

Evaluation of Methane-Oxygen Premixed Flame Dynamics in a Meso-Scale Reactor via RGB Image Processing

Soroush Sarrafan Sadeghi¹ , Sadeq Tabejamaat²

¹ **Corresponding author**, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

Email: soroush.s.s@aut.ac.ir

² Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran. Email: sadegh@aut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type

Research Article

Article history

Received 2026.02.16

Received in revised form 2026.03.20

Accepted 2026.03.25

Available online 2026.03.27

Keywords

RGB image processing

Meso-scale combustion

Premixed flame

Equivalence ratio

RERI regime

ABSTRACT

In the present study, RGB image processing was applied as a low-cost and non-intrusive approach for quantitative re-analysis of methane–oxygen premixed flame images obtained in a cylindrical meso-scale reactor with a 5 mm inner diameter. The analysis focused on stable asymmetric and repetitive extinction and re-ignition (RERI) regimes at oxygen flow rates of 0.5, 0.75, and 1.0 SLM and nitrogen dilution levels of 0, 37.5, and 50%. For each RERI condition, three consecutive images with adequate flame visibility were processed independently and averaged. Mean red, green, and blue intensities, composite Gray intensity, the blue-to-green ratio (B/G), and pixel-wise color distributions were evaluated. The results showed that the mean B/G ratio was higher in RERI than in the Stable regime under all investigated conditions, although its dependence on equivalence ratio was non-monotonic and partial overlap occurred in some cases. R, G, and Gray consistently decreased from the last Stable condition to the first RERI condition, whereas B showed stronger dependence on operating conditions. Pixel-wise R–G and B–G distributions also changed between the two regimes. Previous optical and spectroscopic studies were used only to interpret qualitative co-trends with visible-light intensity and spectral features associated with CH^* and C_2^* , since Lux, CH^* , and C_2^* were not independently and simultaneously measured in the present dataset. Overall, combined RGB descriptors provide a practical framework for monitoring flame-regime changes, while broader validation is required for automatic classification or combustion control.

Introduction

Micro- and mesoscale combustion systems have attracted considerable attention for compact energy-conversion applications because of the high energy density of hydrocarbon fuels and the potential for heat recirculation [1–3]. At reduced scales, however, increased wall heat loss, flame–wall interaction, residence-time limitations, and transport effects strongly influence flame stability and extinction. Previous studies have demonstrated multiple flame regimes in narrow channels, including stable, oscillatory, and repetitive extinction and re-ignition (RERI) behaviors [4–7]. In particular, Sarrafan Sadeghi et al. experimentally identified Blow-off, Blow-out, stable asymmetric, RERI, and Flashback regimes in a 5 mm methane–oxygen meso-scale reactor [7]. Heat-recirculating and Swiss-roll configurations have also been widely investigated as approaches for extending combustion stability at small scales [8–11].

Optical diagnostics based on OH^* , CH^* , and C_2^* chemiluminescence provide useful information on flame structure and reaction-zone behavior [12,13], but generally require dedicated optical equipment and calibration. Digital RGB imaging offers a simpler and lower-cost approach for extracting flame color, luminosity, and morphological descriptors [14–17]. Previous studies have shown that RGB responses can reflect changes in flame radiation and combustion conditions, while recent investigations have compared image-derived parameters with independent optical and spectroscopic measurements [19–21]. These relationships, however, are configuration dependent and do not imply that broadband RGB channels directly measure individual chemical species or photometric quantities.

The present study quantitatively re-analyzes the flame images reported in [7] to investigate the transition between stable asymmetric and RERI regimes. Mean RGB intensities, Gray intensity, the blue-to-green ratio (B/G), and pixel-level color distributions are evaluated under different oxygen-flow and nitrogen-dilution conditions. The objective is to assess their applicability as complementary low-cost image-based indicators of

Cite This Paper:

Sarrafan Sadeghi, Soroush., Tabejamaat, Sadegh., (2026). Evaluation of Methane Oxygen Premixed Flame Dynamics in a Meso Scale Reactor via RGB Image Processing. *Fuel and Combustion*, 19 (1), 107-132. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.588899.1463> (In Persian)

© The author(s) retain the copyright.

Publisher: [Iranian Combustion Institute \(ICI\)](http://www.ici.ir).

ارجاعدهی به این مقاله:



flame-regime changes without treating them as direct substitutes for spectroscopy or independent optical measurements.

Methodology

The experimental images and regime boundaries were obtained from the methane–oxygen combustion experiments reported in [7]. The experiments employed a transparent cylindrical quartz reactor with a 5 mm inner diameter. Methane and oxygen of 99.99% and 99.95% purity, respectively, were premixed before entering the reactor at 300 K. Gas flow rates and pressures were monitored using digital flowmeters and manometers. Flame images were recorded using digital cameras at 25 fps. The present analysis focuses on the stable asymmetric and RERI regimes under oxygen flow rates of 0.5, 0.75, and 1.0 SLM and nitrogen dilution levels of 0, 37.5, and 50%.

For each RERI operating condition, three consecutive images with adequate flame visibility and image quality were processed independently, and the resulting parameters were averaged. The selected images were not synchronized with a particular phase of the RERI cycle; therefore, the reported RERI values represent averages of three selected images rather than time- or phase-resolved averages over a complete oscillation cycle.

Images recorded by the Nikon V1 were processed in Python using OpenCV, NumPy, and Matplotlib, following established digital flame-image processing approaches [14–18]. Mean red, green, and blue intensities were calculated as R_{avg} , G_{avg} , and B_{avg} . The color ratio was defined as:

$$B/G = \frac{B_{avg}}{G_{avg}} \quad (1)$$

Pixel-wise R–G and B–G distributions were also examined to retain information on color dispersion that is not represented by channel means. Gray intensity was calculated using the OpenCV grayscale conversion:

$$Gray \approx 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (2)$$

Its mean value was determined for each analyzed image. The physical interpretation of the RGB features was based on previous spectroscopic and imaging studies [12–17,19–21]. The blue and green camera responses overlap spectral regions containing contributions from CH^* and C_2^* , while previous calibrated measurements have also related red-channel variations to changes in visible flame luminosity. However, Lux, CH^* , and C_2^* were not independently and simultaneously measured in the present dataset. Consequently, RGB quantities are treated as image-derived descriptors, and previous optical relationships are used only for qualitative interpretation.

Results and Discussion

The B/G ratio exhibited a condition-dependent and generally non-monotonic response to equivalence ratio. Nevertheless, its mean value was higher in the RERI regime than in the Stable regime for all six investigated operating conditions, and the ranges of the two regimes were separated in four cases. The degree of separation depended on oxygen flow rate and nitrogen dilution, with clearer regime differentiation generally observed under diluted conditions. B/G therefore provides a useful complementary indicator of regime transition, but does not support a universal threshold. Because the camera channels are broadband, B/G should not be interpreted as a direct measurement of the CH^*/C_2^* chemiluminescence ratio [12–15,19–21].

The individual R, G, B, and Gray descriptors also responded differently to regime transition. Their variations with equivalence ratio were not fully monotonic, reflecting the combined effects of flame morphology, emitting area, position, radiation distribution, and camera spectral response [14–16]. Across the transition from the last Stable condition to the first RERI condition, R_{avg} , G_{avg} , and Gray decreased in all six operating cases, whereas B_{avg} showed a condition-dependent response. Thus, the Stable–RERI transition is better described as a redistribution of image-derived color features than as a uniform increase or decrease of all channels.

The red-channel response showed the largest relative decrease at the regime boundary. Previous calibrated studies [19–21] provide a basis for interpreting this behavior as qualitatively related to changes in visible flame luminosity. The decrease is also consistent with the structural changes accompanying RERI, including flame displacement, weakening, extinction, and re-ignition [7]. Since visible-light intensity was not independently measured in the present dataset, however, R_{avg} is used only as a relative image-based optical indicator and not as a direct Lux measurement.

The green and blue channels also exhibited distinct responses. Previous spectroscopic and imaging studies show that their broadband responses overlap spectral regions containing C_2^* and CH^* emission [12–15,19–21]. In the present data, G generally decreased across the Stable–RERI transition, while B could either decrease or increase

depending on operating conditions. These results indicate a regime-dependent redistribution of the recorded spectral-color response, but G and B are not considered direct measurements of C_2^* or CH^* .

Pixel-wise R–G and B–G scatter distributions provided additional information beyond mean intensities. Differences in the location, extent, and organization of the pixel clouds were observed between Stable and RERI images, indicating changes in spatial-color structure across the transition. This dispersion represents pixel-level color variability rather than temporal oscillation amplitude. Because only three selected consecutive images were analyzed for each RERI condition, quantitative time-resolved characterization would require substantially longer synchronized image sequences.

Overall, the results support a multi-feature interpretation in which mean channel intensities, B/G, Gray, and pixel-distribution characteristics are considered jointly. R, G, and Gray showed the most consistent directional response across the regime boundary, B was more condition dependent, and B/G provided useful but non-universal regime sensitivity. Previous optical and spectroscopic studies [12–21] provide physical context for these trends but are not treated as independent validation of the present image data.

Conclusions

RGB images of methane–oxygen premixed flames in a 5 mm meso-scale reactor were quantitatively re-analyzed to investigate stable asymmetric and RERI regimes. The Stable–RERI transition produced different responses among the image-derived descriptors. B/G generally increased in RERI and provided useful regime sensitivity, although its behavior was non-monotonic and overlap occurred under some conditions. R, G, and Gray showed more consistent directional decreases across the regime boundary, whereas B was more dependent on operating conditions.

Pixel-wise R–G and B–G distributions also changed between the two regimes, demonstrating that useful information is retained in the spatial-color distribution beyond mean channel values. These distributions, however, do not represent the temporal oscillation amplitude of RERI.

The combined use of RGB intensities, color ratios, Gray intensity, and pixel-level descriptors therefore provides a low-cost and non-intrusive framework for monitoring flame-regime changes. Since Lux, CH^* , and C_2^* were not independently measured in the present dataset, previous optical relationships are used only for qualitative interpretation. Further simultaneous RGB–spectroscopy–Lux measurements, extended time-resolved imaging, and validation under additional geometries and operating conditions are required before these indicators can be generalized to automatic regime classification or closed-loop combustion control.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic) for financial support and provision of laboratory facilities for this research. And the authors acknowledge the Energy and Thermal Systems Laboratory (formerly the Fuel and Combustion Laboratory), Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), for technical support and access to computational facilities.

CRediT Author Statement

Soroush Sarrafan Sadeghi: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization, Project administration. **Sadegh Tabejamaat:** Supervision, Conceptualization, Resources, Writing – review & editing, Funding acquisition.

Funding

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author Contributions

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data Availability Statement

Data are available from the corresponding author upon reasonable request.

References

- [1] N. S. Kaisare and D. G. Vlachos, "A review on microcombustion: Fundamentals, devices and applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 38, pp. 321–359, 2012, doi: 10.1016/j.pecs.2012.01.001.
- [2] K. Maruta, "Micro and mesoscale combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 33, pp. 125–150, 2011, doi: 10.1016/j.proci.2010.09.005.
- [3] Y. Ju and K. Maruta, "Microscale combustion: Technology development and fundamental research," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 37, pp. 669–715, 2011, doi: 10.1016/j.pecs.2011.03.001.
- [4] Y. Ju and B. Xu, "Theoretical and experimental studies on mesoscale flame propagation and extinction," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 30, pp. 2445–2453, 2005.
- [5] Y. Ju and B. Xu, "Effects of channel width and Lewis number on the multiple flame regimes and propagation limits in mesoscale," *Combustion Science and Technology*, vol. 178, pp. 1723–1753, 2006.
- [6] Y. Ju and C. W. Choi, "An analysis of sub-limit flame dynamics using opposite propagating flames in mesoscale channels," *Combustion and Flame*, vol. 133, pp. 483–493, 2003.
- [7] S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat, M. Baigmohammadi, and J. Zarvandi, "An experimental study of the effects of equivalence ratio, mixture velocity and nitrogen dilution on methane/oxygen pre-mixed flame dynamics in a meso-scale reactor," *Energy Conversion and Management*, vol. 81, pp. 169–183, 2014.
- [8] J. Wan and A. Fan, "Recent progress in flame stabilization technologies for combustion-based micro energy and power systems," *Fuel*, vol. 286, Art. no. 119391, 2021.
- [9] S. A. Lloyd and F. J. Weinberg, "A burner for mixtures of very low heat content," *Nature*, vol. 251, pp. 47–49, 1974.
- [10] N. Kim et al., "Flame stabilization and emission of small Swiss-roll combustors as heaters," *Combustion and Flame*, vol. 141, pp. 229–240, 2005.
- [11] N. I. Kim et al., "Development and scale effects of small Swiss-roll combustors," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 31, pp. 3243–3250, 2007.
- [12] C. S. Panoutsos et al., "Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using OH*, CH* chemiluminescence in premixed and non-premixed methane-air flames," *Combustion and Flame*, vol. 156, pp. 273–291, 2009.
- [13] J. Kojima et al., "Spatially resolved measurement of OH*, CH*, and C₂* chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane/air premixed flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 28, pp. 1757–1764, 2000.
- [14] H. W. Huang and Y. Zhang, "Flame colour characterization in the visible and infrared spectrum using a digital camera and image processing," *Measurement Science and Technology*, vol. 19, Art. no. 085406, 2008.
- [15] H. W. Huang and Y. Zhang, "Dynamic application of digital image and colour processing in characterizing flame radiation features," *Measurement Science and Technology*, vol. 21, Art. no. 085202, 2010.
- [16] M. Najarnikoo et al., "Experimental study on the flame stability and color characterization of cylindrical premixed perforated burner of condensing boiler by image processing method," *Energy*, vol. 189, Art. no. 116130, 2019.
- [17] D.-C. Toncu et al., "Emulsified jet fuel flame characterization with image processing," *Journal of the Energy Institute*, vol. 92, pp. 567–577, 2019.
- [18] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, and S. L. Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB*, 2nd ed., 2009.
- [19] S. Sarrafan Sadeghi et al., "A novel Swiss-roll counterflow micro-combustor: Experimental investigation of methane-oxygen flame behavior over time," *Applied Thermal Engineering*, vol. 255, Art. no. 123978, 2024.
- [20] S. S. Sadeghi et al., "Effects of wall temperature on non-premixed micro-combustion: A comparative experimental study of copper and aluminum in Swiss-roll chambers," *Fuel Processing Technology*, vol. 274, Art. no. 108237, 2025.
- [21] S. Sarrafan Sadeghi et al., "A novel Swiss-roll counterflow micro-combustor: Experimental investigation of flame dynamic characteristics by spectroscopy and RGB image processing methods," *Energy*, vol. 299, Art. no. 131495, 2024.

