عددی حجم محدود برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استفاده می‌کند که در آن به هر شبکه‌بندی غیرسازمان یافته‌ی سه‌بعدی، سلول‌های چند وجهی نسبت داده می‌شود. در تحقیق حاضر شعله در موقعیت‌های مختلف میدان مغناطیسی گرادیانی افزایشده و کاهشده مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی مساله حاضر از کوپل دو حل‌گر استفاده شده است که یک حل‌گر میدان مغناطیسی در فضای حل را ایجاد و مقادیر شدت میدان و گرادیان آن را به عنوان خروجی می‌دهد. این حل‌گر با توجه به نبودن حل‌گری آماده در این فوم توسط نویسندگان ایجاد و به فایلی اجرایی تبدیل گردیده است. در گام بعدی نتایج حاصله به شکل نیروی میدان مغناطیسی به عنوان جمله‌ی چشمه به معادله‌ی مومنتوم اضافه گردیده است، که اساس

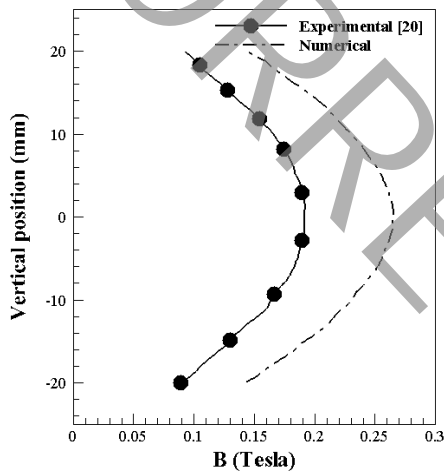
الف را نشان می‌دهد. همانطور که بیان گردید بزرگی نیروی حجمی وارد بر گونه‌های پارامغناطیس و دیامغناطیس به گرادیان میدان مغناطیسی وابسته است و با توجه به محل قرارگیری شعله در این توزیع گرادیان تحت تاثیرات متفاوتی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه از روش حجم محدود برای حل جریان استفاده می‌گردد در بررسی استقلال از مش به تعداد مش ۵۲۳۷۵۰ و استقلال از گام زمانی به $10^{-6} \Delta t$ رسیده است.

۴- روش حل

در این تحقیق از دو حل‌گر نرم‌افزار این‌فوم، که نرم‌افزاری کد باز به زبان C++ می‌باشد، به‌طور مجزا استفاده گردیده است. نرم‌افزار این‌فوم از روش



شکل ۶: توزیع میدان مغناطیسی گنزالز [۱۹]

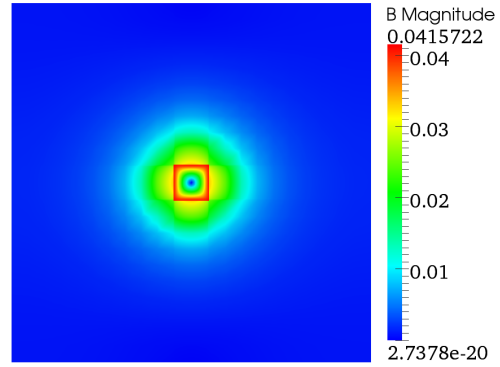


شکل ۷: توزیع میدان مغناطیسی سوماتهی [۲۰]

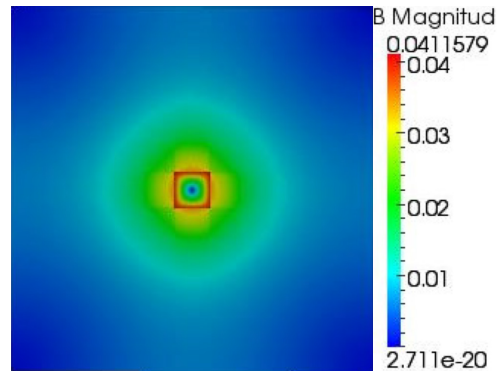
۵- اعتبارسنجی

۵-۱- مدل سازی میدان مغناطیسی

در بحث اعتبارسنجی تولید میدان مغناطیسی به دلیل امکان پذیر بودن شبیه سازی مشابه تحقیقات و اطلاعات موجود، هندسه و شرایط چگالی جریان دقیقاً پیاده سازی گردید که نتایج کانتور توزیع میدان مغناطیسی دقیقاً مشابه نتایج هوانگ [۲۱] بدست آمد. نتایج این شبیه سازی و اعتبارسنجی آن شکل های ۴ و ۵ ارائه شده است. شکل های ۶ و ۷ مقایسه توزیع میدان آزمایشگاهی گنزالز [۱۹] و سوماتهی [۲۰] و شبیه سازی همان شرایط در کد مورد بررسی را نشان می دهد. مشاهده می شود که روند نمودارهای پاسخ شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی یکسان و نتایج توافق قابل قبولی دارند.



