



مطالعه تغییرات غلظت گونه‌های اصلی احتراق متان در اثر فشار و میدان مغناطیسی یکنواخت

علی سعیدی^{*}، جواد خادم، حجت رازنهان

دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۷ آذر ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۶ اسفند ۱۳۹۵
پذیرش: ۲۷ فروردین ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۲ اردیبهشت ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

میدان مغناطیسی یکنواخت
احتراق
گونه‌های شیمیایی

چکیده: تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر احتراق جهت کنترل و بهینه‌سازی و حتی تغییر شکل و درخشندگی شعله موضوع شناخته شده‌ای است. نیروی حجمی مغناطیسی وارد بر گونه‌های مواد پارامغناطیس باعث تغییر رفتار طبیعی آن‌ها شده و بر سینتیک و رفتار تعادلی واکنش‌های شیمیایی احتراق نیز مؤثر است. در تحقیق حاضر بررسی عددی تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت بر واکنش یک مرحله‌ای احتراق متان انجام شده است. با توجه به اینکه در بین گونه‌های تولید شده، NO، OH و O₂ به عنوان ماده پارامغناطیس و سایر گونه‌های احتراق و متان دارای رفتار دیامغناطیس هستند، اثر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت در فشارهای مختلف بر ۱۰ گونه تولید شده در فرآیند احتراق متان با کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس ارزیابی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد اثر میدان مغناطیسی یکنواخت در فشار یک اتمسفر بر گونه‌های تولید شده پارامغناطیس در مقایسه با سایر گونه‌ها قابل توجه‌تر بوده و برای تمام گونه‌ها تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت با افزایش فشار کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان به کمک میدان مغناطیسی یکنواخت، تولید آلاینده NO را همزمان با افزایش فشار کاهش داد. علاوه بر این با اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت و افزایش فشار می‌توان کاهش آلاینده‌های NO و CO را به طور همزمان با افزایش دما ایجاد نمود.

۱- مقدمه

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

اعمال میدان مغناطیسی می‌تواند بر دما، اندازه شعله، تابش شعله، تولید آلاینده‌ها و مشخصات سینتیکی شعله تأثیرگذار باشد [۳].

مایکل فارادی [۴] در سال ۱۸۴۷ میلادی نخستین مشاهدات آزمایشگاهی را از تأثیر میدان مغناطیسی بر احتراق داشت. او با نزدیک کردن یک آهنربا به شعله شمع، انحراف شعله در جهت دور شدن از آهنربا را مشاهده نمود.

فرار شعله شمع از آهنربا به دلیل قابلیت‌های متفاوت مغناطیس‌پذیری مواد در میدان مغناطیسی است. بر اساس نحوه قرارگیری الکترون‌ها، ماده به سه دسته پارامغناطیس، دیامغناطیس و فرومغناطیس دسته‌بندی می‌شوند. مولکول ماده پارامغناطیس در وضعیت اورتو است که عدد کوانتومی فرد یا سطوح انرژی فرد را اشغال می‌نماید. این مواد کاتالیست مناسبی

برای بسیاری از واکنش‌ها بوده و جهت اسپین در مولکول‌های آن‌ها اثرات مشخص بر خواص فیزیکی و رفتار مولکولی ماده دارد [۵]. 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 می‌شود. 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 NO، OH و O₂ 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 [۶].

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

۱. تأثیر مستقیم میدان مغناطیسی بر سینتیک شیمیایی و ترمودینامیک تعادلی
۲. تأثیر مستقیم میدان مغناطیسی بر ذرات باردار متحرک (نیروی لورنتز)

OH در شعله پخشی اکسیژن-هیدروژن پرداختند. آن‌ها به تأثیر گرادیان میدان مغناطیسی بر شدت پخش OH در شعله و نیروی مغناطیسی بر قابلیت مغناطیس‌پذیری و چگالی اکسیژن اشاره نمودند.

بیکر و همکاران [۱۷] مدل‌سازی عددی تأثیر 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 NO در دماهای بالا می‌شود.

گوپتا و همکاران [۱۸] تأثیر تغییر پارامترهای ترمودینامیکی دما و غلظت گونه‌های واکنش حجم ثابت متان در میدان مغناطیسی یکنواخت را مطالعه نمودند. آن‌ها با بررسی تأثیر شدت القای مغناطیسی بر تغییر دما، نشان دادند که با افزایش دما غلظت گونه‌های CO₂، N₂ و H₂O کاهش و سایر گونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین به کاهش غلظت NO با افزایش شدت القای مغناطیسی اشاره نمودند.

بررسی پژوهش‌ها در زمینه تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر ترمودینامیک تعادلی، سینتیک شیمیایی و جریان گازها در احتراق نشان دهنده تأثیر هر کدام از این عوامل بر تولید آلاینده‌ها و راندمان احتراق است. با توجه به نقش فشار و ترمودینامیک تعادلی بر احتراق، در این تحقیق بررسی عددی تأثیر فشار در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت بر ترمودینامیک تعادلی و تغییر غلظت گونه‌های اصلی احتراق متان با هوا انجام شده است. این مطالعه در جهت مشخص نمودن شرایطی از فشار و میدان مغناطیسی یکنواخت برای احتراق کامل‌تر و تولید آلاینده کمتر صورت می‌پذیرد. از این رو تأثیر این دو عامل بر تولید گونه‌های شیمیایی ارزیابی شده و قابلیت کنترل تولید محصولات احتراق توسط آن‌ها 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 بگیرد. برای یک فرآیند بازگشت‌پذیر در این سیستم قانون اول ترمودینامیک نتیجه می‌دهد:

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

که کار این سیستم بسته شامل کار مرز جریان و کار میدان مغناطیسی می‌باشد [۱۹]:

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

با استفاده از رابطه $B = \mu_0 H(1+x)$ [۱۹] و انتگرال‌گیری از کار میدان مغناطیسی، نتیجه زیر حاصل می‌شود:

۳. تأثیر غیر مستقیم میدان بر مواد پارامغناطیس و دیامغناطیس در این تحقیق تأثیر مستقیم میدان مغناطیسی بر ترمودینامیک تعادلی فرآیند احتراق مورد ارزیابی قرار گرفته است.

