



Effects of water injection on a partially ceramic coated piston spark plug ignition engine

İdris Cesur*^{ID}, Hasan Ali Çelik^{ID}

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, Sakarya University of Applied Sciences, 54050, Sakarya, Türkiye

Highlights:

- Effects of partial ceramic coating on spark ignition engines
- Effects of spraying water on the intake manifold on spark ignition engines
- Effects of thermal barrier coating and water injection method on performance, combustion and exhaust emission values

Keywords:

- Thermal coating
- Water injection
- Engine performance
- Emissions

Article Info:

Research Article

Received: 06.03.2022

Accepted: 02.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1088702

Correspondence:

Author: İdris Cesur
e-mail: icesur@subu.edu.tr
phone: +90 264 616 0265

Graphical/Tabular Abstract

Combustion efficiency can be increased by reducing the amount of heat transfer with thermal coating methods in engines. However, increasing combustion chamber temperatures increase NO_x emissions while improving engine performance parameters. One of the most effective ways to reduce the increased NO_x emissions is to send water to the engine. This study used the partial coating method and the water injection method simultaneously. The piston's upper surface is partially covered with 0.5 mm thick MgOZrO₂ ceramic material. Water was sprayed into the intake manifold at 10%, 20% and 30% by mass. As a result of the experimental study, the effective power, specific fuel consumption and HC emissions were improved with the partial coating method. Spraying water into the engine reduces the increased NO_x emissions. According to the standard engine data, the reduction in HC emissions at 20% water spray rate was 33%, and the reduction rate in NO_x emissions was 20% at 30% water spray rate.

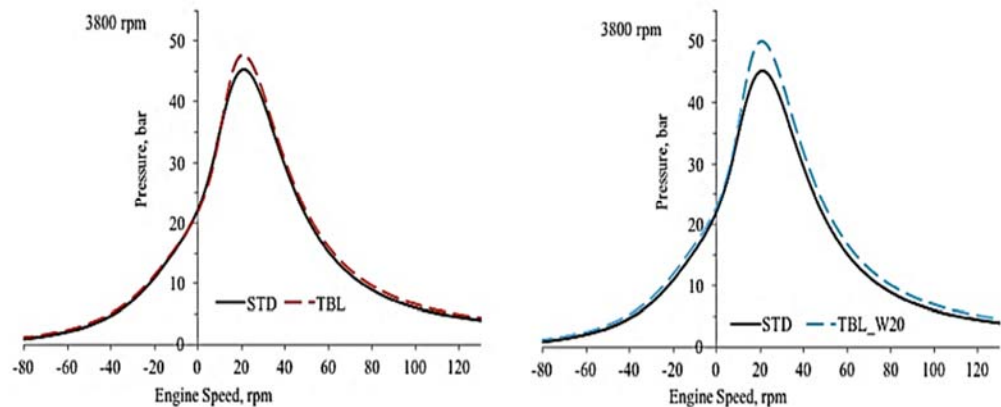


Figure A. In-cylinder pressure variations

Purpose: In this study, the thermal coating and water injection methods were applied simultaneously in engines, aiming to improve engine performance parameters and emission values.

Theory and Methods: A two-cylinder, four-stroke, electronic injection and a water-cooled engine were used in the experiments. In this study, firstly, the upper surface of the piston was covered with 0.5 mm thick MgO-ZrO₂ ceramic material. Secondly, water was injected into the intake manifold at 10%, 20% and 30% mass ratios of the instant fuel consumption of the coated piston engine.

Results: A partially insulated engine increases combustion efficiency due to increased combustion chamber temperatures. A 3.5% increase in effective power was found compared to the standard engine with a partially coated engine. In addition, there was a 27% reduction in HC emissions compared to the standard situation. However, increasing combustion chamber temperatures causes NO_x emissions to increase. The increased combustion chamber temperatures are reduced by sending water to the engine. At a 30% water spray rate, NO_x emissions decreased by 20% compared to the standard engine. The torque increase rate is 4.1% at a 20% water spray rate according to standard engine data (Figure A).

Conclusion: The thermal coating method improves to the combustion efficiency. Combustion chamber temperatures are reduced by injecting water into the intake manifold. In addition, water injection slightly improves performance parameters.



Kısmi seramik kaplı pistonlu buji ateşlemeli motora su enjeksiyonunun etkileri

İdris Cesur*^{ID}, Hasan Ali Çelik^{ID}

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 54050, Serdivan, Sakarya, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Buji ateşlemeli motorlarda kısmi seramik kaplamanın etkileri
- Buji ateşlemeli motorlarda emme manifolduna su püskürtülmesinin etkileri
- Termal bariyer kaplama ve su enjeksiyon yönteminin performans, yanma ve egzoz emisyon değerlerine etkileri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 06.03.2022

Kabul: 02.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1088702

Anahtar Kelimeler:

Termal kaplama,
su enjeksiyonu,
motor performans ve
emisyon

ÖZ

Yanma odasından dışarıya transfer edilen ısı miktarı yanma verimini direkt etkilemektedir. Isı transfer miktarının artması yanma verimini azaltmaktadır. Motorlarda termal kaplama yöntemleri ile ısı transfer miktarı azaltılarak yanma verimi artmaktadır. Fakat yanma odasının tamamının termal malzeme ile kaplanması buji ateşlemeli motorlarda vuruntu temayülünün ve emisyon değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Vuruntu temayülünün ve emisyon değerlerinin azaltılmasında en etkiyi yöntemlerinden biri de su enjeksiyon yöntemidir. Çalışmada, motor verimini arttırmak için piston üst yüzeyi ısı rezervi yüksek MgO-ZrO₂ seramik malzeme ile kısmi kaplanmıştır. Kaplamalı motora, anlık yakıt tüketiminin %10, %20 ve %30 kütle oranlarında emme manifolduna su püskürtülmüştür. İki yöntem aynı anda kullanılarak performans parametreleri ve egzoz emisyonlarında iyileşmeler elde edilmiştir. TBK (Termal bariyer kaplı) pistonlu motorda güç, tork, özgül yakıt sarfiyatı, efektif verim ve HC emisyonları iyileşirken NOx emisyonları artmaktadır. Emme manifolduna su enjeksiyonu yapılması durumunda ise motor performans parametrelerinde azalma olmaksızın artan NOx emisyonları azaltılmaktadır. %20 su püskürtme oranında standart motor verilerine göre, motor torku ve efektif güçte %4,1, özgül yakıt sarfiyatında, %3,8 ve efektif verimde %3,9 oranlarında iyileşmeler saptanmıştır. NOx emisyonlarında %30 su püskürtme oranında standart motor verilerine göre %20 oranında azalma elde edilmiştir. Ayrıca %20 su püskürtme oranında HC emisyonlarında %33'e varan oranlarda azalmalar saptanmıştır.

Effects of water injection on a partially ceramic coated piston spark plug ignition engine

HIGHLIGHTS

- Effects of partial ceramic coating on spark ignition engines
- Effects of spraying water on the intake manifold on spark ignition engines
- Effects of thermal barrier coating and water injection method on performance, combustion and exhaust emission values

Article Info

Research Article

Received: 06.03.2022

Accepted: 02.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1088702

Keywords:

Thermal coating,
water injection,
engine performance and
emissions

ABSTRACT

The amount of heat transferred from the combustion chamber directly affects the combustion efficiency. Increasing the amount of heat transfer reduces the combustion efficiency. With thermal coating methods in engines, the amount of heat transfer is reduced and the combustion efficiency is increased. However, covering the entire combustion chamber with thermal material causes an increase in the knocking tendency and worsening of emission values in spark ignition engines. With the water injection method, emission values can be reduced significantly without worsening engine performance parameters. In the study, the upper surface of the piston was partially covered with MgOZrO₂ ceramic material with high heat reserve in order to increase the engine efficiency. The coated engine was sprayed with water into the intake manifold at 10%, 20% and 30% by mass of instantaneous fuel consumption. By using the two methods at the same time, improvements in performance parameters and exhaust emissions have been achieved. In the TBL piston engine, power, torque, specific fuel consumption, effective efficiency and HC emissions improve, while NOx emissions increase. In the case of water injection into the intake manifold, the increased NOx emissions decrease without any deterioration in performance parameters. Improvements were found in engine torque and effective power by 4.1%, specific fuel consumption by 3.8% and effective efficiency by 3.9% at 20% water injection rate. Compared to standard engine data, a 20% reduction was achieved in NOx emissions at 30% water injection rate. In addition, reductions of up to 33% were detected in HC emissions at 20% water spraying rate.

1. Giriş (Introduction)

İçten yanmalı motorların enerji tasarrufu ve emisyon değerlerinin azaltılması, dünya çapında birçok bilim insanının ilgisini çekmektedir [1]. Araştırmacılar, motorların enerji tasarrufunu ve verimini artırmak için birçok araştırma yapmışlar ve yapmaya devam etmektedirler [2, 4]. Yapılan araştırmalar genellikle motorlarda alternatif yakıt kullanılmasıdır [3]. Buji ateşlemeli motorlarda verim artırıcı bir yöntem ise ısı rezervi yüksek malzemeler ile yanma odası elemanlarının kaplanmasıdır [4]. Benzinli motorlarda yanma odası elemanlarının tamamının seramik malzeme ile kaplanması yanma odasında oluşacak yüksek sıcaklıklar nedeniyle motorlarda vuruntu oluşumuna sebep olmaktadır [5]. Bu nedenle buji ateşlemeli motorlarda kısmi kaplama yöntemleri daha fazla kullanılmaktadır. Kısmi kaplama yöntemi ile motorda vuruntu oluşmadan ısı veriminde artmalar olmaktadır [6]. Literatüre baktığımızda; termal bariyer kaplamalı uygulamaları ile termik verimde artmalar, özgül yakıt sarfiyatı ve efektif güçte iyileşmeler ve özellikle HC emisyonlarında önemli oranlarda azalmalar tespit edilmiştir [5-7].

