

## Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli Motorlarda Enjeksiyon Zamanlamasının Motor Performansı ve Emisyon Oluşumuna Etkilerinin İncelenmesi

Müjdat FIRAT\*<sup>1</sup>, İsmail TÜRK BAY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü, 23119, Elazığ

<sup>2</sup>Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ

Geliş / Received: 27.09.2018, Kabul / Accepted: 9.10.2019

### Öz

Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlar düşük NO<sub>x</sub> ve is emisyonları sağlaması sebebiyle umut verici çalışma alanları olarak görülmektedir. Özellikle dizel yakıtının püskürtme stratejilerinin değiştirilmesiyle yanmanın iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Bu çalışma kapsamında dizel motor şartları altında homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli bir motor için krank açısına (KA) bağlı farklı püskürtme zamanlaması araştırılmıştır. Çalışma AVL-FIRE sayısal yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon üst ölü noktadan (ÜÖN) önce sırasıyla -150KA, -120KA, -90KA, -60KA ve -30KA'nda başlayan zamanlamalar için incelenmiştir. Tüm püskürtme zamanlamaları için enjeksiyon ÜÖN'dan 5KA sonra tamamlanmıştır. Çalışmalar sonucunda erken enjeksiyon zamanlamalarında yüksek sıcaklıklar ve kısmen yüksek NO<sub>x</sub> ve is emisyonları elde edilmiştir. Özellikle -90KA ve -60KA gibi geciken enjeksiyon zamanlamalarında daha düşük NO<sub>x</sub> ve is emisyonları elde edilmiştir. Fakat enjeksiyonun daha geç yapılması durumunda ise CO emisyonlarının arttığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlar, Enjeksiyon zamanlaması, Yanma, Kirlenici emisyonlar

### Investigation of the Effects of Injection Timing on Engine Performance and Formation of Emission in Homogeneous Charge Compression Ignition Engines

#### Abstract

Homogeneous charge compression ignition engines are considered to be promising in studying areas due to their low NO<sub>x</sub> and soot emissions. Particularly, it is aimed to improve combustion by changing the injection strategies of diesel fuel. In this study, different spray timing for a homogeneous charge compression ignition engine was investigated under diesel engine conditions. Also, the AVL-FIRE numerical software was used in this study. Further, injection timing was examined at -150CA, -120CA, -90CA, -60CA and -30CA before the top dead center (BTDC). The injection was completed 5CA after TDC for all injection timings. The results showed that high temperatures, high NO<sub>x</sub> and soot emissions were obtained at early injection timing. Especially, lower NO<sub>x</sub> and soot emissions were obtained in the retarded injection timings such as -90KA and -60KA. However, in the case of late injection, CO emissions were increased.

**Keywords:** Homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines, Injection timing, Combustion, Pollutant emissions

### 1. Giriş

Dizel motorların yüksek NO<sub>x</sub> ve is emisyonları son yıllarda gittikçe ağırlaşan emisyon standartları sebebiyle büyük bir sorun olarak görülmektedir. Bu kirlenici

emisyonların düşürülmesi için farklı yanma konseptleri üzerinde çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalardan en yaygın düşük sıcaklıklı bir yanma konsepti olan homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli (HCCI) yanmadır. Yapılan çalışmalarda

HCCI motorların daha düşük NO<sub>x</sub> ve is emisyonları sağladığı görülmektedir (Suzuki vd., 1997, Mathivanan vd., 2016). HCCI motorlar sağladıkları emisyon avantajlarının yanında bazı problemleri de birlikte getirmektedir. Bu problemlerden en önemlisi yanmanın kontrol edilmesidir (Yao vd., 2009). HCCI motorların yapısı gereği yanmanın başlamasını belirleyecek bir buji ya da ÜÖN bölgesinde bir enjeksiyon bulunmamaktadır. Dolayısıyla yanmanın kontrol edilmesi için araştırmacılar farklı yöntemler üzerinde çalışmalar yürütmektedir. Bu çalışmalardan birisi egzoz gazı geri dönüşüm (EGR) oranının kullanılmasıdır. Farklı oranlarda EGR kullanılmasıyla silindir içindeki ısı salınımı kontrol altına alınmaya çalışılmakta ve bu şekilde yanma kontrol edilmektedir (Lapuerta vd., 2000, Zheng vd., 2004). Ayrıca HCCI motorlarda farklı gaz ve alkol yakıtların birlikte kullanılmasıyla yanmanın kontrol edilmesi ve tüm emisyon türlerinde iyileştirilmenin sağlanması araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilen yöntemlerdir (Yousefzadeh ve Jahanian 2017, Jafarmadar vd., 2015, Kozarac vd., 2016). Gharehghani (2019) yaptığı çalışmada doğalgaz, etanol ve metanol yakıtlarının kullanıldığı HCCI bir motorda motor yükü limitlerinin belirlenmesini araştırmıştır. Deneysel olarak yürütülen çalışmada farklı giriş sıcaklıkları ve basınçları gibi parametreler kullanılarak farklı yakıtların motor yükü altında motor performansı ve emisyon oluşumuna etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda doğalgazın yüksek yüklerde, yüksek giriş basınçlarında ve zengin karışım şartlarında en iyi sonucu verirken, etanol ve metanolun düşük giriş sıcaklıkları ve fakir karışım şartlarında daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

Bunun yanında bir diğer önemli çalışma grubu ise enjeksiyon stratejilerinin

değiştirilmesidir. Farklı enjeksiyon zamanlamaları, farklı sayıda enjeksiyon uygulamaları ve diğer enjeksiyon parametrelerinin değiştirilmesi ile yanmanın kontrol edilmesi sağlanmaktadır (Khandal vd., 2017). Fang vd.(2012) deneysel olarak yürüttükleri çalışmada dizel motor şartları altında bir HCCI motorda pilot enjeksiyon uygulanmasına ilaveten EGR oranlarının değiştirilerek yanmanın kontrol edilmesini ve emisyonların düşürülmesini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda pilot enjeksiyon miktarı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonlarının ciddi düşüş gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca düşük EGR oranlarında NO<sub>x</sub> emisyonlarının düştüğü gösterilmiştir. Coşkun vd. (2018) etanol benzin karışımının yakıt olarak kullanıldığı bir HCCI motorda farklı enjeksiyon parametrelerinin yanma kontrolüne etkisini hem deneysel hem de stokastik reaktör modeli (SRM) kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada emme zamanı boyunca birinci enjeksiyon yapılmış, sıkıştırma zamanı sonunda ise ikinci enjeksiyon gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda birinci enjeksiyonun yanma kontrolünde etkisiz olduğu vurgulanırken ikinci enjeksiyonun ve oranının yanma kontrolünde önemli bir strateji olduğu belirtilmiştir. Türkcan vd. (2018) deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirdikleri çalışmada farklı oranlarda etanol-benzin ve metanol-benzin karışımlarının yakıt olarak kullanıldığı bir HCCI motorda iki kademeli enjeksiyonun etkisini araştırmışlardır. İki kademeli enjeksiyon stratejisinde birinci enjeksiyon emme zamanında ve sabit açılarda uygulanırken ikinci enjeksiyon ÜÖN yakınlığında ve değişen krank açılarında uygulanmıştır. Özellikle ikinci enjeksiyon zamanlamasının HCCI motorlarda yanmanın kontrol edilmesi için oldukça önemli olduğu gösterilmiştir. Çalışmada geciken enjeksiyon zamanlamalarının NO<sub>x</sub> emisyonlarını tüm yakıt karışımları için düşürdüğü, bunun