ارزیابی رفتار دینامیکی شعله‌های پیش مخلوط متان-اکسیژن در راکتور مزو-مقیاس با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر RGB

سروش صرافان صادقی^۱، صادق تابع جماعت^۲

^۱ نویسنده مخاطب، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران، sorosh.s.s@aut.ac.ir

^۲ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران، sadegh@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۰۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۷ کلیدواژه‌ها: پردازش تصویر RGB احتراق مزو-مقیاس شعله پیش‌آمیخته نسبت هم‌آزری رژیم نوسانی	در پژوهش حاضر، پردازش تصویر RGB به‌عنوان روشی کم‌هزینه و غیرتماسی برای بازتحلیل کمی تصاویر شعله پیش‌آمیخته متان-اکسیژن در یک راکتور استوانه‌ای مزو-مقیاس با قطر داخلی ۵ میلی‌متر به‌کار گرفته شد. تحلیل بر رژیم‌های شعله نامتقارن پایدار و خاموش‌شونده و روشن‌شونده تکراری (RERI)، در دبی‌های اکسیژن ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۰ لیتر بر دقیقه و سطوح رقیق‌سازی نیتروژن ۰، ۳۷/۵ و ۵۰ درصد متمرکز شد. برای هر شرایط RERI، سه تصویر متوالی با وضوح مناسب به‌طور مستقل پردازش و میانگین نتایج گزارش شد. شدت متوسط کانال‌های قرمز، سبز و آبی، شاخص ترکیبی Gray، نسبت آبی به سبز (B/G) و توزیع‌های پیکسلی بررسی شدند. نتایج نشان دادند که میانگین B/G در تمام شرایط بررسی‌شده در رژیم RERI بیشتر از رژیم پایدار است، هرچند تغییر آن با نسبت هم‌آزری غیرتک‌سویه بوده و در برخی شرایط هم‌پوشانی میان دو رژیم وجود دارد. مؤلفه‌های R و G و شاخص Gray در عبور از آخرین شرایط پایدار به نخستین شرایط RERI در هر شش حالت کاهش نشان دادند، در حالی که پاسخ B وابستگی بیشتری به شرایط عملیاتی داشت. توزیع‌های پیکسلی R-G و B-G نیز میان دو رژیم تغییر کردند. مطالعات نوری و طیف‌سنجی پیشین صرفاً برای تفسیر کیفی هم‌راستایی روندها استفاده شدند، زیرا Lux، CH^* و C_2^* در مجموعه داده حاضر به‌صورت مستقل و همزمان اندازه‌گیری نشدند. در مجموع، استفاده ترکیبی از ویژگی‌های RGB چارچوبی مناسب برای پایش تغییر رژیم شعله فراهم می‌کند، هرچند تعمیم آن به طبقه‌بندی خودکار یا کنترل احتراق نیازمند اعتبارسنجی گسترده‌تر است.

مقدمه

احتراق در مقیاس‌های مزو و میکرو طی دو دهه اخیر به‌عنوان یکی از زمینه‌های مهم پژوهشی در علوم احتراق و سامانه‌های تبدیل انرژی کوچک‌مقیاس مورد توجه قرار گرفته است. کایساره و ولاکوس [۱] در یک مطالعه مروری، مبانی فیزیکی، پیکربندی‌های متداول و کاربردهای اصلی سامانه‌های میکرو-احتراق را بررسی کرده‌اند. از منظر رفتار دینامیکی شعله و کاربردهای پیش‌رانش کوچک‌مقیاس نیز مطالعات مروری اخیر، اهمیت کنترل پایداری و پاسخ دینامیکی شعله را در این سامانه‌ها نشان داده‌اند [۲]. توسعه فناوری‌های مرتبط با میکرو-احتراق در کاربردهای مختلف مهندسی نیز در مطالعات و اختراعات متعددی مورد توجه قرار گرفته است [۱-۴] و استفاده از این سامانه‌ها برای تبدیل انرژی در مولدهای توان کوچک، یکی از زمینه‌های اصلی توسعه این فناوری به شمار می‌رود [۴].

با وجود چگالی انرژی بالای سوخت‌های هیدروکربنی، کاهش ابعاد مشخصه محفظه احتراق، چالش‌های متفاوتی نسبت به سامانه‌های متعارف ایجاد می‌کند. مطالعات تجربی در راکتورهای استوانه‌ای مزو-مقیاس نشان داده‌اند که مشخصات جریان ورودی می‌توانند بر دینامیک شعله و فرکانس رفتارهای نوسانی تأثیر قابل توجهی داشته باشند [۵]. تغییر طول محفظه نیز حتی در قطر

Cite This Paper:

Sarrafan Sadeghi, Soroush., Tabejamaat, Sadegh., (2026). Evaluation of Methane Oxygen Premixed Flame Dynamics in a Meso Scale Reactor via RGB Image Processing. *Fuel and Combustion*, 19 (1), 107-132. <https://doi.org/10.22034/jfnc.2026.588899.1463> (In Persian)

© The author(s) retain the copyright.

Publisher: Iranian Combustion Institute (ICI).



ثابت، محدوده‌های دینامیکی و رفتار شعله را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۶]. علاوه بر شرایط جریان و هندسه، تغییر میدان حرارتی داخل محفظه، برای مثال از طریق حضور اجسام جامد، می‌تواند ساختار و پایداری شعله پیش‌آمیخته را تغییر دهد [۷]. اهمیت این عوامل در مطالعات مروری اخیر درباره روش‌های افزایش پایداری شعله و زمان ماند سوخت در سامانه‌های میکرو-احتراق نیز مورد تأکید قرار گرفته است [۸].

تعاریف متعددی برای احتراق در این مقیاس‌ها ارائه شده است؛ از جمله تعریف بر اساس طول مشخصه، فاصله خاموشی، یا نسبت سطح به حجم. ماروتا [۹] و جو و ماروتا [۱۰] در مقاله‌های مروری خود، برهم‌کنش شعله-دیواره و اثرات نفوذ مولکولی را از ویژگی‌های بنیادین احتراق مزو/میکرو برشمرده‌اند. پژوهش‌های اولیه در این حوزه، مانند کار جاروزینسکی [۱۱] بر روی خاموشی شعله متان-هوا در کانال‌های باریک، نشان داد که فاصله خاموشی با ضخامت شعله و نسبت هم‌ارزی مرتبط است. سیتزکی و همکاران [۱۲] با بررسی محفظه‌های میکرو-مارپیچی کاتالیستی نشان دادند که در اعداد رینولدز زیر ۲۰، احتراق پایدار امکان‌پذیر است. رونی [۱۳] با مدل‌سازی تشعشع حرارتی، نقش دیواره را در خاموشی شعله تحلیل کرد. ماروتا و همکاران [۱۴] نیز به‌صورت تجربی و عددی، چهار رژیم شعله شامل معمولی، خاموش‌شونده و روشن‌شونده تکراری (FREI)، نوسانی و ترکیبی را در راکتورهای استوانه‌ای کوارتز با قطر زیر بحرانی شناسایی کردند.

در زمینه دینامیک شعله در مقیاس مزو، جو و شو [۱۵، ۱۶] با بررسی شعله‌های منتشرشونده در کانال‌های باریک، اثر اتلاف حرارت و برهم‌کنش شعله-دیواره را بر شکل‌گیری رژیم‌های متعدد شعله نشان دادند. جو و چوی [۱۷] نیز رفتار شعله در شرایط محدودیت حرارتی را در کانال‌های مزومقیاس بررسی کردند. در مطالعه تجربی صرافان صادقی و همکاران [۱۸]، اثر نسبت هم‌ارزی، سرعت مخلوط ورودی و رقیق‌سازی نیتروژن بر دینامیک شعله پیش‌آمیخته متان-اکسیژن در یک راکتور استوانه‌ای کوارتز با قطر داخلی ۵ میلی‌متر بررسی و پنج رژیم شامل Blow-off، Blow-out، شعله نامتقارن پایدار، خاموشی و روشن‌شدن تکرارشونده (RERI) و Flashback شناسایی شد. در آن مطالعه، مرزهای رژیم‌های شعله به‌صورت تجربی تعیین شدند و تصاویر ثبت‌شده عمدتاً برای شناسایی و توصیف کیفی رفتار شعله مورد استفاده قرار گرفتند. در پژوهش حاضر، مجموعه تصاویر حاصل از همان آزمون‌ها به‌عنوان داده پایه مورد استفاده قرار گرفته و تحلیل کمی جدیدی از ویژگی‌های RGB، با تمرکز بر رژیم‌های شعله نامتقارن پایدار و RERI، بر روی آن‌ها انجام شده است. مطالعات تکمیلی نیز حساسیت رفتار شعله در مقیاس مزو به هندسه راکتور و نوع رقیق‌سازی را نشان داده‌اند [۷، ۱۹، ۲۰].

تثبیت شعله در ابعاد کوچک ارتباط نزدیکی با انتقال حرارت و بازایی حرارتی دارد [۲۱]. یکی از پیکربندی‌های شناخته‌شده در این زمینه، محفظه Swiss-roll است که نخستین‌بار توسط لوی و واینبرگ [۲۲] معرفی شد. مطالعات بعدی نشان داده‌اند که هندسه و ابعاد کانال از طریق تغییر انتقال حرارت و پیش‌گرمایش مخلوط ورودی می‌توانند بر محدوده پایداری و رفتار دینامیکی شعله تأثیر بگذارند [۲۳، ۲۴]. این نتایج اهمیت ارتباط میان شرایط حرارتی محفظه و پاسخ دینامیکی شعله را در مقیاس‌های کوچک نشان می‌دهند.

برای بررسی کمی شعله، طیف‌سنجی به‌عنوان روشی متداول، امکان شناسایی رادیکال‌های فعال مانند OH^* ، CH^* و C_2^* را از طریق تحلیل طول‌موج و شدت گسیل نوری فراهم می‌کند. پانتوسوس و همکاران [۲۵] نشان دادند که شدت OH^* و CH^* در احتراق غیرپیش‌آمیخته متان-هوا با نسبت هم‌ارزی همبستگی دارد و کوجیما و همکاران [۲۶] نیز حساسیت نسبت‌های OH^*/CH^* و CH^*/C_2^* را به نسبت هم‌ارزی تأیید کردند. در کنار این روش، پردازش تصاویر رنگی شعله می‌تواند اطلاعات کمی درباره شدت و توزیع مکانی مؤلفه‌های رنگی را با استفاده از دوربین‌های دیجیتال فراهم سازد. هوانگ و ژانگ [۲۷، ۲۸] قابلیت تصویربرداری دیجیتال و پردازش رنگ را برای مشخصه‌یابی ویژگی‌های تابشی شعله بررسی کردند. نجارنیکو و همکاران [۲۹] از

ویژگی‌های رنگی برای بررسی رفتار شعله‌های پیش‌آمیخته استفاده کردند و تونکو و همکاران [۳۰] نیز کاربرد پردازش تصویر را در تخمین مشخصات احتراقی مورد مطالعه قرار دادند. در مطالعات اخیر صرافان صادقی و همکاران [۳۱-۳۳]، پردازش تصویر RGB در شعله‌های کوچک‌مقیاس در کنار روش‌های تشخیصی نوری و طیف‌سنجی مورد بررسی قرار گرفت و قابلیت مؤلفه‌های رنگی برای توصیف تغییرات رفتار شعله ارزیابی شد. در پژوهش حاضر، نتایج این مطالعات به‌عنوان مبنای روش‌شناختی برای تفسیر روندهای RGB مورد استفاده قرار می‌گیرند و مقادیر کانال‌های رنگی به‌عنوان اندازه‌گیری مستقیم CH^* ، C_2^* یا Lux تلقی نمی‌شوند.

با وجود پژوهش‌های گسترده در زمینه دینامیک شعله در راکتورهای مقیاس مزو، کاربرد کمی ویژگی‌های استخراج‌شده از تصاویر RGB برای بررسی و تمایز رژیم‌های دینامیکی از پیش‌شناسایی‌شده در شعله پیش‌آمیخته متان-اکسیژن در راکتورهای استوانه‌ای مزومقیاس کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در مطالعات مرجع [۱۸] که پنج رژیم شعله را شناسایی کرده‌اند، تاکنون مطالعاتی به کاربرد سیستماتیک روش پردازش تصویر RGB برای تحلیل کمی این رژیم‌ها در شرایط پیش‌آمیخته مزو-مقیاس نپرداخته است. از سوی دیگر، مطالعات جدید در زمینه احتراق غیرپیش‌آمیخته [۳۱-۳۵] نشان داده‌اند که روش RGB می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد ماهیت شیمیایی و فیزیکی شعله ارائه دهد. لازم به ذکر است که روش‌های طیف‌سنجی علی‌رغم دقت بالا، نیازمند تجهیزات گران‌قیمت، کالیبراسیون پیچیده و زمان‌بر هستند. در مقابل، روش پردازش تصویر RGB با استفاده از دوربین‌های دیجیتال معمولی، امکان پایش لحظه‌ای و کم‌هزینه شعله را فراهم می‌آورد. این ویژگی، روش RGB را به گزینه‌ای جذاب برای کاربردهای صنعتی و آزمایشگاهی تبدیل کرده است که در آن‌ها دسترسی به تجهیزات پیشرفته طیف‌سنجی محدود است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی دینامیک شعله پیش‌آمیخته متان-اکسیژن در یک راکتور مزو-مقیاس با استفاده از پردازش تصویر RGB انجام شده است. بنابراین، اهداف اصلی پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

- ۱) انجام تحلیل کمی جدید بر روی تصاویر شعله حاصل از مجموعه آزمایشگاهی گزارش‌شده در مرجع [۱۸] با استفاده از مؤلفه‌های رنگی RGB؛
- ۲) بررسی تغییرات شدت متوسط مؤلفه‌های قرمز، سبز و آبی، شدت خاکستری، نسبت B/G و ویژگی‌های توزیع پیکسلی در رژیم‌های شعله نامتقارن پایدار و RERI؛
- ۳) بررسی رفتار این شاخص‌های تصویری در ارتباط با مرزهای رژیم شعله که پیش‌تر به‌صورت تجربی برای شرایط مختلف دبی اکسیژن و رقیق‌سازی نیتروژن تعیین شده‌اند؛
- ۴) ارزیابی قابلیت ویژگی‌های استخراج‌شده از تصاویر RGB به‌عنوان شاخص‌های نوری کم‌هزینه برای پایش و تمایز رژیم‌های شعله.

