

YÜKSELTİLMİŞ D-OPTİMAL DİZAYN YÖNTEMİ KULLANILARAK MÜHENDİSLİK DİZAYNLARINDA ETKİNLİĞİN GELİŞTİRİLMESİ: 'SENTETİK JET' DİZAYN OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI

Hv.SS.Yzb.Fatih ERDOĞAN

HHO Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü
Uzay Bilimleri Anabilim Dalı, 34149, Yeşilyurt, İstanbul
ferdogan@hho.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, mühendislik dizaynlarında analiz ve optimizasyon için kullanılan deney dizaynı yaklaşımlarını araştırmak ve uygulamasını yapmaktır. Kaynak araştırmasında, çeşitli deney dizaynı yöntemleri üzerinde çalışılmış, her dizaynın avantajları ve kısıtları tartışılmış ve değerlendirilmiştir.

Uygulama bölümünde yapılan sentetik jet dizaynı çalışmasında, yükseltilmiş D-Optimal dizayn kullanılmıştır. Minimum nokta deney dizaynı modeli oluşturmak ve etkinliği arttırmak amacıyla, bu çalışmada bilgisayar destekli D-Optimal dizayn yöntemi tercih edilmiştir. Deneylerin dizaynını oluşturmak ve deney sonuçlarının analizlerini yapmak amacıyla, deney dizaynı yazılımını da içeren JMP programı kullanılmıştır.

Hava akışını kontrol çalışmalarında, üzerinde çalışılan sistemin performansı genellikle bilgisayar destekli analiz programları yardımıyla değerlendirilmektedir. Bu çalışmada deneyler, NASA tarafından geliştirilmiş bir simülasyon programı olan CFL3D (Computational Fluids Laboratory 3-Dimensional flow solver) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın uygulama safhasında kullanılan D-Optimal dizayn yöntemine, yükseltme tekniği uygulanarak elde edilen model geliştirilmesi sağlanmıştır. Dizaynı yükseltmek amacıyla, modele istatistiksel yöntemler vasıtasıyla birtakım deneyler ilave edilmiştir. Deneylerin sonuçlarının analizi safhasında, elde edilen verilerin istatistiksel değerlerinin geliştirilerek, matematiksel modele en uygun şekilde dahil edilmesi amacıyla logaritmik transformasyon yöntemi kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, yükseltilmiş D-Optimal dizayn yöntemi kullanılarak oluşturulan modelin, dizayn, analiz, ve optimizasyon çalışmalarındaki etkinliği belirgin bir şekilde geliştirilebildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deney Dizaynı, D-optimal, Minimum Nokta Dizayn, Optimizasyon, Sentetik Jet, Yükseltme.

IMPROVING EFFICIENCY IN ENGINEERING DESIGN USING AUGMENTED D-OPTIMAL DESIGNS: 'SYNTHETIC JET' DESIGN OPTIMIZATION STUDY

ABSTRACT

The purpose of this study is to study the efficiency of several "design of experiments" (DOE) approaches used for the analysis and optimization of engineering designs. A literature review is conducted to study various "design of experiments" methods and the advantages and limitations of each method are discussed.

As an application, Augmented D-Optimal designs are utilized for a design study of 'synthetic jet'.

With the objective of improving efficiency and providing a minimum point experimental design model, computer-aided D-optimal method is preferred for this study. For setting up the design of the experiments and for performing the analysis of results, the "DOE" software-JMP is used.

In flow control studies, performance of the system is generally reached by the use of computerized analysis programs. In this study, the experiments are performed using a NASA-developed flow simulation program, CFL3D (Computational Fluids Laboratory 3-Dimensional flow solver). The D-optimal design in this study is enhanced by applying the augmentation method. For augmenting the design, additional experiments are statistically placed in the model.

Results indicate that utilizing the augmented D-Optimal designs have led to improving efficiency significantly in the design, analysis and optimization studies performed in this thesis.

Keywords: Optimization, Genetic Algorithms, Neural Networks; Simulated Annealing

1.GİRİŞ

Deney dizaynı, yapılacak en uygun deneyleri belirli bir matematiksel modele uygun hale getirmeye yarayan istatistiksel bir tekniktir [4].

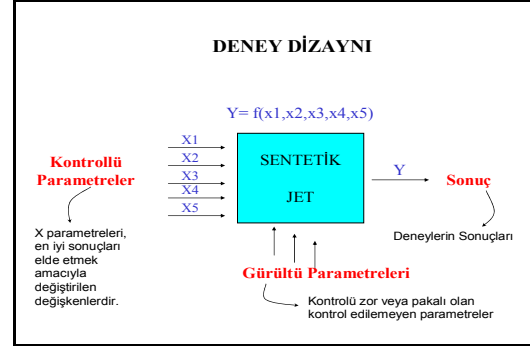
Başka bir tanıma göre ise, uygulamalı istatistiğin, belirli bir parametreyi ya da parametre gurubunu kontrol eden faktörleri değerlendirmek amacıyla kontrollü deneyler planlayan, uygulayan, analiz eden ve yorumlayan bir dalıdır [5].

Bir deneyde, bir ya da birden çok parametre (faktör) kontrollü bir şekilde değiştirilerek, yapılan bu değişikliklerin, elde edilmesi amaçlanan sonuç üzerindeki etkileri gözlemlenir. Deney dizaynı, elde edilen sonuçların geçerli ve objektif sonuçlar olması amacıyla deneylerin planlanmasında oldukça etkin bir yoldur.

Rekabetçi piyasalarda, ürün ya da süreçlerin yüksek kalite ve düşük maliyetlerle elde edilmesi büyük önem arz etmektedir. Ürün ömrü maliyetinin büyük bir kısmı dizayn safhasında gerçekleşmektedir. Bir dizayn yapıldıktan sonra, istenmeyen şartların ortaya çıkması ya da sonradan değişikliklerin yapılmak istendiği durumlarda, yeniden dizayn oluşturma maliyetleri çok yüksek olabilmektedir. Dizayn maliyetleri, kaliteden ödün vermeden optimize edilebilirse rekabet açısından büyük avantajlar sağlayabilmektedir.

Deney dizaynı yöntemlerini kullanmanın en büyük faydası, organize bir yaklaşım sağlamasıdır. Bu sayede, deneysel problemlere yaklaşım, hem basit hem de karmaşık sistemler için kolaylaşmaktadır. Bu yöntemler sayesinde, deneysel amaçlar tanımlandıktan sonra, duruma en uygun dizayn yöntemi belirlenebilir ve belirlenen amaçlar doğrultusunda yapılması gerekli olan deneyler planlı bir şekilde gerçekleştirilebilir.

