



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Doğalgazlı Buji Ateşlemeli Direkt Enjeksiyonlu Bir Motorda Erken ve Geç Ateşlemenin Yanma ve Emisyon Oluşumuna Etkisi

 Müjdat FIRAT ^{a,*}

^a *Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, TÜRKİYE*

* *Sorumlu yazarın e-posta adresi: mfiat@firat.edu.tr*

DOI: 10.29130/dubited.597019

ÖZET

Bu çalışmada doğalgazla çalışan direkt enjeksiyonlu benzinli bir motorda ateşleme zamanının yanma ve emisyonlar üzerine etkileri incelenmiştir. Farklı ateşleme zamanları için motorun 3000 devir şartlarında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Yanma karakteristikleri ve emisyon oluşumlarını incelemek için üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar mekaniği kodu olan ANSYS-Forte 19.0 kullanılmıştır. Tüm simülasyonlar farklı ateşleme zamanları için gaz keleşinin tam açık konumunda tekrarlanmıştır. Erken ateşleme zamanlamasında silindir içi basıncın yükseldiği görülürken, HC ve CO emisyonlarında düşüş gözlenmiştir. Ayrıca, erken ateşleme şartlarında düşen HC ve CO emisyonlarına rağmen NO_x emisyonlarında artış görülmüştür. Sonuç olarak doğalgazlı motorlarda erken ateşleme zamanında daha yüksek yanma verimi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Doğalgaz, Buji ateşlemeli motorlar, Ateşleme zamanı, 3 boyutlu HAD*

Effect of Early and Late Ignition on Combustion and Formation of Emissions in a Natural-Gas Fuelled Spark-Ignited Direct-Injection Engine

ABSTRACT

The effect of spark timing on combustion and emissions of a natural gas fuelled direct injection spark ignition engine was investigated. The engine was simulated at 3000 rpm with different ignition timing. The three-dimensional computational fluid dynamics software ANSYS-Forte 19.0 was used to investigate the combustion characteristic and formation of emissions. All simulations were occurred under wide throttle open with different ignitions timing. The peak cylinder pressure increased with early spark timing. The spark timing also caused HC and CO emissions to decrease for early spark timing. Furthermore, the NO_x emissions remarkably ascended while the CO and HC emissions significantly declined with early ignition timing. As a result, higher combustion efficiency was obtained at early ignition timing for natural gas engine.

Keywords: *Natural gas, Spark ignition engines, Spark timing, 3D CFD*

Geliş: 26/07/2019, Düzeltme: 03/09/2019, Kabul: 15/10/2019

I. GİRİŞ

Fosil yakıtların kullanımı dünya genelinde oldukça önemli bir role sahiptir. Özellikle içten yanmalı motorlarda genellikle fosil yakıtların kullanılması, fosil yakıt rezervlerinin azalması ve gün geçtikçe zorlaşan emisyon kriterleri araştırmacıları bu konularda araştırma ve geliştirme yapmaya yönlendirmektedir. Gerek yanmanın iyileştirilmesi gerekse kirletici emisyonların düşürülmesi için en etkili yöntemlerden birisi olarak alternatif yakıtlar görülmektedir. Bu konuda içten yanmalı motorlarda doğalgaz [1], sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) [2], hidrojen [3], metanol [4], etanol [5] vb. alternatif yakıtlar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yakıtlardan özellikle doğalgazın kullanımı son yıllarda artış göstermektedir. Bu artışın sebebi doğalgazın daha temiz yanma sağlaması ve doğalgaz rezervlerinin yükselmesi olarak gösterilmektedir. Ayrıca, yüksek oktan sayısı ve vuruntu direncinden dolayı, doğalgaz içten yanmalı motorlar için oldukça önemli bir alternatif yakıt olarak gösterilmektedir. Duc vd. [6] deneysel olarak yürüttükleri çalışmada buji ateşlemeli bir motorda benzin ve sıkıştırılmış doğalgaz kullanımının performans ve emisyonlar üzerine etkilerini incelemişlerdir. Doğalgaz kullanımı durumunda fren gücünde kısmen düşüş görülmüştür. Fakat CO₂, CO, HC ve NO_x emisyonlarında ciddi oranda azalma yine aynı çalışmada elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sıkıştırılmış doğalgaz kullanımının buji ateşlemeli motorlarda emisyon kontrolü için oldukça önemli olduğu belirtilmiştir. Chen vd. [7] yakıt olarak metan kullanılan buji ateşlemeli bir motorda buji tipi ve ateşleme enerjisinin yanma üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma tek silindirli, dört zamanlı, dört supaplı ve çatı tipi yanma odasına sahip optik bir motorda deneysel olarak fakir yanma şartları altında yürütülmüştür. Çalışma sonucunda yüksek ateşleme enerjisinin yanma stabilizasyonunu güçlendirdiği ve bu durumun daha hızlı alev gelişimi sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca çok tırnaklı bujinin yüksek ateşleme enerjisini desteklediği belirtilmiştir. Çalışma sonucunda doğalgazlı motorlarda çok tırnaklı buji ve yüksek ateşleme enerjisi kullanımının motor performansını güçlendirdiği belirtilmiştir.

