

# تشخیص وقوع پدیده کوبش در موتورهای احتراق داخلی با استفاده از سیگنال شتاب بدنه

مرتضی صادقی<sup>۱</sup>، وهاب پیروز پناه<sup>۲</sup>، میر محمد اتفاق<sup>۳</sup>، هادی ارجمندی تاش<sup>۴</sup>، امیر صادقیپور رنجبر<sup>۵</sup>

دانشگاه تبریز، دانشکده فنی مهندسی مکانیک  
[Morteza@TabrizU.ac.ir](mailto:Morteza@TabrizU.ac.ir)

## چکیده

مقاله ارائه شده شامل مدلسازی وقوع فرآیند کوبش در موتورهای احتراق داخلی بر اساس مدل پارامتریک ARMA می‌باشد. بدین معنی که با استفاده از شتاب سنج متصل به بدنه موتور و با مدلسازی سیگنالهای لرزش بدنه توسط مدل ARMA معیار مشخص، قابل قبول و بسیار ساده ای برای تشخیص وقوع و یا عدم وقوع کوبش ارائه شده است. بکارگیری سنسور تاکومتر (سرعت سنج) جهت مشخص کردن زاویه دوران میل لنگ به موازات سنسور شتاب باعث افزایش دقت این روش در مقایسه با روشهای مشابه قبلی شده است.

واژه‌های کلیدی: موتورهای احتراق داخلی - کوبش موتور - مدل پارامتریک ARMA

## ۱- مقدمه

یکی از موانع عمده ای که در مسیر طراحی و کاربرد موتورهای احتراق داخلی اشتعال جرقه ای پیش روی قرار دارد، مشکل بروز پدیده کوبش (knocking) در این موتورها است [۱]. این پدیده که در اثر احتراق غیر عادی در محفظه احتراق به وجود می آید، اثرات نامطلوب زیادی مانند ایجاد آلودگی محیط زیست، آسیب رسانی به موتور در دراز مدت و حتی آلودگی صوتی در بر دارد. از طرف دیگر بروز پدیده کوبش، باعث کاهش بازده موتور و افزایش مصرف سوخت ویژه (sfc) می گردد. بنابر مطالب فوق اهمیت تشخیص و مقابله با این پدیده به روشنی نمایان است. روشهایی را که تا به امروز در مورد تشخیص وجود کوبش در موتورهای احتراق داخلی انجام گرفته است، می توان به دو دسته تقسیم بندی کرد:

دسته اول شامل پژوهش هایی است که به طور مستقیم و با مطالعه بر روی چگونگی تغییرات پارامترهای درون محفظه احتراق، که با بروز پدیده کوبش در ارتباط هستند، انجام می گیرد. به عنوان نمونه از این پژوهشها آزمایشهایی است که توسط Hudson و همکاران و در دانشگاه oxford صورت گرفته است [۲]. در این پژوهش، از سنسور اندازه گیری فشار تعبیه شده در داخل محفظه احتراق استفاده شده است. با بررسی سیگنال های حاصل شده در شدتهای مختلف کوبش و با استفاده از آنالیز فوری و آنالیزهای آماری، معیاری با عنوان LKI (Logarithmic Knock Intensity) برای تشخیص شدت کوبش، برپایه میانگین

۱- استادیار مهندسی مکانیک- دانشگاه تبریز

۲- استاد مهندسی مکانیک- دانشگاه تبریز

۳- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک طراحی کاربردی- دانشگاه تبریز

۴- دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک طراحی جامدات- دانشگاه تبریز

۵- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک نیرو محرکه- دانشگاه تبریز

انرژی سیگنال نوسانات فشار داخل معرفی و براساس نتایج حاصله، مدار الکتریکی مناسبی برای نمایان سازی شدت کوبش ساخته و ارائه شده است. بررسی مستقیم و بدون واسطه فرآیندهای درون محفظه احتراق و چگونگی تاثیر پذیری آنها از پدیده کوبش، باعث شده که این روشها در مجموع نتایج خوب و قابل اطمینانی در بر داشته باشند. با وجود این مسائلی مانند هزینه و در معرض آسیب بودن سنسورهای مورد استفاده (به علت تماس مستقیم با مخلوط داغ و پر فشار داخل)، همچنین لزوم سوراخ کردن بدنه موتور جهت نصب حساسه از معایب این روشها می باشند. مجموعه عوامل فوق به اضافه نیاز به تعداد زیاد سنسور (حداقل یک سنسور برای هر سیلندر) و متعاقب آن افزایش هزینه های اقتصادی و حتی افزایش حجم نرم افزارهای کنترل کننده، باعث شده است که کاربرد این روشها تنها به فعالیتهای آزمایشگاهی و تحقیقاتی محدود شود.

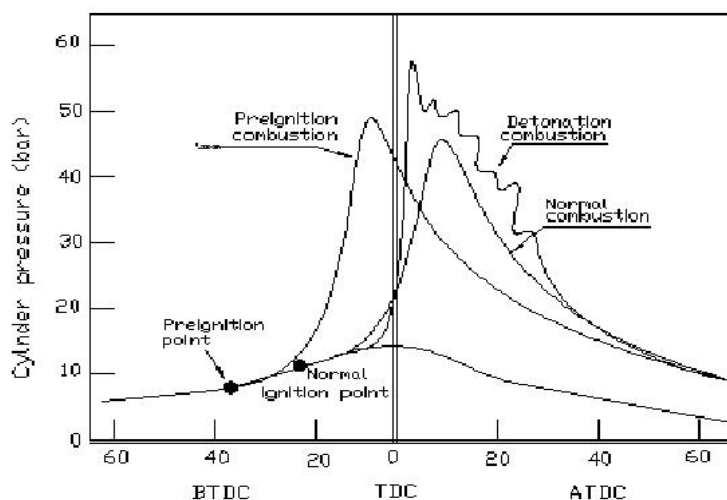
در روشهای غیر مستقیم، بدون دسترسی به فضای داخل محفظه احتراق، و تنها از طریق بررسی و مقایسه پارامترهای خارجی مرتبط، به وقوع کوبش در داخل سیلندر پی برده می شود. اندازه گیری چگونگی تغییرات سیگنالهای صوتی و یا لرزش بدنه موتور از روشهایی غیر مستقیمی است که معمولاً در این مورد بکار گرفته می شود. در سال ۱۹۹۹ Matz و Hlawats [۳] روش تعمیم یافته ای از آشکارساز (detector) زیرفضای منطبق شده (Matched subspace) و روش آنالیز زمان-فرکانس (Time-Frequency) برای فرموله کردن و طراحی شناساگرهای زیر فضا (subspace)، بر پایه روشهای غیر مستقیم، معرفی و با بکارگیری شناساگرهای مختلف برای مساله تشخیص کوبش مزایای اساسی استفاده از شناساگرهای زمان-فرکانس را نشان داده اند. در همین سال نیز در دانشگاه بوخوم آلمان، Stankovic و Bohme [4] آنالیز زمان-فرکانس را در رزونانسهای مختلف و برای فشار داخل محفظه احتراق و سیگنالهای صوتی متناظر بلوک سیلندر و تنها به کمک یک سیکل کامل احتراقی انجام داده و سپس با استفاده از توزیع ویگنر (Wigner Distribution) ابزار مناسبی برای شناسایی وجود کوبش ارائه کرده اند. از آنجائیکه در پژوهش مزبور زمان تاخیر محاسبات (Calculation Delay) از زمان یک سیکل کامل احتراق کمتر است، لذا می تواند کنترل خوب و با دقت بالایی بر روی موتورهای اشتعال جرقه ای فراهم کند. در سال 2001 نیز پژوهش های دیگری با استفاده از ارتعاشات بدنه موتور و استفاده از آنالیز سیکل پایدار (Cyclostationary) صورت گرفته و نتایج قابل قبولی ارائه شده است [۵]. تاثیر عوامل دیگر به غیر از کوبش بر سیگنالهای خروجی از حساسه های مورد استفاده عامل کاهش دقت این پژوهشها نسبت به روش مستقیم است. ولی با وجود این، عواملی نظیر ارزان بودن و طول عمر بیشتر سنسورهای مورد نیاز این روش نسبت به حساسه های قبلی (به علت بهتر بودن شرایط کاری)، تعداد کم حساسه های مورد نیاز (یک و یا نهایتاً دو عدد برای هر موتور) و همچنین عدم نیاز به تخریب بدنه موتور جهت دسترسی به فضای داخل آن، باعث گسترش روشهای غیر مستقیم در تشخیص کوبش گردیده است.

