

بررسی میزان پیچیدگی تغییرات سیکلی فشار در یک موتور اشتعال جرقه با سوخت گاز طبیعی به ازای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

رضا ابراهیمی دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

علی ملکی استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد

چکیده

در این مطالعه، آزمایش‌هایی بر روی یک موتور چهار سیلندر اشتعال جرقه با سوخت گاز طبیعی انجام شده و تغییرات دوره به دوره قله فشار P_{max} و زاویه قله فشار $\alpha_{p_{max}}$ در موتور، برای نه نسبت هم‌ارزی مختلف بررسی شده است. با استفاده از تکنیک آنالیز پیچیدگی چندمقیاسی نشان داده شده است که پیچیدگی قله فشار و زاویه قله فشار به تغییرات نسبت هم‌ارزی‌های مختلف وابسته می‌باشد. به این ترتیب محدوده‌ای برای نسبت هم‌ارزی مطلوب پیدا شده که می‌تواند برای کنترل فرایند احتراق و بهبود عملکرد موتور استفاده شود.

کلمات کلیدی: موتور، نسبت هم‌ارزی، آنالیز پیچیدگی، آنالیز چندمقیاسی

Complexity Investigation of Cycle to Cycle Pressure Variations in a Spark Ignition Engine with Natural Gas versus Various Equivalence Ratios

R. Ebrahimi Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology

A. Maleki Assistant Professor, Mechanical Engineering of Biosystems Department, Shahrekord University

Abstract

In this study, a number of tests are conducted on a four-cylinder spark ignition engine with natural gas and the cycle to cycle variations of peak pressure P_{max} and peak pressure angle $\alpha_{p_{max}}$ in the engine are analyzed for nine different equivalence ratios. By using multi scale entropy technique, it is shown that the complexity of peak pressure and peak pressure angle depends on the equivalence ratio variations. Thereby, a limitation is found for optimum equivalence ratios that can be used for controlling the combustion process and improving engine performance.

Keywords: Engine, Equivalence Ratio, Complexity Analysis, Multi Scale Entropy

۱- مقدمه

در دو دهه اخیر کمی کردن پیچیدگی سیستم‌های فیزیکی مورد توجه خاصی قرار گرفته است. سیستمی را پیچیده گویند که اجزای تشکیل‌دهنده آن دارای قابلیت دگرگونی و تغییر-پذیری زیاد در هر لحظه از زمان باشند [۱].

موتور احتراق داخلی نیز نمونه‌ای از یک سیستم پیچیده است چون که تغییرات سیکی قله فشار و زاویه قله فشار در آن جزء پدیده‌های غیرقابل پیش‌بینی است. شناختن و محدود کردن عوامل این پیچیدگی‌ها یکی از موارد اصلی در تکنولوژی موتورهای اشتعال جرقه محسوب می‌شود [۲-۳]. به طوری که حذف این تغییرات سیکی احتراق، منجر به افزایش ده درصدی قدرت خروجی موتور و کاهش نوسان در جرم سوخت مصرفی خواهد شد [۴-۵].

هیوود [۶] سه فاکتور اصلی را در تغییرات سیکی فرایند احتراق معرفی کرده است: آیرودینامیک در سیلندر در طول فرایند احتراق، مقدار سوخت-هوا و گازهای بازخورانی شده از آگروز به سیلندر و نهایتاً مخلوط ترکیب هنگام جرقه زدن.

وندکر و همکاران [۷] به مطالعه مدل‌های غیرتناوبی تغییرات سیکی فرایند احتراق پرداخته‌اند و ثابت کرده‌اند که تغییرات سیکی احتراق از شرایط اولیه در آغاز هر سیکل ناشی می‌شود.

لیتاک و همکاران [۸] پیچیدگی تغییرات سیکی قله فشار و زاویه قله فشار را برای سه نوع پیش‌زاویه جرقه ۵، ۱۵ و ۳۰ درجه بررسی کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که کمترین میزان پیچیدگی در پیش‌زاویه جرقه ۱۵ درجه اتفاق می‌افتد.

در این مقاله، تغییرات سیکی قله فشار و زاویه قله فشار یک موتور چهار سیلندر با سوخت گاز طبیعی به ازای نه نسبت هم‌ارزی مختلف ثبت شده و مقدار پیچیدگی هر کدام از آنها با روش آنتروپی چندمقیاسی محاسبه شده است. در نهایت با استفاده از نتایج به دست آمده و نمودارها محدودده نسبت هم-ارزی مطلوبی را که مقدار پیچیدگی در آن کمینه است معرفی شده است.