شکل ۴: تولید میدان مغناطیسی شبیه سازی شده کار حاضر

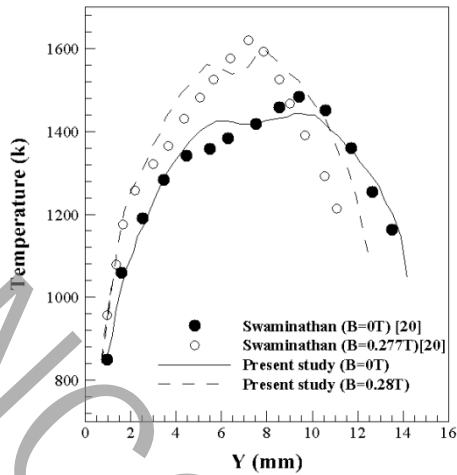


شکل ۵: تولید میدان مغناطیسی توسط هوانگ [۲۱]

حل احتراق، حل گر احتراقی^۱ می باشد. حل گر یاد شده از روش حجم محدود برای حل عددی استفاده می کند. به سبب گذرا بودن احتراق از الگوریتم پیمپل^۲ برای تصحیح جفت شدگی سرعت و فشار استفاده گردیده است. حل گر احتراقی که در نظر گرفته شده، حل گری برای شبیه سازی جریان های احتراقی تراکم پذیر آشفته (یا آرام) به همراه مکانیزم های شیمیایی چند مرحله ای است. اساس استفاده ای این حل گر بیش تر معطوف به جریان های غیرپیش آمیخته است اما استفاده از آن برای جریان های پیش آمیخته نیز ممکن است. همچنین حل گر مغناطیسی که توسط نویسندگان این تحقیق برنامه نویسی شده است بر اساس یک معادله لاپلاسین بوده که میدان مغناطیسی را با استفاده از شار چگالی مغناطیسی تولید می کند. سیستم مورد استفاده برای اجرای محاسبات عددی شبیه سازی شده دارای پردازنده ای^۳ با قدرت ۴۸ GHz و رم^۴ با مقدار ۲۵۶ GB می باشد. زمان تقریبی هر حل ۷۲ تا ۱۶۸ ساعت معادل ۳ تا ۷ روز بوده است.

- 1 ReactingFoam
- 2 Pimple
- 3 CPU
- 4 RAM

- 5 Zhe Huang
- 6 Diego F. Gonzalez
- 7 Sumathi Swaminathan



شکل ۱۰: مقایسه‌ی توزیع دمای C_2H_2 در حالت حضور میدان مغناطیسی و بدون حضور میدان در تحقیق حاضر و سوماتهی [۲۰]

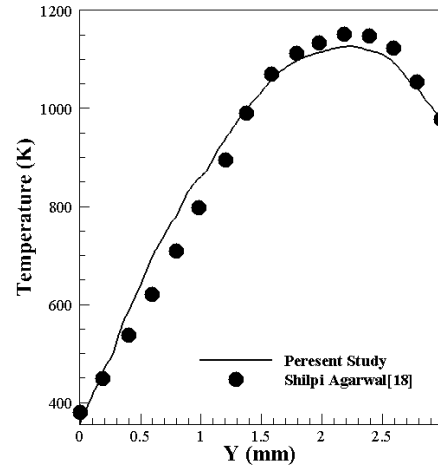
گرفت که نتایج دمایی تحقیق حاضر که معیار خوبی برای انطباق است برای گاز پروپان در شکل ۱۰ مقایسه گردیده است که نتایج مقایسه از توافق خوبی برخوردار می‌باشد.

۶- تحلیل و بررسی نتایج

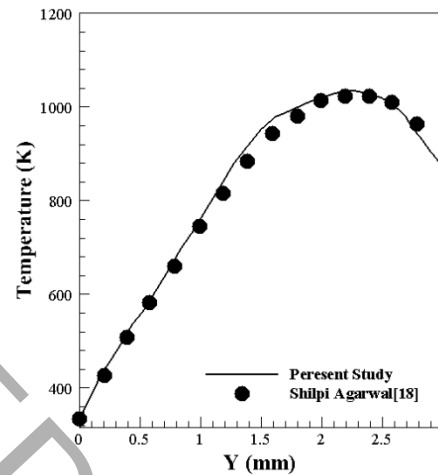
۶-۱- اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت روی شکل شعله

در تحقیق حاضر، شعله میان دو قطب آهن‌ربا و تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار داده شده است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر تأثیر میدان مغناطیسی بر شکل و خصوصیات دیگری از شعله است.

