

# بررسی ترمودینامیک تعادلی اثر کار میدان مغناطیسی روی کسر مولی محصولات اصلی واکنش متان-هوا

علی سعیدی\*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

جواد خادم

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

حجت رازنهان

دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

## چکیده

تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر احتراق موضوع شناخته شده‌ای است. در حضور میدان مغناطیسی، گونه‌های پارامغناطیس سبب تغییر در سینتیک و رفتار تعادلی واکنش‌های شیمیایی احتراق می‌شود. با توجه به این واقعیت که اکسیدنیترژن و اکسیژن گونه‌های پارامغناطیس و سایر گونه‌های احتراق و متان دارای رفتار دیامغناطیس هستند، اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت سبب تغییر در روند معمولی واکنش شیمیایی می‌گردد. در تحقیق حاضر بررسی عددی تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت بر واکنش یک مرحله‌ای احتراق متان با کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد اثر میدان مغناطیسی یکنواخت بر گونه‌های پارامغناطیس در مقایسه با سایر گونه‌ها قابل توجه است. واکنش احتراق متان با میدان مغناطیسی یکنواخت منجر به افزایش کسر مولی کربن منوکسید و کاهش کسر مولی کربن دی‌اکسید می‌گردد. همچنین نتایج حاکی است که می‌توان به کمک میدان مغناطیسی یکنواخت تولید آلاینده اکسیدنیترژن را همزمان با افزایش دما کاهش داد به طوری که در محدوده احتراق واقعی آلاینده اکسید نیترژن زیادی تولید می‌شود. افزایش میدان مغناطیسی یکنواخت از ۰/۰۶ به ۰/۰۸ باعث کاهش ۸۸/۲ درصدی کسر مولی این آلاینده می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** میدان مغناطیسی یکنواخت، احتراق، گونه‌های شیمیایی، متان.

## An Equilibrium Thermodynamics Investigation on Influence of Magnetic Field Work on Molar Fraction of Main Products of Methane–Air Reaction

A.Saedi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

J. Khadem

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

H.Raznahan

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

## Abstract

The effect of magnetic fields on combustion is a well-known fact. In presence of magnetic field, the paramagnetic species change kinetics and equilibrium properties of chemical reaction in combustion. Because NO and O<sub>2</sub> are paramagnetic species and other elements and methane are diamagnetic, applying a magnetic field on combustion cause to change its chemical reactions. In this study, the effects of uniform magnetic field on one stage methane combustion reaction has been studied numerically by means of Gibbs free energy minimization. The results suggest that the uniform magnetic field has significant effects on paramagnetic species and their production is influenced, dramatically. Methane combustion reaction with uniform magnetic field leads CO molar fraction to be increased and CO<sub>2</sub> concentration to be decrease. The results indicate that the NO pollutant formation also can be decreased while the temperature is increased. Increasing the uniform magnetic field from 0.06 to 0.08 causes molar fraction of this pollutant to decrease by 88.2%.

**Keywords:** Uniform magnetic field, Combustion, Chemical species, Methane.

## ۱- مقدمه

مولکول ماده پارامغناطیس در وضعیت اورتو<sup>۱</sup> 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 ملکول‌های آنها اثرات مشخص بر خواص فیزیکی و رفتار مولکولی ماده

تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر سینتیک شیمیایی و آیرودینامیک فرآیند احتراق موضوع شناخته شده‌ای است. اگرچه در این زمینه تحقیقات گسترده‌ای صورت نگرفته است، اما نتایج نشان از توانمندی میدان‌های مغناطیسی برای کنترل و بهینه‌سازی کمیت‌های احتراق و حتی شکل و درخشندگی شعله دارد [۱، ۲].

بر اساس نحوه قرارگیری الکترون‌ها، مواد به سه دسته پارامغناطیس، دیامغناطیس و فرومغناطیس دسته‌بندی می‌شوند.

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ali.saedi@birjand.ac.ir

<sup>1</sup> Ortho

دارد [۳]. گشتاور ماده پارامغناطیس در راستای میدان خارجی، باعث جذب ماده پارامغناطیس به سمت میدان قوی‌تر می‌شود. اکسیژن به عنوان مهم‌ترین گاز پارامغناطیس موجود در هوا، باعث ایجاد خاصیت پارامغناطیسی در هوا است. گازهای حاصل از احتراق شامل مونواکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، 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 تبدیلی، باعث القای خاصیت آهنربایی در حضور میدان مغناطیسی می‌شوند.

در بین گونه‌های تولید شده در احتراق متان، تنها دو دسته دیامغناطیس و پارامغناطیس وجود دارد که گونه‌های اکسیدنیتروژن و اکسیژن دارای خاصیت پارامغناطیس و سایر گونه‌های تولید شده در احتراق و متان دارای خاصیت دیامغناطیس هستند. نیروی مغناطیسی حجمی وارد شده بر اکسیژن به عنوان ماده پارامغناطیس نسبت به سایر گونه‌ها بسیار بزرگتر است، به نحوی که نقش اساسی در تعیین رفتار هوا در میدان مغناطیسی دارد [۳].

با بررسی تحقیقات گذشته در زمینه تاثیرات میدان‌های مغناطیسی بر احتراق سه جنبه اصلی در آنها مشاهده می‌شود:

- تاثیر مستقیم میدان مغناطیسی بر سینتیک شیمیایی
- تاثیر مستقیم میدان مغناطیسی بر ذرات باردار متحرک (نیروی لورنتز)

- تاثیر غیر مستقیم میدان بر مواد پارامغناطیس و دیامغناطیس

در این تحقیق تاثیر مستقیم میدان مغناطیسی بر ترمودینامیک تعادلی فرآیند احتراق مورد ارزیابی قرار گرفته است.