باید توجه داشت که روش آنتروپی چندمقیاسی ارائه شده در این مقاله، یک آنتروپی ترمودینامیکی نیست بلکه میزانی برای تعیین پیچیدگی یک سیستم به حساب می‌آید. اخیراً این روش برای بررسی پیچیدگی سری‌های زمانی فیزیولوژیک مثل قلب انسان نیز استفاده شده است [۹].

۲- فرایند آزمایش

در طول فرایند آزمایش، فشار داخل یک سیلندر از موتور به وسیله یک حسگر پیزوالکتریک (مدل ۶۰۵۵B۸۰) اندازه‌گیری

شد. لازم به ذکر است که فشار داخل سیلندر، بهترین کمیت شناخته شده‌ای است که می‌تواند مستقیماً برای بررسی دینامیک موتور استفاده شود [۱۰-۱۱]. بنابراین آنالیز آنتروپی چندمقیاسی از داده‌های فشار می‌تواند اطلاعاتی را راجع به پیچیدگی فرایند احتراق موتور تهیه کند.

مشخصات کلی موتور استفاده شده و شکل کلی آزمایش، به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ داده شده است. سرعت موتور و نرخ سوخت و هوا در طول هر مرحله از آزمایش ثابت نگه‌داشته شد. یک دبی‌سنج از طریق یک تانک بزرگ به موتور متصل شد تا نرخ جریان هوای ورودی به سیلندر را اندازه‌گیری کند. سیگنال خروجی حسگر فشار نیز ابتدا به وسیله یک دستگاه آمپلی‌فایر تقویت شده و سپس به دستگاه جمع‌آوری داده (USB2002, 6 channels, 400 kHz A/D card) وارد می‌شد. زاویه قله فشار نیز به وسیله زاویه‌سنج (ساخت شرکت AVL، مدل ۳۳۳ و دقت ۰٫۱ درجه) نصب شده بر روی میل-لنگ و دستگاه جمع‌آوری داده ذخیره و ثبت می‌شد.

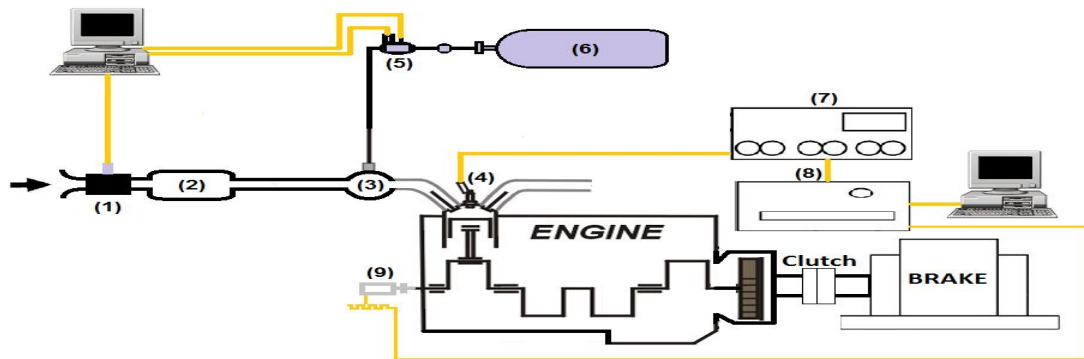
جدول ۱- مشخصات موتور استفاده شده در آزمایش

قطر سیلندر	۹۵ میلی‌متر
طول شاتون	۱۵۶ میلی‌متر
حجم جاروب	۵۸۲ سانتی‌مترمکعب
نسبت تراکم	۹٫۶

