



## Metan Yakıtlı Sıkıştırılmalı Ateşlemeli Motorlarda Piston Geometrisi ve Yanma Süreci Parametrelerinin Motor Performansına Etkilerinin Kriging Yöntemiyle İncelenmesi

Halil SARAÇOĞLU, Oğuz Salim SÖĞÜT

İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Türkiye  
 saracogluha@itu.edu.tr; ORCID ID: [orcid.org/0000-0001-9155-9085](https://orcid.org/0000-0001-9155-9085)  
 sogut@itu.edu.tr; ORCID ID: [orcid.org/0000-0002-1369-3366](https://orcid.org/0000-0002-1369-3366)

### Öz

Yapılan çalışmada, metan yakıtlı çift yakıtlı bir motorda piston geometrisi ve yanma süreci parametrelerinin motor performansına etkileri incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği temelli motor modellemesi, Deney Tasarımı metodu ve Kriging metamodelleme ile birleştirildi. Sıkıştırılmalı ateşlemeli motorunun modellenmesinde AVL Fire HAD yazılımı kullanılmıştır. Deney Tasarımı metodu olan Latin Hiperküp Örneklemesi vasıtasıyla 6 boyutlu parametre uzayında verimli örneklem noktaları belirlendi. Kriging yöntemiyle, piston geometrisi ve yanma süreci parametrelerinin motor performansına etkisini açıklayan yeterli tahmin bilgileri elde edildi. Önerilen vekil modelin literatürde diğer yaklaşımlarla uyumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmanın sonuçlarının, performansın artırılmasıyla ilgili metan yakıtlı sıkıştırılmalı ateşlemeli motor çalışmalarına katkısı olacağı değerlendirilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Metan, Sıkıştırılmalı Ateşlemeli Motor, Latin Hiperküp Örneklemesi, Kriging Metamodel, Motor Performansı.

## Investigation of the Effects of Piston Geometry and Combustion Process Parameters on Engine Performance of Methane Fuelled Compression Ignition Engines with Kriging Method

### Abstract

In this study, the effects of piston geometry and combustion process parameters on the performance of methane burned dual fuel engines were investigated. For this purpose, three-dimensional computational fluid dynamics-based simulation modelling is combined with method of Design of Experiments (DOE) and Kriging metamodelling. AVL Fire 3-D CFD software was used in the modelling of dual fuel engine. Through the DOE method of Latin Hypercube Sampling efficient sampling points were determined in 6 dimensional parameter space. By Kriging metamodel, sufficient prediction results were obtained about the effect of piston geometry and combustion process parameters on engine performance. It has been found out that the proposed surrogate model is consistent with other approaches in the literature. Furthermore, it has been speculated that the results of this study will contribute to methane fuelled compression ignition engine studies related to performance enhancement.

**Keywords:** Methane, Compression Ignition Engine, Latin Hypercube Sampling, Kriging Metamodel, Engine Performance.

**To cite this article:** Saraçoğlu, H. and Söğüt, O. S. (2017). Metan yakıtlı sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda piston geometrisi ve yanma süreci parametrelerinin motor performansına etkilerinin kriging yöntemiyle incelenmesi. *Journal of ETA Maritime Science*, 5(4), 314-321.

**To link to this article:** <https://dx.doi.org/10.5505/jems.2017.52824>

## 1. Giriş

Metanın ana yakıt olarak kullanıldığı sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda dizayn parametrelerinin performans etkilerinin belirlenmesi zor ve karmaşık bir durumdur. Karmaşıklığı sebepleri, artan parametre sayısı, parametrelerinin etkilerinin aynı anda ölçme zorluğu ve yeterli veriye ulaşmak için daha fazla deney yapılma zorunluluğudur. Parametrelerin etkilerini daha basit ve sade açıklayabilmek için deney tasarımı ve istatistiksel yöntemleri birlikte kullanılmaktadır. İstatistiksel yöntemlerde tahmin için, deneylerden ve CFD sayısal modellemelerden elde edilen verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ham verilerden vekil model oluşturularak birden fazla parametrenin etkileri incelenebilir. Bu çalışmada, sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda 6 dizayn parametresini etkilerini incelemek için deney tasarımı metodunun uygulandığı HAD verilerine, Kriging istatistiksel yöntemi kuruldu.