دلهر [۷] جهت بررسی اندرکنش میدان مغناطیسی و سینتیک شیمیایی از قوانین ترمودینامیک استفاده کرد. او تحلیل مرتبه اول را برای تعیین حداقل شدت میدان لازم برای تأثیرات مشخص روی رفتار واکنش‌های شیمیایی به کار برد.

هایاشی [۸ و ۹] به صورت آزمایشگاهی اثر میدان مغناطیسی بر واکنش‌های شیمیایی را از طریق طیف‌سنجی الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار داد. نتایج او نشان داد که میدان مغناطیسی یکنواخت باعث افزایش انتشار رادیکال OH شده، در حالی که بر رادیکال‌های CH و C₂ تأثیری مشاهده نکرد.

واکایاما و همکاران [۱۰] تغییرات در شدت انتشار سدیم در شعله اکسیژن-هیدروژن محتوی نمک در اثر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافته‌اند 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 [۱۱] بررسی تأثیر 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 تأثیر بسیار کمی برای پودرهای پارامغناطیس و دیامغناطیس نشان داد.

یونو و همکاران [۱۲] با بررسی احتراق الکل با کاتالیست پلاتین در میدان مغناطیسی با شدت القای مغناطیسی ۰/۵ تا ۱/۴ تسلا و گرادیان بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ تسلا بر متر، کاهش دمای ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس در مکان‌های مشخصی از جبهه شعله را مشاهده کردند.

اوکی [۱۳] با مطالعه شعله پخشی بوتان و هوا تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت نشان داد که میدان مغناطیسی باعث کاهش غلظت دوده و افزایش رادیکال OH می‌شود.

یامادا و همکاران [۱۴] با بررسی و حل عددی معادلات حاکم تأثیرات میدان مغناطیسی بر رادیکال OH و توزیع دو بعدی از چگالی جرمی رادیکال OH در احتراق شعله پخشی به دست آوردند.

میزوتانی و همکاران [۱۵]، برای شعله پیش‌آمیخته پروپان و هوا، تأثیر میدان مغناطیسی روی سینتیک شیمیایی را بررسی نمودند. آن‌ها بیان کردند که برای شعله مورد بررسی، میدانی به بزرگی ۵ تسلا تأثیر قابل توجهی بر واکنش‌های شیمیایی ندارد.

یامادا و همکاران [۱۶] به مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر توزیع رادیکال

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:

$$\sum_{i=1}^{n_{sp}} (-a_{ij} h_i) + \frac{\sum x_i}{\sum y_i} \sum_{i=1}^{n_{sp}} y_i a_{ij} + \sum_{j=1}^{n_{el}} \lambda_j \sum_{i=1}^{n_{sp}} a_{ik} a_{ij} y_i - b_j = 0 \quad (11)$$

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

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

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 [۲۰]، 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:

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

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

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

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

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

۳- تعریف مسئله

ساده‌ترین هیدروکربن شناخته شده متان است که بیش از ۹۰٪ سوخت گاز طبیعی را تشکیل می‌دهد. در این پژوهش تأثیرات فشار بر فرآیند احتراق

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

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 این که 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 $y_i = n_i / n$ بوده و n_i 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 واکنش دهنده‌ها و محصولات به صورت زیر ارائه می‌شود:

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

با کمینه‌سازی رابطه (۸) با استفاده از ضریب لاگرانژ داریم:

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

اصلی در محصولات احتراق متان با هوا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور اعتبارسنجی در حضور میدان مغناطیسی صفر و ۰/۰۴ تسلا، از نتایج نرم‌افزار GASEQ و گزارش شده توسط بیکر و همکاران [۱۷] استفاده شده است. شکل ۱ ارزیابی نتایج کار حاضر با نرم‌افزار GASEQ برای میدان مغناطیسی صفر تسلا و نتایج بیکر و همکاران [۱۷] برای میدان مغناطیسی ۰/۰۴ تسلا را نشان می‌دهد. همچنین این نتایج به همراه میزان خطای نسبی در جدول ۲ آمده است. با بررسی شکل ۱ و جدول ۲ انطباق مناسبی بین نتایج کار حاضر و داده‌های معتبر گزارش شده مشاهده می‌شود که بیانگر صحت نتایج عددی حاضر می‌باشد.

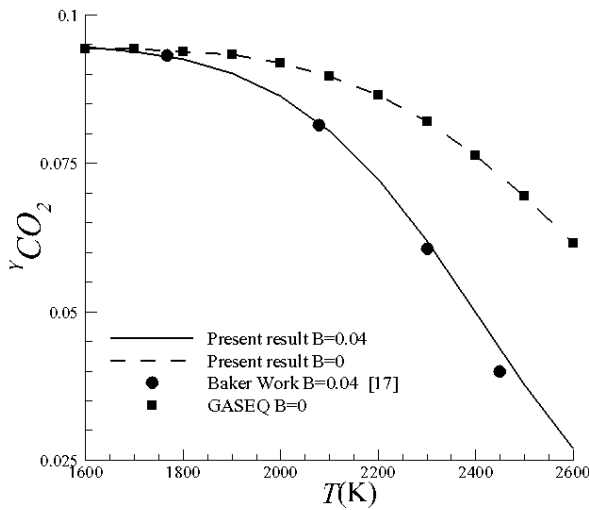


Fig. 1. The comparison between present work and Baker et. al. results [17]