روش‌شناسی

مجموعه داده آزمایشگاهی و پیکربندی آزمون

مجموعه داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در پژوهش حاضر از برنامه آزمایشگاهی گزارش‌شده توسط صرافان صادقی و همکاران [۱۸] حاصل شده است. در مطالعه مرجع، اثر نسبت هم‌ارزی، سرعت مخلوط ورودی و رقیق‌سازی نیتروژن بر رفتار دینامیکی شعله پیش‌آمیخته متان-اکسیژن بررسی و مرز رژیم‌های مختلف شعله به‌صورت تجربی تعیین شد. در پژوهش حاضر آزمایش احتراقی جدیدی برای بازتعریف این مرزها انجام نشده است؛ بلکه از تصاویر اصلی ثبت‌شده در همان مجموعه آزمایشگاهی با یک رویکرد کمی جدید مبتنی بر مؤلفه‌های RGB بازتحلیل شده‌اند. از این‌رو، توضیحات پیکربندی آزمایشگاهی در ادامه برای مشخص کردن شرایط تولید تصاویر و مبنای فیزیکی طبقه‌بندی رژیم‌ها ارائه می‌شود. بر همین مبنا در این آزمایش‌ها از یک

راکتور استوانه‌ای از جنس کوارتز شفاف با قطر داخلی ۵ میلی‌متر، طول ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۱ میلی‌متر استفاده شده است. شفافیت نوری کوارتز امکان تصویربرداری مستقیم از شعله و مشاهده موقعیت آن درون راکتور را فراهم می‌کند. شرایط هندسی و حرارتی این راکتور امکان مشاهده رژیم‌های مختلف شعله، از جمله شعله نامتقارن پایدار و رژیم خاموشی و روشن شدن تکرارشونده (RERI)، را فراهم می‌کند [۷، ۱۸]. آزمایش‌ها در دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس انجام شده‌اند. تأمین سوخت و اکسیدکننده به‌ترتیب از کپسول‌های متان با خلوص ۹۹/۹۹٪ و اکسیژن با خلوص ۹۵/۹۹٪ صورت گرفته است. برای اندازه‌گیری دبی حجمی گازها و فشار در خطوط سوخت و اکسیدکننده، از چهار دبی‌سنج دیجیتال (ساخت New-Flow و Yamatake) و دو مانومتر دیجیتال (ساخت NewFlow) با دقت ۰/۱٪ در مقیاس کامل استفاده شده است. عملکرد قطع و وصل جریان و ایمنی سیستم توسط شیرهای برقی و یک‌طرفه در محل‌های مناسب کنترل می‌شده است. کلیه اتصالات و لوله‌ها از نوع مهره‌تصال و جنس مس بوده‌اند. نمایی از بستر آزمون و نمای شماتیک از بستر آزمون در شکل ۱ نشان داده شده است. مخلوط متان-اکسیژن به‌صورت پیش‌آمیخته (پیش از ورود به راکتور) تهیه شده و دمای مخلوط ورودی در تمامی آزمایش‌ها برابر با ۳۰۰ کلوین بوده است. احتراق مخلوط توسط یک جرقه‌زن واقع در خروجی راکتور آغاز می‌شده و سپس با تنظیم دبی سوخت و اکسیدکننده، شعله به‌داخل راکتور هدایت (فلش‌بک کنترل‌شده) و تثبیت می‌شده است. جهت ثبت تصاویر و فیلم‌های شعله در طول آزمون‌ها، از دو دوربین دیجیتال (مدل‌های Canon PowerShot G6 و Nikon V1) با سرعت ۲۵ فریم بر ثانیه استفاده شده است.

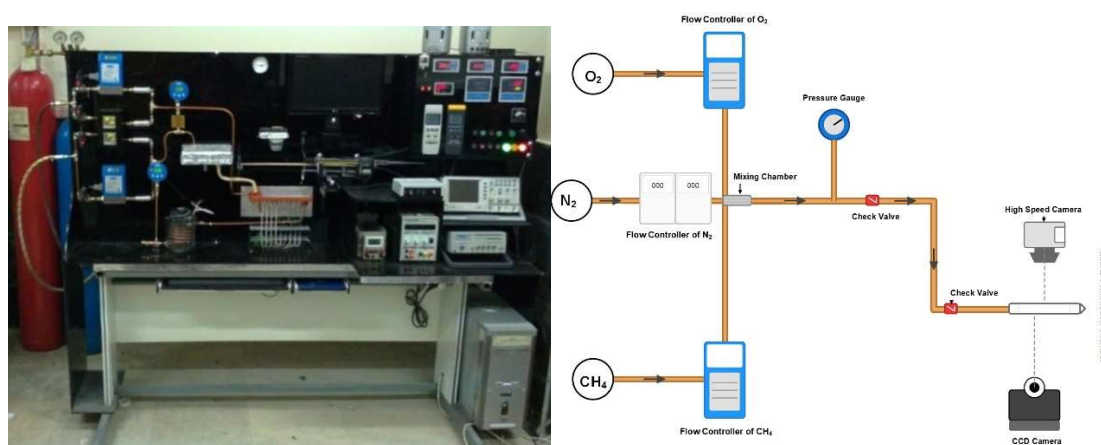


Figure 1- Overall view and flow diagram of the test bench equipment used.

شکل ۱- نمایی کلی و دیاگرام جریانی، تجهیزات بستر تست مورد استفاده.

پارامترهای عملیاتی و محدوده آزمون‌ها

پارامترهای اصلی متغیر در این پژوهش شامل نسبت هم‌ارزی (ϕ)، سرعت مخلوط ورودی (عدد رینولدز) و درصد رقیق‌سازی با نیتروژن هستند. در این پژوهش، تغییرات نسبت هم‌ارزی با تغییر دبی جرمی سوخت (متان) در حالی که دبی اکسیژن ثابت نگه‌داشته می‌شود، اعمال شده است. محدوده نسبت هم‌ارزی بررسی‌شده در مقاله مرجع [۱۸] در بازه وسیعی از مقادیر غنی از سوخت تا نزدیک استوکیومتری (بسته به درصد رقیق‌سازی) قرار داشته است.

روش اجرای آزمون‌ها و تعیین رژیم‌های شعله

برای تعیین دقیق محدوده شکل‌گیری رژیم‌های مختلف شعله، ابتدا آزمون‌های مقدماتی برای یافتن حدود فلش‌بک، خاموشی خارج از راکتور (Blow-out) و تشکیل شعله درون راکتور انجام شده است. جهت کاهش اثرات پیش‌گرمایش دیواره راکتور بر

داده‌های ثبت‌شده، کلیه آزمایش‌ها از نسبت‌های هم‌ارزی غنی از سوخت (با سرعت شعله کمتر) شروع و سپس به سمت مقادیر نزدیک‌تر به استوکیومتری (با سرعت شعله بیشتر) پیش رفته‌اند [۱۸]. با تغییر دبی سوخت در دبی ثابت اکسیژن و درصد رقیق‌سازی مشخص، پنج رژیم شعله در راکتور مزو-مقیاس قابل شناسایی است:

- ۱) **Blow-off (خاموشی در خارج از راکتور):** زمانی که سرعت ورودی به مراتب بیشتر از سرعت شعله است و شعله حتی در خروجی راکتور نیز تشکیل نمی‌شود.
- ۲) **Blow-out (شعله چسبیده به خروجی):** زمانی که سرعت ورودی کمی بیشتر از سرعت موضعی شعله است و شعله درست در خارج از خروجی راکتور تشکیل و به آن متصل می‌شود.
- ۳) **شعله نامتقارن پایدار درون راکتور:** زمانی که سرعت ورودی تقریباً برابر با سرعت موضعی شعله است و شعله به صورت پایدار درون راکتور تشکیل می‌شود. این شعله به دلیل برهم‌کنش حرارتی شعله-دیواره و اثرات جابه‌جایی طبیعی، اغلب به صورت نامتقارن مشاهده می‌شود.
- ۴) **RERI (خاموش‌شونده و روشن‌شونده تکراری):** زمانی که دمای موضعی دیواره به دمای خوداشتعالی می‌رسد و شعله به صورت نوسانی و تکرار شونده درون راکتور حرکت کرده، خاموش و مجدداً روشن می‌شود.
- ۵) **Flashback (فلش‌بک):** زمانی که سرعت ورودی از سرعت موضعی شعله کمتر است و شعله به سرعت به سمت بالادست جریان حرکت می‌کند.

در نمودار شکل ۲ روند تغییرات رژیم‌های شعله‌ها بر حسب نسبت هم‌ارزی و نسبت رقیق‌سازی نشان داده شده است.

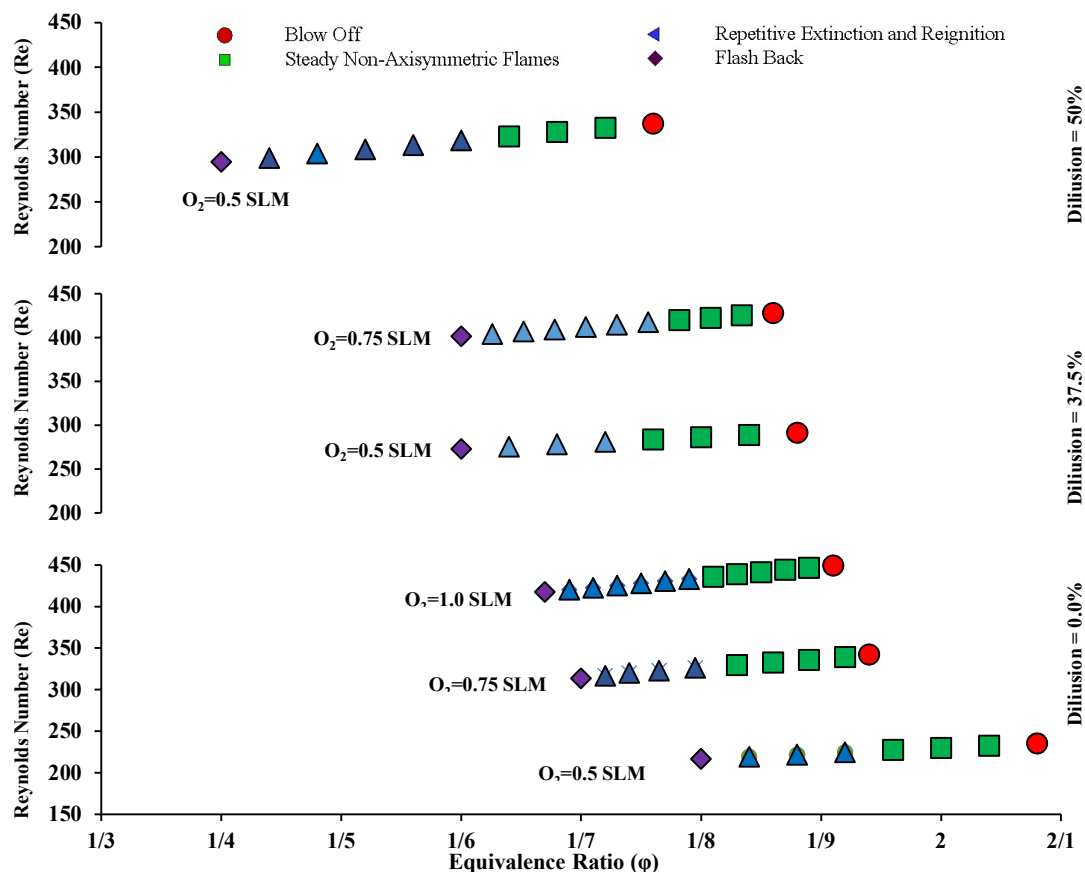


Figure 2- Variations in flame regime boundaries and flame states as a function of equivalence ratio and dilution ratio.

شکل ۲- روند تغییرات محدوده و حالت شعله‌ها بر حسب نسبت هم‌ارزی و نسبت رقیق‌سازی.

پردازش تصویر RGB

در پژوهش حاضر، تصاویر ثبت شده با دوربین Nikon V1 از مجموعه آزمایشگاهی مرجع [۱۸] به منظور استخراج ویژگی‌های کمی رنگ شعله مورد پردازش قرار گرفتند. پردازش تصاویر با استفاده از کد توسعه یافته در محیط Python و با بهره‌گیری از کتابخانه‌های OpenCV، NumPy و Matplotlib انجام شد. چارچوب کلی این روش پردازش تصویر پیش‌تر در مطالعات [۳۱-۳۴] مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، این چارچوب برای تحلیل کمی تصاویر شعله‌های پیش‌آمیخته متان-اکسیژن در رژیم‌های پایدار و RERI به کار گرفته شد.

در رژیم RERI، به دلیل تغییرات ناپایای شکل و موقعیت شعله، برای هر شرایط آزمایشگاهی سه تصویر متوالی که در آن‌ها شعله به وضوح قابل مشاهده بوده و کیفیت تصویری مناسبی داشت، انتخاب و به طور جداگانه پردازش شدند. انتخاب تصاویر به زمان یا فاز مشخصی از چرخه RERI وابسته نبود و از روش تحریک یا هم‌زمان‌سازی فازی استفاده نشد. پارامترهای تصویری برای هر یک از سه تصویر به صورت مستقل استخراج و سپس میانگین حسابی آن‌ها به عنوان مقدار گزارش شده برای آن شرایط ارائه شد. بنابراین، مقادیر گزارش شده برای رژیم RERI بیانگر میانگین سه تصویر منتخب هستند و نباید به عنوان میانگین زمانی یک چرخه کامل نوسان شعله تفسیر شوند.

مشخصات تصاویر ورودی

تصاویر مورد تحلیل با دوربین Nikon V1 و نرخ ثبت ۲۵ فریم بر ثانیه تهیه شده‌اند [۱۸]. تصاویر رنگی دارای عمق ۸ بیت بوده و شدت هر یک از مؤلفه‌های قرمز، سبز و آبی در بازه ۰ تا ۲۵۵ قرار دارد. تصاویر ورودی در محیط پردازش به آرایه‌های عددی تبدیل شده و سپس سه ماتریس متناظر با کانال‌های R، G و B از یکدیگر تفکیک شدند. برای کمی‌سازی شدت رنگ تصاویر، مقدار متوسط شدت هر کانال در ناحیه مورد تحلیل محاسبه شد. اگر N تعداد پیکسل‌های ناحیه مورد بررسی باشد، شدت متوسط کانال‌های قرمز، سبز و آبی به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آید:

$$R_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \quad (۱)$$

$$G_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_i \quad (۲)$$

$$B_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_i \quad (۳)$$

که در آن R_i ، G_i و B_i به ترتیب شدت کانال‌های قرمز، سبز و آبی در پیکسل هستند. نسبت B/G نیز به صورت B_{avg}/G_{avg} محاسبه و برای بررسی تغییرات نسبی دو مؤلفه رنگی در شرایط مختلف مورد استفاده قرار گرفت.

در پژوهش حاضر، تصویر RGB با استفاده از تبدیل استاندارد مقیاس خاکستری در OpenCV (cv2.COLOR_BGR2GRAY) به تصویر Gray تبدیل شد. این تبدیل به طور تقریبی از رابطه:

$$Gray = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (۴)$$

پیروی می‌کند. سپس مقدار متوسط Gray در ناحیه مورد تحلیل محاسبه شد و در شرایط RERI، میانگین مقادیر حاصل از سه تصویر منتخب گزارش گردید.