Kısmi kaplama yöntemi ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde; Saravanan vd., bir benzin motorunda portakal kabuğu yağı ve piston üzerini mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplanmasının performans, yanma ve emisyon üzerine etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda; %10 portakal kabuğu yağı kullanılması durumunda NOx emisyonlarında azalma olur iken efektif verim ve HC emisyonlarında artmalar saptamışlardır. Kaplamalı piston deneylerinde ise %10 biyodizel karışımı yakıtın standart duruma göre HC ve CO emisyonlarında sırasıyla %3,1 ve %3,6 oranlarda azalmalar saptamışlardır. Ayrıca kaplamalı pistonun efektif verim değeri standart motor verilene göre daha yüksek olduğunu saptamışlardır [8]. Sivakandhan vd., kaplamalı bir motorda ve sardalye yağı metil esteri ve nano parçacık katkılı dizel yakıtı ile çalışan bir dizel motorda performans ve emisyonlar üzerine etkilerini araştırmışlardır. Piston üzerine 0,5 mm kalınlığında kısmi stabilize edilmiş zirkonyum ile kaplamışlardır. Kaplamalı motorda yapılan deneyler sonucunda; standart yakıtta göre biyodizel ve nano parçacıklı katkılı yakıt ile ısı verim, ısı yayılım miktarı ve silindiri içi basınç değerleri artmıştır [9]. Bayat ve yıldız, bir dizel motorda farklı malzemeler ve kalınlıklarda piston üst yüzeyine kaplama yapılmasının etkilerini sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Araştırma sonucunda kaplamalı motorda basınç verilerine göre sürtünme kuvvetinde %15 oranlarda azalma olduğunu tespit etmişlerdir [10]. Babua vd., çam yağından elde edilmiş biyodizeli termal bariyer kaplı bir motorda performans, yanma ve egzoz emisyon değişimlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda kaplamalı ve biyodizel karışımı yakıtın standart yakıtlı motor verilerine göre efektif verimde %1,8 oranında artma saptamışlardır. Emisyonlarda ise CO ve HC emisyonlarında sırasıyla %8 ve %14 oranında azalma NO emisyonlarında ise %19 artma elde etmişlerdir [11]. Obulesa vd., tek silindirli ve iki zamanlı buji ateşlemeli motorda benzin metanol karışımları ve termal bariyer kaplamasının etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yakıtta %10, 20 ve 30 hacimsel oranda metanol karıştırmışlardır. Ayrıca piston üst yüzeyini 300 mm kalınlığında pirinç malzeme ile kaplamışlardır. Çalışma sonucunda; en iyi sonuç %20 metanol +benzin karışımı yakıtta elde edilmiştir. %20 karışımı yakıt ve kaplama ile efektif verim, özgül yakıt sarfiyatı ve mekanik verimde iyileşmiş bulmuşlardır [12]. İçten yanmalı motorlarda gerçekleştirilen seramik kaplama çalışmalarına bakıldığında ısı verim, performans, HC ve CO emisyonlarında iyileşmeler görülmüştür. Fakat artan yanma odası sıcaklıkları NOx emisyonlarını tetikleyerek artmasına neden olmaktadır [13-15]. Günümüzde NOx emisyonlarını azaltmak için kullanılan en etkili yöntem buhar-su enjeksiyon yöntemidir [16, 17]. Su-buhar çalışmaları gelecekte motor verimliliğini arttırmak ve emisyonları azaltmak için kullanılacak en

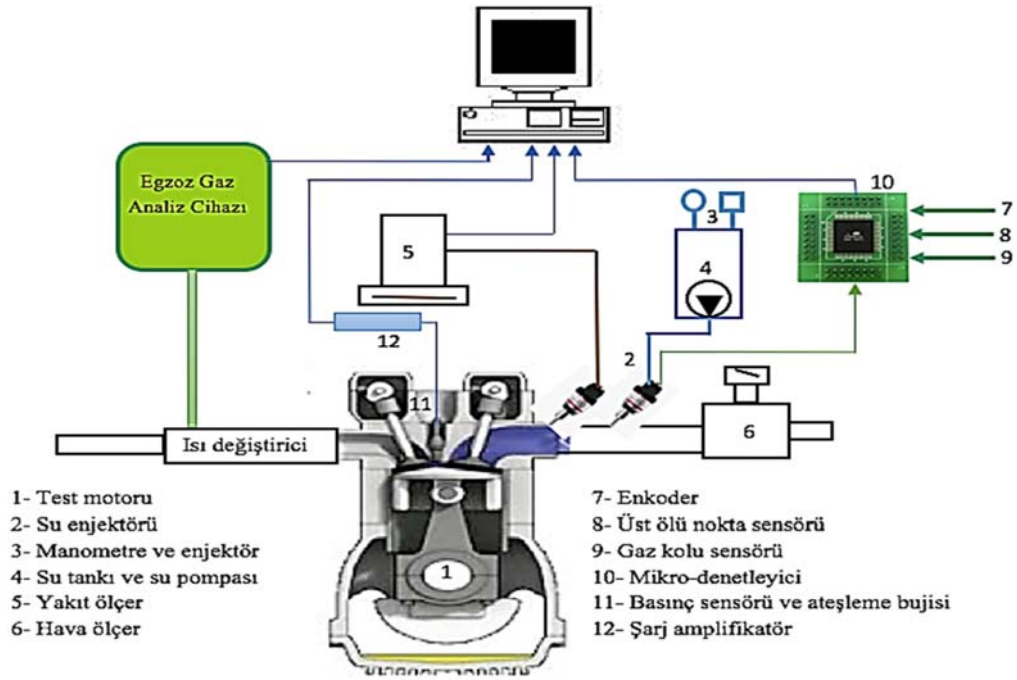
etkin yöntemlerden biri olacaktır [18, 19]. Su-buhar, termal etkileri nedeniyle silindiri içi sıcaklıkları düşürmesi, ve kimyasal etkileri nedeniyle yanma kalitesini iyileştirmektedir [20, 21].

Literatürdeki su-buhar çalışmaları incelendiğinde; Cesur, Y₂O₃ kısmi seramik kaplı motorda su enjeksiyonunun etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda su enjeksiyonu yöntemi ile efektif güç, özgül yakıt sarfiyatı, HC ve NOx emisyonlarında iyileşmeler elde etmiştir. Su oranını %20 olarak ayarlandığında motorun optimum performans değerleri elde etmiştir. Optimum koşullar altında efektif güç, özgül yakıt sarfiyatı HC ve NOx emisyonları sırasıyla %3,4, %6, %36 ve %25 oranında iyileşmektedir [22]. Cesur vd., buji ateşlemeli farklı oranlarda buhar enjeksiyonunu etkilerini deneysel ve teorik olarak araştırmışlardır. Motora yakıt sarfiyatının %10, %20 ve %30 oranlarında buhar enjektör etmişlerdir. Deneysel ve teorik sonuçlara göre optimum buhar oranı %20 olarak saptamışlardır. Deneysel ve teorik sonuçlara göre 2000 d/d'da özgül yakıt sarfiyatı, HC ve NOx emisyonlarında sırasıyla %6,4, %31,5 ve %17,7 oranlarında iyileşmeler saptamışlardır [23]. Hadia vd., [22] buhar enjeksiyonu ve sıkıştırma oranının HCCI motorlarda performans, yanma ve emisyonlar üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, buhar yakıtı oranı 0,1 ve sıkıştırma oranı 18 olan motorun, optimum koşullar altında özgül yakıt sarfiyatı, CO ve CO₂'nin sırasıyla %10, %40 ve %10 oranında azaldığını belirlemişlerdir. Hsueh vd. [25], buhar enjeksiyon yöntemi ile motorun performans ve emisyon değerlerini iyileştirmişlerdir. Motorun performansı, buhar miktarı, enjeksiyon zamanlaması, enjeksiyon basıncı ve sıcaklığa bağlı olduğunu saptamışlardır. Bununla birlikte, buhar silindire yalnızca emme zamanında göndermişlerdir [26-28]. Ayhan, biyodizel dizel karışımları ile çalışan bir dizel motora farklı oranlarda direkt su enjeksiyonu yapılmasının etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Deneysel çalışma sonucunda su enjeksiyonu ile NOx emisyonlarında %56'a varan oranlarda iyileşme sağlanmıştır [29]. Ayhan, çift yakıtlı LPG-dizel karışımları ile çalışan dizel motoruna farklı oranlarda su enjeksiyonu etkileri deneysel olarak araştırmıştır. %30 LPG ile çalışan dizel motoruna anlık yakıt tüketiminin %60, %80 ve %100 oranlarında su enjeksiyonu yapmıştır. Direkt su enjeksiyonu ile özgül yakıt sarfiyatı, duman koyuluğu, CO₂ ve NOx emisyonlarında azalmalar tespit etmiştir [30]. Ayrıca buhar enjeksiyon ile yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde; Parlak, Gonca, Kokkulunk, Cesur vd., motora farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda performans ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini deneysel ve teorik incelemişlerdir [31]. Çalışmalarda teorik ve deneysel çalışma sonucunda %20 buhar enjeksiyonu ile NOx emisyonlarında kayda değer oranda azalmalar ve motor performans parametrelerinde iyileşmeler saptamışlardır [31-34]. Ayrıca, Gonca vd., Miller çevrimi ile çalışan bize dizel motora farklı oranlarda buhar enjeksiyonunun etkilerini deneysel ve teorik incelemişlerdir. Çalışma sonucunda buhar enjeksiyonu ile motor performans parametrelerinde iyileşmeler olur iken NOx emisyonunda azalmalar tespit etmişlerdir [35, 36].

Bu çalışmada motorun verimini ve salınan emisyon değerlerinin iyileştirilmesi amacıyla kısmi kaplama yöntemi ve su enjeksiyon yöntemi aynı anda kullanılmıştır. Literatür incelendiğinde çoğunlukla bu yöntemler ayrı ayrı kullanılmaktadır. Bu çalışma ile termal bariyer ve su enjeksiyon yönteminin birlikte kullanılmasının etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Deneylerde, iki silindirli, elektronik enjeksiyonlu, doğal emişli, su soğutmalı, dört stroklu, piston çapı 72 mm, strok uzunluğu 62 mm ve sıkıştırma oranı 10,7/1 olan Lombardini marka buji ateşlemeli bir motor kullanılmıştır. Şekil 1'de deney düzeneğinin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Schematic view of the experimental setup)

Test motorunu tam ve kısmi yüklerde çalıştırmak için 20kW güç yutma kapasitesine sahip elektrikli bir dinamometre kullanılmıştır. Motorun ürettiği tork ve devir sayılarını belirleyebilmek için 0,01 kg hassasiyetli yük hücresi ve 1 devir hassasiyetli devir ölçer kullanılmıştır.