شکل ۱: مقایسه کار حاضر با نتایج بیکر و همکاران [۱۷]

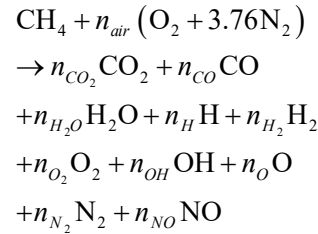
جدول ۲: مقایسه کار حاضر با نتایج بیکر و همکاران [۱۷]

Table 2. The comparison between present work and Baker et al. results [17]

۲۴۰۰	۲۲۰۰	۲۰۰۰	۱۶۰۰	دما
۰/۰۷۷۱	۰/۰۸۶۴	۰/۰۹۲۱	۰/۰۹۵	بیکر و همکاران [۱۷]
۰/۰۷۶۳	۰/۰۸۶۴	۰/۰۹۱۸	۰/۰۹۴۲	کار حاضر B=۰
۱	۰/۰۷	۰/۳	۰/۷	خطا (%)
۰/۰۳۹۸	۰/۰۶۸۲	۰/۰۸۶۴	۰/۰۹۴۶	بیکر و همکاران [۱۷]
۰/۰۴۶۹	۰/۰۷۲۲	۰/۰۸۶۳	۰/۰۹۴۵	کار حاضر B=۰/۰۴
۱۷/۶	۵/۹	۰/۲	۰/۱	خطا (%)

شکل ۲ تغییرات کسر مولی بخار آب تحت میدان مغناطیسی یکنواخت صفر تا ۰/۱ تسلا در فشار ۱ اتمسفر را نشان می‌دهد. تأثیر میدان مغناطیسی بر کسر مولی بخار آب سبب تغییرات ناگهانی در تولید بخار آب تحت میدان مغناطیسی ۰/۰۴ تسلا می‌شود. مطابق شکل، افزایش شدت میدان مغناطیسی یکنواخت کاهش تولید بخار آب و احتراق ناقص را در پی دارد.

متان با هوا و نسبت هم‌ارزی یک، تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت (صفر و ۰/۰۴ تسلا) و شرایط دما ثابت بررسی شده است. فرآیند یک مرحله‌ای احتراق متان که در آن ۱۰ گونه انتخاب شده، در زیر آمده است. [۱۷]



با توجه به وجود گونه‌های پارامغناطیس و دیامغناطیس در محصولات احتراق، نحوه تأثیرپذیری 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 شونده‌های تولید شده در احتراق متان را نشان می‌دهد. قابلیت مغناطیس‌شوندگی برای مواد پارامغناطیس، تابع دما و دارای مقادیر مثبت در بازه ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۰۰۰۱ (واحد cgs) می‌باشد. این پارامتر با دما به صورت معکوس رابطه دارد و توسط رابطه (۱۶) برای گونه‌های مختلف به دست می‌آید [۱۹].

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

که مقدار ضریب لاند g برای همه گونه‌های پارامغناطیس برابر ۲ لحاظ می‌شود. مقدار تعداد کل اسپین الکترون برای گونه‌های O، NO و OH به ترتیب ۱، ۰/۵ و ۰/۵ می‌باشد.

جدول ۱: قابلیت مغناطیسی شونده‌های برخی گونه‌ها در احتراق متان [۶]

Table 1. Magnetic susceptibility of some species in methane combustion [6]

گونه	قابلیت مغناطیس شونده‌گی (cgs)
CO ₂	-۲۱×۱۰ ^{-۶}
CO	-۹/۸×۱۰ ^{-۶}
H ₂ O	-۱۲/۶۳×۱۰ ^{-۶}
H	-۲/۹۳×۱۰ ^{-۶}
H ₂	-۳/۹۹×۱۰ ^{-۶}
N ₂	-۱۲×۱۰ ^{-۶}

۴- نتایج

با مدل‌سازی و اعتبارسنجی کد عددی، تأثیر فشار و میدان مغناطیسی یکنواخت بر ترمودینامیک تعادلی و تغییرات کسر مولی هر یک از گونه‌های

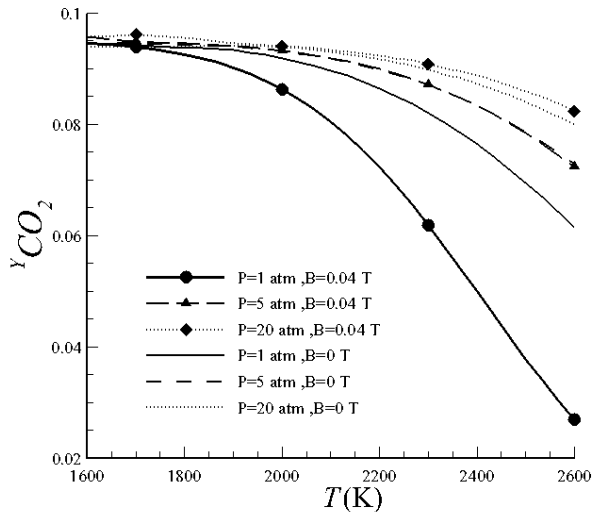


Fig. 3. The variations of CO₂ mole fraction in uniform magnetic field of 0 and 0.04 Tesla at different pressures

شکل ۳: تغییرات کسر مولی CO₂ در میدان مغناطیسی یکنواخت صفر و ۰/۰۴ تسلا و فشارهای مختلف

صفر و ۰/۰۴ تسلا در فشارهای مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. کسر مولی مونواکسید کربن در فشار ۱ اتمسفر و میدان صفر تسلا از ۱۶۸۰ کلوین شروع به تولید و تا مقدار ۰/۰۳۰۶ در دمای ۲۶۰۰ کلوین می‌رسد. رفتار تولید مونواکسید کربن در فشار ثابت با اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت و بدون آن در دماهای مختلف متفاوت است. به عنوان مثال در فشار یک اتمسفر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت باعث افزایش تولید CO می‌شود در حالی که در فشار ۵ یا ۲۰ اتمسفر اعمال میدان باعث کاهش تولید CO خواهد شد.

