

# HOMOJEN DOLGULU SIKIŞTIRMA İLE ATEŞLEMELİ BİR BENZİN MOTORU İÇİN KAM TASARIMI VE İMALATI

Can ÇINAR\*, Ahmet UYUMAZ\*\*

\* Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, ANKARA

\*\* Otomotiv Programı, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, BURDUR  
[cancinar@gazi.edu.tr](mailto:cancinar@gazi.edu.tr), [auyumaz@mehmetakif.edu.tr](mailto:auyumaz@mehmetakif.edu.tr)

(Geliş/Received: 06.08.2012; Kabul/Accepted: 30.01.2014)

## ÖZET

Bu çalışmada, homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) bir benzin motoru için kam tasarımı ve imalatı yapılmıştır. 38 mm temel daire çapı ve 124° supap açık kalma süresi için, HCCI yanma karakteristiğine uygun 3,5, 5,5 ve 7,5 mm düşük supap kalkma miktarına sahip kamlar tasarlanmıştır. Dairesel yay eğrisi kullanılarak kam profillerinin genel geometrik modelleri elde edilmiş ve elde edilen kam profili modelleri fourier serisi ile ekstrapole edilerek daire yay eğrisine karşılık gelen eşitlikler türetilmiştir. Tasarlanan kam profilleri için iticinin hız, ivme ve sıçrama etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar 5. dereceden klasik spline yöntemi ile elde edilen kamlar ile mukayese edilmiştir. Klasik spline fonksiyonları ile elde edilen kam profillerinde supap kalkma miktarı arttıkça kamın iticiye tek noktadan temas özelliğinin kaybolduğu, iticilerin ivme ve sıçrama değerlerinin çok fazla arttığı görülmüştür. Geometrik modeli elde edilen kam profillerinin fourier serileri ile ekstrapole edilmesiyle, yüksek supap kalkma miktarlarında bile kamın iticiye tek noktadan temas etme özelliğinin kaybolmadığı, düşük hız ve ivme ile çalışması sonucu sürtünme ve atalet kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** HCCI yanma, kam tasarımı, üç dairesel yay eğrisi, fourier serisi, spline metodu

## CAM DESIGN AND MANUFACTURING FOR A HOMOGENEOUS CHARGE COMPRESSION IGNITION GASOLINE ENGINE

### ABSTRACT

In this study, cams were designed and manufactured for a homogenous charge compression ignition (HCCI) gasoline engine. Low lift cams were designed accordance with HCCI combustion characteristics for 38 mm base circular diameter, 124° dwell angle, 3.5, 5.5 and 7.5 mm valve lifts. Generic geometric models of cam profiles were obtained using circular arc curves. Obtained models were fitted with fourier series and circular arc curve was derived from the corresponding equations. Speed, acceleration and jerk effects of the follower were investigated for designed cam profiles. Obtained results were compared with cams obtained by 5<sup>th</sup> degree classical spline method. It has been shown that feature a single point of contact of cam into the follower has been lost and acceleration and jerk values of the follower increased so much as long as valve lift increase in the cam profiles obtained by classical spline functions. It has been shown that feature a single point of contact of cam into the follower has not been lost by fitting fourier series of obtained geometric model of cam profile even high valve lifts. Friction and inertia forces decreased due to the low speed and acceleration operation.

**Keywords:** HCCI combustion, cam design, three circular arc curve, fourier series, spline method

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) yanma, benzinli ve dizel motorların ortak avantajlarına sahip içten yanmalı motorlardaki yeni nesil yanmanın temsilcisi olarak tanınmaktadır. HCCI modunda yanma işlemi, homojen dolgulu ön karışımın yanma odası içerisinde eş zamanlı olarak

yanması sonucu meydana gelmektedir. HCCI yanması ilk olarak 1979 yılında Onishi ve arkadaşları tarafından iki zamanlı benzinli motorlarda yanma kararlılığını iyileştirmek amacıyla uygulanmıştır [1]. Yüksek termik verim ve düşük egzoz emisyonlarına sahip olan HCCI yanması, benzinli veya dizel motor üzerinde değişikliğe gidilerek sağlanabilmektedir. Her iki durumda da yanma, yakıt/hava karışımının kendi

kendine tutuşması ile başlamaktadır. Yakıt/hava karışımı, silindir içerisine gaz keleşi olmaksızın herhangi bir kısılma meydana gelmeden alınmakta ve kısmi motor yüklerinde oldukça fakir karışımlarda çalışabilmektedir. Motor yükü değişimi yakıt/hava oranının kontrolü ile sağlanmaktadır [2-5].

Benzinli motorlarda HCCI dönüşümü için silindir içerisinde yeterli basınç ve sıcaklığın sağlanabilmesi amacıyla sıkıştırma oranının artırılması veya emme havasının ısıtılması gerekmektedir. Motorun sıkıştırma oranının artırılması HCCI çalışmasını düşük yüklerle sınırlandırmakta, motor yüksek yüklerde buji ile ateşleme moduna geçtiğinde vurutuya sebep olmaktadır. Emme havasının doğrudan ısıtılması ise hem zor hem de fazladan maliyet ve ilave sistemler gerektirmektedir. Bu sebeple benzinli motorlarda HCCI dönüşümü için egzoz supabı kalkma miktarı azaltılarak ve kapanma zamanı avansa alınarak, silindirde egzoz gazları tutulmaktadır. Silindirde tutulan art egzoz gazlarının emme manifoldundan kaçışını engellemek için de emme supabı açılma zamanı rötara alınmaktadır [1].

