

بررسی عددی تأثیر میدان مغناطیسی بر شعله هیدروژن

حسین مهدوی مقدم^۱، جواد حسین پور^۲

۱ استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، mahdavy@kntu.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۴

چکیده

در این مقاله، تأثیر میدان مغناطیسی بر شعله نفوذی هیدروژن (کسر حجمی ۰/۳ هیدروژن و ۰/۷ نیتروژن) بر پارامترهایی چون شکل شعله، حرارت تولیدشده در اثر واکنش و میزان هیدروژن نسوخته در محصولات احتراق مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور میدان مغناطیسی با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳ و ۴ تسلا به‌طور مستقیم بر شعله اعمال و مشاهده می‌شود که با اعمال میدان مغناطیسی شکل شعله کوچکتر شده و ارتفاع آن کاهش می‌یابد. همچنین مقدار هیدروژن نسوخته در محصولات احتراق که در $Y=1$ میلی‌متر اندازه‌گیری شده، کاهش می‌یابد. با اعمال میدان مغناطیسی در جریان، نیروی لورنتس تولید می‌شود که با جهت جریان مخالفت می‌کند. نیروی لورنتس ایجادشده خود سبب تغییر در شکل شعله، حرارت تولیدشده در اثر واکنش و محصولات احتراق می‌شود. به‌عبارت دیگر این نیرو سبب برگشت هیدروژن نسوخته به‌سمت شعله می‌شود. همچنین مقدار حرارت تولیدشده در اثر واکنش با افزایش میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد و شعله نیز کوچکتر می‌شود. این نتایج اثبات می‌کند که اعمال میدان مغناطیسی بر شعله سبب احتراق کامل‌تر و بهینه‌تر می‌گردد. گفتنی است برای اعمال تأثیر میدان مغناطیسی بر معادلات حاکم (نیروی لورنتس و نرخ گرمایش ژول)، از برنامه‌نویسی سی. استفاده شده است.

واژگان کلیدی

احتراق، شعله هیدروژن، میدان مغناطیسی، مگنتوهیدرودینامیک

۱. مقدمه

بر پدیده احتراق اثرگذار باشد [۱]. فارادی، در سال ۱۸۴۷ م، آزمایش خود را بر شعله یک شمع مومی^۱ با اعمال میدان مغناطیسی انجام داد و مشاهده کرد که با اعمال میدان، شعله از

محققان برای کنترل پدیده احتراق، آزمایشات گوناگونی روی سوخت‌های مختلف و عوامل تأثیرگذار بر شعله انجام داده و دریافته‌اند که عواملی چون میدان الکتریکی و مغناطیسی می‌تواند

شکل عدسی خارج و به شکل دیسکی تمایل دارد [۲]. حدس و گمان‌های اولیه این بود که تغییر رفتار شعله به دلیل تأثیر میدان مغناطیسی با گازهای یونیزه شده در یک شعله است. اما با استفاده از یک آنالیز ابعادی، بعداً نشان داده شد که تأثیر میدان مغناطیسی با گاز یونیزه شده نسبت به اثر میدان مغناطیسی بر خاصیت پارامغناطیسی دیامغناطیسی مواد (هوا، محصولات و واکنش‌دهنده‌ها) برای شعله نفوذی ناچیز است [۳]. همچنین واکایاما آزمایش خود را برای دو حالت شعله نفوذی^۲ و شعله نیمه پیش‌مخلوط^۳ با سوخت متان انجام داد. وی ابتدا شعله را تحت میدان مغناطیسی غیریکنواخت کاهشی (میدانی که در جهت جریان، شدت میدان مغناطیسی آن کم می‌شود) قرار داد و مشاهده کرد مقدار بیشتری هوا به سمت پایه شعله جذب می‌شود که به دلیل خاصیت پارامغناطیسی^۴ اکسیژن است. همچنین محصولات احتراق به طور مؤثری از ناحیه واکنش به خاطر خاصیت دیامغناطیسی^۵ محصولات، رانده می‌شوند (محصولات در راستای کاهش میدان شتاب می‌گیرند). این جذب اکسیژن بیشتر سبب افزایش دما و کوچکتر شدن شعله متان می‌شود [۱، ۴]. گفتنی است این تغییرات، برای شعله نفوذی بیشتر از شعله نیمه پیش مخلوط بوده و در شعله کاملاً پیش‌مخلوط^۶ با اعمال میدان مغناطیسی هیچ تغییری در رفتار شعله مشاهده نکردند. همچنین وی آزمایش دیگری روی ترکیب گاز نیتروژن و بخار آب انجام داد تا علت تغییر رفتار شعله را بررسی کند. او انحراف مخلوط گاز نیتروژن و اکسیژن در این آزمایش به خاصیت پارامغناطیسی - دیامغناطیسی مواد نسبت داد. میدان مغناطیسی غیریکنواخت، نیرویی را به مواد پارامغناطیس القا می‌کند که سبب افزایش جابه‌جایی موادی که دارای خواص پارامغناطیس هستند، می‌شود. یکی از مواد پارامغناطیس، اکسیژن است در حالی که نیتروژن، سوخت و محصولات احتراق دیامغناطیس هستند. از طرفی چون اکسیژن بیشترین شرکت را در احتراق دارد و نقش عمده‌ای ایفا می‌کند، با اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت، این جابه‌جایی باعث جذب اکسیژن به ناحیه شعله و کاهش سطح شعله می‌شود [۱]. علاوه بر موارد فوق، خلدی و همکاران (۲۰۱۰) آزمایش جالبی را برای بی‌وزن کردن شعله و خنثی‌سازی اثر بویانسی به وسیله میدان مغناطیسی به سمت بالا (مثبت) انجام و نشان دادند که میدان مغناطیسی بر گازهای پارامغناطیسی، که گازهای دیامغناطیس را احاطه کرده (با سطح مشترک با ضخامت قابل