رفتار تولید CO در تطابق با تولید CO₂ است؛ به این ترتیب که اعمال میدان مغناطیسی در فشار ۱ اتمسفر، سبب کاهش تولید دی‌اکسید کربن و

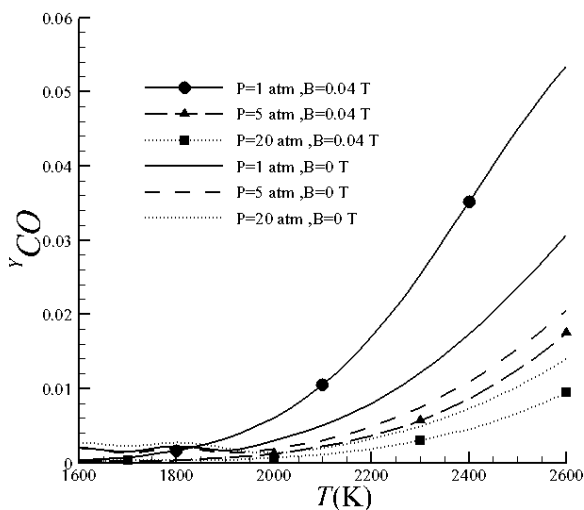


Fig. 4. The variations of CO mole fraction in uniform magnetic field of 0 and 0.04 Tesla at different pressures

شکل ۴: تغییرات کسر مولی CO در میدان مغناطیسی یکنواخت صفر و ۰/۰۴ تسلا و فشارهای مختلف

اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت بالاتر تأثیر چشم‌گیری بر تغییرات کسر مولی بخار آب نخواهد داشت. برای بخار آب و سایر گونه‌ها در فشارهای بالا نتایج حاکی از رفتار مشابه است به نحوی که افزایش شدت میدان تا حد مشخصی باعث تأثیر قابل توجه بر کسر مولی می‌شود. از این رو حد بالای میدان مغناطیسی یکنواخت ۰/۰۴ تسلا انتخاب شده است.

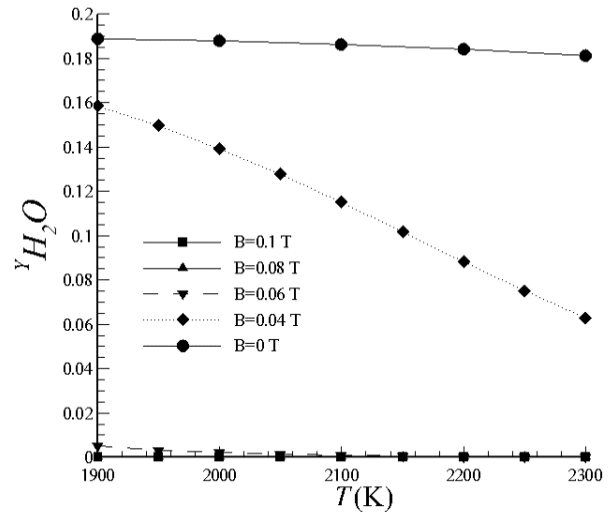


Fig. 2. The variations of H₂O mole fraction in uniform magnetic field of 0 and 0.1 Tesla at different pressures 1 atm

شکل ۲: تغییرات کسر مولی H₂O در میدان مغناطیسی یکنواخت از صفر تا ۰/۱ تسلا در فشار ۱ اتمسفر

شکل ۳ تغییرات کسر مولی دی‌اکسید کربن تحت میدان مغناطیسی یکنواخت صفر و ۰/۰۴ تسلا در فشارهای ۱، ۵ و ۲۰ اتمسفر را نشان می‌دهد. تأثیر دو عامل فشار و میدان مغناطیسی بر کسر مولی دی‌اکسید کربن تا دمای ۱۶۸۰ کلوین قابل صرف‌نظر و ناچیز است. شکل ۳ نشان می‌دهد افزایش فشار در میدان صفر تسلا باعث افزایش تولید دی‌اکسید کربن می‌گردد. همچنین شیب نزولی در نمودار تولید دی‌اکسید کربن، در دماهای بالاتر دیده می‌شود. اثر میدان مغناطیسی یکنواخت بر تولید دی‌اکسید کربن بر خلاف فشار رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد، به نحوی که تأثیر قابل توجه میدان مغناطیسی بر تولید دی‌اکسید کربن در فشارهای پایین مشاهده می‌شود.

در فشارهای کم تا حدود ۵ اتمسفر میدان مغناطیسی یکنواخت باعث کاهش تولید دی‌اکسید کربن (حدود ۳ درصد) و در فشارهای بالا (۲۰ اتمسفر) باعث افزایش تولید آن خواهد شد. هر چند در فشار ۲۰ اتمسفر، بیشتر شدن کسر مولی دی‌اکسید کربن در اثر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت چندان چشم‌گیر نیست، اما می‌توان اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت در فشارهای بالا را عاملی در جهت واکنش کامل‌تر دانست. در یک دمای ثابت افزایش فشار در شرایط با میدان مغناطیسی یکنواخت، درصد رشد کسر مولی دی‌اکسید کربن بیشتر از حالت بدون میدان مغناطیسی می‌باشد.