yanında CO emisyonlarını kısmen artırdığı gözlenmiştir. Ghorbanpour ve Rasekhi (2013) sayısal olarak yürüttükleri ve deneysel olarak geçerliliğini sağladıkları çalışmada HCCI motorlarda emisyonları düşürmek ve verimi artırmak için parametrik bir çalışma yapmışlardır. Üst ölü noktadan 100KA önceden başlayarak 10KA farkla üst ölü noktadan 30KA önceye kadar püskürtme açısını değiştirmişlerdir. Enjeksiyon açısının değişiminin yanında bir diğer enjeksiyon parametresi olan enjeksiyon profili de bu çalışma kapsamında araştırılmıştır. Çalışmada erken püskürtmenin silindir içi basınç ve sıcaklığı artırırken NOx ve is emisyonlarını artırdığı gözlenmiştir. Ayrıca enjeksiyon profilinin HCCI yanması üzerine oldukça etkili olduğu gösterilmiştir.

İncelenen literatür ışığında enjeksiyon stratejilerinin HCCI motorlarda yanmanın kontrol edilmesi ve kirletici emisyonların düşürülmesi için oldukça önemli olduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamın da ise HCCI direk enjeksiyonlu bir motorda enjeksiyon başlama açısı ve süresi değiştirilerek yanma kontrolü sağlanmaya çalışılmaktadır. Bu amaçla üst ölü noktadan 150KA önce başlayarak 30KA artışla üst ölü noktadan 30KA önceye kadar enjeksiyon başlama açısı değiştirilmiştir. Beş farklı enjeksiyon açısı ve süresi için çalışmalar tekrarlanarak belirlenen enjeksiyon stratejisinin motor performansı ve emisyon oluşumuna etkisi incelenmiştir. Bu şekilde değişen enjeksiyon açıları ve ikinci bir enjeksiyona gerek duyulmadan HCCI motorlar için en uygun enjeksiyon açısı belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar enjeksiyon stratejilerinin HCCI motorlar üzerindeki etkisini göstermekte olup literatürdeki eksikliği giderecek niteliktedir.

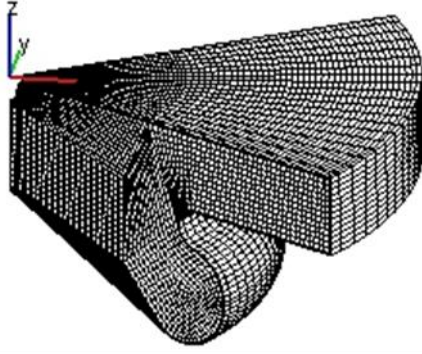
## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışma kapsamında direk enjeksiyonlu HCCI bir motorda yanma fazının kontrol edilmesi ve düşük sıcaklıklı yanma sağlanarak kirletici emisyonların düşürülmesi için farklı enjeksiyon zamanlamaları incelenmiştir. Çalışma AVL-FIRE (AVL-FIRE User Guide, 2013) yazılımı kullanılarak sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada dört silindri dört zamanlı bir dizel motor HCCI şartları altında işletilmiştir. Çalışmada kullanılan motorun teknik özellikleri Tablo 1’de görülmektedir.

**Tablo 1. Sayısal çalışmalarda kullanılan motorun teknik özellikleri**

<b>Motor Tipi</b>	HCCI
<b>Silindir Sayısı</b>	4
<b>Toplam Silindir Hacmi</b>	1.910 lt
<b>Çap</b>	82mm
<b>Strok</b>	90.4mm
<b>Sıkıştırma Oranı</b>	18:1
<b>Soğutma Şekli</b>	Su Soğutmalı
<b>Enjektör Nokta Sayısı</b>	6
<b>Enjektör Püskürtme Açısı</b>	140°
<b>Enjektör Nozul çapı</b>	0.145mm
<b>Maksimum Devir</b>	4000-4500 devir/dakika
<b>Maksimum Tork</b>	280Nm
<b>Maksimum Tork Devri</b>	2000 devir/dakika
<b>Rölanti Devri</b>	850-900

Bu çalışma kapsamında, çözümlere geçilmeden önce incelenen motor şartlarında ağ yapısı test edilmiş ve ağ yapısından bağımsız çözüm elde edilmiştir. Ağ yapısından bağımsız çözümü elde etmek için farklı hücre sayılarında ağ yapısı kullanılarak sabit çalışma şartları için farklı çözümler elde edilmiştir. Çalışmada, çözümlenen kesit model (1/6 sektör model) için ve piston ÜÖN’ da iken 12000, 20000, 50000, 80000, 120000 ve 180000 hücre sayıları için çözüm yapılmıştır. Çalışmada kullanılan model ve uygulanan ağ yapısı Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan model ve ağ yapısı

Hücre sayının az olması çözüm kalitesini düşürürken fazla olması da çözüm kalitesine olumsuz yönde etki etmekte ve çözüm süresini aşırı şekilde uzatmaktadır. Bu çalışma sonucunda piston üst ölü noktada iken 80000 hücre sayılı çözüm kullanılmıştır. Çalışılan bir çok hücre sayısı için sonuçlar elde edilmiş ve belirlenen hücre sayısından sonra sonuçların değişmediği gözlenmiştir. Dolayısıyla sayısal çalışma süresinde göz önünde bulundurularak ilgili hücre sayısı seçilmiştir. Piston alt ölü noktada iken çözüm modeli için yaklaşık 500000 hücre ile analizler yapılmıştır.

Çözümlerin yapılması için bir çok alt model sayısal yazılım aracılığıyla kullanılmıştır. Isıyı ve akışı yöneten süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin yanında, türbülanslı akışın çözümü için içten yanmalı motorlarda

türbülans çözümleri için literatürde sıklıkla tercih edilen k-(zeta)ζ-f türbülans modeli kullanılmıştır (AVL-FIRE User Guide, 2013). Birinci ve ikinci atomizasyonun modellenmesi için WAVE model (Liu ve Ritz, 1993), ısı-kütle transferi ve buharlaşma modeli olarak Dukowicz model (Dukowicz, 1997), sprey duvar etkileşimleri için Walljet model (Naber ve Reitz, 1988) ve silindir içi damlacık çarpışmaları için O'Rourke model (O'Rourke, 1989) kullanılmıştır.