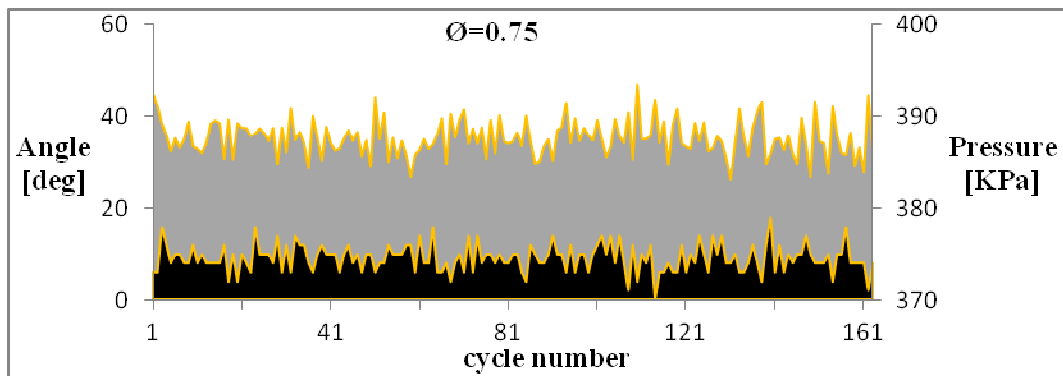
قبل از شروع آزمون، موتور به مدت ۱۵ دقیقه کاملاً گرم شد و پس از اینکه شرایط موتور پایدار شد، نسبت هم‌ارزی با توجه به سیگنال ارسال شده از دبی‌سنج هوا و دبی‌سنج سوخت، توسط یک سیستم الکتریکی و یک کامپیوتر اندازه‌گیری و با استفاده از کنترل‌کننده جریان سوخت ورودی به موتور تنظیم شد. سپس قله فشار و زاویه قله فشار ۱۶۰ سیکل از احتراق موتور جمع‌آوری و ذخیره شد. در ادامه نسبت هم‌ارزی تغییر داده شد و بعد از گذشت ۵ دقیقه مجدداً قله فشار و زاویه قله فشار ۱۶۰ سیکل از احتراق موتور جمع‌آوری و ذخیره شد. این عملیات برای نه نسبت هم‌ارزی مختلف (۰٫۷۵ - ۰٫۸۰ - ۰٫۸۵ - ۰٫۹۰ - ۰٫۹۵ - ۱٫۰۰ - ۱٫۱۱ - ۱٫۲۰ - ۱٫۲۸) انجام شد. شکل ۲ یک نمونه از تغییرات دوره به دوره قله فشار و زاویه قله فشار اندازه‌گیری شده را برای نسبت هم‌ارزی ۰٫۷۵ نشان می‌دهد.

۳- آنتروپی چندمقیاسی (MSE)

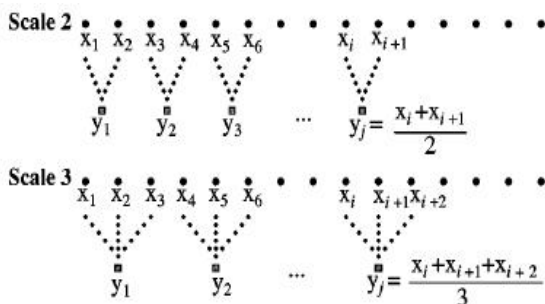
در این قسمت برخی از جنبه‌های تئوری روش آنتروپی چندمقیاسی بر روی دنباله‌های گسسته به صورت خلاصه شرح



شکل ۱- طرح کلی آزمایش: (۱) دبی سنج (۲) تانک میراکننده جریان هوا (۳) مخلوطکن سوخت و هوا (۴) سنسور فشار (۵) کنترل کننده جریان سوخت (۶) مخزن سوخت (۷) آمپلی فایر (۸) دستگاه جمع آوری داده (۹) زاویه سنج



شکل ۲- تغییرات سیکنالی قله فشار (رنگ خاکستری) و زاویه قله فشار (مشکی) برای نسبت هم‌ارزی ۰.۷۵



شکل ۳- نمایش کلی فرایند دانه‌درشت‌کردن

با این تعریف، بردار (x_1, x_2, x_3) به عنوان بردار سه مولفه‌ای نمونه در نظر گرفته می‌شود، و با سایر بردارهای سه مولفه‌ای درست شده از سری زمانی $\{(x_4, x_5, x_6), (x_7, x_8, x_9), \dots\}$ مقایسه می‌شود.

در ادامه بردار نمونه بعدی (x_2, x_3, x_4) در نظر گرفته و دوباره عملیات مقایسه (بررسی مشابه بودن) با سایر بردارهای ایجاد شده از سری زمانی انجام می‌شود.