شکل ۱۱ کانتور دمایی شعله‌ی متان خروجی از لوله‌ای به مساحت $25 \times 10^{-6} m^2$ در سه حالت مختلف را نشان می‌دهد. حالت الف، پروپیل شعله بدون حضور میدان مغناطیسی و حالت ب، شعله با حضور میدان مغناطیسی افزاینده و حالت پ، با حضور میدان مغناطیسی کاهنده است. همانطور که بیان گردید هوا به واسطه‌ی اکسیژن پارامغناطیس و متان و محصولات احتراق خاصیت دیامغناطیسی دارند. هوا به واسطه‌ی اکسیژن موجود در آن به سمت میدان قوی‌تر جذب شده و محصولات احتراق به سمت میدان ضعیف‌تر دفع می‌شوند. بر این اساس همانطور که در شکل ۱۱ قسمت ب مشاهده می‌شود، شعله قرار گرفته در میدان افزاینده به حالت قارچی شکل در می‌آید. به واسطه جذب اکسیژن به ناحیه شعله توسط میدان مغناطیسی نرخ اختلاط سوخت و هوا تحریک شده و از طرفی محصولات احتراق از میدان قوی به سمت میدان ضعیف دفع می‌شوند. این شکل کاملاً دفع محصولات احتراق به سمت میدان ضعیف‌تر را نشان می‌دهد که به صورت گسترش رو به پایین شعله مشخص شده است. از طرفی قرار گرفتن شعله در میدان کاهنده در کنار جذب اکسیژن به ناحیه اختلاط، دفع



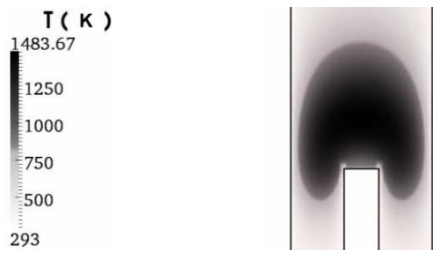
شکل ۸: مقایسه‌ی توزیع دمای C_2H_2 در حالت حضور میدان مغناطیسی کاهنده در تحقیق حاضر و آگروال [۱۸]



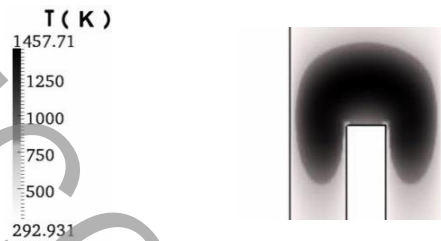
شکل ۹: مقایسه‌ی توزیع دمای C_2H_2 در حالت بدون میدان مغناطیسی در تحقیق حاضر و آگروال [۱۸]

۵-۲- میدان جریان با احتراق

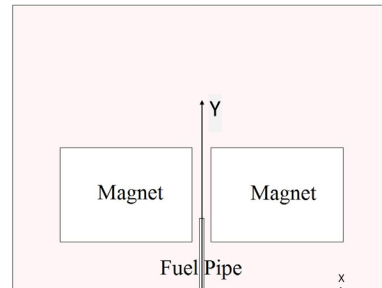
شکل‌های ۸ و ۹ اعتبارسنجی را برای جریان احتراق گاز بوتان در حضور میدان مغناطیسی غیر یکنواخت نشان می‌دهد که با نتایج آگروال [۱۸] مقایسه گردیده است. با توجه به اینکه تحقیقات آگروال به این تحقیق حاضر نزدیکتر بود و اطلاعات کامل‌تری جهت مدل‌سازی و اعتبارسنجی وجود داشت بنابراین درستی نتایج و روند کار برای گاز بوتان با توجه به تحقیق آگروال انجام شده است. همانطور که شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند دمای شبیه‌سازی شده شعله آرام گاز بوتان در راستای عمودی (محور Y) با داده‌های آزمایشگاهی در توافق خوبی قرار دارند. با توجه به تحقیقات سوماتهی [۲۰] شرایط مسئله فراهم و برای گاز پروپان جهت اعتبارسنجی مورد بررسی قرار



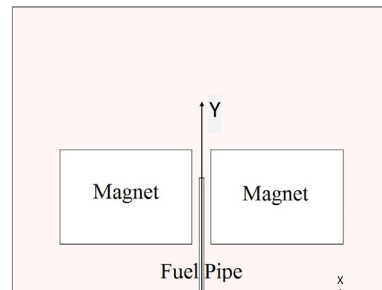
الف



ب



پ



شکل ۱۱: کانتور دمایی شعله‌ی متان بدون حضور میدان مغناطیسی (الف) و با حضور میدان مغناطیسی (ب و پ) با شدت ۰/۱ تسلا

میدان یکنواخت بخش مرکزی قطب‌های آهنربا، بزرگ شدن گرادیان میدان باعث جمع‌تر و کوچک‌تر شدن شعله می‌گردد. این رفتار نتیجه جذب بیشتر اکسیژن به ناحیه احتراق و دفع بیشتر محصولات احتراق است. شکل ۱۴ و ۱۵ تغییر ارتفاع و پهنای شعله آرام متان-هوا را در میدان‌های مغناطیسی افزایشدهنده و کاهشدهنده نشان می‌دهند. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که ارتفاع شعله در میدان مغناطیسی افزایشدهنده کاهش یافته و در میدان مغناطیسی کاهشدهنده افزایش می‌یابد. با توجه به نقش ∇B^2 در نیروی مغناطیسی حجمی

محصولات احتراق در جهت نیروی شناوری توسط میدان مغناطیسی را به همراه دارد. این پدیده باعث کشیده شدن شعله به سمت بالا و جمع‌تر شدن آن می‌گردد. این رفتار شعله در میدان کاهشدهنده را می‌توان در شکل ۱۱ قسمت پ مشاهده نمود.