Supaplara hareket veren kamlar yüzey teması ile makine parçalarına kuvvet ileten mekanik elemanlardır. İletilmek istenen mekanik hareketin karakteristiği en uygun kam profilinin tasarımı ile belirlenmektedir. İçten yanmalı motorlarda devir arttıkça sürtünme, atalet kuvvetleri ve gürültü artmakta, mekanik verim azalmaktadır. Kam profillerinin tasarlanmasında trapezoidal, sinüs kam eğrileri, spline, kübik spline, B-spline ve trigonometrik fonksiyonlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde, bilgisayar destekli tasarım teknolojileri ile kinematik optimizasyona dayalı çeşitli kam profili tasarımı metodları geliştirilmiştir. Diğer yandan dinamik optimizasyona dayalı özel kam profili analiz yaklaşımları geliştirilmeye devam edilmektedir. Kam tasarımında yaygın olarak kullanılan metodlardan bir diğeri fourier serileridir. Araştırmacılar fourier serilerini kullanarak süperpozisyon prensibine dayanan metod ile kam tasarımlarını gerçekleştirmişlerdir [6-10].

Mandal ve Naskar [9] tarafından yapılan kam profili tasarımında 6, 7 ve 8. dereceden klasik spline ve B-spline polinomları kullanılmıştır. Karabulut ve Sarıdemir [10] tarafından yapılan kam tasarımında klasik spline yöntemi kullanılmıştır. Farklı kam profillerinin tasarlandığı çalışmada, supap kalkma miktarının ve supap açık kalma sürelerinin hız, ivme ve sıçrama etkileri incelenmiştir. Lanni ve arkadaşları [11] üç daire yayından oluşan kam profillerinin tasarımında analitik tanımlamalar yaparak tasarım amaçlarına ulaşmak için nümerik örneklerle en uygun kam profilini elde etmeye çalışmışlardır. Hsieh [12] tarafından yapılan çalışmada, üç daire yay eğrisi

kullanılarak kam profillerinin genel bir geometrik modeli oluşturulmuş ve homojen koordinatlara dönüşüm yapılarak daire yay eğrisine karşılık gelen eşitlikler türetilmiştir. Tasarlanan kamların kinematik karakteristikleri incelenmiş ve kam profilinin karakteristik çözümünden üç daire yayı kamının imalatı için NC kodları türetilmiştir. Qiu ve arkadaşları [13] kam eğrilerinin belirlenmesinde B-spline yöntemini kullanmışlar ve B-spline metodunda kontrol noktalarını kompleks arama algoritması ile optimize etmişlerdir. Mills ve arkadaşları [14] kam profilinin tasarımında optimum tasarım parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Lampinen [15] kam profillerinin tasarlanmasında bilgisayar tabanlı genetik algoritmadan faydalanmıştır. Liang ve arkadaşları [16] bilgisayar destekli kam tasarımı konusunu incelemişler, kam profilinin ve yayların teğet noktalarının belirlenmesi için matematiksel analiz yapmışlardır.

Benzinli motorlarda HCCI yanması sağlamak amacıyla supap kalkma miktarı ve zamanlaması üzerinde de birçok çalışma yapılmıştır [17-19]. He ve arkadaşları [18] tarafından yapılan çalışmada tek silindirli, dört zamanlı, üstten çift kam miline sahip benzinli bir motorda HCCI yanması sağlamak amacıyla supap açık kalma süreleri ve kalkma miktarları azaltılmıştır. Egzoz supabının erken kapanması ile art gazların miktarının arttığı, silindire alınan hava kütesinin azaldığı görülmüştür. Zhang ve arkadaşları [20] tek silindirli, dört zamanlı benzinli bir HCCI motorda değişken supap zamanlama sistemi ve 9,5 mm'den 0,5 mm'ye kadar farklı supap kalkma miktarlarının yanma ve emisyonlara etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde egzoz supabı kalkma miktarı azaldıkça silindirde tutulan art gaz miktarının arttığı görülmüştür. Silindirde tutulan art gaz miktarı %35 ile %80 arasında değiştirilerek, 1000-4500 dev/dak arasında HCCI yanması sağlanmıştır. Jang ve arkadaşları [19] yaptıkları çalışmada, emme ve egzoz supaplarının maksimum açılma ve kapanma zamanlarını ve egzoz supabı kalkma miktarlarını değiştirerek HCCI yanma karakteristiklerini incelemişlerdir. Deneylerde 2,5, 4 ve 8,4 mm supap kalkma miktarına sahip kam profillerini kullanmışlardır. Negatif supap bindirmesi artırıldığında ve egzoz supabı kalkma miktarı azaldığında silindirde tutulan art egzoz gazlarının arttığı ve yanma fazının avansa kaydığı görülmüştür. Yeom ve arkadaşları [21] yaptıkları çalışmada, LPG ve benzin ile çalışan bir HCCI motorda değişken supap mekanizmasının emisyon ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yanma başlangıcının emme supabı zamanlaması ve hava/yakıt oranından etkilendiğini görmüşlerdir. Emme supabı zamanlaması rötara alındığında HC ve CO emisyonlarının arttığını, CO<sub>2</sub> miktarının azaldığını görmüşlerdir.

Bu çalışmada, tek silindirli, dört zamanlı, benzinli bir motorda HCCI yanması sağlamak amacıyla 3,5, 5,5 ve 7,5 mm supap kalkma miktarı için farklı kam profilleri tasarlanmıştır. Klasik spline yöntemi ve üç daire yaylarından oluşan kam profillerinin geometrik modeli çıkarılarak, fourier serisi ile fit edilmiştir. Elde edilen kamların iticinin hız, ivme ve sıçramasına etkileri incelenmiştir. Fourier serisi ile fit edilen 3,5 ve 5,5 mm kalkma miktarına sahip kamlar imal edilerek, değişken supap mekanizmasında kullanılmıştır.