Alternatif yakıt kullanımının yanı sıra yanma karakteristiklerinin iyileştirilmesi ve kirletici emisyonların azaltılması için farklı yöntemlerde kullanılmaktadır [8]. Bu yöntemlerden başlıcaları farklı enjeksiyon zamanları ve enjeksiyon stratejilerinin uygulanması [9] ve yanma odası şeklinin incelenmesi [10] şeklinde sıralanabilir. Bunların yanında, özellikle buji ateşlemeli motorlar için ateşleme zamanı yanmanın başlaması bakımından oldukça önemli bir parametredir. Ateşleme zamanına bağlı olarak silindir için birçok karakteristik değiştiği gibi emisyonlarda oldukça farklılık göstermektedir [11,12]. Gong vd. [13] ateşleme zamanının yanma ve emisyon oluşumları üzerine etkilerini fakir karışımli yanma şartları altında buji ateşlemeli bir motorda incelemişlerdir. Çalışma deneysel olarak gerçekleştirilmiş olup, ateşleme zamanı üst ölü noktadan önce 25 °KMA - 50 °KMA arasında 5 °KMA farkla değiştirilmiştir. Ateşleme zamanının üst ölü noktaya yaklaşmasıyla silindir içi basıncın düştüğü, ısı salınımının üst ölü noktaya yaklaştığı, ateşleme gecikmesinin azaldığı ve yanma süresinin kısaldığı görülmüştür. Bu durumda kirletici emisyonlar genel olarak artış gösterirken NO_x emisyonunun düştüğü de gösterilmiştir.

Bu çalışma kapsamında direkt enjeksiyonlu buji ateşlemeli doğalgazla çalışan bir motorda ateşleme zamanının yanma karakteristikleri ve kirletici emisyonlara etkileri araştırılmıştır. Doğalgazın düşük basınçlı olarak direkt enjeksiyonunun sağlandığı tek silindirli bir motorda erken ve geç ateşleme durumları incelenmiştir. Doğalgazlı motorların son yıllarda yaygınlaşması ile birlikte özellikle bu kapsamda çalışmalar literatürde henüz eksiklikler içermektedir. Özellikle doğalgazlı motorlarda ateşleme zamanının etkisinin araştırılması literatürde eksik kalan yanlardan birisidir.

Yapılan bu çalışmayla doğalgazlı motorlar için ateşleme zamanının etkisi ve önemi vurgulanmıştır. Bu şekilde literatürdeki önemli bir eksiklik giderilmeye çalışılmıştır.