تغییرات کسر مولی مونواکسید کربن تحت میدان مغناطیسی یکنواخت

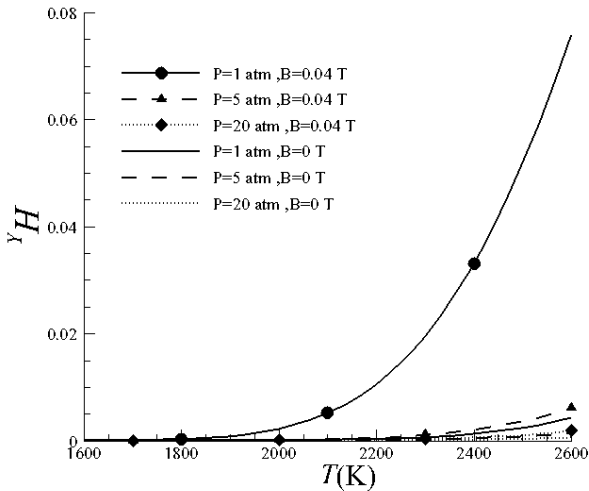


Fig. 6. The variations of H_2 mole fraction in uniform magnetic field of 0 and 0.04 Tesla at different pressures

شکل ۶: تغییرات کسر مولی H_2 در میدان مغناطیسی یکنواخت صفر و ۰/۰۴ تسلا و فشارهای مختلف

صفر می‌رود، این رفتار باعث افزایش کسر مولی اتم هیدروژن می‌شود (شکل ۶).

تغییرات کسر مولی H_2 تولید شده بر حسب دما در فرآیند احتراق متان در شکل ۷ آمده است. کسر مولی H_2 در دمایی خاص به حداکثر مقدار خود رسیده و سپس روند نزولی پیش می‌گیرد. با افزایش فشار این دما نیز بالاتر رفته و همچنین اندازه کسر مولی H_2 زیاد خواهد شد؛ به طوری که در فشار ۱ اتمسفر در دمای ۲۶۰۰ کلوین، مقدار کسر مولی برابر ۰/۰۱۲۷ و در فشار ۲۰ اتمسفر برابر ۰/۰۴۹۵ خواهد بود.

شکل ۸ روند تغییرات کسر مولی O_2 را در دماهای مختلف در اثر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت صفر و ۰/۰۴ تسلا در فشارهای ۱، ۵ و ۲۰ اتمسفر نشان می‌دهد. کسر مولی O_2 تا دمای ۱۸۸۴ کلوین از افزایش فشار

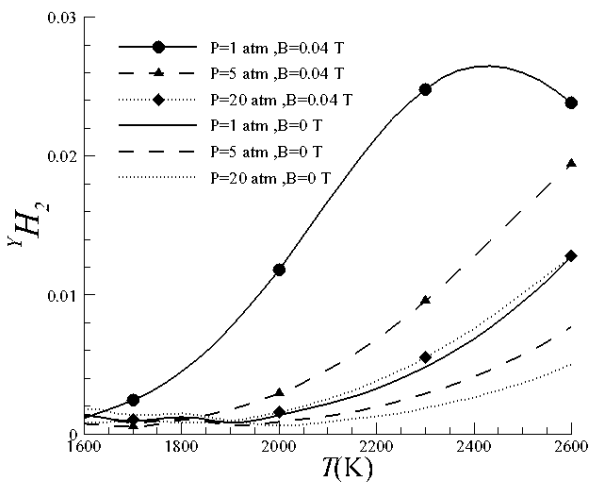


Fig. 7. The variations of H_2 mole fraction in uniform magnetic field of 0 and 0.04 Tesla at different pressures

شکل ۷: تغییرات کسر مولی H_2 در میدان مغناطیسی یکنواخت صفر و ۰/۰۴ تسلا و فشارهای مختلف

در مقابل افزایش تولید منوکسید کربن خواهد شد. تأثیر میدان مغناطیسی بر تولید CO در فشارهای ۵ و ۲۰ اتمسفر برخلاف فشار ۱ اتمسفر بوده و تغییرات کمی در فشارهای بالا (مشابه با CO_2) دارد. هر چند که در فشارهای بالا هر دو عامل فشار و میدان مغناطیسی یکنواخت باعث تولید کمتر CO_2 و بیشتر خواهند بود.

شکل ۵ تغییرات کسر مولی بخار آب با اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت در فشارهای متفاوت را نشان می‌دهد. با بررسی ترمودینامیک تعادلی احتراق متان با هوا در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکنواخت، افزایش دما باعث کاهش تولید بخار آب و برعکس، افزایش فشار باعث افزایش تولید بخار در دمای ثابت می‌شود. برای این گونه نیز مطابق سایر محصولات تولید شده در احتراق متان تغییرات کسر مولی از دمای ۱۶۱۳ کلوین شروع می‌شود. تولید بخار آب با اعمال میدان مغناطیسی رفتار یکنواختی را در دماهای متفاوت دارد. در هر فشاری، اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت باعث کاهش تولید بخار آب به میزان قابل توجهی می‌شود. برخلاف کربن دی اکسید، تأثیرپذیری این گونه در تمام فشارها از میدان مغناطیسی یکنواخت قابل توجه است.

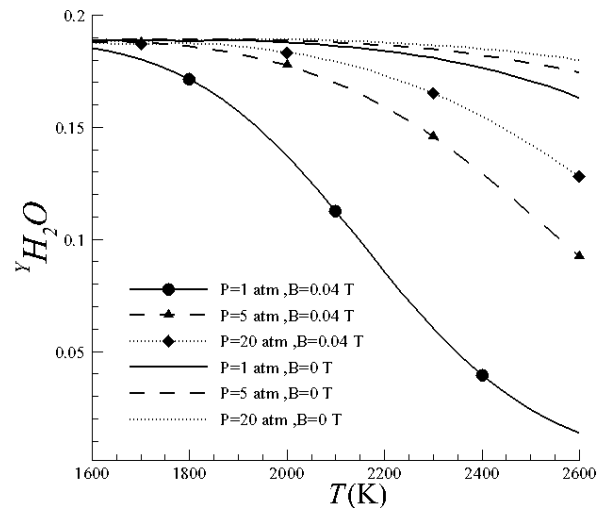


Fig. 5. The variations of H_2O mole fraction in uniform magnetic field of 0 and 0.04 Tesla at different pressures