علاوه بر مقادیر متوسط، توزیع شدت پیکسل‌ها در فضای رنگی نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، مقادیر متناظر کانال‌های رنگی هر پیکسل در نمودارهای دوبعدی رسم شدند؛ به گونه‌ای که نمودارهای RGB-G توزیع پیکسل‌های تصویر را در

فضای چندکاناله نشان می‌دهند. این روش امکان بررسی دامنه، تراکم و پراکندگی مؤلفه‌های رنگی را فراهم می‌کند و در مقایسه با استفاده صرف از مقادیر متوسط، بخشی از اطلاعات مربوط به توزیع مکانی شدت رنگ تصویر را نیز حفظ می‌کند. جهت بیان و مشخص شدن روند و الگوریتم مراحل استخراج پارامترهای RGB از هر تصویر در شکل ۳ نشان داده شده است.

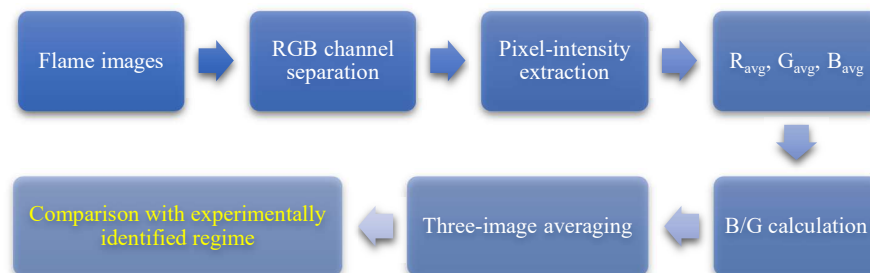


Figure 3- Workflow of the RGB image-processing and feature-extraction procedure used in the present study.

شکل ۳- گردش کار پردازش تصویر RGB و روش استخراج ویژگی مورد استفاده.

مراحل پردازش تصویر با کد پایتون

برای انجام پردازش تصاویر، یک کد اختصاصی به زبان برنامه‌نویسی پایتون توسعه داده شده است که از کتابخانه‌های تخصصی OpenCV، NumPy و Matplotlib بهره می‌برد [۳۱-۳۴]. مراحل اصلی پردازش به شرح زیر است:

- **بارگذاری و تبدیل تصاویر به آرایه عددی:** بارگذاری و تبدیل تصاویر به آرایه عددی: تصاویر رنگی ۸ بیت بارگذاری و به آرایه‌های عددی متناظر با شدت پیکسل‌ها در بازه ۰ تا ۲۵۵ تبدیل می‌شوند. این مقادیر مبنای تفکیک کانال‌ها و محاسبه شاخص‌های شدت متوسط قرار می‌گیرند.
- **تفکیک کانال‌های رنگی:** تصویر نرمال شده به سه ماتریس دوبعدی مجزا برای کانال‌های قرمز (R)، سبز (G) و آبی (B) تفکیک می‌شود. هر ماتریس، شدت نور مربوط به همان کانال رنگی را برای تمامی پیکسل‌های تصویر نشان می‌دهد.
- **محاسبه شدت متوسط پیکسل‌ها:** برای هر یک از سه کانال رنگی، مقدار متوسط شدت پیکسل‌ها در ناحیه مربوط به شعله محاسبه می‌شود. این کمیت‌ها به عنوان شاخص‌های کلی شدت رنگ شعله در نظر گرفته می‌شوند و به ترتیب با نمادهای R_{avg} ، G_{avg} و B_{avg} نمایش داده می‌شوند.
- **تحلیل پراکندگی پیکسل‌ها:** به منظور بررسی دقیق‌تر توزیع رنگ در سطح شعله، نمودارهای پراکندگی دوبعدی برای هر جفت کانال رنگی (به ویژه کانال‌های قرمز و آبی نسبت به کانال سبز به عنوان مبنا) ترسیم می‌شود. گستره، تراکم و شکل توزیع نقاط در این نمودارها اطلاعات تکمیلی درباره ناهمگنی رنگی و روابط نسبی میان کانال‌های RGB در سطح پیکسل فراهم می‌کنند. این ویژگی‌ها در پژوهش حاضر به عنوان مشخصه‌های تصویری تحلیل می‌شوند و مستقیماً به توزیع گونه‌های شیمیایی نسبت داده نمی‌شوند.

مبنای فیزیکی تفسیر مؤلفه‌های RGB

پاسخ کانال‌های رنگی یک دوربین دیجیتال تابع توزیع طیفی تابش ورودی و مشخصات پاسخ طیفی حسگر است. در شعله‌های هیدروکربنی، بخشی از تابش ثبت شده در محدوده مرئی با نشر گونه‌های برانگیخته و تابش پیوسته شعله مرتبط است. مطالعات

پیشین [۲۷-۳۴] نشان داده‌اند که تغییرات کانال‌های RGB می‌توانند با تغییرات برخی ویژگی‌های نوری و طیف‌سنجی شعله همراه باشند.

در مطالعات پیشین [۳۱-۳۳]، مؤلفه‌های RGB در کنار روش‌های تشخیصی نوری مورد بررسی و کالیبراسیون قرار گرفته‌اند و ارتباط میان تغییرات کانال‌های رنگی و داده‌های نوری مستقل ارزیابی شده است. این نتایج در پژوهش حاضر به‌عنوان مبنای روش‌شناختی برای تفسیر روند تغییرات RGB مورد استفاده قرار می‌گیرند.

باین‌حال، در مجموعه داده مورد استفاده در پژوهش حاضر، اندازه‌گیری همزمان و مستقل Lux و طیف‌سنجی CH^* و C_2^* انجام نشده است. بنابراین، مقادیر R، G و B در این مطالعه به‌عنوان کمیت‌های مستقیم استخراج‌شده از تصاویر تحلیل می‌شوند و معادل اندازه‌گیری مستقیم C_2^* یا CH^* در نظر گرفته نمی‌شوند. به همین ترتیب، نسبت B/G یک شاخص تصویری است و نه اندازه‌گیری مستقیم نسبت طیف‌سنجی CH^*/C_2^* . روابط گزارش‌شده در مطالعات پیشین [۲۷-۳۴] تنها برای تفسیر فیزیکی روندهای مشاهده‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بر این اساس، مطالعات پیشین [۳۱-۳۳] نشان داده‌اند که در پیکربندی‌های مورد کالیبراسیون، تغییرات کانال قرمز تصاویر می‌تواند با تغییرات شدت روشنایی مرئی شعله هم‌راستا باشد. همچنین، بر اساس مطالعات طیف‌سنجی و پردازش تصویر [۲۵-۳۱، ۳۳]، محدوده پاسخ کانال‌های آبی و سبز با بخش‌هایی از نواحی طیفی مرتبط با نشر CH^* و C_2^* هم‌پوشانی دارد. این نتایج مبنایی فیزیکی برای تفسیر کیفی روندهای R، G و B در پژوهش حاضر فراهم می‌کنند. باین‌حال، به دلیل پهن‌بند بودن پاسخ کانال‌های دوربین و نبود اندازه‌گیری همزمان و مستقل Lux، CH^* و C_2^* در مجموعه داده حاضر، هیچ‌یک از کانال‌های RGB به‌عنوان اندازه‌گیری مستقیم این کمیت‌ها در نظر گرفته نمی‌شوند و روابط مطالعات پیشین صرفاً برای بررسی هم‌راستایی و معقول بودن فیزیکی روندهای مشاهده‌شده استفاده می‌شوند.

نتایج و بحث

در این بخش، ویژگی‌های کمی استخراج‌شده از تصاویر شعله شامل شدت متوسط کانال‌های R، G و B، نسبت B_{avg}/G_{avg} ، شدت Gray و توزیع پیکسلی مؤلفه‌های رنگی بررسی می‌شوند. مرز رژیم‌های شعله بر اساس نتایج تجربی گزارش‌شده در مرجع [۱۸] تعیین شده‌اند، در حالی که پارامترهای RGB مورد بحث در این بخش از بازتحلیل کمی تصاویر ثبت‌شده در همان مجموعه آزمایشگاهی به دست آمده‌اند. در رژیم RERI، مقدار گزارش‌شده برای هر شرایط عملیاتی، میانگین نتایج حاصل از سه تصویر متوالی منتخب با وضوح مناسب است. انتخاب این تصاویر به فاز زمانی خاصی از نوسان RERI وابسته نبوده است.

چارچوب تفسیر ویژگی‌های رنگی شعله

پژوهش‌های بنیادین هوانگ و ژانگ با مقایسه‌ی همزمان داده‌های طیف‌سنج و تصاویر دوربین رنگی، نشان داد که مؤلفه‌ی آبی (B) در فضای RGB می‌تواند نمایانگر روند شدت نشر رادیکال CH^* (طول موج ۴۳۰ نانومتر، شاخص آزادسازی گرما) و مؤلفه‌ی سبز (G) می‌تواند نمایانگر روند شدت نشر رادیکال C_2^* (طول موج‌های ۴۷۱ و ۵۱۶ نانومتر، شاخص تشکیل دوده بر اساس معرفی منابع) است [۲۷، ۲۸].

از این‌رو، در پژوهش حاضر کانال‌های B_{avg} و G_{avg} به‌عنوان ویژگی‌های رنگی استخراج‌شده از تصاویر تحلیل می‌شوند و به‌عنوان اندازه‌گیری مستقیم CH^* و C_2^* در نظر گرفته نمی‌شوند. به همین ترتیب، نسبت B_{avg}/G_{avg} یک شاخص تصویری حاصل از نسبت شدت متوسط دو کانال رنگی است و، با توجه به نبود اندازه‌گیری طیف‌سنجی همزمان در مجموعه داده حاضر، معادل

مستقیم نسبت طیف‌سنجی CH^*/C_2^* تلقی نمی‌شود. مطالعات [۲۷-۳۴] صرفاً مبنای روش‌شناختی و فیزیکی تفسیر روندهای مشاهده‌شده را فراهم می‌کنند.

مطالعات پیشین [۳۱-۳۳] که در آن‌ها تصویربرداری RGB در کنار اندازه‌گیری‌های نوری مستقل مورد استفاده قرار گرفته است، هم‌راستایی روندی میان پاسخ کانال قرمز و تغییرات شدت روشنایی مرئی شعله را گزارش کرده‌اند. از این‌رو، در پژوهش حاضر R_{avg} به‌عنوان یک شاخص تصویری مرتبط با تغییرات نسبی روشنایی مرئی تفسیر می‌شود، نه به‌عنوان اندازه‌گیری مستقیم Lux. به همین ترتیب، هم‌پوشانی طیفی پاسخ کانال‌های G و B با نواحی شامل نشر C_2^* و CH^* [۲۵-۲۸، ۳۱-۳۳] امکان تفسیر کیفی تغییرات این کانال‌ها را فراهم می‌کند، اما این مؤلفه‌ها به‌عنوان اندازه‌گیری مستقیم گونه‌های شیمیایی در نظر گرفته نمی‌شوند. این تفکیک میان «شاخص تصویری» و «اندازه‌گیری مستقل» در تمام تحلیل‌های بعدی مقاله رعایت شده است.

تحلیل نسبت B/G به‌عنوان شاخص تصویری گذار Stable-RERI

شکل ۴، تغییرات نسبت را بر حسب نسبت هم‌ارزی برای شرایط مختلف دبی اکسیژن و رقیق‌سازی نیتروژن نشان می‌دهد. نسبت B_{avg}/G_{avg} از تقسیم شدت متوسط کانال آبی (B_{avg}) بر شدت متوسط کانال سبز (G_{avg}) محاسبه شده است. در رژیم RERI، برای هر شرایط سه تصویر متوالی با وضوح مناسب به‌طور مستقل پردازش شدند و میانگین سه مقدار B_{avg}/G_{avg} به‌عنوان مقدار نهایی گزارش شد. انتخاب تصاویر به زمان یا فاز مشخصی از چرخه RERI وابسته نبود. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که در تمام شرایط روند یکنواختی نسبت به نسبت هم‌ارزی ندارد؛ باین‌حال، مقدار میانگین این نسبت در تمامی شرایط

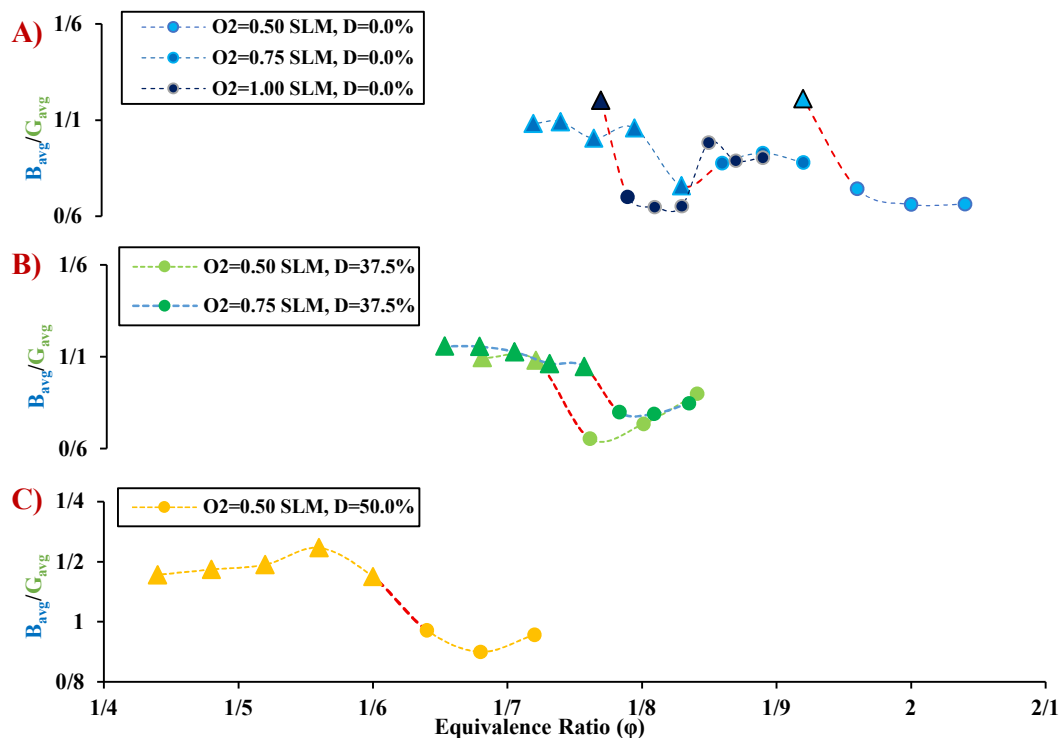


Figure 4- Variations of the blue-to-green intensity ratio (B_{avg}/G_{avg}) as a function of equivalence ratio (ϕ) for stable and oscillatory regimes. (Symbols: ● Stable, ▲ Oscillatory RERI); (A) Without dilution, (B) 37.5% N_2 dilution, (C) 50% N_2 dilution.

شکل ۴- تغییرات نسبت شدت مؤلفه‌ی آبی به سبز (B_{avg}/G_{avg}) بر حسب نسبت هم‌ارزی (ϕ) در رژیم‌های پایدار و نوسانی. (نمادها: ● پایدار، ▲ نوسانی RERI); (A) بدون رقیق‌سازی، (B) رقیق‌سازی ۳۷/۵٪ نیتروژن، (C) رقیق‌سازی ۵۰٪ نیتروژن).