Yanma olayının modellenmesi için alev yüzey yoğunluğu transport denklemleri ve karışım modelinin birlikte olduğu bir difüzyon yanma modeli olan ECFM-3Z model (Combustion Module, 2013) kullanılmıştır. Model AVL-FIRE yazılımı tarafından özellikle dizel benzeri yanma işlemlerinde kullanılmakla birlikte, ECFM modele kıyasla daha fazla kimyasal detay içerir. Dolayısıyla model otomatik ateşlemeli sistemlere oldukça uygundur. ECFM model üzerinde yapılan değişikliklerle birlikte bu model istenilen yanma çözümleri için rahatlıkla kullanılabilir. ECFM-3Z model O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O, H, N, OH ve NO gibi kimyasal türlerin ortalama miktarları için transport denklemler çözmektedir. Modele ait denklemler aşağıdaki gibi sunulmaktadır.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{y}_x}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{y}_x}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \tilde{y}_x}{\partial x_i} \right) = \dot{\omega}_x \quad (1)$$

Burada  $\dot{\omega}_x$  yanma için kaynak terimini  $y_x$  ise türler için kütle oranları ifade eder. Bu durumda taze gazlar ve yanmış gazlar iki

farklı denklemlerle hesaplanır. Denklemlerde u simgesi taze gazları, b simgesi ise yanmış gazları ifade eder.

$$\tilde{y}_{Fu}^u = \frac{\tilde{m}_{Fu}^u}{\bar{m}} = \frac{\bar{\rho}_{Fu}^u}{\bar{\rho}} \quad (2)$$

$$\tilde{y}_{Fu}^b = \frac{\tilde{m}_{Fu}^b}{\bar{m}} = \frac{\bar{\rho}_{Fu}^b}{\bar{\rho}} \quad (3)$$

Model içerisinde bir transport denklem kullanılarak yanmamış gazlar hesaplanmaktadır.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{y}_{Fu}''}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{y}_{Fu}''}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \tilde{y}_{Fu}''}{\partial x_i} \right) = \bar{\rho} \tilde{S}_{Fu}'' + \bar{\omega}_{Fu}'' \quad (4)$$

Denklemden kullanılan S taze gazlar içerisindeki yakıtın buharlaşmasını ifade eden kaynak terimidir. Bu şekilde dizel yanmasına daha uygun bir yanma modeli elde edilmiş olmaktadır.

Ayrıca NO emisyonlarının hesaplanması için genişletilmiş Zeldovic mekanizması ve is emisyonlarının hesaplanması için kinetik is modeli bu çalışma kapsamında tercih edilmiştir (Emission Module, 2013). İlgili mekanizmalar NO ve is emisyonlarının elde edilmesi için literatürde sıklıkla kullanılan ve AVL FIRE tarafından da önerilen mekanizmalardır.

Sayısal çalışmalar belirlenen test motorunda sabit 2000d/d motor devrinde,

sabit yakıt tüketimi (2.9mg/çevrim), sabit sıkıştırma oranı (18.0) ve yaklaşık 300KA analiz süresi altında incelenmiştir. Çalışmanın yürütülmesi bir HCCI motorun farklı enjeksiyon zamanlamalarını içermektedir. Farklı enjeksiyon açıları kullanılarak yakıtın silindir içerisinde kalma süresi değiştirilmiş ve yanma fazı kontrol edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla erken enjeksiyon sayılacak açılardan başlanarak üst ölü noktaya doğru farklı enjeksiyon açıları taranmış ve HCCI şartları oluşturulmuştur. Bu amaçla belirlenen 5 farklı durum ve durumları ifade eden detaylı enjeksiyon parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2. Çalışma parametreleri**

<b>Durum 1</b>	-150 KA	Enjeksiyon ÜÖN’den 150KA önce başlar ve ÜÖN’den 5KA sonra biter.
<b>Durum 2</b>	-120 KA	Enjeksiyon ÜÖN’den 120KA önce başlar ve ÜÖN’den 5KA sonra biter.
<b>Durum 3</b>	-90 KA	Enjeksiyon ÜÖN’den 90KA önce başlar ve ÜÖN’den 5KA sonra biter.
<b>Durum 4</b>	-60 KA	Enjeksiyon ÜÖN’den 60KA önce başlar ve ÜÖN’den 5KA sonra biter.
<b>Durum 5</b>	-30 KA	Enjeksiyon ÜÖN’den 30KA önce başlar ve ÜÖN’den 5KA sonra biter.

### 3. Bulgular

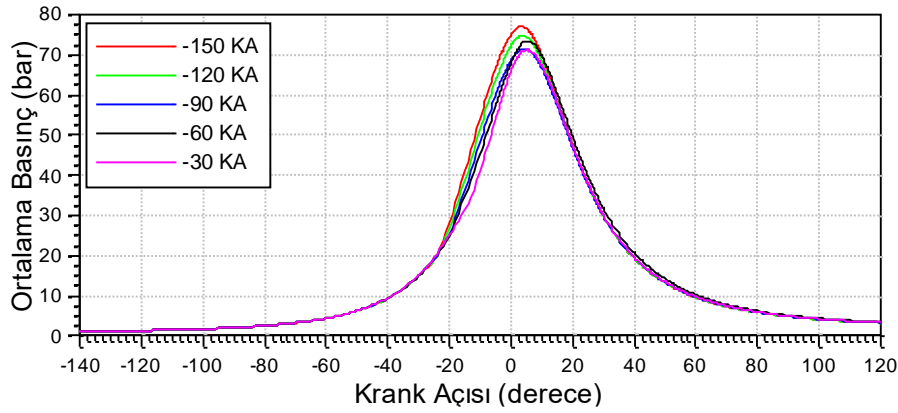
HCCI motorlarda yanmanın kontrol edilmesinin en önemli yöntemlerinden birisi yakıtın farklı zamanlarda yanma odasına gönderilmesidir. Bu şekilde yanma başlangıcının kontrol edilmesi ve düşük sıcaklıkta yanma durumu sağlanmaya çalışılmaktadır. Bu çalışmada HCCI bir

motorda, yakıtın farklı enjeksiyon zamanlarında yanma odasına püskürtülmesi durumları için yanma ve emisyon analizleri yapılmıştır. Çalışma içerisinde üst ölü noktadan önce farklı beş krank açısında (ÜÖN’den 150,120,90,60 ve 30 KA önce) yakıt yanma odasına gönderilmiştir. Dolayısıyla aynı miktarda yakıtın üst ölü noktadan önce gönderilmesine bağlı olarak

yanma karakteristikleri ve emisyonlar üzerine etkileri analiz edilmiştir.

Şekil 2’de krank mili açısına bağlı olarak silindir içi ortalama basınç değişimleri farklı enjeksiyon zamanları için verilmiştir. Yakıt erken krank açılarındaki yanma odasına gönderilirse yanmanın daha erken başladığı ve silindir içi basıncın en yüksek durumlara ulaştığı görülmektedir. Bu durum yakıt

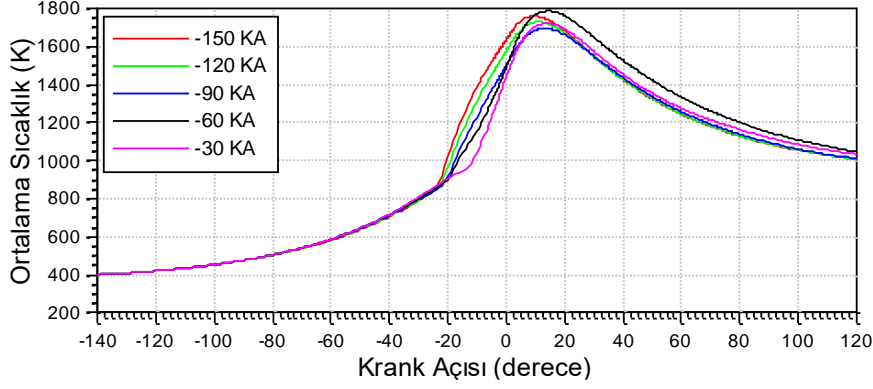
hava karışımının oldukça homojen olması ve yakıt ve oksijenin yüksek oranda buluşmasının bir sonucu olarak görülmektedir. Yakıtın enjeksiyon zamanlaması ÜÖN’ya yaklaştıkça silindir içi basınç kademeli olarak düşmektedir. Fakat özellikle -60KA’ında yapılan enjeksiyonda basıncın bu düşüşü devam ettirmeyip kısmen yükseldiği görülmektedir.