هایاشی [۴، ۵] به صورت آزمایشگاهی اثر میدان مغناطیسی و واکنش‌های شیمیایی را مورد بررسی قرار داد. نتایج او نشان داد که یک میدان مغناطیسی یکنواخت بر انتشار رادیکال OH تاثیر دارد، در حالی که بر رادیکال‌های CH و C<sub>2</sub> تاثیری مشاهده نکرد.

واکایاما و همکاران [۶] تغییرات در شدت انتشار سدیم در شعله اکسیژن-هیدروژن محتوی نمک در اثر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که شدت انتشار سدیم در حضور میدان مغناطیسی زیاد می‌شود. همچنین رابطه‌ای بین افزایش شدت انتشار و شرایط احتراق وابسته به مشخصه‌های متفاوتی مانند غلظت نمک، دبی جریان سوخت و اکسیژن به دست آوردند.

کردیاشکین و همکاران [۷] بررسی تاثیر میدان مغناطیسی بر واکنش‌های شیمیایی در شرایط محصولات تقطیر شده را به صورت آزمایشگاهی انجام دادند. آزمایشات آنها شامل احتراق پودرهای فرومغناطیس، پارامغناطیس و دیامغناطیس در حضور یک آهنربای الکتریکی بود. با توجه به کم بودن شدت میدان اعمال شده نتایج آنها تاثیر بسیار کمی برای پودرهای پارامغناطیس و دیامغناطیس نشان داد.

یونو و همکاران [۸] 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 را مشاهده کردند.

اوکی [۹] با مطالعه شعله پخشی تحت تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت نشان داد که میدان مغناطیسی باعث کاهش غلظت دوده و

افزایش رادیکال OH می‌شود.

یاماشیتا و همکاران [۱۰] با بررسی تاثیرات میدان مغناطیسی بر رادیکال OH و حل معادلات دینامیک گازها، توزیع دو بعدی از چگالی جرمی رادیکال OH در احتراق شعله پخشی به دست آوردند.

میزوتانی و همکاران [۱۱]، برای شعله پیش آمیخته تاثیر میدان مغناطیسی روی سینتیک شیمیایی را بررسی نمودند. آنها بیان داشتند که برای شعله مورد بررسی، میدان به بزرگی ۵ تسلا تاثیر قابل توجهی بر واکنش‌های شیمیایی ندارد.

یامادا و همکاران [۱۲] به مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر پخش رادیکال OH در شعله اکسیژن-هیدروژن پرداختند. آنها به تاثیر گرادیان میدان مغناطیسی بر شدت پخش OH در شعله و نیروی مغناطیسی بر قابلیت مغناطیس‌پذیری و چگالی اکسیژن اشاره نمودند.

بیکر و همکاران [۱۳] آنالیز عددی تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت بر گونه‌های تولید شده در سینتیک احتراق متان بر اساس انرژی آزاد گیبس را انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که افزایش شدت القای مغناطیسی باعث کاهش تولید اکسیدنیتروژن در دماهای بالا می‌شود.

گوپتا و همکاران [۱۴] تغییر پارامترهای ترمودینامیکی واکنش حجم ثابت متان در میدان مغناطیسی یکنواخت را مطالعه نمودند. آنها با بررسی تاثیر شدت القای مغناطیسی بر تغییر دما، نشان دادند که با افزایش دما غلظت گونه‌های کربن دی‌اکسید، نیتروژن و بخار آب کاهش و سایر گونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین به کاهش غلظت اکسید نیتروژن با افزایش شدت القای مغناطیسی اشاره نمودند.

خلدی و همکاران [۱۵] با انجام آزمایشی برای بی‌وزن کردن شعله و خنثی‌سازی اثر بویانسی به وسیله میدان مغناطیسی، نشان دادند که میدان مغناطیسی بر گازهای پارامغناطیسی اثر می‌گذارد. همچنین احتراق شعله در حضور میدان مغناطیسی باعث کاهش اکسیژن و به دنبال آن کاهش آهنگ گرمای آزاد شده می‌شود و در نهایت پایین آمدن دمای شعله و کاهش دوده را به دنبال دارد.

سعیدی و همکاران [۱۶] نیز به مطالعه و بررسی آزمایشگاهی اثر میدان مغناطیسی بر شعله پخشی پرداختند. در این پژوهش تاثیر میدان‌های مغناطیس بر جریان گاز و فرآیند احتراق شعله‌های پخشی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان از بهبود اندازه شعله و افزایش دمای آن، تحت تاثیر گرادیان میدان مغناطیسی داشت.

واو و همکاران [۱۷] اندازه‌گیری خواص احتراق متان در اثر میدان مغناطیسی را انجام دادند. آنها به تاثیر میدان مغناطیسی روی تولید گونه اکسیدنیتروژن و کاهش ۶۰ درصدی غلظت این آلاینده اشاره نمودند.

یکی از جنبه‌های کمتر مورد مطالعه قرار گرفته میدان مغناطیسی، تاثیرات آن بر ترمودینامیک تعادلی فرآیند احتراق می‌باشد. در این تحقیق بررسی عددی تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت بر ترمودینامیک تعادلی و تغییر غلظت گونه‌های اصلی احتراق متان انجام شده است. میدان مغناطیسی یکنواخت به عنوان عامل تاثیرگذار بر تولید گونه‌های شیمیایی ارزیابی شده و قابلیت کنترل و تولید محصولات احتراق توسط آن تحلیل می‌گردد.

## ۲- روابط حاکم بر مسئله

با توجه به اینکه فرآیندها در جهت کاهش انرژی آزاد گیبس پیش می‌روند و نقطه تعادل یک فرآیند زمانی است که انرژی آزاد گیبس به کمینه مقدار خود برسد، از این اصل برای محاسبه غلظت گونه‌های تشکیل شده در واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شود.