Sıcaklık ölçümü için NiCr-Ni tipi termokopul kullanılmıştır. Motorun soğutulması ve şartlandırılması amacıyla kapalı sistem soğutma sistemi tasarlanmış ve kullanılmıştır. Tüm deney şartlarında su sıcaklığı 85 °C'de olarak sabit tutulmuştur. Hava sarfiyatı ölçümü için hava sönmüleme tankı ve kütle hava akış ölçer kullanılmıştır. NOx, HC, CO ve CO₂ emisyon ölçümleri için MRU Delta 1600 L marka egzoz gaz analiz cihazı kullanılmıştır.

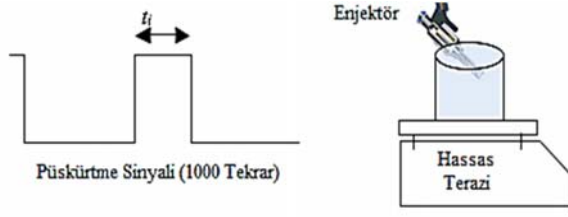
Motorun tükettiği yakıt sarfiyatı için kütleli yakıt ölçüm düzeneği kullanılmıştır. Hassas terazi 0,01g hassasiyetli 3 kg kapasitelidir. Yakıt ölçüm düzeneği motora uzak ve titreşimlerden etkilenmeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Bu sayede kararlı bir ölçüm sağlanmıştır. Yakıt tüketiminin hassas bir şekilde ölçülmesi için elektronik kontrollü bir ölçüm düzeneği tasarlanmıştır. Yakıt ölçümünde kullanılan terazi bilgisayara RS 232 bağlantısı ile haberleşmektedir. Tasarlanan bir program ile deney esnasında anlık yakıt tüketimi belirlenmektedir. Tasarlanan program sayesinde deneysel çalışmada insandan kaynaklanan hatalar minimize edilmiştir.

Silindir içi basınç ölçümünde AVL marka GH13Z-24 model buji ateşlemeli bir piezo-elektrik sensör ve Kistler 5011B model şarj amplifikatör kullanılmıştır. Veri aktarımı ve analizi dört kanallı SMETEC marka kanal başına 1Mbyte veri aktarma hızına sahip Combi Combustion Indication System kullanılmıştır. Silindir basıncı ölçümünde açılma konumu belirlemek için Heidenhain ROT426 model 3600 pals/tur özelliğine sahip bir enkoder sisteme bağlanmıştır. Deney verileri kaydedilmeden önce motorun kararlı hale gelmesi için egzoz sıcaklığının sabitlenmesi beklenmiştir. Motor kararlı hale geldikten sonra her bir devir için motordan 1000 çevrimlik basınç verisi alınmıştır. Alınan 1000 çevrimlik basınç verisinin ortalaması alınarak basınç krank mili açısı diyagramları çizilmiştir. Motor

testlerinden elde edilen basınç verilerine göre silindir içi sıcaklık değerleri hesaplanmıştır.

Pistonun üst kısmı, 8 mm genişliğinde ve 0,5 mm kalınlığında MgO-ZrO₂ (TBK) seramik malzeme ile kaplanmıştır. Piston üzerine kaplamak için atmosferik plazma sprej kaplama yöntemi kullanılmıştır. Plazma gazı için ise % H₂ karışımı kullanılmıştır. Piston kaplaması, 0,20 mm kalınlığında bir NiCrAl bağ tabakası üzerinde 0,30 mm kalınlığında bir MgO-ZrO₂ tabakasından oluşmaktadır.

Elektronik kontrollü su püskürtme sistemi, hassas miktarlarda ve zamanlarda emme manifolduna suyu püskürtmek için kullanılmıştır. Krank açısına bağlı olarak, enjeksiyon başlangıcı ve su enjeksiyon süresi boyunca enjektörün çalışmasını kontrol etmek için bir elektronik kontrol ünitesi (ECU) kullanılmıştır. Çalışma öncesi ilk olarak sistemde kullanılacak enjektörün enjektör parametreleri belirlenmiştir. Enjektörlerin çalışma prensibine göre; belirli basınç altında bir gecikme yaparak açılmaktadır. İstenilen miktarda suyun püskürtülebilmesi için enjektör parametrelerin belirlenmesi önemlidir. Bu nedenle deneysel çalışmalardan önce bir enjektör test sistemi kurulmuş bir dizi deneyler yapılarak enjektör parametreleri belirlenmiştir (Şekil 2). Enjektörün açık kalma süresi enjektör voltajına ve su basıncına göre değişmektedir. Su enjeksiyonu için 3 bara ayarlanmış basınç pompası ve regülatör ile ayarlanmıştır. 24 Volt için elde edilen enjeksiyon gecikme süresi 0,6 ms'dir. Şekil 3'de sinyal süresine karşılık gelen enjeksiyon miktarı görülmektedir. Şekil incelendiğinde meydana gelen açılma gecikmesi görülmektedir. Elektronik kontrol ünitesi, enkoder aracılığıyla kam mili konumunu ve motor devrini belirlemekte olup üst ölü nokta sensörü ile zamanlar tayin edilmektedir. Su enjektörleri motor emme supabının tama arkasına püskürtme yapacak şekilde emme manifolduna konumlandırılmıştır. Su, motorun tüketmiş olduğu yakıt sarfiyatının %10, %20 ve %30 kütleli oranlarında emme supabı açık konumunda ve piston üst ölü noktayı 5 KMA geçtikten sonra püskürtülmeye başlanmış, piston alt ölü noktaya gelmeden bitmesi sağlanacak şekilde enjektör seçimi yapılmıştır [37].



Şekil 2. Enjeksiyon sinyali ve püskürtülen yakıt miktarı ölçümü (Injection signal and injection fuel quantity measurement)

Standart, kaplamalı ve su enjeksiyon deneyleri deney sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla motor aynı koşullar altında çalıştırılmıştır (ateşleme avansı, enjeksiyon basıncı, giriş sıcaklığı ve basınç ve hava/yakıt oranı). Deneyler sabit ateşleme avansında gerçekleştirilmiştir. Motorun ateşleme avansı 10° krank mili açısı (KMA)'dır. Motora farklı oranlarda su enjeksiyonu yapılması durumunda motor çalışma parametrelerinde herhangi bir değişim yapılmamıştır. Ayrıca su emme manifolduna püskürtüldüğü için motorun yakıt sarfiyatında bir değişim olmamaktadır. Su motora üç farklı oranlarda gönderilmiştir. Bunlar %10 (S10), %20 (S20) ve %30 (S30) oranlarıdır. Deneyler gaz keleşinin tam açık olduğu konum ve 1400, 1800, 2200, 2600, 3000, 3400 ve 3800 d/d motor hızlarında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, her test noktası için 5 tekrarlı ölçümden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak elde edilmiştir. Ölçüm değerlerin ve ölçü aletlerinden kaynaklanan hataların oluşturduğu belirsizlik değerleri belirsizlik analizi ile hesaplanmıştır ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sistematik ve rastgele belirsizlikler (Systematic and random uncertainties)

Parametreler	Sistematik belirsizlikler, \pm
Yük, N	0,1
Devir, d/d	1,0
Zaman, s	0,1
Sıcaklık, $^\circ\text{C}$	1
Yakıt tüketimi, g	0,01
NOx, ppm	Ölçülen değerin %5
CO, %	Ölçülen değerin %5
HC, ppm	Ölçülen değerin %5
CO ₂ , %	Ölçülen değerin %5
Parametreler	Toplam Belirsizlik, %
Özgül Yakıt sarfiyatı, g/kWh	1,2
Moment, Nm	1,0
Efektif Verim, %	1,3
Efektif güç, kW	1,0

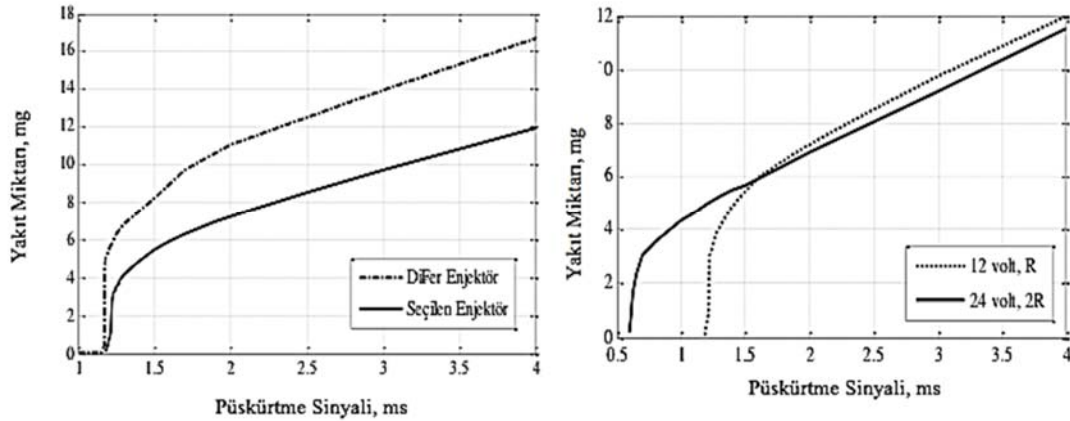
3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

İçten yanmalı motorlarda, yanma odası sıcaklıklarının artırılması ısı verimi arttırmaktadır. Yanma odası sıcaklıklarının artırılmasının bir yolu da yanma odası elemanlarının ısı kapasitesi yüksek malzemeler ile kaplanmasıdır. Bu yöntem ile yanma verimi artırılmaktadır. Fakat buji ateşlemeli motorlarda yanma odasının tamamının kaplanması vuruş oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada pistonun üst yüzeyi kısmi olarak termal malzeme ile kaplanmıştır. Pistonun MgO-ZrO₂ malzemesi ile kaplanması durumunda elde edilen motor torku değerleri ve yüzdesel değişim miktarlarını gösteren grafikler Şekil 4'de verilmiştir. Kaplamalı motorda standart motor verilene göre tüm devirlerde motor torkunda artmalar görülmüştür. Momentteki maksimum artma miktarı 2600 d/d'da %3,5 olarak tespit edilmiştir. STD duruma göre kaplamalı motorun tork değerlerini artmasının nedeni seramik kaplama sayesinde silindirin içi ısı kayıplarının azalması ve alev sönmelerinin önüne geçilerek yakıtın daha fazla yanması sağlandığından elde edilen enerji miktarı artmasıdır.