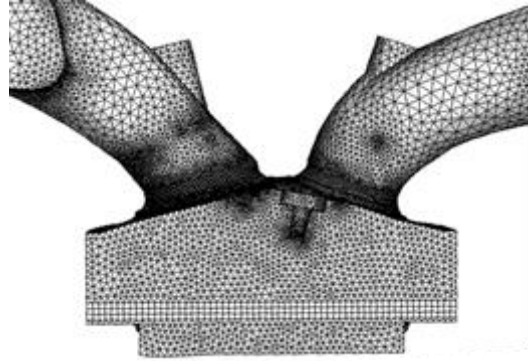
II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada benzinli bir motorda erken ve geç ateşleme zamanlarının yakıt olarak doğalgaz kullanımı durumunda sayısal olarak araştırılması amaçlanmıştır. Sayısal olarak gerçekleştirilen çalışmada motor performansı ve kirlenici emisyon oluşumları detaylı olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmanın yürütülmesi için üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan ANSYS-Forte 19 [14] kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında Navier-Stokes denklemlerinin yanı sıra türbülanslı akışın modellenmesi için ANSYS Forte tabanında da mevcut olan RNG k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır [15]. Ayrıca ısı salınımı ANSYS Forte tabanında Eşitlik (1)' e göre hesaplanmıştır.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma+1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (1)$$

Burada, $\frac{dQ}{d\theta}$ ısı salınım oranını, γ özgül ısıları oranını (c_p/c_v), θ krank açısını, P silindir içi gaz basıncını ve V silindir hacmini ifade etmektedir [14].

Sayısal model, emme manifoldu, egzoz manifoldu, silindir kapağı, enjektör, buji ve yanma odasını kapsayacak şekilde simetri model olarak oluşturulmuştur. Modelin ağ yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir. Çalışmada tek silindirli dört zamanlı benzinli bir motor referans alınmış ve gerçek çalışma şartlarına uygun parametreler sınır şartları olarak belirlenmiştir. Motora ait teknik özellikler Tablo 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Modelin ağ yapısı

Tablo 1. Sayısal çalışmada kullanılan motorun teknik özellikleri

Silindir çapı	84mm
Strok	103mm
Sıkıştırma oranı	11.67
Biyel kolu uzunluğu	144.3mm
Silindir sayısı	1
Çevrim türü ve zamanı	Otto çevrimi, 4 zamanlı
Motor devri	3000 d/d

Doğalgaz bileşen olarak %94-96'lara varan oranlarda CH₄ içerir [16,17]. Geriye kalan küçük kısımda ise diğer bileşenler bulunmaktadır. Bu bakımdan doğalgazın modellendiği bu çalışmada doğalgaz CH₄ olarak kabul edilerek analizler yapılmıştır. Doğalgaz için enjeksiyon şartları Tablo 2'de gösterilmiştir.

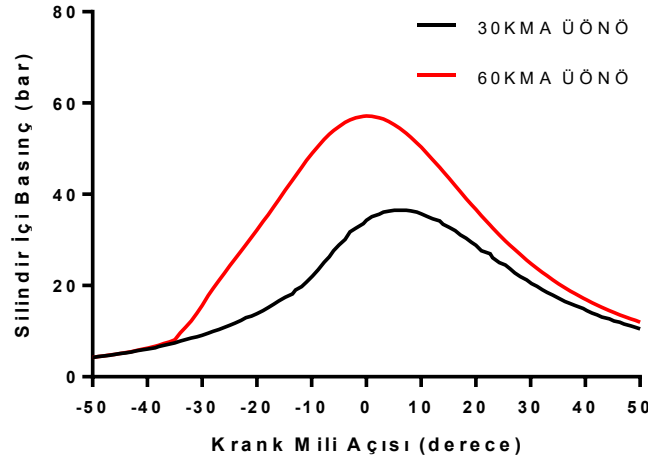
Tablo 2. Çalışmada kullanılan enjeksiyon parametreleri

Enjeksiyon Basıncı	0.2MPa
Enjeksiyon Süresi	50°KA
Nozul Çapı	120micron
Nozul Sayısı	1