یک سیستم بسته، با خواص همگن و یکنواخت، در حال سکون در نظر بگیرید. برای یک فرآیند بازگشت‌پذیر در این سیستم قانون اول ترمودینامیک نتیجه می‌دهد:

$$Tds + \delta W = dU \quad (1)$$

که در آن  $T$  دما،  $S$  آنتروپی،  $U$  انرژی درونی و  $W$  کار این سیستم بسته است که شامل کار مرز جریان و کار میدان مغناطیسی می‌باشد [۱۸]:

$$\delta W = -pdV + d\left(\int V HdB\right) \quad (2)$$

جمله کار میدان مغناطیسی رابطه (۲)، شامل شدت میدان مغناطیسی  $H$ ، القای مغناطیسی  $B$  و حجم  $V$  سیستم است. با استفاده از رابطه  $B = \mu_0 H(1+x)$  و انتگرال‌گیری از کار میدان مغناطیسی، نتیجه زیر حاصل می‌شود:

$$\delta w = -pdV + H^2 \mu_0 x dV + V H \mu_0 x dH + V H^2 \mu_0 dx \quad (3)$$

با توجه به اینکه در این مسئله به بررسی میدان یکنواخت تحت شرایط دما ثابت پرداخته می‌شود، در نتیجه  $dH=0$  و با توجه به وابستگی قابلیت مغناطیس پذیری به دما  $dx=0$  می‌باشد. بنابراین با استفاده از تعریف انرژی آزاد گیبس ( $G=I-TS$ ) و رابطه (۱) که کار سیستم در آن طبق رابطه (۳) بیان می‌شود، داریم:

$$dG = Vdp + H^2 \mu_0 x dV \quad (4)$$

با فرض اینکه سیستم مخلوط گاز ایده‌آل است و لحاظ نمودن آن در رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$d\left(\frac{G}{R_u T}\right) = n\left(\frac{dp}{p} - H^2 \mu_0 \frac{dp}{p^2}\right) \quad (5)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه (۵) و فشار اولیه یک اتمسفر داریم:

$$\frac{G}{R_u T} = n\left(\frac{g^0}{R_u T} + \ln(p) + H^2 \mu_0 x \left(\frac{1}{p} - 1\right)\right) \quad (6)$$

رابطه فوق برای مخلوطی از گازهای ایده‌آل به صورت ذیل بازنویسی می‌شود:

$$\frac{G}{R_u T} = \sum_{i=1}^{n_{sp}} n_i \left(\frac{g_i^0}{R_u T} + \ln(p_i) + H^2 \mu_0 x_i \left(\frac{1}{p_i} - 1\right)\right) \quad (7)$$

برای مخلوط گاز ایده‌آل فشار هر جزء  $p_i=y_i p$  است که در آن  $y_i=n_i/n_t$  بوده و  $n_t$  مجموع تعداد مول‌های محصولات واکنش می‌باشد. بنابراین با جایگذاری این دو پارامتر در رابطه (۷)، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{G}{R_u T} = \sum_{i=1}^{n_{sp}} n_i \left(\frac{g_i^0}{R_u T} + \ln(y_i) + \ln(p) + H^2 \mu_0 x_i \left(\frac{1}{y_i p} - 1\right)\right) \quad (8)$$

رابطه فوق میزان انرژی آزاد گیبس را برای مخلوطی از گازهای ایده‌آل پارامغناطیس و دیامغناطیس نشان می‌دهد. با توجه به رابطه (۸)، حداقل مقدار انرژی آزاد گیبس را برای واکنش موردنظر محاسبه و براساس آن تعداد مول گونه‌های به وجود آمده در احتراق متان، تحت شرایط تعادل به دست می‌آید.

بقای جرم برای واکنش‌دهنده‌ها و محصولات عبارت است از:

$$\sum_{i=1}^{n_{sp}} a_{ij} x_i - b_j = 0 \quad (9)$$

که در آن  $b$  تعداد المان‌ها در محصولات واکنش و  $a$  بیانگر تعداد المان‌ها در سمت واکنش‌دهنده‌ها می‌باشد. با کمینه‌سازی رابطه (۸) با استفاده از ضریب لاگرانژ ( $\lambda$ ) داریم:

$$\sum_{i=1}^{n_{sp}} h_i = \sum_{j=1}^{n_{El}} \lambda_j \sum_{i=1}^{n_{sp}} y_i a_{ij} \quad (10)$$

با توجه به رابطه (۸) و کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس با استفاده از ضریب لاگرانژ، تعداد مول هر کدام از محصولات حاصل می‌شود که با جایگذاری مول کمینه شده در رابطه (۹) خواهیم داشت:

$$\sum_{i=1}^{n_{sp}} (-a_{ij} h_i) + \sum_{i=1}^{n_{sp}} y_i a_{ij} + \sum_{j=1}^{n_{El}} \lambda_k \sum_{i=1}^{n_{sp}} a_{ik} a_{ij} y_i - b_j = 0 \quad (11)$$

در دو رابطه (۱۰) و (۱۱)، مقدار  $h_i$  از عبارت زیر به دست می‌آید:

$$h_i = y_i \left[ \frac{g_i^0}{R_u T} + \ln\left(\frac{y_i}{y_i^0}\right) + \ln p - H^2 \mu_0 x_i + \sum_{m=1}^{n_{sp}} \frac{H^2 \mu_0 x_m}{p} \right] \quad (12)$$

به منظور محاسبه مول هر یک از گونه‌های تولید شده در واکنش، ابتدا برای هر گونه در محصولات، مقداری فرضی در نظر گرفته می‌شود. بر مبنای این مقادیر فرضی،  $h_i$  با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود. با جایگذاری  $h_i$  در رابطه (۱۰) و (۱۱)، دستگاه معادلاتی شامل تعداد عناصر شرکت کننده در واکنش به اضافه یک معادله دیگر حاصل می‌شود. مجهولات این دستگاه معادلات، ضریب لاگرانژ به تعداد عناصر و مقدار کل واقعی مول گونه‌های تولید شده در واکنش است. با حل این دستگاه معادلات بر اساس روش حذفی گوس [۱۹]، تعداد مول گونه‌های تولید شده در واکنش حاصل می‌شود. به منظور اصلاح فرض اولیه در مورد تعداد مول گونه‌های تولید شده در واکنش از تقریب زیر استفاده می‌شود:

$$y_i = -h_i + y_i \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_{sp}} x_i}{\sum_{i=1}^{n_{sp}} y_i} + \sum_{j=1}^{n_{El}} \lambda_j a_{ij} \right) \quad (13)$$