Geoistatistik alanında yaygın olarak kullanılan Kriging yöntemi, var olan değerlerin yardımıyla oluşturulan vekil model yardımı ile bilinmeyen değerlerin en doğru bir şekilde tahmin etme yöntemidir [1].

Bu yöntemin tekniğinin en önemli özelliği, tam interpolasyon sağlamasıdır. Son araştırma sonuçları, Kriging'in diğer polinom regresyon metamodellerine göre daha doğru tahminde bulunabileceğini göstermektedir [2]. Ayrıca tahmin yeteneği yüksek olan bu yöntem, simülasyon optimizasyonunda veya model tabanlı mühendislik tasarım yaklaşımları için tercih edilmektedir.

Kriging modelinin avantajı, var olan noktalardaki verilerin, lineer bileşimi ile bilinmeyen noktalardaki değerleri kestiren bir interpolasyon yöntemi olmasıdır [3]. Bu modelin diğer avantajları, tahmin sapmasının minimum olması, tahminlerinin yansız (unbiased) olması ve tahminler için bir hata değeri belirlemesidir. Bu

avantajları; Kriging algoritmasını En İyi Doğrusal Yansız Tahminleyici (Best Linear Unbiased Estimator- BLUE) yöntemi haline getirmiştir [4].

Literatürde, içten yanmalı motorlarda Kriging yönteminin kullanıldığı çalışmalar incelenmiştir. Yapılan bir çalışmada kullanılan Kriging yöntemi ile metan yakılan sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda en az emisyon oluşturabilecek yanma odası geometrisi tasarlanmıştır [5]. Bu çalışmanın bir amacı da, fakir yanma sonucunda CO ve HC emisyonlarının artışı yanma odasının geometrisini optimize ederek azaltmaktır. Diğer bir çalışmada, Kriging yöntemi kullanılarak, metan ana yakıt yakılan ve dizel pilot yakıt kullanılan doğalgaz motorlarının yakıt püskürtme sistemleri dizayn edilmiştir. Gaz püskürtme sistemlerine ait bir bileşenin tasarımı için farklı yakıt püskürtme stratejilerinin karşılaştırıldığı analitik bir çalışmadır [6].

Kriging yöntemi ve genetik algoritmanın birlikte kullanıldığı bir çalışmada, dizel motoru modellenerek dizayn parametrelerinin motor karakteristiklerine ve  $NO_x$  emisyonu oluşumuna etkilerine dair bilgiler elde edilmiştir [7]. Yapılan diğer bir çalışmada, bir dizel motorunun yanma odası geometrisinin tasarımı için Kriging yöntemi kullanılmıştır. Giriş parametreleri olarak piston geometrisi ve yakıt püskürtme açısı kullanılmıştır. Çıkış parametreleri için PM, CO ve NO emisyonları ile motor performans parametresi olarak efektif ısıl verim tercih edilmiştir [8]. Kriging yönteminin kullanıldığı benzin motorlarıyla ilgili bir çalışmada, farklı fiziksel ve kimyasal yapıdaki benzin türevlerinin performans, verimlilik ve emisyonlara etkisi değerlendirilmiştir [9].

Yapılan bu çalışmanın amacı, metan yakılan sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda, piston geometrisi ve yanma sürecine ait parametrelerin, motor gücüne etkilerini analiz etmektir. İlk aşamada, belli aralıklardaki giriş parametreleri

ve bu parametrelerin etkilediği motor performansına ait çıkış parametreleri belirlenmiştir.