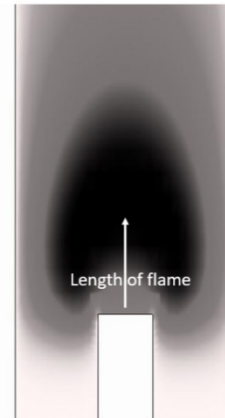
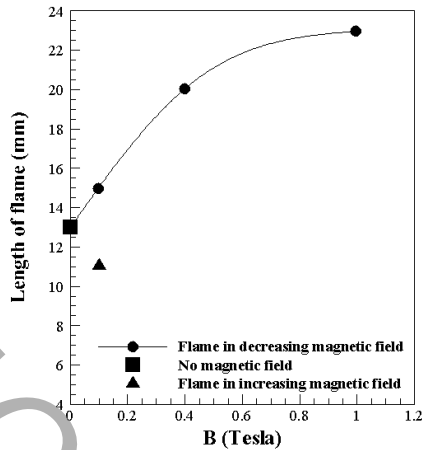
به جهت بررسی بیشتر رفتار شعله در میدان کاهشدهنده، اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت بر شعله در دو اندازه شدت میدان ۰/۴ و ۱ تسلا در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش شدت



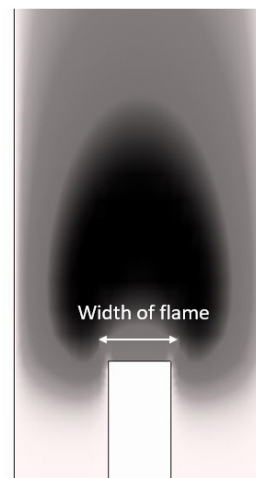
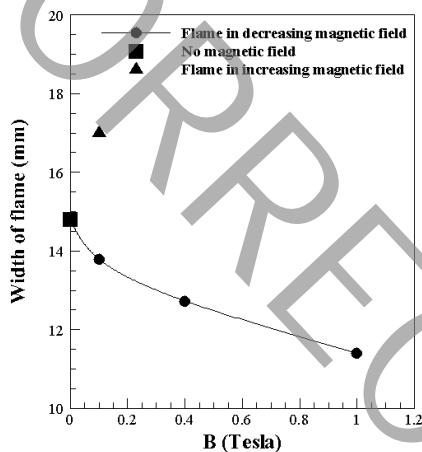
شکل ۱۳: شکل شعله‌ی متان با حضور میدان مغناطیسی کاهشدهنده (شدت میدان $B=1$ T)



شکل ۱۲: شکل شعله‌ی متان با حضور میدان مغناطیسی کاهشدهنده (شدت میدان $B=0.4$ T)



شکل ۱۴: تغییرات طول شعله در حضور میدان مغناطیسی افزایشی و کاهنده در مقایسه با حالت بدون حضور میدان مغناطیسی



شکل ۱۵: تغییرات پهنای شعله در حضور میدان مغناطیسی افزایشی و کاهنده در مقایسه با حالت بدون حضور میدان مغناطیسی

اثر گذار باشد. البته با توجه به نوع میدان مغناطیسی که شعله در آن قرار گرفته است این دما می‌تواند نسبت به عدم حضور میدان مغناطیسی در اطراف شعله افزایش یا کاهش داشته باشد. با بررسی شعله در حضور میدان مغناطیسی غیر یکنواخت همانطور که شکل ۱۶ نشان می‌دهد، دمای بیشینه‌ی شعله در حضور میدان مغناطیسی کاهنده نسبت به حالتی که میدانی بر آن اعمال نشده است، افزایش یافته در حالی که اعمال میدان مغناطیسی افزایشی منجر به کاهش دمای بیشینه‌ی شعله شده است.

برای بررسی بیشتر اثر میدان کاهنده بر پروفیل دمای شعله شکل ۱۷ توزیع دما در حالت بدون میدان را با دو میدان کاهنده مقایسه نموده است. این شکل نشان می‌دهد که با بزرگ شدن گرادیان میدان کاهنده (متناظر با بزرگ شدن شدت میدان در ناحیه یکنواخت) افزایش دمای بیشتری در شعله مشاهده می‌شود.