همچنین به منظور همگرایی سریع معادلات از ضریب  $c$  برای محاسبه تعداد مول‌های جدید هر گونه استفاده می‌گردد:

$$y_i^{m+1} = y_i^m + C(y_i^{m+1} - y_i^m) \quad (14)$$

از خطای نسبی برای بررسی روند همگرایی و شرط توقف مساله استفاده شده تا معیاری به منظور صحت نتایج باشد:

$$E = \max_i \frac{|n_i^{m+1} - n_i^m|}{n_i^{m+1}} \quad (15)$$

معادلات بیان شده تشکیل یک دستگاه معادلات می‌دهند که باید به صورت یکپارچه و متوالی حل گردند تا مقادیر کسر مولی محاسبه شده به همگرایی موردنظر برسند. روند حل معادلات توسط الگوریتم بیان شده در شکل ۱ نشان شده است.

جدول ۱- قابلیت مغناطیسی شوندگی برخی گونه‌ها در احتراق

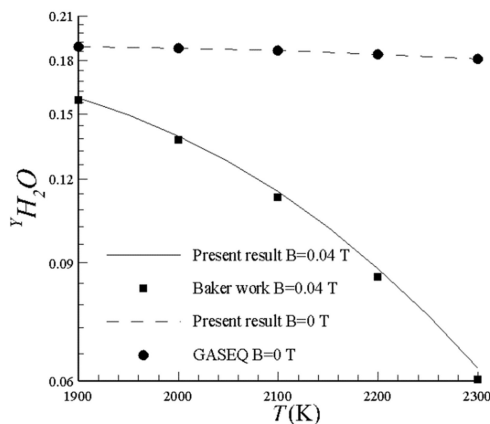
گونه	قابلیت مغناطیسی شوندگی (واحد cgs)
CO <sub>2</sub>	-21 × 10 <sup>-6</sup>
CO	-9/8 × 10 <sup>-6</sup>
H <sub>2</sub> O	-12/63 × 10 <sup>-6</sup>
H	-2/93 × 10 <sup>-6</sup>
H <sub>2</sub>	-3/99 × 10 <sup>-6</sup>
O	-4/61 × 10 <sup>-6</sup>
N <sub>2</sub>	-12 × 10 <sup>-6</sup>
NO	+1/45 × 10 <sup>-3</sup>
O <sub>2</sub>	+3/43 × 10 <sup>-3</sup>

قابلیت مغناطیسی شوندگی برای مواد پارامغناطیس، تابع دما و دارای مقادیر مثبت در بازه 10<sup>-6</sup> - 10<sup>-3</sup> می‌باشد، که قابلیت مغناطیس‌پذیری با دما به صورت معکوس رابطه دارد و توسط رابطه (۱۶) برای گونه‌های مختلف به دست می‌آید.

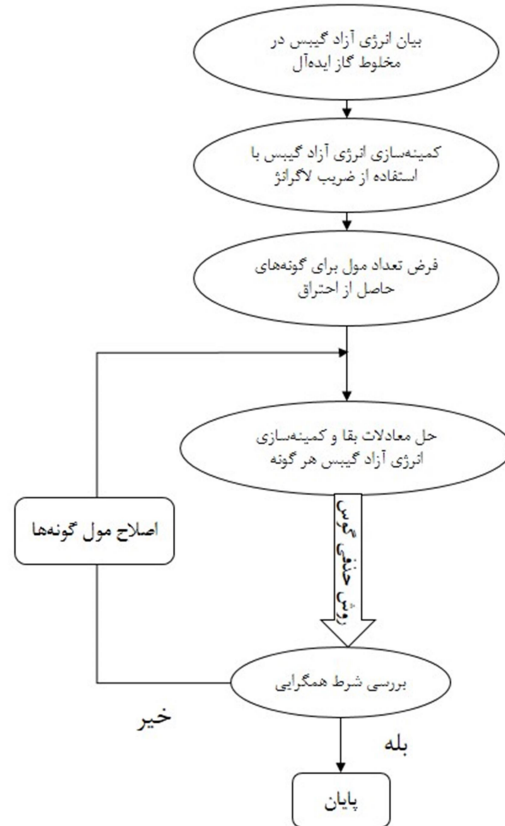
$$x_i = \frac{N_A g_L \mu_B^2 S_i (S_i + 1) \mu_0}{3kTM_i} \quad (16)$$

#### ۴- نتایج

با مدل‌سازی و اعتبارسنجی کد عددی، تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت بر ترمودینامیک تعادلی و تغییرات کسر مولی هر یک از گونه‌های اصلی در محصولات احتراق متان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور اعتبارسنجی نتایج در حضور میدان مغناطیسی و بدون میدان، از نتایج گزارش شده توسط بیکر و همکاران [۱۳] و GASEQ برای گونه بخار آب و کربن دی‌اکسید استفاده شده است (شکل ۲ و ۳). محور افقی دمای تعادل ترمودینامیکی محصولات واکنش و محور عمودی بیانگر درصد مولی هر یک از گونه‌ها می‌باشد. بررسی نتایج توافق بسیار نزدیکی را نشان می‌دهد.