Kaplamalı motora farklı oranlarda su püskürtülmesi durumunda motor torku değerleri ve değişim miktarlarını gösteren grafik Şekil 4'de verilmiştir. TBK pistonlu motora farklı oranlarda emme manifolduna su püskürtülmesi durumunda en iyi sonuç %20 su püskürtme oranında elde edilmiştir. %20 su enjeksiyonu yapılması durumunda motor momentinde tüm devir aralıklarında artmalar saptanmıştır. %20 su püskürtülmesi sonucu motor momentindeki maksimum artış 2600 d/d'da %4,1'dir. Motor torkunda, ölçümlerden kaynaklanan hata oranı miktarı %0,7'dir. Su enjeksiyonu ile elde edilen artış oranı hata oranından fazla olduğu için artış oranı anlamlı bir değerdir.

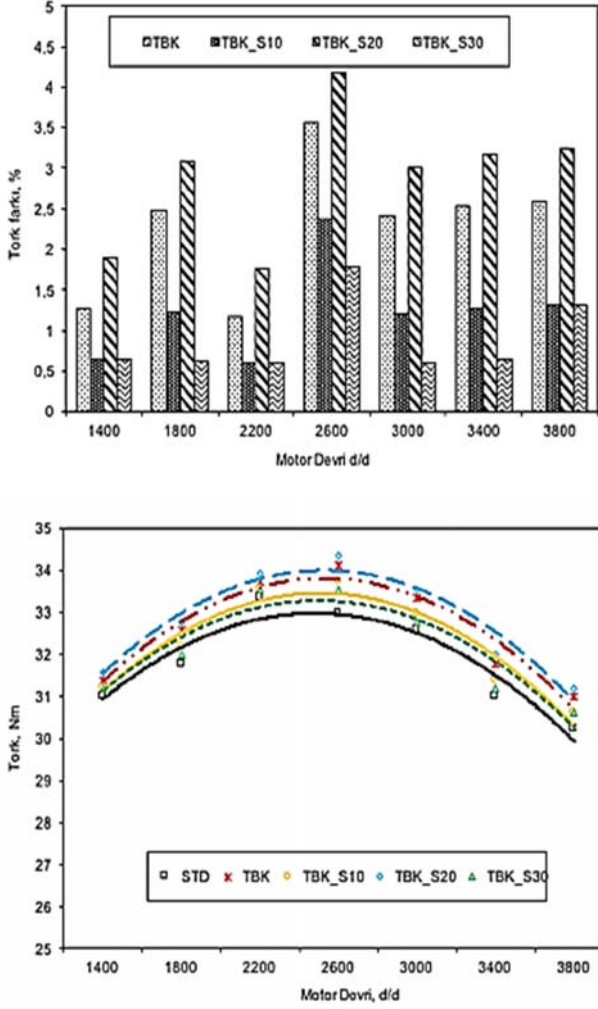
Su enjeksiyon yapılması durumunda motor momentindeki artışların nedenleri; suyun yanma odasına girmesi ile alınan dolguda ilave bir entalpi girişi olmasıdır. Ayrıca suyun yüzey gerilmesinin havaya göre daha fazla olması yakıtın yanma işlemi öncesi daha küçük parçalara ayrılarak hava ile daha homojen karışım oluşmasında neden olmaktadır. Buna ilave olarak suyun yüzey gerilmesine bağlı olarak yanma esnasındaki mikro patlamalar ile yanma hızının artmasına sebep olmaktadır. Artan yanma hızı, yanma verimini olumlu yönde etkilemektedir. Bu olumlu etkiler motor performansında kötüleşme olmadan bir miktar iyileşmelere neden olmaktadır.

Şekil 5'de TBK pistonlu motor ve TBK pistonlu motora su püskürtülmesi durumunda elde edilen efektif güç değerleri ve yüzdesel değişim miktarları görülmektedir. Grafik incelendiğinde



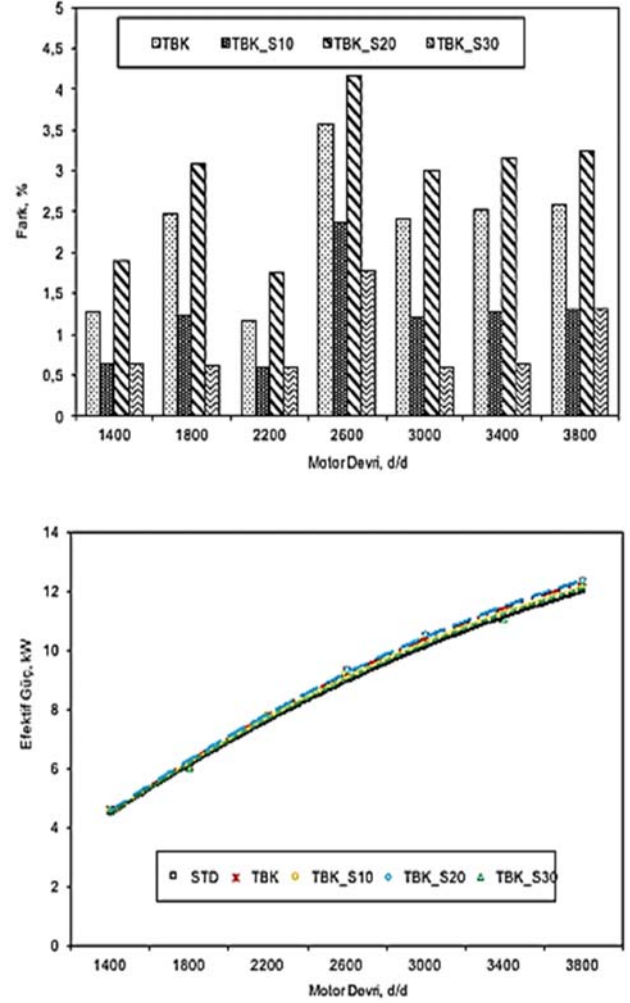
Şekil 3. Farklı enjektörler için elde edilen enjektör parametreleri (Injector parameters obtained for different injectors)

TBK pistonlu motorun güç değerleri standart motor verilerine göre tüm devirlerde artmalar gözlemlenmiştir. TBK pistonlu motora su püskürtülmesi durumunda en yüksek efektif güç değeri %20 su püskürtme oranında elde edilmiştir. %20 su püskürtme oranı için efektif güçteki maksimum artış oranı %3,5'dir.



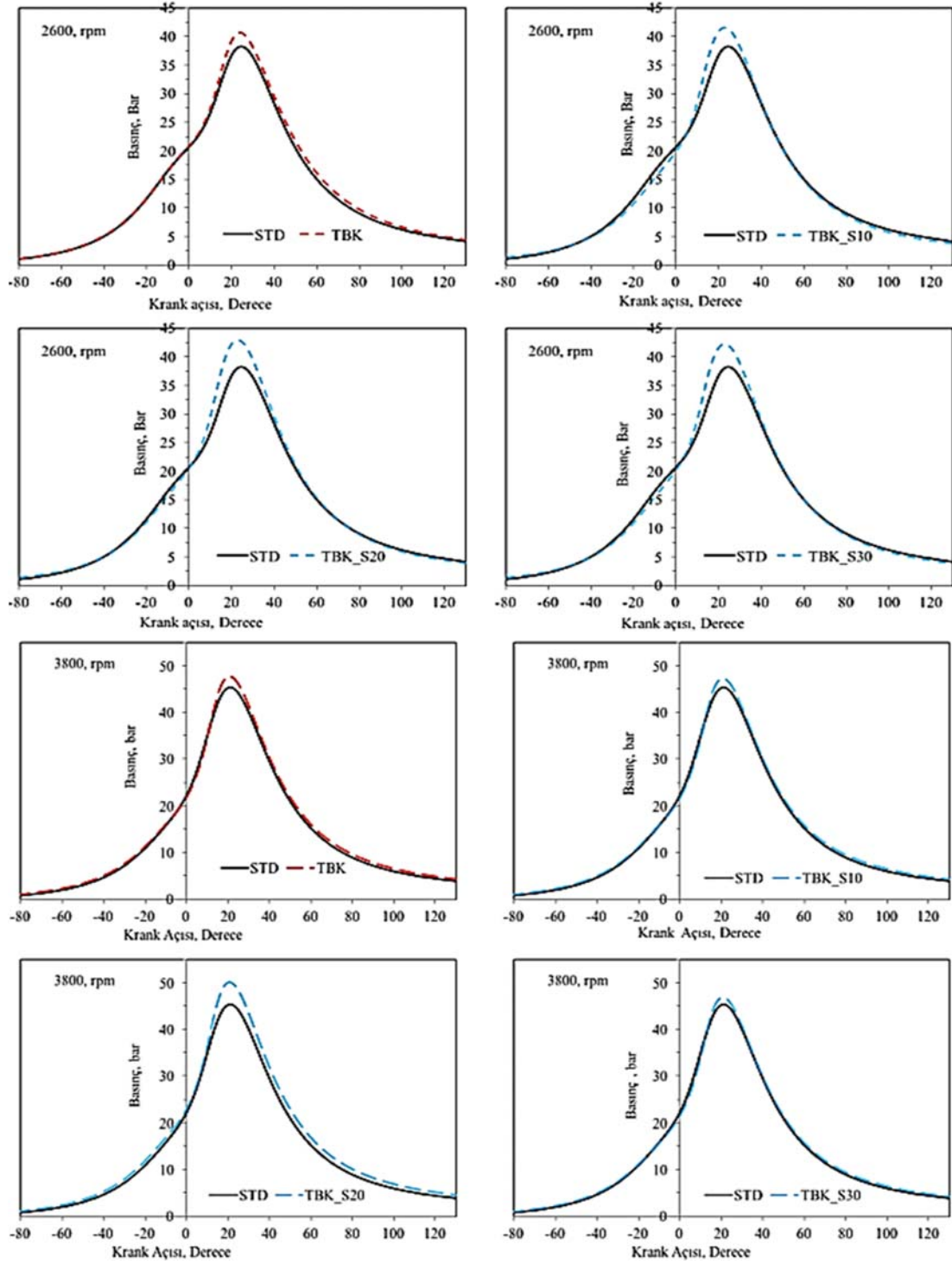
Şekil 4. Motor devrine bağlı olarak motor torku değerleri ve yüzdesel değişim miktarları
(Engine torque values and percentage changes depending on engine speed)

Şekil 6'de tam yük şartlarında maksimum moment (2600 d/d) ve maksimum gücün (3800 d/d) olduğu devirlerinde ölçülen silindir içi basınç değerlerini gösteren grafikler verilmiştir. Basınç grafiği incelendiğinde STD duruma göre TBK pistonlu motorun basınç değerleri artmaktadır. Standart duruma göre silindir içi basınç değerlerinin artmasının nedeni, yanma odasından dışarıya daha az ısı atılmasıdır. Bu etki yanma odası sıcaklıklarını artırarak yanma odası basıncını arttırmasına neden olmaktadır. TBK pistonlu motora farklı oranlarda su püskürtülmesi durumunda ise standart motor verilerine göre silindir içi basınç değerlerinde artmalar görülmüştür. Artmaların nedeni, motor çevriminde sıkıştırma sırasında daha az iş tükettiği ve genişleme zamanında ise daha yüksek iş üretmesinden kaynaklanmaktadır. Motorlarda pompalama kayıplarının azalması ile daha fazla iş üretmesi yanma odasında oluşan pik basıncın artmasına neden olmaktadır. Ayrıca emme manifolduna gönderilen su sıkıştırma esnasında daha iyi hava-yakıt karışımı oluşmasına ve yanma hızının artması neden olmaktadır.