شکل ۵: تغییرات کسر مولی H_2O در میدان مغناطیسی یکنواخت صفر و ۰/۰۴ تسلا و فشارهای مختلف

شکل ۶ تغییر کسر مولی اتم هیدروژن بر حسب دما به ازای فشارهای مختلف را نشان می‌دهد. طبق این شکل، اتم هیدروژن به عنوان محصول واکنش در فشارهای پایین و دماهای بیش از ۲۳۶۰ کلوین تولید شده و افزایش فشار باعث کاهش تولید می‌شود. در تمام فشارها اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت افزایش تولید هیدروژن تک اتمی را ایجاد خواهد کرد. تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت بر گونه H در فشارهای پایین بزرگ‌تر از فشارهای بالا است.

طبق شکل ۵ بخار آب تجزیه حرارتی شده و کسر مولی آن به سمت

فشار ۱ اتمسفر نشان داد، OH پارامغناطیس نیز چنین رفتاری دارد. باتوجه به قابلیت مغناطیس‌پذیری بیشتر اکسیژن در مقایسه با OH، این رفتار را می‌توان در اثر بزرگ‌تر بودن اندازه نیروی حجمی وارد شده بر اکسیژن دانست. شایان ذکر است افزایش فشار باعث تأخیر در تولید گونه OH می‌شود.

از دیگر گونه‌های تولید شده در فرآیند احتراق متان، اتم اکسیژن می‌باشد که کسر مولی اتم اکسیژن بر حسب دما به ازای فشارهای مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. رفتار اتم اکسیژن مطابق رفتار اتم هیدروژن می‌باشد و با افزایش فشار کسر مولی آن کاهش می‌یابد که این اتفاق در دمای بالای ۲۰۴۴ کلوین رخ می‌دهد. افزایش دما باعث تولید اتم اکسیژن شده که این افزایش در مورد بخار آب (شکل ۵) باعث تجزیه حرارتی و کاهش کسر مولی آن شد.

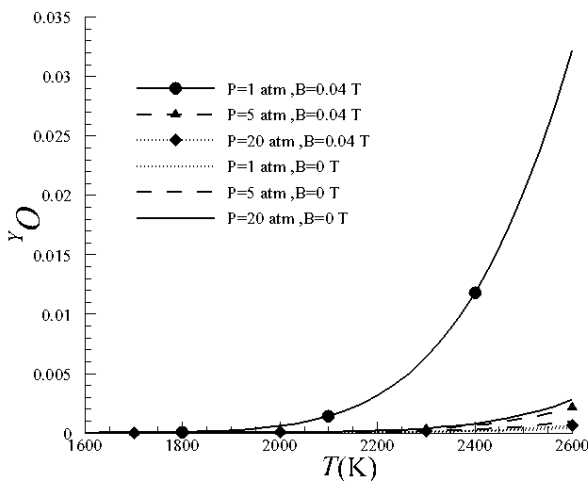


Fig. 10. The variations of O mole fraction in uniform magnetic field of 0 and 0.04 Tesla at different pressures

شکل ۱۰: تغییرات کسر مولی O در میدان مغناطیسی یکنواخت صفر و ۰/۰۴ تسلا و فشارهای مختلف

کسر مولی مولکول نیتروژن تحت فشارهای مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. گونه N_2 تا حدود دمای ۱۶۱۹ کلوین از فشار و میدان تأثیر نمی‌پذیرد. در تمام فشارها اعمال میدان مغناطیسی شروع روند کاهشی غلظت مولکول نیتروژن را در دمای پایین‌تر سبب می‌شود. همچنین افزایش فشار مانع تجزیه نیتروژن در دمای بالا می‌شود.

شکل ۱۲ کسر مولی NO را بر حسب دما در فشارهای مختلف نشان می‌دهد. با افزایش فشار در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت کسر مولی NO زیاد می‌شود. همانطور که در مورد گونه پارامغناطیس O_2 مشاهده شد، کسر مولی NO نیز با اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت به شدت کاهش می‌یابد.

نکته قابل توجه در بررسی این شکل کاهش میزان NO تولیدی در فشار اتمسفر همزمان با افزایش دما است؛ به نحوی که در دمای ۱۹۰۰ کلوین اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت باعث کاهش ۴۸/۵ درصدی و دمای

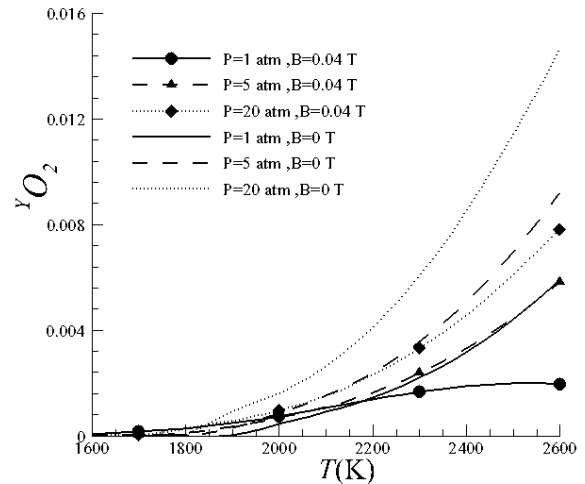


Fig. 8. The variations of O_2 mole fraction in uniform magnetic field of 0 and 0.04 Tesla at different pressures

شکل ۸: تغییرات کسر مولی O_2 در میدان مغناطیسی یکنواخت صفر و ۰/۰۴ تسلا و فشارهای مختلف

و میدان مغناطیسی یکنواخت تأثیر نمی‌پذیرد. در فشار یک اتمسفر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت، کسر مولی O_2 را به شدت کاهش می‌دهد. این رفتار را می‌توان با خاصیت پارامغناطیسی اکسیژن مرتبط دانست. با توجه به نتایج شکل‌های ۳، ۴ و ۵ اثر میدان مغناطیسی یکنواخت بر گونه‌های تولید شده، در فشارهای کم، قابل توجه است. بر این مبنای کاهش چشم‌گیر غلظت O_2 در فشار ۱ اتمسفر کاملاً در تطابق با نتایج سایر گونه‌ها است.