Şekil 2. Farklı enjeksiyon zamanlarında silindir içi basıncın değişimi

Şekil 3’de farklı enjeksiyon zamanlamasına bağlı olarak silindir içi ortalama sıcaklık değişimi görülmektedir. HCCI yanma şartlarında özellikle düşük sıcaklıklı yanma şartlarının sağlanması önemlidir. Şekilde görüldüğü üzere tüm enjeksiyon zamanlamaları için dizel şartlarına göre daha düşük sıcaklıklı yanma elde edilmiştir. Enjeksiyonun erken yapılması durumunda silindir içi sıcaklığın en yüksek olduğu daha sonra ilerleyen enjeksiyon zamanlamasında azaldığı görülmektedir. Ayrıca erken enjeksiyon zamanlamasında yanmanın daha erken başlamasının sonucu olarak

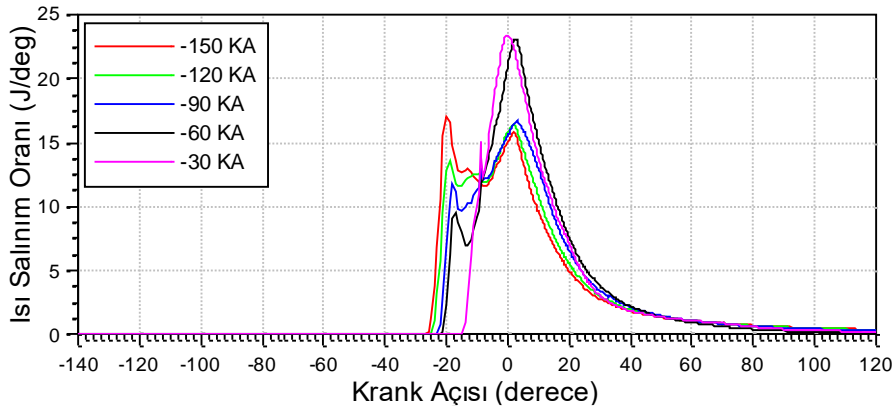
ÜÖN’den önce sıcaklık hızlıca yükselmiş daha sonra hızlıca düşmüştür. Fakat özellikle -60KA’ında sıcaklık yükselmesinin yaklaşık olarak ÜÖN’ya çok yakın bir noktada gerçekleştiği ve devam eden süreçte daha yavaş azaldığı görülmektedir. Bu enjeksiyon şartında yanmanın en ideal noktada yoğun olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Enjeksiyonun -30KA’ında yapıldığı durumda ise yanmanın oldukça geç başladığı ve sıcaklığında hızlı düştüğü görülmektedir.



Şekil 3. Farklı enjeksiyon zamanlarında silindir içi sıcaklığın değişimi

Farklı enjeksiyon zamanlamaları için ısı salınım oranları Şekil 4'de görülmektedir. Enjeksiyon zamanlaması erken olduğu durumlarda (-150KA, -120KA) ısı salınımının oldukça erken başladığı görülmektedir. Bu durumlar için ısı salınımının büyük bölümünün ÜÖN'dan

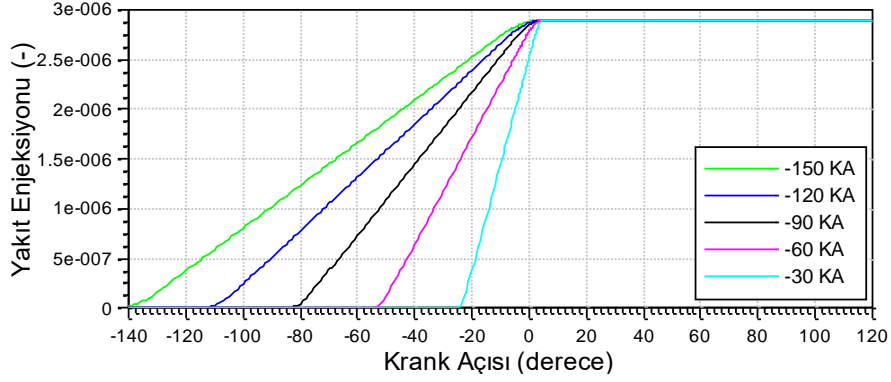
çok önce gerçekleştiği gözlenmiştir. Geç enjeksiyon zamanlamasında (-30KA) ise ısı salınımının çok geç ve hızlı bir şekilde meydana geldiği görülmektedir. Bu durum yanma odası içerisinde yükselen sıcaklığın bir sonucu olarak görülmektedir.



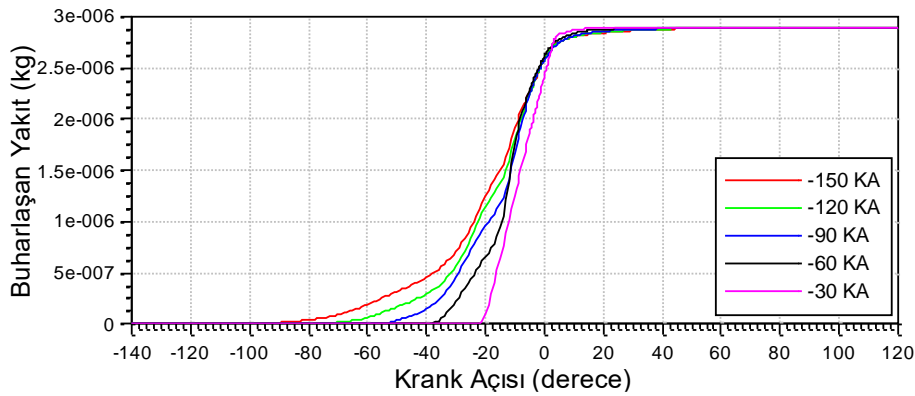
Şekil 4. Farklı enjeksiyon zamanlarında ısı salınım oranının değişimi

Bu çalışmanın parametrelerini gösteren yakıt enjeksiyonunun krank açısına bağlı değişimi ve durumda buharlaşan yakıt miktarı Şekil 5'de görülmektedir. Yakıtın yanma odası içerisinde kaldığı süreye bağlı olarak buharlaşma hızı ve miktarının değişimi, tam yanmanın gerçekleşmesi ve düşük emisyonların elde edilmesi

bakımından oldukça önemlidir. Özellikle erken enjeksiyonda sürenin uzun olmasından dolayı daha fazla yakıtın buharlaştığı ve yanmanın daha erken başladığı anlaşılmaktadır. Geç enjeksiyon durumunda ise yakıtın buharlaşması için yeterli sürenin bulunmadığı bu şekilde anlaşılmaktadır.



a)