شکل ۱۸ پروفیل توزیع دمای شعله در راستای عمودی را نشان می‌دهند. همانطور که در شکل ۱۸ نشان داده شده، اعمال میدان مغناطیسی کاهنده علاوه بر بالا بردن حداکثر دمای شعله میانگین دمای شعله در راستای

که بر گونه‌های پارامغناطیس و دیامغناطیس وارد می‌شود (معادله ۲۰)، این رفتار شعله را می‌توان توصیف نمود. در میدان افزایشی جهت نیروی شناوری و میدان وارد بر گونه‌های دیامغناطیس خلاف همدیگر است که غلبه نیروی حجمی مغناطیسی بر شناوری باعث پهن و کوتاه شدن شعله می‌گردد. همچنین بایستی به نقش تاثیرگذار جذب اکسیژن توسط میدان به ناحیه اختلاط سوخت و هوا توجه داشت.

شکل ۱۵ عرض (پهنای) شعله را در میدان افزایشی و کاهنده نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که اثر همزمان نیروی حجمی مغناطیسی و شناوری در میدان مغناطیسی افزایشی باعث افزایش عرض شعله و به عبارتی قارچی شکل شدن شعله می‌شود، و برای میدان کاهنده شعله جمع‌تر و عرض آن کم خواهد شد

۶-۲- اثر میدان مغناطیسی بر دمای شعله

میدان مغناطیسی به واسطه‌ی پارامغناطیس بودن اکسیژن موجود در هوا بر اختلاط بین سوخت و هوا تأثیر گذاشته و می‌تواند بر دمای شعله نیز

لا را نیز نسبت به حالت اعمال میدان افزایشده و بدون میدان مغناطیسی بیشتر نموده است. همچنین این شکل رفتار شکل شعله در میدان مغناطیسی و بدون میدان را تأیید می‌نماید، به نحوی که اعمال میدان کاهنده شعله را جمع‌تر و کشیده‌تر می‌نماید و همچنین مکان دمای بیشینه شعله نیز به بالاتر نسبت به حالت بدون اعمال میدان یا میدان افزایشده انتقال یافته است.

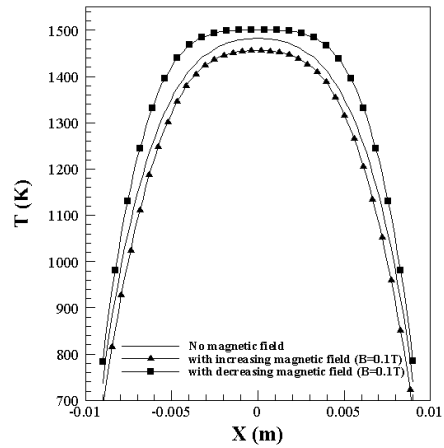
۳-۶- اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت بر تولید CO_p و آلاینده‌های CO و NO

همانطور که نشان داده شد، مشخصات فیزیکی شعله و دمای آن از میدان مغناطیسی، گرادیان آن و افزایشده یا کاهنده بودن میدان تأثیر می‌پذیرد. بنابراین محصولات احتراق نیز در اثر میدان مغناطیسی می‌تواند دستخوش تغییر قرار گیرد. از این رو در ادامه بررسی اثر میدان مغناطیسی بر تولید CO_p و آلاینده‌های NO و CO مورد توجه خواهد بود.

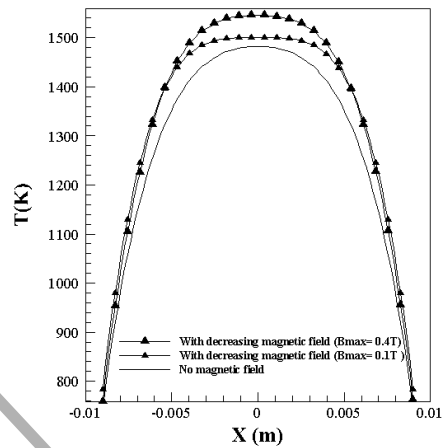
شکل ۱۹ اثر میدان مغناطیسی کاهنده با اندازه حداکثر میدان ۰/۱ و ۰/۴ تسلا را بر تولید دی‌اکسید کربن نشان می‌دهد. بر این اساس میدان مغناطیسی پروفیل تولید CO_p را یکنواخت‌تر نموده و میانگین حجمی تولید را ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌دهد. در میدان مغناطیسی با شدت ۰/۱ تسلا میانگین تولید CO_p نسبت به حالت بدون میدان افزایش می‌یابد. در حالی که برای میدان مغناطیسی ۰/۴ تسلا این میانگین و همچنین بیشینه تولید CO_p کاهش خواهد یافت. بارمینا و زیگ [۲۳] نیز اثر میدان مغناطیسی بر تولید CO_p را مشابه همین نتایج گزارش نمودند. شکل ۲۰ اثر میدان مغناطیسی بر تولید CO_p در تحقیق بارمینا را نشان می‌دهد. نتایج ایشان حاکی بود که افزایش میدان تا حدود ۰/۰۶ تسلا تولید CO_p را افزایش و در ادامه روند کاهش را دنبال کرده است.