Bu çalışmada düşük basınçta doğalgaz enjekte edilen direkt enjeksiyonlu benzinli motorda erken ve geç ateşlemenin yanma ve egzoz emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda enjeksiyon zamanı enjeksiyon süresi ve kullanılan yakıt sabit tutularak farklı iki ateşleme zamanında araştırma yapılmıştır. Öncelikle üst ölü noktadan önce (ÜÖNÖ) 30 krank mili açısı (KMA)'nda ateşleme yapılmıştır. Bu durum geç ateşleme şartlarını ifade etmektedir. Sonrasında ise ÜÖN'dan önce 60 °KMA'da ateşleme gerçekleştirilmiştir. Bu şartlarda ise erken ateşleme şartları simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlar her iki ateşleme zamanlaması için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

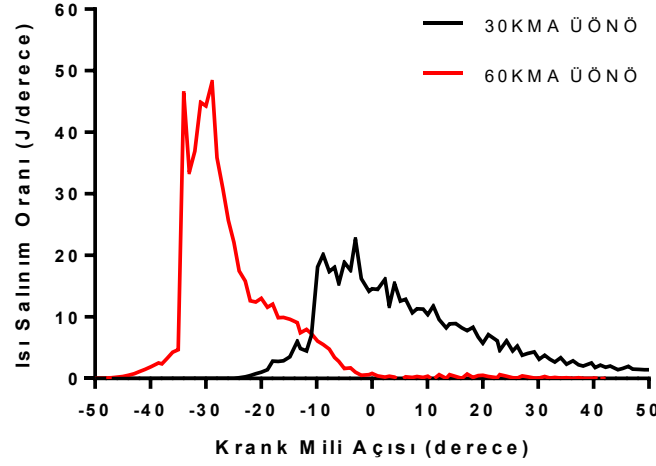
III. BULGULAR

Şekil 2'de farklı ateşleme zamanlarında silindir içi basınç değişimi görülmektedir. Erken ateşleme şartlarında yanmanın daha erken başlamasına bağlı olarak silindir içi basınç daha erken krank açılarında yükselmeye başlamıştır. Ayrıca yine erken ateşleme durumunda daha yüksek silindir içi basıncın elde edildiği görülmektedir. Geç ateşleme şartlarında ise yanma için kalan sürenin kısa olmasına bağlı olarak daha düşük silindir içi basınçlar görülmektedir. Motor devri de göz önünde bulundurularak gerek yanma için daha kısa süre kalması gerekse yakıtın zaman olarak yanmaması neticesinde geç ateşleme şartlarında yanma basıncının düşüş gösterdiği sonucu grafikten elde edilmektedir.



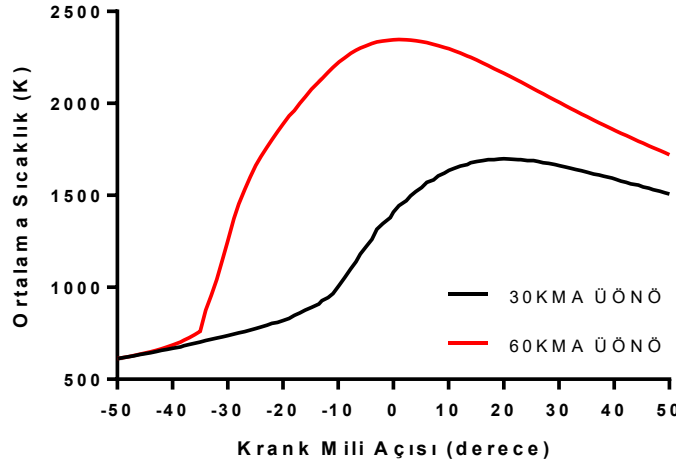
Şekil 2. Farklı ateşleme zamanlarının silindir içi basınca etkisi

Farklı ateşleme zamanlarına bağlı olarak ısı salınım oranının değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde buji ateşlemeli motor teorisine uygun olarak ısı salınımının buji ateşlemesine bağlı olarak başladığı görülmektedir. Erken ateşleme durumunda daha erken bir ısı salınımı gerçekleştiği ve ÜÖN'ya kadar sürdüğü görülmektedir. Geç ateşleme şartlarında ise ısı salınımının ÜÖN'ya yakın bir açıda başladığı ve ÜÖN'dan yaklaşık 40 °KMA kadar sonra tamamlandığı görülmektedir. Bu durumda püskürtülen yakıtın faydalı olarak yakılamadığı görülmektedir. Doğalgazın yanma direnci göz önünde bulundurulduğunda, doğalgazlı motorlarda erken ateşlemenin bu bakımdan daha doğru bir yaklaşım olacağı elde edilen önemli bir sonuçtur.