## 2. KAM PROFİLLERİNİN BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF CAM PROFILES)

HCCI yanmasında meydana gelen hızlı ısı dağılımının önlenmesi ve yanmanın kontrol edilmesinde kullanılan en uygun yöntemlerden biri silindirde art gazların tutulması işlemidir. Art gazların miktarı supap kalkma miktarı azaltılarak ve supap zamanlamaları değiştirilerek kontrol edilebilmektedir. Bu sebeple farklı supap kalkma miktarına sahip kam profillerinin tasarlanması gerekmektedir [1-4].

Bu çalışmada, teknik özellikleri Tablo 1’de verilen tek silindirli, dört zamanlı Ricardo-Hydra marka benzinli bir motorun HCCI yanma moduna dönüşümünü sağlamak amacıyla yeni bir kam milinin tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Motorun, standart kam mili 38 mm temel daire çapı, 124° supap açık kalma süresi ve 9,5 mm supap kalkma miktarına sahiptir. HCCI yanma moduna dönüşüm için 3,5, 5,5 ve 7,5 mm olmak üzere azaltılmış 3 farklı supap kalkma miktarına sahip kamlar tasarlanmış ve imal edilen kamlar değişken supap mekanizmasında kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Motorun teknik özellikleri (Technical specifications of the engine)

Motor tipi	Hydra, Buji ile ateşlemeli	
Çap x kurs (mm)	80,26 x 88,9	
Sıkıştırma oranı	5:1 – 13:1	
Supap zamanlaması	Açılma	Kapanma
Emme supabı	12° ÜÖN önce	56° AÖN sonra
Egzoz supabı	56° AÖN önce	12° ÜÖN sonra
Supap kalkma miktarı (mm)	9,5 mm	

### 2.1. Klasik spline yöntemi ile elde edilen kam profilleri (Cam profiles obtained by classical spline method)

İçten yanmalı motorlarda kullanılan kamların tasarımında yaygın olarak kullanılan metotlardan birisi klasik spline yöntemidir. Bu çalışmada, öncelikle 5. dereceden klasik spline yöntemi ile kam açısı düğüm noktaları ile belirli aralıklara bölünerek her bir aralık için spline fonksiyonu yazılmış ve

kamın hareket fonksiyonu elde edilmiştir [8-10]. Elde edilen fonksiyonların türevleri alınarak iticinin hız, ivme ve sıçrama grafikleri elde edilmiştir. Her bir parçanın genel ifadesi;

$$P(Q) = a \left( \frac{Q-x}{t-x} \right)^5 + b \left( \frac{Q-x}{t-x} \right)^4 + c \left( \frac{Q-x}{t-x} \right)^3 + d \left( \frac{Q-x}{t-x} \right)^2 + e \left( \frac{Q-x}{t-x} \right) + f \quad (1)$$

$(x \leq Q \leq t)$

şeklinde yazılmaktadır. Burada  $Q$  kam açısını,  $x$  ve  $t$  spline fonksiyonunun  $Q$  cinsinden başlangıcını ve sonunu göstermektedir. Supabın açılmaya başladığı an ile kapandığı an arası 4 eşit parçaya bölünürse her bir aralık için yukarıdaki eşitlik;

$$P_1(Q) = a_1 \left( \frac{Q}{0,541} \right)^5 + b_1 \left( \frac{Q}{0,541} \right)^4 + c_1 \left( \frac{Q}{0,541} \right)^3 + d_1 \left( \frac{Q}{0,541} \right)^2 + e_1 \left( \frac{Q}{0,541} \right) + f_1 \dots (0 \leq Q \leq 0,541) \quad (2)$$

$$P_2(Q) = a_2 \left( \frac{Q-0,541}{0,541} \right)^5 + b_2 \left( \frac{Q-0,541}{0,541} \right)^4 + c_2 \left( \frac{Q-0,541}{0,541} \right)^3 + d_2 \left( \frac{Q-0,541}{0,541} \right)^2 + e_2 \left( \frac{Q-0,541}{0,541} \right) + f_2 \dots (0,541 \leq Q \leq 1,082) \quad (3)$$

$$P_3(Q) = a_3 \left( \frac{Q-1,082}{0,541} \right)^5 + b_3 \left( \frac{Q-1,082}{0,541} \right)^4 + c_3 \left( \frac{Q-1,082}{0,541} \right)^3 + d_3 \left( \frac{Q-1,082}{0,541} \right)^2 + e_3 \left( \frac{Q-1,082}{0,541} \right) + f_3 \dots (1,082 \leq Q \leq 1,623) \quad (4)$$

$$P_4(Q) = a_4 \left( \frac{Q-1,623}{0,541} \right)^5 + b_4 \left( \frac{Q-1,623}{0,541} \right)^4 + c_4 \left( \frac{Q-1,623}{0,541} \right)^3 + d_4 \left( \frac{Q-1,623}{0,541} \right)^2 + e_4 \left( \frac{Q-1,623}{0,541} \right) + f_4 \dots (1,623 \leq Q \leq 2,164) \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Elde edilen fonksiyonların hesaplanabilmesi için,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  ve  $f$  katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenen katsayılar yerlerine yazılırsa;