İkinci aşamada, giriş parametrelerinden verimli örneklemeler elde etmek için, deney tasarımı araçlarından Latin Hiperküp Örneklemeye uygulanmıştır. Elde edilen parametre verimli örneklem noktalarından, AVL Fire yanma analizi programı kullanılarak HAD temelli veri seti elde edilmiştir.

Üçüncü aşamada HAD deney verilerinden indike güce ait sonuçlara Kriging modeli kurulmuştur. Ayrıca kurulan Kriging İndike güç modeli; LHÖ'de rastgele oluşturulan örneklem noktalarına ait deney test verileri ile doğrulanmıştır.

Son aşamada, dizayn parametrelerinin Kriging indike güç modeline ait iyi sonuçları incelenmiştir. Elde edilen tahmin bilgileri, literatürdeki bilgilerle karşılaştırılarak genel trende uyumluluğu test edilmiştir.

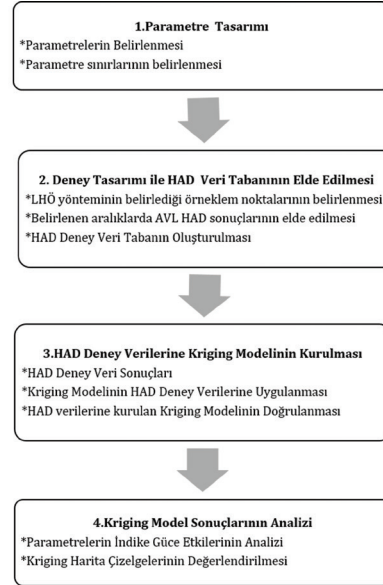
## 2. İstatiksel Modelinin Kurulması

Bu çalışmada, tahmin yeteneği yüksek olan Kriging yöntemi, metan yakılan sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda, piston geometrisi ve yanma sürecine ait parametrelerin performansa etkilerini analiz etmek için kurulmuştur.

İstatiksel modellemede kullanılan deney verileri, AVL Fire programından sıkıştırılmalı ateşlemeli motor simülasyonlarından elde edilen HAD test sonuçlarıdır. Metan yakılan sıkıştırılmalı ateşlemeli motorun Kriging İndike güç modeli, AVL Fire programının HAD verilerinin üzerine kurulmuştur. Bu sonuçlardan, deney tasarım metodlarından olan LHÖ'nün belirlediği rastgele bir sıraya göre ve yeterli sayıda oluşturulan örneklemelere göre yapılmıştır. Kriging yöntemin nasıl uygulandığını gösteren akış diyagramı Şekil 1'de belirtilmiştir.

### 2.1. Dizayn Parametrelerinin Belirlenmesi

Deney tasarımında dizayn parametrelerinin belirlenmesinde,



Şekil 1. Kriging Modelinin Uygulanması için Oluşturulan Akış Diyagramı

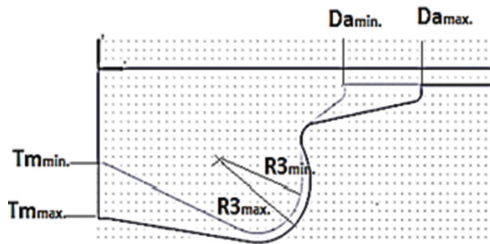
birbirinden etkilenmeyen bağımsız parametreler tercih edilmiştir. Etkileri incelenecek parametreler; piston geometrisine ve yanma sürecine ait dizayn parametreleridir.