در پژوهش حاضر با استفاده از شتاب سنج و با ثبت تغییرات لرزش بدنه موتور، سعی در پایه ریزی روشی جهت تشخیص کوبش در مراحل آغازین وقوع آن شده است، که می تواند در دسته روشهای غیر مستقیم طبقه بندی شود. همانگونه که اشاره شد، در مورد مطالعه تغییر لرزشهای بدنه موتور نسبت به بروز پدیده کوبش، قبل از این نیز پژوهش هایی صورت گرفته است، ولی این پژوهش دو تفاوت عمده با موارد قبلی دارد، مورد اول اینکه با بکارگیری سنسور دور سنج (Tachometer) به موازات سنسور شتاب سنج و ثبت چگونگی تغییرات سرعت دورانی موتور، سعی در افزایش دقت پردازش داده ها شده است. مورد دوم و مهم تر اینکه با طراحی یک مدل پارامتریک ریاضی به نام مدل (ARMA Auto Regressive Moving Average) برای مدلسازی پدیده کوبش، نتایج بررسی از حالت شهودی محض خارج شده و ایجاد پدیده کوبش با تغییرات یک پارامتر مشخص، متناظر گردیده است. این روش که برای اولین بار و در این پژوهش صورت گرفته است، باعث شده نیاز به وجود فرد متخصص جهت بررسی و تحلیل نمودار های حاصله (در روشهای قبلی) از بین رفته و بدین ترتیب امکان توسعه این روش جهت طراحی و ساخت یک مدار کنترلی جهت خودکار کردن تشخیص این پدیده فراهم شده است. با توجه به اینکه روش بکار گرفته شده در این تحقیق روشی ابتکاری و جدید است، لذا جهت صحت گذاری (validation) نتایج، آزمایش بر روی موتور آزمایشگاهی تک سیلندر BASF - که جهت ایجاد و بررسی مراحل مختلف کوبش طراحی و ساخته شده است - در آزمایشگاه ماشینهای حرارتی دانشگاه تبریز، انجام گرفت.

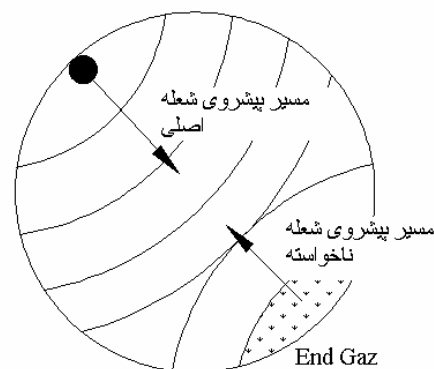
روند مطالب ارائه شده در این مقاله به این صورت است که ابتدا در بخش ۲ به بررسی اجمالی پدیده کوبش پرداخته خواهد شد. سپس، در بخش ۳ در مورد مدل های خطی ثابت در زمان، و مدل سازی پدیده کوبش توسط یکی از این مدل ها به نام مدل ARMA توضیح داده می شود. در بخش ۴ به داده برداری و پردازش سیگنال های به دست آمده و نتایج مدل سازی پرداخته می شود، و در انتها، در بخش های ۵ و ۶ در مورد نتایج به دست آمده بحث و نتیجه گیری کلی انجام خواهد شد.

## ۲- موتور و پدیده کوبش

مکانیزم ایجاد کوبش در موتور را، می توان به رخداد پدیده احتراق غیرعادی (Abnormal Combustion) در محفظه احتراق مربوط دانست. به صورت عادی، احتراق هنگامی روی می دهد که نزدیکترین لایه مخلوط سوخت-هوا، توسط جرقه شمع منفجر شده و مشتعل گردد. در این مرحله، این لایه مشتعل، به نوبه خود، لایه اطراف خود را نیز مشتعل می کند و به این ترتیب، مخلوط لایه به لایه مشتعل شده و احتراق تا دیواره های سیلندر و به صورت نسبتاً آرام و منظمی به پیش می رود (Flame Propagation). حال چنانچه در هنگام پیش روی شعله به سمت دیواره، بخشی از مخلوط که در لایه های انتهایی محفظه احتراق قرار دارد (End Gas)، در اثر افزایش دما و فشار ناشی از احتراق لایه های داخلی و یا بالا آمدن پیستون، به صورت خودبخودی مشتعل شود، تولید موجی در خلاف جهت انتشار شعله اولیه می نماید (شکل ۱). در این حالت این دو موج با همدیگر و با شدت زیادی برخورد کرده و تولید ضربه ای ناگهانی و صدای مهیب، می کند. چنین پدیده ای با عنوان کوبش شناخته می شود [1].



شکل ۲- چگونگی تغییرات فشار داخل سیلندر در حالت پیش جرقه زنی و کوبش



شکل ۱- مکانیزم ایجاد پدیده کوبش

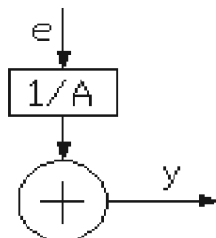
صدای کوبش در اتومبیلها، عموماً آزار دهنده است. کوبش منجر به گرم شدن بیش از حد سیلندر، ایجاد پیش جرقه زنی (Preignition) و تولید جریانهای فشاری بالا در داخل سیلندر می گردد (شکل ۲). چنین امواج فشاری قوی منجر به از بین رفتن لایه مرزی مایع روانکاری روی سیلندر گردیده که این مساله نیز به نوبه خود باعث خوردگی سطحی پیستون در داخل سیلندر خواهد شد [1]. بروز این پدیده همچنین باعث آسیب دیدن رینگ پیستون ها می شود. از طرف دیگر امواج فشاری تولید شده، انتقال حرارت از محصولات احتراق به دیواره های سیلندر را افزایش می دهند. این مساله نیز به نوبه خود منجر به افزایش دمای موضعی در نقاط مختلف سیلندر، پیستون و سوپاپها شده و به علت پایین بودن دمای ذوب آلیاژهای آلومینیوم، بر سطوح مختلف آنها نقاط ذوب موضعی و خوردگی ایجاد می شود (دمای ذوب آلیاژهای آلومینیوم بسیار کم بوده و این آلیاژها در حدود  $250^{\circ}C$  شروع به گرم شدن موضعی و نرم شدن می کنند). ذوب موضعی روی پیستونها در دراز مدت

سبب ایجاد سوراخ خواهد شد. کاهش توان و کار کردن غیر عادی و ناهنجار موتور، افزایش آلایندگی و مصرف سوخت نیز از آثار مهم دیگر پدیده کوبش است.