Şekil 5. Motor devrine bağlı olarak efektif güç değerleri ve yüzdesel değişim miktarları
(Effective power values and percentage changes depending on engine speed)

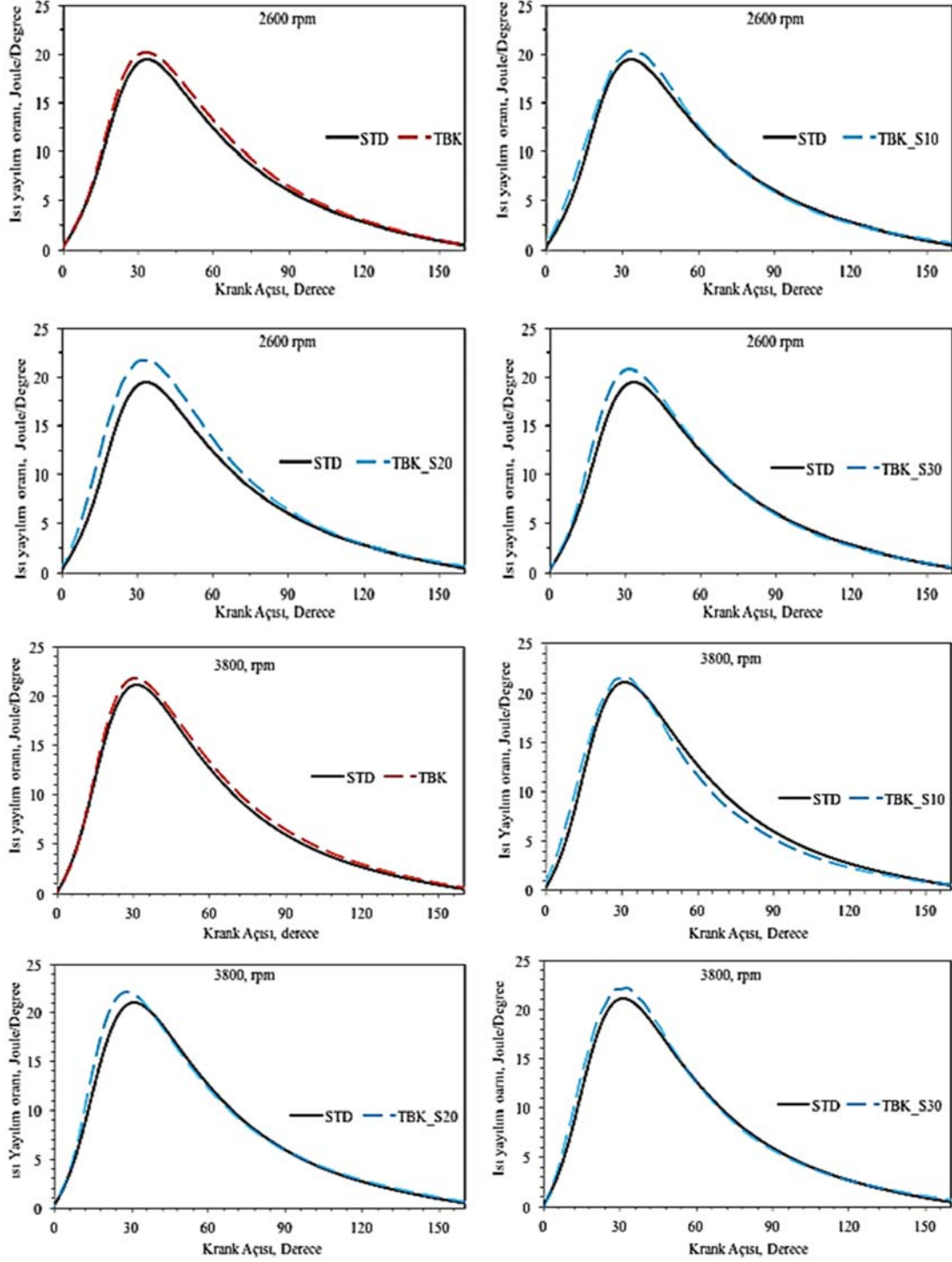
Şekil 7'de STD, TBK motor ve TBK pistonlu motora farklı oranlarda su püskürtülmesi durumunda elde edilen ısı yayılım grafikleri görülmektedir. Şekil incelendiğinde STD duruma göre motorda TBK pistonlu motora ısı yayılım değerinde artmalar görülmüştür. Isı yayılım oranları incelendiğinde, standart duruma göre TBK piston kullanımında daha fazla enerjinin açığa çıktığı görülmektedir. Özellikle alev sönmeye bölgelerinde meydana gelen eksik yanma TBK piston kullanımında iyileştiği ve ısı transfer miktarının azaldığı açıkça görülmektedir. TBK motora farklı oranlarda su püskürtülmesi durumunda ise ısı yayılım oranında artmalar görülmüştür. Artmaların nedeni; suyun benzin yakıtına göre karışım daha yüksek yanma hızıdır. Bu nedenle daha fazla ısı açığa çıkmaktadır. Yakıt-hava karışımının daha iyi karışmasını sağlayan yüksek yanma hızı, yanma reaksiyonlarının daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamaktadır. Şekil 8'de TBK pistonlu motor ve TBK pistonlu motora farklı oranlarda su püskürtülmesi durumunda özgül yakıt sarfiyatı değerleri ve yüzdesel değişim oranları görülmektedir. Şekil incelendiğinde, TBK pistonlu motorda tüm motor devirlerinde özgül yakıt sarfiyatı değerlerinde azalmalar görülmüştür. Maksimum azalma 2600 d/d' da %3,3 olarak saptanmıştır. Azalmaların nedeni; yanmanın iyileşmesi ve yakıt dönüşüm veriminin artmasıdır. TBK pistonlu motora farklı oranlarda su püskürtülmesi durumunda özgül yakıt sarfiyatında iyileşmeler saptanmıştır. En iyi sonuç %20 su püskürtme oranında elde edilmiştir.



Şekil 6. STD, TBK ve TBK pistonlu motora su enjekte edilmesi durumunda silindir içi basınç değerleri (In-cylinder pressure values when water is injected into the STD, TBK and TBK piston engine)

%20 su püskürtme oranında, STD duruma göre özgül yakıt sarfiyatındaki maksimum azalma oranı 2600 d/d'da %3,8 olduğu tespit edilmiştir. Özgül yakıt sarfiyatındaki (ÖYS) hata oranı %1,2'dir. Su enjeksiyonu ile elde edilen artış oranı hata oranından fazla olduğu için artış oranı anlamlı bir değerdir. Özgül yakıt sarfiyatındaki azalmaların nedeni; suyun, yanma hızının yüksek olması yanma reaksiyonlarının daha kısa zamanda tamamlanmasına ve

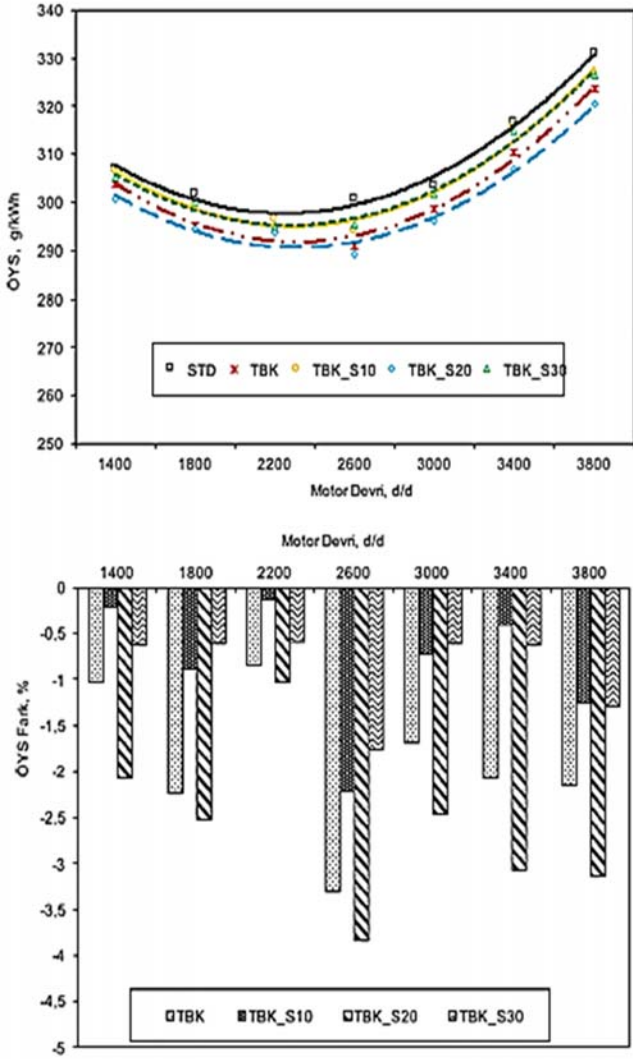
buna bağlı olarak yakıt dönüşüm veriminin artması neden olmaktadır. Bu etkiye ilave olarak motora ilave entalpi girişi de motor torkunda artmalara neden olmaktadır. Ayrıca suyun daha iyi karışım sağlaması yanma verimini iyileştirmektedir. Bu olumlu etkiler standart durumu göre özgül yakıt sarfiyatında iyileşmelere neden olmaktadır. Şekil 9'da TBK pistonlu motor ve TBK pistonlu motora farklı oranlarda su püskürtülmesi durumunda efektif verim değerleri ve yüzdesel değişim