Piston geometrisinin seçimi için AVL Fire piston örnekleri incelenmiştir. Seçilen piston geometrisi, sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda sık kullanılan iç bükey (çanak) şeklinde olmasıdır. Seçilen bu geometriye ait parametreler; piston çanağı dış çapı ( $D_a$ ), piston çanağı girintisinin yarıçapı ( $R_3$ ) ve piston çanağı merkez derinliğinden ( $T_m$ ) oluşmakta olup Tablo 1'de belirtilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan Piston Geometrisi Parametreleri

Piston geometrisi parametreleri	Kısaltma
Piston çanağının dış çapı	Da
Piston çanağının yarıçapı	R3
Piston çanağının merkez derinliği	Tm

Piston geometrisinin parametre aralıklarının seçiminde, AVL Fire programında düzgün ağ yapısı oluşturan sınırlar belirlenmiştir. Parametre sınırları, piston çanağını daraltmakta ve genişletmektedir. Piston çanağındaki bu fiziksel değişimin indike güce etkileri incelenmiştir. Modellenen piston geometrisi ve parametrelerin minimum ve maksimum durumlarındaki değişim, Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Modellenen Piston Geometrisi ve Parametreler

Yanma süreci ile ilgili parametreler; pilot yakıt püskürtme zamanı, pilot yakıt püskürtme açısı ve yakıt fazlalık oranı seçilmiş ve Tablo 2'de belirtilmiştir. Bağımlı parametre olarak da İndike güç seçilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan Yanma Süreci Parametreleri

Yanma süreci parametreleri	Kısaltma
Yakıt fazlalık oranı	EqRat
Pilot yakıt püskürtme zamanı	SOI
Yakıt püskürtme açısı	SpAng

Pilot yakıt püskürtme zamanı, erken ve geç püskürtmenin etkilerini görmek için ÜÖN (720 KMA) ile ÜÖN'dan 40 KMA aralıkları arasında incelenmiştir. Yakıt püskürtme açısına ait aralıklar, piston

çanağının merkezine (120°) ve çanağın dış bölgesine (170°) yapılan püskürtmenin, yanma sürecine etkilerini belirlemek için seçilmiştir. Yakıt fazlalık oranı sınırları, fakir ve zengin metan-hava karışımının yanma sürecine etkilerine ait bilgileri elde etmek için belirlenmiştir. Belirlenen dizayn parametrelerine ait aralıklar Tablo 3'te belirtilmiştir.

## 2.2. Latin Hiperküp Örnekleme Uygulanması

Deney tasarımı yöntemlerinden olan Latin Hiperküp Örnekleme, N boyutlu uzayda deney verilerini verimli bir şekilde dağılmasını belirlemektedir [10]. Bu çalışmada, piston dizaynı ve yanma parametrelerinin oluşturduğu HAD sonuç verilerine Latin Hiperküp Örnekleme yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemin kullanılmasının amacı; 6 boyutlu parametre uzayında en iyi şekilde örnekleme (temsil etme) noktaları elde ederek sonuçlara ait veri kalitesini artırmaktır.

6 boyutlu parametre uzayı için Latin Hiper Küp yöntemi ile 25 adet örneklem noktasından ortak 25 adet HAD sonuçlarına ait veri tabanı elde edilmiştir. Ayrıca kullanılan istatistiksel modelin doğrulanması için LHÖ'ün ürettiği örneklem noktalarına ait 10 adet HAD veri tabanı ile test edilmiştir. Kriging İndike güç modeli toplamda 35 adet HAD deney sonucunun oluşturduğu veri setine kurulmuştur.

## 2.3. HAD ile Veri Üretimi

Bu çalışmada, vekil modeli için gerekli olan veri üretimi, HAD temelli AVL Fire yanma yazılımı kullanarak sıkıştırılmalı ateşlemeli motor modellenmiştir. Modellenen motorun özelliği, metan yakıtının emme

Tablo 3. Belirlenen Giriş Parametrelerine Ait Aralıklar

Sınırlar	Da (mm)	R3 (mm)	Tm (mm)	SOI (KMA)	SpAng	EqRat
Minimum	0,065	0,0059	0,009	680	120°	0.45
Maximum	0,085	0,0069	0,015	720	170°	0.85

manifolduna püskürtülerek pilot dizel yakıtıyla ateşlemenin gerçekleştiği sıkıştırılmalı ateşlemeli yanmadır. LHÖ'nün belirlediği 35 adet ait örneklem noktaları için 35 adet indike güç HAD verisi elde edilmiştir. Modellenen bu motora ait ortak özellikler Tablo 4'te belirtilmiştir.

