

بررسی عددی تاثیر میدان مغناطیسی بر رفتار شعله غیرپیش‌آمیخته متان

کیارش کاملی^۱ و هادی پاسدارشهری^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، kiarash.kameli@modares.ac.ir

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، pasdar@modares.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۲۲، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۸/۳/۳، پذیرش: ۹۸/۳/۵)

چکیده: در این مقاله، به بررسی عددی تأثیر میدان مغناطیسی با گرادیان‌های کاهشی و افزایشی بر رفتار شعله غیرپیش‌آمیخته آرام متان پرداخته شده است. به‌منظور بررسی تأثیر میدان مغناطیسی، از مدل احتراقی آرنیوسی و همچنین سینتیک یک‌مرحله‌ای متان-هوا برای شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشته و دمای شعله ارزیابی شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده تغییر شکل شعله و افزایش دمای آن تحت تأثیر گرادیان میدان مغناطیسی است. با قرارگیری شعله در میدان مغناطیسی، در دو حالت گرادیان کاهشی و افزایشی، دمای شعله افزایش و ارتفاع شعله کاهش می‌یابد. با اعمال میدان مغناطیسی گرادیان کاهشی، دمای بیشینه در بالای مشعل به ارتفاع ۴/۵ میلی‌متر و در حالت بدون میدان به ارتفاع ۲/۵ میلی‌متر می‌رسد، در حالی که تحت تأثیر میدان مغناطیسی گرادیان افزایشی این مقدار ۴ میلی‌متر است که نشان‌دهنده کاهش ارتفاع شعله نیز است. تغییرات رفتار شعله در حالت میدان با گرادیان کاهشی مشهودتر است. میدان مغناطیسی در کاهش کسر جرمی متان نسوخته و محصولات احتراق در طی فرایند احتراق موثر است. در حالت گرادیان کاهشی و افزایشی، متان نسوخته نسبت به حالت بدون میدان به ترتیب ۹۹ و ۵۲ درصد کاهش می‌یابد.

کلیدواژگان: شعله غیر پیش‌آمیخته، میدان مغناطیسی، گرادیان کاهشی و افزایشی، گونه پارامغناطیس، نیروی حجمی مغناطیسی

مقدمه

احتراق ناقص به احتراقی گفته می‌شود که ماده سوختنی با عامل اکسیدکننده کاملاً واکنش ندهد که این عامل منجر به تولید محصولات حاصل از نسوختن ماده سوختنی و به‌وجود آمدن گونه‌های جدید در محصولات احتراق می‌شود، اما در مقابل آن، در احتراق کامل، تمامی اجزای اولیه فرایند شیمیایی کاملاً با یکدیگر واکنش می‌دهند. احتراق کامل کاهش آلاینده‌گی هوا را به‌دنبال خواهد داشت، این در حالی است که احتراق ناقص با تولید آلاینده‌ها اثرات مخرب زیست‌محیطی را نیز به‌دنبال خواهد داشت. با توجه به آنچه گفته شد، محققین به بررسی عوامل تأثیرگذار بر ساختار و پارامترهای شعله پرداختند تا بتوانند به احتراق هرچه کامل‌تر دست یابند که نتایج حاصل از آن مصرف بهینه سوخت و محیط زیست پاک‌تر را به‌دنبال دارد. به‌کاربردن میدان‌های مغناطیسی در بسیاری از جنبه‌های تحقیقاتی و کاربردی بسیار مهم و فراگیر است. مطالعه در زمینه بیومغناطیس مانند تأثیر میدان مغناطیسی بر فرایندهای زیستی، فرایندهای شیمیایی، سنتز مواد و تصویربرداری تنها بخشی از استفاده‌های گسترده و روزافزون میدان‌های مغناطیسی است. یکی از جنبه‌های مهم و تأثیرگذار بر فرایند احتراق اعمال میدان مغناطیسی بر آن است. اگرچه در این زمینه تحقیقات کمی صورت گرفته است، اما نتایج نشان از توانمندی میدان‌های مغناطیسی برای کنترل و بهینه‌سازی فرایند احتراق دارد [۱-۳]. استفاده از میدان مغناطیسی برای کنترل میدان جریان و سینتیک احتراق با هدف افزایش بازدهی و کاهش انتشار آلاینده‌ها موضوع شناخته‌شده‌ای است که در عین حال کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

مایکل فارادی، در سال ۱۸۴۷، اولین فردی بود که تأثیر میدان مغناطیسی بر احتراق را مشاهده و گزارش کرد. او، با نزدیک کردن یک آهنربا به شعله شمع، انحراف شعله در جهت دور شدن از آهنربا را مشاهده کرد. در واقع، شعله از یک میدان مغناطیسی قوی‌تر به سمت یک میدان ضعیف‌تر منحرف می‌شود. فارادی این مشاهده خود را به حضور مواد مغناطیسی و غیرمغناطیسی در هوا و گازهای حاصل از احتراق نسبت داد و علت فرار شعله از سمت میدان قوی را این گازها دانست [۴].

یونو و همکاران [۵،۶]، با بررسی احتراق الکل با کاتالیست پلاتین در میدان مغناطیسی با شدت القای مغناطیسی ۱/۴-۰/۵ تسلا و گرادیان بین ۱۰۰-۲۰۰ تسلا بر متر، کاهش دمای ۱۰۰-۲۰۰ درجه سلسیوس در مکان‌های مشخصی از جبهه شعله را مشاهده کردند. مکان واکنش احتراق بنزن روی کاتالیست پلاتین در معرض میدان‌های مغناطیسی جریان مستقیم از ۰/۱ تا ۱ تسلا قرار گرفت. آن‌ها تغییرات متفاوتی در سرعت احتراق بنزن مشاهده کردند. به عنوان مثال، سرعت احتراق در ۰/۲ و ۰/۶ تسلا بین ۵ تا ۱۰٪ کاهش یافت، در حالی که برای ۰/۳، ۰/۵ و ۱ تسلا بین ۵ تا ۱۰٪ افزایش یافت. آزمایش‌های آن‌ها برای چند نوع الکل نیز چنین رفتاری را نشان داد.

اوکی [۷-۹] با مطالعه شعله پخشی بوتان و هوا تحت تأثیر میدان مغناطیسی به بررسی انتشار رادیکال‌ها پرداخت. او نشان داد که میدان مغناطیسی کاهشی (میدانی که در جهت جریان، شدت میدان مغناطیسی آن کم می‌شود) باعث کاهش غلظت دوده، افزایش رادیکال OH، CH و C₂، افزایش در دمای شعله، کاهش در ابعاد شعله و میل به آبی شدن شعله می‌شود. میدان مغناطیسی بیشترین تأثیر را روی C₂، CH به میزان کمتر و کمترین تأثیر را روی رادیکال OH دارد، اما تحت تأثیر میدان مغناطیسی افزایشی این رادیکال‌ها کاهش می‌یابد. میدان مغناطیسی افزایشی سبب سوختن معکوس شده و مکان‌های آبی و زرد شعله عکس می‌شود. همچنین، مکان بیشترین دمای شعله در سطح آن مشاهده شد. او همچنین بیان کرد که نیروی لورنتز هیچ تأثیری روی شکل شعله نداشته است. او یک مدل پخشی ساده برای توصیف شرایط اختلاط و ضریب پخش بعد از اعمال میدان استفاده کرد. در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت تغییرات بسیار کوچکی در افزایش انتشار رادیکال‌های OH، CH و C₂، دمای شعله و کاهش ابعاد شعله و آزادسازی میزان کربن مشاهده کرد. او مشاهده این تغییرات بسیار کوچک را به دلیل تأثیر میدان بر جریان جابه‌جایی آزاد در لبه‌های قطب‌ها دانست.

واکایاما [۱۰] آزمایش خود را برای دو حالت شعله غیرپیش‌آمیخته و شعله نیمه‌پیش‌آمیخته با سوخت متان انجام داد. وی ابتدا شعله را در موقعیت میدان مغناطیسی غیریکنواخت کاهشی قرار داد. در این حالت، مقدار بیشتری هوا به سمت پایه شعله جذب می‌شود که به دلیل خاصیت پارامغناطیسی اکسیژن است. همچنین، محصولات احتراق به طور مؤثری از ناحیه واکنش به خاطر خاصیت دیامغناطیسی رانده می‌شوند (محصولات در جهت کاهش میدان مغناطیسی شتاب می‌گیرند). این جذب اکسیژن بیشتر سبب افزایش دما، کوچک‌تر شدن شعله و شدت ساطع نور بیشتر شده و تأثیر مستقیم آن کاهش تشکیل دوده است. او همچنین شعله را در موقعیت میدان مغناطیسی یکنواخت قرارداد و دریافت که در این موقعیت شکل شعله تغییر نمی‌کند، در حالی که در موقعیت میدان مغناطیسی غیریکنواخت افزایشی، طول شعله افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، در یک بررسی چشمی از شکل شعله، مشاهده شد که شعله از محل میدان مغناطیسی بزرگ‌تر (ناحیه خروجی مشعل) دور می‌شود. در حقیقت، شعله از میدان مغناطیسی اجتناب و آن محل را ترک می‌کند. این رفتار قابل پیش‌بینی است چون سوخت و محصولات احتراق دیامغناطیس‌اند و ذاتاً به وسیله میدان قوی‌تر دفع می‌شوند. از این رو، در جهت میدان مغناطیسی کمتر فرار می‌کنند. شایان ذکر است که این تغییرات برای شعله غیرپیش‌آمیخته بیشتر از شعله نیمه‌پیش‌آمیخته است و در شعله کاملاً پیش‌آمیخته، با اعمال میدان مغناطیسی، هیچ تغییری در رفتار شعله مشاهده نمی‌شود.