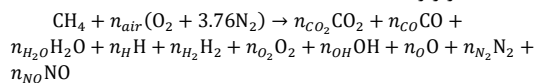
شکل ۲- نتایج کار حاضر و بیکر و همکاران [۱۳]



شکل ۱- الگوریتم حل مسئله

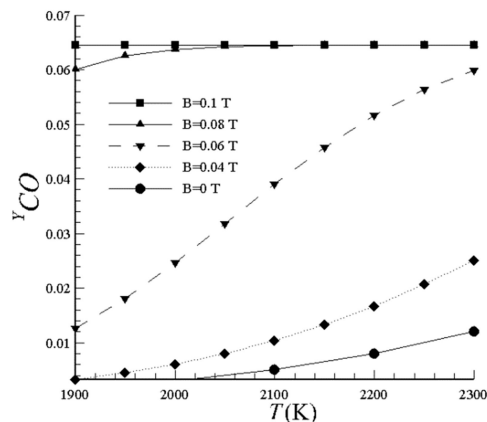
#### ۳- تعریف مسئله

ساده‌ترین هیدروکربن شناخته شده متان است که بیش از ۹۰ درصد سوخت گاز طبیعی را تشکیل می‌دهد. به این منظور فرآیند احتراق متان با نسبت هم‌ارزی یک تحت تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت (صفر تا ۰/۱ تسلا) و شرایط دما و فشار ثابت (۱ اتمسفر) بررسی شده است. فرآیند یک مرحله‌ای احتراق متان که در آن ۱۰ گونه انتخاب شده است در زیر آمده است [۱۳]:



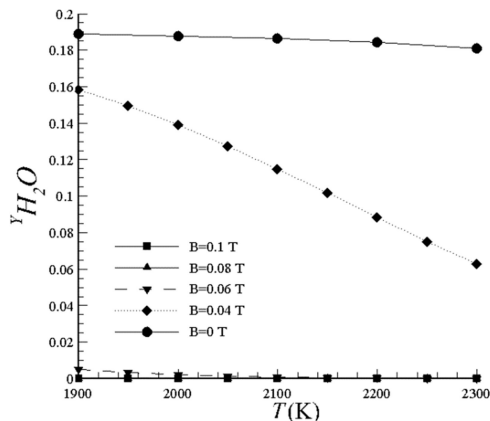
با توجه به وجود گونه‌های پارامغناطیس و دیامغناطیس در محصولات احتراق، نحوه تاثیرپذیری هر گونه از میدان، توسط پارامتر قابلیت مغناطیس‌پذیری تعیین می‌گردد. قابلیت مغناطیس‌پذیری مواد دیامغناطیس بر خلاف مواد پارامغناطیس منفی بوده و مقادیر ثابتی را به خود می‌گیرد. جدول ۱ میزان قابلیت مغناطیسی شوندگی برخی گونه‌های تولید شده در احتراق متان را نشان می‌دهد.

اکسید کربن و در مقابل افزایش تولید مونوکسید کربن خواهد شد. تولید کربن مونوکسید در میدان‌های مغناطیسی با شدت بالا (مشابه با کربن دی‌اکسید) تغییرات ناچیزی دارد. در میدان‌های مغناطیسی ۰/۱ تسلا و بیشتر، تولید کربن مونوکسید در دمای واقعی احتراق متان تغییرات کمی خواهد داشت و مقدار آن در محدوده ۰/۰۶۴۴ خواهد بود.

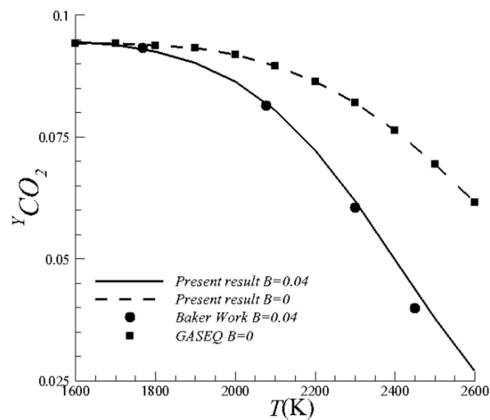


شکل ۵- تغییرات کسر مولی مونواکسید کربن در میدان مغناطیسی یکنواخت از صفر تا ۰/۱ تسلا

شکل ۶ تغییرات کسر مولی بخار آب با اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت را به تصویر می‌کشد. بررسی سینتیک احتراق متان تحت تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت، نشان از کاهش تولید بخار آب در اثر افزایش دما دارد. میدان مغناطیسی یکنواخت باعث کاهش تولید بخار آب به میزان قابل توجهی می‌شود. کسر مولی بخار آب در حضور میدان مغناطیسی کوچک‌تری نسبت به سایر گونه‌ها به مقدار حدی خود می‌رسد؛ به طوری که در میدان مغناطیسی ۰/۰۶ تسلا و دمای ۲۱۰۰ کلون، درصد مولی گونه بخار آب ۰/۰۰۰۸ و گونه دی‌اکسید کربن ۰/۰۴۲ می‌باشد. با افزایش میدان به ۰/۰۸ تسلا در دمای فوق، درصد مولی دی‌اکسید کربن به ۰/۰۰۷۷ رسیده و به مقدار حدی خود نزدیک می‌شود.

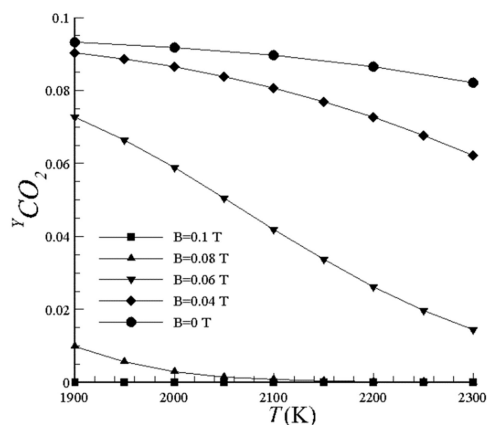


شکل ۶- تغییرات کسر مولی بخار آب در میدان مغناطیسی یکنواخت از صفر تا ۰/۱ تسلا



شکل ۳: نتایج کار حاضر و بیکر و همکاران [۱۳]