**Tablo 4.** Metan Yakıtlı Sıkıştırılmalı Ateşlemeli Motorun Özellikleri

Özellikler	Değerler
Piston/ Strok	104mm/115mm
Motor devri	1500 rpm
Ana yakıt	Metan
Pilot yakıt	Diesel-D1
EGR kütle fraksiyonu	0
Püskürtülen pilot yakıt miktarı	12.954 mg
Püskürtme süresi	1.444 ms
Emme valfinin kapanması	586 KMA
Egzoz valfinin açılması	850 KMA

### 3. Kriging Yöntemi

Kriging yöntemi, 6 boyutlu parametre uzayında AVL programında oluşturulan HAD veri seti için kurularak bu verilerden vekil model oluşturulmuştur. Kurulan bu modelin oluşturulmasında önemli rol oynayan farklı bir baz fonksiyonu kullanılmıştır. Baz fonksiyonu, bir veri setinin konumsal sürekliliğinin veya değişiminin sayısal bir ölçüsünü ifade eder ve aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\hat{f}(x) = w^T \psi = \sum_{i=1}^n W_i \psi(\|x^j - c^{(i)}\|) \quad j=1, \dots, n \quad (1)$$

$$\psi^i = \exp\left(-\sum_{j=1}^k Q_j |X_j^{(i)} - x_j|^{p_j}\right) \quad (2)$$

$\hat{f}(x)$  = Tahmin modeline ait fonksiyon

$x$  = dizayn parametreleri

$W$  = parametre tahmin setine ait verileri

$k$  = dizayn parametre sayısı

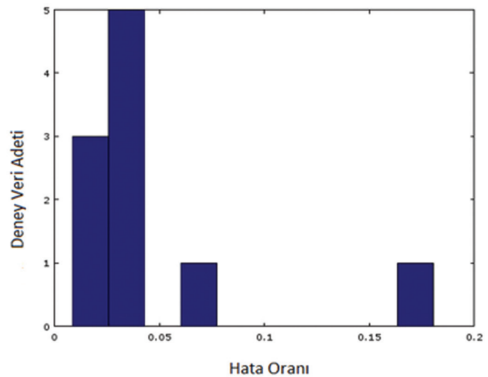
$\theta$  ve  $p$  = belirlenen katsayılar

Polinom regresyonundan farklı olarak  $\psi$  fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon, veri

noktalarıyla tanımlı baz fonksiyonları olarak tanımlanır. Tahmin edilecek değerler, analiz verilerine uzaklığına bağlı olarak bulunur.  $W_i$  katsayıları hatayı minimize edecek şekilde bulunur. Bu baz fonksiyonunun oluşturduğu eğri; lineer, çeşitli mertebeden polinomlar, üstel fonksiyon, Gauss fonksiyonu, kuvvet serileri, vb. gibi çeşitli model fonksiyonlardan oluşabilir. Kriging yöntemiyle ilgili detaylı bilgiler; Forrester ve arkadaşlarının yazdığı Engineering Design via Surrogate Modelling A Practical Guide kitabında detaylı bilgi bulunmaktadır [11]. Ayrıca Kriging yöntemine ait hesaplamalar için 'MATLAB Kriging Toolbox-DACE' yazılımı kullanılmıştır.