Deney dizaynı yaklaşımının az sayıda deney gerektirdiği açıktır. "Belirlenen deneyler, deneysel bir plana dayandığı için, her deney birbiriyle mantıksal ve teorik açıdan tercih edilen bir şekilde diğerleriyle bağlantılıdır" [6]. Böylece, deney dizaynı yardımıyla, tüm parametrelerin birleşik etkisi değerlendirilebildiği için, çalışılan sistem hakkında daha faydalı ve daha kesin bilgiler elde etmek mümkün olabilmektedir. Kurulan modelin uygunluğu doğrulandıktan sonra, parametrelerin etkileri matematiksel bir model elde etmek amacıyla regresyon analizleri yapılarak değerlendirilmektedir [6].



Şekil 1. Deney dizaynında kullanılan parametreler ve sonuçlar

Dizayn optimizasyonu, kalite, performans ve maliyet üzerinde önemli etkisi olması sebebiyle, ürün ve süreçlerin dizaynında ve değerlendirilmesinde etkin bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Dizayn optimizasyonunun amacı, sistem kısıtlarını gözönüne alarak performans karakteristiklerini optimize eden dizayn değişkenlerinin değerlerini belirlemek için dizayn bölgesini etkin bir şekilde incelemektir [1]. Uzay ve havacılık alanındaki birçok çalışmada, burada uygulaması yapılan 'sentetik jet' dizaynında olduğu gibi, genellikle deneyleri uygulamak için uzun zaman gerektiren karmaşık algoritmalarından faydalanan bilgisayar programları kullanılır.

2. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmanın amacı, uzay ve havacılık alanında kullanılan sentetik jet dizaynı uygulamasında, minimum nokta deney dizaynı oluşturabilmek ve bu amaçla bilgisayar yardımıyla dizayn optimizasyonuna uygun olan D-optimal yöntemini uygulamaktır.

Havacılık ve uzay alanındaki dizayn çalışmaları yüksek maliyetli ve zaman alıcı olabilmektedir. Bu sebeple, yapılan çalışmada, sarfedilen çabayı azaltmak ve etkinliği arttırmak amacıyla minimum nokta D-optimal deney dizaynı yöntemi kullanılmıştır. Bu dizayn yöntemi sentetik jet dizaynı uygulamasında kullanılarak etkin ve esnek bir dizayn elde edilmiştir.

2.1. Araştırma Sorusu

D-optimal deneysel dizayn yönteminin uzay ve havacılık alanındaki uygulamaları kısıtlı miktarda olmuştur. Bu çalışmada belirlenen D-optimal minimum nokta dizayna ilave olarak, deney noktaları eklemek yoluyla, deney datasının yükseltilmesi yöntemi de kullanılmıştır. Bu uygulama, belirgin bir zaman tasarrufu sağlamanın yanında, dizayna özellikle dahil edilmesi istenen noktaların ilave edilebilmesine ve modelin doğruluğunun daha iyi değerlendirilebilmesi için çeşitli istatistiksel analizler yapılabilmesine imkan vermektedir. Bu çalışma, D-optimal dizaynın sentetik jet dizayn uygulamasında, etkinliği arttırmak amacıyla ne derece uygulanabilir

olduğunu sorgulamakta ve araştırmaktadır.

Deneylerin uygulanmasını takiben, transformasyon tekniği kullanılarak, istatistiksel değerlerin doğruluğu artırılabilir. Bu teknik kullanılarak, modelin uygunluğu ve ana parametre etkileri ve parametre etkileşimlerini gösteren istatistiksel veriler iyileştirilebilmektedir. Böylece, sonuç yüzeyini temsil eden optimum parametre değerleri ve daha iyi bir matematiksel model, transformasyon kullanılarak elde edilebilmektedir.

2.2. Araştırmanın Kapsamı

Bu araştırmada şu varsayımlardan yola çıkılmıştır:

- Sentetik jet dizaynı için yapılan deneyler, bilgisayar simülasyonları kullanılmasına rağmen, uzun zaman almaktadır.
- Seçilen yöntemin düşük sayıda dizayn noktası gerektirmesi önemli bir kriter olacaktır. Başka bir deyişle, maliyet ve etkinlik açısından uygun olan minimum sayıda deney gerektirecek yöntemin seçilmesi gerekmektedir.
- Dizayna yükseltme yöntemi uygulamak yoluyla, optimal sayıda deney ekleyerek model genişletilebilmekte, istatistiksel analizlere imkan vermekte ve böylece modelin geliştirilmesini sağlayabilmektedir.
- Deney sonuç değerlerinin başka bir biçime dönüştürülmesi, modelin uygunluğu ve doğruluğu açısından faydalı olabilmektedir.

Deney dizaynının oluşturulması, D-optimal dizayn elde edilmesi ve istatistiksel analizlerin yapılması amacıyla, JMP bilgisayar programı kullanılmıştır. Bu program aynı zamanda deneylerin yapılmasından sonra elde edilen verilerin analiz ve optimizasyonu için kullanılmıştır. Sentetik jet dizaynı için yapılan deneyler NASA Langley Research Center tarafından geliştirilen CFL3D (Computational Fluids Laboratory 3-Dimensional flow solver) bilgisayar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu çalışmada, deney dizaynının yapısını ve işleyişini daha iyi anlayabilmek için literatürdeki bazı yaygın deney dizaynı yöntemleri araştırılmıştır. Bunlar; 'OFAT' (one-factor-at a time) yaklaşımı, Tam faktöriyel dizayn, kısmi faktöriyel dizayn, 'response surface model' dizayn (central composite dizayn ve Box-Behnken dizayn), D- optimal dizayn ve dizaynın yükseltilmesi yöntemlerini içermektedir.

'OFAT' (one-factor-at a time) yöntemi, araştırılan yöntemler içinde etkinliği en düşük olan yöntem

olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, parametrik dizayn çalışmalarında oldukça sık kullanılan bir yöntemdir.

OFAT yaklaşımı, parametreler arası etkileşimleri ya da disiplinler arası dizayn çalışmalarında, disiplinler arasındaki etkileşimleri gözönüne almayan bir yöntemdir. Modeldeki parametreler arasında hiçbir etkileşimin bulunmadığı durumlarda düzgün bir şekilde çalışmaktadır. Fakat, çoğu durumda, parametreler arasında etkileşim mevcuttur ve bu etkileşimin olup olmadığını tahmin etmek zordur. Olması kuvvetle muhtemel etkileşimlerin ihmal edilmesi, optimal parametre değerlerine ulaşılmasını ve uygun bir matematiksel model oluşturulmasını engellemektedir. Bu sebeple, bu dizayn yöntemi optimal olmayan sonuçlar verebilmektedir.