اغماض)، اثر می‌گذارد. بنابراین تحت تأثیر میدان مغناطیسی روبه بالا، هوا یک نیروی جسمی روبه بالا را به خود می‌بیند. آنها به مقداری بحرانی برای شدت میدان مغناطیسی رسیدند که در این مقدار، نیروی بویانسی با نیروی میدان مغناطیسی کاملاً خنثی شده و احتراق فقط به صورت دیفیوژن رخ می‌دهد که منجر به کروی شدن شکل شعله و آبی شدن رنگ آن می‌شود. از طرفی، چون شعله کاملاً آبی می‌شود، شعله آبی بیانگر عدم تشکیل دوده است. درحقیقت، دوده به خاطر کاهش دما تشکیل نمی‌شود و بیانگر این است که دما پایین‌تر از آستانه تشکیل دوده^۷ است. علت پایین آمدن دما این‌گونه بیان می‌شود که چون تنها عامل در احتراق، دیفیوژن است، تأمین اکسیژن پایین می‌آید که سبب کاهش نرخ حرارت آزاد شده احتراق می‌شود و در نهایت پایین آمدن دمای شعله را به دنبال خواهد داشت [۵].

در آزمایش دیگری لگرس و همکاران (۲۰۱۱) روی مشعل با جریان هم راستا^۸، با قراردادن شعله در معرض گرادیان شدید روبه پایین ($B dB/dZ < 0$) و تغییر کسر مولی اکسیژن و شدت میدان مغناطیسی، به بررسی شروع ناپایداری^۹ در شعله پرداختند. درحقیقت شروع ناپایداری در شعله به نوعی نشان‌دهنده انتقال شعله از جریان آرام به توربولانت و ناپایداری است. آنها مشاهده کردند که با افزایش مقدار اکسیژن، همچنین افزایش ∇B^2 شعله ناپایدار می‌شود. در حقیقت، افزایش مقدار اکسیژن ارتفاع شعله را به خاطر جابه‌جایی بهتر اکسیژن به ناحیه کناری شعله کاهش می‌دهد و از طرفی افزایش گرادیان مغناطیسی روبه پایین سبب بهبود جابه‌جایی ترمومغناطیسی (جابه‌جایی هوا در اثر اعمال میدان مغناطیسی) و سرعت بخشیدن به جریان اکسیدکننده می‌شود [۶]. همچنین گیلارد و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت افقی بر شعله نفوذی آرام با سوخت متان پرداختند و مشاهده کردند که میدان مغناطیسی سبب کاهش ارتفاع برخاستگی^{۱۰} شعله می‌شود [۷]. ارتفاع برخاستگی شعله این‌گونه تعریف می‌شود که وقتی جریان جرمی سوخت از یک مقدار بحرانی تجاوز کند، باعث می‌شود که پایه شعله^{۱۱} (ابتدا شروع شعله) از سر مشعل جدا شود و در شعله نفوذی در ارتفاعی بالاتر معلق بماند، آنگاه فاصله سر مشعل تا پایه شعله، که شعله از جای خود بلند شده است، را ارتفاع برخاستگی شعله می‌گویند [۸]. برخلاف آزمایش‌هایی که واکایاما و بیکر روی میدان مغناطیسی کاهشی انجام دادند، گیلن و همکاران سوخت متان را

تحقیقات چندانی در زمینه اثر میدان مغناطیسی یکنواخت بر شعله به صورت عددی انجام نشده است. لذا در این مقاله، ابتدا میدان مغناطیسی غیریکنواخت به صورت مستقیم به شعله هیدروژن اعمال شده و با نتایج عددی کینوشیتا و همکاران مقایسه می‌شود. سپس اثر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت با مقادیر مختلف بر شعله هیدروژن مورد بررسی قرار می‌گیرد. گفتنی است برای بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر شعله هیدروژن از نرم‌افزار انسیس فلونت استفاده شده است.

۲. تعریف مسئله

در این مقاله ترکیب احتراق سوخت هیدروژن با نیتروژن در نظر گرفته شده است که کسر مولی هیدروژن $0/3$ و کسر مولی نیتروژن در سوخت $0/7$ می‌باشد. لازم به ذکر است که هدف از ترکیب نیتروژن پایین آوردن دمای شعله است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، سوخت از نازل به محیط با هوای ساکن خارج می‌شود و اثر گرانش نیز در نظر گرفته شده است. باتوجه به اینکه قطر نازل ۲ میلی‌متر است، دامنه با ابعاد 10×20 میلی‌متر ابعاد مناسبی برای حل مسئله خواهد بود. همچنین سرعت متوسط سوخت در نازل ۵ سانتی‌متر بر ثانیه است. در این شبیه‌سازی ۸ جزء شیمیایی همچون اکسیژن، هیدروژن، منو اکسید هیدروژن و ... در نظر گرفته شده و از انتقال حرارت تشعشعی صرف‌نظر شده است. همچنین نفوذ دما و نفوذ فشار در معادلات لحاظ نشده است [۱۲]. معادلات مومنتوم، انرژی و معادله القایی میدان مغناطیسی به صورت کوپل حل می‌شوند؛ برای گسسته‌سازی این معادلات از روش خلاف جهت باد با مرتبه 1^2 در نرم‌افزار استفاده شده‌اند. دامنه محاسباتی نیز در شکل ۱ قابل مشاهده است.

۳. معادلات حاکم

۳-۱. مکانیزم مگنتوهیدرودینامیک و معادلات ماکسول

اصطلاحاً به مطالعه برهم‌کنش میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با جریان سیال رسانا، مگنتوهیدرودینامیک یا به صورت ساده ام. اچ. دی. گفته می‌شود [۱۳-۱۴]. کوپلینگ بین میدان جریان سیال و میدان مغناطیسی با دو اثر حیاتی و عمده می‌تواند بیان شود [۱۴]: القای جریان الکتریکی به سبب جابه‌جایی مواد رسانا در یک میدان مغناطیسی و اثر نیروی لورنتس که حاصل تعامل جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی است.