بیکر [۱۱] نیز، آزمایشی مشابه با واکایاما انجام داد با این تفاوت که از سوخت پروپان به جای متان استفاده کرد. وی، در آزمایش خود، اثر میدان بر نقطه شروع دوده مرئی و نقطه نزدیک خاموشی را بررسی کرد. وی مشاهده کرد که در اثر اعمال میدان مغناطیسی، نقطه نزدیک خاموشی بالا می‌رود. شایان ذکر است که به نقطه‌ای که هرگونه کاهش در نرخ جریان باعث خاموش شدن شعله شود، نقطه نزدیک خاموشی گفته می‌شود. به عبارت دیگر، برای جلوگیری از خاموش شدن شعله باید نرخ

خروج از جریان بیشتر شود. در اثر حضور میدان و خاصیت پارامغناطیسی اکسیژن، اکسیژن در نزدیکی پایه شعله متراکم شده و باعث پایین آمدن دمای منشورها می شود (در این آزمایش از دو تیغه منشوری با مغناطیس دائم برای اعمال میدان استفاده شده است). به همین دلیل، باید نرخ خروج جریان بیشتر شود تا شعله خاموش نشود. از طرفی، زمانی که از یک جریان جرمی مشخص به بعد، برای نخستین بار با چشم غیرمسلح تابش نارنجی رنگ شعله مشاهده می شود، نقطه شروع دوده مرئی گفته می شود. وی مشاهده کرد که با اعمال میدان، نقطه شروع دوده مرئی پایین می آید. به عبارت دیگر، با دبی کمتر شاهد وجود شعله نارنجی رنگ خواهیم بود.

سوامیناتان [۱۲]، در تحقیق خود، به بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر شعله غیرپیش آمیخته پروپان-هوا پرداخت. او، با اعمال گرادیان افزایشی و کاهش میدان مغناطیسی بر شعله غیرپیش آمیخته پروپان در سرعت جریان های مختلف، ارتفاع شعله را به صورت تجربی اندازه گیری کرد. با اعمال گرادیان کاهشی، با افزایش میدان، ارتفاع شعله کاهش می یابد. همچنین، با اعمال گرادیان افزایشی، ارتفاع شعله، نسبت به حالتی که میدان اعمال نمی شود، افزایش می یابد. با اعمال گرادیان افزایشی، نیروی شناوری مغناطیسی با غلبه بر نیروی شناوری وزنی باعث افزایش ارتفاع شعله می شود. به همین صورت، در حالت گرادیان کاهشی، نیروی شناوری وزنی بیشتر باعث کاهش ارتفاع شعله می شود. وی، همچنین، تأثیر میدان مغناطیسی بر روی دوده حاصل از احتراق را بررسی و مشاهده کرد که اعمال میدان باعث کوچک شدن قطر ذرات دوده و میزان تراکم آن ها در سطح مشخص می شود.

وو و همکاران [۱۳] به مطالعه تجربی اثرات میدان مغناطیسی بر روی شعله متان پرداختند. نتایج آزمایش آن ها نشان می دهد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، ابعاد طولی شعله کاهش و عرض و دمای شعله افزایش می یابد. آن ها، همچنین، به بررسی اثر میدان بر توزیع NO_x پرداختند. نتایج حاصل از کاهش قابل ملاحظه توزیع NO_x با افزایش شدت میدان مغناطیسی حکایت دارد. آن ها در این آزمایش مشاهده کردند میزان تولید NO_x به مقدار ۶۰ درصد تا یک ارتفاع مشخص کاهش می یابد که این کاهش بستگی به شدت میدان دارد. تحت تأثیر گرادیان میدان مغناطیسی، به دلیل نیروی پارامغناطیس اکسیژن، اکسیژن اطراف شعله به سمت مناطق با گرادیان مغناطیسی بزرگ شعله جریان می یابد. به همین دلیل، توزیع رادیکال OH در شعله زیاد می شود که این دلیلی بر کاهش NO_x شعله می شود.

شینودا و همکاران [۱۴]، با بررسی آزمایشگاهی و حل عددی معادلات حاکم، تأثیر میدان مغناطیسی را بر توزیع چگالی جرمی رادیکال OH در احتراق شعله پیش آمیخته متان مطالعه کردند. تغییر واضح در توزیع چگالی جرمی OH در شعله توسط اندازه گیری PLIF^۱ دیده شد. با این حال، تغییر در ناحیه N_2 ناچیز بود. آن ها چنین پدیده ای را با حل معادلات دینامیک گاز واکنشی و مغناطیسی به صورت عددی نیز شبیه سازی کردند. نتیجه گیری آن ها این بود که نیروی مغناطیسی به طور مستقیم سرعت نفوذ OH را افزایش نمی دهد، بلکه نیروی مغناطیسی با تأثیر بر روی O_2 در هوای اطراف، که تراکم توده و قابلیت مغناطیسی آن ها بسیار بزرگ تر از سایر گونه های شیمیایی است، موجب تغییر سرعت جابه جایی گاز مخلوط می شود تا توزیع چگالی جرمی OH غیرمستقیم جابه جا شود. به عبارت دیگر، علت تغییرات چگالی OH نفوذ OH نیست، بلکه جابه جایی هوای محیط شامل O_2 فراوان است.

بارمینا و همکاران [۱۵، ۱۶] به صورت تجربی و مدل سازی ریاضی اثرات میدان مغناطیسی بر دینامیک احتراق در تبدیل ترموشیمیایی زیست توده با هدف ارائه کنترل فرایندهای در حال توسعه در منطقه واکنش شعله در حال چرخش را بررسی کردند. مدل سازی ریاضی از اثر میدان مغناطیسی در شکل گیری دینامیک شعله تأیید می کند که نیروی الکترومغناطیسی، که توسط جریان الکتریکی اطراف شعله ایجاد می شود، منجر به افزایش گردابه جریان با افزایش اختلاط واکنشگرها می شود. همچنین، اثر میدان مغناطیسی بر روی دمای شعله و سرعت واکنش ها باعث افزایش گردابه جریان و در نتیجه خنک شدن

1. Planar laser-induced fluorescence

شعله با محدود کردن تبدیل شیمیایی واکنش دهنده‌ها می‌شود. اثر ذرات مغناطیسی عمود بر جهت جریان موجب ایجاد یک گردابه اضافی در محدوده محاسباتی و اختلال در خطوط جریان می‌شود. تأثیر جهت مغناطیسی بر جهت جریان موجب می‌شود که گردابه در گوشه سمت چپ بالا و اختلال خطوط جریان حذف شود.

مطالعه نتایج سایر پژوهش‌ها نشان می‌دهد، برای رفتار شعله در یک میدان مغناطیسی کاهشی یا افزایشی، اکثر محققین کاهش ارتفاع شعله و سطح آن را گزارش کرده‌اند [۱۳، ۱۲]. برخی نتایج برای منطقه با میدان کاهشی حاکی از افزایش ارتفاع شعله است. از این رو، به نظر می‌رسد بر مبنای شدت میدان اعمال شده و گرادیان آن، در ناحیه میدان کاهشی یا افزایشی آهنربا، رفتار شعله متفاوت خواهد بود. در هیچ‌کدام از پژوهش‌های گزارش شده تاکنون بررسی جامعی بر شکل شعله متان منتشر نشده است. تغییرات شکل شعله نیز اثر مشهودی از نیروی حجمی مغناطیسی است که توسط میدان به محدوده فرایند احتراق وارد شده است. بنابراین، تغییرات شکل شعله بر کمیت‌هایی مانند دمای شعله و تابش آن نیز تأثیر خواهد داشت. هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر رفتار شعله با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در به دست آوردن پارامترهایی مانند طول و دمای شعله و همچنین غلظت گونه‌های حاصل از احتراق است تا احتراق کامل تر و تولید آلاینده کمتر بررسی شود.

معادلات حاکم

همان‌طور که بیان شد، میدان‌های مغناطیسی غیریکنواخت می‌توانند رفتار شعله و جریان گازها را تحت تأثیر قرار دهند. این تأثیر از خصوصیات پارامغناطیسی و دیامغناطیسی گازهای مختلف به وجود می‌آید. یک ماده پارامغناطیس، به دلیل وجود اتم‌های دارای گشتاور دوقطبی، در مسیر میدان قوی‌تر جذب می‌شود، اما در ماده دیامغناطیس، با نداشتن گشتاور دوقطبی، نیروی دافعه ضعیفی در مقایسه با ماده پارامغناطیس در جهت دور شدن از میدان قوی به آن وارد می‌شود.