### 3.1. Kriging Modelinin Doğrulanması

Bu çalışmada, Kriging yönteminin seçilmesinin en önemli sebebi, doğru tahmin yeteneğine sahip olmasıdır. Kurulan Kriging modelinin tutarlılığını ve doğru tahmin gücünü test etmek için doğrulanması gerekmektedir. Kriging yönteminin bir avantajı da, rastgele belirlenen verilerle kendi kendini test edebilme yeteneğine sahip olmasıdır. Bunun için LHÖ'nin oluşturduğu 10 örneklem noktası, Kriging İndike Güç modelinin doğrulanması için kullanılmıştır. Kurulan Kriging İndike Güç modelinin standart hata histogramları incelendiğinde,



**Şekil 3.** Kriging İndike Güç Modeline Ait Standart Hata Histogramu

8 veriye ait hata oranının % 5'in altında kaldığı Şekil 3'te görülmektedir. Bu durum, Kriging modelinin doğru kurulduğunu ve elde edilen tahmin bilgilerinin güvenilir olduğunu göstermektedir.

#### 4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Dizayn parametrelerinin oluşturduğu HAD verilerine, motor performansına ait Kriging İndike Güç modeli kurulmuştur. Kurulan Kriging modeli, piston geometrisi ve yanma süreci parametrelerinin motor performansına etkileri hakkında tahmin bilgileri vermiştir. Bu çalışmada, Kriging modellerinden indike güce ait harita konturlarının incelenmesiyle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

##### 4.1. Dizayn Parametrelerinin Kriging İndike Güç Modelinin İyi Sonuçlarına Etkileri

Piston geometrisi ve yanma parametrelerinin etkilerini belirlemek için Kriging İndike güç modeline ait iyi sonuçları incelenmiştir. Sonuçlar, Kriging modelinde kullanılan piston geometrisi ve yanma parametrelerine ait belirlenen sınırlar için incelenmiştir. Tablo 5'te belirtildiği üzere, piston geometrisi parametrelerinden Da'daki azalma durumunun indike gücü artırıcı etkisi olduğu saptanmıştır. Tm ve R3'deki geometrilerinde azalma, İndike gücü artıran yönde etkilemektedir. Sonuç olarak, piston çanağına ait üç parametredeki azalmanın, indike gücü artırdığı tahmin edilmiştir.

**Tablo 5.** Piston Geometrisi Parametrelerinin Kriging Ni Modelinin İyi Sonuçlarına Etkileri

Parametrenin durumu	İndike güce artma
Da'da azalma	% 100
Tm'de azalma	% 60
R3'de azalma	% 50

Yanma süreci parametrelerinin, Kriging İndike gücün iyi sonuçlarına etkisi, Tablo 6'da belirtilmiştir. Pilot yakıtın geç

püskürtmenin, indike gücü artırıcı etkisi olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Ayrıca yakıt püskürtmenin, piston çanağının merkezine doğru yapılması, İndike gücü pozitif yönde etkilemektedir. Yakıt fazlalık oranına ait Kriging modelinde belirtilen sınırlarda, İndike güce etkilerini açıklayabilecek anlamlı bilgiye ulaşılamamıştır.

**Tablo 6.** Yanma Süreci Parametrelerinin Kriging Ni Modelinin İyi Sonuçlarına Etkileri

Parametrenin durumu	İndike güce artma
SOL'da gecikme	% 65
SpAng'da azaltma	% 50
EqRat'daki değişim	Belirsiz

##### 4.2. Kriging Modeline Ait Sonuçların Literatürdeki Sonuçlarla Karşılaştırılması

Metan yakılan sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda piston geometrisi ve yanma süreci parametrelerinin indike güce etkisiyle ilgili literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalara ait genel bilgiler, Kriging İndike Güç modelinden elde edilen tahmin bilgileri ile karşılaştırılmıştır.