### ۳- مدل‌های سیستم‌های خطی ثابت در زمان [۷، ۸] (Linear Time Invariant systems)

در این پژوهش، موتور به عنوان سیستمی مورد بررسی قرار گرفته است که پدیده کوبش، تاثیر مستقیم بر روی رفتار (پاسخ) آن دارد. هر سیستمی را می‌توان توسط یک مدل ریاضی مشابه سازی نمود و بهترین مدل، الگویی است که بیشترین تطابق را با پاسخ سیستم، نسبت به ورودی مربوطه، داشته باشد. در این پژوهش از مدل پارامتریک ARMA جهت مدل سازی ریاضی سیستم مذکور استفاده شده است. این مدل که توسط پارامترهایی مشخص می‌شود، رفتار ارتعاشی موتور را مدل سازی می‌کند، به نحوی که هرگونه تغییر در رفتار ارتعاشی باعث تغییر در رفتار پارامترهای مدل ARMA می‌شود. در این حال با مطالعه نحوه تغییرات این پارامترها می‌توان به پدیده فیزیکی که در سیستم واقعی اتفاق می‌افتد، پی برد. بیان ریاضی حالت کلی مدل ARMA به صورت رابطه (۱) است:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n_a) = e(t-1) + c_1 e(t-1) + c_2 e(t-2) + \dots + c_n e(t-n_c) \quad (1)$$

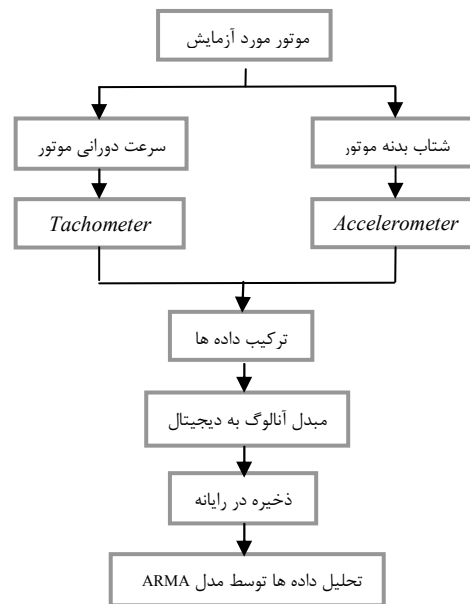


شکل ۳ - دیاگرام عمومی ورودی-خروجی یک مدل ARMA

دیاگرام عمومی ورودی-خروجی مدل ARMA در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، چنین مدلی فاقد ورودی معین و مشخصی بوده و تمامی ورودیها را می‌توان تحت عنوان کلی اغتشاش (noise) در نظر گرفت. چنین مدلی به عنوان یک ابزار استاندارد در شناخت سیستمها و طراحی و کنترل آن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

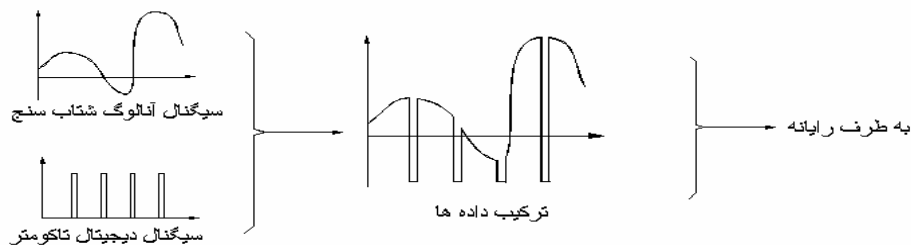
### ۴- داده برداری و پردازش سیگنال‌های ارتعاشی موتور

شمای کلی روش و مراحل انجام تحقیق حاضر در شکل ۴ مشخص شده است. اطلاعاتی که به منظور نیل به اهداف این تحقیق لازم است از موتور اخذ شود، شامل سیگنال ارتعاشات بدنه موتور و سیگنال تاکومتر (دور سنج) می‌باشد. باید به این نکته مهم توجه داشت که سیگنال اولی (سیگنال ارتعاشی) دارای ماهیت آنالوگ بوده و در حقیقت، سیگنال اصلی می‌باشد و تمامی پردازشها بر روی آن انجام خواهد گرفت ولی سیگنال دومی (سرعت موتور)، سیگنالی دیجیتال بوده و به منظور کمک به بررسی و افزایش دقت پردازش و تحلیل سیگنال اولیه به کار برده می‌شود. کاربرد و مزیت استفاده از این سیگنال در آینده، بیشتر مشخص خواهد شد. نکته مهم در این بین، نحوه و روش ترکیب این دو سیگنال با همدیگر به شرط داشتن بیشترین دقت و کمترین اغتشاش (noise) اضافه شده به سیگنالهای اصلی، است. با این فرض و با در نظر گرفتن این نکته که پردازشهای انجام گرفته به صورت زمان واقعی (real time) نبوده و ابتدا سیگنالها جذب و ذخیره شده و سپس پردازش بر روی آنها انجام خواهد گرفت، لذا باید به هر ترتیب ممکنه نقاط متناظر با ابتدا و انتهای هر دور را بر روی سیگنال شتاب سنج علامت گذاری کرد تا در آینده مورد استفاده قرار گیرد. روش تحقیق حاضر برای رسیدن به این هدف، شامل طراحی و ساخت یک مدار میکسر-سویچینگ می‌باشد.