نیروی مغناطیسی بر واحد حجم (F_i) ، که بر گونه i توسط میدان غیریکنواخت وارد می‌شود، با معادله زیر بیان می‌شود [۱۷]:

$$F_i = \left(\frac{1}{2\mu_0} \right) \rho Y_i \chi_i \nabla (B^2) \quad (1)$$

که در آن μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی خلاء $(4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2)$ ، ρ چگالی، Y_i کسر جرمی گونه، χ_i قابلیت مغناطیسی گونه و B میدان مغناطیسی غیریکنواخت اعمال شده است. گونه‌های بدون الکترون‌های جفت نشده عموماً دارای اندازه بسیار کوچک و منفی χ_i هستند که همان مواد دیامغناطیس‌اند. در مقابل، موادی که الکترون‌های جفت نشده دارند (مواد پارامغناطیس) دارای اندازه بزرگ و مثبت χ_i در مقایسه با مواد دیامغناطیس‌اند. قابلیت مغناطیسی به صورت زیر برای گونه‌های پارامغناطیس مختلف به دست می‌آید [۱۴]:

$$\chi_i = \frac{N_A g_L^2 \mu_B^2 S_i (S_i + 1) \mu_0}{3kT m_i} \quad (2)$$

عبارت بالا تابعی از گشتاور دوقطبی کلی اسپینی $^1(S_i)$ ، جرم مولی گونه شیمیایی (m_i) و دما (T) است. همچنین، N_A عدد آووگادرو، g_L فاکتور لند، μ_B قابلیت مغناطیسی بور^۳ و k ثابت بولتزمن است.

در شعله‌های غیرپیش‌آمیخته، سوخت‌های هیدروکربنی، نیتروژن، مونواکسیدکربن و دی‌اکسیدکربن دیامغناطیس و اکسیژن اصلی‌ترین گاز پارامغناطیس است. از آنجاکه قابلیت مغناطیسی اکسیژن چندبرابر بزرگ‌تر از قابلیت مغناطیسی گازهای دیامغناطیس است، از نیروی وارد بر گازهای دیامغناطیس در مقابل نیروی وارد بر هوا (اکسیژن) پارامغناطیس صرف‌نظر می‌شود. با توجه به دیامغناطیس بودن گازهای حاصل از احتراق و سوخت و صرف‌نظر از نیروی وارد بر این گونه‌های دیامغناطیس، تنها اکسیژن نقش اصلی را ایفا می‌کند. با صرف‌نظر از غلظت بسیار کم گونه‌های پارامغناطیس تشکیل شده در شعله و با توجه

1. Total electron spin momentum
2. Lande's g-factor
3. Bohr magneton

به ثابت بودن دمای محیط، می توان نیروی وارد بر واحد حجم هوای اطراف شعله را که باعث جذب هوا به سمت شعله و نفوذ بیشتر در محدوده احتراق می شود، ساده تر بیان کرد.

با توجه به روابطی که تاکنون برای اثرات میدان های مغناطیسی بر جریان گاز و احتراق بیان شد، اثرات میدان مغناطیسی به صورت یک نیروی حجمی قرار می گیرد. برای یک جریان آرام، در حضور میدان مغناطیسی، می توان معادلات بقای جرم، اندازه حرکت، انرژی و گونه های شیمیایی را به صورت زیر نوشت [۱۴]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + \rho \sum_{i=1}^N Y_i f_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v T) = \frac{1}{C_p} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \frac{1}{C_p} \sum_{i=1}^N h_i w_i + \frac{1}{C_p} \rho \sum_{i=1}^N Y_i f_i \cdot V_i \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + w_i \quad (6)$$

در روابط بالا، ρ و v به ترتیب چگالی و سرعت اند. h آنتالپی، C_p گرمای ویژه فشار ثابت و λ ضریب هدایت حرارتی مخلوط است. D_i نفوذ جرمی گونه i ام، Y_i کسر جرمی گونه i ام و w_i نرخ تولید گونه i ام اند.

برای تکمیل دستگاه معادلات بالا، معادله حالت گاز کامل و نیروهای حجمی خارجی بر واحد جرم، که بر هر گونه i وارد می شود، به صورت زیر اضافه می شوند:

$$p = \rho R_u T \sum_{i=1}^N \frac{Y_i}{m_i} \quad (7)$$

$$f_i = \frac{1}{2\mu_0} \chi_i \nabla (B^2) \quad (8)$$

مدل احتراقی

در جریان احتراقی آرام، برای محاسبه نرخ متوسط تولید یا مصرف گونه n ام در اثر واکنش ها از مدل سینتیک آرنیوسی^۱ استفاده شده است. این مدل برای جریان های آرام از دقت مناسبی برخوردار است. یک سیستم شیمیایی با N گونه و M واکنش را می توان به صورت واکنش شیمیایی مطابق معادله (۹) نشان داد:

$$\sum_{k=1}^N v'_{kj} s_k = \sum_{k=1}^N v''_{kj} s_k \quad k=1, N \quad j=1, M \quad (9)$$

که در آن نشانگر گونه k ام و v'_{kj} و v''_{kj} ضرایب مولی استوکیومتری گونه k ام در واکنش j ام اند. با توجه با معادله (۹)، نرخ مصرف یا تولید گونه k ام به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\dot{\omega}_k = \frac{d[X_k]}{dt} = \sum_{j=1}^M v_{kj} RR_j \quad (10)$$

$$v_{kj} = v''_{kj} - v'_{kj} \quad (11)$$

$$RR_j = k_{fj} \prod_{k=1}^N [X_k]^{v'_{kj}} - k_{rj} \prod_{k=1}^N [X_k]^{v''_{kj}} \quad (12)$$

$$[X_k] = \frac{\rho Y_k}{MW_k} \quad (13)$$

در روابط بالا، MW_k جرم مولکولی گونه k ام، $[X_k]$ نماد غلظت مولی گونه k ام، RR_j نرخ پیشرفت واکنش j ام و k_{fj} و k_{rj} نرخ های رفت و برگشت واکنش j ام اند. برای محاسبه ثابت نرخ های واکنش رفت و برگشت از رابطه آرنیوسی استفاده شده است:

1. Arrhenius expression

$$k_{fj} = A_j T^{\beta_j} e^{\left(\frac{-E_{aj}}{RT}\right)} \quad (14)$$

$$k_{rj} = \frac{k_{fj}}{\left(\frac{p_a}{RT}\right) \sum_{k=1}^N v_{ij} e^{\left(\frac{\Delta S_j^0}{R} + \frac{\Delta H_j^0}{RT}\right)}} \quad (15)$$

در روابط بالا، E_{aj} انرژی فعال سازی واکنش زام، R ثابت جهانی گازها، A_j ضریب پیش‌نمایی آرنیوسی، β_j توان دما و p_a فشار است. تغییرات آنتالپی و آنتروپی واکنش زام به ترتیب با H و S نشان داده شده‌اند که با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{H}{RT} = a_1 + \frac{a_2}{2} T + \frac{a_3}{2} T^2 + \frac{a_4}{2} T^3 + \frac{a_5}{2} T^4 + \frac{a_6}{T} \quad (16)$$

$$\frac{S}{R} = a_1 \ln T + a_2 T + \frac{a_3}{2} T^2 + \frac{a_4}{3} T^3 + \frac{a_5}{4} T^4 + a_7 \quad (17)$$

ضرایب a_1 تا a_7 از جداول ترمودینامیکی جنف^۱ به دست می‌آیند. از آنجایی که محاسبه نرخ تولید یا مصرف گونه‌ها در تمام واکنش‌ها به‌طور همزمان انجام می‌شود، یک دستگاه معادلات ديفرانسیل معمولی غیرخطی^۲ در هر گام زمانی حل می‌شود.

روش عددی

در تحقیق حاضر، برای تحلیل رفتار شعله از نرم‌افزار OpenFoam، که نرم‌افزاری کدباز براساس برنامه‌نویسی شیء‌گرا با زبان برنامه‌نویسی C++ است، استفاده شده است. به‌منظور تحلیل جریان احتراق، از حلگر reactingFoam استفاده شده است که اثر میدان مغناطیسی به شکل یک نیروی حجمی به معادله تکانه اضافه می‌شود.

حلگر یادشده از روش گسسته‌سازی حجم محدود برای حل عددی استفاده می‌کند و الگوریتم حاکم بر آن PIMPLE^۳ است. حداکثر مقدار عدد کورانت موضعی^۴ ۰/۴ در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی تشعشع، از آنجا که میزان انتشار تشعشع در همه جهات یکسان است، از مدل P1 استفاده شده است.

برای تمامی عبارات‌های جابه‌جایی در معادلات اندازه حرکت، انتقال انرژی، انتقال گونه از تقریب مرتبه دو استفاده شده است. برای عبارت مشتق زمانی در تمام معادلات از روش اویلری، برای گرادیان‌ها، از روش گوسی مرتبه دوم و برای مشتق‌های مرتبه دوم نیز از تقریب مرتبه دوم استفاده شده است.

برای انجام مطالعات از یک دستگاه رایانه با پردازشگر intel-Core i7-4970k با فرکانس ۴ گیگاهرتز، که ۴ هسته حقیقی و ۴ هسته مجازی دارد که در مجموع شامل ۸ هسته محاسباتی می‌شود و ۱۶ گیگابایت حافظه موقت دارد، استفاده شده است. این دستگاه قابلیت انجام پردازش موازی به کمک کتابخانه MPI را داراست. در عمده محاسبات انجام‌شده، برای دستیابی به سرعت بالاتر، به‌طور هم‌زمان از ۴ هسته برای هر مطالعه استفاده شده است. به عنوان یک برآورد برای مدل‌های یادشده، با در نظر گرفتن حدود ۹۲۰۵۰۰ شبکه محاسباتی، ۱۸ ساعت زمان محاسبات لازم است.