Şekil 3. Farklı ateşleme zamanlarının ısı salınım oranına etkisi

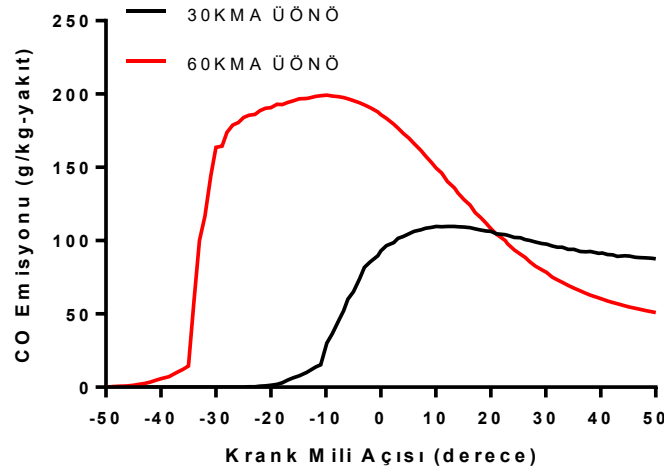
Şekil 4’de silindir içi ortalama sıcaklığın farklı ateşleme zamanlarına ve krank mili açısına bağlı değişimi görülmektedir. Silindir içi sıcaklık değişimi yanma için oldukça önemli bilgiler verirken bir çok emisyon oluşumu içinde bir referans teşkil etmektedir. Şekilde erken ateşleme durumunda silindir içi sıcaklığın yaklaşık 2400K değerlerine kadar yükseldiği görülmürken, geç ateşleme şartlarında oldukça düşük sıcaklık değerleri elde edilmektedir. Bu durum püskürtülen yakıtın silindir içerisinde karışım için yeterli zamanı erken ateşleme şartlarında bulduğunu ve buna bağlı yanma için gereken zamanın daha fazla olduğunu göstermektedir. Fakat geç ateşleme zamanında elde edilen düşük sıcaklık sonuçları da oldukça önemlidir. Dizel motorlarda daha sıklıkla tercih edilen ve emisyonların kontrol edilmesi için kullanılan düşük sıcaklı yanma stratejilerinde olduğu gibi, bu sonuç benzinli motorlarda da bu durumun ateşleme zamanıyla sağlanabilir olduğunu göstermektedir. Bu bakımdan ateşleme zamanlamasının silindir içi sıcaklık değişimine bu kadar etki etmesi gelecek çalışmalar adına umut verici bir sonuç olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Farklı ateşleme zamanlarının silindir içi ortalama sıcaklığa etkisi

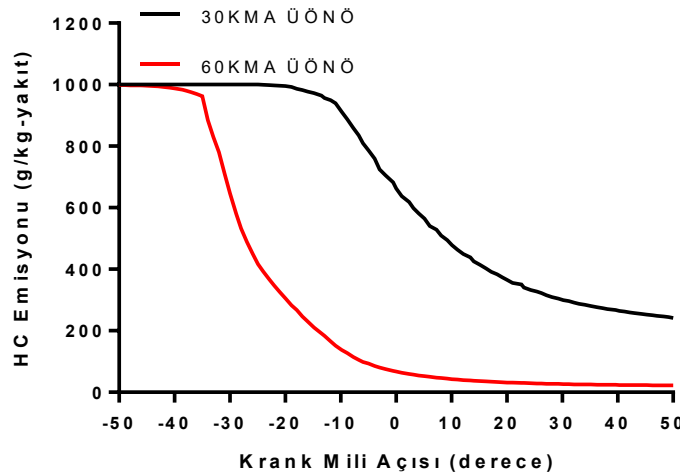
Şekil 5’te erken ve geç ateşleme zamanlamalarının CO oluşumuna etkisi krank mili açısına bağlı olarak sunulmuştur. Şekilde erken ateşleme durumunda CO emisyonlarının hızlıca yükseldiği ve sonra düşüş gösterdiği gözlenmiştir. Geç ateşleme şartlarında ise ÜÖN civarında CO emisyonlarının yükseldiği ve ilerleyen krank mili açılarındaki çok az düşüş gösterdiği gözlenmiştir. CO emisyonları eksik yanma ürünü olup yakıt molekülleriyle oksijenin tam olarak buluşmaması sebebiyle oluşmaktadır [18]. Enjeksiyon basıncının oldukça düşük olduğu göz önünde bulundurulursa erken ateşleme durumunda yanmanın başladığı zaman yakıt-hava karışımının henüz eksik olduğu