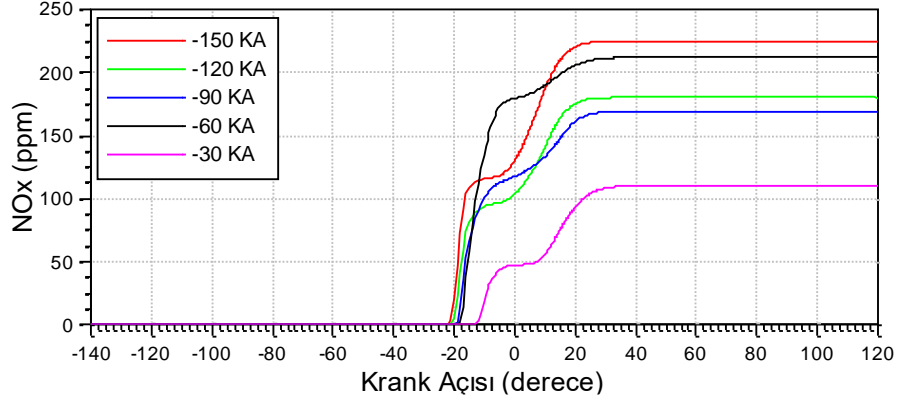
b)

Şekil 5. Farklı enjeksiyon zamanlarında yakıt püskürtme ve buharlaşma durumlarının değişimi

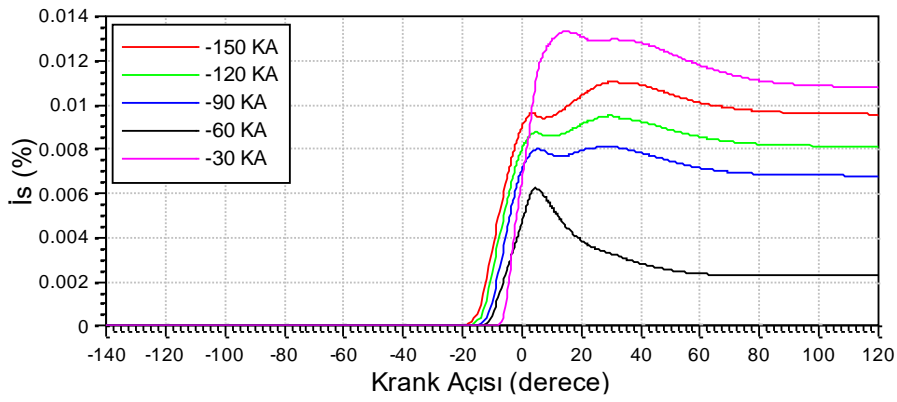
Şekil 6'da farklı enjeksiyon zamanlamaları için NO<sub>x</sub> ve İ<sub>s</sub> emisyonlarının değişimi görülmektedir. NO<sub>x</sub> emisyonları yüksek sıcaklıklı yanma olayının doğal bir sonucudur. Bu sebeple uygulanan HCCI yanma stratejisinde genel olarak düşük yanma sıcaklıkları ve buna bağlı olarak düşük NO<sub>x</sub> emisyonları elde edilmiştir. Çalışma parametrelerinde ise enjeksiyon zamanlaması geciktikçe NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar silindir içi sıcaklık sonuçlarını da doğrular niteliktedir. Fakat -60KA durumunda sıcaklık değişimine de bağlı olarak başlangıçta düşük NO<sub>x</sub> emisyonu elde edilirken ÜÖN'ya yaklaştıkça sıcaklığın çok hızlı yükselmesi sonucu kısmen yüksek NO<sub>x</sub> emisyonları elde

edilmiştir. Şekil 6 (b) de görülen is emisyonları ise kötü yanma ve silindir içerisinde meydana gelen alev sönmelerinin bir sonucudur. Görüldüğü üzere erken enjeksiyon zamanlarında yüksek olan is emisyonları enjeksiyon zamanları geciktikçe kademeli olarak düşmektedir. Dolayısıyla en düşük is emisyonları sırasıyla -60KA ve -90KA enjeksiyon zamanlarında elde edilmiştir. Bu duruma ters bir sonuç olarak ise -30KA görülmektedir. Isı salınımının ve yakıt buharlaşmasının oldukça gecikmesi ve yanmanın kötü olması neticesinde püskürtülen yakıtın oksijen ile buluşmasının zorlaştığı ve buna bağlı is emisyonlarının arttığı görülmektedir.





a)

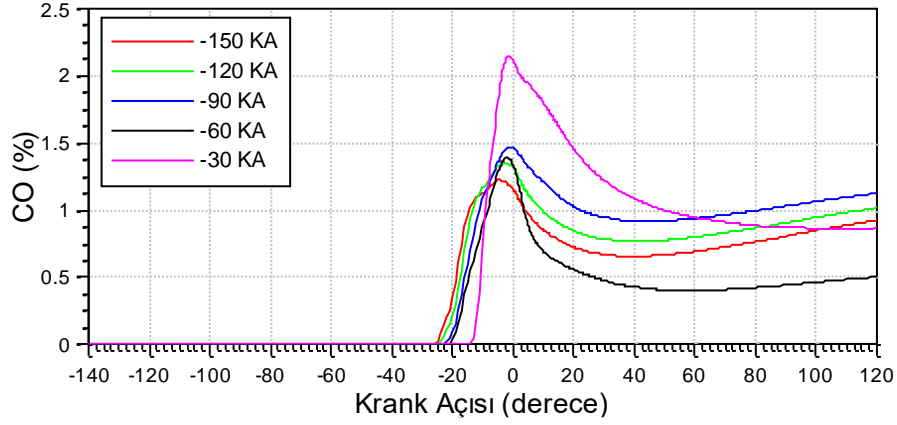


b)

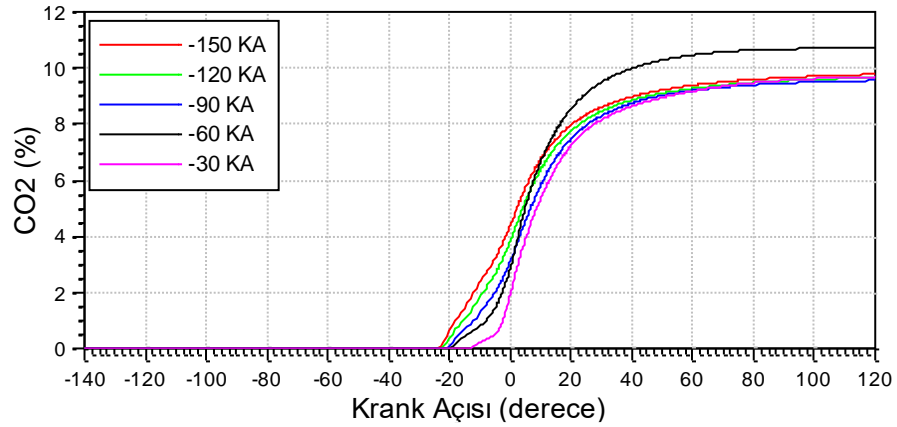
Şekil 6. Farklı enjeksiyon zamanlarında NOx ve is emisyonlarının değişimi