شرایط شبیه‌سازی و اندازه شبکه محاسباتی

برای شبیه‌سازی مسئله حاضر، ناحیه محاسباتی مکعب‌مستطیلی با طول ۴۹ میلی‌متر، عرض ۳۹ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۹ میلی‌متر در نظر گرفته شد. دلیل انتخاب این ابعاد قرار گرفتن دو آهنربا با ابعاد ۴۹×۴۹ میلی‌متر در فاصله ۳۹ میلی‌متر از یکدیگر برای اعمال میدان مغناطیسی است. مبدأ محور مختصات در ورودی مشعل سوخت قرار گرفته است (ارتفاع مشعل سوخت ۴۹ میلی‌متر در نظر گرفته شده است). همچنین، قطر مشعل ۲ میلی‌متر است. ذکر این نکته لازم است که ابعاد در نظر

1. Janaf
2. ODE
3. Pressure (PISO)-Implicit Method for Pressure Linked Equations
4. Local courant number

گرفته شده برگرفته از کار آگاروال [۱۸] است. طرحواره هندسی مسئله در حالت میدان مغناطیسی کاهشی به صورت شکل ۱ و در حالت میدان مغناطیسی افزایشی به صورت شکل ۲ است.

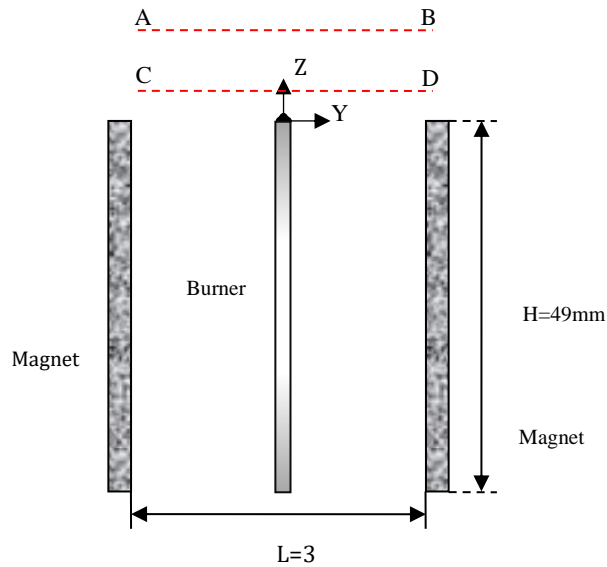


Figure 1- Schematic geometry in the magnetic field with a decreasing gradients

شکل ۱- طرحواره هندسه در حالت میدان مغناطیسی با گرادیان کاهشی

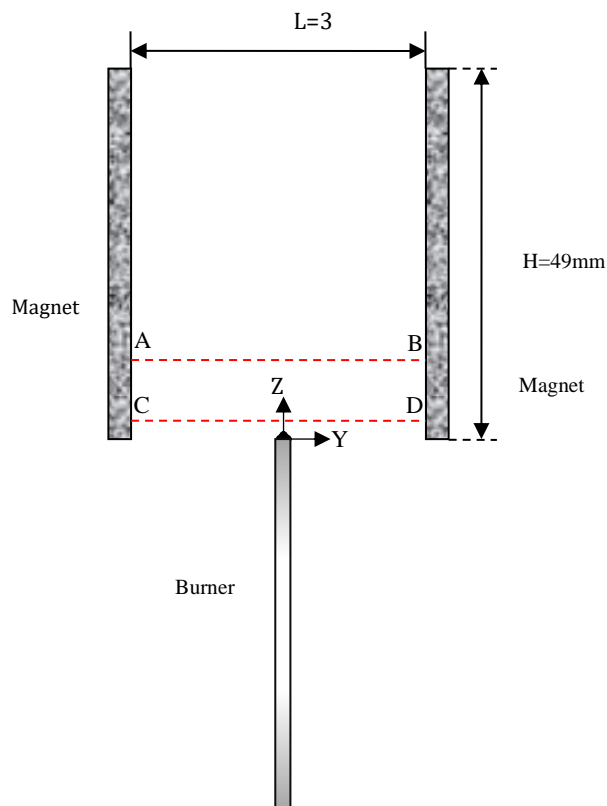


Figure 2- Schematic geometry in the magnetic field with an increasing gradient

شکل ۲- طرحواره هندسه در حالت میدان مغناطیسی با گرادیان افزایشی

در این مسئله، از شبکه سازمان یافته، به دلیل خطای عددی کمتر، استفاده شده است. ساختار حاصل شده در این مسئله در شکل ۳ نشان داده شده است.

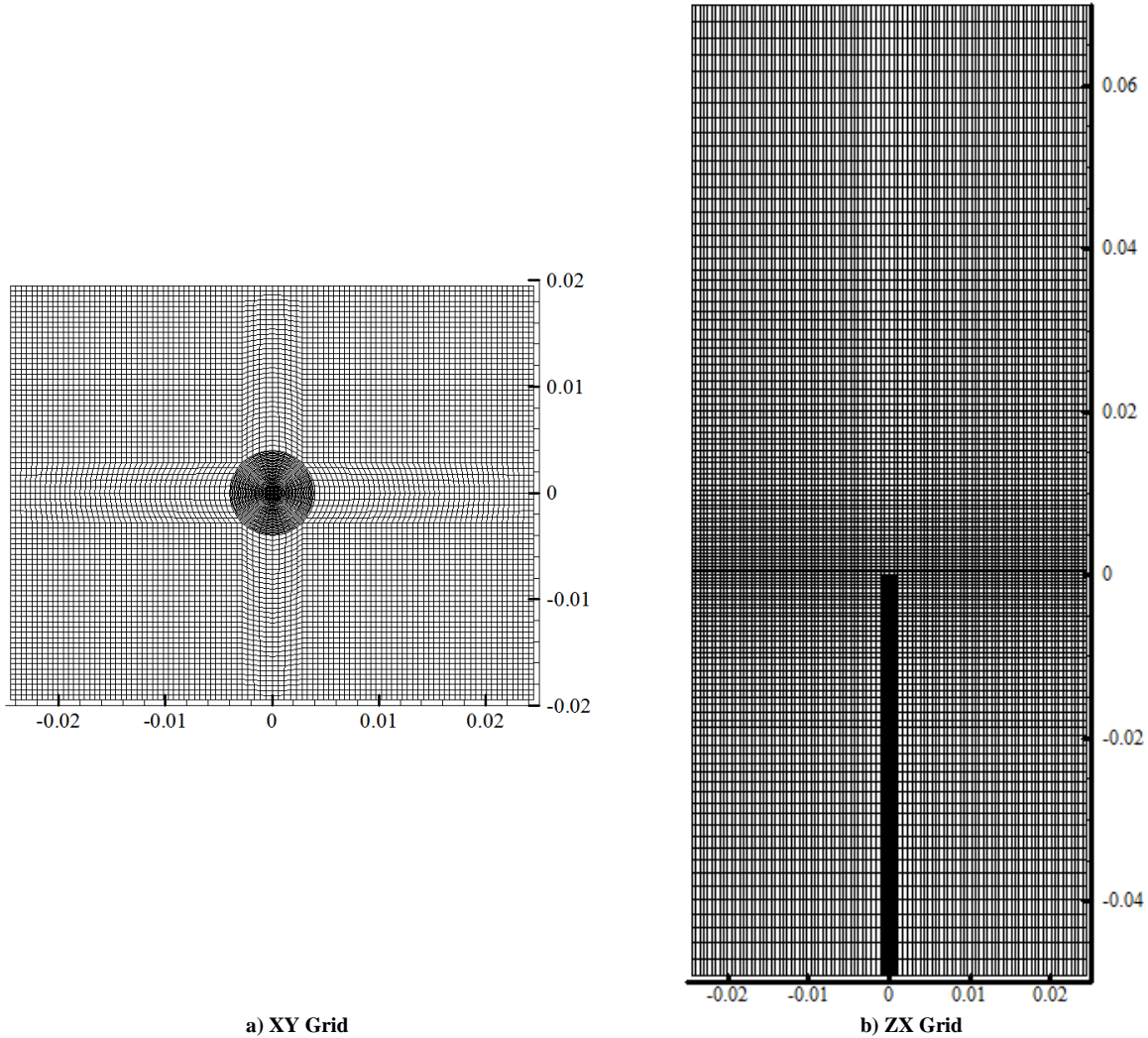


Figure 3- Computational grid structure used in simulation

شکل ۳- ساختار شبکه محاسباتی مورد استفاده در شبیه سازی: الف) شبکه در مقطع XY، ب) شبکه در مقطع ZX

در ابتدا، شبکه محاسباتی با میزان ۱۲۴۰۰۰ سلول در نظر گرفته شد. این تعداد شبکه در چند مرحله تا میزان ۱۴۲۵۵۰۰ سلول افزایش یافت. در چند ناحیه از میدان محاسباتی نتایج دمای شعله برای شبکه های مختلف با هم مقایسه شدند. به عنوان مثال، در ارتفاع ۸ میلی متر از ورودی سوخت منحنی تغییرات دما در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می شود که با تغییر تعداد شبکه محاسباتی از ۹۲۰۵۰۰ به ۱۴۲۵۵۰۰ شبکه، تفاوت محسوسی در منحنی تغییرات دما حاصل نمی شود. بنابراین، اندازه شبکه محاسباتی ۹۲۰۵۰۰ در نظر گرفته می شود.