شکل ۹ کسر مولی گونه OH تولید شده در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت به ازای دماهای مختلف را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹ تغییر کسر مولی گونه OH در اثر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت در فشار ۱ اتمسفر در مقایسه با سایر فشارها بیشتر است. همانطور که O_2 به عنوان ماده پارامغناطیس تغییرات چشم‌گیری در اثر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت در

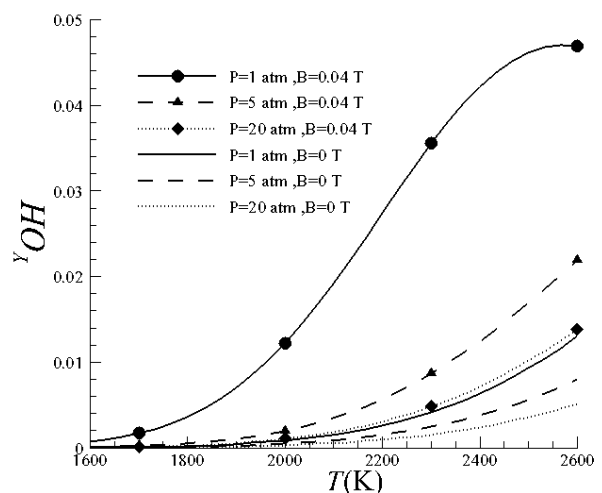


Fig. 9. The variations of OH mole fraction in uniform magnetic field of 0 and 0.04 Tesla at different pressures

شکل ۹: تغییرات کسر مولی OH در میدان مغناطیسی یکنواخت صفر و ۰/۰۴ تسلا و فشارهای مختلف

مغناطیسی یکنواخت ۰/۰۴ تسلا باعث کاهش ۴۸/۵ تا ۶۱/۷ درصدی تولید آلاینده NO می‌شود.

- برای تمام گونه‌ها تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت بر تغییرات کسر مولی با افزایش فشار کاهش می‌یابد.
- کسر مولی دو گونه پارامغناطیس NO و O₂ در فشار یک اتمسفر در اثر میدان مغناطیسی یکنواخت به شدت کاهش می‌یابند.
- افزایش فشار باعث بزرگ‌تر شدن کسر مولی گونه‌های دی اکسید کربن، نیتروژن و بخار شده و به عبارتی واکنش احتراق کامل‌تر می‌شود.
- در فشارهای ۵ و ۲۰ اتمسفر اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت باعث کاهش تولید CO و افزایش تولید CO₂ می‌شود در حالی که در فشار ۱ اتمسفر نتیجه معکوس است.

با توجه به نتایج با اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت و افزایش فشار می‌توان کاهش آلاینده‌های NO و CO را به طور همزمان با افزایش دما ایجاد نمود.

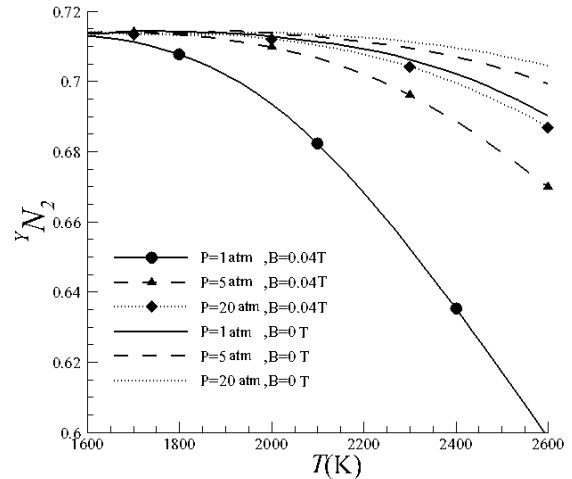


Fig. 11. The variations of N₂ mole fraction in uniform magnetic field of 0 and 0.04 Tesla at different pressures

شکل ۱۱: تغییرات کسر مولی N₂ در میدان مغناطیسی یکنواخت صفر و ۰/۰۴ تسلا و فشارهای مختلف

فهرست علائم

a_{ij}	تعداد اتم المان i محصول j
B	القای مغناطیسی (T)
b_j	تعداد اتم المان j در 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)
nSp	تعداد کل گونه‌های تولید شده
nEl	تعداد کل المان‌های شرکت‌کننده در واکنش
n_i	تعداد کل مول گونه‌های تولید شده (mol)
p	فشار (kgm ⁻¹ s ⁻²)
p_i	فشار گونه (kgm ⁻¹ s ⁻²)
R_u	ثابت جهانی گازها (J/mol.K)

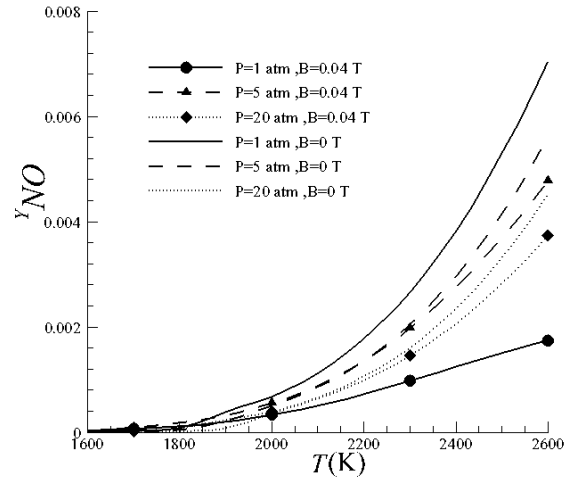


Fig. 12. The variations of NO mole fraction in uniform magnetic field of 0 and 0.04 Tesla at different pressures