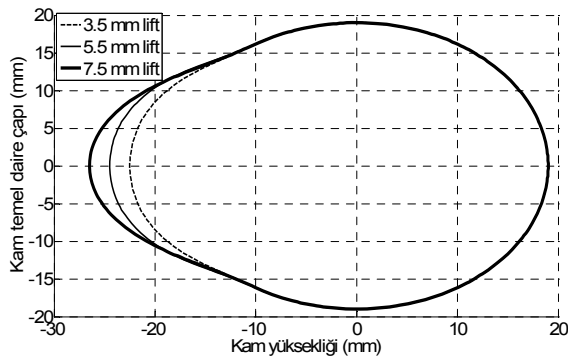
$$P_1(Q) = 1,564 \left( \frac{Q}{0,541} \right)^5 - 5,993 \left( \frac{Q}{0,541} \right)^4 + 6,428 \left( \frac{Q}{0,541} \right)^3 + 0 \left( \frac{Q}{0,541} \right)^2 + 0 \left( \frac{Q}{0,541} \right) + 0 \dots (0 \leq Q \leq 0,541) \quad (6)$$

$$P_2(Q) = -0,542 \left( \frac{Q-0,541}{0,541} \right)^5 + 1,830 \left( \frac{Q-0,541}{0,541} \right)^4 - 1,897 \left( \frac{Q-0,541}{0,541} \right)^3 - 1,026 \left( \frac{Q-0,541}{0,541} \right)^2 + 3,136 \left( \frac{Q-0,541}{0,541} \right) + 2 \dots (0,541 \leq Q \leq 1,082) \quad (7)$$

$$P_3(Q) = 0,542 \left( \frac{Q-1,082}{0,541} \right)^5 - 0,881 \left( \frac{Q-1,082}{0,541} \right)^4 + 0 \left( \frac{Q-1,082}{0,541} \right)^3 - 1,160 \left( \frac{Q-1,082}{0,541} \right)^2 + 0 \left( \frac{Q-1,082}{0,541} \right) + 3,5 \dots (1,082 \leq Q \leq 1,623) \quad (8)$$

$$P_4(Q) = -1,564 \left( \frac{Q-1,623}{0,541} \right)^5 + 1,830 \left( \frac{Q-1,623}{0,541} \right)^4 + 1,897 \left( \frac{Q-1,623}{0,541} \right)^3 - 1,026 \left( \frac{Q-1,623}{0,541} \right)^2 + 3,136 \left( \frac{Q-1,623}{0,541} \right) + 2 \dots (1,623 \leq Q \leq 2,164) \quad (9)$$

eşitlikleri elde edilir. 5. dereceden klasik spline yöntemi ile elde edilen 3,5, 5,5 ve 7,5 mm supap kalkma miktarına sahip kam profilleri Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Klasik spline yöntemi ile elde edilen kam profilleri (Cam profiles obtained by classical spline method)

Şekil 1'de görüldüğü gibi klasik spline yöntemi ile elde edilen kamlarda kalkma miktarı arttıkça kamın iticiye tek noktadan temas özelliği kaybolmaktadır. Bu nedenle itici ile kam arasındaki sürtünme kuvvetleri artmakta ve istenilen supap açılma profili sağlanamamaktadır. Kam profillerinin tasarlanmasında farklı derecelerden polinomik hareket denklemleri, harmonik hareket denklemleri ve farklı spline yöntemleri kullanılmasına rağmen iticilerin maksimum pozitif ve negatif ivme değerleri çok fazla artmış ve kamın iticiye tek noktadan temas sorunu devam etmiştir.

## 2.2. Daire yayı ve fourier serisi ile ekstrapole edilmiş kam profilleri (Cam profiles obtained by circular arc and fitting fourier series)

Daire yayı, kam tasarımı en çok kullanılan yöntemlerinden biridir [8-12,22]. Şekil 2'de daire yay kamının temel geometrik tasarım parametreleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi daire yayı kamı 2 farklı daire yayından oluşmaktadır. Burada,  $Q$  supap açık kalma süresini,  $Q_1$  1. daire yayının maksimum açısını,  $Q_2$  2. daire yayının maksimum

açısını,  $h$  maksimum supap kalkma miktarını,  $r$  temel daire yarıçapını,  $a$  supabın maksimum ivmesini ve  $W$  kam milinin açısal hızını ifade etmektedir [22].

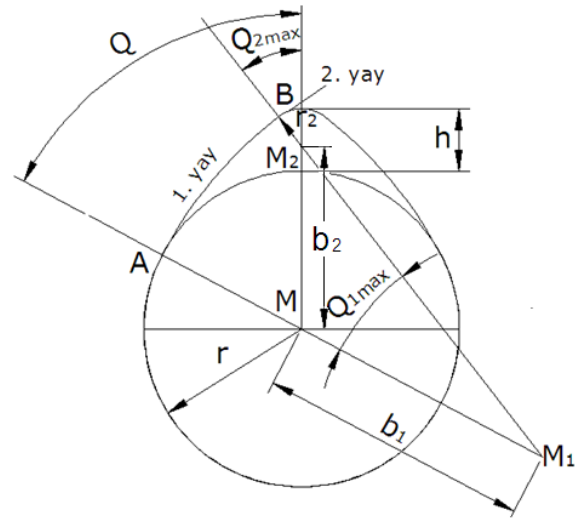
Burada, kam tepesi yarıçapı

$$r_2 = r + h - b_2$$

ve merkez aralığı

$$b_1 = \frac{b_2^2 - (r - r_2)^2}{2(r - r_2 - \cos Q)}$$

olarak hesaplanmaktadır.