بررسی شده در رژیم RERI بالاتر از رژیم پایدار است و در بخش قابل توجهی از شرایط، تغییر مشخصی در مجاورت مرز تجربی دو رژیم مشاهده می‌شود. بنابراین، در این مطالعه B_{avg}/G_{avg} به عنوان یک شاخص تصویری حساس به تغییر رژیم، و نه یک معیار مستقل و عمومی برای جداسازی رژیم‌ها، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

بررسی شکل ۴ نشان می‌دهد که نسبت B_{avg}/G_{avg} در تمام شرایط عملیاتی رفتار کاملاً یکنواختی نسبت به نسبت هم‌ارزی ندارد؛ با این حال، مقایسه رژیم‌های پایدار و RERI یک ویژگی مشترک را نشان می‌دهد: میانگین B_{avg}/G_{avg} در تمام شرایط بررسی شده در رژیم RERI بیشتر از مقدار میانگین آن در رژیم پایدار است. میزان این افزایش و وضوح جدایش دو رژیم به دبی اکسیژن و درصد رقیق‌سازی نیتروژن وابسته است. بنابراین، B_{avg}/G_{avg} به عنوان یک شاخص تصویری حساس به تغییر رژیم می‌توان در نظر گرفت.

• **در حالت بدون رقیق‌سازی: شکل ۴-A)، رفتار B_{avg}/G_{avg} به دبی اکسیژن وابستگی قابل توجهی دارد.**

$O_2=0.50$ در لیتر بر دقیقه، مقادیر B_{avg}/G_{avg} در دو نقطه پایدار $\phi=2/0.4$ و $\phi=2/0.0$ تقریباً ثابت و به ترتیب برابر با 0.855 و 0.852 هستند. در نخستین نقطه RERI در $\phi=1/96$ ، مقدار B_{avg}/G_{avg} همچنان حدود 0.852 است و بنابراین در خود مرز گذار، تغییر ناگهانی مشخصی مشاهده نمی‌شود. با کاهش بیشتر نسبت هم‌ارزی به $\phi=1/92$ ، مقدار میانگین B_{avg}/G_{avg} در رژیم RERI به حدود $1/178$ افزایش می‌یابد. در نتیجه، برای این شرایط، تغییر B_{avg}/G_{avg} پس از ورود به RERI آشکارتر می‌شود و نمی‌توان آن را به صورت یک پرش فوری در اولین نقطه گذار توصیف کرد. برای $O_2=0.75$ لیتر بر دقیقه و بدون رقیق‌سازی، جدایش دو رژیم واضح‌تر است. مقادیر B_{avg}/G_{avg} در رژیم پایدار، در محدوده $\phi=1/92$ تا $\phi=1/83$ ، بین حدود 0.933 و $1/0.5$ قرار دارند، در حالی که در رژیم RERI مقادیر این نسبت در محدوده حدود $1/0.41$ تا $1/0.96$ قرار می‌گیرند. به ویژه در عبور از آخرین نقطه پایدار ($B_{avg}/G_{avg} \approx 0.933$) و B_{avg}/G_{avg} به نخستین نقطه RERI ($B_{avg}/G_{avg} \approx 1/0.96$ و $\phi=1/795$)، افزایشی در حدود 17% مشاهده می‌شود. بنابراین، در این شرایط B_{avg}/G_{avg} تمایز تصویری مشخص‌تری میان دو رژیم ایجاد می‌کند.

$O_2=1/0.0$ در لیتر بر دقیقه، تغییرات B/G غیر تک‌سویه‌تر هستند. در رژیم پایدار، مقدار این نسبت تقریباً بین 0.811 و $1/1.05$ تغییر می‌کند و در دو نقطه RERI مقادیر حدود 0.931 و $1/1.41$ به دست می‌آیند. هر چند مقدار B_{avg}/G_{avg} از حدود 0.844 در آخرین نقطه پایدار به حدود 0.931 در نخستین نقطه RERI افزایش می‌یابد، هم‌پوشانی محدوده مقادیر دو رژیم نشان می‌دهد که در این دبی اکسیژن، B/G به تنهایی برای جداسازی قطعی رژیم پایدار و RERI کافی نیست.

• **اثر رقیق‌سازی نیتروژن: در شکل‌های B-۴ و C-۴ با وضوح بیشتری مشاهده می‌شود. در رقیق‌سازی $37/5\%$ و**

$O_2=0.50$ لیتر بر دقیقه، B_{avg}/G_{avg} در رژیم پایدار از حدود 0.940 در $\phi=1/84$ به حدود $1/711$ در $\phi=1/76$ کاهش می‌یابد. با ورود به RERI در $\phi=1/72$ ، مقدار میانگین B_{avg}/G_{avg} به حدود $1/0.50$ افزایش یافته و در نقطه بعدی نیز حدود $1/0.66$ باقی می‌ماند. بنابراین، در عبور از آخرین حالت پایدار به نخستین حالت RERI، افزایشی در حدود 48% مشاهده می‌شود که یکی از واضح‌ترین تغییرات رژیمی در مجموعه داده حاضر است.

• **برای رقیق‌سازی $37/5\%$ و $O_2=0.75$ لیتر بر دقیقه نیز مقادیر B_{avg}/G_{avg} در رژیم پایدار در محدوده نسبتاً باریک**

0.855 تا 0.906 قرار دارند، در حالی که در رژیم RERI این مقدار از حدود $1/0.44$ آغاز شده و با کاهش نسبت هم‌ارزی تا حدود $1/1.32$ افزایش می‌یابد. مقدار B_{avg}/G_{avg} در عبور از آخرین نقطه پایدار ($\phi=1/782$) به نخستین نقطه RERI

($\varphi=1/756$) از حدود $0/855$ به $1/044$ افزایش می‌یابد که معادل حدود 22% است. در این شرایط، محدوده مقادیر دو رژیم نیز با یکدیگر هم‌پوشانی ندارند.

- در بیشترین سطح رقیق‌سازی مورد بررسی، یعنی 50% نیتروژن و $O_2=0/50$ لیتر بر دقیقه (شکل ۴-C)، مقادیر B_{avg}/G_{avg} در رژیم پایدار تقریباً بین $0/960$ و $1/002$ قرار دارند. با ورود به RERI در $\varphi=1/60$ ، این نسبت به حدود $1/134$ افزایش می‌یابد و در ادامه رژیم RERI در محدوده تقریباً $1/156$ تا $1/237$ باقی می‌ماند. در این حالت نیز جدایش روشنی میان محدوده مقادیر پایدار و RERI مشاهده می‌شود و مقدار میانگین B_{avg}/G_{avg} در RERI حدود 21% بیشتر از میانگین آن در رژیم پایدار است.

در مجموع، داده‌های شکل ۴ نشان می‌دهند که رفتار B_{avg}/G_{avg} را نمی‌توان با یک رابطه یکنواخت نسبت به نسبت هم‌آزری توصیف کرد. با این حال، در تمام شش شرایط عملیاتی بررسی شده، مقدار میانگین B_{avg}/G_{avg} در رژیم RERI بالاتر از رژیم پایدار است و در چهار مورد از شش شرایط، محدوده مقادیر B_{avg}/G_{avg} دو رژیم نیز از یکدیگر جدا هستند. این تمایز در شرایط دارای رقیق‌سازی نیتروژن واضح‌تر است، در حالی که در حالت بدون رقیق‌سازی، به‌ویژه در $0/50$ و $O_2=1/00$ لیتر بر دقیقه، هم‌پوشانی یا تأخیر در تغییر B_{avg}/G_{avg} مشاهده می‌شود. از این رو، B_{avg}/G_{avg} می‌تواند به‌عنوان یک شاخص تصویری مکمل برای شناسایی تغییر رژیم مورد استفاده قرار گیرد، اما برای تعریف یک معیار عمومی و مستقل تشخیص رژیم، بررسی همزمان سایر ویژگی‌های RGB ضروری است.

تحلیل رفتار مؤلفه‌های R، G، B و Gray

شکل ۵ تغییرات شدت متوسط مؤلفه‌های قرمز (R)، سبز (G)، آبی (B) و Gray را بر حسب نسبت هم‌آزری برای دبی اکسیژن $0/75$ لیتر بر دقیقه و در شرایط بدون رقیق‌سازی نشان می‌دهد. نقاط پایدار و RERI بر اساس مرزهای رژیم شعله تعیین شده در مطالعه تجربی تفکیک شده‌اند [۱۸]. مقدار $Gray_{avg}$ ، مطابق تعریف ارائه شده در بخش ۲، از میانگین حسابی شدت متوسط سه کانال R، G و B محاسبه شده است. بنابراین، Gray در پژوهش حاضر یک شاخص ترکیبی بدون وزن از شدت مؤلفه‌های رنگی تصویر است و نباید معادل شدت روشنایی فوتومتریک (Lux) تلقی شود.

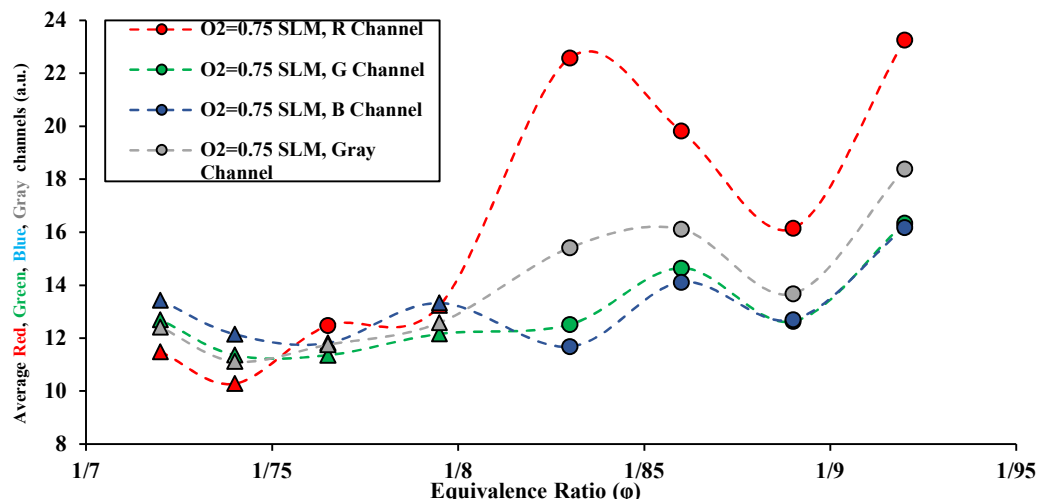


Figure 5- Variations in the mean red (R), green (G), blue (B), and Gray intensities as a function of equivalence ratio (φ) at SLM $O_2=0.75$ without nitrogen dilution. Symbols: ● Stable regime; ▲ RERI regime.

شکل ۵- تغییرات شدت متوسط مؤلفه‌های قرمز (R)، سبز (G)، آبی (B) و Gray بر حسب نسبت هم‌آزری (φ) برای دبی اکسیژن $0/75$ لیتر بر دقیقه و بدون رقیق‌سازی. نمادها: ● رژیم پایدار؛ ▲ رژیم RERI.

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تغییر مؤلفه‌های منفرد RGB با کاهش نسبت هم‌ارزی کاملاً یکنواخت نیست و حتی در محدوده پایدار نیز تغییرات غیرتک‌سویه‌ای دیده می‌شود. چنین رفتاری برای داده‌های تصویری شعله دور از انتظار نیست، زیرا مقادیر RGB تنها تابع یک پارامتر احتراقی منفرد نیستند و می‌توانند همزمان تحت تأثیر شدت و توزیع طیفی تابش مرئی، شکل و موقعیت شعله و توزیع مکانی ناحیه تابشی در تصویر قرار گیرند. مطالعات هوانگ و ژانگ [۲۷، ۲۸] نیز نشان داده‌اند که ویژگی‌های رنگی استخراج‌شده از تصاویر دیجیتال به تغییر مشخصات تابشی و دینامیکی شعله حساس‌اند. در شعله‌های پیش‌آمیخته نیز نجارنیکو و همکاران [۲۹] تغییر ویژگی‌های رنگی تصویر را همراه با تغییر شرایط احتراق و پایداری شعله گزارش کرده‌اند. بنابراین، نوسانات مشاهده‌شده در شکل ۵ را بهتر است به‌عنوان پاسخ ترکیبی ویژگی‌های نوری و ساختاری شعله تفسیر کرد، نه نتیجه تغییر یک گونه شیمیایی منفرد.

با وجود این رفتار غیرتک‌سویه، تغییر رژیم از آخرین نقطه پایدار در $\phi=1/83$ به نخستین شرایط RERI در $\phi=1/795$ با بازآرایی مشخصی در مؤلفه‌های رنگی همراه است. برجسته‌ترین تغییر در کانال R رخ می‌دهد که شدت متوسط آن به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد؛ Gray نیز کاهش همزمانی نشان می‌دهد. در مقابل، تغییر G_{avg} در این مرز محدود است و B_{avg} افزایش نسبی نشان می‌دهد. از این‌رو، پاسخ چهار مؤلفه در گذار رژیم یکسان نیست و تغییر رژیم را نمی‌توان به کاهش یا افزایش هماهنگ تمام کانال‌ها نسبت داد. بررسی کل داده‌های شکل نیز نشان می‌دهد که مقادیر R_{avg} و $Gray_{avg}$ در رژیم RERI کاملاً پایین‌تر از محدوده مربوط به رژیم پایدار قرار می‌گیرند، در حالی که دامنه‌های G_{avg} و B_{avg} در دو رژیم تا حدی با یکدیگر هم‌پوشانی دارند. بنابراین، در شرایط عملیاتی حاضر R_{avg} و $Gray_{avg}$ نسبت به کانال‌های G_{avg} و B_{avg} به‌تنهایی قابلیت بیشتری برای تمایز تصویری دو رژیم نشان می‌دهند.