در حضور میدان افزایشی با نوعی متفاوت نسبت به دو آزمایش اول انجام دادند. محققان در آزمایش خود محدوده‌ای برای پایداری شعله به دست آوردند و همچنین میزان ارتفاع برخاستگی شعله را با اعمال میدان افزایشی بررسی و مشاهده کردند که میدان مغناطیسی بر کاهش ارتفاع برخاستگی شعله اثر می‌گذارد و هرچه شدت گرادیان میدان مغناطیسی بیشتر باشد، میزان برخاستگی شعله از سر مشعل بیشتر کاهش می‌یابد [۸]. پژوهشی که توسط سار و همکاران (۲۰۱۴) انجام شد نیز نشان داد که میدان مغناطیسی بر ارتفاع برخاستگی شعله تأثیرگذار است. آنها با ثابت نگه داشتن سرعت سوخت و افزایش سرعت هوا بدون اعمال میدان مغناطیسی مشاهده کردند که ارتفاع برخاستگی شعله افزایش می‌یابد و اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت منفی سبب کاهش ارتفاع برخاستگی شعله می‌شود که با نتایج تجربی گیلارد و گیلن مطابقت دارد [۹].

بیکر 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 نزدیک خاموشی 1^2 را بررسی کرد. وی مشاهده کرد که در اثر اعمال میدان مغناطیسی، نقطه نزدیک خاموشی بالا می‌رود. گفتنی 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 جریان بیشتر شود. آنها علت را این‌گونه بیان کردند که در اثر حضور میدان و خاصیت پارامغناطیس بودن اکسیژن، اکسیژن در نزدیکی پایه شعله متراکم شده و باعث پایین آمدن دمای منشورها (در این آزمایش از دو تیغه منشوری با مغناطیس دائم برای اعمال میدان استفاده شده است) می‌شود [۱۰]. به همین دلیل باید نرخ خروج جریان بیشتر شود تا شعله خاموش نشود. آزمایش قابل توجه دیگری توسط وو و همکاران (۲۰۱۵) انجام شد و اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت بر پارامترهای احتراق متان با جریان آرام و غلظت تولیدشده NOx را بررسی کرد. آنها در این آزمایش مشاهده کردند که اعمال میدان مغناطیسی سبب کاهش ارتفاع شعله شده و میزان تولید NOx به مقدار ۶۰ درصد تا یک ارتفاع مشخص کاهش می‌یابد که این کاهش بستگی به شدت میدان دارد [۱۱]. همان‌طور که مشاهده شد، آزمایشات تجربی زیادی در این زمینه انجام شده است و تأثیر میدان مغناطیسی بر شعله از زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با این وجود

معادلات ماکسول و قانون اهم، معادله القای مغناطیسی به دست می‌آید که این معادله کوپلی بین میدان جریان و میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند. برای میدان سرعت سیالی در یک میدان مغناطیسی قانون اهم به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود [۱۴].

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B}) \quad (7)$$

از معادلات اهم و ماکسول، معادله القایی به صورت معادله ۸ حاصل می‌گردد [۱۴-۱۵]:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{B} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{U} \quad (8)$$

طبق رابطه آمپر، از میدان مغناطیسی حل شده، دانسیته جریان به صورت رابطه ۹ محاسبه می‌شود [۱۴].

$$\vec{J} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{B} \quad (9)$$

۲-۳. معادلات جریان حاکم بر احتراق همراه با اثر میدان مغناطیسی

اکنون با توجه به جریان الکتریکی القاشده، به وسیله معرفی یک جمله چشمه جدید به معادله ممتنم و معادله انرژی سیال، کوپل ام. اچ. دی. حاصل می‌شود. برای معادله ممتنم جمله اضافه شده، نیروی لورنتس است که از رابطه ۱۰ به دست می‌آید [۱۴].

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (10)$$

بنابراین معادله ممتنم، با در نظر گرفتن نیروهای حجمی شامل نیروی گرانش و نیروی لورنتس، در معادله ۱۱ اصلاح می‌گردد.

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \left(\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \right) + \rho g_i + j_i \times B_i \quad (11)$$

for $i = 1, 2, 3$

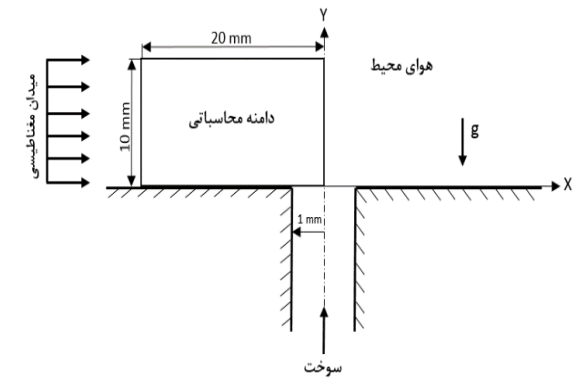
برای معادله انرژی جمله چشمه اضافه شده، نرخ گرمایش ژول است که به صورت معادله ۱۲ تعریف می‌شود [۱۴].

$$Q = \frac{1}{\sigma} \vec{J} \cdot \vec{J} \quad (12)$$

پس با فرض صفر در نظر گرفتن سایر نیروهای جسمی و اضافه شدن این جمله به معادله انرژی می‌توان نوشت:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} - \frac{Dp}{Dt} = -\nabla \cdot q + \phi + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_k V_k + \frac{1}{\sigma} \vec{J} \cdot \vec{J} \quad (13)$$