تعداد بردارهای سه مولفه‌ای جور شده در هر مرحله را $n_i^{(m)}$ در نظر گرفته می‌شود و فرایند ذکر شده در بالا برای کل سری زمانی انجام می‌شود. لازم به ذکر است که در شمارش

داده می‌شود که ترکیبی از دو فرایند مهم دانه‌درشت‌کردن و محاسبه آنتروپی نمونه است.

با فرض اینکه $X(i) = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_N\}$ یک دنباله گسسته به طول N باشد، دانه‌درشت‌کردن در مقیاس τ ، عبارت است از میانگین‌گیری روی یک سری داده به طول τ ، که در شکل ۳ نشان داده شده است. بنابراین هر عنصر از سری زمانی دانه‌درشت‌شده از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$y_j^\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} x_i \quad (1)$$

در معادله بالا، τ فاکتور مقیاس است و $1 \ll j \ll N/\tau$. به طوری که برای فاکتور مقیاس یک، دنباله دانه‌درشت‌شده همان دنباله گسسته مبنا می‌باشد.

فرض کنید N طول سری زمانی، m طول مولفه‌هایی که باید در سری زمانی با هم مقایسه شوند و Γ حدود تغییرات برای پذیرفتن یک عضو از دنباله داده شده باشد (معمولاً ۱۰ تا ۲۰ درصد انحراف معیار سری زمانی). در محاسبه آنتروپی نمونه پارامترهای N ، m و Γ باید ثابت باشد.

دو بردار ایجاد شده از سری زمانی مبنا را با هم مشابه گوییم هر گاه که قدر مطلق اختلاف بین درایه‌های متناظر آنها کمتر از Γ باشد.

آنتروپی نمونه برای هر دنباله درشت شده P_{max} و $\alpha_{P_{max}}$ محاسبه شده و به عنوان تابعی از فاکتور مقیاس τ ، برای نه نسبت هم‌ارزی رسم شده است (شکل ۴).

برای همه این موارد m برابر ۳ و Γ برابر ۱۵٪ انحراف معیار، در نظر گرفته شده است. از شکل‌ها ملاحظه می‌شود که آنتروپی نمونه دارای یک توزیع نمایی نسبت به مقیاس می‌باشد. پیچیدگی یک سیستم به صورت انتگرال آنتروپی بر حسب مقیاس تعریف می‌شود (مساحت زیر منحنی‌های شکل ۴) [۱۲]. بنابراین برای یک سری زمانی پیوسته، پیچیدگی برابر است با:

$$k = \int_1^N s(\tau) d\tau \quad (۵)$$

و برای یک سری زمانی گسسته:

$$k = \sum_{i=1}^N s(i) \quad (۶)$$

بردارها فقط داده‌های جلوتر یعنی سمت راست بردار سه مولفه‌ای نمونه مورد شمارش قرار می‌گیرد و خود بردار نمونه مورد شمارش قرار نمی‌گیرد. در این صورت احتمال تشابه بردار سه مولفه‌ای در فرایند Γ ام از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$c_i^{(m)}(r) = \frac{n_i^{(m)}}{N - m + 1} \quad (۲)$$