برای ناحیه ورودی سوخت، شرط مرزی دبی ورودی در نظر گرفته شد. دو آهنربای مسئله به صورت دو صفحه در مقابل هم در راستای محور X با شرط مرزی دیوار قرار گرفته اند و صفحات اطراف شبکه محاسباتی شرط مرزی ناحیه آزاد دارند.

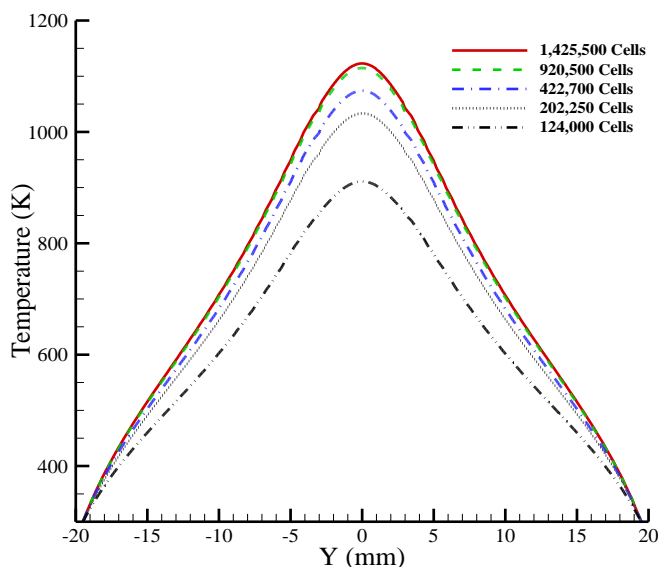


Figure 4- Flame temperature curves for checking the grid independency of the results
 شکل ۴- منحنی‌های دمای شعله برای بررسی استقلال حل از اندازه شبکه محاسباتی

صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی، از کار آگاروال [۱۸] و همکارانش، که به مطالعه رفتار شعله غیرپیش‌آمیخته تولیدشده توسط مشعل بوتان در غیاب میدان مغناطیسی و در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت و غیریکنواخت پرداختند، استفاده شده است. در این حالت از میدان مغناطیسی کاهشی با گرادینان $-2/15 \text{ T/m}$ در میدان مغناطیسی 0.07 T استفاده شده است. برای محاسبه نرخ واکنش از سینتیک آرنیوسی به صورت زیر استفاده شده است [۱۹]:

$$R = AT^{\beta} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) C_{C_4H_{10}}^a C_{O_2}^b \quad (18)$$

به طوری که E_a انرژی فعال‌سازی واکنش و C غلظت گونه مربوطه است. برای مخلوط حاضر، در قالب آپن فوم، پارامترهای مورد نیاز معادله (۱۸) به صورت جدول ۱ است:

جدول ۱- پارامترهای مکانیزم شیمیایی بوتان

Table 1- Butane chemical mechanism Parameters [19]

b	a	$T_a (K)$	β	$A \left(\frac{m^3}{kmol}\right)^{0.75} s^{-1}$
1.6	0.15	15097.43	0	4.16×10^9

T_a ، در جدول ۱، دمای فعال‌سازی است و از تقسیم انرژی فعال‌سازی E_a بر ثابت گاز R به دست می‌آید. نتایج حاصل‌شده از این مسئله برای دمای شعله، در دو حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی و اعمال میدان مغناطیسی کاهشی، به صورت نمودار شکل ۵ خواهد بود. ذکر این نکته لازم است که شاخص اندازه‌گیری دما در ارتفاع $6/5$ میلی‌متر از مشعل است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دمای بیشینه حاصل از کار آگاروال [۱۸] در دو حالت بدون میدان مغناطیسی و با میدان مغناطیسی به ترتیب 1026 و 1156 کلوین است. همچنین، دمای بیشینه حاصل از شبیه‌سازی کار بالا در دو حالت بدون میدان مغناطیسی و با میدان مغناطیسی به ترتیب 1053 و 1179 کلوین است که نتایج حاصل‌شده به ترتیب $2/6\%$ و 2% با نتایج تجربی اختلاف دارند.

ذکر این نکته لازم است که عبارت‌های WMF¹، IMF² و DMF³، که در شکل‌های این مقاله به کار رفته است، به ترتیب بیانگر عبارت‌های بدون میدان مغناطیسی، میدان مغناطیسی با گرادیان افزایشی و میدان مغناطیسی با گرادیان کاهشی است.

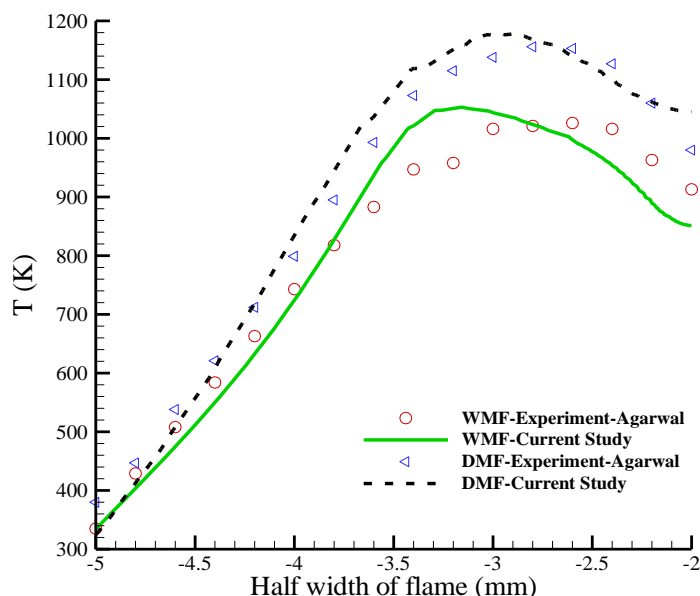


Figure 5- Temperature distribution of butane diffusion flame in the absence of magnetic field and the presence of decreasing magnetic field

شکل ۵- توزیع دمای شعله نفوذی بوتان در غیاب میدان و در حضور میدان مغناطیسی کاهشی

نتایج

در این بخش، به بررسی تأثیرات میدان مغناطیسی در دو حالت کاهشی و افزایشی بر شعله غیرپیش‌آمیخته آرام متان پرداخته و تأثیر میدان مغناطیسی بر مقدار محصولات احتراق نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

شکل ۶ خطوط هم‌تراز دما را برای سه حالت مختلف بدون میدان مغناطیسی و با میدان مغناطیسی گرادیان کاهشی و افزایشی در صفحه $x=0$ نشان می‌دهد. افزایش دما در حالت میدان مغناطیسی کاهشی بیشتر است. علت تأثیر بیشتر میدان بر افزایش دما در اثر میدان مغناطیسی گرادیان کاهشی در مقایسه با حالت میدان مغناطیسی گرادیان افزایشی را می‌توان با بررسی نیروی مغناطیسی وارد بر هوا و محصولات احتراق تحلیل کرد. با توجه به معادله (۸)، در حالت میدان مغناطیسی گرادیان افزایشی، نیروی وارد بر هوا به سمت بالا (مثبت z) بوده و جریان جابه‌جایی طبیعی به سمت پایین (منفی z) است. بنابراین، در میدان مغناطیسی گرادیان افزایشی، این دو نیرو در خلاف جهت هم بوده، در حالی که در حالت میدان مغناطیسی گرادیان کاهشی، این دو نیرو به سمت پایین است. در هر دو حالت از تأثیر میدان، نیروی وارد بر هوا موجب افزایش نفوذ هوا در منطقه احتراق می‌شود که در حالت میدان مغناطیسی گرادیان کاهشی، این تأثیر بیشتر نمود پیدا می‌کند.

شکل ۷ تغییرات دما در ارتفاع بالای مشعل بدون اعمال میدان و تحت تأثیر میدان مغناطیسی گرادیان کاهشی و افزایشی را نشان می‌دهد. با اعمال میدان مغناطیسی گرادیان کاهشی، دمای بیشینه در بالای مشعل از ارتفاع $4/5$ میلی‌متر در حالت

1. Without Magnetic Field
2. Increasing Magnetic Field
3. Decreasing Magnetic Field

بدون میدان به ارتفاع ۲/۵ میلی متر می رسد، در حالی که تحت تأثیر میدان مغناطیسی گرادیان افزایشی این مقدار ۴ میلی متر است که نشان دهنده کاهش ارتفاع شعله است.