در حالت کلی، جریان القاشده و نیروی لورنتس تمایل به مخالفت با سازوکار به وجود آورنده خود دارند. از اینرو جابه‌جایی که سبب القای الکترومغناطیس می‌شود، به صورت سیستماتیک به وسیله نیروی لورنتس به وجود آمده، متوقف می‌شوند. همچنین القای الکتریکی، در حضور یک میدانی که با زمان تغییر می‌کند می‌تواند رخ دهد [۱۴]. این اثر باعث تحریک بیشتر در جابه‌جایی سیال به وسیله نیروی لورنتس می‌شود. میدان‌های الکترومغناطیس به وسیله معادلات ماکسول به صورت معادلات ۱ تا ۴ توصیف می‌شوند [۱۴]:



شکل ۱. دامنه محاسباتی استفاده شده برای شعله هیدروژن

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (4)$$

که در این روابط B ، E ، D ، q ، H و J به ترتیب میدان مغناطیسی (تسلا)، میدان الکتریکی، میدان القایی برای میدان الکتریکی، دانسیته شار الکتریکی، میدان القایی برای میدان مغناطیسی و دانسیته جریان الکتریکی می‌باشند. همچنین H و D به صورت روابط ۵ و ۶ تعریف می‌شوند [۱۴].

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (6)$$

به طوری که در این روابط μ قابلیت نفوذ مغناطیسی و ε ثابت دی‌الکتریک (گذردهی الکتریکی) است. در بررسی تعامل بین میدان جریان و میدان الکترومغناطیس، دانستن دانسیته جریان به سبب القاء ضروری است. برای ارزیابی دانسیته جریان، از

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (22)$$

$$\vec{D} = e\vec{E} = 0 \quad (23)$$

$$\vec{q} = \nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (24)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \quad (25)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B} \quad (26)$$

در نهایت، معادله القایی (معادله ۸) با اعمال فرضیات به صورت ۲۷ حاصل می‌گردد:

$$(U \cdot \nabla) \vec{B} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{U} \quad (27)$$

۴. بررسی و تحلیل نتایج

در این بخش به بررسی نتایج تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت برشعله هیدروژن با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳ و ۴ تسلا پرداخته می‌شود. تأثیر میدان مغناطیسی با استفاده از کدهای نوشته شده برای نیروی لورنتس و نرخ گرمایش ژول در برنامه‌نویسی سی. اعمال شده است و تغییرات شکل شعله، میزان حرارت تولیدشده بر اثر واکنش و کسر مولی محصولات احتراقی در $Y=1 \text{ mm}$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. گفتنی است کدهای مربوط به نیروی لورنتس (معادلات ۱۶ و ۱۷) و نرخ گرمایش ژول (معادله ۱۸) به ترتیب به عنوان جملات چشمه برای معادلات ممتوم (در جهت x و y) و معادله انرژی در نرم‌افزار فلوئنت تعریف شده‌اند که پس از حل میدان سرعت، معادله القای میدان مغناطیسی (معادله ۸) حل شده و با استفاده از مقادیر به دست آمده میدان برای هر سلول از شبکه، کدهای مربوط به نیروی لورنتس و نرخ گرمایش ژول اعمال می‌شوند. اما پیش از اینکه اثر میدان مغناطیسی یکنواخت بر شعله هیدروژن بررسی شود، ابتدا به مقایسه حل انجام شده در این روش با نمونه کار عددی انجام شده توسط کینوشیتا و همکاران با اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت بر شعله هیدروژن پرداخته می‌شود. در شکل ۲ پروفیل دما در این تحقیق (شکل الف) و کینوشیتا و همکاران (شکل ب) نمایش داده شده است. در شکل ۳ نتایج کسرهای جرمی اجزای اکسیژن، بخار آب و هیدروژن بدون اعمال میدان مغناطیسی در تحقیق حاضر با داده‌خوانی از نتایج کینوشیتا و همکاران مقایسه شده است.

آنها بیشترین دمای شعله قبل از میدان ۱۷۴۷ درجه کلوین و با اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت ۱۶۷۴ درجه کلوین

که در آن فشار، h آنتالپی، Y_k کسر جرمی گونه k ام و V_k سرعت دیفیوژن گونه k ام است. با توجه به اینکه مسئله مورد نظر دوبعدی بوده و با فرض پایا و میدان الکتریکی صفر در نظر گرفته شده‌اند، معادلات به صورت روابط ۱۴ و ۱۵ ساده سازی می‌شوند. به این ترتیب با اعمال این فرضیات بر معادله ۷ می‌توان نوشت:

$$\vec{j} = \sigma (\vec{U} \times \vec{B}) = \sigma (u_x B_y - u_y B_x) \vec{k} \quad (14)$$

با جایگذاری معادله ۱۴ در معادله ۱۰ می‌توان نوشت:

$$F = J \times B = -\sigma B_y (u_x B_y - u_y B_x) \vec{i} + \sigma B_x (u_x B_y - u_y B_x) \vec{j} \quad (15)$$

در نتیجه نیروی لورنتس به صورت روابط ۱۶ و ۱۷ تفکیک می‌شوند:

$$F_x = -\sigma B_y (u_x B_y - u_y B_x) \quad (16)$$

$$F_y = \sigma B_x (u_x B_y - u_y B_x) \quad (17)$$

همچنین با استفاده از معادله ساده شده ۱۴ و جایگذاری آن در

معادله ۱۲، نرخ گرمایش ژول به صورت ۱۸ به دست می‌آید:

$$Q = \frac{1}{\sigma} \vec{j} \cdot \vec{j} = \sigma (u_x B_y - u_y B_x)^2 \quad (18)$$

در نتیجه معادله ممتوم حاکم بر جریان با جایگذاری معادلات

۱۶ و ۱۷ در معادله ۱۱ و با توجه به مدل دوبعدی و فرضیات

مسئله، به صورت معادلات ۱۹ و ۲۰ اصلاح می‌گردند:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g + \rho F_x \quad (19)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g + \rho F_y \quad (20)$$