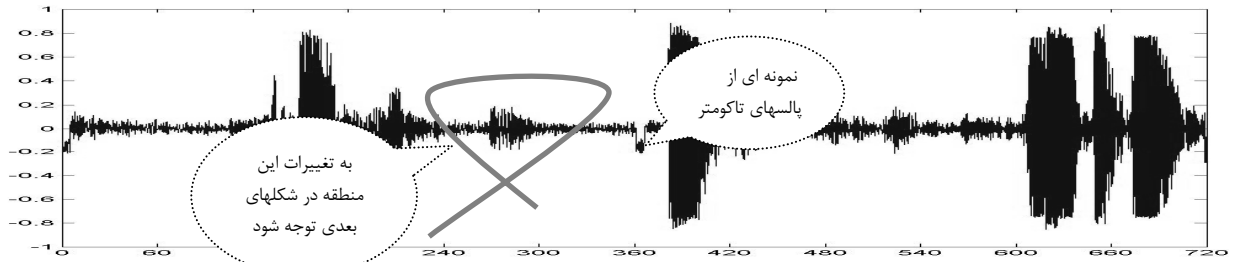
شکل ۴- مراحل مختلف اجرای تحقیق حاضر

چنین مداری دارای دو سیگنال ورودی (سیگنال شتاب سنج و سیگنال تاکومتر) و یک سیگنال خروجی (سیگنال ترکیبی) بوده و طریقه عمل آن بدین صورت است که تا زمانی که ورودی اول (ورودی از تاکومتر) برابر صفر باشد، سیگنال دوم (سیگنال ارتعاشی) را از خود عبور خواهد داد ولی در لحظه ای که ورودی اول برابر یک گردد، مقدار معین و از پیش تعیین شده ای را در خروجی خود ظاهر خواهد کرد. بنابر این خروجی چنین مداری شامل سیگنال آنالوگ ارتعاشی بوده که دارای فرورفتگی‌هایی در ابتدا و انتهای هر دور موتور (در نقاط متناظر با پالسهای تاکومتر) می باشد. (شکل ۵)

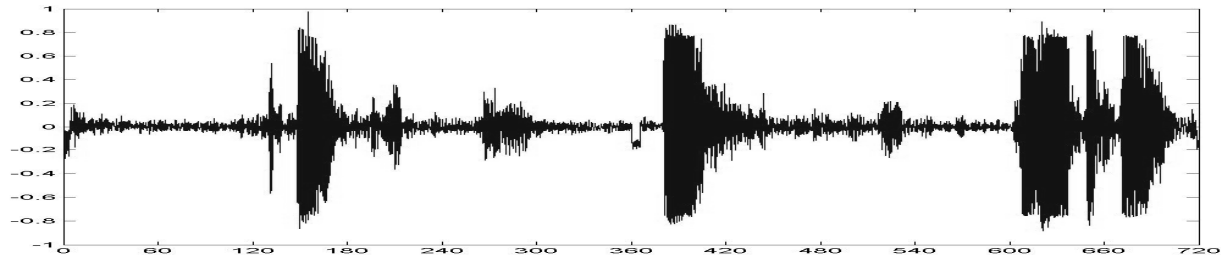


شکل ۵- عملیاتی که توسط مدار خارجی انجام می گیرد.

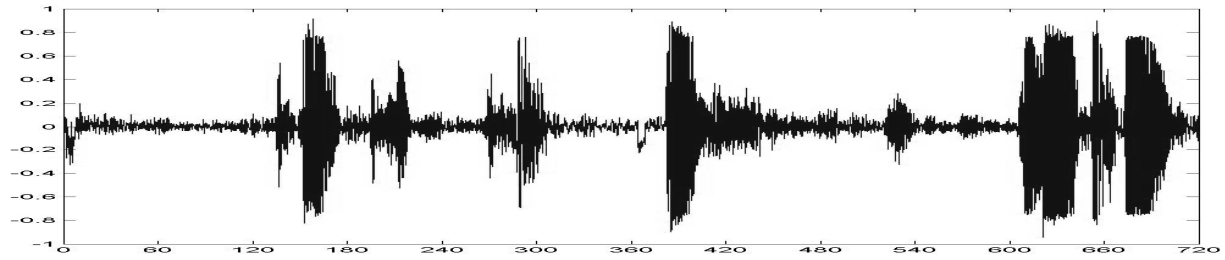
موتور مورد استفاده در تحقیق حاضر، یک موتور تک سیلندر آزمایشگاهی به نام (Knock testing engine BASF) است که به منظور مطالعه بر روی پدیده کوبش و یا تعیین عدد اکتان سوخت‌های مختلف، در شرکت (Carlowitz&Co) آلمان، طراحی و ساخته شده است. این موتور به وسیله ای برای تغییر نسبت تراکم مجهز است که می تواند نسبت تراکم موتور را در حین کارکرد آن تغییر داده و بدین ترتیب شدت‌های مختلف کوبش را در داخل محفظه احتراق به وجود آورد. در انجام این آزمایش، پس از آماده کردن ابزارهای داده گیری، با تغییر نسبت تراکم، کوبش‌هایی با هشت مرحله شدت مختلف در محفظه احتراق تولید گردید، که اولین آنها حالت عادی کارکرد موتور، بدون کوبش و با نسبت تراکم ۵٫۲ و آخرین مرحله آزمایش نیز مرحله ای با نسبت تراکم ۶٫۸ و دارای ماکزیمم حد کوبشی بود که احساس شد بیشتر از آن ممکن است باعث آسیب دیدن موتور شود. سرعت دورانی موتور در تمامی این مراحل برابر ۶۰۰ rpm (برابر با سرعت نامی موتور) و فرکانس نمونه برداری برابر ۴۴٫۱ KHz بود. از طرف دیگر مدت زمان داده گیری برای هر مرحله برابر یک دقیقه تعیین گردید که بدین ترتیب شامل حدود ۳۰۰ سیکل کامل موتور می‌باشد.



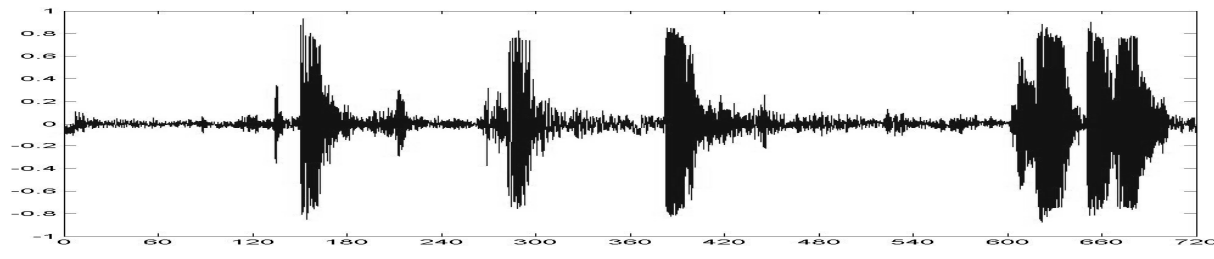
شکل ۶- سیگنال دریافتی از موتور به ازای شدت کوبش صفر. نسبت تراکم: ۵٫۲



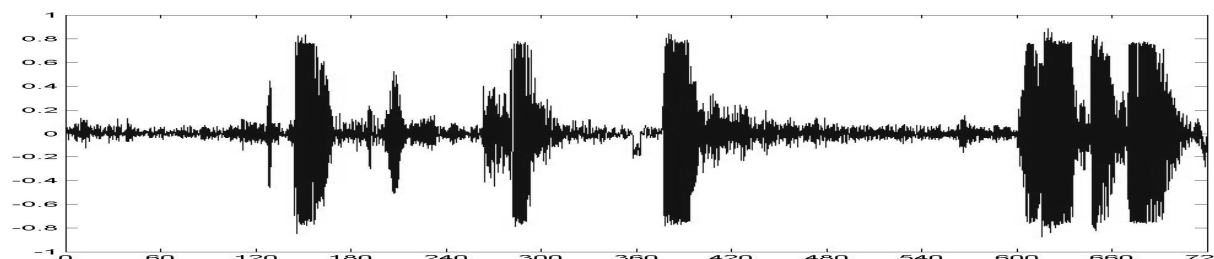
شکل ۷- سیگنال دریافتی از موتور در اولین مرحله کوبش. نسبت تراکم: ۵٫۵