شکل ۱۲: تغییرات کسر مولی NO در میدان مغناطیسی یکنواخت صفر و ۰/۰۴ تسلا و فشارهای مختلف

۲۲۵۰ کلومین میدان باعث کاهش ۶۱/۷ درصدی اکسید نیتروژن می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه عددی ۱۰ گونه اصلی تولید شده در فرآیند احتراق متان با هوا در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت و فشارهای مختلف با استفاده از کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس انجام گردید. براین اساس نتایج زیر حاصل شد:

- اثر میدان مغناطیسی یکنواخت در فشار یک اتمسفر بر گونه‌های تولید شده پارامغناطیس در مقایسه با سایر گونه‌ها قابل توجه‌تر است.
- در محدوده احتراق واقعی متان با هوا (۱۹۰۰ تا ۲۲۵۰ کلومین و فشار ۱ اتمسفر) که آلاینده NO زیادی تولید می‌شود، اعمال میدان

transition of the OH radical in flames, *Chemical Physics Letters*, 87(2) (1982) 113-116.

- [9] H. Hayashi, Recent studies of excited molecules and reaction intermediates, *Scientific papers of the institute of physical and chemical research*, 80(3) (1986) 87-101.
- [10] N.I. Wakayama, I. Ogasawara, H. Hayashi, The external magnetic field effect on the emission intensity of the Na D line in hydrogen—oxygen flames, *Chemical Physics Letters*, 105(2) (1984) 209-213.
- [11] A.I. Kirdyashkin, Y.M. Maksimov, A.G. Merzhanov, Effect of a magnetic field on the combustion of heterogeneous systems with condensed reaction products, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 22(6) (1986) 700-706.
- [12] S. Ueno, K. Harada, Experimental difficulties in observing the effects of magnetic fields on biological and chemical processes, *Magnetics, IEEE Transactions on*, 22(5) (1986) 868-873.
- [13] T. Aoki, Radicals' Emissions and Butane Diffusion Flames Exposed to Upward-Decreasing Magnetic Fields, *Japanese Journal of Applied Physics*, 28(5R) (1989) 776.
- [14] E. Yamada, M. Shinoda, H. Yamashita, K. Kitagawa, Experimental and numerical analyses of magnetic effect on OH radical distribution in a hydrogen-oxygen diffusion flame, *Combustion and Flame*, 135(4) (2003) 365-379.
- [15] Y. Mizutani, M. Fuchihata, Y. Ohkura, Pre-mixed laminar flames in a uniform magnetic field, *Combustion and Flame*, 125(1-2) (2001) 1071-1073.
- [16] E. Yamada, M. Shinoda, H. Yamashita, K. Kitagawa, Numerical analysis of a hydrogen-oxygen diffusion flame in vertical or horizontal gradient of magnetic field, *Combustion Science and Technology*, 174(9) (2002) 149 - 164.
- [17] J. Baker, K. Saito, Magnetocombustion: a thermodynamic analysis, *Journal of Propulsion and Power*, 16(2) (2000) 263-268.
- [18] A. Gupta, J. Baker, Uniform magnetic fields and equilibrium flame temperatures, *Journal of thermophysics and heat transfer*, 21(3) (2007) 520-524.
- [19] R.E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, Courier Corporation, 2013.
- [20] S. Gordon, B.J. McBride, *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium*

انتروپی (J/mol.K) S

تعداد کل اسپین الکترون گونه i S_i

دما (K) T

انرژی داخلی (J/mol) U

حجم (m^3) V

کار (J/mol) W

کسر مولی گونه‌ها y

تعداد مول فرض شده برای گونه i y_i

قابلیت مغناطیس‌پذیری X

علامت یونانی

ضریب لاگرانژ (kgm^{-3}) λ

مغناطیس بوهر (J/T) μ_B

قابلیت نفوذ مغناطیسی هوا (H/m) μ_0

زیرنویس

هوا air

گونه i ام i

منابع

- [1] M.E. Biresselioglu, T. Yelkenci, I.O. Oz, Investigating the natural gas supply security: A new perspective, *Energy*, 80 (2015) 168-176.
- [2] W.-f. Wu, J. Qu, K. Zhang, W.-p. Chen, B.-w. Li, Experimental Studies of Magnetic Effect on Methane Laminar Combustion Characteristics, *Combustion Science and Technology*, 188(3) (2016) 472-480.
- [3] A. Saeedi, M. Moghiman, Kerosene wick lamp flame deformation in gradient magnetic fields, *Applied Physics Letters*, 104(11) (2014) 114104.
- [4] M. Faraday, LXIV. *On the diamagnetic conditions of flame and gases*, (1847).
- [5] D.R. Lide, *CRC handbook of chemistry and physics*, CRC Press, Boca Raton, Fla., 2009.
- [6] R.C. Weast, *CRC handbook of chemistry and physics*, (1986).
- [7] R. Delhez, L'influence du champ magnétique sur les transformations physico-chimiques, *Bulletin de la Société Royale (Belge) des Sciences*, 26(2) (1957) 83.
- [8] H. Hayashi, The external magnetic field effect on the emission intensity of the $A\ 2[\Sigma]^+ \rightarrow X\ 2[\Pi] (0-0)$

Interim Revision, March 1976, (1976)

Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

H. Raznahan, J. Khadem, A. Saeedi, Study the Effects of Uniform Magnetic Fields and Pressures on the Concentration of Main Species of Methane Combustion, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(2) (2018) 337-346.

DOI: 10.22060/mej.2017.12194.5279