همچنین با جایگذاری رابطه ساده شده ۱۸ در ۱۳ و با

ساده‌سازی مشتق مادی در رابطه ۱۳، معادله انرژی به صورت ۲۱

ساده می‌شود:

$$\rho (U \cdot \nabla) h - (U \cdot \nabla) p = -\nabla \cdot q + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_k V_k + \sigma (u_x B_y - u_y B_x)^2 \quad (21)$$

گفتنی است جریان شعله آرام در نظر گرفته شده، لذا تلفات در

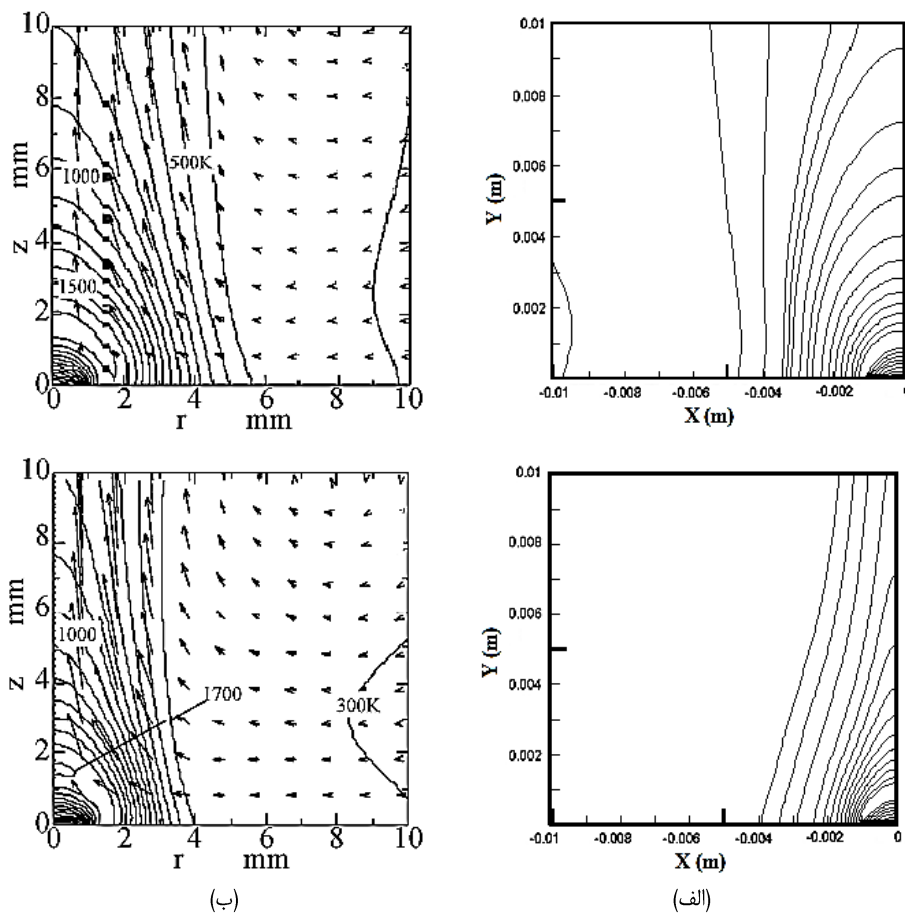
سرعت‌های پایین ناچیز است. به همین ترتیب معادلات ۱ تا ۶

(معادلات ماکسول) با فرض پایابودن و عدم وجود میدان

الکتریکی به صورت ۲۲ تا ۲۶ ساده می‌شوند.

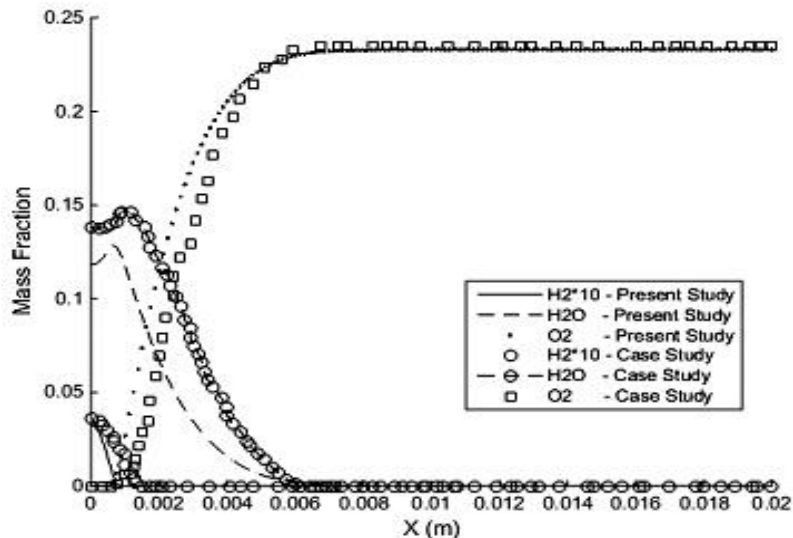
این ملکول به سمت میدان مغناطیسی جذب می‌شود. لذا تأمین اکسیژن در ناحیه شعله افزایش می‌یابد و واکنش سریع‌تر صورت می‌گیرد که سبب کوچکتر شدن شعله (ارتفاع و عرض) می‌شود. اکنون تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت به صورت مستقیم بر شعله هیدروژن با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳ و ۴ تسلا بررسی می‌شود. لذا نتایج حاصل از تغییرات مقدار حرارت تولید شده بر اثر واکنش صورت گرفته (انرژی حاصل از واکنش) با اعمال میدان مغناطیسی در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

به دست آوردند. همچنین در تحقیق حاضر بیشترین دمای شعله بدون میدان و با اعمال میدان مغناطیسی ۱۶۳۰ و ۱۵۷۳ درجه کلوین به ترتیب حاصل شده‌اند. با مقایسه پیشینه دما مشاهده می‌شود که میزان خطا ۶/۶ درصد برای حالت بدون میدان و ۶/۰۳ درصد برای حالت با اعمال میدان مستقیم حاصل شده است که این مقدار خطا به دلیل اختلاف جزئی در جزئیات حل عددی قابل پیش‌بینی است. همچنین با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که اعمال میدان مغناطیسی سبب جذب بیشتر اکسیژن به ناحیه شعله می‌شود. به عبارت دیگر به دلیل خاصیت پارامغناطیسی اکسیژن،