değerlendirmektedir. Bu durumda hızlı bir CO yükselmesi görülse de ilerleyen krank açılarında ciddi oranda düşüş gösterdiği görülmektedir. Geç ateşleme zamanında ise yanmanın geç başlamasına bağlı olarak eksik yanma durumunun devam ettiği anlaşılmaktadır.



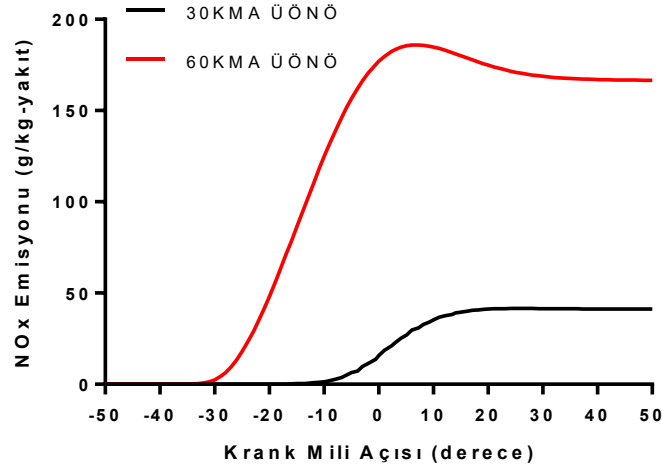
Şekil 5. Farklı ateşleme zamanlarının CO emisyonlarına etkisi

Eksik yanma ürünü olan HC emisyonlarının farklı ateşleme zamanlarına bağlı olarak değişimi Şekil 6'da görülmektedir. HC emisyonları eksik yanmayı ifade etmekle birlikte yanmanın kötü olduğunun göstergesidir. Erken ateşleme durumunda yanma süresine bağlı olarak HC emisyonlarının oldukça düştüğü görülürken, geç ateşleme zamanlarında daha yüksek HC emisyonları elde edilmiştir. Bu durum yakıtın yanmadan motordan atıldığının göstergesidir. Özellikle geç ateşleme zamanlarında enjeksiyon stratejilerinde değişiklik yapılarak bu durumun giderilmesi düşünülebilir.



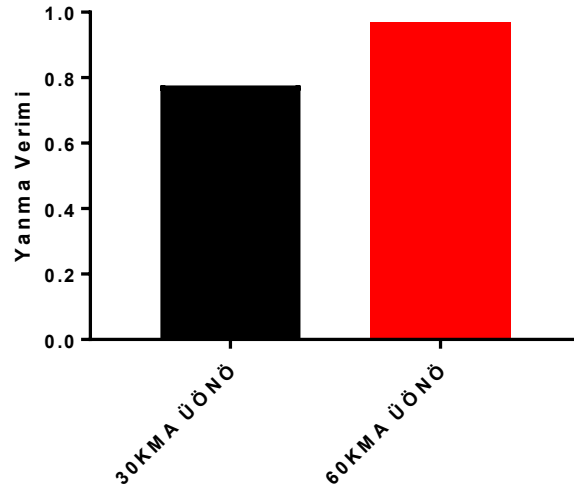
Şekil 6. Farklı ateşleme zamanlarının HC emisyonlarına etkisi