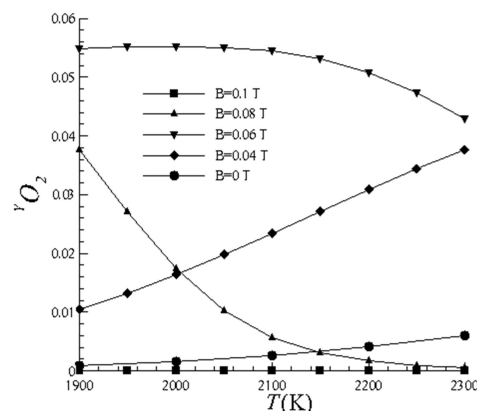
شکل ۴ تغییرات کسر مولی دی‌اکسید کربن تحت میدان مغناطیسی یکنواخت صفر تا ۰/۱ تسلا را نشان می‌دهد. تاثیر میدان مغناطیسی بر کسر مولی دی‌اکسید کربن در محدوده دمایی ۱۹۰۰-۲۳۰۰ کلون قابل ملاحظه است، به طوری که تغییرات ناگهانی در تولید دی‌اکسید کربن تحت میدان‌های مغناطیسی ۰/۰۶ و ۰/۰۴ تسلا رخ می‌دهد. مطابق شکل، افزایش شدت میدان مغناطیسی یکنواخت باعث کاهش تولید دی‌اکسید کربن می‌شود. اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت بالاتر از ۰/۱ تسلا تاثیر چشمگیری بر تغییرات کسر مولی دی‌اکسید کربن نخواهد داشت و عمده تغییرات تا میدان ۰/۱ مشاهده می‌شود. اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت در محدوده دمای واقعی باعث کاهش تشکیل دی‌اکسید کربن و احتراق ناقص است.



شکل ۴- تغییرات کسر مولی دی‌اکسید کربن در میدان مغناطیسی یکنواخت از صفر تا ۰/۱ تسلا

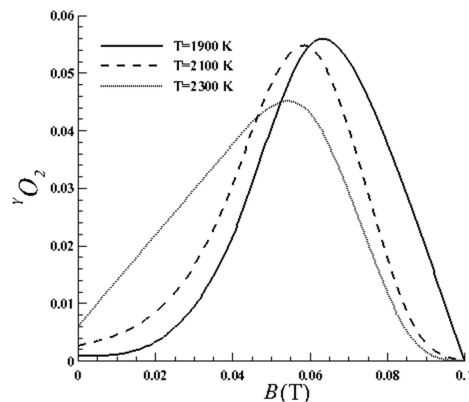
تغییرات کسر مولی مونواکسید کربن در بازه دمایی ۱۹۰۰-۲۳۰۰ کلون، تحت میدان مغناطیسی یکنواخت در شکل ۵ نشان داده شده است. کسر مولی مونوکسید کربن در حضور میدان مغناطیسی با افزایش دما روند صعودی داشته و به سمت یک مقدار حدی میل می‌کند. اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت باعث افزایش تولید کربن مونوکسید می‌شود. رفتار تولید کربن مونوکسید در تطابق با تولید کربن دی‌اکسید است؛ به این ترتیب که اعمال میدان سبب کاهش تولید دی-

شکل ۷ روند تغییرات کسر مولی اکسیژن را در دماهای مختلف در اثر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت نشان می‌دهد. اکسیژن در میدان‌های مغناطیسی مختلف رفتاری متفاوت دارد، بطوریکه در محدوده دمایی ۱۹۰۰-۲۳۰۰، کسر مولی اکسیژن در میدان‌های مغناطیسی ۰/۰۶ تا ۰/۱ تسلا روند کاهشی ولی در میدان مغناطیسی تا ۰/۰۶ تسلا رفتاری افزایشی دارد. نتایج شکل ۵ و ۴ بیانگر روند صعودی کسر مولی متواکسید کربن و رفتار نزولی دی‌اکسید کربن در ازای افزایش میدان مغناطیسی می‌باشند بطوریکه این روند صعودی و نزولی رفتاری پیوسته دارد. در گونه اکسیژن با افزایش شدت میدان مغناطیسی ابتدا شاهد روندی صعودی و سپس در میدان بالاتر از ۰/۰۶ روندی نزولی وجود دارد. این رفتار غیرپیوسته گونه اکسیژن در میدان‌های بالاتر از ۰/۰۶ تسلا را می‌توان به خاصیت پارامغناطیس آن مرتبط دانست.



شکل ۷- تغییرات کسر مولی اکسیژن در میدان مغناطیسی یکنواخت از صفر تا ۰/۱ تسلا

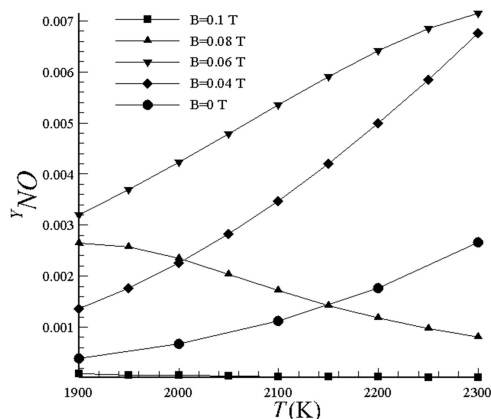
تغییرات کسر مولی اکسیژن برحسب میدان مغناطیسی در شکل ۸ نشان داده شده است. با افزایش دما بیشینه مقدار کسر مولی اکسیژن در میدان مغناطیسی ضعیف‌تری اتفاق می‌افتد. برای دماهای نشان داده شده در میدان مغناطیسی کمتر از ۰/۰۵ تسلا افزایش دما باعث تولید اکسیژن بیشتر و در میدان‌های قوی‌تر باعث کاهش کسر مولی اکسیژن و میل کردن آن به سمت کمینه مقدار خود می‌شود.



شکل ۸- تغییرات کسر مولی اکسیژن در حضور میدان مغناطیسی در دمای ۱۹۰۰-۲۳۰۰ کلوین

همچنین بررسی شکل برای هر دمای واکنش، نقطه بیشینه‌ای را نشان می‌دهد که برای میدان با شدت معین تولید اکسیژن در محصولات به حداکثر می‌رسد.