Tam faktöriyel dizayn, dizayn parametrelerinin olası tüm kombinasyonlarını, seviyelerini ve etkileşimlerini hesaba katmaktadır. Fakat, bu durumda, özellikle yüksek seviyelerle yapılan dizayn çalışmalarında uygulanacak deney sayısı, parametre sayısı ile orantılı olarak çok yüksek miktarlarda olabilmektedir. Yüksek sayıdaki deneylerin herbirinin uygulanması oldukça masraflı ve zaman alıcı ve düşük etkinliktir olabilmektedir.

Kısmi faktöriyel dizaynlar, tam faktöriyel dizaynın belirli bir orandaki kısmını kullanırlar ve ana parametre etkilerini ve bazı parametreler arası etkileşimleri bu orana göre dizayna dahil ederler. Buna göre, kısmi faktöriyel dizayn için, tam faktöriyel dizaynın sistematik olarak düzenlenmiş bir altkümüsi olduğu söylenebilir.

'Response surface dizaynlar' ve optimal dizaynlar deney dizaynının etkin yöntemleridir. Dizayn parametreleri ve performans karakteristikleri arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarabilmek için, matematiksel bir model oluşturmak 'response surface' dizaynın yaklaşım tarzını temsil eder. Bu yaklaşımda, dizayn analizleri deneysel dizayn matrisi tarafından belirlenen istatistiksel yöntemlerle seçilmiş olan noktalarda uygulanmaktadır. Deneylerin uygulanmasından sonra elde edilen sonuçlarla, çok değişkenli en küçük kareler regresyon analizi uygulanarak 'response surface yaklaşım modeli' oluşturulur.

'Response surface' model (RSM), ikinci dereceden bir modeldir ve tüm 2-parametre etkileşimlerini, eğrileri ve lineer olmayan değerleri kapsayabilmektedir. Böylece, RSM dizaynın sonuç yüzeyi hakkında önemli bilgiler verebilmektedir. Bu dizayn yöntemi kullanılarak, optimal dizayn kurulumuna ulaşılabilir. Dolayısıyla, dizayn geliştirilebilir, dizayndaki sorunlar ve zayıf noktalar tespit edilebilir ve böylece dizayn daha güçlü bir hale getirilebilir. En çok kullanılan RSM dizaynlar; 'CCD-

Yükseltilmiş D-Optimal Dizayn Yöntemi Kullanılarak Mühendislik Dizaynlarında Etkinliğin Geliştirilmesi: 'Sentetik Jet' Dizayn Optimizasyon Çalışması

central composite dizayn' ve 'Box-Behnken dizayndır.'

Bu çalışmada incelenen yaklaşımların en iyilik ölçütleri ve farklılık arz eden özellikleri araştırılmıştır. Takiben, uzay ve havacılık alanında, dizayn, analiz ve optimizasyonun etkinliğini önemli derecede arttıracak değerlendirilen D-optimal yöntemi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışmanın uygulama safhasında, sentetik jet dizayn çalışmasında uygun bir yöntem olduğu değerlendirilen D-optimal yöntemi kullanılmıştır

3.1. Bilgisayar Destekli Dizaynlar

Birçok durumda, standart dizayn yöntemleri amaçlara hizmet edebilmekte ve bu dizaynlar birçok istatistik yazılım programlarıyla oluşturulabilmektedir. Fakat, bazı durumlarda bu dizaynlar uygun veya pratik olmayabilmektedir.

Bu durumda, bilgisayar destekli dizaynlar daha iyi çalışabilmektedir. Bazı durumlar için ise bilgisayar destekli dizaynları kullanmak tek seçenek olabilmektedir.

Çizelge 1.' de tam faktöriyel dizayn, 3 seviyeli ortogonal dizayn, CCD dizayn ve D-Optimal dizayn için deney sayıları gösterilmiştir. D-Optimal deney dizaynı yönteminin, diğerlerine oranla, en az sayıda deney gerektirdiği görülmektedir.

Çizelge 1. Yaygın modellerin deney sayıları

PARAMETRE SAYISI	TAM FAKTÖRİYEL DİZAYN (3 ⁿ)	3-SEVİYELİ ORTOGONAL SIRA	CCD DİZAYN	D-OPTIMAL DİZAYN
3	27	27	15	10
4	81	81	25	15
5	243	81	43	21
6	729	-----	77	28
7	2187	-----	143	36
DENKLEM	3 ⁿ		2 ⁿ +2n+1	(n+1).(n+2)/2

3.2. Minimum Nokta dizaynları Kullanarak Deney Dizaynı Yapılması

“Dizayn noktası sayısı, modele dahil edilmesi gereken minimum terim sayısına tam olarak eşit ise, minimum nokta dizayn olarak adlandırılmaktadır” [40]. Minimum nokta dizayn yöntemleri etkin deney dizaynları oluşturabilmektedir. Bu dizayn yaklaşımlarının minimum gözlem sayısı ile oluşturulabilmesi, etkinliğini de arttırabilmektedir. Minimum nokta dizaynlarda, parametreler kalitatif ya

da kantitatif olabilirler. Bunun yanında, bu dizayn yöntemi lineer olan veya olmayan her türlü modele de uygulanabilmektedir [18].

3.3. Minimum Nokta D-Optimal Dizaynların Karakteristikleri:

- Parametre sayısının fazla olduğu ve dizayn çalışmalarının maliyetli olduğu durumlarda CCD dizaynların yerine tercih edilebilmektedir.
- Dizayn noktası sayısı minimuma indirilebilmektedir.
- İkinci derece ya da üçüncü derece sonuç yüzeyi polinomları oluşturulabilmektedir.
- Arzu edilmeyen sonuçlar veren satırlar içeren dizayn matrisleri dizaynın dışında bırakılabilmektedir.
- Faktöriyel dizayn ve kısmi faktöriyel dizaynların aksine, minimum nokta dizayn matrisleri genellikle ortogonal değildir ve yapılan etki tahminleri birbirleriyle ilişkilidir [27].
- Üzerinde çalışılan bölge tam olarak kapsamayabilmektedir.
- Modelin doğruluğunun test edilmesi için serbestlik derecesi bulunmamaktadır.

Standart faktöriyel ve kısmi faktöriyel dizaynlarda zaman ve kaynağın sınırlı olduğu durumlarda, çok fazla deney sayısı gerekebilmektedir, bunun aksine, minimum nokta dizaynlar zaman ve kaynak tasarrufu sağlamaktadır.