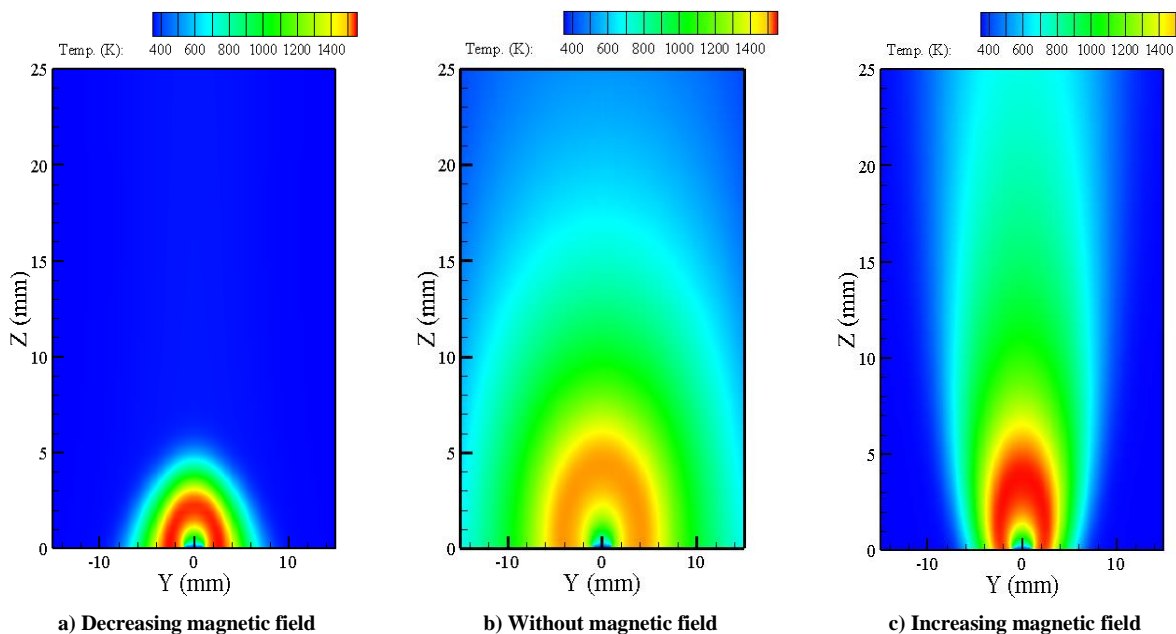


Figure 6- Magnetic field effect on temperature distribution in Methane flame

شکل ۶- تأثیر میدان مغناطیسی بر توزیع دما در شعله متان: الف) میدان مغناطیسی گرادیان کاهشی، ب) بدون میدان مغناطیسی، ج) میدان مغناطیسی گرادیان افزایشی

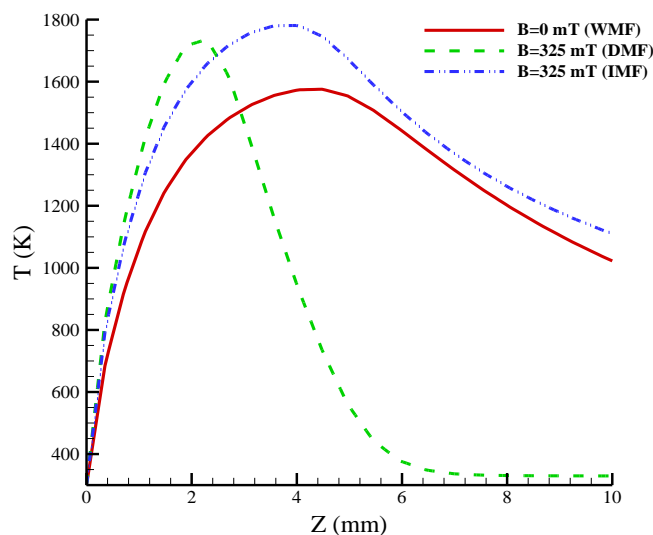


Figure 7- Magnetic field effect on temperature distribution versus the height above burner

شکل ۷- تأثیر میدان مغناطیسی بر توزیع دما با فاصله از بالای مشعل

کسر مخلوط^۱ پارامتر اسکالر بسیار مفیدی به خصوص در احتراق غیرپیش آمیخته است. اگر جریان سوخت با شار جرمی m_1 و جریان اکسیدکننده با شار جرمی m_2 نشان داده شود، در این صورت کسر مخلوط به صورت زیر تعریف می شود [۲۰]:

1. Mixture Fraction

$$Z = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (19)$$

که برای جریان سوخت برابر ۱ و برای جریان اکسیدکننده مقدار صفر خواهد بود ($0 \leq Z \leq 1$). اگر $Y_{O_2,2}$ کسر جرمی اکسیژن در جریان اکسیدکننده و $Y_{F,1}$ کسر جرمی سوخت در جریان سوخت باشد، در این صورت کسر مخلوط به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۰]:

$$Z = \frac{sY_F - Y_{O_2} + Y_{O_2,2}}{sY_{F,1} + Y_{O_2,2}} \quad (20)$$

که در آن s نسبت جرم استوکیومتری است. معادله (۲۰) برای سوخت متان به صورت زیر خواهد بود:

$$Z = \frac{4Y_{CH_4} - Y_{O_2} + 0.232}{4(1) + 0.232} = 0.9452Y_{CH_4} - 0.2362Y_{O_2} + 0.0548 \quad (21)$$

با توجه به معادله (۲۱)، در حالت استوکیومتری، کسر مخلوط برابر 0.548 است و با توجه به این مهم، موقعیت مکانی $Z = 0/0548$ در بالای شعله بیانگر ارتفاع شعله است.

در شکل ۸، خطوط هم‌تراز کسر مخلوط، در حالات مختلف، بدون حضور میدان مغناطیسی و در حضور میدان مغناطیسی، با گرادیان کاهشی و افزایشی، در صفحه $x=0$ نشان داده شده است. همان‌طور که گفته شد، میدان مغناطیسی از نفوذ شعله جلوگیری می‌کند که از شکل ۸ نیز به این نتیجه می‌توان رسید. با توجه به مطالب گفته شده در بالا و خطوط هم‌تراز کسر مخلوط، ارتفاع و پهنای شعله در حالات مختلف مطابق جدول ۲ است.

جدول ۲- تأثیر میدان مغناطیسی بر ارتفاع و پهنای شعله متان

Table2- Influence of magnetic field on the height and width of Mehtane flame

Applied magnetic field	Without magnetic field	Decreasing magnetic field	Increasing magnetic field
Flame Height (L) (mm)	4.92	2.45	4.4
Flame Width (w) (mm)	9.54	5.84	5.43

مشاهده می‌شود تغییرات ارتفاع در حالت گرادیان کاهشی قابل ملاحظه‌تر است، به طوری که با اعمال میدان کاهشی، ارتفاع نسبت به حالت اولیه نصف می‌شود. در حالت گرادیان افزایشی ۱۱٪ ارتفاع نسبت به حالت بدون میدان کاهش می‌یابد. کاهش ارتفاع و پهنای شعله متناسب با اندازه گرادیان میدان است. البته، کاهش پهنای شعله برای هر دو حالت میدان گرادیان کاهشی و افزایشی تقریباً برابر و در حدود ۴۰٪ است.

بر اساس معادله نیروی حجمی مغناطیسی وارد بر گونه‌های احتراق این رفتار را می‌توان تفسیر کرد. در حالت میدان گرادیان کاهشی، نیروی وارد بر اکسیژن به سمت میدان است. با قرار گرفتن شعله در میدان کاهشی و با افزایش جریان و به تبع آن افزایش گرادیان میدان، نیروی بیشتری به هوا برای جذب به سمت میدان وارد می‌شود. در این حالت، با افزایش جابه‌جایی به سمت میدان، ناحیه احتراقی کوچک‌تر و در نتیجه شعله کوچک‌تر به وجود می‌آید. در میدان گرادیان افزایشی، نیروی وارد بر اکسیژن به طرف بالا خواهد بود که در این حالت کاهش ارتفاع شعله نسبت به میدان گرادیان کاهشی کمتر خواهد بود.

تغییرات سرعت جریان، در ارتفاع ۴ میلی‌متر بالاتر از مشعل (خط AB در شکل‌های ۱ و ۲)، بدون حضور میدان مغناطیسی و در حضور میدان مغناطیسی کاهشی و افزایشی، در شکل ۹ نمایش داده شده است. با اعمال میدان مغناطیسی، هوا، که به دلیل حضور اکسیژن ماده‌ای پارامغناطیس است، به سمت میدان جذب می‌شود. به همین دلیل، در حضور میدان مغناطیسی سرعت افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه اعمال میدان باعث دفع محصولات احتراق از میدان می‌شود، هوا و محصولات در خلاف جهت هم خواهند بود. بنابراین، با دفع محصولات احتراق به سمت میدان ضعیف‌تر، سرعت در حالت گرادیان افزایشی بیشتر خواهد بود.