شکل ۹ تغییرات کسر مولی اکسید نیتروژن را برحسب دما نشان می‌دهد. با افزایش شدت میدان مغناطیسی یکنواخت کسر مولی اکسید نیتروژن رفتاری متمایز دارد. همانطور که در مورد گونه پارامغناطیس اکسیژن مشاهده شد، کسر مولی اکسید نیتروژن با اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت صفر تا ۰/۰۶ تسلا روند صعودی به خود می‌گیرد این درحالی است که در میدان مغناطیسی ۰/۰۸ تسلا روندی نزولی داشته و به کمینه مقدار خود نزدیک می‌شود. در این شکل نیز مشابه سایر شکل‌های ۴، ۶ و ۷ تغییرات غلظت گونه اکسید نیتروژن در میدانی به بزرگی ۰/۱ تسلا ناچیز و نزدیک به مقدار حدی آن می‌باشد. در این شکل مشاهده می‌شود افزایش میدان مغناطیسی تا مقدار ۰/۰۶ تسلا نه تنها موجب کاهش بلکه باعث افزایش کسر مولی اکسید نیتروژن شده و اعمال میدان مغناطیسی بالاتر از ۰/۰۶ تسلا می‌تواند کاهش زیادی در تولید آلاینده اکسید نیتروژن ایجاد نماید. نکته قابل توجه در بررسی این شکل کاهش میزان اکسید نیتروژن تولیدی در دمای ۲۳۰۰ کلوین با افزایش شدت میدان مغناطیسی است؛ به نحوی که در این دما افزایش میدان مغناطیسی یکنواخت از ۰/۰۶ به ۰/۰۸ باعث کاهش ۸۸/۲ درصدی کسر مولی این آلاینده می‌شود.



شکل ۹- تغییرات کسر مولی اکسید نیتروژن در میدان مغناطیسی یکنواخت از صفر تا ۰/۱ تسلا

شکل ۱۰ تغییرات کسر مولی اکسید نیتروژن در حضور میدان مغناطیسی در دمای ۱۹۰۰-۲۳۰۰ کلوین را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود در میدان مغناطیسی حدود ۰/۰۶ تسلا روند تغییرات کسر مولی با دما دگرگون می‌شود، به طوری که در میدان‌های مغناطیسی کمتر از این حد، افزایش دما سبب افزایش تولید کسر مولی اکسید نیتروژن و در میدان مغناطیسی قوی‌تر باعث کاهش کسر مولی اکسید نیتروژن می‌شود. مطابق شکل ۸ و ۱۰، نحوه تغییرات کسر مولی دو گونه پارامغناطیس اکسیژن و اکسید نیتروژن با گونه‌های دیامغناطیس متفاوت است. برای کاهش تولید اکسید نیتروژن در میدان مغناطیسی یکنواخت باید شدت میدان بزرگتر از مقدار بیشینه کننده تولید اکسید نیتروژن باشد.

### ۶- نمادها

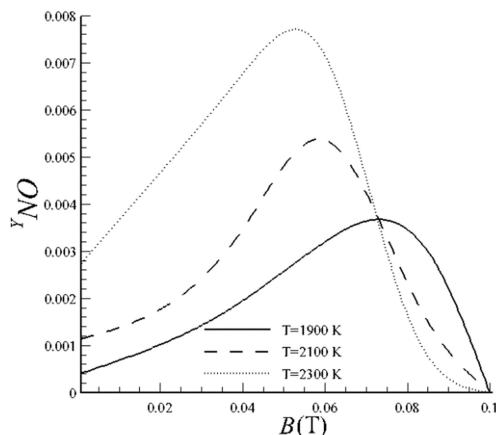
$a_{ij}$	تعداد اتم المان $i$ محصول $j$
$B$	القای مغناطیسی (T)
$b_i$	تعداد اتم المان $i$ زدر واکنش دهنده‌ها
$E$	خطا
$G$	انرژی آزاد گیبس (J/mol)
$\bar{g}^0$	انرژی آزاد گیبس مرجع (J/mol)
$g_L$	ضریب لاند $g$
$H$	شدت میدان مغناطیسی (A/m)
$I$	آنتالپی (J/mol)
$K$	ثابت بولتزمن (J/K)
$M$	شدت مغناطیس‌پذیری (A/m)
$M_i$	وزن مولکولی گونه $i$
$N_A$	عدد آووگادرو (1/mol)
$N$	تعداد مول (mol)
$n_{Sp}$	تعداد کل گونه‌های تولید شده
$n_{El}$	تعداد کل المان‌های شرکت‌کننده در واکنش
$n_i$	تعداد کل مول گونه‌های تولید شده (mol)
$P$	فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
$P_i$	فشار گونه $i$ ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
$R_u$	ثابت جهانی گازها (J/(mol.K))
$S$	آنتروپی (J/(K.mol))
$S_i$	تعداد کل اسپین الکترون گونه $i$
$T$	دما (K)
$U$	انرژی داخلی (J/mol)
$V$	حجم ( $\text{m}^3$ )
$W$	کار (J/mol)
$Y$	کسر مولی گونه‌ها
$y_i$	تعداد مول فرض شده برای گونه $i$
$X$	قابلیت مغناطیس‌پذیری

### علایم یونانی

$\lambda$	ضریب لاگرانژ ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\mu_B$	مغناطیس بوهر (J/T)
$\mu_0$	قابلیت نفوذ مغناطیسی هوا (H/m)

### زیرنویس‌ها

air	هوا
$i$	گونه $i$ ام



شکل ۱۰- تغییرات کسر مولی اکسید نیتروژن در حضور میدان مغناطیسی در دمای ۱۹۰۰-۲۳۰۰ کلوین

در جدول ۲ رفتار کسر مولی گونه‌های مورد بررسی در احتراق متان در اثر اعمال میدان مغناطیسی به صورت کیفی بیان شده است. با توجه به نتایج می‌توان بیان نمود که تولید آلایند اکسید نیتروژن با اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت کاهش می‌یابد، اما در مقابل احتراق ناقص‌تر و تولید آلایند کربن منوکسید بیشتر را سبب می‌شود. برای استفاده از توانایی میدان مغناطیسی در کاهش کسر مولی اکسید نیتروژن و همچنین فشار در کاهش تولید آلایند کربن منوکسید، می‌توان واکنش احتراق در فشارهای بالا که موجب احتراق کامل‌تر است را همزمان با اعمال میدان انتخاب نمود.