3.4. Yükseltilmiş Dizayn

Dizaynın yükseltilmesi ile, modele deney ilave ederek orijinal modele nazaran daha çok terim içeren bir model elde edilebilmektedir. Bir dizayna deney ilave etmek etkili bir yöntemdir, Çünkü lineer bir modeli tam ikinci dereceden bir modele çevirme imkanı vermektedir. Örneğin, 2 parametrelili ve 2 seviyeli 4 deneyli bir dizayna, ikinci dereceden terimler ekleyerek 5 yeni nokta eklenirse, yükseltilmiş D-Optimal deney dizaynı vasıtasıyla 3X3 bir dizayn üretilmiş olur. Genişletilmiş model vasıtasıyla orijinal modele yeni optimal terimlerin eklenebildiği D-Optimal yükseltme tekniği, sıralı dizaynlar için etkili bir araçtır. Aynı zamanda, ikinci setini birinci sete bağlantılı bloklayarak, iki deney setini ayrı bloklarda gruplamak mümkün olabilmektedir [27]. Bazı deney dizaynı yazılımlarını kullanmak yoluyla, mevcut deney veri çizelgesi modifiye edilebilmekte ve yinelemeli bir süreç sağlanabilmektedir.

3.5. Veri Transformasyonu

Transformasyon yöntemleri, mevcut veride aykırı değer, çarpıklık ve eşit olmayan varyans gibi istenmeyen durumlar mevcutsa oldukça faydalı olabilmektedir.

Logaritmik Transformasyon

Logaritmik transformasyon en sık kullanılan transformasyon biçimlerinden biridir. Eğer veri seti ile ilgili aykırı değer, kayıklık veya değişen varyans gibi problemler mevcut ise logaritmik transformasyon en uygun transformasyon yöntemlerinden biridir. Fakat, problemin çözülebileceğini garanti etmemektedir.

Eğer uç noktalarda aykırı değerler mevcutsa, bu problemi ortadan kaldırmak için, bu çalışmada da kullanılan logaritmik transformasyon yapmak uygun olabilir. Logaritmik transformasyon, dağılımdaki geniş değerleri sıkıştırarak uç noktalardaki aykırı değerleri yakınlaştırabilir. Log transformasyonu, veri gruplarını daha geniş standart sapmalarla sıkıştırarak normalden sapmayı yaklaşık olarak eşitleyebilmektedir. [12].

3.6. Amaçlanan Katkılar

Bu çalışma, minimum nokta dizayn uygulamasına birtakım katkılarda bulunmayı amaçlamaktadır.

3.6.1. Yükseltme

Minimum nokta D-optimal dizayn oluşturmak amacıyla, minimum sayıda deney gerektiren ve aynı zamanda da etkin olan bir yöntem seçilmiştir. Bununla birlikte, yükseltme yöntemi kullanılarak, belirlenen D-optimal dizaynın daha da geliştirilebileceği düşünülmüştür. Bu sayede, birçok seçeneği uygulamak mümkün olabilmektedir.

3.6.2. Transformasyon

JMP programında, deneylerin sonuçlarını elde ettikten sonra, modelin uygunluğunun kontrolü için sonuçlar analiz edilebilmektedir. Modelin istatistiksel uygunluk analizinde problem olması durumunda amaçlanan matematiksel model elde edilemeyebilir. Bu durumda, transformasyon tekniği, deney sonuç verisini farklı bir forma çevirerek daha yüksek doğrulukta istatistiksel veriler elde edilmesini sağlayabilmektedir. Sonuç değerlerinin transformasyonu ile, daha iyi analiz değerleri elde etmek mümkün olabilmektedir. Yaygın transformasyon yöntemleri karekök, ters ve logaritmik transformasyonlardır.

3.6.3. Uzay ve Havacılık Alanında Sentetik Jet Dizaynına Uygulanması

Uzay ve havacılık alanındaki dizayn çalışmalarında, deney dizaynı yöntemlerini kullanarak yapılan çalışma sayısı kısıtlıdır. Sentetik jet, herhangi bir yüzeydeki hava akışını kontrol edebilen aktif bir akış kontrol cihazıdır. Sentetik jet üzerinde yapılan dizayn çalışmaları oldukça yenidir ve bu cihazın optimizasyonun ifadesi henüz net değildir.

Sentetik jetin dizayn parametreleri arasında lineer olmayan değerler ve güçlü parametre etkileşimleri mevcuttur. İstatistiksel deney dizaynı yaklaşımı bu durumda oldukça etkin sonuçlar verebilmektedir. Bu dizayn problemine, yükseltilmiş minimum nokta D-Optimal dizayn yöntemini uygulamak, bu alanda halen sıklıkla kullanılmakta olan 'OFAT' yönteminden daha uygun bir yöntem olacaktır.

4. D-OPTIMAL YÖNTEMİNİN 'SENTETİK JET' DİZAYNINA UYGULANMASI

4.1. Sentetik Jet

Çizelge 2. Parametre Aralıkları

Sentetik jet, herhangi bir yüzeydeki hava akışını

PARAMETRELER	DEĞER ARALIĞI	
	DÜŞÜK	ÜKSEK
KAVİTENİN GENİŞLİĞİ	15	25
GENLİK	0,2	0,8
AĞIZ YÜKSEKLİĞİ	0,4	1,6
AĞIZ GENİŞLİĞİ	0,4	1,6
FREKANS	300 Hz	1300 Hz

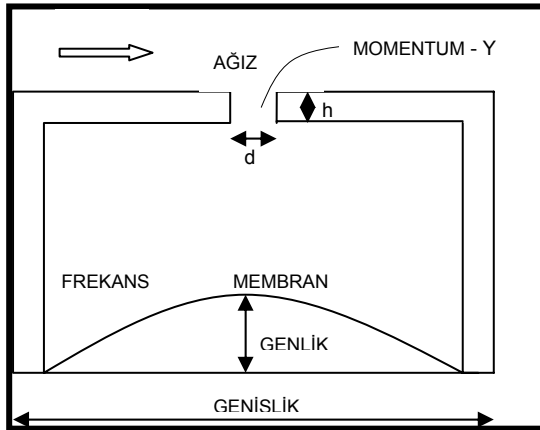
kontrol eden bir cihazdır. Aktif akış kontrol cihazları enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte, sentetik jetin en önemli avantajı çok düşük enerji harcayarak akış yüzeyindeki değişimlere çok çabuk cevap verebilmesidir. Devamlı hava üfleme ya da emme işlemi, istenmeyen yan etkiler doğururken, sentetik jet kullanarak arka arkaya yapılan üfleme ve emme, akış ayrılmalarının kontrolünde oldukça verimli sonuçlar verebilmektedir [24].

Akış kontrol yöntemleri, enerji harcanması bakımından, pasif ve aktif yöntemler olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Her iki tip cihaz da yüzeydeki hava akışını kontrol etmekte ve bu cihazlar yardımı ile akış bölgesinde önemli iyileştirmeler elde edilebilmektedir. Pasif kontrol cihazları harici enerjiye

ihtiyaç duymazlar. Pasif kontrol cihazlarıyla ilgili, uzun yıllar, birçok araştırma yapılmıştır. [25].