شکل ۲. نمایی از الف) خطوط هم‌تراز دما در تحقیق حاضر، ب) کینوشیتا و همکاران

دو شکل فوقانی بدون اعمال میدان و دو شکل تحتانی با اعمال شدت میدان مغناطیسی $H \frac{\partial H}{\partial z} = -40 \frac{T^2}{m}$



شکل ۳. کسرهای جرمی حاصل شده برای اجزای شیمیایی اکسیژن، بخار آب و هیدروژن در $Y=1 \text{ mm}$ در شعله هیدروژن بدون اعمال میدان مغناطیسی

$X=0$ نشان‌دهنده کوچکتر شدن شعله می‌باشد؛ علت این رفتار به دلیل خاصیت پارامغناطیسی اکسیژن، دیامغناطیسی محصولات احتراق و رفتار نیروی لورنتس ایجاد شده بر اثر اعمال میدان مغناطیسی تعبیر می‌شود. با توجه به معادله ۷، نیروی لورنتس با حضور میدان مغناطیسی به همراه میدان جریان یا میدان الکتریکی ایجاد می‌شود. لذا چون میدان الکتریکی صفر فرض شده است، میدان سرعتی که در دامنه وجود دارد، سبب ایجاد نیروی لورنتس می‌شود. این نیرو که با جهت جریان مخالفت می‌کند، نیز سبب اختلاط بهتر با اکسیژن می‌شود و اکسیژن را به ناحیه شعله جذب می‌کند. از طرفی با توجه به پارامغناطیس بودن اکسیژن که به ناحیه میدان مغناطیسی جذب می‌شود، این رفتار نیز انتظار می‌رود. دلیل دیگری که سبب کاهش ارتفاع شعله می‌شود، نیروی لورنتس ایجاد شده در دامنه است که سبب ایجاد بویانسی مغناطیسی می‌شود. لذا نیروی ایجاد شده توسط میدان مغناطیسی به نیروی وزنی اضافه می‌شود و سبب افزایش بویانسی می‌شود. اما به دلیل سبک بودن ملکول هیدروژن، نیروی لورنتس ایجاد شده بزرگتر از نیروی بویانسی مغناطیسی خواهد بود. لذا با افزایش میدان مغناطیسی شعله کوچکتر می‌شود. گفتنی است با اضافه کردن ماژول MHD در فلوننت، مقادیر خواص مغناطیسی مواد و گونه‌های شیمیایی نیز از دیتابیس نرم‌افزار به‌طور خودکار اضافه می‌گردند. در شکل ۸ با مقایسه خطوط هم‌تراز دما با مقادیر میدان مغناطیسی مختلف این موضوع به‌وضوح دیده می‌شود. از طرفی با توجه به بررسی میزان تغییرات حرارت تولید شده بر اثر واکنش

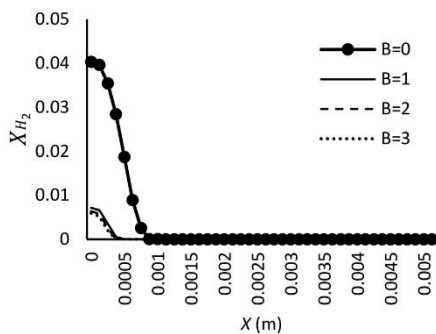
با توجه به بررسی تغییرات مقدار حرارت تولید شده در شعله با اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت، مشاهده می‌شود که حرارت تولید شده افزایش می‌یابد. همچنین افزایش حرارت تولید شده (تولید انرژی بیشتر)، نشان‌دهنده افزایش مقدار واکنش به صورت ضمنی می‌باشد. لذا افزایش واکنش به معنای انفعال بیشتر سوخت با هوا (سرعت خروجی سوخت از چراغ بنزن^{۱۴} ثابت است) بوده و خود بیانگر احتراق کامل‌تر می‌باشد که در شکل ۲ این مطلب نشان داده شده است. همچنین تغییرات کسر مولی هیدروژن نسوخته، اکسیژن و بخار آب در $Y=1 \text{ mm}$ در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش میدان مغناطیسی، هیدروژن نسوخته کاهش می‌یابد که مقادیر آن در جدول ۱ در $X=0$ و $Y=1 \text{ mm}$ آورده شده‌اند. لذا کاهش هیدروژن نسوخته نشان‌دهنده واکنش بیشتر سوخت و هوا می‌باشد که به احتراق کامل‌تر تعبیه می‌شود. همچنین با توجه به شکل‌های ۶ و ۷، میزان تأمین اکسیژن در ناحیه شعله افزایش می‌یابد و نشان می‌دهد با افزایش میدان مغناطیسی ارتفاع شعله کوچکتر می‌شود که این ارتفاع از خروجی چراغ بنزن تا بالاترین نقطه شعله سنجیده می‌شود. به همین ترتیب کوچکتر شدن شکل شعله در نمودار کسر مولی مقدار بخار آب (شکل ۷) نیز به روشنی مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، چون بخار آب یکی از محصولات احتراق است، گراف‌های کسر مولی این ملکول در شکل ۷ به‌نحوی نشان‌دهنده محل واکنش در هر نقطه از شعله می‌باشند. لذا کشیده شدن شعله با توجه به نمودارهای بخار آب به سمت محور

انجام شده (شکل ۴) با اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت، مشاهده می‌شود که مقدار واکنش افزایش می‌یابد.