شکل ۸- سیگنال دریافتی در دومین مرحله کوبش. نسبت تراکم: ۵٫۶۵

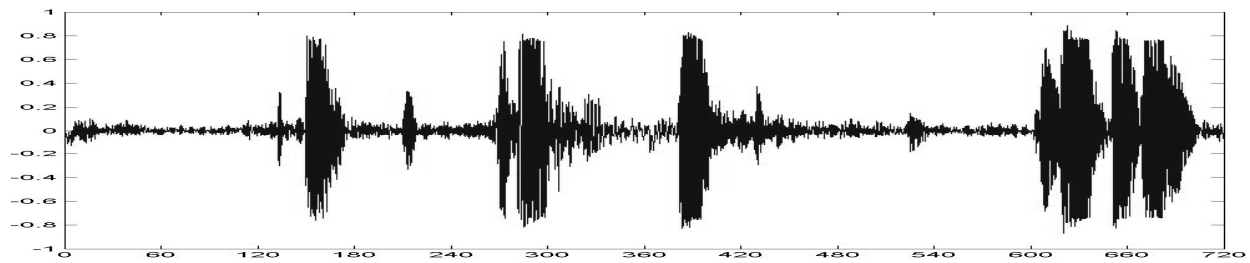


شکل ۹- سیگنال دریافتی در سومین مرحله کوبش. نسبت تراکم: ۵٫۷۵

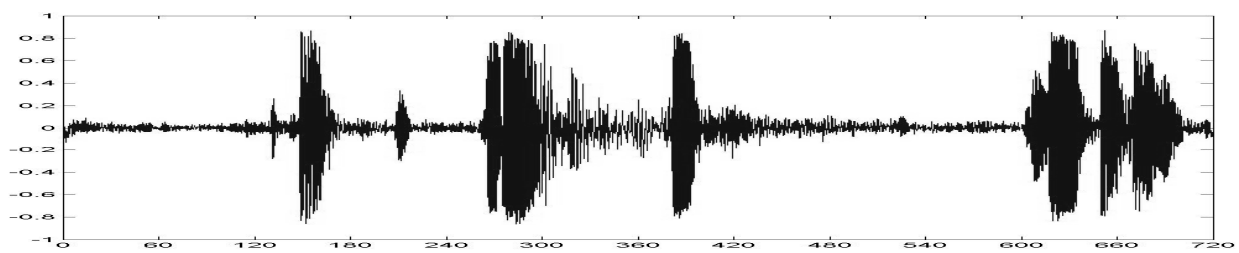


شکل ۱۰- چهارمین مرحله کوبش. نسبت تراکم: ۶

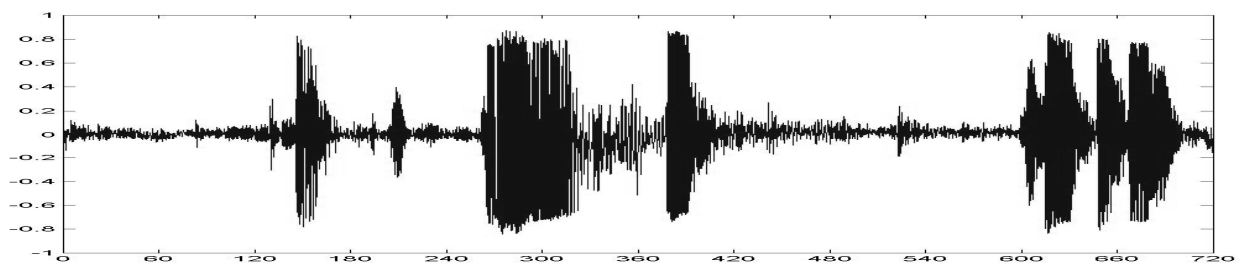
سیگنالهای حاصل از آزمایش صورت گرفته، به ازای شدت های مختلف کوبش، به ترتیب از شدت های کوبش کم تا زیاد در شکل های ۶ تا ۱۳ نمایش داده شده است. در تمامی این نمودارها، محور افقی زاویه دوران میل لنگ نسبت به نقطه مرگ پایین و محور عمودی، دامنه سیگنال های دریافتی است.



شکل ۱۱- مرحله پنجم کوبش. نسبت تراکم: ۶،۲



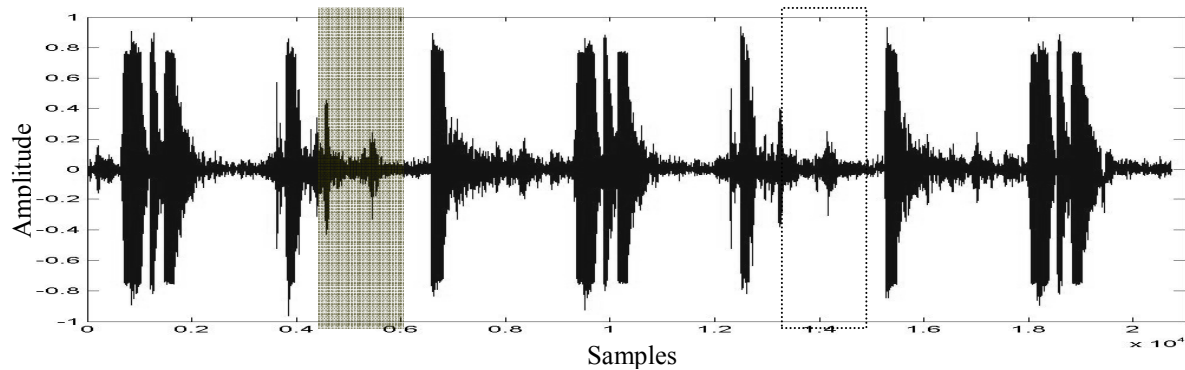
شکل ۱۲- سیگنال دریافتی در مرحله ششم کوبش. نسبت تراکم: ۶،۴