کاهش همزمان R_{avg} و $Gray_{avg}$ را می‌توان در سطح اپتیکی به کاهش شدت ثبت‌شده در بخش قابل‌توجهی از پاسخ مرئی تصویر در هنگام ورود به RERI مرتبط دانست. این برداشت با ماهیت RERI سازگار است [۱۸]؛ در این رژیم ساختار شعله دیگر پایدار نبوده و شعله تحت فرآیندهای تکرارشونده جابه‌جایی، تضعیف، خاموشی و روشن‌شدن مجدد قرار می‌گیرد. چنین تغییر ساختاری می‌تواند سطح و توزیع ناحیه گسیل‌کننده ثبت‌شده توسط دوربین و در نتیجه شدت مؤلفه‌های RGB را تغییر دهد. مطالعات پردازش تصویر شعله نیز نشان داده‌اند که تغییرات دینامیکی و هندسی شعله در پاسخ مؤلفه‌های رنگی بازتاب می‌یابد [۲۷-۲۹]. با این حال، از داده‌های حاضر به‌تنهایی نمی‌توان سهم جداگانه تغییر سطح تابشی، دمای شعله یا تغییر توزیع طیفی گسیل را تعیین کرد. از دیدگاه طیفی، مطالعات نورتابی شیمیایی نشان داده‌اند که شدت نشر گونه‌های برانگیخته‌ای مانند CH^* و G_2^* نسبت به شرایط مخلوط و ساختار ناحیه واکنش حساس است [۲۵، ۲۶]. همچنین در مطالعات پیشین [۲۷-۳۰]، تغییرات مؤلفه‌های RGB در کنار روش‌های تشخیصی نوری مورد بررسی قرار گرفته و حساسیت این مؤلفه‌ها به تغییر شرایط احتراق نشان داده شده است. در مجموع، شکل ۵ نشان می‌دهد که گذار میان رژیم پایدار و RERI نه به‌صورت تغییر یکنواخت تمام کانال‌های رنگی، بلکه به‌صورت تغییر در توازن نسبی پاسخ مؤلفه‌های RGB ظاهر می‌شود. برای شرایط بررسی‌شده، R_{avg} و $Gray_{avg}$ جدایش روشن‌تری میان دو رژیم ایجاد می‌کنند، در حالی که G_{avg} و B_{avg} به‌تنهایی دارای هم‌پوشانی بیشتری هستند. این نتیجه نشان می‌دهد که برای تشخیص رژیم شعله، استفاده همزمان از چند ویژگی تصویری و نسبت‌های رنگی نسبت به اتکا به یک کانال منفرد مناسب‌تر است؛ موضوعی که با کاربرد روش‌های چندویژگی در مطالعات پردازش تصویر شعله [۲۷-۳۵] نیز هم‌راستا است.

تحلیل کانال قرمز به عنوان شاخص مرتبط با شدت روشنایی مرئی

شکل ۶ تغییرات شدت متوسط کانال قرمز (R_{avg}) را بر حسب نسبت هم‌ارزی در شرایط مختلف دبی اکسیژن و رقیق‌سازی نیتروژن نشان می‌دهد. مطالعات پیشین [۳۱-۳۳، ۳۵] با استفاده از کالیبراسیون و اندازه‌گیری‌های نوری مستقل، ارتباط معنی‌داری میان پاسخ کانال قرمز تصاویر دیجیتال و شدت روشنایی مرئی شعله گزارش کرده‌اند. همچنین وابستگی خواص شعله‌ها با شدت روشنایی قبلاً اثبات شده است [۳۶، ۳۷]. بر این اساس، در پژوهش حاضر R_{avg} به عنوان یک شاخص تصویری مرتبط با تغییرات نسبی شدت روشنایی فوتومتریک مورد بررسی قرار می‌گیرد. باین حال، از آنجا که شدت تابش در مجموعه داده حاضر به صورت مستقل اندازه‌گیری نشده است، این ارتباط صرفاً برای تفسیر روندها استفاده می‌شود و نه به عنوان اعتبارسنجی مستقل یا اندازه‌گیری شدت روشنایی فوتومتریک.

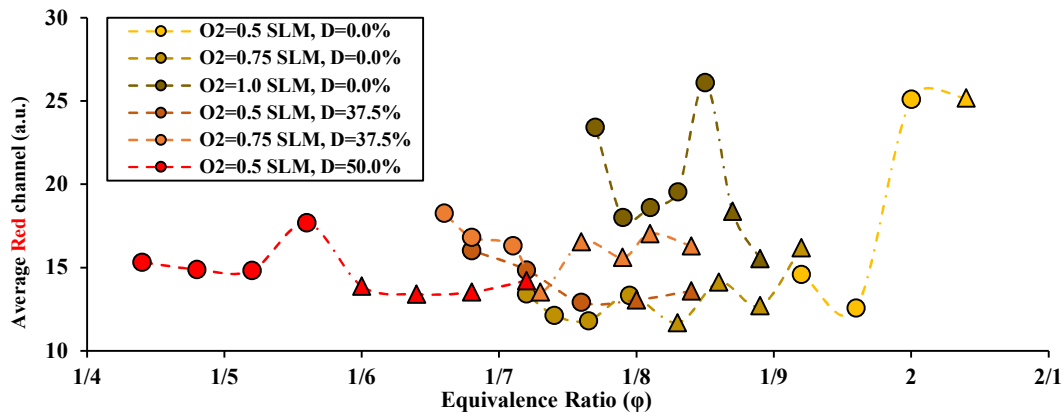


Figure 6- Variations of mean red-channel intensity (R_{avg}) as a function of equivalence ratio (ϕ) under different oxygen-flow and nitrogen-dilution conditions. Symbols: ● Stable regime; ▲ RERI regime.

شکل ۶- تغییرات شدت متوسط کانال قرمز (R_{avg}) بر حسب نسبت هم‌ارزی (ϕ) در شرایط مختلف دبی اکسیژن و رقیق‌سازی نیتروژن. نمادها: ● رژیم پایدار؛ ▲ رژیم RERI.

داده‌ها نشان می‌دهند که R_{avg} در داخل هر رژیم الزاماً رفتار یکنواختی با نسبت هم‌ارزی ندارد؛ باین حال، در گذار از آخرین شرایط Stable به نخستین شرایط RERI، کاهش مشخصی در پاسخ کانال قرمز در تمامی شرایط بررسی شده مشاهده می‌شود. شدت این کاهش به دبی اکسیژن و سطح رقیق‌سازی وابسته است. این رفتار نشان می‌دهد که گذار به RERI با کاهش نسبی شدت تابش ثبت‌شده در محدوده پاسخ کانال قرمز همراه است.

این روند با تغییرات ساختاری شعله در رژیم RERI با مطالعات تجربی سازگار است [۱۸]؛ در این رژیم، جابه‌جایی، تضعیف، خاموشی و روشن‌شدن مجدد شعله می‌تواند سطح و توزیع ناحیه گسیل‌کننده را تغییر داده و در نتیجه شدت نور ثبت‌شده توسط دوربین را کاهش دهد.

مطالعات پردازش تصویر نیز حساسیت پاسخ کانال‌های رنگی به تغییر ساختار و شدت تابش شعله را گزارش کرده‌اند [۲۷-۲۹]. بنابراین، هم‌راستایی کیفی روند با رفتار روشنایی گزارش‌شده در مطالعات کالیبراسیون پیشین [۳۱-۳۳، ۳۵] از کاربرد این کانال به عنوان یک شاخص نسبی نوری پشتیبانی می‌کند. باین حال، این نتیجه به معنای جایگزینی مستقیم Lux meter یا تعمیم یک رابطه کمی ثابت به همه هندسه‌ها و شرایط عملیاتی نمی‌تواند باشد.

تحلیل کانال‌های سبز و آبی و ارتباط آن‌ها با ویژگی‌های طیفی شعله

کانال‌های سبز و آبی دوربین در نواحی طیفی قرار دارند که بخشی از نشر گونه‌های برانگیخته C_2^* و CH^* را پوشش می‌دهند. مطالعات طیف‌سنجی و پردازش تصویر پیشین نشان داده‌اند که تغییرات کانال G_{avg} می‌تواند با تغییرات نشر C_2^* و کانال B_{avg} با تغییرات نشر CH^* هم‌راستا باشد [۲۵-۲۸]. این ارتباط در مطالعات پیشین [۳۱-۳۵، ۳۳] نیز با استفاده همزمان از روش‌های RGB و تشخیص‌های نوری مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، در پژوهش حاضر تغییرات G_{avg} و B_{avg} به‌عنوان شاخص‌های تصویری حساس به تغییرات نسبی ساختار طیفی شعله تفسیر می‌شوند، بدون آنکه این کانال‌ها معادل اندازه‌گیری مستقیم C_2^* و CH^* در نظر گرفته شوند.

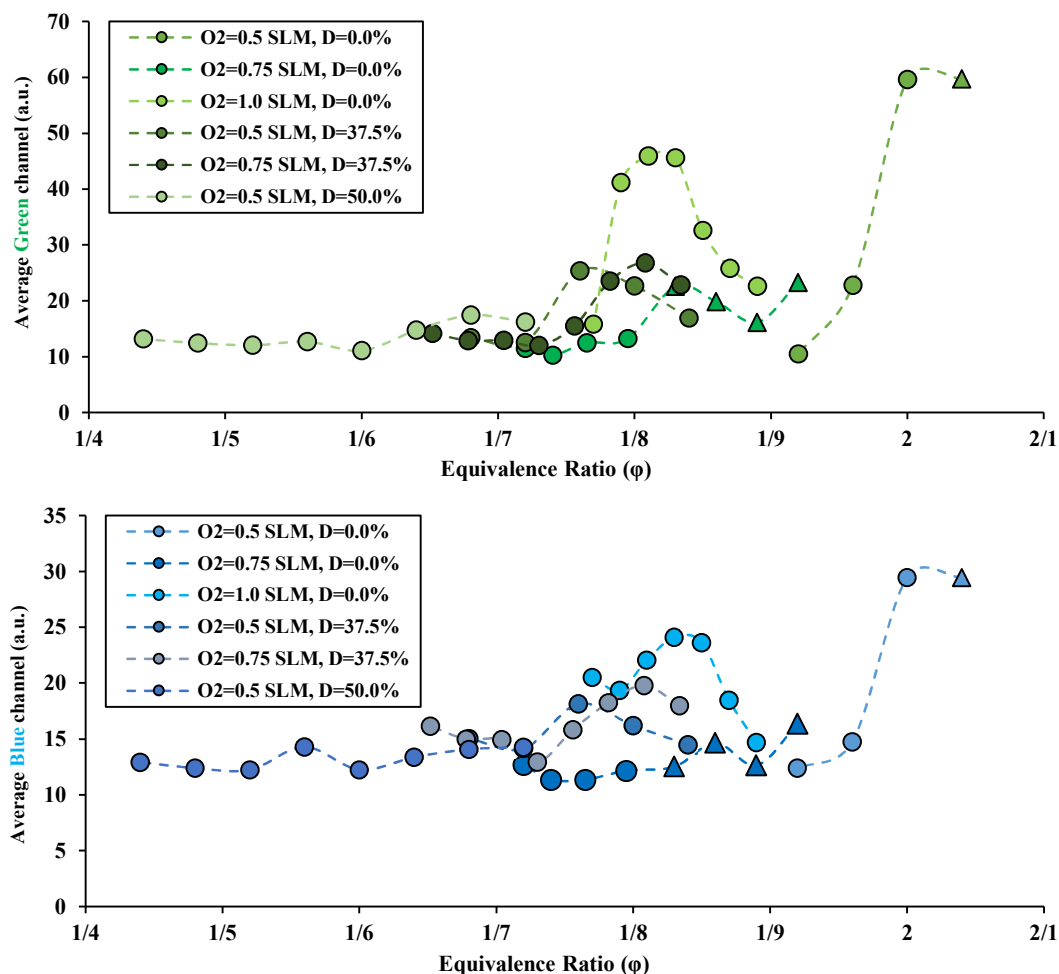


Figure 7- Variations of mean green-channel (G_{avg}) and blue-channel (B_{avg}) intensities as a function of equivalence ratio (ϕ) under the investigated oxygen-flow and nitrogen-dilution conditions. Symbols: ● Stable regime; ▲ RERI regime.

شکل ۷- تغییرات شدت متوسط کانال‌های سبز (G_{avg}) و آبی (B_{avg}) بر حسب نسبت هم‌ارزی (ϕ) در شرایط مختلف دبی اکسیژن و رقیق‌سازی نیتروژن. نمادها: ● رژیم پایدار؛ ▲ رژیم RERI.

بررسی داده‌های حاضر نشان می‌دهد که پاسخ G_{avg} و B_{avg} در گذار Stable-RERI یکسان نیست. کانال G_{avg} در شرایط بررسی‌شده عموماً در ورود به RERI کاهش نشان می‌دهد، در حالی که رفتار B_{avg} وابستگی بیشتری به شرایط عملیاتی داشته و در برخی موارد کاهش و در برخی دیگر افزایش می‌یابد. این تفاوت نشان می‌دهد که تغییر رژیم صرفاً با کاهش یکنواخت شدت

تمام مؤلفه‌های تصویر همراه نیست، بلکه توزیع نسبی پاسخ طیفی ثبت شده توسط کانال‌های مختلف نیز تغییر می‌کند. از دیدگاه فیزیکی، چنین رفتاری می‌تواند با تغییر ساختار ناحیه واکنش و سهم نسبی مؤلفه‌های مختلف تابش مرئی در گذار به RERI مرتبط باشد [۲۵-۲۸]. با این حال، به دلیل پهن‌بند بودن پاسخ کانال‌های دوربین و نبود طیف‌سنجی همزمان در مجموعه داده حاضر، نمی‌توان تغییر G_{avg} یا B_{avg} را مستقیماً به افزایش یا کاهش C_2^* یا CH^* نسبت داد. در نتیجه، روابط گزارش شده در مطالعات [۲۵-۲۸، ۳۱-۳۳، ۳۵] در این پژوهش صرفاً برای تفسیر کیفی و روندی استفاده می‌شوند. این نتایج همچنین نشان می‌دهند که استفاده ترکیبی از G_{avg} ، B_{avg} و نسبت B_{avg}/G_{avg} نسبت به تفسیر یک کانال منفرد مناسب‌تر است. به‌ویژه، تغییر متفاوت دو کانال در برخی شرایط می‌تواند اطلاعات بیشتری درباره بازآرایی نسبی ویژگی‌های رنگی شعله در گذار Stable-RERI فراهم کند.

نمودار پراکندگی کانال‌های رنگی در فضای دوبعدی RGB-B

شکل ۸ توزیع پیکسلی مؤلفه‌های قرمز (R_{avg}) و آبی (B_{avg}) را نسبت به مؤلفه سبز (G_{avg}) برای تصاویر مربوط به رژیم‌های Stable و RERI نشان می‌دهد. برخلاف مقادیر متوسط کانال‌ها که اطلاعات رنگی یک تصویر را به یک مقدار منفرد کاهش می‌دهند، نمودارهای پراکندگی رابطه بین شدت کانال‌های مختلف را در سطح پیکسل حفظ می‌کنند و از این‌رو اطلاعات تکمیلی درباره گستره و توزیع رنگی تصویر فراهم می‌آورند. در هر نمودار، فاصله و شکل توزیع نقاط $R_{avg}-G_{avg}$ و $B_{avg}-G_{avg}$ بیانگر تفاوت نسبی پاسخ کانال‌ها در نواحی مختلف تصویر است؛ بنابراین این نمودارها برای بررسی تغییر ساختار رنگی تصویر میان رژیم‌های شعله مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۷-۳۰].