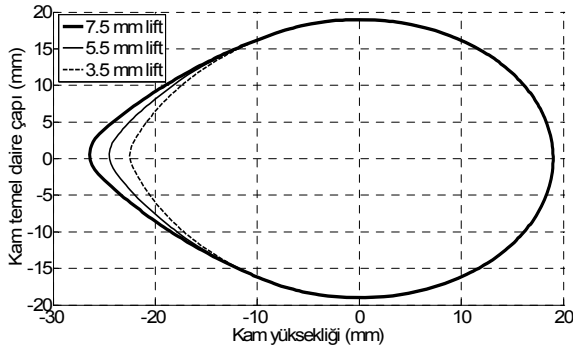
Şekil 2. Daire yayı kamının temel geometrik tasarım parametreleri (Basic geometric design parameters of circular arc cam) [22]

Daire yayı yöntemi ile geometrik modeli elde edilen 3,5, 5,5 ve 7,5 mm supap kalkma miktarına sahip kam profilleri aşağıda belirtilen fourier serisi kullanılarak, ekstrapole edilmiştir. Fourier eşitliğinin kullanılması için yeter sayıda katsayının belirlenmesi gerekmektedir. Eşitlik (10)'da belirtilen  $a_k$  ve  $b_k$  katsayıları belirlenerek, fourier dönüşümü ile kamın hareket fonksiyonunu veren eşitlik (11) elde edilmiştir. Elde edilen eşitlikten iticinin hız, ivme ve sıçrama değişimleri türetilmiştir.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \quad (10)$$

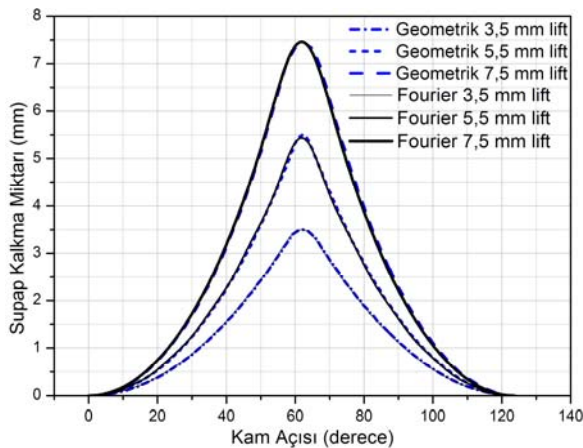
$$F(I) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(T(I)) + b_1 \sin(T(I)) + a_2 \cos(2T(I)) + b_2 \sin(2T(I)) + a_3 \cos(3T(I)) + b_3 \sin(3T(I)) + a_4 \cos(4T(I)) + b_4 \sin(4T(I)) + \dots \quad (11)$$

Şekil 3'de geometrik modeli oluşturulan daire yayı kamlarının fourier serisi ile ekstrapole edilmiş profilleri görülmektedir. Fourier serisi ile elde edilen kam profilleri HCCI karakteristiğine uygun olarak 38 mm temel daire çapı, 124° supap açık kalma süresi, 3,5, 5,5 ve 7,5 mm supap kalkma miktarı için tasarlanmıştır.



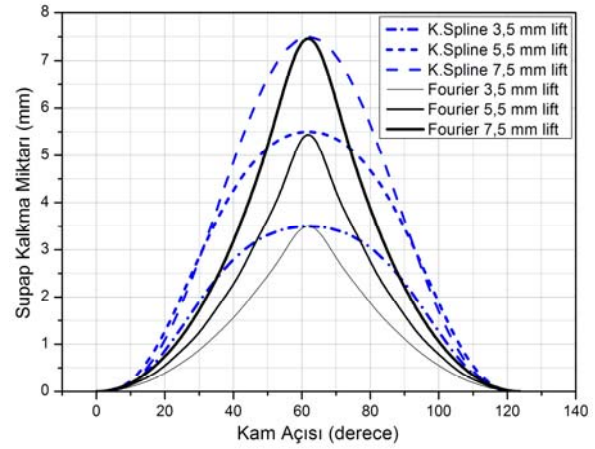
**Şekil 3.** Fourier serisi ile ekstrapole edilmiş kam profillerinin karşılaştırılması (Comparison of cam profiles obtained by fitting fourier series)

Şekil 4'de, motor hızı 4000 dev/dak alınarak geometrik olarak tasarlanan ve fourier serileri ile ekstrapolasyonu yapılan kam profillerinin kalkma miktarı grafiği görülmektedir. Daire yayı ile elde edilen ve fourier serileri ile ekstrapolasyonu yapılan kamların kalkma miktarı grafiğinin düzgün ve homojen bir hareket sağladığı görülmektedir.

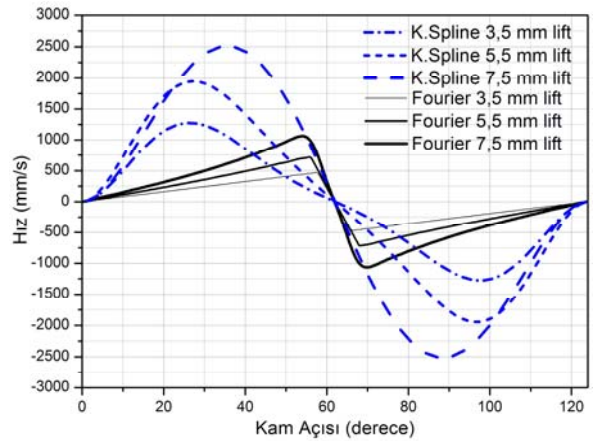


**Şekil 4.** Geometrik olarak elde edilmiş ve fourier serisi ile fit edilmiş kamların kalkma miktarının karşılaştırılması (Comparison of cam lifts obtained by geometrically and fitting fourier series)