شکل ۱۳- سیگنال دریافتی در بیشترین شدت کوبش تولیدی. نسبت تراکم: ۶،۸

همانگونه که از این نمودارها مشخص است، منطقه مشخص شده در شکل ۶ حساسیت زیادی به تغییر شدت کوبش از خود نشان می دهد. لذا، پس از این تمامی تحلیل ها بر روی این ناحیه متمرکز خواهد شد. از طرف دیگر اختلاف بین دامنه سیگنالهای تولید شده در شدت های کم و بالای کوبش به اندازه ای چشمگیر است که برای تمایز بین شدت های کوبش بالا و پایین، نیازی به تحلیل خاصی نبوده و به صورت شهودی از هم قابل تفکیک می باشند. ولی نکته مهم، حائز اهمیت و مشکل تفکیک بین شدت های کوبش پایین و تشخیص کوبش در مراحل آغازین آن می باشد. با در نظر گرفتن این نکته و با یادآوری این مساله که در کاربردهای عملی و در حین کارکرد معمولی موتورها، شدت های بسیار بالای کوبش رخ نداده و تنها مقادیر جزئی کوبش اتفاق می افتد، بنابر این در تحقیق حاضر بحث تشخیص کوبش منوط به تشخیص و متمایز کردن نمودارهای ۶ و ۷ (مرحله بدون کوبش و مرحله آغازین آن) می باشد. برای رسیدن به این هدف، باید از هرکدام از دو سیگنال فوق، به تعداد کافی نمونه شامل مناطق حساس به کوبش، جدا شده و به مدل ARMA منتقل شوند. برای این منظور و در تحقیق حاضر، سیگنالهای تاکومتر نقش بسیار مهم و قابل توجهی ایفا نمودند. بطوریکه شاید بدون وجود این سیگنالها رسیدن به پاسخ مورد نظر امکان پذیر نبود. برای روشن شدن بیشتر اهمیت این سیگنال به شکل ۱۴ که شامل دو سیکل کامل از سیگنالهای ارتعاشی بدنه موتور و فاقد سیگنالهای تاکومتر است، توجه کنید. ناحیه حساس به کوبش در سیکل اول، حول وحوش منطقه ای است که با پیش زمینه خاکستری مشخص شده است. در این حالت سوال اساسی این است که چگونه و برپایه کدام معیار

می‌توان این منطقه را به طور کامل شناخته و از محیط اطراف جدا نمود؟ و سوال مهمتر اینکه چگونه می‌توان این معیار را به سیکل‌های بعدی (مثلا سیکل دوم سیگنال فوق) گسترش داد به نحوی که مناطق انتخاب شده بیشترین همبستگی را با همدیگر داشته باشند؟ و اصولا معیار همبستگی در انتخاب مناطق حساس چیست؟ برای تفکیک کردن بهتر منطقه فوق در تمامی سیکل‌ها نیاز به دو پارامتر اساسی داریم، نخست اینکه باید نقطه ای در نزدیکی های منطقه مورد نظر را که بطور متوالی در سیکل‌های بعدی تکرار شده و قابل شناسایی باشد، به عنوان مبدا این منطقه در اختیار داشته باشیم.



شکل ۱۴- دو سیکل کامل از سیگنال‌های دریافتی از موتور در مرحله بدون کوبش. در این شکل برای روشن شدن بهتر بحث پالسهای مربوط به تاکومتر حذف شده اند. منطقه حساس به کوبش در سیکل اول با سایه مشخص شده است ولی چون امکان شناسایی دقیق منطقه متناظر با آن در سیکل دوم وجود نداشت، منطقه احتمالی با نقطه چین مشخص شده است.

از طرف دیگر باید طولی را نیز به عنوان طول منطقه حساس به کوبش در نظر بگیریم به نحوی که با شروع از مبدا مورد نظر و پیشروی به اندازه این طول، مرز این منطقه به طور کامل از سیگنال‌های اطراف، جدا شده و تمامی منطقه حساس را در برگیرد. شاید طول این منطقه حساس را بتوان به طور تخمینی و با استفاده از تعداد نمونه های موجود در حد فاصل ابتدا و انتهای باند فوق، مشخص کرده و برای تمامی سیکل‌های بعدی نیز، اعمال کرد. ولی عملا نقطه ای را که نقاط متناظر آن در سیکل‌های بعدی تکرار شده و قابل شناسایی باشد، به عنوان نقطه مبدا در دست نداریم. در اینجا است که نقش اساسی سیگنال‌های تاکومتر مشخص می‌شود. شکل ۱۵ سیگنال فوق را به همراه سیگنال‌های تاکومتر - اخذ شده از بدنه موتور مورد آزمایش در حالت کوبش صفر- مجددا نشان می‌دهد.

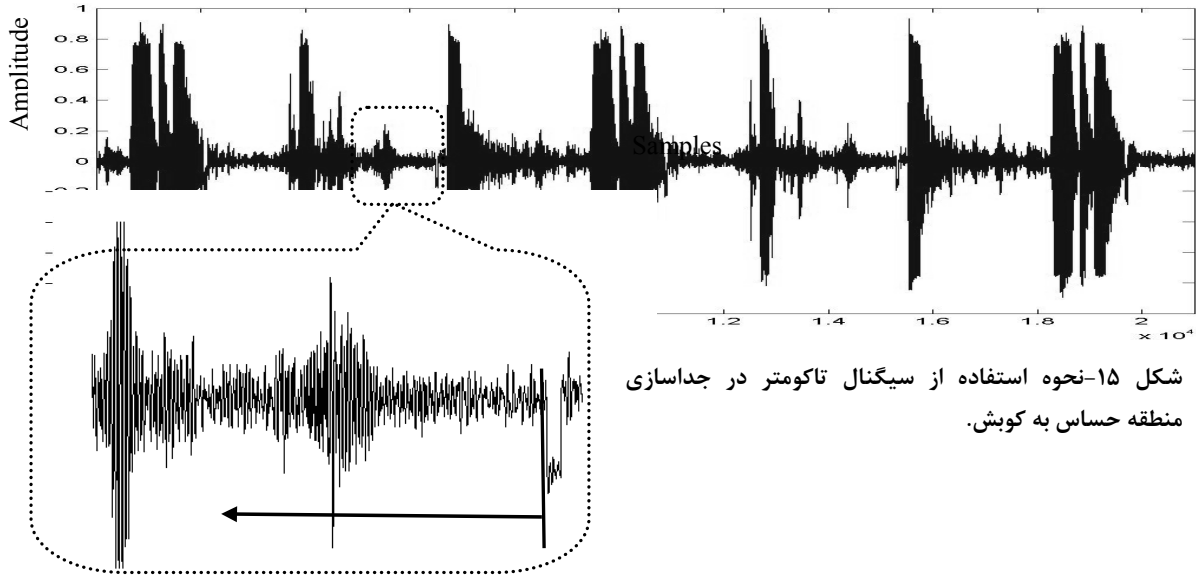
سیگنال تاکومتر، پالسی است که در تمامی نقاط مرگ پایین تکرار شده و دارای محل ثابتی در تمامی سیکل‌ها می‌باشد، در نتیجه تمامی ویژگی‌های نقطه مبدا را دارا است. بدین ترتیب همان طور که در شکل ۱۵ مشخص است، می‌توان در تمامی سیکل‌ها، سیگنال تاکومتر را به عنوان مبدا در نظر گرفته و با انتخاب تعداد مشخصی از داده های اخذ شده قبل از این پالس، تمامی این منطقه را از سیگنال‌های پیرامون جدا کرد.

پس از آگاهی از اهمیت استفاده از تاکومتر، دوباره به بحث اصلی این بخش یعنی چگونگی تمیز و تشخیص دادن دو سیگنال شکل‌های ۶ و ۷ برمی‌گردیم. همانطور که پیشتر گفته شد باید به تعداد کافی نمونه از منطقه حساس به کوبش دو سیگنال فوق جدا گردد. در این حالت حدود ۷۵٪ داده‌ها در گروه های ۳۰ تایی دسته بندی شده و بر اساس الگوی ARMA مدل سازی گردیدند.