Aktif akış kontrol cihazları üzerine yapılan çalışmalar oldukça yenidir. Aktif cihazlar, akış bölgesine etki etmek için harici enerji ya da yardımcı enerji kullanırlar. “Sentetik jet”, hava akışının mevcut olduğu her yüzeyde kullanılabilen bir aktif kontrol cihazıdır. Havayı sadece emen ya da üfleyerek akışı kontrol eden cihazlar üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Fakat, bu çalışmanın deney dizaynı uygulamasında kullanılan sentetik jet, havayı emen ve ardından üfleyen çift yönlü bir cihazdır. Burada kontrol işlevi, elde edilmek istenen akış doğrultusunda vortekslerin azaltılmasını veya arttırılmasını ifade eder.

Şekil 2.’de ‘sentetik jet’in ana parçaları görülmektedir. Cihaz, havayı sıralı bir şekilde kavitenin içine emer ve üfler. Piezoelektrik bir sistemle çalışan ve cihazın tabanında yer alan membran, periyodik olarak aşağı ve yukarı hareket eder. Emilen tüm hava membranın hareketiyle tekrar üflendiği için, cihazın ağız bölümündeki net kütle akışı sıfırdır.



Şekil 2. Sentetik Jet

Sentetik jetin performansı üzerinde etkisi olan ana parametreler çizelge 3.’te gösterilmektedir. Bu uygulamadaki amaç, D-Optimal dizayn yöntemini kullanarak çizelgedeki ana parametre değerlerini değiştirerek yoluyla cihaz tarafından üretilen maksimum momentum değerini bulmaktır. Bu parametreler; membranın frekansı, membranın hareket genişliği (amplitude), ağız’ın (orifice) yüksekliği, ağız’ın genişliği ve kavite’nin genişliğidir. Bu parametre değerlerinde yapılan değişimler kavitenin ağızındaki hava akışının momentum değerini etkiler. Her parametre için 3 seviye belirlenmiş ve farklı parametre kombinasyonlarını gösteren deneyler bilgisayar programı yardımıyla dizayn edilmiştir.

Düşük enerji harcayarak maksimum momentum elde

edilebilmesi için dizayn parametre değerlerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Sentetik jet’in maksimum momentumu üretebilmesi için beş parametre değerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Çizelge 3. Parametrelerin Kodlu Değerleri

	Genişlik	Genlik	Ağız Yüksekliği	Ağız Genişliği	Frekans
-1	15	0.2	0.4	0.4	300
0	20	0.5	1	1	800
1	25	0.8	1.6	1.6	1300

4.2. Parametrelerin Seviyelerinin Tespit Edilmesi

Denklem-1, D-optimal dizayn için ikinci dereceden modelin kurulumunu ifade etmektedir.

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ii} x_i^2 + \sum \sum b_{ij} x_i x_j$$

Denklem 1

JMP programında ‘custom design tool’ kullanarak yükseltilmiş D-optimal deney dizaynı 30 deney ile oluşturulmuştur. Oluşturulan bu dizayn matrisinde, 5 parametre 3 seviyede çalışılmıştır. Bu seviyeler, kodlu gösterimde (-1), 0 ve (+1) ile ifade edilmiştir. Örneğin, genlik parametresi için (-1), 0.2 (düşük değer)’i, (0), 0.5 (orta değer)’i, (+1) ise 0.8 (yüksek değer)’i ifade etmektedir. Kodlu formda hazırlanan bu matris, deneylerin yapılması için gerçek parametre değerlerine çevrilmiştir.

➤ CFL3D

NASA Langley Araştırma Merkezi’ndeki Hesaplamalı Akışkanlar Laboratuvarında, 1980’li yıllarda geliştirilmiştir. CFL3D’nin açılımı, 3 boyutlu akış çözücü hesaplamalı akışkanlar laboratuvarı’dır. Bu program, Zamana bağımlı, korunum kanunu formunda, ‘Reynolds-averaged Navier-Stokes’ denklemlerini çözmektedir [26].

4.3. Deney Dizaynının Seçilmesi

Deneylerin dizaynı için D-optimal yöntem seçilmiştir. Eğer dizayn noktası sayısı modelde kapsanacak terim sayısına eşitse böyle modellere ‘minimum nokta dizayn’ adı verilmektedir. Bu modelle dizayn noktası sayısı minimum sayıya indirilebildiği için, parametre

sayısının yüksek olması durumlarında kullanılması uygun olabilmektedir. D-Optimal model kullanılarak, ikinci dereceden ve üçüncü dereceden sonuç yüzeyi polinomları kurmak mümkün olmaktadır. Bunun yanında, D-Optimal dizayn matrisleri genellikle ortogonal değildir ve parametre etkilerinin tahmin edilmesi birbirleriyle ilişkilidir. Aynı zamanda, bu dizayn yöntemiyle, istenmeyen sonuçlar veren dizayn matrisleri modelden çıkarılabilmektedir.

Sentetik jet dizaynında kullanılan ikinci dereceden yaklaşım modeli, dizayn bölgesini daha iyi kapsayabilmek için, lineer olmayan terimleri (kare terim) ve etkileşimleri (çapraz terim) hesaba katmaktadır.

Bu yaklaşım modelleri değişen parametre değerlerinin momentum değeri üzerindeki etkisini tanımlamak için kullanılabilir. Bu modelin önemli bir diğer avantajı ise, hassasiyet analizleri

yapılırken, herhangi bir parametrenin değerini değiştirdikten sonra tüm sistemi yeniden analiz etmeyi gerektirmemesidir [27].

Denklem-1'de x_i , sonuç değişkeni olan Y değerini etkileyen girdi değişkenlerini temsil etmektedir. b_0 , b_i , ve b_{ij} ise tahmini regresyon değerleridir. Çapraz terimler 2-parametre etkileşimlerini, kare terimler ise ikinci derece lineer olmayan ifadeleri temsil etmektedir. Modeldeki katsayıları tahmin edebilmek amacıyla ikinci derece bir model oluşturmak için dizayn parametreleri en az 3 seviyede belirlenmelidir. Bu sebeple, 3^n faktöriyel deneyler gerekli olabilmektedir [28] [40].

D-Optimal yöntemin çalışma mantığını basit bir şekilde açıklamak için, lineer yaklaşım modelinin en küçük kareler analizini kullanan katsayıların tahmini aşağıda gösterilmiştir.