جدول ۲- تغییرات کسر مولی گونه‌ها در اثر افزایش شدت میدان مغناطیسی

گونه‌ها	NO	O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
افزایش شدت میدان مغناطیسی	نامنظم	نامنظم	افزایش	کاهش	کاهش

### ۵- نتیجه‌گیری

مطالعه عددی گونه‌های اصلی تولید شده در فرآیند احتراق متان در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت با استفاده از کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس انجام گردید. براین اساس نتایج عبارت است از:

- اثر میدان مغناطیسی یکنواخت بر گونه‌های تولید شده پارامغناطیس در مقایسه با سایر گونه‌ها نامنظم‌تر است.
- در محدوده احتراق واقعی (۱۹۰۰ تا ۲۲۵۰ کلوین و فشار یک اتمسفر) که آلایند اکسید نیتروژن زیادی تولید می‌شود افزایش میدان مغناطیسی یکنواخت از ۰/۰۶ به ۰/۰۸ باعث کاهش ۸۸/۲ درصدی کسر مولی این آلایند می‌شود.
- میدان مغناطیسی یکنواخت تولید آلایند اکسید نیتروژن را همزمان با افزایش دما کاهش می‌دهد.
- افزایش میدان مغناطیسی تا ۰/۱ تسلا باعث افزایش کسر مولی گونه مونواکسید کربن و کاهش کسر مولی دی‌اکسید کربن می‌شود.

- Characteristics. *Combustion Science and Technology*, Vol. 188, No. 3, pp. 472-480, 2016.
18. Rosensweig, R.E., *Ferrohydrodynamics*. Courier Corporation, 2013.
  19. Gordon, S. and B.J. McBride, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations. Interim Revision, March 1976. 1976.
  20. Weast, R.C., *CRC handbook of chemistry and physics*. 1986.
- [1] Saeedi A. and Moghiman M., Kerosene wick lamp flame deformation in gradient magnetic fields. *Applied Physics Letters*, Vol. 104, No. 11, pp. 114104, 2014.
  2. Ueno, S., Quenching of flames by magnetic fields. *Journal of Applied Physics*, Vol. 65, No. 3, pp. 1243-1245, 1989.
  3. Lide, D.R., *CRC handbook of chemistry and physics* CRC Press, 2009.
  4. Hayashi, H., The external magnetic field effect on the emission intensity of the  $A\ 2[\Sigma]^+ \rightarrow X\ 2[\Pi] (0-0)$  transition of the OH radical in flames. *Chemical Physics Letters*, Vol. 87, No. 2, pp. 113-116, 1982.
  5. Hayashi, H., Recent studies of excited molecules and reaction intermediates. *Scientific papers of the institute of physical and chemical research*, Vol. 80, No. 3., pp. 87-101, 1986.
  6. Wakayama, N.I., I. Ogasawara, and H. Hayashi, The external magnetic field effect on the emission intensity of the Na D line in hydrogen—oxygen flames. *Chemical Physics Letters*, 1984. Vol. 105, No. 2, pp. 209-213, 1984.
  7. Kirdyashkin, A.I., Y.M. Maksimov, and A.G. Merzhanov, Effect of a magnetic field on the combustion of heterogeneous systems with condensed reaction products. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, Vol. 22, No. 6, pp. 700-706, 1986.
  8. Ueno, S. and K. Harada, Experimental difficulties in observing the effects of magnetic fields on biological and chemical processes. *Magnetics, IEEE Transactions*, Vol. 22, No. 5, pp. 868-873, 1986.
  9. Aoki, T., Radicals' Emissions and Butane Diffusion Flames Exposed to Upward-Decreasing Magnetic Fields. *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 28, No. 5R, pp. 776, 1989.
  10. Yamashita, H., D. Djamrak, and T. Takaeno, Role of Elementary Reactions in Flame Structure and Unsteady Behavior of Two-Dimensional Fuel Jet Diffusion Flame. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, Vol. 42, No. 4, pp. 699-707, 1999.
  11. Mizutani, Y., M. Fuchihata, and Y. Ohkura, Pre-mixed laminar flames in a uniform magnetic field. *Combustion and Flame*, Vol. 125, No. 1-2, pp. 1071-1073, 2001.
  12. Yamada, E., et al., Numerical analysis of a hydrogen-oxygen diffusion flame in vertical or horizontal gradient of magnetic field. *Combustion Science and Technology*, Vol. 174, No. 9, pp. 149-164, 2002.
  13. Baker, J. and K. Saito, Magnetocombustion: a thermodynamic analysis. *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 16, No. 2, pp. 263-268, 2000.
  14. Gupta, A. and J. Baker, Uniform magnetic fields and equilibrium flame temperatures. *Journal of thermophysics and heat transfer*, Vol. 21, No. 3, pp. 520-524, 2007.
  15. Khaldi, F., K. Messadek, and A.M. Benselama, Isolation of gravity effects on diffusion flames by magnetic field. *Microgravity Science and Technology*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-5, 2010.
  16. Saeedi, A. and M. Moghiman, Influence of Gradient Magnetic Field on Quenching and Elongating Diffusion Flame. *International Journal of Innovation in Science and Mathematics*, Vol. 2, 2014.
  17. Wu, W.-f., et al., Experimental Studies of Magnetic Effect on Methane Laminar Combustion