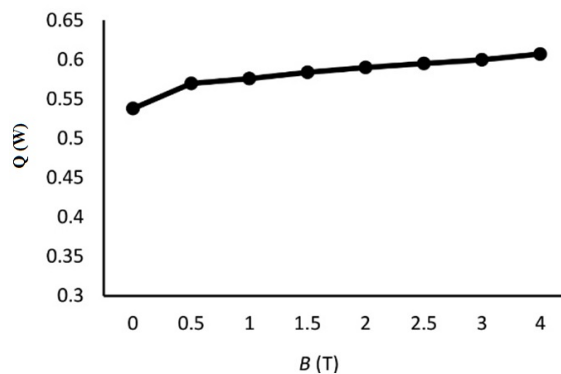
۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر میدان مغناطیسی بر شعله با سوخت هیدروژن بررسی و نتایج پارامترهایی چون شکل شعله، مقدار حرارت تولیدشده در اثر واکنش و میزان آلاینده‌گی برخی از محصولات احتراق حاصل شد. با بررسی کسر حجمی هیدروژن نسوخته در $X=0$ و $Y=1$ میلی‌متر مشاهده شد که با افزایش میدان مغناطیسی، مقدار هیدروژن نسوخته کاهش می‌یابد و احتراق کامل‌تری صورت می‌گیرد. همچنین با توجه به نمودارهای ۵ و ۶ نتیجه گرفته شد که به دلیل خاصیت پارامغناطیسی اکسیژن، این ملکول به سمت شعله جذب شود. لذا سوخت، هوای مورد نیاز خود را برای واکنش زودتر دریافت می‌کند و با افزایش میدان مغناطیسی ارتفاع آن کوچکتر می‌شود که با نتایج تجربی گیلن،

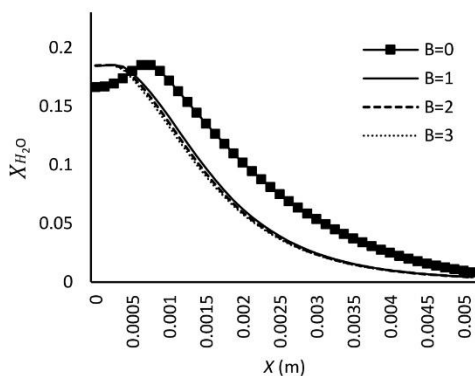
واکایاما و نتایج عددی کینوشیتا همخوانی دارد. دلیل دیگر کاهش ارتفاع شعله وجود نیروی لورنتس است؛ نیروی لورنتس ایجادشده در دامنه سبب ایجاد بویانسی مغناطیسی می‌شود. از طرفی، به دلیل سبک‌بودن ملکول هیدروژن، نیروی لورنتس ایجادشده بزرگتر از نیروی بویانسی مغناطیسی خواهد بود و با افزایش میدان مغناطیسی، شعله نیز کوچکتر خواهد شد. با تحلیل مقدار حرارت تولیدشده بر اثر واکنش مشاهده می‌شود که با اعمال میدان مغناطیسی، مقدار حرارت تولیدشده در اثر واکنش صورت گرفته افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، به دلیل واکنش بهتر سوخت با هوا، حرارت تولیدشده افزایش می‌یابد که خود نشان‌دهنده احتراق کامل‌تر می‌باشد. نتایج حاصل‌شده با توجه به مقدار هیدروژن نسوخته و حرارت تولیدشده در اثر واکنش شیمیایی نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی عامل مثبتی در پدیده احتراق به‌شمار می‌رود و سبب احتراقی کامل‌تر و بهینه‌تر می‌گردد.



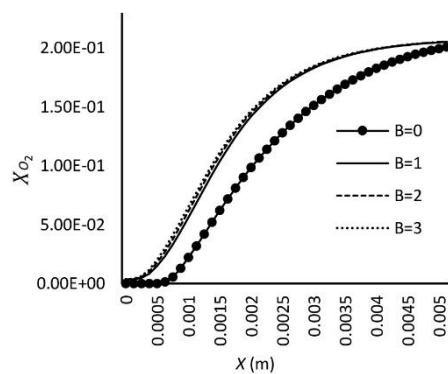
شکل ۵. تأثیر تغییرات میدان مغناطیسی بر کسر مولی هیدروژن نسوخته



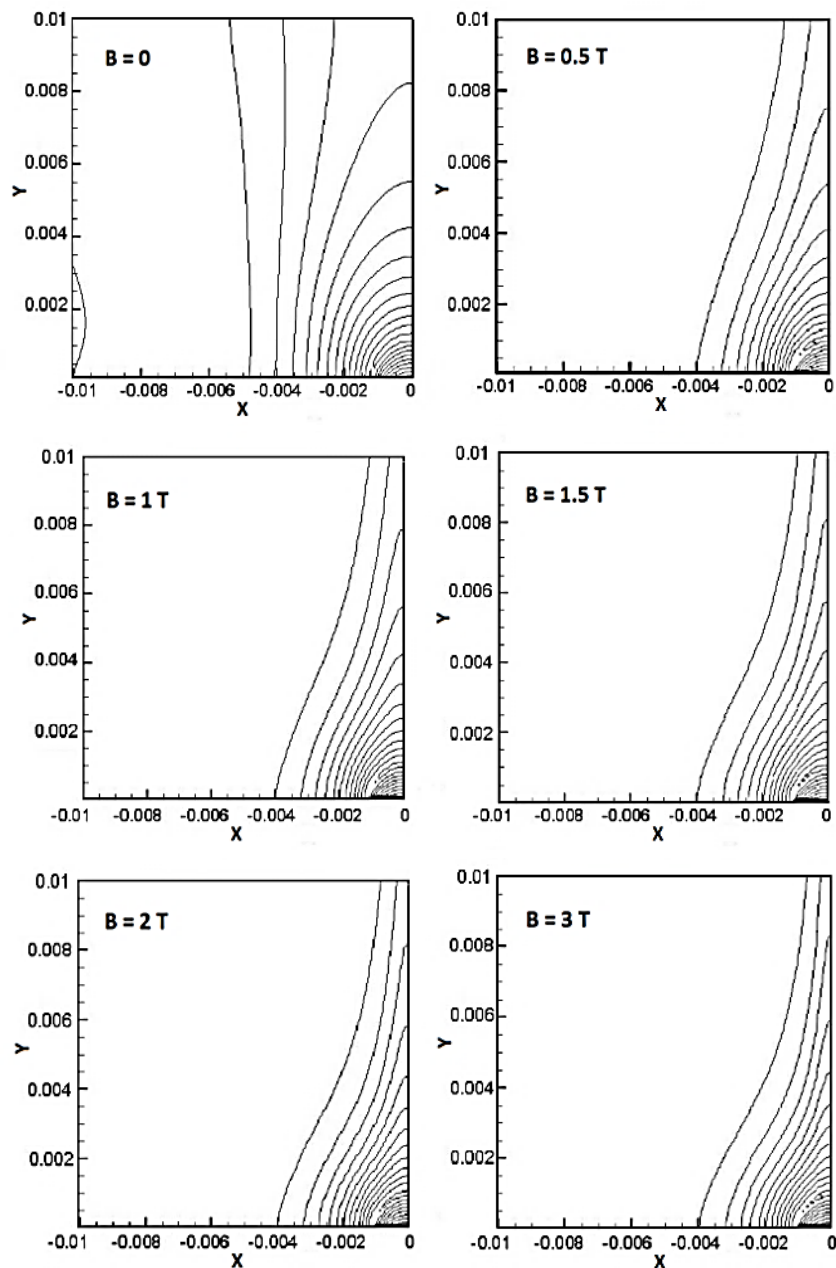
شکل ۴. میزان تغییرات مقدار حرارت تولیدشده با اعمال میدان مغناطیسی