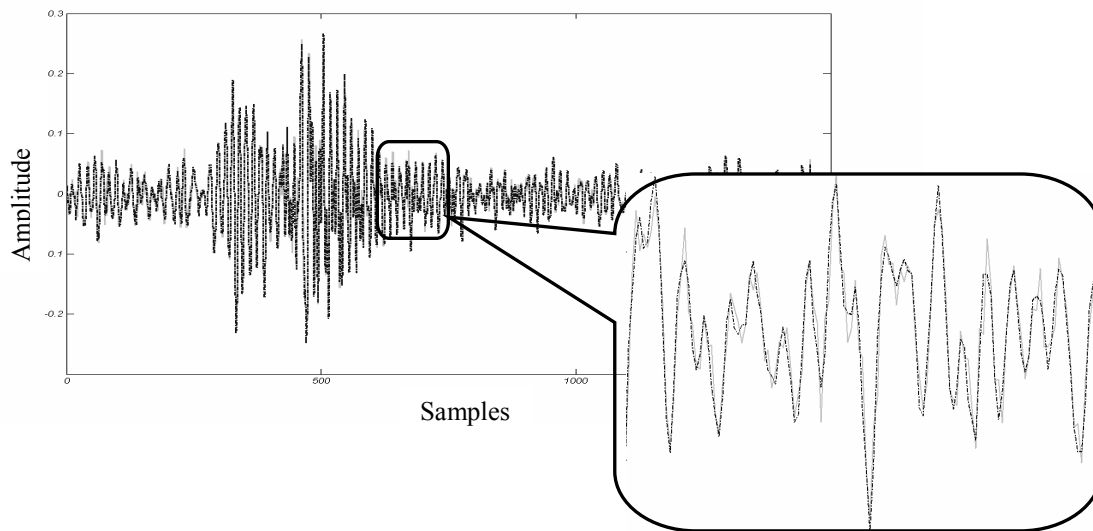
بقیه داده‌ها نیز برای اعتبار سنجی (validation) مدل مورد استفاده قرار گرفتند. نرم افزار استفاده شده جهت تخمین پارامتر های مدل ARMA در این تحقیق، بر اساس منابع [۹ و ۱۰] برنامه نویسی و تهیه شده است. در این نرم افزار مرتبه (order) مدل برابر ۵ برای قسمت Auto Regressive و ۵ برای قسمت Moving Average و با سعی و خطا به دست آمده است. نمونه ای از نمودارهای اعتبار سنجی این مدل در شکل ۱۶ مشخص می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، در این حالت سیگنال



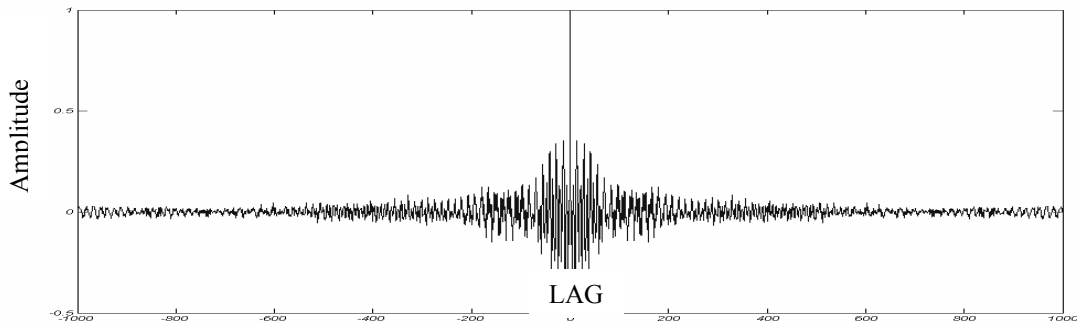
شبیه‌سازی شده رفتار کاملاً مشابهی با سیگنال اصلی دارد. نمودار همبستگی مدل در شکل ۱۷ نیز رفتار قابل قبولی از خود نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- نحوه استفاده از سیگنال تاکومتر در جداسازی منطقه حساس به کوبش.



شکل ۱۶- نمودار اعتبار سنجی مدل ARMA، خطوط پر سیگنال واقعی و خطوط چین سیگنال شبیه سازی شده می باشد.



شکل ۱۷- نمودار همبستگی مدل ARMA مرتبه ۵-۵

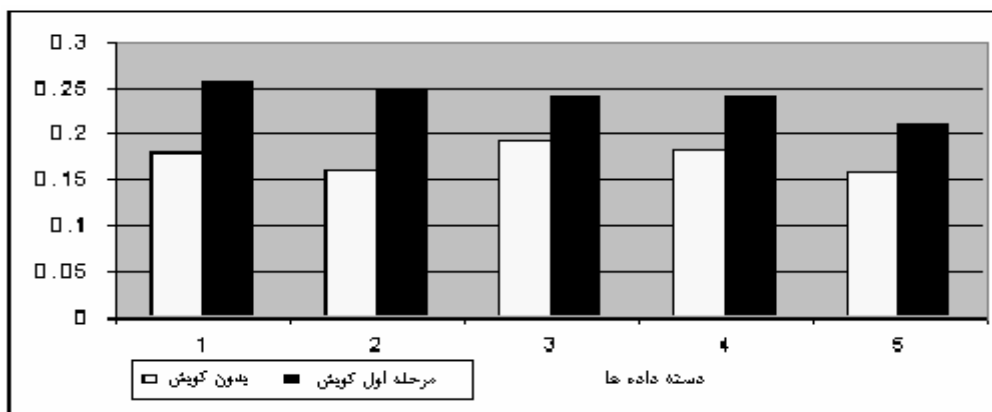
## ۵- نتایج حاصله

همانگونه که ذکر شد، داده های منطقه مورد نظر، در دسته های ۳۰ تایی به مدل پارامتریک ARMA منتقل می شوند. نمونه ای از پارامترهای مدل برای ۵ دسته داده های مختلف، در جدول (۱) درج شده است. با کمی دقت در نتایج حاصله ملاحظه می شود که رفتار پارامتر چهارم Moving Average به ازای شدتهای کوبشهای مختلف جالب توجه است.

جدول ۱- پارامترهای مختلف مدل ARMA به ازای ۵ دسته مختلف داده ها، همانگونه که ملاحظه می شود پارامتر چهارم به ازای شدتهای مختلف کوبش از خود حساسیت نشان می دهد.