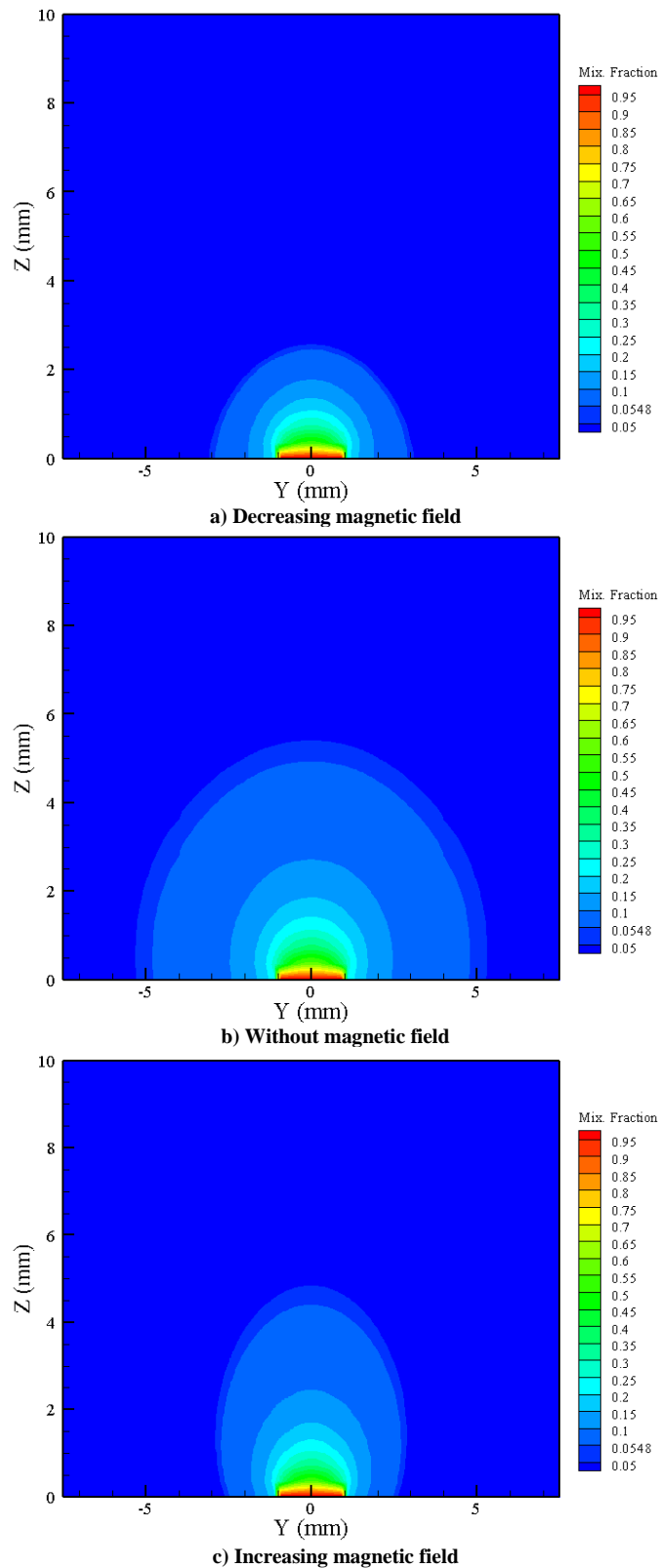


Figure 8- Magnetic field effect on mixture fraction distribution in Methane flame

شکل ۸- تأثیر میدان مغناطیسی بر توزیع کسر مخلوط در شعله متان: الف) میدان مغناطیسی گرادیان کاهشی، ب) بدون میدان مغناطیسی، ج) میدان مغناطیسی گرادیان افزایشی

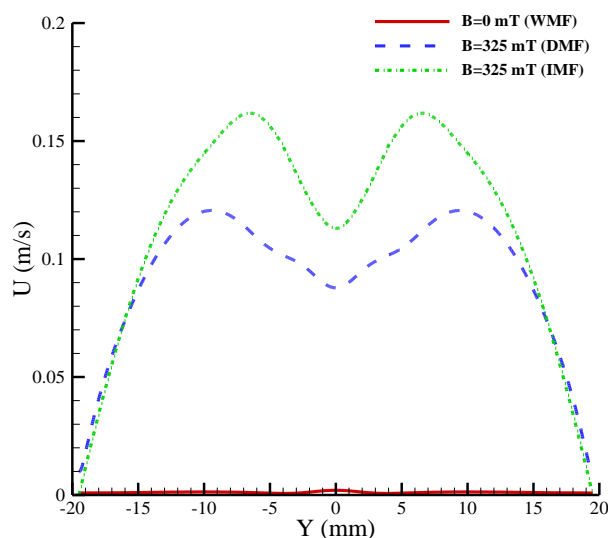


Figure 9- Magnetic field effect on flow velocity in $z=4\text{mm}$
 شکل ۹- تأثیر میدان مغناطیسی بر سرعت جریان در $z=4\text{mm}$

شکل ۱۰ تغییرات کسر جرمی متان نسوخته و دیگر محصولات احتراق را در ارتفاع ۴ میلی‌متر بالاتر از مشعل (خط AB در شکل‌های ۱ و ۲)، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالت بدون حضور میدان مغناطیسی بیشینه کسر جرمی متان نسوخته در مرکز شعله برابر ۰/۰۱۵۳ است. اما، در حضور میدان مغناطیسی کاهش این مقدار به ۰/۰۰۰۰۸ کاهش یافته است که نشان‌دهنده کاهش ۹۹ درصدی متان نسوخته با اعمال میدان مغناطیسی کاهش یافته است. در حضور میدان مغناطیسی افزایشی، این مقدار به ۰/۰۰۷۴ کاهش یافته است که کاهش ۵۲ درصدی متان نسوخته را به دنبال دارد. همچنین، در این شکل، تغییرات کسر جرمی اکسیژن نشان داده شده است. این نمودار تأثیر میدان مغناطیسی بر افزایش اکسیژن در نزدیکی منطقه احتراق و جذب آن به سمت میدان اعمال شده را نشان می‌دهد. در این حالت، کسر جرمی اکسیژن با اعمال میدان مغناطیسی گرادیان کاهش از مقدار کم ۰/۰۰۸۳ به ۰/۱۷۵۶ افزایش می‌یابد. در حالت میدان مغناطیسی گرادیان کاهش نیز، تراکم اکسیژن در نزدیکی مشعل و منطقه احتراق نسبت به حالت بدون میدان افزایش می‌یابد.

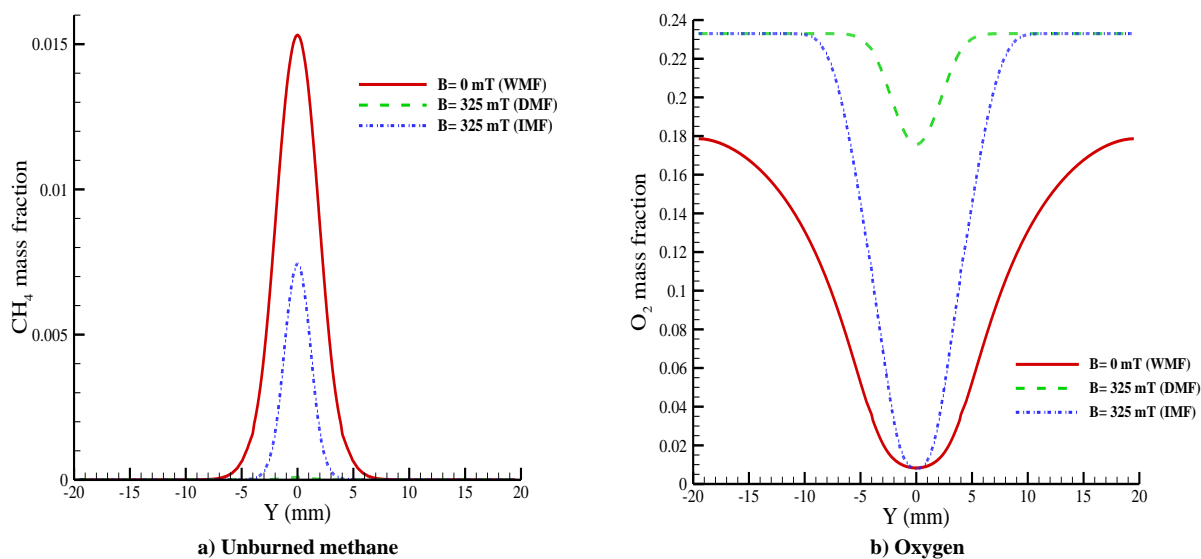


Figure 10- Magnetic field effect on the mass fraction of species in $z=4\text{mm}$
 شکل ۱۰- تأثیر میدان مغناطیسی بر کسر جرمی گونه‌ها در $z=4\text{mm}$ (الف) متان نسوخته، (ب) اکسیژن

در نمودار شکل ۱۱، تغییرات بخار آب و دی‌اکسید کربن، به‌عنوان محصولات احتراق، نمایش داده شده است. در واقع، این دو گونه، به‌دلیل دارا بودن خاصیت دیامغناطیسی در حضور میدان، از منطقه احتراق دفع و تراکم آن‌ها کم می‌شود. از این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت، با اعمال میدان مغناطیسی، میزان متان نسوخته کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد سوخت کامل‌تر می‌سوزد. مقدار اکسیژن مورد نیاز برای احتراق افزایش می‌یابد و در نتیجه آن ارتفاع شعله کاهش می‌یابد (به‌دلیل خاصیت پارامغناطیسی آن و جذب به‌سمت میدان بیشتر). این نکته قابل توجه است که این تغییرات در حالت گرادیان کاهشی محسوس‌تر و بهتر است. در حالت میدان با گرادیان افزایشی، نمودار تغییرات محصولات احتراق به محور شعله نزدیک می‌شود. در واقع، نیروی مغناطیسی بر روی سوخت به‌عنوان گونه دیامغناطیس، باعث ایجاد جابه‌جایی در محدوده شعله و حمایت بهتر از احتراق توسط واکنش‌دهنده‌ها و حذف محصولات می‌شود. این شرایط به افزایش سوختن کمک می‌کند و در نتیجه باعث افزایش دمای شعله می‌شود.