شکل ۷. تأثیر تغییرات میدان مغناطیسی بر کسر مولی بخار آب



شکل ۶. تأثیر تغییرات میدان مغناطیسی بر کسر مولی اکسیژن



شکل ۸. مقایسه خطوط هم تراز دما بدون اعمال میدان مغناطیسی و با اعمال میدان مغناطیسی با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳ تسلا

جدول ۱. بررسی نتایج تغییرات مقدار هیدروژن نسوخته با اعمال میدان مغناطیسی

میدان مغناطیسی (تسلا)	کسر مولی هیدروژن نسوخته (در $X=0$ و $Y=1$ میلی متر)
۰	$4 e^{-2}$
۰/۵	$8/5 e^{-3}$
۱	$7/2 e^{-3}$
۱/۵	$6/6 e^{-3}$
۲	$6/3 e^{-3}$
۳	$5/9 e^{-3}$
۴	$5/4 e^{-3}$

- [1] Wakayama, N. I. "Magnetic Promotion of Combustion in Diffusion Flames." *Combustion and Flame*, vol. 93, 1993, pp. 207-214.
- [2] Lawton, J., F. J. Weinberg. "Electrical Aspects of Combustion." Clarendon, Oxford, 1969, pp. 336-340.
- [3] Baker, J., R. Varagani, K. Saito. "Models and Experiments of Laminar Diffusion Flames in Non-Uniform Magnetic Fields," *NASA*, 2003, pp. 317-320.
- [4] Swaminathan, S. "Effects of Magnetic Field on Micro Flames", Master of Science Thesis, Louisiana State University, 2005.
- [5] Khaldi, F., K. Messadek, A. M. Benseelama. "Isolation of gravity Effects on Diffusion Flames by Magnetic Field," *Microgravity Science Technology*, vol. 22, 2010, pp. 1-5.
- [6] Legros, G., T. Gomez, M. Fessard, T. Gouache, T. Ader, P. Guibert, et al. "Magnetically Induced Flame Flickering", *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 33, 2011, pp. 1095-1103.
- [7] Gilard V., P. Gillon, J. N. Blanchard, B. Sarh. "Influence of Horizontal Magnetic Field on a Co-flow Methane/Air Diffusion Flame." *Combustion Science and Technology*, vol. 180, 2008, 1920-1935.
- [8] Gillon P., J. N. Blanchard, V. Gilard. "Magnetic Field Influence on Coflow Laminar Diffusion Flames," *Russian Journal of Physical Chemistry B*, vol. 4, 2010, pp. 279-285.
- [9] Sarh, B., P. Gillon, V. Gilard, E. Bodele. "Lengths of Lifted Laminar Flames under Vertical Magnetic Field Gradient," *Combustion Science and Technology*, vol. 186, 2014, pp. 1422-1433.
- [10] Baker, J., M. E. Calvert. "A study of the characteristics of slotted laminar jet diffusion flames in the presence of magnetic fields." *Combustion and flame*, vol. 133, 2003, pp. 345-357.
- [11] Wu, W., J. Qu, K. Zhang, W. Chen, B. Li. "Experimental Studies of Magnetic Field on Methane Laminar Combustion Characteristics." *Combustion Science and Technology*, 2015.
- [12] Kinoshita, S., T. Takagi, H. Kotera, N. I. Wakayama. "Numerical Simulation of Diffusion Flames with and without Magnetic Field." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 14, 2004, pp. 1685-1688.
- [13] John, J. E. A. *Gas Dynamics*, Pearson, 1984.
- [14] "ANSYS FLUENT Magnetohydrodynamics (MHD) Module Manual v.14," 2011.
- [15] Huang, H. L., A. Ying, M. A. Abdou. "3D MHD free surface fluid flow simulation based on magnetic-field induction equations." *Fusion Engineering and Design*, vol. 63-64, 2002, pp. 361-368.

پی نوشت

-
1. wax taper
 2. diffusion flame
 3. partially Pre-mixed flame
 4. paramagnetism
 5. diamagnetism
 6. pre-mixed flame
 7. visible soot inception
 8. coflow
 9. flickering
 10. lift-off height
 11. flame base
 12. near extinction point
 13. 2nd order upwind
 14. Bunsen burner