Şekil 7. STD, TBK ve TBK pistonlu motora su enjekte edilmesi durumunda ısı yayılım miktarları
(Heat release amounts in the case of injecting water into the STD, TBK and TBK piston engine)

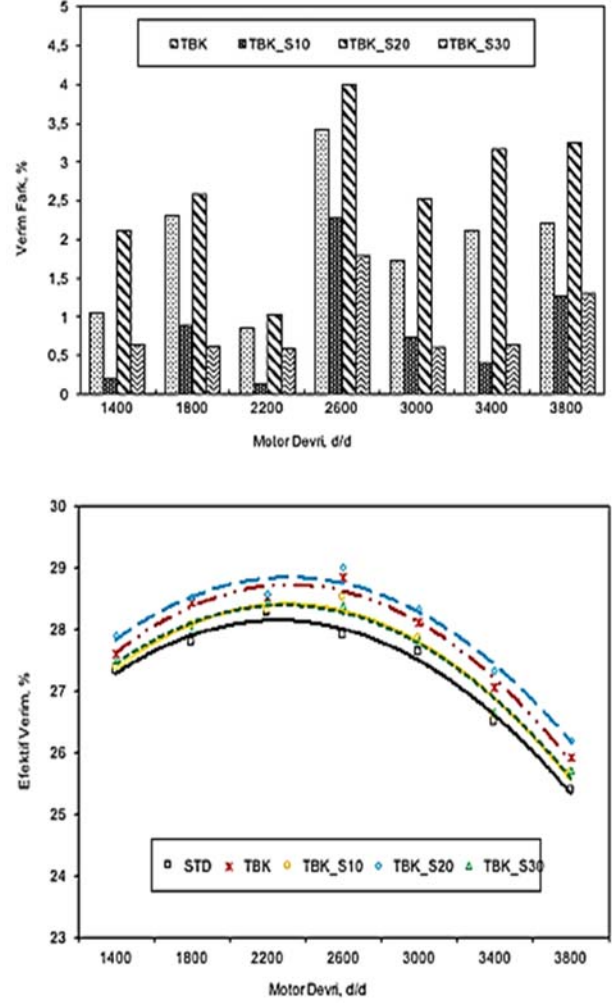
oranları görülmektedir. TBK pistonlu motor verileri standart motor verilerine göre efektif verimde tüm devirlerinde artmalar meydana gelmiştir. Efektif verimdeki maksimum artış miktarı 2600 d/d'da %3,4'dır. Emme manifolduna farklı oranlarda su püskürtülmesi durumunda efektif verimde iyileşmeler gözlemlenmiştir. Efektif verimdeki maksimum artış miktarı %20 su püskürtme oranında elde edilmiştir. S20 püskürtme oranı için maksimum artma oranı 2600 d/d'da 3,9'dır. Efektif verimdeki hata oranı %1,3'dir. Su enjeksiyonu

ile elde edilen artış oranı hata oranından fazla olduğu için artış oranı anlamlı bir değerdir. Efektif verim motorun tükettiği yakıt miktarının ne kadarının faydalı işe dönüştüğüne bağlıdır. Termal bariyer kaplama ile ısı transferinin azalması yama verimi ve yakıt dönüşüm verimini arttırmaktadır. Su enjeksiyonu yapılması durumunda ise suyun yanma esnasında mikro patlamalar sayesinde yakıt hava karışımının iyileşmesi yanma verimini iyileştirmektedir. Bu olumlu etki efektif verimde artmalara neden olmaktadır.



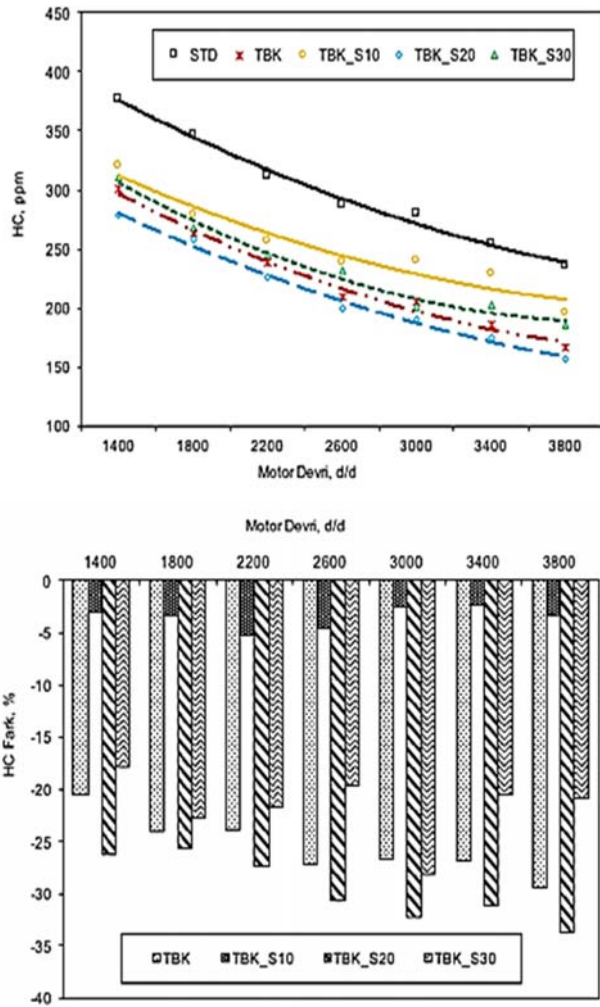
Şekil 8. Motor devrine bağlı olarak özgül yakıt sarfiyatı değerleri ve yüzdesel değişim miktarları (Specific fuel consumption values and percentage changes depending on engine speed)

Şekil 10'da TBK pistonlu motor ve TBK pistonlu motora su enjeksiyon yapılması durumunda HC emisyon değerleri ve yüzdesel değişim oranları görülmektedir. STD duruma göre TBK pistonlu motorda HC emisyonlarında tüm devirlerinde azalmalar tespit edilmiştir. HC emisyonundaki maksimum azalış miktarı 2600 d/d'da %27'dir. Kaplama yöntemi ile HC emisyonlarının azalmanın nedeni, piston üzerine yapılan seramik kaplama ile silindir cidarlarına yakın yüzeylerde oluşturulan ısı rezervi ile yanma odası sıcaklıklarının artması ve buna bağlı olarak oksidasyon reaksiyonları hızlanmaktadır. Artan reaksiyon hızları HC emisyonlarını azaltmaktadır. TBK pistonlu motorda farklı oranlarda su gönderilmesi durumunda tüm püskürtme oranlarında HC emisyonlarında iyileşmeler tespit edilmiştir. HC emisyonlarındaki en fazla azalma miktarı %20 su enjeksiyonunun oranında elde edilmiştir. HC emisyonlarındaki maksimum azalış miktarı, 3800 d/d'da %33 olarak saptanmıştır. Suyun yüzey gerilmesinin yüksek olması ile yakıt-hava karışımlarının daha iyi olmasına neden olmaktadır. Ayrıca yanma hızının yüksek olması yanma reaksiyonlarının daha kısa zamanda tamamlanmasına sebep olmaktadır. Bu olumlu etkiler yanma verimini iyileştirerek HC emisyonlarında azalmalara neden olmaktadır.



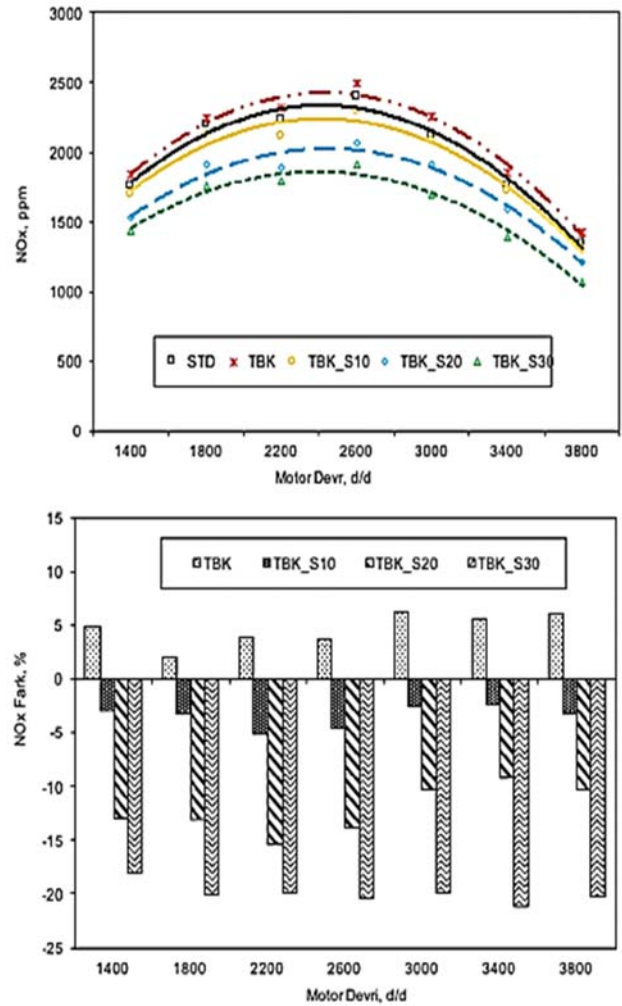
Şekil 9. Motor devrine bağlı olarak efektif verim değerleri ve yüzdesel değişim miktarları (Effective efficiency values and percentage changes depending on engine speed)

Şekil 11'de TBK pistonlu motor ve TBK pistonlu motora farklı oranlarda su püskürtülmesi durumunda motordan salınan NOx emisyon değerleri ve yüzdesel değişim oranları görülmektedir. Şekil incelendiğinde motorda TBK pistonlu motordan salınan NOx emisyon değerleri standart motor verilene göre tüm devirlerde artmalar tespit edilmiştir. NOx emisyonlarındaki maksimum artış oranı 3000 d/d'da %6'dır. NOx emisyonlarındaki artmaların nedeni piston üst yüzeyine seramik malzeme kaplanması yanma odası sıcaklıklarının artmasına yol açmaktadır. NOx emisyonlarının azaltılması için TBK pistonlu motorun emme manifolduna farklı oranlarda su püskürtülmüştür. NOx emisyonlarında maksimum azalma miktarı %30 su püskürtme oranında elde edilmiştir. %30 su püskürtme oranı için maksimum azalma miktarı 2600 d/d'da %20'dir. NOx emisyonlarının oluşumunu tetikleyen en önemli neden yüksek sıcaklıklardır. Suyun özgül ısı yaklaşık olarak havanın özgül ısısında dört kat daha fazladır. Bu durumda yanma odasına gönderilen su, yanma ürünlerinin standart duruma göre ısı kapasitelerinin artmasına neden olmaktadır. Yanma odasında artan ısı kapasiteleri silindir içi maksimum yanma sıcaklıklarının düşmesine neden olmaktadır. Yanma sonu sıcaklıklarının azalması NOx oluşum hızının azalmasına sebep olmaktadır. Bu olumlu etki nedeniyle NOx emisyonlarında kayda değer oranlarda azalmalara neden olmaktadır.