Şekil 7'de silindir içi NO_x emisyonlarının krank mili açına göre değişimi farklı ateşleme zamanları için sunulmuştur. Bilindiği üzere NO_x emisyonları yüksek yanma sıcaklıklarına bağlı olarak, yüksek aktivasyon enerjisinde meydana gelmektedir. Erken ateşleme zamanlarında yüksek yanma sıcaklıklarının görülmesi aynı zamanda daha yüksek NO_x emisyonlarının elde edildiğini göstermektedir. Daha düşük sıcaklıkta yanma meydana gelen geç ateşleme durumunda ise oldukça düşük NO_x emisyonu elde edilmiştir. Bu bakımdan bu grafik Şekil 4'ü doğrular niteliktedir. Özellikle yüksek yanma sıcaklıklarına çıkılan durumlarda ve motor tasarımlarında geç ateşleme zamanlarının oldukça önemli olduğu ve gelecek çalışmalar için umut verici olduğu bu grafikten elde edilen önemli bir sonuçtur.



Şekil 7. Farklı ateşleme zamanlarının NOx emisyonlarına etkisi

İçten yanmalı motorlar için oldukça önemli olan, yanma ve emsiyon oluşumlarının yorumlanması için kolaylık sağlayan bir diğer sonuç ise yanma verimidir. Yanma verimi motora gönderilen yakıtın yanma oranına göre hesaplanmakta olup elde edilen tüm sonuçlar için belirleyicidir. Şekil 8’de farklı ateşleme zamanlarında yanma veriminin değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi geç ateşleme zamanlamasında yaklaşık %78 gibi bir yanma verimi elde edilirken, erken ateşleme zamanlamasında yaklaşık %96 yanma verimi elde edilmiştir. Bu sonuçlar yanma için gereken zamanın yeterliliği, ısı salınımının tamamlanması ve yakıtın yanmasının bir göstergesidir. Dolayısıyla erken ateşleme zamanlarında oldukça yüksek yanma verimleri elde edilmektedir.



Şekil 8. Farklı ateşleme zamanlarının yanma verimine etkisi

IV. SONUC

Bu çalışma kapsamında doğalgazlı direkt enjeksiyonlu buji ile ateşlemeli bir motorda erken ve geç ateşleme zamanlarının yanma ve emisyonlar üzerine etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Doğalgaz kullanılan motorlarda ateşleme zamanının etkileri erken ve geç ateşleme zamanları olacak şekilde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre geciken ateşleme zamanlarında silindir içi basınç ve sıcaklığın düşüş gösterdiği görülürken erken ateşleme zamanlarında daha yüksek değerler

elde edilmiştir. Ateşleme zamanına bağlı olarak ısı salınımının geç ateşleme de daha geç meydana geldiği ve bu durumun yanmayı olumsuz etkilediği görülmüştür. Erken ateşleme durumunda CO ve HC emisyonlarında düşme görülürken, geç ateşleme durumunda NO_x emisyonları oldukça düşmüştür. Ayrıca erken ateşleme durumunda yanma veriminin yaklaşık %96'lere ulaştığı görülürken, geç ateşleme durumunda ancak %78 değerine ulaşabilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre doğalgazlı motorlarda erken ateşlemenin yanma verimi ve kirletici emisyonlar üzerine oldukça etkili olduğu ve kullanılabilir olduğu gözlenmiştir. Geç ateşleme durumunda ise NO_x emisyonlarında ciddi oranda düşüş olması gelecek çalışmalar için umut verici niteliktedir.