Metan yakıtlı sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda piston geometrisinin performansa etkileriyle ilgili bazı çalışmalarda; piston çanağının dar olan geometrilerinde, çanak içinde daha iyi dağılımlı gaz karışımının oluşması motor performansını iyileştirdiği vurgulanmıştır [12, 13, 14]. Ayrıca, bu çalışmalarda dar çanak geometrilerde metan hava karışımlarında zengin, daha geniş çanak geometrilerinde ise fakir karışım olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Diğer bir çalışmada çok değişkenli genetik algoritma kullanılarak, pistonun geometrik şekline bağlı olarak motor performansı optimize edilmiştir. Dar piston çanağı geometrilerinde zengin karışım, daha geniş piston çanağı geometrilerinde ise fakir karışım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Dar piston çanağı geometrilerinde, motor performansı ile ilgili daha olumlu sonuçlar

elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, pilot yakıt püskürtme açısının indike güce etkisi incelenmiştir. Elde edilen bilgi; yakıt huzmesinin piston çanağının merkezine doğru püskürtülmesinin ısı verimi artırmaktadır. [15]. Yakıt püskürtme açısıyla ilgili diğer çalışmada da benzer sonuç bulunmuştur. Bu çalışmada; pilot yakıt püskürtme açısının daraltılarak piston çanağı merkezine yapılan püskürtmeyle yanma veriminin arttığı belirtilmiştir [16].

Yakıt püskürtme zamanının etkisiyle ilgili bir çalışmada, pilot yakıtın erken püskürtülmesinin, motor çıkış torku ve ısı verimi düşürmektedir. Fakat maksimum basınç ve basınç artış hızını artırdığı bilgisi elde edilmiştir. Sonuç olarak yakıt püskürtme zamanının geciktirilmesiyle indike gücün arttığı belirtilmiştir [17]. Benzer bir çalışmada da erken püskürtme ile özgül yakıt tüketiminin arttığı, fakat indike gücün azaldığı, ayrıca egzoz çıkış sıcaklıklarının yükseldiğini belirtmişlerdir [18].

Kriging yöntemiyle ilgili yapılan bu çalışmada piston çanağı dış çapının, merkez çapının ve derinliğinin azalmasının, daha geniş çaplı ve daha derin piston çanağı geometrilerine göre daha iyi motor performansı sonuçları ortaya çıkmıştır. Ayrıca elde edilen tahmin sonuçlarından yakıt püskürtmenin geciktirilmesinin motor performansı değerlerini iyileştiren bir trend olduğunu ortaya çıkmıştır. Kriging İndike Güç modelinden, yakıt püskürtme açısının piston çanağının merkezine doğru gönderilmesinin yanma verimini pozitif etkilediği bilgisine ulaşılmıştır.

## 5. Genel Sonuçlar

Bu çalışma, Kriging yönteminin Deney Dizaynı ile birleştirilerek metan yakıtlı sıkıştırılmalı motorlarda dizayn parametrelerinin motor performansına etkileri incelenmiştir. Deney Dizaynı araçlarından olan Latin Hiperküp Örneklem ile verimli örneklem noktaları

elde edilmiştir. 6 boyutlu parametre uzayı için HAD sonuç verileri oluşturulmuştur. Bu verilerden, Kriging İndike Güç vekil modeli oluşturulmuştur. Kriging İndike güç modelinin doğrulanmasıyla, bu yöntemin tutarlı ve doğru kurulduğu sonucuna ulaşılmıştır. Doğrulanana modele ait Kriging harita çizelgeleri incelenerek dizayn parametrelerinin indike güce etkileri değerlendirilmiştir.

Bu çalışmadan, Kriging modelinden elde edilen tahmin bilgilerinin, literatürdeki genel trend bilgileriyle uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bu çalışmanın metan yakıtlı sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda performansının artırılmasıyla ilgili çalışmalara katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

## 6. Kısaltmalar

KMA: Krank mil açısı; HAD: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği; Da: Piston çanağı dış çapı; R3: Piston çanağı yarıçapı; Tm: Piston çanağı merkez derinliği; SpAng: Yakıt püskürtme açısı; SOI: Yakıt püskürtme başlangıcı; LHÖ: Latin Hiperküp Örnekleme; ÜÖN: Üst ölü nokta; Ni: İndike güç.