Yanma sonu emisyonlarında önemli olan bir diğer grup ise CO ve CO<sub>2</sub> emisyonlarıdır. Yanma kalitesi gösteren bu sonuçlar zararlı emisyonlar olarak da özellikle incelenmelidir. CO emisyonları kötü yanma ürünü olup istenmeyen emisyonlardır. Şekil 7(a)'da görüldüğü üzere -30KA'da enjeksiyon yapıldığı durumda oldukça yüksek CO emisyonu

elde edilmiştir. Aynı zamanda en düşük CO emisyonu -60KA durumunda gözlenmektedir. CO emisyonları azaldıkça yanma mekanizmalarının doğal bir sonucu olarak tam yanma ürünü olan CO<sub>2</sub> emisyonları artmaktadır. Dolayısıyla Şekil 7(b)'de en yüksek CO<sub>2</sub> emisyonu -60KA da görülmektedir.



a)

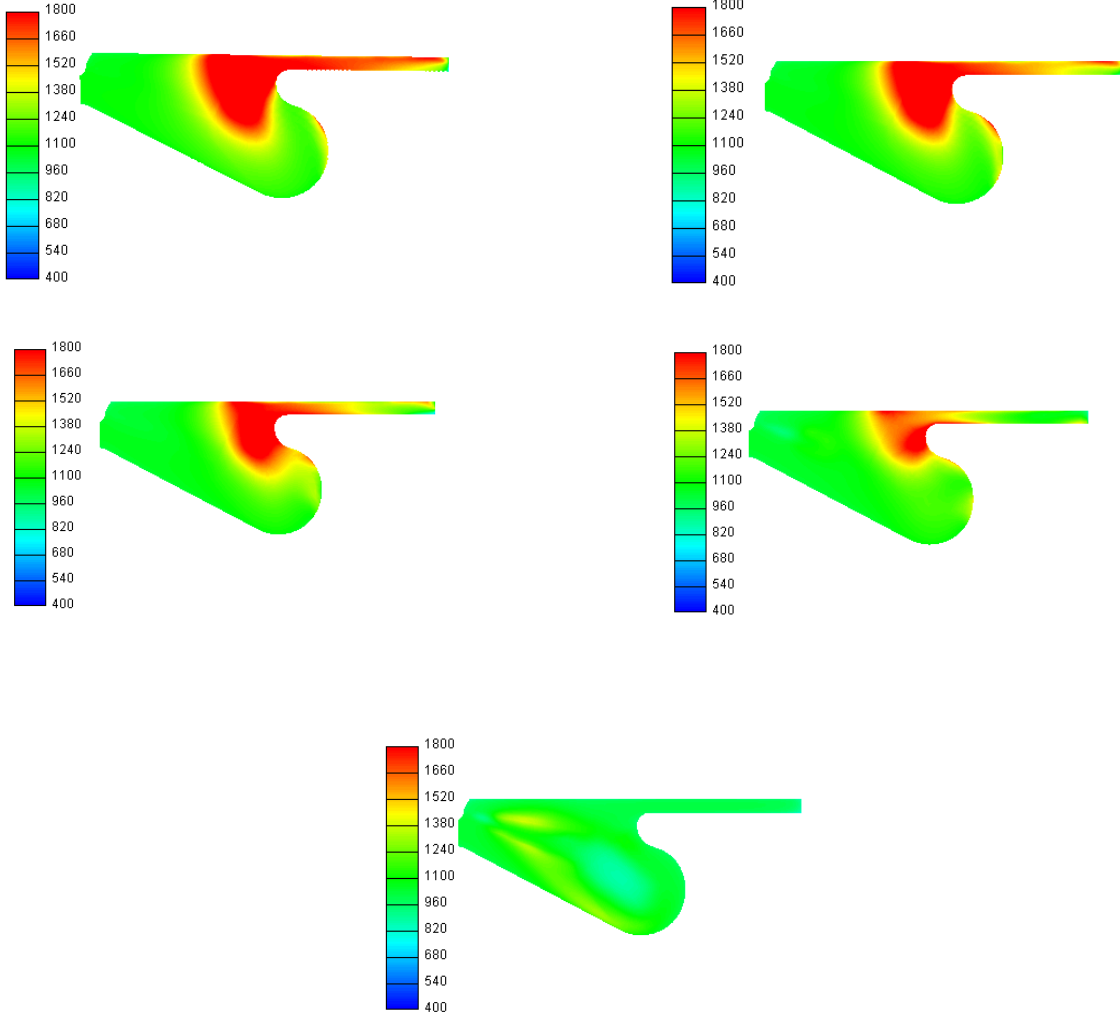


b)

Şekil 7. Farklı enjeksiyon zamanlarında CO ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının değişimi

Şekil 8'de -10KA için sıcaklık dağılımları verilmiştir. Bu şekilde yanma odası içerisinde oluşan yapıları görülmektedir. Ana alev cephesinin piston çanağı ile silindir kapağı arasında meydana geldiği görülmektedir. Özellikle erken enjeksiyon durumunda ana alev cephesi yanında piston çanağı içerisinde farklı noktalarda küçük alev yapılarının olduğu görülmüştür. -90KA ve -

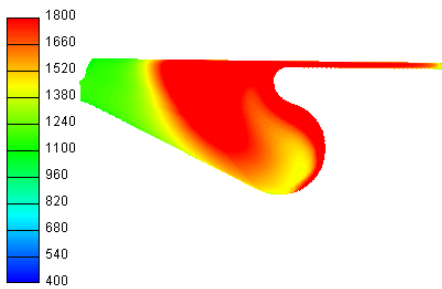
60KA durumunda ise yanmanın kısmen daha düşük sıcaklıklarda başladığı gözlenmiştir. Geç enjeksiyon zamanlamasında ise yakıt enjeksiyonunun henüz bittiği ve yakıtın buharlaşmak üzere olduğu aynı zamanda hızlı bir sıcaklık yükselişi görülmektedir.



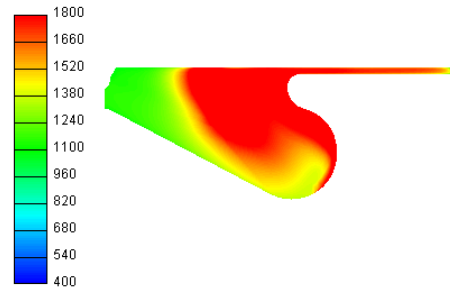
Şekil 8. ÜÖN'dan -10KA önce sıcaklık dağılımı

Şekil 9'da pistonun ÜÖN'da olması durumu görülmektedir. Tüm enjeksiyon zamanlamaları için yanma başlamış ve devam etmektedir. Yanma odalarında farklı sıcaklık bölgeleri, çatallaşan alev yapıları ve farklı bölgelerde yüksek sıcaklık