شکل ۲۱ نشان دهنده تأثیر میدان مغناطیسی غیریکنواخت بر کسر جرمی گونه‌ی CO می‌باشد. در این شکل مشاهده می‌گردد که تأثیر میدان مغناطیسی غیریکنواخت افزایشده بر تولید آلاینده‌ی CO ناچیز بوده است و تقریباً همان میزان تولید CO را داشته است. در صورتیکه در این شکل تأثیر مثبت میدان مغناطیسی غیریکنواخت کاهنده بر تولید گونه‌ی CO کاملاً مشهود می‌باشد. همانطور که در شکل دیده می‌شود میدان مغناطیسی گرادینانی کاهنده باعث کاهش تولید آلاینده‌ی CO شده است که در همین شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی غیریکنواخت تولید آن کاهش بیشتری می‌یابد. شکل ۲۲ نشانگر توزیع کسر جرمی NO در حالت بدون میدان مغناطیسی و با میدان مغناطیسی غیریکنواخت کاهنده می‌باشد و کاهش تولید این آلاینده را نشان می‌دهد.

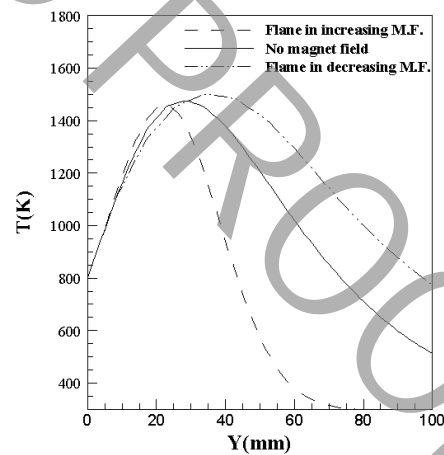
از آنجا که میدان مغناطیسی باعث تغییر در پروفیل دمای شعله شده و علاوه بر تغییر دما نسبت به حالت بدون میدان، توزیع پروفیل دما را نیز تغییر می‌دهد، تغییر در تولید آلاینده NO اجتناب ناپذیر خواهد بود. البته میدان مغناطیسی در کنار تأثیر نیروی حجمی خود بر آیرودینامیک احتراق، به واسطه کار میدان مغناطیسی در تعریف قانون اول، شرایط تعادلی را نیز



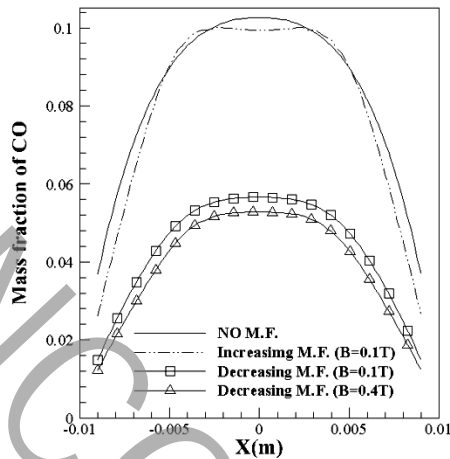
شکل ۱۶: توزیع دمای شعله در سه حالت بدون حضور میدان مغناطیسی و با حضور میدان مغناطیسی افزایشده و کاهنده به شدت ۰/۱ تسلا



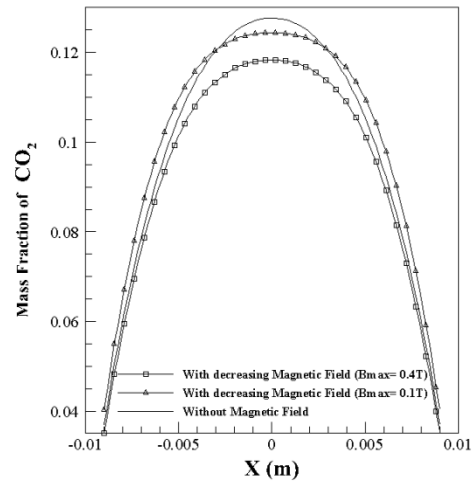
شکل ۱۷: توزیع دما در حالت بدون حضور میدان مغناطیسی و با حضور میدان مغناطیسی کاهنده به شدت ۰/۱ و ۰/۴ تسلا