Şekil 5'de ise klasik spline yöntemi ve geometrik modelden fourier serisi ile ekstrapole edilmiş kamların kalkma miktarı grafikleri görülmektedir. Şekil 6'da klasik spline ve fourier serileri ile elde edilen kamların hızlarının karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi supap kalkma miktarı arttıkça iticinin hızı artmaktadır. Klasik spline yöntemi ile elde edilen kamlarda maksimum hızlar 7,5 mm supap kalkma miktarı için 2509 mm/s, 5,5 mm supap kalkma miktarı için 1945 mm/s ve 3,5 mm supap kalkma miktarı için 1274 mm/s iken, fourier serisi ile elde edilen kamlarda 7,5 mm supap kalkma miktarı için 1063,75 mm/s, 5,5 mm supap kalkma miktarı için 720,53 mm/s ve 3,5 mm supap kalkma miktarı için 470,30 mm/s'dir.



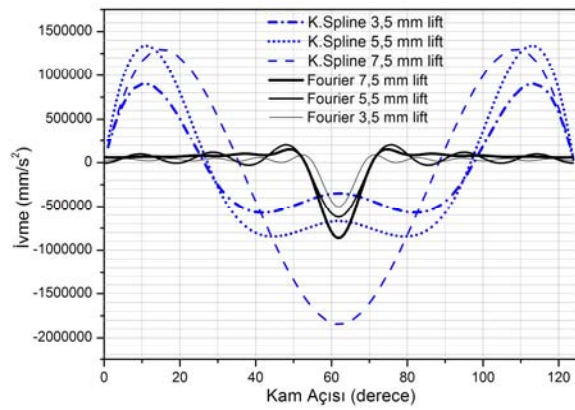
**Şekil 5.** Klasik spline ve fourier serisi ile elde edilen kamların kalkma miktarının karşılaştırılması (Comparison of cam lifts obtained by classical spline and fourier series)



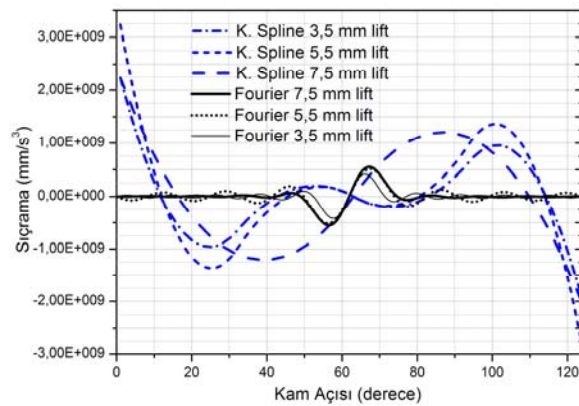
**Şekil 6.** Klasik spline ve fourier serileri ile elde edilen kamların hızlarının karşılaştırılması (Comparison of cam speeds obtained by classical spline and fourier series)

Kam profillerinin tasarımında iki temel amaç göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlardan biri supabın mümkün olan en düşük ivme ile çalışmasını sağlamaktır. Bu iticinin minimum yük altında çalışmasına yardımcı olmaktadır. İkincisi iticideki titreşimli hareketin ortadan kaldırılmasıdır. Klasik

spline ve fourier serileri ile elde edilen kamların ivmelerinin ve sıçramalarının karşılaştırılması sırayla Şekil 7 ve 8'de görülmektedir. Şekil 7 incelendiğinde supap kalkma miktarı arttıkça ivmelerin arttığı görülmektedir. Klasik spline yöntemi ile elde edilen kam profillerinde supap kalkma miktarı arttıkça iticinin ivme ve sıçrama değerlerinin çok fazla arttığı görülmektedir. Kamların ivmeleri arttıkça supap sisteminde meydana gelebilecek titreşim ve darbeleri absorbe etmek amacıyla daha güçlü yayların kullanılması zorunlu hale gelmektedir. Çünkü iticinin ivme değerleri arttıkça sürtünme kuvveti artmakta kam daha hızlı aşınmaktadır [8-10]. İçten yanmalı motorlarda özellikle yüksek hızlarda, kamın iticiye tek noktadan direkt temas etme özelliği kayboldukça atalet ve sürtünme kuvvetleri artmakta, supap sistemi gürültülü ve titreşimli çalışmaktadır [10,15-17].



**Şekil 7.** Klasik spline ve fourier serileri ile elde edilen kamların ivmelerinin karşılaştırılması (Comparison of cam accelerations obtained by classical spline and fourier series)



**Şekil 8.** Klasik spline ve fourier serileri ile elde edilen kamların sıçramalarının karşılaştırılması (Comparison of cam jerks obtained by classical spline and fourier series)

Klasik spline yöntemi ile elde edilen kamlarda maksimum ivmeler 7,5 mm supap kalkma miktarı için  $1,847 \times 10^6$  mm/s<sup>2</sup>, 5,5 mm supap kalkma miktarı için  $1,339 \times 10^6$  mm/s<sup>2</sup> ve 3,5 mm supap kalkma miktarı için  $9,034 \times 10^5$  mm/s<sup>2</sup> iken, fourier serileri ile elde edilen kamlarda 7,5 mm supap kalkma miktarı için  $860701,04$  mm/s<sup>2</sup>, 5,5 mm supap kalkma miktarı için

$620620,26$  mm/s<sup>2</sup> ve 3,5 mm supap kalkma miktarı için  $501061,47$  mm/s<sup>2</sup> elde edilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde klasik spline yöntemi ile elde edilen kamlarda maksimum sıçrama değerleri 7,5 mm supap kalkma miktarı için  $2,238 \times 10^9$  mm/s<sup>3</sup>, 5,5 mm supap kalkma miktarı için  $3,232 \times 10^9$  mm/s<sup>3</sup> ve 3,5 mm supap kalkma miktarı için  $2,238 \times 10^9$  mm/s<sup>3</sup> iken, fourier serileri ile elde edilen kamlarda 7,5 mm supap kalkma miktarı için  $5,514 \times 10^8$  mm/s<sup>3</sup>, 5,5 mm supap kalkma miktarı için  $5,168 \times 10^8$  mm/s<sup>3</sup> ve 3,5 mm supap kalkma miktarı için  $4,193 \times 10^8$  mm/s<sup>3</sup> olduğu görülmüştür.