مقایسه تصاویر Stable و RERI نشان می‌دهد که تغییر رژیم با تغییر مشخص در شکل، گستره و موقعیت توزیع پیکسلی کانال‌ها همراه است. در تصاویر مربوط به شعله پایدار نامتقارن، به دلیل امتداد بیشتر ناحیه روشن و ناهمگنی مکانی ساختار شعله، دامنه وسیع‌تری از ترکیب شدت کانال‌ها مشاهده می‌شود. در مقابل، در بسیاری از تصاویر RERI، توزیع نقاط ساختار متمرکزتر و الگوی متفاوتی نسبت به کانال G_{avg} نشان می‌دهد. این تفاوت با تغییر مورفولوژی شعله در رژیم RERI، شامل حرکت، تضعیف، خاموشی و روشن شدن مجدد گزارش شده در مطالعه تجربی است [۱۸]. با این حال، گستردگی ابر نقاط در این نمودار یک معیار مکانی-رنگی در تصویر است و نباید با دامنه نوسانات زمانی شعله یکسان در نظر گرفته شود.

این تمایز به‌ویژه برای تفسیر رژیم RERI اهمیت دارد. برای هر شرایط RERI، سه تصویر متوالی با وضوح مناسب پردازش شده و مقادیر متوسط گزارش شده از میانگین نتایج آن‌ها حاصل شده است؛ انتخاب تصاویر نیز به فاز مشخصی از چرخه RERI وابسته نبوده است. بنابراین، نمودارهای پراکندگی حاضر یک تحلیل حل فازی یا حل زمانی از نوسانات RERI نیستند. تعیین میزان پراکندگی زمانی این رژیم مستلزم تحلیل پیوسته تعداد بیشتری فریم در طول یک یا چند چرخه کامل است.

از نظر فیزیکی، تغییر الگوی پراکندگی را می‌توان به بازتوزیع نسبی شدت کانال‌های رنگی در اثر تغییر شکل، موقعیت، سطح تابشی و ویژگی‌های طیفی ناحیه شعله مرتبط دانست [۲۷-۲۹]. با این حال، در پژوهش حاضر اندازه‌گیری مستقیم دوده، CH^* یا C_2^* همزمان با این تصاویر انجام نشده است؛ بنابراین، برخلاف نسخه اولیه، پهنای موقعیت ابر نقاط مستقیماً به توزیع دوده یا یک گونه شیمیایی خاص نسبت داده نمی‌شود. روابط طیفی و کالیبراسیون‌های گزارش شده در مطالعات پیشین [۳۱-۳۳، ۳۵] تنها چارچوبی برای تفسیر کیفی تغییرات رنگی فراهم می‌کنند.

در مجموع، تفاوت قابل مشاهده میان توزیع‌های پیکسلی Stable و RERI نشان می‌دهد که اطلاعات موجود در فضای RGB فراتر از مقادیر متوسط کانال‌ها است. این تفاوت‌ها می‌توانند در مطالعات آینده به صورت ویژگی‌های کمی مانند گستره، تراکم، فاصله کانال‌ها یا پارامترهای آماری توزیع برای توسعه الگوریتم‌های طبقه‌بندی رژیم استفاده شوند.

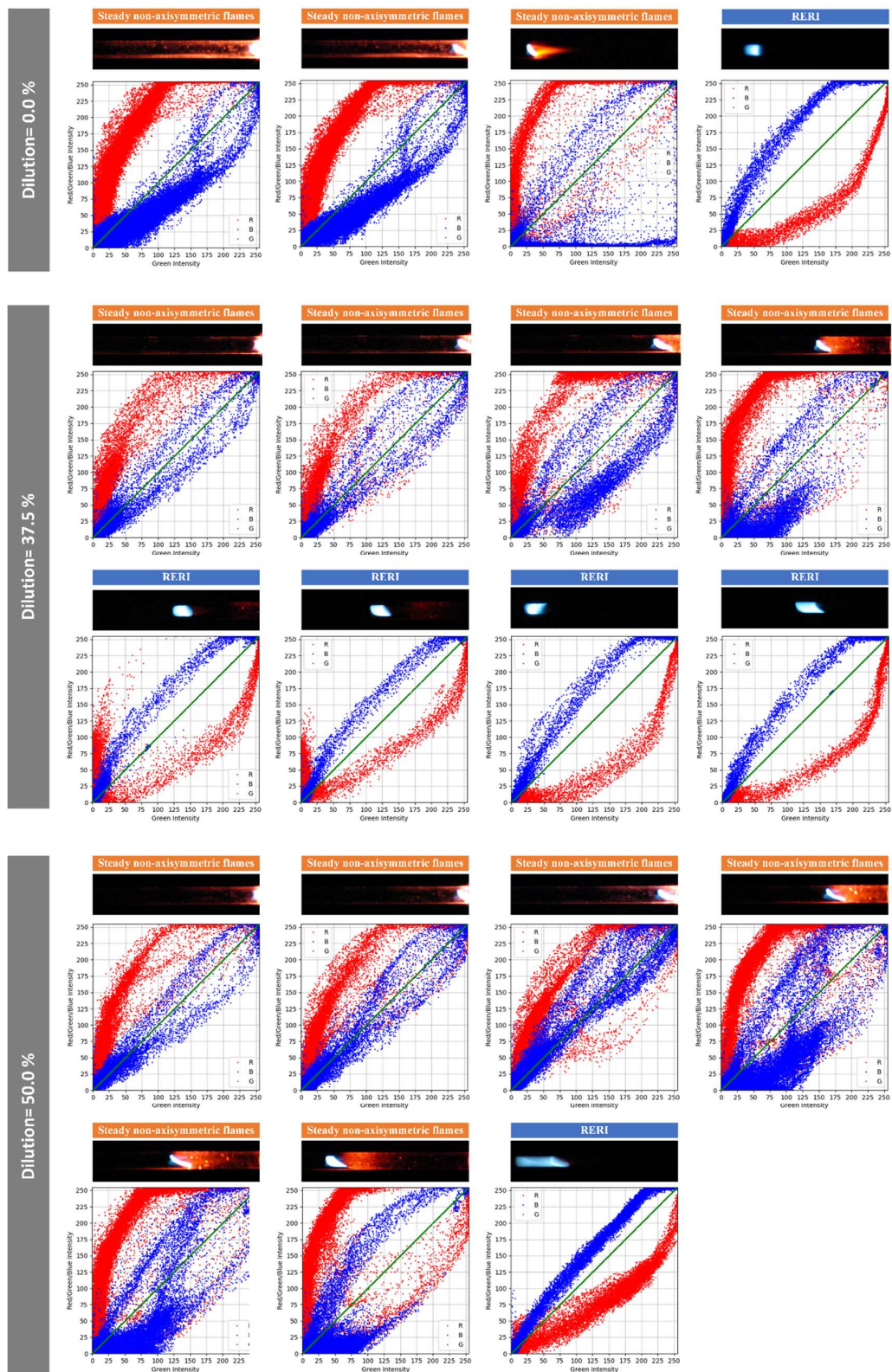


Figure 8- Pixel-wise scatter distributions of the red (R) and blue (B) components relative to the green (G) component for images corresponding to the Stable and RERI regimes at different nitrogen-dilution levels. Each point represents the corresponding channel intensities of an image pixel.

شکل ۸- نمودارهای پراکندگی پیکسلی مؤلفه‌های قرمز (R) و آبی (B) نسبت به مؤلفه سبز (G) برای تصاویر مربوط به رژیم‌های Stable و RERI در سطوح مختلف رقیق‌سازی نیتروژن. هر نقطه بیانگر مقادیر متناظر شدت کانال‌ها در یک پیکسل تصویر است.

تحلیل کمی پاسخ شاخص‌های تصویری در گذار Stable-RERI

به‌منظور کمی‌سازی پاسخ پارامترهای تصویری به تغییر رژیم، تغییر نسبی شدت متوسط کانال‌های R، G، B و Gray در عبور از آخرین شرایط Stable به نخستین شرایط RERI برای شش مجموعه شرایط عملیاتی موجود در داده‌ها بررسی شد. این مقایسه بر کمیت‌هایی استوار است که مستقیماً از تصاویر پژوهش حاضر استخراج شده‌اند و بنابراین مستقل از روابط کالیبراسیون مورد استفاده برای تفسیر Lux یا گونه‌های طیفی است.

نتایج نشان می‌دهند که R_{avg} ، G_{avg} و $Gray_{avg}$ در هر شش شرایط عملیاتی در گذار به RERI کاهش می‌یابند، در حالی که پاسخ B_{avg} وابسته‌تر به شرایط است و جهت تغییر آن در همه حالات یکسان نیست. در میان این پارامترها، کانال R_{avg} بیشترین کاهش نسبی متوسط را نشان می‌دهد و دامنه پاسخ آن در شرایط مختلف نیز قابل توجه است $Gray_{avg}$ و G_{avg} نیز جهت تغییر سازگاری دارند، در حالی که رفتار متفاوت B_{avg} نشان می‌دهد که گذار رژیم با یک افت یکنواخت در همه مؤلفه‌های رنگی همراه نیست (جدول ۱).

برای هر شاخص، تغییر نسبی در گذار رژیم از آخرین شرایط Stable به نخستین شرایط RERI از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\Delta X(\%) = \frac{X_{RERI,first} - X_{Stable,last}}{X_{Stable,last}} \times 100 \quad (5)$$

مقادیر ارائه‌شده در جدول ۱، میانگین تغییر نسبی حاصل از شش شرایط عملیاتی بررسی‌شده هستند.

جدول ۱- تحلیل کمی پاسخ شاخص‌های تصویری در گذار Stable به RERI.

Table 1- Quantitative analysis of the response of visual indicators in the transition from Stable to RERI.

Image indicator	Response across Stable → RERI	Median relative change across six Stable-RERI transitions	Interpretation
R_{avg}	Decrease in 6/6 cases	-38%	Relatively high sensitivity to regime transition; qualitative luminosity-related interpretation based on [31-33]
G_{avg}	Decrease in 6/6 cases	-13%	Consistent directional response; qualitative spectral interpretation based on [25-28]
B_{avg}	Condition dependent; 2 decreases / 4 increases	+5%	Stronger dependence on operating conditions; not suitable as a standalone indicator
Gray	Decrease in 6/6 cases	-19%	Weighted grayscale conversion of the RGB image
B/G	Condition dependent	—	Complementary color-ratio indicator; no universal threshold

جمع‌بندی نهایی تحلیل داده‌های RGB

بر اساس تحلیل‌های ارائه‌شده در بخش ۳، شاخص‌های اصلی استخراج‌شده از تصاویر RGB، نوع شواهد موجود برای هر شاخص و دامنه مناسب تفسیر آن‌ها در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲- خلاصه شاخص‌های RGB، نوع شواهد و دامنه تفسیر در پژوهش حاضر.

Table 2- Summary of RGB indicators, type of evidence, and scope of interpretation in the present study.

RGB indicator	Main finding in the present study	Basis of interpretation	Appropriate scope
R	Consistent directional response across Stable-RERI transition	Present RGB data + previous luminosity calibrations [31–33]	Relative image-based optical-intensity indicator
G	Consistent decrease at the regime boundary	Present data + spectral background [25–28,31–33]	Complementary color descriptor
B	Condition-dependent response	Present data + spectral background [25–28,31–33]	Complementary feature; not a standalone indicator
B/G	Regime-sensitive but non-monotonic	Direct ratio of image-derived features	Complementary regime-change indicator
Gray	Consistent decrease across the transition	Arithmetic mean of R_{avg} , G_{avg} , and B_{avg}	Complementary composite RGB-intensity descriptor
Pixel scatter	Changes in distribution shape and extent	Pixel-wise image data + [27–30]	Feature extraction for future classification studies

تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که پردازش تصاویر RGB امکان استخراج مجموعه‌ای از ویژگی‌های کمی مکمل برای بررسی تغییر رژیم‌های شعله در راکتور مزو-مقیاس حاضر را فراهم می‌کند. رفتار این ویژگی‌ها به شرایط عملیاتی وابسته است و هیچ کانال منفردی در تمام شرایط به‌تنهایی معیار کاملی برای تعیین رژیم محسوب نمی‌شود.

نسبت‌های رنگی، به‌ویژه B/G، در بخشی از شرایط تغییر مشخصی در مجاورت مرز Stable-RERI نشان می‌دهند، اما رفتار آن‌ها نسبت به نسبت هم‌ارزی کاملاً یکنواخت نیست؛ از این رو، استفاده از آن‌ها به‌عنوان شاخص مکمل مناسب‌تر از تعریف یک آستانه عمومی ثابت است. در مقابل R_{avg} ، G_{avg} ، B_{avg} و Gray در داده‌های حاضر جهت تغییر سازگارتری در گذار به RERI نشان می‌دهند، در حالی که پاسخ B وابستگی بیشتری به شرایط عملیاتی دارد.

تحلیل پراکندگی پیکسلی نیز نشان می‌دهد که گذار رژیم تنها در مقادیر متوسط کانال‌ها منعکس نمی‌شود، بلکه با تغییر در ساختار توزیع رنگی پیکسل‌های تصویر همراه است. این ویژگی، ارزش تحلیل RGB را فراتر از استخراج مقادیر متوسط افزایش می‌دهد و می‌تواند مبنایی برای تعریف ویژگی‌های پیشرفته‌تر تصویری در مطالعات آینده باشد.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهند که ترکیب شدت متوسط کانال‌ها، نسبت‌های رنگی و ویژگی‌های توزیع پیکسلی می‌تواند یک چارچوب غیرتماسی و کم‌هزینه برای پایش تغییرات تصویری مرتبط با رژیم شعله فراهم کند. کاربرد این اطلاعات برای طبقه‌بندی خودکار یا کنترل بلادرنگ مستلزم توسعه و اعتبارسنجی الگوریتم‌های طبقه‌بندی و استفاده از داده‌های زمانی و اندازه‌گیری‌های مستقل نوری در مطالعات آینده است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تصاویر ثبت‌شده از شعله‌های پیش‌آمیخته متان-اکسیژن در یک راکتور مزومقیاس با قطر داخلی ۵ میلی‌متر با استفاده از پردازش تصویر RGB مورد بازتحلیل کمی قرار گرفتند. تحلیل بر دو رژیم اصلی شعله، شامل شعله پایدار نامتقارن و رژیم نوسانی خاموش‌شونده و روشن‌شونده تکراری (RERI)، در دبی‌های مختلف اکسیژن و سطوح متفاوت رقیق‌سازی با نیتروژن متمرکز شد. برای شرایط RERI، سه تصویر متوالی با وضوح مناسب به‌طور مستقل پردازش و میانگین نتایج آن‌ها گزارش شد؛ بنابراین داده‌های این رژیم بیانگر میانگین تصاویر منتخب هستند و نه تحلیل حل-زمانی یا حل-فازی یک چرخه کامل RERI.