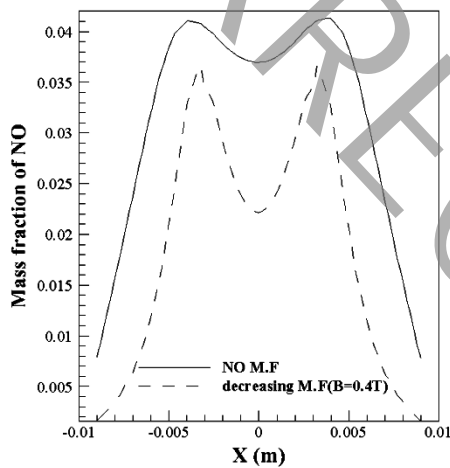
شکل ۱۸: پروفیل دمای شعله در حالت بدون میدان و میدان کاهنده و افزایشده با شدت ۰/۱ تسلا



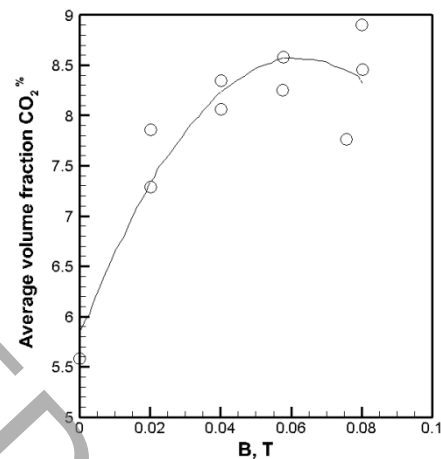
شکل ۲۱: اثر میدان مغناطیسی غیر یکنواخت بر CO با شدت میدان مغناطیسی ۱/۰ و ۴/۰ تسلا در مقایسه با عدم حضور میدان مغناطیسی



شکل ۱۹: اثر میدان مغناطیسی کاهنده با شدت ۱/۰ و ۴/۰ تسلا بر تولید CO_۲



شکل ۲۲: اثر میدان مغناطیسی کاهنده بر NO بدون و با حضور میدان مغناطیسی به شدت ۴/۰ تسلا



شکل ۲۰: اثر میدان مغناطیسی بر تولید CO_۲ مرجع [۲۳]

هوا) و دیامغناطیس (متان و محصولات احتراق) بر شکل شعله، دمای شعله و اختلاط سوخت و هوا تأثیر دارد. با بزرگ شدن میدان مغناطیسی تأثیر این نیرو بیشتر و واضح تر می‌گردد.

- اعمال میدان مغناطیسی کاهنده باعث باریک و کشیده شدن شکل شعله و افزایش دمای شعله می‌گردد.
- اعمال میدان مغناطیسی افزایشنده باعث کوتاه شدن و پخش شدن (قارچی شکل شدن) شعله و کاهش دمای شعله می‌گردد.
- با اعمال نیروی حجمی الکترومغناطیسی توسط میدان مغناطیسی بر جریان گاز می‌توان فرآیند احتراق، پروفیل هندسه شعله، اندازه دمای پیشینه‌ی شعله و محل آن را کنترل نمود.
- در محدوده دمایی مورد بررسی، اعمال میدان مغناطیسی کاهنده سبب

می‌تواند تغییر دهد. تحلیل اثر میدان مغناطیسی بر تعادل شیمیایی نشان داده است که تولید آلاینده NO به شدت تأثیر پذیرفته و کاهش می‌یابد [۲۴].

۷- نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی عددی حاضر به بررسی اثر میدان‌های مغناطیسی غیر یکنواخت بر شعله‌ی آرام پختی متان-هوا پرداخته شد. این شبیه‌سازی عددی با این فوم انجام شده و دو دسته معادلات الکترومغناطیس برای تولید و شبیه‌سازی میدان مغناطیسی و معادلات مکانیک سیالات و احتراق برای شبیه‌سازی احتراق متان-هوا با هم متصل گردیدند. بر این اساس به طور خلاصه نتایج زیر حاصل گردید.