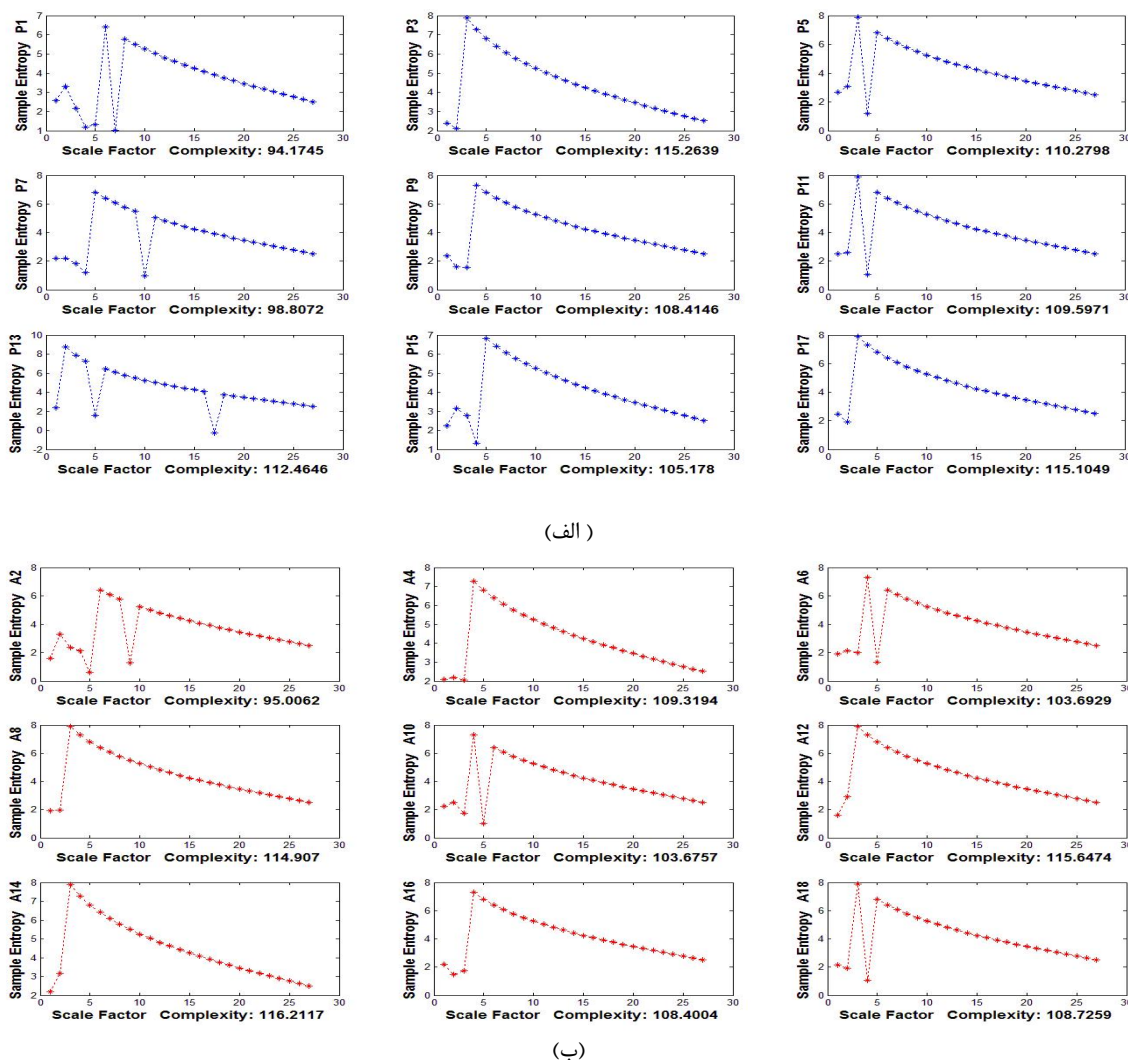
و میانگین کل $c_i^{(m)}(r)$ ‌ها نشان دهنده احتمال آن است که هر دو بردار $m = 3$ مولفه‌ای درون حدود تغییرات Γ دیده شوند:

$$c^{(m)}(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} c_i^{(m)}(r) \quad (۳)$$

به این ترتیب آنتروپی نمونه وابسته به دو پارامتر m و Γ از معادله زیر حساب می‌شود:

$$SampEn = -Ln\left[\frac{c^{(m)}(r)}{c^{(m-1)}(r)}\right] \quad (۴)$$

که عبارت داخل Ln همان احتمال شرطی دیدن یک بردار $m = 3$ مولفه‌ای به شرط دیدن یک بردار ۲ مولفه‌ای است.



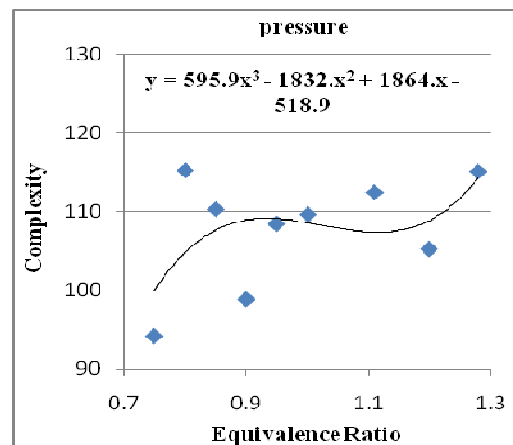
شکل ۴- آنتروپی نمونه محاسبه شده برای سری‌های زمانی قله فشار (الف) و زاویه قله فشار (ب) بر حسب فاکتور مقیاس τ برای نه نسبت هم‌ارزی مختلف

که طول محدود سری‌های زمانی (نوسانات قله فشار و زاویه قله فشار) به کار رفته در اینجا $N=160$ بوده و مقدار پیچیدگی با استفاده از ام‌فایل نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB محاسبه شد.