### 3. KAMLARIN İMALATI (MANUFACTURING OF CAMS)

Tek silindirli, dört zamanlı benzinli HCCI motor için tasarımı yapılan kamların açılma ve kapanma zamanlarını değiştirebilmek amacıyla Şekil 9'da görülen değişken kam mili mekanizması imal edilmiştir.

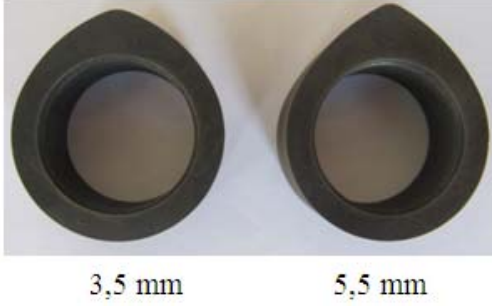


**Şekil 9.** İmal edilen kam mili (Manufactured camshaft)

Şekil 9'da görülen değişken kam mili Ç4140 malzemeden imal edilmiş ve 42 HRC sertliğe kadar sertleştirilmiştir. Kamların mile montajı için kam mili üzerine ve kamların iç yüzüne M28x1 diş açılmıştır. Kamlar istenilen açılma-kapanma zamanlamasına ayarlandığında her iki tarafına yerleştirilen kontra somunlarla sabitlenebilmektedir. Değişken kam mili mekanizması ile farklı kalkma miktarına sahip kamlar, farklı supap açılma-kapanma zamanlamalarında kam miline monte edilebilmekte ve supap bindirmesi değiştirilmektedir.

Şekil 10'da fourier serisi ile elde edilmiş 3,5 ve 5,5 mm kalkma miktarına sahip imal edilen kamlar görülmektedir. Kamlar profil kesiminden önce 60 HRC sertliğe kadar ısıl işlem uygulanarak sertleştirilmiştir. Nümerik olarak elde edilen kam profilleri AutoCAD ortamına aktararak CNC tel erozyon tezgahında imal edilmiştir ve polisaj işlemine tabi tutulmuştur.





**Şekil 10.** 3,5 mm ve 5,5 mm kalkma miktarına sahip kamlar (Cams with 3.5 and 5.5 mm valve lifts)

İmal edilen kamların yüzey pürüzlülük değerleri Time TR200 marka yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile  $\pm 40$   $\mu\text{m}$  hassasiyette ölçülmüştür. Kam yüzeyleri üzerinden 4 mm uzunlukta 0,8 mm aralıklarla 5 örnek ölçüm yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Kamların yüzey pürüzlülüğü ortalama olarak  $Ra=0,4$   $\mu\text{m}$  ölçülmüştür.

İmalatı yapılan kamlar Şekil 9'da görülen değişken supap mekanizmasında Tablo 1'de verilen supap açılma-kapanma derecelerinde ayarlanmak suretiyle motor üzerinde montajı yapılarak çalıştırılmıştır.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Benzinli HCCI motorlarda yanma fazının kontrol edilebilmesi için uygulanan en yaygın yöntem değişken supap zamanlamasıdır. Isı dağılım oranının azaltılması ve yüksek devirlerde vuruntunun engellenmesi için taze dolgu art egzoz gazları ile seyreltilmektedir. Düşük yük ve devirlerde ise silindirde bırakılan egzoz gazları karışımın ısıtılmasını sağlamaktadır. Bu amaçla HCCI motorlarda supap kalkma miktarı azaltılmakta veya egzoz supabı kapanma zamanı avansa alınarak silindirde egzoz gazları tutulmakta ve art egzoz gazlarının emme manifoldundan kaçışını engellemek için emme supabı açılma zamanı geciktirilmektedir. Bu çalışmada 5. dereceden klasik spline yöntemi ve geometrik olarak elde edilen daire yayı kamlarının fourier serisi ile ekstrapole edilmesi ile HCCI yanma karakteristiğine uygun düşük kalkma miktarına sahip kam profilleri tasarlanmıştır. Her iki yöntemle  $124^\circ$  kam açısı, 38 mm temel daire çapı için 3,5, 5,5 ve 7,5 mm kalkma miktarına sahip kamlar tasarlanmış ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen kamlarda supap kalkma miktarı arttıkça hız, ivme ve sıçrama değerleri artmaktadır. Klasik spline fonksiyonları ile elde edilen kam profillerinde supap kalkma miktarı arttıkça kamın iticiye tek noktadan temas özelliğinin kaybolduğu, iticilerin ivme ve sıçrama değerlerinin çok fazla arttığı görülmüştür. Geometrik modeli elde edilen kam profilinin fourier serileri ile ekstrapole edilmesiyle daha düzgün ve iticiye tek noktadan temas eden kam profillerinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Fourier serileri ile elde edilen kamlarda aynı supap açık kalma süresinde supap kalkma miktarı artmasına rağmen kamın iticiye tek

noktadan temas etme özelliğinin kaybolmadığı görülmüştür. Sonuçta iticinin daha düşük hız, ivme ve sıçrama ile çalışması sağlanmıştır. HCCI yanma karakteristiğine uygun olarak tasarlanan kamların imalatı yapılarak motor üzerinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

#### SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

$a$	Maksimum supap ivmesi ( $\text{mm/s}^2$ )
AÖN	Alt ölü nokta
$b_1$	Merkez aralığı (mm)
$h$	Maksimum supap kalkma miktarı (mm)
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
$n$	Motor devri (dev/dak)
NC	Sayısal kontrol
$Q$	Kam açısı (derece)
$Q_1$	1. daire yayının maksimum açısı (derece)
$Q_2$	2. daire yayının maksimum açısı (derece)
$r$	Temel daire yarıçapı (mm)
$r_2$	Kam tepesi yarıçapı (mm)
ÜÖN	Üst ölü nokta
$W$	Kam mili açısal hızı (rad/s)

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Zhao, H., **HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry**, Woodhead Publishing Limited, England, 2007.
2. Xingcai, L., Yuchun, H., Linlin, Z. ve Zhen H., "Experimental Study on the Auto-ignition and Combustion Characteristics in the Homogeneous Charge Compression Ignition HCCI Combustion Operation with Ethanol/n-heptane Blend Fuels by Port Injection", **Fuel**, Cilt 85, 2622-2631, 2006.
3. Arcoumanis, C., Bae, C., Crookes R. ve Kinoshita, E., "The Potential of Di-methyl ether (DME) as an Alternative Fuel for Compression-Ignition Engines", A review, **Fuel**, Cilt 87, 1014-1030, 2008.
4. Megaritis, A., Yap, D. ve Wyszynski, M.L., "Effect of Water Blending on Bioethanol HCCI Combustion with Forced Induction and Residual Gas Trapping", **Energy**, Cilt 32, 2396-2400, 2007.
5. Yap, D., Karlovsky, J., Megaritis, A., Wyszynski, M.L. ve Xu, H., "An Investigation into Propane Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine Operation with Residual Gas Trapping", **Fuel**, Cilt 84, 2372-2379, 2005.
6. Yoon, B.O., **Dynamic Analysis and Optimal Design of Over-Head Cam Systems**, Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering, The University of Michigan, Michigan, 1993.
7. Tsay, D.M. ve Huey, C.O., "Cam Motion Synthesis Using Spline Functions", **Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design**, Cilt 110, 161-165, 1988.

8. Tsay, D.M. ve Huey, C.O., "Spline Functions Applied to the Synthesis and Analysis of Nonrigid Cam-Follower Systems", **Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design**, Cilt 111, 561-569, 1989.
9. Mandal, M. ve Naskar, T.K., "Introduction of Control Points in Splines for Synthesis of Optimized Cam Motion Program", **Mechanism and Machine Theory**, Cilt 44, 255-271, 2009.
10. Karabulut, H. ve Sarıdemir, S., "Farklı Supap Açık Kalma Süreleri ve Kursları İçin Klasik Spline Yöntemi İle Elde Edilen Kam Profillerinin Karşılaştırılması", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 24, 509-515, 2009.
11. Lanni, C., Ceccarelli, M. ve Figliolini, G., "An Analytical Design for Three Circular-Arc Cams", **Mechanism and Machine Theory**, Cilt 37, 915-924, 2002.
12. Hsieh, J.F., "Design and Analysis of Cams with Three Circular-Arc Profiles", **Mechanism and Machine Theory**, Cilt 45, 955-965, 2010.
13. Qiu, H., Lin, J.C., Li, Z.Y., Hiroaki, O., Wang, J. ve Yong, Y., "A Universal Optimal Approach to Cam Curve Design and Its Applications", **Mechanism and Machine Theory**, Cilt 40, 669-692, 2005.
14. Mills, J.K., Notash, L. ve Fenton, R.G., "Optimal Design and Sensitivity Analysis of Flexible cam Mechanisms", **Mechanism and Machine Theory**, Cilt 28, 563-583, 1993.
15. Lampinen, J., "Cam Shape Optimisation by Genetic Algorithm", **Computer Aided Design**, Cilt 35, 727-737, 2003.
16. Liang, Z. ve Quinn, C.J., "Accurate Design of a Cam Profile on the CAD System", **Journal of Manufacturing Systems**, Cilt 10, 501-508, 1991.
17. Erlandsonn, O., "Thermodynamic Simulation of HCCI Engine Systems", Ph.D. Thesis, Lund Institute of Technology, 2002.
18. He, B.Q., Xie, H., Zhang, Y., Qin, J. ve Zhao, H., "An Experimental Study on HCCI Combustion in a Four Stroke Gasoline Engine with Reduced Valve Lift Operations", **SAE Paper**, 2005-01-3736, 2006.
19. Jang, J. ve Bae, C., "Effects of Valve Events on the Engine Efficiency in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine Fueled by Dimethyl Ether", **Fuel**, Cilt 88, 1228-1234, 2009.
20. Zhang, Y., Zhao, H., He, B.Q. ve Xie, H., "Variable-Valve-Actuation-Enabled High-Efficiency Gasoline Engine", **Journal of Automobile Engineering**, Cilt 224, 1081-1095, 2006.
21. Yeom, K., Jang, J. ve Bae, C., "Homogeneous Charge Compression Ignition of LPG and Gasoline Using Variable Valve Timing in an Engine", **Fuel**, Cilt 86, 494-503, 2007.
22. Grohe, H., **Otto ve Dizel Motorları**, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 180-205, 1999.