Şekil 10. Motor devrine bağlı olarak HC emisyon değerleri ve yüzdesel değişim miktarları (HC emission values and percentage changes depending on engine speed)

Şekil 12’de tam yük şartlarında maksimum moment (2600 d/d) ve maksimum gücün (3800 d/d) verdiği motor devirleri için ölçülen silindir içi basınç değerlerini göre hesaplanan silindir içi sıcaklık değerleri görülmektedir. TBK pistonlu motordan elde edilen silindir içi sıcaklık değerleri standart duruma göre artmalar saptanmıştır. Artmaların nedeni ısı rezervi yüksek seramik malzeme ile yanma odası sıcaklıklarının artmasıdır. Motora su enjeksiyonu yapılması durumunda NOx emisyonlarında en düşük değer %30 su püskürtme oranında elde edilmiştir. NOx emisyonları silindir içerisinde oluşan yüksek sıcaklıklara ve yanma süresine bağlıdır. Şekil 12 incelendiğinde, yanma odası sıcaklıkları düştüğü görülmektedir. Suyun, buharlaşma ısısının fazla olması ve artan kısmi oksijen miktarı pik yanma sıcaklığını azaltmaktadır. Böylece NOx oluşum hızı azalmaktadır. Şekil 13’de TBK pistonlu motor ve TBK pistonlu motora su püskürtülmesi durumunda CO emisyon değerlerini gösteren grafik verilmiştir. TBK pistonlu motor ve TBK pistonlu motora su enjeksiyonu yapılması durumunda tüm devirlerde standart motor verilerine göre CO emisyonlarında iyileşmeler elde edilmiştir. CO emisyonlarında iyileşmelerin nedeni seramik malzeme ile yanma odası sıcaklıklarının artması yanma reaksiyon hızlarının artmasına neden olmaktadır. Artan yanma hızı yanma verimini arttırmaktadır. Su enjeksiyonu durumunda ise daha iyi yakıt hava karışımı elde edilmesi yanma veriminin iyileştirmektedir.



Şekil 11. Motor devrine bağlı olarak NOx emisyon değerleri ve yüzdesel değişim miktarları (NOx emission values and percentage changes depending on engine speed)

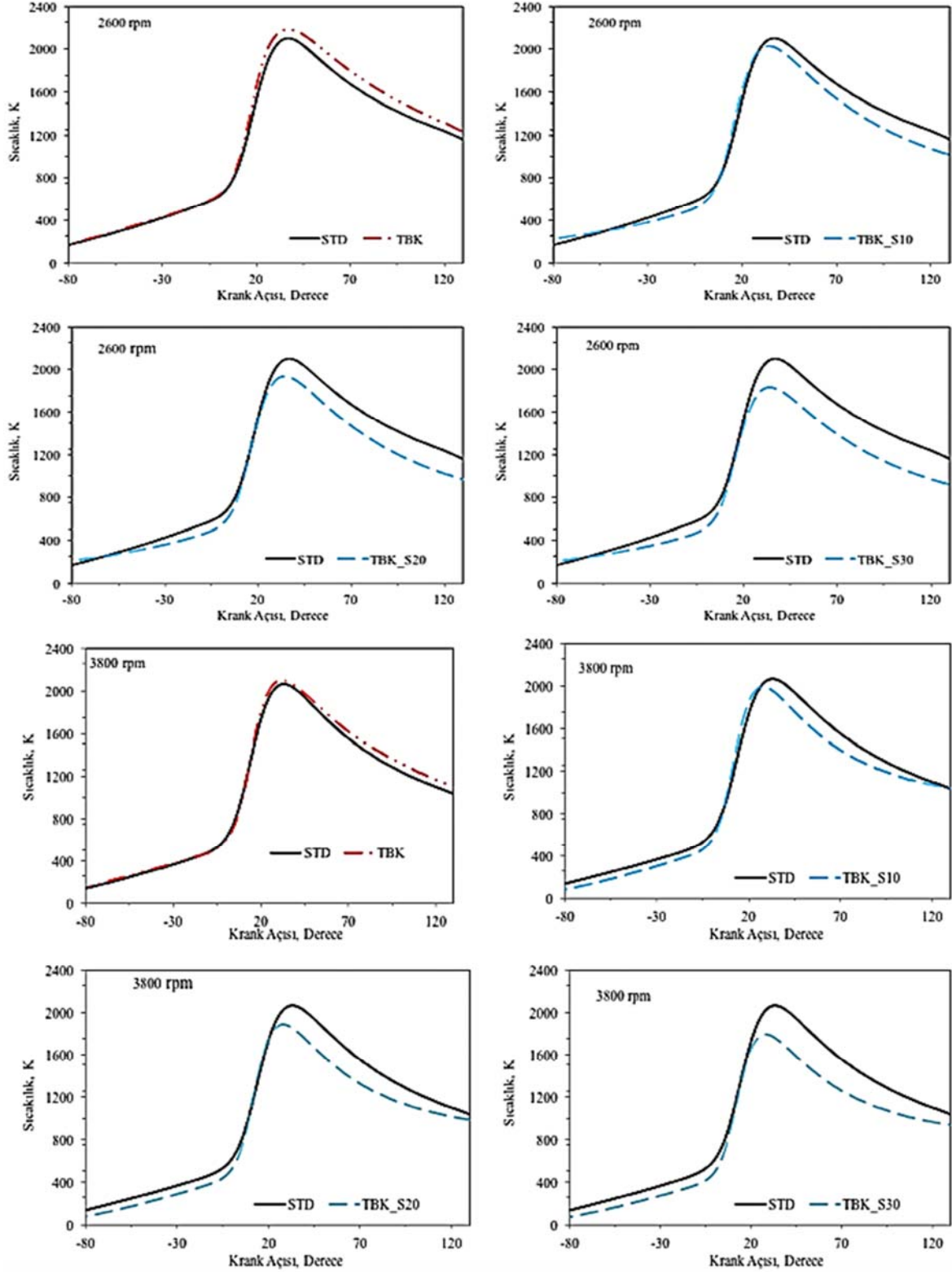
Şekil 14’de CO₂ emisyonlarının değişimleri görülmektedir. TBK pistonlu motor ve TBK pistonlu motora su enjeksiyonu yapılması durumunda tüm devirlerde CO₂ emisyonlarında artmalar görülmüştür. Artan CO₂ emisyonları kısmi eksik yanmanın azaldığını ve tam yanmanın arttığını işaret etmektedir. Yanma veriminin artmasına bağlı olarak CO emisyonları CO₂’ye dönüşmektedir.

4. Simgeler (Symbols)

t_i	: Zaman
R	: Direnç
MgO-ZrO ₂	: Magnezyum Oksit Zirkonyum dioksit
Y ₂ O ₃	: Yitrum oksit

4.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

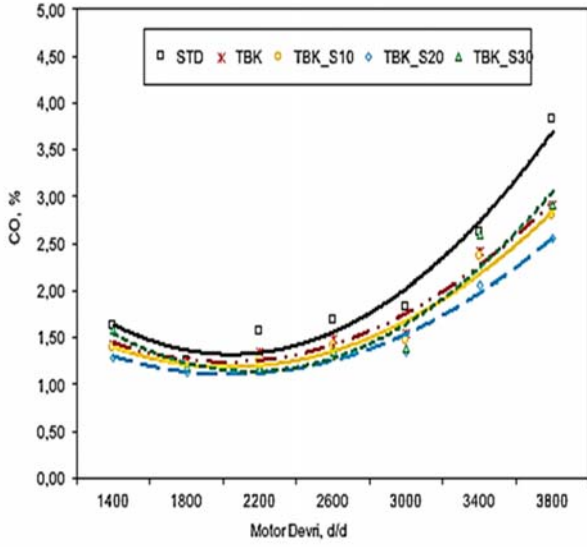
CO	: Karbon monoksit
CO ₂	: Karbon dioksit
ECU	: Elektronik kontrol ünitesi
HC	: Hidrokarbon
HCCI	: Homojen Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşlemeli
KMA	: Krank mili açısı
LPG	: Sıvılaştırılmış petrol gazı



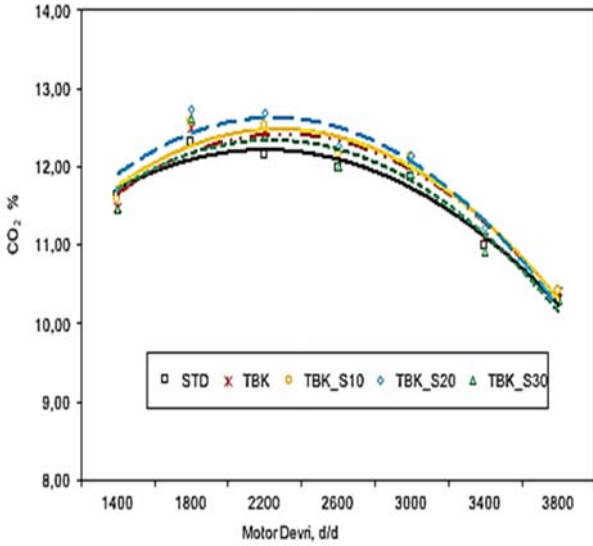
Şekil 12. STD, TBK ve TBK pistonlu motora su enjekte edilmesi durumunda silindir içi sıcaklık değişimi (In-cylinder temperature change in the case of injecting water into the STD, TBK and TBK piston engine)

NO_x : Azot oksit
 ÖYS : Özgül Yakıt Sarfiyatı
 STD : Standart benzin yakıtı
 S10 : %10 Su enjeksiyonu

S20 : %20 Su enjeksiyonu
 S30 : %30 Su enjeksiyonu
 TBK : Termal Bariyer Kaplama
 ÜÖN : Üst ölü nokta



Şekil 13. Motor devrine bağlı olarak CO emisyon değerleri (CO emission values depending on engine speed)



Şekil 14. Motor devrine bağlı olarak CO₂ emisyon değerleri (CO₂ emission values depending on engine speed)

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, benzin motorlarından salınan kirletici emisyonları azaltılması ve verimin artırılması amacıyla piston üst yüzeyi kısmi olarak seramik malzeme ile kaplanması ve farklı oranlarda emme manifolduna su püskürtülmüştür. Çalışmada; motorun tükettiği yakıtın miktarının yüzdesel oranlarında emme manifolduna su gönderilmesi ile kayda değer oranlarda emisyon değerleri azaltılırken motor performans parametreleri de iyileştirilmiştir.