پارامترهای A.R	دسته داده ها	دسته اول		دسته دوم		دسته سوم		دسته چهارم		دسته پنجم	
		بدون کوبش	مرحله اول	بدون کوبش	مرحله اول	بدون کوبش	مرحله اول	بدون کوبش	مرحله اول	بدون کوبش	مرحله اول
پارامترهای A.R	اول	-۱.۴۰۸	-۱.۴۹۲	-۱.۳۸۴	-۱.۳۷۲	-۱.۲۹۴	-۱.۴۷۶	-۱.۲۹۰	-۱.۳۸۹	۱.۲۶۷	۱.۳۸۳
	دوم	۰.۶۷۸	۰.۸۳۲	۰.۶۱۰	۰.۶۴۰	۰.۶۵۹	۰.۸۰۱	۰.۶۶۴	۰.۷۰۵	۰.۶۱۶	۰.۶۶۸
	سوم	-۰.۳۰۹	-۰.۴۴۵	-۰.۲۵۲	-۰.۳۸۶	-۰.۳۳۴	-۰.۴۰۳	-۰.۳۱۸	-۰.۴۴۰	-۰.۲۸۵	-۰.۳۲۴
	چهارم	۰.۴۸۰	۰.۵۶۹	۰.۴۵۹	۰.۴۷۷	۰.۵۲۲	۰.۵۴۲	۰.۴۹۹	۰.۶۳۱	۰.۴۸۳	۰.۵۸۴
	پنجم	-۰.۱۷۸	-۰.۲۵۷	-۰.۱۸۸	-۰.۲۷۸	۰.۱۹۹	-۰.۲۶۲	-۰.۲۰۳	-۰.۲۴۵	-۰.۱۹۴	-۰.۲۳۱
پارامترهای M.A	اول	-۰.۶۴۳	-۰.۷۱۲	-۰.۵۸۲	-۰.۶۳۱	-۰.۶۰۹	-۰.۷۰۲	-۰.۶۰۴	-۰.۶۴۲	-۰.۵۶۶	-۰.۶۳۹
	دوم	۰.۳۴۳	۰.۴۴۶	۰.۳۰۵	۰.۳۵۳	۰.۳۵۹	۰.۴۳۰	۰.۳۴۳	۰.۳۸۳	۰.۳۱۲	۰.۳۶۸
	سوم	-۰.۲۷۳	-۰.۳۰۵	-۰.۲۴۲	-۰.۲۷۵	-۰.۲۹۲	-۰.۲۸۰	-۰.۲۶۱	-۰.۳۱۹	-۰.۲۶۰	-۰.۲۶۶
	چهارم	۰.۱۷۹	۰.۲۵۶	۰.۱۶۱	۰.۲۵۰	۰.۱۹۲	۰.۲۴۲	۰.۱۸۱	۰.۲۴۱	۰.۱۵۹	۰.۲۱۲
	پنجم	-۰.۰۷۷	-۰.۰۹۷	-۰.۰۹۵	-۰.۰۹۵	۰.۰۹۷	-۰.۰۹۳	-۰.۰۹۴	-۰.۰۸۳	-۰.۰۹۸	-۰.۰۸۶

در شرایطی که در مورد سیگنال مرحله بدون کوبش مقدار این پارامتر، همواره کوچکتر از ۰.۲ می باشد، در مورد مرحله اول کوبش مقدار این پارامتر بزرگتر از ۰.۲ است. بدین ترتیب معیار مشخصی جهت تفکیک حالات بدون کوبش و با کوبش کم بدست می آید که همان هدف تحقیق حاضر است. شکل ۱۸ این مساله را بطور آشکارتری نمایان می سازد.



شکل ۱۸- رفتار پارامتر چهارم Moving Average به ازای شدتهای مختلف کوبش

## ۶- نتیجه گیری

هدف از تشخیص پدیده کوبش، جلوگیری از مصرف هزینه های اضافی، مقابله با تخریب تدریجی موتور و مبارزه با روند آلودگی محیط زیست می باشد. این موضوع ایجاب می کند که روشی در تشخیص کوبش مورد استفاده قرار گیرد که دارای کمترین هزینه و دقت تشخیص کافی نسبت به روشهای دیگر باشد. تحقیق حاضر با در نظر گرفتن این اصل کلی، روش ابتکاری و جدیدی در جهت تشخیص کوبش ارائه می کند. البته لازم به ذکر است که در گذشته نیز در این مورد فعالیتهای بسیاری انجام گرفته است، بدین ترتیب که پس از اخذ داده ها (مثلا داده های مربوط به شتاب بدنه موتور) با بکارگیری تحلیلهای خاص و رسم برخی نمودارها (همانند طیف فرکانسی و یا دیاگرام زمان-فرکانس) معیارهای قابل قبولی جهت تشخیص کوبش ارائه شده است، ولی ویژگی عمده روش این مقاله این است که وقوع یا عدم وقوع پدیده کوبش را به طریق بسیار ساده ای به تغییرات یک پارامتر خاص از مدل پارامتریک ARMA طراحی شده برای سیگنال شتاب بدنه موتور، مربوط کرده و به این ترتیب نیاز به حضور فرد متخصص جهت بررسی و تحلیل دیاگرامها و نتایج را در روشهای پیشین برطرف می کند. استفاده از دستگاه تاقومتر و ترکیب سیگنال آن با سیگنال شتاب بدنه نیز ابتکار دیگر این تحقیق است که باعث افزایش دقت و کارایی تحلیلهای شده و به نظر می رسد نتیجه این روش نسبت به روشهای قبل قابل اعتمادتر باشد. لازم به ذکر است که به علت جدید و ابتکاری بودن این روش، سعی شد در تمامی مراحل انجام تحقیق رفتار محافظه کارانه ای در پیش گرفته و ساده سازیهایی صورت بگیرد. برای رعایت این اصل نیز تمامی آزمایش ها بر روی موتور تک سیلندر و آزمایشگاهی صورت گرفته و تمامی نمونه برداریها تحت سرعت ثابت موتور انجام شد و حتی داده پردازیها نیز بصورت  $on\ line$  نبوده و پس از انجام آزمایش، ساعتهای زیادی صرف پردازش داده ها و رسیدن به نتیجه مطلوب شد.

## مراجع

- 1- Thomas.G, "Engine Knock Detection using Spectral Analysis Techniques with a TM320S DSP", Application report, Texas instrument, 1995.
- 2- Hudson, C., Gao, X., and Stone, R., "Knock Measurement for Fuel Evaluation in Spark Ignition Engines", Fuel, No.80, pp. 395-407, 2001.
- 3- Matz, Gerald, and Hlawatsch, Franz, " Time-Frequency Subspace Detectors and Application to Knock Detection", AEU Int.J.Electron., No.6, pp 1-6, 1999
- 4- Stankovic, Ljubisa, and Bohme, Johann F., "Time-Frequency Analysis of Multiple Resonances in Combustion Engine Signals", Journal of Signal processing, No 79 pp. 1528 1999.

- 5- Antoni, J., Daniere, J., and Guillet, f., "Effective Vibration Analysis of IC Engines using Cyclostationarity.Part I-A Methodology for Condition Monitoring",Journal of Sound and Vibration, 257(5), pp. 815-837, 2002.
- 6- Heinz, Heisler, "Vehicle and Engine Technology",2<sup>nd</sup> edition, Arnold publication, 1999
- 7- Ljung, Lenart, "System Identification :Theory for the Users, ",Prentice-Hall Inc, 1987
- 8- Soderstrom, Torsten and Stoica, Peter, " System Identification ", Ptrentice Hall International (UK) Ltd, 199 .
- 9- Ben Mrad, R., Fassois, S.D., and Levitte,J.A, " A Polynominal–Algebraic Method for Non-stationary TARMA Signal Analysis, part I the Method ",Journal of Signal processing 65 pp 1-19, 1998
- 10- Ben Mrad, R., "Non-Linear Systems Representation Using ARMAX Models with Time-Dependent Coefficients",Journal of Mechanical system and Signal processing, 16(5), pp 803-815, 2001