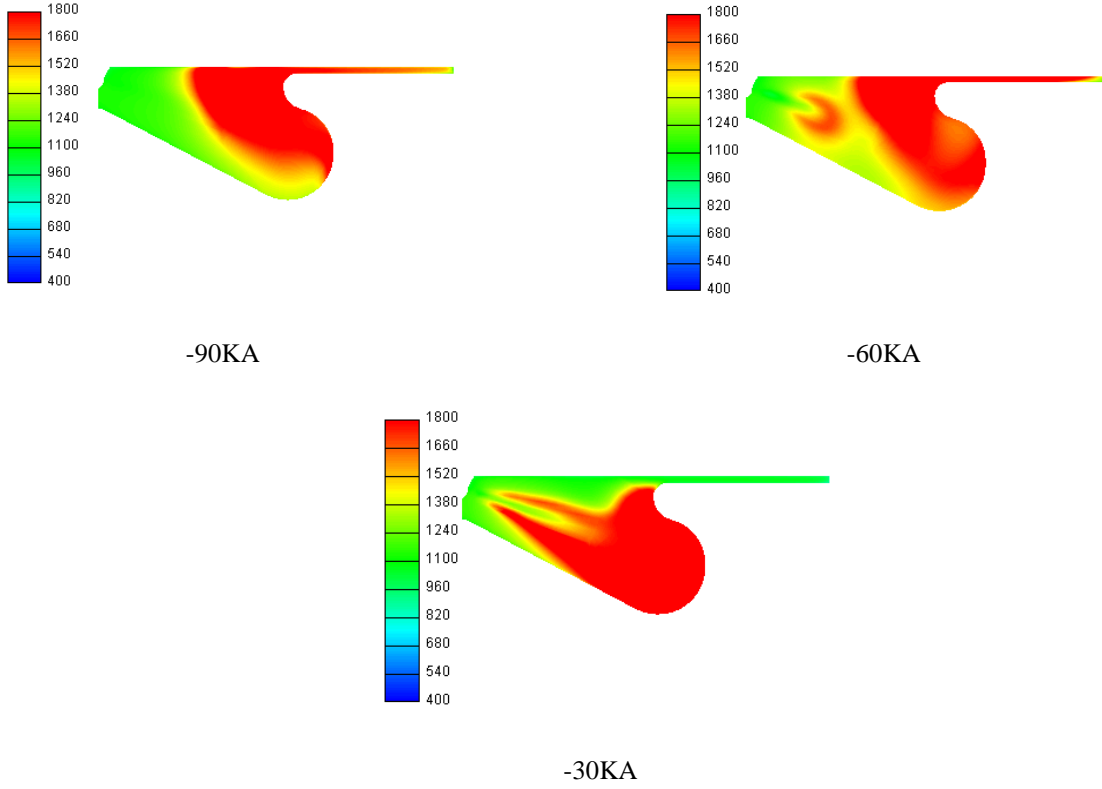
bölgeleri bu KA için açıkça görülmektedir. Geç enjeksiyon durumunda bir önceki sonuçlarda yakıtın buharlaşmasından hemen sonra yanmanın çok hızlı başladığı bu şekilden anlaşılmaktadır.



-150KA



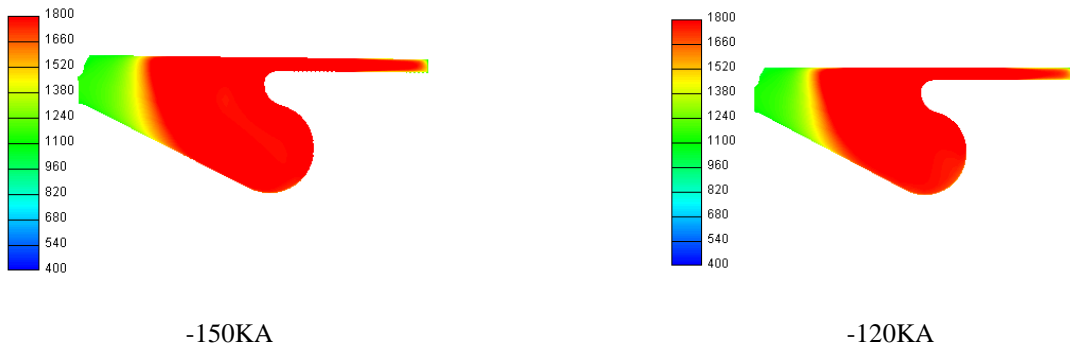
-120KA

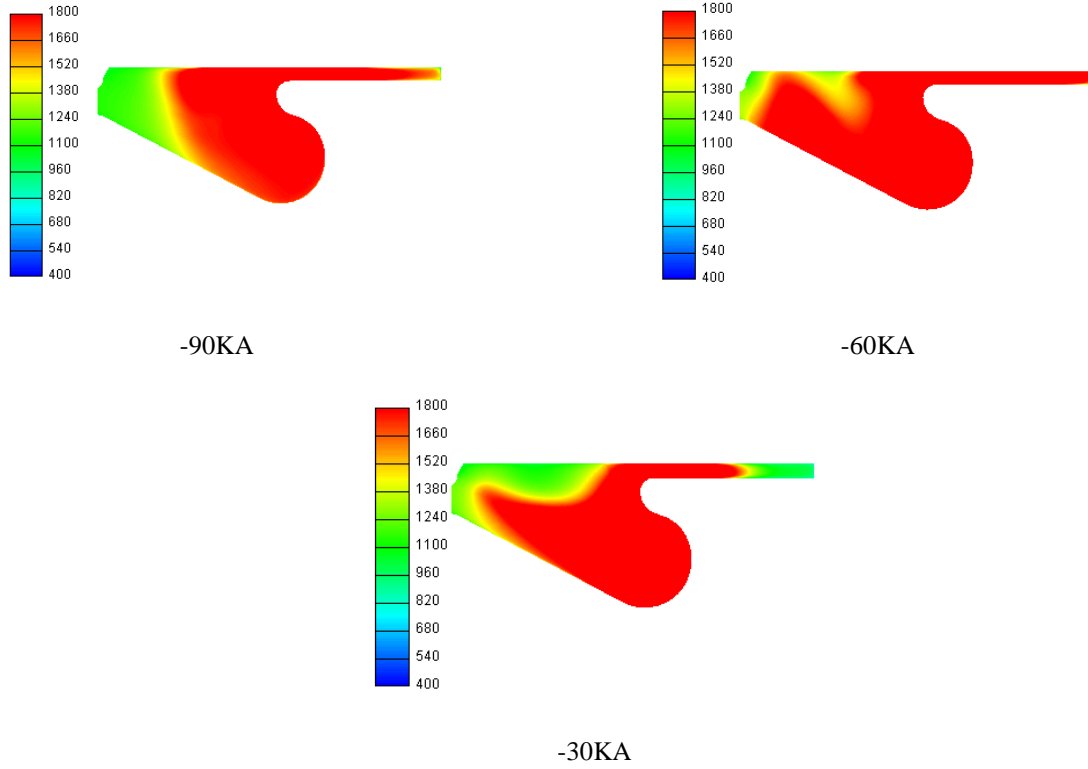


Şekil 9. ÜÖN'da sıcaklık dağılımı

Şekil 10 pistonun ÜÖN'yi geçtikten 10KA sonrası için yanma odası içerisinde sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Tüm enjeksiyon zamanlamaları için alev cephesinin hemen hemen birleştiği ve yanma odası içerisinde yayıldığı görülmektedir. Özellikle silindir merkezinde ve uzak silindir cidarlarına

henüz alev cephesi ulaşamamıştır. Şekilde en üniform ilerlemenin -60KA enjeksiyon zamanlamasında olduğu görülmektedir. Geç enjeksiyon zamanlaması için ise daha önceki şekilde piston çanağında başlayan alev cephesinin silindir içerisinde ilerlemeye başladığı fakat henüz çok küçük olduğu elde edilen önemli bir sonuçtur.