V. KAYNAKLAR

- [1] J. Liu ve C. E. Dumitrescu, "Combustion partitioning inside a natural gas spark ignition engine with a bowl-in-piston geometry", *Energy Conversion and Management*, c. 183, ss. 73–83, 2019.
- [2] A. Suyabodha, "Comparison the Rate of Energy Consumption between Gasoline95 and LPG in Spark Ignition Engine under Real Driving Conditions", *Energy Procedia*, c. 118, ss. 164-171, 2017.
- [3] J. Lee, C. Park, Y. Kim, Y. Choi, J. Bae, B. Lim, "Effect of turbocharger on performance and thermal efficiency of hydrogen-fueled spark ignition engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 44 s. 8, ss. 4350-4360, 2019.
- [4] Nidhi, K. A. Subramanian, "Experimental investigation on effects of oxygen enriched air on performance, combustion and emission characteristics of a methanol fuelled spark ignition engine", *Applied Thermal Engineering*, c.147, ss. 501-508, 2019.
- [5] P. Chansauria ve R. K. Mandloi, "Effects of Ethanol Blends on Performance of Spark Ignition Engine-A Review", *Materials Today: Proceedings*, c. 5 s. 2, ss. 4066-4077, 2018.
- [6] K. N. Duc, V. N. Duy, L. Hoang-Dinh, T. N. Viet, T. Le-Anh, "Performance and emission characteristics of a port fuel injected, spark ignition engine fueled by compressed natural gas", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, c. 31, ss. 383–389, 2019.
- [7] L. Chen, H. Wei, R. Zhang, J. Pan, L. Zhou, D. Feng, "Effects of spark plug type and ignition energy on combustion performance in an optical SI engine fueled with methane", *Applied Thermal Engineering* c.148, ss.188–195, 2019.
- [8] M. Z. Gül, H. Köten, M. Yılmaz, H. Savcı, "Advanced numerical and experimental studies on CI engine emissions", *Journal of Thermal Engineering*, c. 4, ss. 2234-2247, 2018.
- [9] C. Gong, Z. Liu, H. Su, Y. Chen, J. Li, F. Liu, "Effect of injection strategy on cold start firing, combustion and emissions of a LPG/methanol dual-fuel spark-ignition engine", *Energy*, c.178, ss.126-133, 2019.
- [10] A. O. Hasan, H. Al-Rawashdeh, A. H. Al-Muhtaseb, A. Abu-jrai, R. Ahmad and J. Zeaiter, "Impact of changing combustion chamber geometry on emissions, and combustion characteristics of a single cylinder SI (spark ignition) engine fueled with ethanol/gasoline blends", *Fuel*, c. 231, ss. 197–203, 2018.
- [11] X. Duan, Y. Li, J. Liu, G. Guo, J. Fu, Q. Zhang, S. Zhang and W. Liu, "Experimental study the effects of various compression ratios and spark timing on performance and emission of a lean-burn heavy-duty spark ignition engine fueled with methane gas and hydrogen blends", *Energy*, c. 169, ss. 558-571, 2019.

- [12] W. Shi, X. Yu, H. Zhang and H. Li, "Effect of spark timing on combustion and emissions of a hydrogen direct injection stratified gasoline engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 42, ss. 5619-5626, 2019.
- [13] C. Gong, Z. Li, Y. Chen, J. Liu, F. Liu and Y. Han, "Influence of ignition timing on combustion and emissions of a spark-ignition methanol engine with added hydrogen under lean-burn conditions", *Fuel*, c. 235, ss. 227-238, 2019.
- [14] ANSYS Forte User's Guide, 2018.
- [15] ANSYS Forte Theory Manuel, 2018.
- [16] S. Aljamali, S. Abdullah, W. M. F. W. Mahmood and Y. Ali, "Effect of fuel injection timings on performance and emissions of stratified combustion CNGDI engine", *Applied Thermal Engineering*, c.109, ss. 619-629,2016.
- [17] J. Liu and C.E. Dumitrescu, "3D CFD simulation of a CI engine converted to SI natural gas operation using the G-equation", *Fuel*, c. 232 ss. 833-844, 2018.
- [18] X. Duan, Y. Li, J. Liu, G. Guo, J. Fu, Q. Zhang, S. Zhang and W. Liu, "Experimental study the effects of various compression ratios and spark timing on performance and emission of a lean-burn heavy-duty spark ignition engine fueled with methane gas and hydrogen blends", *Energy*, c. 169, ss. 558-571, 2019.