Deneysel çalışmada, motor pistonu olarak TBK piston kullanılması durumunda performans parametreleri ve HC emisyonları iyileşmektedir. Fakat NOx emisyonlarında ise artmalar meydana gelmektedir. Motora su enjeksiyonu yapılması durumunda tüm püskürtme oranlarında motor performans parametreleri, HC ve NOx emisyonlarında iyileşmeler saptanmıştır. Motor performans parametreleri açısından en iyi sonuç %20 su püskürtme oranında elde

edilmiştir. %20 su püskürtülmesi sonucu motor momentindeki maksimum artış 2600 d/d'da %4,1'dir. %20 su püskürtme oranında, STD duruma göre özgül yakıt sarfiyatı ve efektif verimdeki iyileşme miktarları sırasıyla %3,8 ve %3,9'dur. TBK pistonlu motorda standart motor verilerine göre HC emisyonları %27 azalır iken NOx emisyonları %6 oranında artmıştır. %20 su püskürtme oranında HC emisyonlarında en iyi sonuç elde edilmiş olup standart duruma göre %33 varan oranlarda azalmalar saptanmıştır. NOx emisyonlarındaki en iyi sonuç %30 su enjeksiyon yapılması durumunda elde edilmiştir. %30 püskürtme oranında standart duruma göre %20 oranlarında azalmalar saptanmıştır.

Çalışma sonucunda elde edilen deneysel sonuçlara göre; motorda TBK piston kullanılması ve bu motora su enjeksiyonu yapılması durumunda performans parametreleri ve NOx ve HC emisyonları kayda değer oranlarda iyileşmelere neden olmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Lu Q., Chai J., Wang S., Zhang Z.G., Sun X.C., Potential energy conservation and CO₂ emissions reduction related to China's road transportation, *Journal of Cleaner Production*, 245, 118892, 2020.
2. Arabacı E., Simulation and performance analysis of a spark ignition engine using gasoline and LPG as fuel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 447-458, 2020.
3. Yontar A.A., Doğu Y., Investigation of ignition advance effects for CNG usage in a sequential dual ignition gasoline engine by using in-cylinder combustion analysis, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 1087-1100, 2019.
4. Lion S., Vlaskos I., Taccani R., A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery, *Energy Conversion and Management*, 207, 112553, 2020.
5. Cerit M., Ayhan V., Parlak A., Yasar H., Thermal analysis of a partially ceramic coated piston: Effect on cold start HC emission in a spark ignition engine, *Applied Thermal Engineering*, 31 (2-3), 336-341, 2011.
6. Parlak A., Ayhan V., Effect of using a piston with a thermal barrier layer in a spark ignition engine, *J. Energy Inst.* 80 (4), 223-228, 2007.
7. Parlak A., Ayhan V., Deniz C., Kolip A., Koksall S., Effects of M15 blend on performance and exhaust emissions of spark ignition engine with thermal barrier layer coated piston, *J. Energy Inst.* 81 (2), 97-101, 2008.
8. Saravanan C.G., Vikneswaran M., Prasanna Raj Yadav S., Edwin Geo V., Sasikala J., Ashok K., Muthukumaran N., Experimental study of feasibility of orange peel oil as a partial replacement for gasoline fuel in SI engine with and without MAO coated piston, *Fuel*, 315, 123173, 2022.
9. Sivakandhan C., Elumalai P.V., Murugan M., Effects of MnO₂ nanoparticles behavior of a sardine oil methyl ester operated in thermal barrier coated engine, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147, 8919-8931, 2022.
10. Bayata F., Yıldız C., The analyses of frictional losses and thermal stresses in a diesel engine piston coated with different thicknesses of thermal barrier films using co-simulation method, *International Journal of Engine Research*, DOI: 10.1177/14680874211065637, 2021.
11. Manoj Babua A., Saravanan C.G., Vikneswarana M., Edwin Geob E., Sasikalac J., Femilda J.S., Josephind D., Analysis of performance, emission, combustion and endoscopic visualization of micro-arc oxidation piston coated SI engine fuelled with low carbon biofuel blends, *Fuel*, 285, 119189, 2021.
12. Obulesu P., Siva Kumar R., Ramanjaneyulu B., A experimental test on 2-stroke spark ignition engine with gasoline and methanol-gasoline blends using brass coated piston, *Materials Today, Proceedings*, 39 (1), 590-595, 2020.
13. Li A.Q., Zheng Z.L., Peng T., Effect of water injection on the knock, combustion, and emissions of a direct injection gasoline engine, *Fuel*, 268, 117376, 2020.
14. Li X.Y., Zhen X.D., Xu S.Q., Wang Y., Liu D.M., Tian Z., Numerical comparative study on knocking combustion of high compression ratio

- spark ignition engine fuelled with methanol, ethanol and methane based on detailed chemical kinetics, *Fuel*, 306, 121615, 2021.
15. Karagöz M., Ağbulut Ü., Sandemir S., Waste to energy: Production of waste tire pyrolysis oil and comprehensive analysis of its usability in diesel engines, *Fuel*, 275, 117844, 2020.
 16. Zhang Z.B., Liu Q., Zhao R.C., Chen Y.P., Qin Q.C., Research on in-cylinder steam injection in a turbo compound diesel engine for fuel savings, *Energy*, 238, 121799, 2022.
 17. Zhang Z.B., Li L.F., Investigation of in-cylinder steam injection in a turbocharged diesel engine for waste heat recovery and NOx emission control, *Energies*, 11 (4), 93, 2018.
 18. Li L.F., Zhang Z.B., Investigation on steam direct injection in a natural gas engine for fuel savings, *Energy*, 183, 958-970, 2019.
 19. Sun X.X., Jia Z.Y., Liang X.Y., Jing G.X., Liu H., Shen G.J., Investigation of water/steam direct injection on performance and emissions of two-stroke marine diesel engine, *International Journal of Green Energy*, 18 (8), 843-855, 2021.
 20. Lin C.Y., Wang K.H., Effects of diesel engine speed and water content on emission characteristics of three-phase emulsions, *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 39 (5), 1345-1359, 2004.
 21. Park J.W., Huh K.Y., Park K.H., Experimental study on the combustion characteristics of emulsified diesel in a rapid compression and expansion machine, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D* 214, 579-586, 2000.
 22. Cesur, I., Effects of Water Injection on Performance and Exhaust Emissions of SI Engine with Y2O3-Coated Piston, *Journal of Energy Engineering*, 146 (5), 04020040, 2020.
 23. Cesur I., Parlak A., Ayhan V., Gonca G., Boru B., The Effects of Electronic Controlled Steam Injection on Spark Ignition Engine, *Applied Thermal Engineering*, 55 (1-2) 61-68, 2013.
 24. Hadia F., Wadhah S., Ammar H., Ahmed O., Investigation of combined effects of compression ratio and steam injection on performance, combustion and emissions characteristics of HCCI engine, *Case studies in thermal engineering*, 10, 262- 271, 2017.
 25. Hsueh M.H., Lai C.J., Hsieh M.C., Wang S.H., Hsieh C.H., Pan C.Y., Huang W.C., Effect of water vapor injection on the performance and emissions characteristics of a spark-ignition engine. *Sustainability*, 13 (16), 9229, 2021.
 26. Manickam M.V., Duraisamy S., Selvaraj M., Marimuthu P., Effect of steam injection on NOx emissions and performance of a single cylinder diesel engine fuelled with soy methyl ester. *Thermal Science*, 21 (2), 473-479, 2017.
 27. Min S.H., Suh H.K., Effect of water vapor injection on the distributions of equivalence ratio and the NO emission reduction in a CI engine, *Energies*, 12 (22), 4248, 2019.
 28. Zhao R.C., Zhang Z.B., Zhuge W.L., Zhang Y.J., Yin Y., Comparative study on different water/steam injection layouts for fuel reduction in a turbo compound diesel engine, *Energy conversion and management*, 171, 1487-1501, 2018.
 29. Ayhan V., Investigation of electronic controlled direct water injection for performance and emissions of a diesel engine running on sunflower oil methyl ester, *Fuel*, 275, 117992, 2020.
 30. Ayhan V., Experimental Investigation of the Effect of Direct Water Injection on Combustion, Knock, and Emissions for LPG-Diesel Dual-Fuel Engine, *Journal of Energy Engineering*, 147, 1, 2021.
 31. Gonca G., Investigation of the effects of steam injection on performance and NO emissions of a diesel engine running with ethanol-diesel blend, *Energy Conversion Management* 77, 450-457, 2014.
 32. Kökkülünk G., Parlak A., Ayhan V., Gonca G., Theoretical and experimental investigation of diesel engine with steam injection system on performance and emission parameters, *Applied Thermal Engineering*, 54 (1), 161-170, 2013.
 33. Parlak A., Ayhan V., Üst Y., Şahin B., Cesur I., Boru B., Kökkülünk G., New method to reduce NOx emissions of diesel engines: electronically controlled steam injection system, *Journal of the Energy Institute*, 85, 135-139, 2012.
 34. Cesur I., Investigation of the effects of steam injection on the emissions and performance of a diesel engine using waste chicken oil methyl ester, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30 (10), 1-7, 2016.
 35. Gonca G., Sahin B., Parlak A., Ayhan V., Cesur I., Koksall S., Investigation of the effects of the steam injection method (SIM) on the performance and emission formation of a turbocharged and Miller cycle diesel engine (MCDE), *Energy*, 119, 926-37, 2017.
 36. Gonca G., Sahin B., Effect of turbo charging and steam injection methods on the performance of a Miller cycle diesel engine (MCDE), *Applied Thermal Engineering*, 118, 138-46, 2017.
 37. Cesur İ., Kısmi Yalıtılmış Bir Buji Ateşlemeli Motorda Buhar Enjeksiyonu Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2013.