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i \quad \text{Denklem 2}$$

Denklem-2 nin matris gösterimi şu şekilde ifade edilebilir:

$$Y = XB + e \quad \text{Denklem 3}$$

Denklem-3'te, Y , gözlem vektörünü, e , hata vektörünü, X dizayn matrisini ve B , model katsayıları vektörünü (b_0 ve b_i) ifade etmektedir. "Dizayn matrisi, deneyler boyunca uygulanacak

dizayn parametreleri ayarlarını ifade eden kodlu değişken değerlerinin bir kombinasyon setidir". B , en küçük kareler yöntemini kullanarak şu şekilde tahmin edilir [27]:

$$B = (X'X)^{-1} X'Y \quad \text{Denklem 4}$$

Tahmin kolonu B 'nin doğruluğunun bir ölçüsü, varyans-kovaryans matrisidir ve şu şekilde ifade edilir [28].

$$V(B) = \sigma^2 (X'X)^{-1} \quad \text{Denklem 5}$$

Denklem-5'te, σ^2 , hatanın varyansını ifade eder. $V(B)$ matrisi ise, modelin uygunluğunun istatistiksel ölçüsünü ifade eder. $V(B)$, $(X'X)^{-1}$ 'in bir fonksiyonudur ve dolayısıyla uygunluğun kalitesini arttırmak için $(X'X)^{-1}$ minimize edilmelidir. İstatistiksel olarak $(X'X)^{-1}$ ifadesini minimize etmek $(X'X)$ 'in determinantını maksimize etmeye denktir. Bundan dolayı, iyi bir en küçük kareler yaklaşım modeli kurmamızı sağlayan bir dizayn matrisi oluşturmak, $X'X$ matrisinin determinantını maksimize etmekle sağlanabilir. $|X'X|_i$ maksimize eden deneysel dizayna D-Optimal dizayn adı verilmektedir. Burada 'D', $X'X$ matrisinin determinantının ilk harfidir. Denklem-1'deki bu lineer analizler kolayca ikinci dereceden modele genişletilebilir.

4.4. Deney Matrisinin Dizaynı

Matris, 21 deneyle minimum nokta D-optimal deney dizaynına göre oluşturulmuş ve bu matris, yükseltme için 8 deney, merkez noktası için de 1 deney ilave edilmiştir. Böylece, toplam deney sayısı 30' a ulaşmıştır.

Çizelge 4. Gerçek Değerli D-Optimal Dizayn Matrisi ve Deneysel Sonuçları

	GENİSLİK	do/hc	FREKANS	GENLİK	ho/hc	
1	25	0,4	300	0,8	1,6	58,16926
2	25	1	800	0,8	1,6	227,3849
3	15	0,4	300	0,8	0,4	83,69798
4	25	0,4	1300	0,8	0,4	75,47368
5	20	0,4	300	0,2	0,4	16,21742
6	15	1,6	300	0,2	0,4	9,525087
7	25	1,6	300	0,2	1,6	11,28429
8	20	1	300	0,8	1	122,4258
9	15	0,4	300	0,2	1,6	12,24956
10	15	0,4	1300	0,8	1,6	83,73629
11	15	0,4	1300	0,2	0,4	20,81844
12	25	0,4	800	0,2	1	20,64893
13	25	1,6	1300	0,2	0,4	14,51937
14	15	1,6	1300	0,8	0,4	358,615
15	15	1,6	300	0,8	1,6	51,17152
16	25	1,6	1300	0,5	1	59,83274
17	25	1	300	0,5	0,4	83,04012
18	20	0,4	800	0,5	1,6	55,09334
19	15	1,6	1300	0,2	1,6	19,38202
20	25	0,4	1300	0,2	1,6	5,221729
21	25	1,6	300	0,8	0,4	106,7702
22	15	1	800	0,5	0,4	98,38415
23	25	1,6	1300	0,8	1,6	98,51434
24	15	0,4	1300	0,8	1	90,05769
25	25	0,4	300	0,2	0,4	18,85215
26	20	1	1300	0,2	1,6	10,75915
27	20	1,6	800	0,8	0,4	260,5051
28	20	1,6	300	0,5	1,6	32,73228
29	15	1,6	800	0,2	1	69,8165
30	20	1	800	0,5	1	156,4131

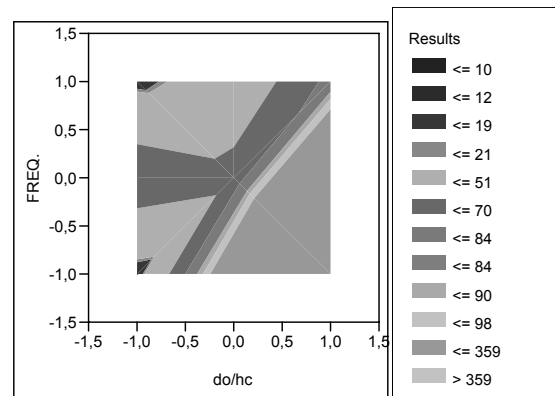
yapılarak modelin uygunluğu test edilmiştir.

Çizelge 5. Deneylerin sonuç değerleri

Deneylerin Sonuçları			
1	58,16926	16	59,83274
2	227,3849	17	83,04012
3	83,69798	18	55,09334
4	75,47368	19	19,38202
5	16,21742	20	5,221729
6	9,525087	21	106,7702
7	11,28429	22	98,38415
8	122,4258	23	98,51434
9	12,24956	24	90,05769
10	83,73629	25	18,85215
11	20,81844	26	10,75915
12	20,64893	27	260,5051
13	14,51937	28	32,73228
14	358,615	29	69,8165
15	51,17152	30	156,4131

Elde edilen sonuç çizelgeleri ve analizlerin şekilli ifadeleri elde edilerek analizler yapılmıştır. Bunlar; gerçek ve tahmini çizelgeler, uygunluk çizelgesi özeti, varyans çizelgesi analizleri, parametre tahmin çizelgesi, ölçekli tahmin çizelgesi ve tahmin profili çizelgesidir.

Şekil 3.’te, parametre değişimlerine göre sonuçlarda meydana gelen değişimi gösteren kontur çizimleri görülmektedir. Genlik, “1” değerinde sabit tutularak ve dizaynda etkin parametreler olan frekans ve ağız genişliği değerleri değiştirilerek kontur değerleri çizilmiştir.



Şekil 3. Sonuç Değerlerinin Kontur Çizimi, GENLİK=1

Ondördüncü deney, 358,615kg.m/sn² lik değeriyle en yüksek sonucu vermiştir. Merkez noktasını gösteren otuzuncu deneyin sonucu 1564131 kg.m/sn² Deneylerin sonucunda Çizelge 5’te görülen momentum değerleri elde edildikten sonra analizleri

4.5. Matematiksel Modelin Kurulması ve Optimal Parametre Değerlerinin Tahmini

Analiz çizelgeleri kullanılarak ikinci dereceden matematiksel model ve sonuç değerini optimize eden parametre değerlerinin dizaynı hesaplanmıştır.