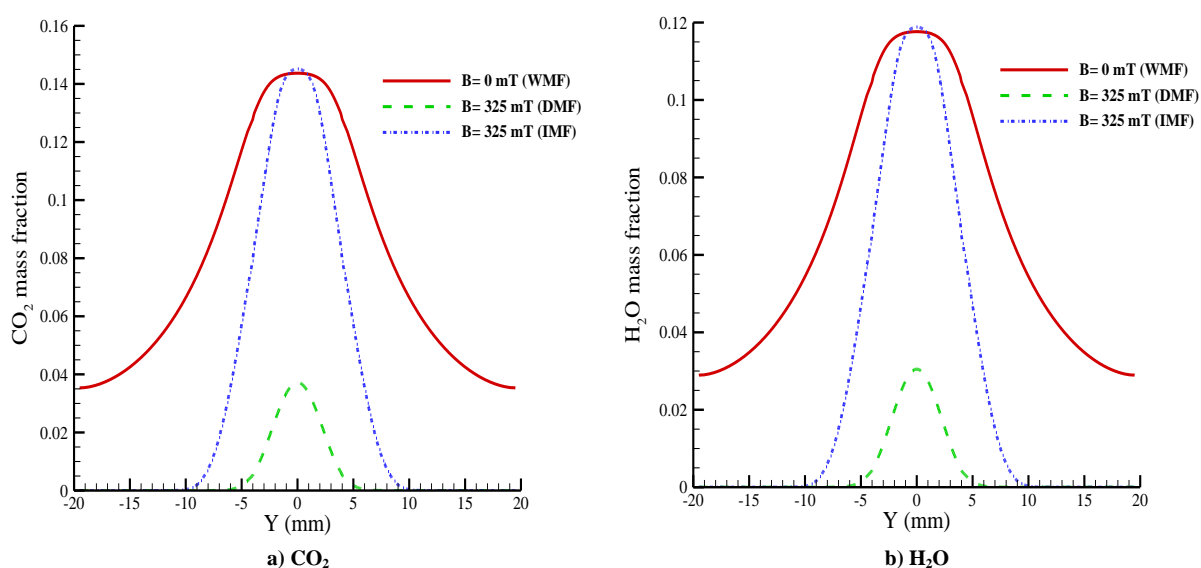


Figure 11- Magnetic field effect on the mass fraction of species in $z=4\text{mm}$

شکل ۱۱- تأثیر میدان مغناطیسی بر کسر جرمی گونه‌ها در $z=4\text{mm}$: الف) دی‌اکسید کربن، ب) بخار آب

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به شبیه‌سازی عددی تأثیر میدان مغناطیسی بر رفتار شعله غیرپیش‌آمیخته آرام متان پرداخته شد. در کار حاضر، از مدل احتراقی واکنش نرخ محدود و مکانیزم یک‌مرحله‌ای متان-هوا استفاده شده است. برای مدل‌سازی تشعشع از مدل P1 استفاده شده است.

در این مطالعه عددی به‌طور خلاصه موارد زیر حاصل شد:

- میدان مغناطیسی، با تأثیر بر روی شدت نفوذ هوا به منطقه احتراق، بر شکل و رفتار شعله تأثیر می‌گذارد، به‌نحوی که ارتفاع و پهنای شعله، با اعمال میدان مغناطیسی در حالت گرادیان کاهشی و افزایشی، کاهش می‌یابد.
- اعمال میدان مغناطیسی موجب افزایش دمای شعله غیرپیش‌آمیخته می‌شود. افزایش دمای شعله در حالت گرادیان کاهشی بیش از حالت گرادیان افزایشی است.
- حضور میدان مغناطیسی بر سرعت جریان می‌افزاید که این افزایش سرعت در حالت گرادیان افزایشی بیشتر از حالت گرادیان کاهشی است.
- میدان مغناطیسی باعث کاهش مقدار متان نسوخته می‌شود.

منابع

1. F. Khaldi, K. Messadek and A. M. Benselama, "Isolation of gravity effects on diffusion flames by magnetic field," *Microgravity Science and Technology*, 22, No. 1, 2010, pp. 1-5.
2. P. Gillon, J. Blanchard and V. Gilard, "Magnetic field influence on coflow laminar diffusion flames," *Russian Journal of Physical Chemistry B, Focus on Physics*, 4, No. 2, 2010, pp. 279-285.
3. E. Yamada, M. Shinoda, H. Yamashita and K. Kitagawa, "Numerical analysis of a hydrogen-oxygen diffusion flame in vertical or horizontal gradient of magnetic field," *Combustion science and technology*, 174, No. 9, 2002, pp. 149-164.
4. M. Faraday, "LXIV. On the diamagnetic conditions of flame and gases," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 31, No. 210, 1847, pp. 401-421.
5. S. Ueno and K. Harada, "Experimental difficulties in observing the effects of magnetic fields on biological and chemical processes," *IEEE Transactions on Magnetics*, 22, No. 5, 1986, pp. 868-873.
6. S. Ueno and K. Harada, "Effects of magnetic fields on flames and gas flow," *IEEE Transactions on Magnetics*, 23, No. 5, 1987, pp. 2752-2754.
7. T. Aoki, "Radicals' emissions and butane diffusion flames exposed to upward-decreasing magnetic fields," *Japanese Journal of Applied Physics*, 28, No. 5R, 1989, pp. 776,
8. T. Aoki, "Radical emissions and anomalous reverse flames appearing in upward-increasing magnetic fields," *Japanese journal of applied physics*, 29, No. 1R, 1990, pp. 181.
9. T. Aoki, "Radical emissions and butane diffusion flames exposed to uniform magnetic fields encircled by magnetic gradient fields," *Japanese Journal of Applied Physics*, 29, No. 5R, 1990, pp. 952.
10. N. I. Wakayama, "Magnetic promotion of combustion in diffusion flames," *Combustion and Flame*, 93, No. 3, 1993, pp. 207-214.
11. J. Baker and M. 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, No. 3, 2003, pp. 345-357.
12. S. Swaminathan, *Effects of magnetic field on micro flames*, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Louisiana State University, 2005.
13. W. f. Wu, J. Qu, K. Zhang, W. p. Chen and B. w. Li, "Experimental Studies of Magnetic Effect on Methane Laminar Combustion Characteristics," *Combustion Science and Technology*, 188, No. 3, 2016, pp. 472-480.
14. M. Shinoda, E. Yamada, T. Kajimoto, H. Yamashita and K. Kitagawa, "Mechanism of magnetic field effect on OH density distribution in a methane-air premixed jet flame," *Proceedings of the Combustion Institute*, 30, No. 1, 2005, pp. 277-284.
15. I. Barmina, R. Valdmanis, M. Zake, H. Kalis, M. Marinaki and U. Strautins, "Magnetic field control of combustion dynamics," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 53, No. 4, 2016, pp. 36-47,
16. I. Barmina, M. Zake, U. Strautins and M. Marinaki, "Effects Of Gradient Magnetic Field On Swirling Flame Dynamics," in *Proceedings of International Conference Engineering for Rural Development*, pp. 148-154, Jegvala, Latvia, 2017.
17. V. Gilard, P. Gillon, J. N. Blanchard and B. Sarh, "Influence of a horizontal magnetic field on a co-flow methane/air diffusion flame," *Combustion Science and Technology*, 180, No. 10-11, 2008, pp. 1920-1935.
18. S. Agarwal, M .Kumar and C. 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, pp. 214-221.
19. S. McAllister, J. Y. Chen and A. C. Fernandez-Pello, *Fundamentals of combustion processes*, Springer, New York, 2011.
20. N. Peters, "Combustion theory," *RWTH Aachen University (CEFRC Summer School)*, 2010.

English Abstract

Numerical Investigation of Magnetic Field Effect on Non-Premixed Methane Flame Behavior

Kiarash Kameli¹ and Hadi Pasdarsahri^{2*}

1- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, kiarash.kameli@modares.ac.ir

2- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, pasdar@modares.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2019.3.13, Received in revised form: 2019.05.24, Accepted: 2019.05.26)

In this paper, the effect of magnetic field with decreasing and increasing gradients on the non-premixed methane flame has been investigated. In order to investigate the effect of the magnetic field, Arrhenius combustion model and the one-stage methane-air mechanism have been used for simulation. The simulated results of the flame temperature are in a good agreement with experimental measurements. Results shows the flame deformation and its temperature increase affected by magnetic field gradient. By applying the flame in the magnetic field with decreasing and increasing gradients, the flame temperature increases and the flame height decreases. By applying a decreasing gradient magnetic field, the maximum temperature at the top of the burner reaches a height of 4.5 mm while in the absence of field, it is at a height of 2.5 mm. While under the influence of increasing gradient magnetic field, this value is 4 mm, indicating a decrease in the height of the flame. These changes are more obvious in the field with decreasing gradient. The magnetic field effects on methane and products mass fractions decrease. In decreasing and increasing gradients, unburned methane declined respectively 99% and 52% in comparison with no field.

Keywords: non-premixed flame, magnetic field, decreasing and increasing-gradient, paramagnetic species, magnetic force per unit volume