- نیروی حجمی مغناطیسی وارد بر گونه‌های پارامغناطیس (اکسیژن،

- of flame and gases.” (1847): 401-421.
- [4] Lide, David R. Haynes, and W. M. Mickey. Handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data. No. 53-54 HAN. 2009.
- [5] Weast, Robert C., M. J. Astle, and W. H. Beyer. “CRC Handbook of Chemistry and Physics, p. B-82.” (1986).
- [6] Ueno, Shoogo, and Koosuke Harada. “Experimental difficulties in observing the effects of magnetic fields on biological and chemical processes.” IEEE Transactions on Magnetics 22.5 (1986): 868-873.
- [7] Ueno, S. “Quenching of flames by magnetic fields.” Journal of applied physics 65.3 (1989): 1243-1245.
- [8] Aoki, Takashi. “Radical emissions and butane diffusion flames exposed to uniform magnetic fields encircled by magnetic gradient fields.” Japanese Journal of Applied Physics 29.5R (1990): 952.
- [9] Wakayama, Nobuko I. “Effect of a gradient magnetic field on the combustion reaction of methane in air.” Chemical physics letters 188.3-4 (1992): 279-281.
- [10] Wakayama, Nobuko I. “Magnetic acceleration and deceleration of O/sub 2/gas streams injected into air.” IEEE Transactions on Magnetics 31.1 (1995): 897-901.
- [11] Fjita, Osamu, et al. “Determination of magnetic field effects on a jet diffusion flame in a microgravity environment.” Symposium (International) on Combustion. Vol. 27. No. 2. Elsevier, 1998.
- [12] Baker, John, and Kozo Saito. “Magnetocombustion: a thermodynamic analysis.” Journal of Propulsion and Power 16.2 (2000): 263-268.
- [13] Baker, John, and Mark E. Calvert. “A study of the characteristics of slotted laminar jet diffusion flames in the presence of non-uniform magnetic fields.” Combustion and flame 133.3 (2003): 345-357.
- [14] Kinoshita, Shinichi, et al. “Numerical simulation of diffusion flames with and without magnetic field.” IEEE transactions on applied superconductivity 14.2 (2004): 1685-1688.
- [15] Shinoda, Masahisa, et al. “Mechanism of magnetic field effect on OH density distribution in a methane-air premixed jet flame.” Proceedings of the Combustion Institute 30.1 (2005): 277-284.
- [16] V. Gilard, T. Delmaere, P. Gillon, B. Sarh, and J. N. Blanchard, “Magnetic influence on the behaviour of methane diffusion flames.” presented at the Proceedings of the European Combustion Meeting, 2007.
- [17] Gillon, P., J. N. Blanchard, and V. Gilard. “Methane/air-lifted flames in magnetic gradients.” Combustion

کاهش آلاینده‌های NO و CO شده است. از این رو می‌توان با اعمال میدان مغناطیسی کاهنده در کنار افزایش دما، احتراق کاملتر و تولید آلاینده‌های کمتری داشت.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

F	نیروی میدان مغناطیسی
A	بردار پتانسیل مغناطیسی (V.s/m)
J	چگالی جریان الکتریکی (A)
V	پتانسیل الکتریکی (V)
B	چگالی شار مغناطیسی (Tesla)
ρ	چگالی (kg/m^3)
K	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)
R	ثابت جهانی گاز ($\text{J}/(\text{mol.K})$)
T	دما (K)
p	فشار (atm)
M_i	وزن مولکولی گونه‌ی i ام
Y_i	کسر مولی گونه‌ی i ام
ω_i	نرخ تولید یا مصرف گونه‌ی i ام
X	قابلیت مغناطیس پذیری مواد
c	ثابت کوری
M	مغناطیس کنندگی مواد (A/m)
H	قدرت میدان مغناطیسی (G)

علائم یونانی

μ_i	نفوذ پذیری مغناطیسی مواد i ام (H/m)
μ_0	قابلیت نفوذ مغناطیسی هوا (H/m)
air	هوا
f	گاز داغ شعله
I	گونه i ام

مراجع

- [1] Biresselioglu, Mehmet Efe, Tezer Yelkeni, and Ibrahim Onur Oz. “Investigating the natural gas supply security: A new perspective.” Energy 80 (2015): 168-176.
- [2] Wu, Wen-fei, et al. “Experimental Studies of Magnetic Effect on Methane Laminar Combustion Characteristics” Combustion Science and Technology 188.3 (2016): 472-480.
- [3] Faraday, Michael. “LXIV. On the diamagnetic conditions

- Electromagnetic Problems.” (2010).
- [22] Patankar, Suhas. Numerical heat transfer and fluid flow. CRC press, 1980.
- [23] Barmina, I., & Zake, M. “Effects of Magnetic Field on Swirling Flame.” International Scientific Colloquium Modelling for Material Processing. Riga , September 16-17 , 2010.
- [24] سعیدی ع، خادم ج، رازنهان ح، "مطالعه تغییرات غلظت گونه‌های اصلی احتراق" [24] متان در اثر فشار و میدان مغناطیسی یکنواخت»، مجله مهندسی مکانیک امیرکبیر (DOI): 10.22060/mej.2017.12194.5279.
- Science and Technology 182.11-12 (2010): 1805-1819.
- [18] Agarwal, Shilpi, Manoj Kumar, and Chandra Shakher. “Experimental investigation of the effect of magnetic field on temperature and temperature profile of diffusion flame using circular grating Talbot interferometer.” Optics and Lasers in Engineering 68 (2015): 214-221.
- [19] Gonzalez, Diego F. Magnetic Field Effects on Diffusion Flames. Diss. Louisiana State University, 2008.
- [20] Swaminathan, Sumathi. Effects of magnetic field on micro flames. Diss. Louisiana State University, 2005.
- [21] Huang, Zhe. “OpenFOAM Simulation for

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Saeedi, A.R. Jafari Beinabaj, J. Khadem, Numerical simulation of diffusion flame in a non-uniform magnetic field and variations in flame shape, temperature and NO, CO, CO₂, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(4) (2019) 1-14.

DOI:



UNCORRECTED PROOF