Çizelge 6. Modeli Optimize Eden Parametre Değerleri

WIDTH	-1
do/hc	1
FREQ.	-1
AMPL.	1
ho/hc	1
Y	336,4148

Dizaynın ikinci dereceden matematiksel modeli;

$$Y=125,7713+(-7,87184)*(width)+53,90452*(do/hc)+16,2214*(freq)+23,68415*(amp)+17,99717*(ho/hc)+(-11,6585)*(width)*(width)+(7,25534)*(width)*(do/hc)+26,82049*(do/hc)*(do/hc)+14,90941*(width)*(freq)+(14,1441)*(do/hc)*(freq)+7,844876*(freq)*(freq)+(10,05)*(width)*(amp)+18,77267*(do/hc)*(amp)+(15,2152)*(freq)*(amp)+(43,9508)*(amp)*(amp)+(19,8192)*(width)*(ho/hc)+20,74703*(do/hc)*(ho/c)+12,801*(freq)*(ho/hc)+19,66247*(amp)*(ho/hc)+(-41,4771)*(ho/hc)*(ho/hc)$$

$$Y= 336,4148$$

Çalışmanın amacının sentetik jet tarafından üretilen momentum değerini maksimize etmek olduğuna göre, optimum parametre değerlerine göre matematiksel modelin elde edilen maksimum sonucu 336,4148 kg.m/sec² olmuştur. Merkez noktasını (dizayn parametrelerinin merkez noktası değerlerini kullanan deney) gösteren deneyin sonucu 156,41 kg.m/sec² dir. Merkez noktası değerine oranla 336,4148 kg.m/sec² momentum değerinin oldukça iyi bir değer olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre model iki katından daha fazla bir oranda geliştirilmiştir. Ondördüncü deneyin kodlu parametre değerleri optimizasyon sonucunda elde edilen parametre değerleriyle aynıdır. Dolayısıyla, doğrulama deneyi yapmaya gerek yoktur ve 336,4148 kg.m/sec² değeri doğrulanmış değer olarak kabul edilebilir.

5. SONUÇLAR

Uygulamada kullanılacak en uygun yöntemi belirlemek amacıyla, birçok deney dizaynı yöntemi temel çalışma prensipleri, kısıtları ve avantajları

açısından incelenmiştir.

Sentetik jet dizayn çalışmaları için yapılan deneyler karmaşık bilgisayar algoritmaları kullanılarak yapıldığı için, oldukça uzun zaman almaktadır. Bundan dolayı, bu çalışmada en önemli kısıt, minimum nokta deney sayısı kullanılmaktır. Kaynak araştırmasının ardından, çalışmanın kısıtları ve amaçlar gözönüne alındığında, minimum nokta D-Optimal dizayn yönteminin diğerlerinden daha uygun olacağı düşünülmüştür. D-Optimal dizaynlar, deney sayısını belirlemede esneklik sağlamaktadır. Bununla birlikte, deney sayısı mutlak minimumda olduğunda, elde edilen dizayn sature dizayn olmaktadır. Yani, hata analizi için hiçbir serbestlik derecesi bulunmamaktadır. Bu kısıtlamadan kaçınmak için, D-Optimal dizayna yükseltme yöntemi uygulanarak model geliştirilmiştir.

Sentetik jet dizayn çalışmasında yükseltmiş minimum nokta D-Optimal dizayn yönteminin uygulanmış ve sonuçlar modelin merkez noktasına göre iki katından daha fazla geliştirildiğini göstermiştir

5.1. Gelecekteki Potansiyel Uygulamalar

Ana parametreler, birçok parametre arasından dizayna olan etkileri derecesine göre seçilmiştir. Buna rağmen, önemli bir parametre dizayna dahil edilmemiş olabilir ve bu parametrenin eksikliği modelin doğru kurulmasına sebep olabilir. Tüm parametrelerin modele dahil edildiğinden emin olabilmek için farklı bir yaklaşım tatbik edilebilir. Bu yaklaşım, dizaynı iki kademeye ayırmayı öngörmektedir; öncelikle iki seviyeli bir parametre dizaynı ile az sayıda deney yaparak önemli parametreleri belirlemek, daha sonra üç seviyeli dizayna geçmektir. Üç seviyeli dizaynlarda fazla parametre kullanmak çok sayıda deney gerektirdiği için etkin bir yöntem değildir. Bununla birlikte, iki seviyeli dizayn yaparak, 3 seviyeli dizayna göre daha az deney sayısı ile, çok daha fazla parametre modele dahil edilebilir. İki seviyeli dizaynın deneylerini ve analizlerini yaptıktan sonra, üç seviyeli dizayn için güçlü olan parametreler belirlenebilir. Böylece, parametrelerin belirlenmesi, rastgele tahmin ya da uzman görüşüne göre değil, deneysel analizlerle gerçekleştirilmiş olacaktır.

6. KAYNAKLAR

[1] Unal, R., R. Braun, A. Moore and R. Lepsch, "Response Surface Model Building Using Orthogonal Arrays for Computer Experiments," Proceedings of the 19th Annual Conference of the International Society of Parametric Analysts, May, pp. 469-481 (1997).