نتایج نشان دادند که تغییر رژیم شعله در ویژگی‌های مختلف تصویر به شکل یکسان منعکس نمی‌شود. نسبت B_{avg}/G_{avg} در بخش قابل‌توجهی از شرایط در مجاورت مرز Stable-RERI تغییر مشخصی نشان داد و مقدار میانگین آن در رژیم RERI

عموماً بالاتر از رژیم پایدار بود؛ باین حال، رفتار این نسبت نسبت به نسبت هم‌ارزی کاملاً یکنواخت نبوده و در برخی شرایط هم‌پوشانی میان دو رژیم مشاهده شد. از این رو، B_{avg}/G_{avg} را می‌توان یک شاخص تصویری حساس به تغییر رژیم در نظر گرفت، اما داده‌های حاضر از تعریف یک آستانه عمومی و مستقل برای تفکیک رژیم‌ها پشتیبانی نمی‌کنند.

بررسی مؤلفه‌های منفرد نیز نشان داد که G_{avg} ، R_{avg} و B_{avg} حساسیت یکسانی به گذار رژیم ندارند. در مجموعه شرایط بررسی شده، کانال‌های R_{avg} و G_{avg} و شاخص Gray پاسخ جهت‌دار سازگارتری در عبور از Stable به RERI نشان دادند، در حالی که رفتار کانال B_{avg} وابستگی بیشتری به شرایط عملیاتی داشت. این تفاوت بیانگر آن است که گذار به RERI صرفاً با افزایش یا کاهش یکنواخت شدت کلی تصویر همراه نیست، بلکه با بازآرایی نسبی مؤلفه‌های رنگی و ساختار تابشی ثبت شده در تصویر همراه است. بنابراین، استفاده ترکیبی از چند ویژگی RGB نسبت به اتکا به یک کانال منفرد برای بررسی تغییر رژیم مناسب‌تر است.

تحلیل توزیع پیکسلی نیز نشان داد که تفاوت Stable و RERI تنها در مقادیر متوسط کانال‌ها ظاهر نمی‌شود و شکل، گستره و موقعیت توزیع‌های $R_{avg}-G_{avg}$ و $B_{avg}-G_{avg}$ نیز میان تصاویر دو رژیم تغییر می‌کند. این یافته نشان می‌دهد که حفظ اطلاعات پیکسلی می‌تواند ویژگی‌های تکمیلی برای توصیف حالت شعله فراهم کند. باین حال، پراکندگی پیکسلی مورد بررسی در این مطالعه نباید با نوسانات زمانی RERI یکسان تلقی شود و تعیین کامل مشخصات دینامیکی این رژیم به تحلیل متوالی تعداد بیشتری فریم نیاز دارد.

در تفسیر فیزیکی نتایج، روابط کالیبراسیون و مقایسه‌های نوری گزارش شده در مطالعات پیشین مبنایی برای بررسی هم‌راستایی روندهای RGB با تغییرات روشنایی مرئی و برخی ویژگی‌های طیفی شعله فراهم می‌کنند. به‌ویژه، کالیبراسیون‌های پیشین امکان استفاده از کانال R_{avg} به عنوان یک شاخص تصویری مرتبط با تغییرات نسبی روشنایی و تفسیر کیفی کانال‌های B_{avg} و G_{avg} در ارتباط با نواحی طیفی CH^* و C_2^* را فراهم می‌کنند. باین حال، در مجموعه داده حاضر Lux، CH^* و C_2^* به‌طور هم‌زمان و مستقل اندازه‌گیری نشده‌اند؛ از این رو، این روابط به عنوان مبنای تفسیر روندها مورد استفاده قرار می‌گیرند و نه به عنوان اعتبارسنجی مستقل یا اندازه‌گیری مستقیم این کمیت‌ها.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهند که پردازش تصاویر RGB می‌تواند روشی کم‌هزینه، غیر تماسی و نسبتاً ساده برای استخراج اطلاعات کمی مکمل از تغییر حالت شعله در راکتورهای مزومقیاس فراهم کند. ارزش اصلی روش حاضر در ترکیب شدت متوسط کانال‌ها، نسبت‌های رنگی و اطلاعات توزیع پیکسلی است. باین حال، تعمیم این شاخص‌ها به عنوان معیار عمومی تشخیص رژیم یا استفاده از آن‌ها برای کنترل خودکار نیازمند اعتبارسنجی گسترده‌تر در شرایط عملیاتی و هندسه‌های متفاوت است.

در ادامه این پژوهش، اندازه‌گیری هم‌زمان RGB با طیف‌سنجی و Lux meter، تحلیل حل-زمانی تعداد بیشتری از فریم‌ها در چرخه RERI و استخراج ویژگی‌های مکانی و زمانی پیشرفته‌تر می‌تواند امکان ارزیابی کمی دقیق‌تر ارتباط شاخص‌های تصویری با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شعله را فراهم کند. همچنین، توسعه و اعتبارسنجی الگوریتم‌های طبقه‌بندی بر پایه مجموعه بزرگ‌تری از داده‌های تصویری می‌تواند امکان استفاده از این ویژگی‌ها را برای تشخیص خودکار رژیم‌های شعله در کاربردهای آینده بررسی کند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) به دلیل حمایت مالی و فراهم‌سازی امکانات آزمایشگاهی این پژوهش سپاس‌گزاری می‌نمایند. همچنین از همکاران آزمایشگاه سیستم‌های انرژی و حرارتی (آزمایشگاه سوخت و احتراق سابق) دانشکده مهندسی هوافضا به‌خاطر همراهی و کمک‌های فنی در اجرای طرح سپاسگزار است.

References

- [1] N. S. Kaisare and D. G. Vlachos, "A review on microcombustion: Fundamentals, devices and applications," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 38, no. 3, pp. 321–359, 2012, doi: 10.1016/j.pecs.2012.01.001.
- [2] D. M. Dias, P. R. Resende, and A. M. Afonso, "A Review on Micro-Combustion Flame Dynamics and Micro-Propulsion Systems," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 6, p. 1327, Mar. 2024, doi: 10.3390/en17061327.
- [3] S. Jejurkar and D. Mishra, "A Review of Recent Patents on Micro-Combustion and Applications," *Recent Patents on Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 194–209, 2009, doi: 10.2174/187221209789117753.
- [4] J. E. J. Ding, J. Chen, G. Liao, F. Zhang, and B. Luo, "Process in micro-combustion and energy conversion of micro power system: A review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 246, p. 114664, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114664>.
- [5] A. Zargarbashi, S. Sarrafan Sadeghi, and S. Tabejamaat, "Experimental study of the effects of input flow characteristics on flame dynamics and oscillating frequencies of a partially-premixed flame in a fixed-geometry Meso-cylindrical reactor," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 213–223, Mar. 2022, doi: 10.52547/mme.22.4.213.
- [6] A. Zargarbashi, S. Tabejamaat, S. Sarrafan Sadeghi, and S. Sheykhbaglou, "Experimental study of the effect of inlet flow characteristics and chamber length on partially premixed flame dynamics, in the mesoscale cylindrical reactor of constant diameter with different lengths," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 12, pp. 2697–2705, 2020, [Online]. Available: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-43004-en.html>
- [7] M. Baigmohammadi, S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat, and J. Zarvandi, "Numerical study of the effects of wire insertion on CH₄(methane)/AIR pre-mixed flame in a micro combustor," *Energy*, vol. 54, pp. 271–284, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.01.047.
- [8] M. Nauman, J. Pan, Y. Wang, F. Li, A. Oluwaleke Ojo, and A. Raza, "A review of recent advancements in micro combustion techniques to enhance flame stability and fuel residence time," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 1165–1193, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.050>.
- [9] K. Maruta, "Micro and mesoscale combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 33, no. 1, pp. 125–150, 2011, doi: 10.1016/j.proci.2010.09.005.
- [10] Y. Ju and K. Maruta, "Microscale combustion: Technology development and fundamental research," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 37, no. 6, pp. 669–715, 2011, doi: 10.1016/j.pecs.2011.03.001.
- [11] J. Jarosiński, "Flame quenching by a cold wall," *Combust. Flame*, vol. 50, pp. 167–175, Jan. 1983, doi: 10.1016/0010-2180(83)90059-7.
- [12] L. Sitzki, K. Borer, S. Wussow, E. S. Kaoru Maruta, P. D. Ronney, and A. Cohen, "Combustion in microscale heat-recirculating burners," *39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, no. January 2001, 2001, doi: 10.2514/6.2001-1087.
- [13] P. D. Ronney, "Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors," *Combust. Flame*, vol. 135, no. 4, pp. 421–439, 2003, doi: 10.1016/j.combustflame.2003.07.003.
- [14] K. Maruta, T. Kataoka, N. Il Kim, S. Minaev, and R. Fursenko, "Characteristics of combustion in a narrow channel with a temperature gradient," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 30, no. 2, pp. 2429–2436, 2005, doi: 10.1016/j.proci.2004.08.245.
- [15] Y. Ju and B. Xu, "Theoretical and experimental studies on mesoscale flame propagation and extinction," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 30, no. 2, pp. 2445–2453, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.234>.
- [16] Y. Ju and B. Xu, "Effects of channel width and lewis number on the multiple flame regimes and propagation limits in mesoscale," *Combustion Science and Technology*, vol. 178, no. 10–11, pp. 1723–1753, 2006, doi: 10.1080/00102200600788643.
- [17] Y. Ju and C. W. Choi, "An analysis of sub-limit flame dynamics using opposite propagating flames in mesoscale channels," *Combust. Flame*, vol. 133, no. 4, pp. 483–493, 2003, doi: 10.1016/S0010-2180(03)00058-0.

- [18] S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat, M. Baigmohammadi, and J. Zarvandi, "An experimental study of the effects of equivalence ratio, mixture velocity and nitrogen dilution on methane/oxygen pre-mixed flame dynamics in a meso-scale reactor," *Energy Convers. Manag.*, vol. 81, pp. 169–183, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.02.022.
- [19] S. T. and M. R. B. M. J. Zarvandi, "Numerical Simulation of the Effective Parameters on the Stability of Stoichiometric CH₄/Air Premixed Combustion in a Micro-combustion Chamber," *Fuel and Combustion*, vol. 3, no. 2, pp. 31–45, 2011, Accessed: Jul. 23, 2026. [Online]. Available: https://www.jfnc.ir/article_46138.html?lang=en
- [20] M. Baigmohammadi, S. Tabejamaat, and Y. Farsiani, "An experimental study of methane–oxygen–carbon dioxide premixed flame dynamics in non-adiabatic cylindrical meso-scale reactors with the backward facing step," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 95, pp. 105–123, 2015, doi: 10.1016/j.cep.2015.05.013.
- [21] J. Wan and A. Fan, "Recent progress in flame stabilization technologies for combustion-based micro energy and power systems," *Fuel*, vol. 286, no. P2, p. 119391, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119391.
- [22] S. A. Lloyd and F. J. Weinberg, "A burner for mixtures of very low heat content," *Nature*, vol. 251, no. 5470, pp. 47–49, 1974, doi: 10.1038/251047a0.
- [23] N. KIM *et al.*, "Flame stabilization and emission of small Swiss-roll combustors as heaters," *Combust. Flame*, vol. 141, no. 3, pp. 229–240, May 2005, doi: 10.1016/j.combustflame.2005.01.006.
- [24] N. Il Kim, S. Aizumi, T. Yokomori, S. Kato, T. Fujimori, and K. Maruta, "Development and scale effects of small Swiss-roll combustors," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 31, no. 2, pp. 3243–3250, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.proci.2006.08.077.
- [25] C. S. Panoutsos, Y. Hardalupas, and A. M. K. P. Taylor, "Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using OH* and CH* chemiluminescence in premixed and non-premixed methane-air flames," *Combust. Flame*, vol. 156, no. 2, pp. 273–291, 2009, doi: 10.1016/j.combustflame.2008.11.008.
- [26] J. Kojima, Y. Ikeda, and T. Nakajima, "Spatially resolved measurement of OH*, CH*, and C₂* chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane/air premixed flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 28, no. 2, pp. 1757–1764, Jan. 2000, doi: 10.1016/S0082-0784(00)80577-9.
- [27] H. W. Huang and Y. Zhang, "Flame colour characterization in the visible and infrared spectrum using a digital camera and image processing," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 8, Aug. 2008, doi: 10.1088/0957-0233/19/8/085406.
- [28] H. W. Huang and Y. Zhang, "Dynamic application of digital image and colour processing in characterizing flame radiation features," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 8, 2010, doi: 10.1088/0957-0233/21/8/085202.
- [29] M. Najarnikoo, M. Z. Targhi, and H. Pasdarshahri, "Experimental study on the flame stability and color characterization of cylindrical premixed perforated burner of condensing boiler by image processing method," *Energy*, vol. 189, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116130.
- [30] D.-C. Toncu, M. Mirzaei, and S. Soleimani, "Emulsified jet fuel flame characterization with image processing," *Journal of the Energy Institute*, vol. 92, no. 3, pp. 567–577, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.04.002>.
- [31] S. S. Sadeghi, S. Tabejamaat, A. Ghahremani, and S. N. Asl, "Effects of wall temperature on non-premixed micro-combustion: A comparative experimental study of copper and aluminum in Swiss-roll chambers," *Fuel Processing Technology*, vol. 274, no. April, p. 108237, 2025, doi: 10.1016/j.fuproc.2025.108237.
- [32] S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat, A. Ghahremani, and S. Narimani Asl, "A novel swiss-roll counterflow micro-combustor: Experimental investigation of methane-oxygen flame behavior over time," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 255, no. April, p. 123978, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123978.
- [33] S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat, A. Ghahremani, and S. Narimani Asl, "A novel Swiss-roll counterflow micro-combustor: Experimental investigation of flame dynamic characteristics by spectroscopy and RGB image processing methods," *Energy*, vol. 299, no. May, p. 131495, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131495.
- [34] A. Ashouri, S. Sarrafan Sadeghi, and M. Zabetian Targhi, "Experimental Evaluation of Burner Geometry Performance and its flame structure on Heating Rate of a MILD Steel Reheating Furnace," *Fuel and Combustion*, vol. 18, no. 4, pp. 103–123, 2025, doi: 10.22034/jfnc.2026.579786.1457.

- [35] S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat, A. Ghahremani, and S. Narimani Asl, "Introducing a novel spiral-channel combustion chamber and experimentally investigating the effect of nitrogen dilution on non-premixed micro methane-oxygen flame by spectroscopy method," *Fuel and Combustion*, vol. 15, no. 3, pp. 73–99, 2023, doi: 10.22034/jfnc.2023.367267.1334.
- [36] A. Javareshkian, S. Tabejamaat, S. Sarrafan-Sadeghi, and M. Baigmohammadi, "An experimental study on the effects of swirling oxidizer flow and diameter of fuel nozzle on behavior and light emittance of propane-oxygen non-premixed flame," *Thermal Science*, vol. 21, no. 3, pp. 1453–1462, 2017, doi: 10.2298/TSCI140706210J.
- [37] S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat, and A. Javareshkian, "Experimental Study on the Effect of Swirling Flow and Oxidizer Type on the Stability, Light Emission, and Pollutant Emissions of Non-Premixed Propane Flames," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 12, no. 2, pp. 671–681, 2026, doi: 10.22055/jacm.2025.48481.5262.