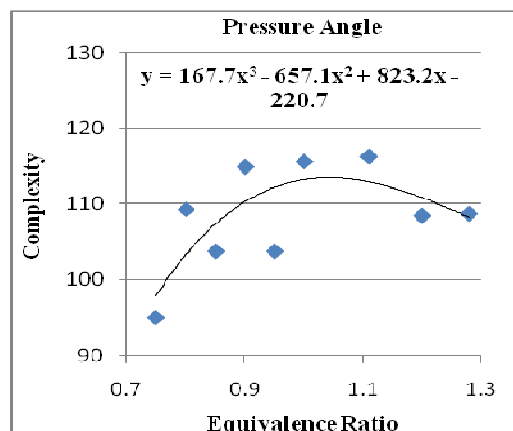
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله پیچیدگی قله فشار و زاویه قله فشار یک موتور چهار سیلندر با سوخت گاز طبیعی، بر حسب نسبت هم‌ارزی مختلف محاسبه شد که در نمودارهای شکل ۵ نشان داده شده است. با برآزش کردن یک منحنی درجه سه برای آنها مقدار پیچیدگی قله فشار و زاویه قله فشار برحسب نسبت هم‌ارزی فرموله شده است.

از نمودارها مشخص است که محدوده نسبت هم‌ارزی مطلوب برای حداقل پیچیدگی بین ۱/۱۱ تا ۱/۲ می‌باشد. چون پیچیدگی زاویه قله فشار، در حال کاهش، و پیچیدگی قله فشار حداقل می‌باشد. بنابراین نوسانات قدرت خروجی نیز می‌تواند با مینیمم کردن پیچیدگی قله فشار و زاویه قله فشار، کاهش داده شود.



(الف)



(ب)

شکل ۵- نتایج پیچیدگی الف) قله فشار و ب) زاویه قله فشار برحسب نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

نمادها

قله فشار	P_{max}
زاویه قله فشار	$\alpha_{p_{max}}$
فاکتور مقیاس	τ
طول محدود سری	N
طول مولفه‌های مقایسه شده در سری	m
حدود تغییرات	r
پیچیدگی	k

مراجع

- [1] Costa, M., Goldberger, A.L., Peng, C.K. "Multi-scale analysis of complex biological signals", *Physical Review*, Vol.89:068102, 2002.
- [2] Litak, G., Kamiński, T., Rusinek, R., Czarnigowski, J., Wendeker, M. "Patterns in the combustion process in a spark ignition engine", *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 35, pp. 578–585, 2008.
- [3] Sen, A.K., Longwic, R., Litak, G., Górski, K. "Analysis of cycle-to-cycle pressure oscillations in a diesel engine", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 22, pp. 362–373, 2008.
- [4] Clerk, D. "The gas engine", Longmans Green, London, 1886.
- [5] Patterson, DJ., "Cylinder pressure variation, a fundamental combustion problem", *SAE*, Vol. 690129, 1966.
- [6] Heywood, JB. "Internal combustion engine fundamentals", McGraw-Hill, New York, 1988.
- [7] Wendeker, M., Litak, G., Czarnigowski, J., Szabelski, K. "Non periodic oscillations of pressure in a spark ignition engine", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 14, pp. 1801–1806, 2004.
- [8] Litak, G., Kamiński, T., Czarnigowski, J., Sen, A.K., Wendeker, M. "Combustion process in a spark ignition engine: analysis of cyclic peak pressure and peak pressure angle oscillations", *Meccanica*, Vol. 44, pp. 1-11, 2009.
- [9] Costa, M., Peng, C.K., Goldberger, A.L. "Multi-scale analysis of human gait dynamics", *Physica*, Vol. 330, pp. 53-60, 2003.
- [10] Sawamoto, K., Kawamura, Y., Kita, T., Matsushita, K. "Individual cylinder knock control by detecting cylinder pressure", *SAE*, paper 871911, 1987.
- [11] Matekunas, FA. "Modes and measures of cyclic combustion variability", *SAE*, paper 830337, 1983.
- [12] Costa, M., Goldberger, A.L., Peng, C.K. "Multi-scale analysis of biological signals", *Physical Review*, Vol. 89:021906, 2005.