- [2] Unal, R., "development of response surface models for rapid analysis & multidisciplinary optimization of launch vehicle design concepts," NASA Grant No: NAG-1-2157
- [3] JMP ® Design User's Guide, SAS Institute Inc, Cary, NC. 1992.
- [4] Phadke S.M., "quality engineering using robust design," Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1989.
- [5] American Society For Quality (ASQ). Six Sigma Forum. Retrieved Dec 19, 2005, from <http://www.asq.org/sixsigma/terms/a.html>
- [6] Umertics. Design of Experiments- Principles and Applications. Retrieved Dec 25,2005, from <http://www.umetrics.com/pdfs/books/DOEBook.pdf>
- [7] Unal, R., ENMA 763 Class Notes, Old Dominion University. Spring 2006.
- [8] Della Role, P.G., "Design of Experiments - Basic concepts". July 2003.
- [9] The Math Works. Statistical Toolbox. Retrieved Dec 26, 2005 from <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/stats/f56635.html>
- [10] Lye A L.M., "Design of Experiments in Civil Engineering: "Are We Still in The 1920'S?" Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montréal, Québec, Canada. June 5-8, 2002.
- [11] Oxford Journals. Journal of Tropical Pediatrics. Research Method II-Multivariate Analysis. Chapter 9. Retrieved Dec 30, 2005 from http://www.oxfordjournals.org/tropej/online/ma_chap9.pdf
- [12] NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods,
- [13] <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>. Retrieved Dec 12,2005.
- [14] iSixSigma. Design_of_Experiments_-_DOE. Retrieved Dec 19, 2005 from http://www.isixsigma.com/dictionary/Design_of_Experiments_-_DOE-41.htm
- [15] Fahner,G., "Learning Strategies and Experimental Design", A Fair Isaac White Paper. Dec 2002.
- [16] American Society for Quality (ASQ). Statistics Division-glossary and tables. Retrieved Feb 19, 2006 from <http://www.asqstatdiv.org/glossary-tables.htm>
- [17] Frey, D.D. and Greitzer,E.M.,"One Step at a Time", The American Society of Mechanical Engineers. 2004.
- [18] Anderson, M.J., and Whitcomb, P.J., "Response Surface Methods for Process Optimization". Nov 2004.
- [19] Goos, P.and Leemans, H., "Teaching Optimal Design of Experiments Using a Spreadsheet", Journal of Statistics Education Volume 12, Number 3.(2004).
- [20] Canadian Forest Service. Data Transformation. Retrieved Feb 12, 2006 from http://www.pfc.forestry.ca/profiles/wulder/mvstats/transform_e.html
- [21] Wikipedia. Outlier. Retrieved Feb 27, 2006 from <http://en.wikipedia.org/wiki/Outlier>
- [22] Wolfram Research. Skewness. Retrieved Feb 23, 2006 from <http://mathworld.wolfram.com/Skewness.html>
- [23] Nettleton,D, Iowa State University. Retrieved Feb 24, 2006 from <http://www.public.iastate.edu/~dnett/S401/nlogtransform.pdf>
- [24] Kowalski, M., "LogInt," Retrieved Feb 24, 2006 from <http://www.stat.ualberta.ca/~kowalski/LogInt.pdf>
- [25] University Of Kentucky, Engineering Department. Computational Fluid Dynamics (CFD) Group Website. Flow Separation Control Using Synthetic Jets. Retrieved Dec 29, 2005 from <http://www.engr.uky.edu/~cfd/Synthetic%20jet%20FC.htm>
- [26] Kral L.D., ASME Fluids Engineering Division Technical Brief, "Active Flow Control Technology" Washington University St. Louis, Missouri
- [27] CFL3D User's Manual, NASA Langley Research Center, Hampton, VA <http://cfl3d.larc.nasa.gov/Cfl3dv6/V5Manual/Intro.pdf>
- [28] Unal R, Stanley D.O., Lepsch R.A., "Parametric Modeling Using Saturated Designs," Journal Of Parametrics vol 16, no 1 (fall 1996) : 319
- [29] Unal, R., Lockwood, M.K., Mcmillin, M.L., "Model Building for Rapid Multidisciplinary Integration and Optimization Using Experimental Designs," Old Dominion University & NASA Langley Research Center
- [30] Wikipedia. JMP (Application Software). Retrieved Dec 25,2005 from [http://en.wikipedia.org/wiki/JMP_\(application_software\)](http://en.wikipedia.org/wiki/JMP_(application_software))
- [31] Montgomery D.C., Introduction to Statistical Quality Control, Fourth Edition, New York: John Wiley & Sons Inc. Jan 2000.
- [32] Crow Kenneth, "Robust Product Design Through Design of Experiments", DRM Associates. 1997.
- [33] Objective Design of Experiments. "Teaching Practical efficient experimentation to Chemists, engineers and scientists". Retrieved Dec,19, 2005, from <http://www.objectivedoe.com/faq.php?name=#a14>.

[34] Shaikh, S.M., "Design Optimization Using Statistical Techniques", PhD Thesis, Melbourne, FL. May 2005.

[35] R. Wille, "Landing Gear Weight Optimization Using Taguchi Analysis," Presented at the 49th Annual International Conference of Society of Allied Weight Engineers, Chandler, 1990.

[36] D.O. Stanley, R. Unal., and R. Joyner, "Application of Taguchi Methods to Dual Mixture Ratio Propulsion System Optimization for SSTO Vehicles," AIAA-92-0213, January 1992.

[37] Unal, R., R. A. Lepsch, W. Engelund and D. O. Stanley, "Approximation Model Building and MDO Using Response Surface Methods with Applications To Launch Vehicle Design", 6th AIAA/ USAF/ NASA/ ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, (September 1996).

[38] Mitchell, T.J., "An Algorithm for the Construction of "D-Optimal" Experimental Designs", Technometrics. (Feb, 2000).

[39] Cimbala J.M., ME 82 Class Notes, Penn State University. Fall 2003.

[40] Todoroki, A., "Teach Yourself Response Surface Methodology," Tokyo Institute of Technology. 2001.

[41] Unal, R., Lepscht, R.A., McMillint, M.L., "Response Surface Model Building and Multidisciplinary Optimization Using D-Optimal Designs", AIAA-98-4759, Old Dominion University Norfolk, VA & NASA Langley Research Center Hampton VA

[42] Response Surface Methodology
<http://www.mne.psu.edu/me82/Learning/RSM/rsm.html>, Retrieved Dec,19, 2005, from
<http://www.objectivedoe.com/faq.php?name=#a14>.

[43] Zahran, A., Christine M. Anderson-Cook and Raymond H. Myers, "Fraction of Design Space to Assess Prediction Capability of Response Surface Designs", Cairo University, Cairo, Egypt & Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA

bulduğu 2 nci Ana Jet Üs Komutanlığı'ndaki pilotaj eğitiminden ayrılarak 12. Hava Ulaştırma Ana Üs Komutanlığı'na atandı. Mart 1998 – Haziran 1999 tarihleri arasında, 12 nci Hava Ulaştırma Ana Üs Komutanlığı, 221 nci Filo Komutanlığında seyrüsefer subayı eğitimini tamamladı. Haziran 1999 – Ağustos 2004 yılları arasında aynı filoda C-160 uçaklarında seyrüsefer subayı olarak görev yaptı.

Buradaki görevini takiben Eylül 2004 – Temmuz 2005 tarihleri arasında Hava Harp Okulu'na atanarak, Havaçılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsünde Uzay Bilimleri Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimini takiben Temmuz 2005 – Haziran 2006 tarihleri arasında Amerika Birleşik Devletleri, Old Dominion Üniversitesi'nde Mühendislik Yönetimi Ana Bilim Dalında yüksek lisansı eğitimini tamamlamıştır.

Fransızca ve İngilizce bilmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

Hv.SS.Yzb. Fatih ERDOĞAN

1974 yılında Kahramanmaraş'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Bursa'da lise öğrenimini, Bursa'da Işıklar Askeri Lisesi'nde tamamladı. 1992 yılında girmiş olduğu Hava Harp Okulunun Endüstri Mühendisliği Bölümünden 1996 yılında Hava Teğmen olarak mezun oldu.

Temmuz 1996 – Mart 1998 tarihleri arasında