Şekil 10. ÜÖN'dan 10KA sonra sıcaklık dağılımı

#### 4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada HCCI bir motorda farklı enjeksiyon zamanlamalarının motor performansı, yanma karakteristikleri ve emisyon oluşumlarına etkilerinin sayısal olarak incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bilindiği üzere HCCI yanma stratejisi düşük sıcaklıklı yanmanın ve buna bağlı olarak daha düşük kirletici emisyonların arzulandığı yanma konseptidir. HCCI motorlarda yanmanın kontrol edilebilmesi ve istenilen sonuçların elde edilmesi için ise enjeksiyon stratejileri özel önem taşımaktadır. Bu çalışmada AVL FIRE sayısal yazılımı kullanılarak üç boyutlu olarak tasarlanan bir dizel motor HCCI şartlarına adapte edilmiştir. Oluşturulan HCCI motor üzerinde farklı enjeksiyon zamanlamaları denenerek yanma karakteristikleri ve emisyon oluşumları elde

edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre;

- Yakıt erken krank açılarındaki yanma odasına gönderilirse yanmanın daha erken başladığı ve silindir içi basıncın en yüksek durumlara ulaştığı görülmüştür. Bu durum yakıt hava karışımının oldukça homojen olmasının, ayrıca yakıt ve oksijenin yüksek oranda buluşmasının bir sonucu olarak görülmektedir.
- Yakıt enjeksiyonunun erken yapılması durumunda silindir içi sıcaklığın en yüksek olduğu daha sonra ilerleyen enjeksiyon zamanlamalarında azaldığı görülmüştür.
- Yakıt enjeksiyon zamanlamasının erken olduğu durumlarda (-150KA, -120KA) ısı salınımının oldukça erken başladığı görülmüştür. Bu durumlar

için ısı salınımının büyük bölümünün ÜÖN'dan çok önce gerçekleştiği gözlenmiştir.

- Enjeksiyon zamanlaması geciktikçe NOx emisyonlarının azaldığı gözlenmiştir.
- Erken enjeksiyon zamanlarında yüksek olan is emisyonları enjeksiyon zamanları geciktikçe kademeli olarak düşmektedir. Dolayısıyla en düşük is emisyonları sırasıyla -60KA ve -90KA enjeksiyon zamanlarında elde edilmiştir.
- -30KA'da enjeksiyon yapıldığı durumda oldukça yüksek CO emisyonu elde edilmiştir. Aynı zamanda en düşük CO emisyonu -60KA durumunda gözlenmektedir.
- Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar enjeksiyon açısının yanma üzerine etkilerini ayrıntılı olarak göstermektedir. Bu çalışmaların özellikle farklı motor yük şartları altında deneysel olarak tekrarlanması HCCI motorlar için çalışma aralıklarının belirlenmesini kolaylaştıracaktır.

## 5. Teşekkür

Yazarlar, finansal desteklerinden dolayı TEKF 15.11 Nolu proje için Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Başkanlığı'na ve yazılım desteklerinden dolayı AVL firmasına teşekkür eder.

## 6. Kaynaklar

AVL-FIRE User Guide, 2013.

Coskun, G. Demir, U. Soyhan, H. S. Turkcan, A. Ozsezen A. N. and Canakci, M. 2018. "An experimental and modeling study to investigate effects of different injection parameters on a direct injection

HCCI combustion fueled with ethanol-gasoline fuel blends", *Fuel*, 215, 879-891.

Combustion Module, 2013. AVL FIRE user Manual v.2013. 2, 2013.

Dukowicz, J.K. 1997. Quasi-steady droplet change in the presence of convection. informal report Los Alamos Scientific Laboratory, LA7997-MS.

Emission Module, 2013. AVL FIRE user Manual v.2013. 2, 2013.

Fang, Q. Fang, J. Zhuang, J. and Huang, Z. 2012. "Influences of pilot injection and exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions in a HCCI-DI combustion engine", *Applied Thermal Engineering*, 48, 97-104.

Gharehghani, A. 2019. "Load limits of an HCCI engine fueled with natural gas, ethanol, and

Methanol", *Fuel*, 239, 1001-1014.

Ghorbanpour, M., Rasekhi R. 2013. "A parametric investigation of HCCI combustion to reduce emissions and improve efficiency using a CFD model approach", *Fuel*, 106, 157-165.

Jafarmadar, S. Nemati, P. and Khodaie, R. 2015. "Multidimensional modeling of the effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on exergy terms in an HCCI engine fueled with a mixture of natural gas and diesel", *Energy Conversion and Management*, 105, 498-508.

Khandal, S.V. Banapurmath, N.R. Gaitonde V.N. and Hiremath, S.S. 2017. "Paradigm shift from mechanical direct injection diesel engines to advanced injection strategies of diesel homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines- A comprehensive review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 369-384.

Kozarac, D. Taritas, I. Vuilleumier, D. Saxena S. and Dibble, R. W. 2016. "Experimental and numerical analysis of the performance and exhaust gas emissions of a biogas/n-heptane fueled HCCI engine", *Energy*, 115, 180-193.

- Lapuerta, M. Hernandez, J.J. and Gimenez, F. 2000. "Evaluation of exhaust gas recirculation as a technique for reducing diesel engine NOx emissions", *Proc Inst Mech Eng Part D J Autom Eng*, 214, 85–93.
- Liu, A.B. Reitz, R.D. 1993. "Modeling the Effects of Drop Drag and Break-up on Fuel Sprays". *SAE 930072*.
- Mathivanan, K. Mallikarjuna J. M. and Ramesh A. 2016. "Influence of multiple fuel injection strategies on performance and combustion characteristics of a diesel fuelled HCCI engine – An experimental investigation", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 77, 337–346.
- Naber, J.D. Reitz, R.D. 1988. "Modeling Engine Spray/Wall Impingement." *SAE-880107*.
- O'Rourke, P.J. 1989. "Statistical Properties and Numerical Implementation of a Model for Droplet Dispersion in Turbulent Gas" *J. Comput. Physics* 83, 1989.
- Suzuki, H. Koike, N. Ishii H. and Odaka, M. 1997. "Exhaust purification of diesel engines by homogeneous charge with compression ignition part1: experimental investigation of combustion and exhaust emission behavior under pre-mixed homogeneous charge compression ignition method", *SAE Paper No. 970313*.
- Turkcan, A. Altinkurt, M. D. Coskun, G. and Canakci, M. 2018. "Numerical and experimental investigations of the effects of the second injection timing and alcohol-gasoline fuel blends on combustion and emissions of an HCCI-DI engine", *Fuel*, 219, 50–61.
- Yao, M.F. Zheng, Z.L. and Liu, H.F. 2009 "Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines", *Prog. Energ. Combust. Sci.*, 35, 398-437.
- Yousefzadeh, A. and Jahanian, O. 2017. "Using detailed chemical kinetics 3D-CFD model to investigate combustion phase of a CNG-HCCI engine according to control strategy requirements", *Energy Conversion and Management*, 133, 524–534.
- Zheng, M. Reader, G.T. and Hawley, J.G. 2004. "Diesel engine exhaust gas recirculation – a review on advanced and novel concepts". *Energy Convers Manage*, 45, 883–900.