## Kaynaklar

- [1] Deutsch, C. V. ve Journel, A. G. (1992). Geostatistical Software Library and User's Guide. New York, Oxford University Press.
- [2] Papalambros, P. Y. ve Wilde, D. J. (2000). Principles of Optimal Design. Cambridge University Press.
- [3] Journel, A. G. ve Huijbregts CH. J. (1981). Mining Geostatistics. Academic Press.
- [4] Boogaart, K. G. van den ve Schaeben, H. (2002). Kriging of Regionalized Directions, Axes, and Orientations I. Directions and Axes. Mathematical Geology, 2002:34(5):479 -503.
- [5] Wang, B., Li, T., Ge, L. L. ve Ogawa, H. (2016). Optimization of combustion chamber geometry for natural

- gas engines with diesel micro-pilot-induced ignition. *Energy Conversion and Management*, 2016:122:552-563 DOI: 10.1016/j.enconman.2016.06.027
- [6] Dellino, G., Lino, P., Meloni, C., ve Rizzo, A. (2009). Kriging metamodel management in the design optimization of a CNG injection system. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2009:79(8):2345-2360 DOI: 10.1016/j.matcom.2009.01.013
- [7] Brahmi E. H., Denis-Vidal, L., Cherfi, Z. ve Boudaoud, N. (2009). Statistical modeling and optimization for diesel engine calibration. *Industrial Electronics*, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE. DOI: 10.1109/IECON.2009.5414811.
- [8] Jeong, S., Minemura, Y. ve Obayashi, S. (2006). Optimization of Combustion Chamber for Diesel Engine Using Kriging Model. *Journal of Fluid Science and Technology*, 2006:1(2):138-146. DOI:10.1299/jfst.1.138.
- [9] de Carvalho, R. N., Machado, G. B., ve Colaço, M. J. (2017). Estimating gasoline performance in internal combustion engines with simulation metamodels. *Fuel*, 2017:193:230-240.
- [10] McKay M. D., Conover W. J. ve Beckman, R. J. (1979). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 1979:21(2).
- [11] Forrester, A. I. J., Sóbester, A. ve Keane A. (2008). *Engineering Design via Surrogate Modelling A Practical Guide*.
- [12] Yadollahi, B. ve Boroomand, M. (2013). The effect of combustion chamber geometry on injection and mixture preparation in a CNG direct injection SI engine. *Fuel*, 2013:107: 52-62. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.01.004
- [13] Olsson, K. ve Johansson, B. (1995). *Combustion Chambers for Natural Gas SI Engines Part 2: Combustion and Emissions*. SAE Technical Paper 950517. DOI:10.4271/950517.
- [14] Sahoo, B. B., Sahoo, N. ve Saha, U. K. (2009). Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009:13(6-7): 1151-1184.
- [15] de Risi, A., Donateo, T. ve Laforgia, D. (2003). Optimization of the Combustion Chamber of Direct Injection Diesel Engines. SAE Technical Paper 2003-01-1064, 2003. DOI:10.4271/2003-01-1064.
- [16] Kim, M. Y. ve Lee, C. S. (2007). Effect of a narrow fuel spray angle and a dual injection configuration on the improvement of exhaust emissions in a HCCI diesel engine. *Fuel*, 2007:86(17-18):2871-2880. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.03.016.
- [17] Selim M. Y. E. (2013). Sensitivity of Dual fuel engine combustion and knocking limits to gaseous limits to gaseous fuel composition. *Energy Conversion and Management*, 2013:45(3):411-425. DOI: 10.1016/S0196-8904(03)00150-X.
- [18] Nwafor O. M. I. (2000). Effect of choice of pilot fuel on the performance of natural gas in diesel engines. *Renewable Energy*, 2000:21(3-4):495-504. DOI:10.1016/S0960-1481(99)00132-9.