



En uygun çark tasarımı ile bir santrifüj pompa performansının iyileştirilmesi

Zekeriya Parlak*

27.05.2016Geliş/Received, 07.10.2016 Kabul/Accepted

doi: 10.16984/saufenbilder.48460

ÖZET

Bu çalışmada santrifüj tipi bir pompa çarkının belirlenen parametre ve bunların seviyeleri arasından, en iyi verim, basma yüksekliği ve debiyi sağlayacak olan değerleri Taguchi yöntemi kullanılarak deneysel olarak tespit edilmiştir. Böylece belirlenen şartlarda optimum bir çark tasarımı elde edilmiştir. Yapılan deneysel tasarımda kanat sayısı, çıkış açısı, çıkış çapı ve çıkış genişliği tasarım parametreleri olarak tespit edilmiş ve buna göre 9 çark geometrisi belirlenmiş, imal edilmiş ve pompa deney düzeneğinde test edilmiştir. Testler sonucunda her bir çarkın kullanıldığı pompaya ait karakteristik ve verim eğrileri elde edilmiş, bu test sonuçları kullanılarak hesaplanan sinyal/gürültü oranları sayesinde tüm alternatif tasarımlar tahmin edilerek optimum tasarımlar belirlenmiştir. Ayrıca yapılan varyans analizleri yardımıyla her bir parametrenin verim, basma yüksekliği ve debi üzerindeki etkileri de hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: pompa, çark, deneysel tasarım, taguchi yöntemi, varyans analizi, ANOVA

Performance enhancement of a centrifugal pump by optimal impeller design

ABSTRACT

In the study, the parameters and their levels of the impeller of a centrifugal pump were predicted provided the best efficiency, head and flow rate by using Taguchi design of experimental method. An optimal impeller design was obtained under the specified condition in this way. Number of vanes, vane outlet angle, impeller outlet diameter, impeller outlet width, were determined as design parameters and thus 9 different impeller are designed with the design of experimental method, manufactured and tested. Characteristic and efficiency curves of pumps were draw after the tests. Optimal impeller designs were predicted calculating signal/noise rates of the test data over all alternative designs. In addition, the effect of each individual parameter on the results, which are efficiency, head and flow rate, were determined by a variance of analysis.

Keywords: pump, impeller, design of experimental, taguchi method, analysis of variance, ANOVA

*Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya – zparlak@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerjinin üretimi, iletimi ve tüketimi için tasarlanan mühendislik sistemlerin verimlerinin artırılmasına yönelik yapılan çalışmalar, özellikle son yıllarda büyük önem arz etmektedir. Birçok mühendislik sisteminde vazgeçilmez bir önemli sahip olan pompalar, akışkanları alçak seviyeden yüksek seviyeye gönderilmesi veya düşük basınçtan yüksek basınca çıkartılması için kullanılan, akışkana kinetik ya da potansiyel enerji kazandıran makinelerdir. Genel olarak pompalar hacimsel ve rotodinamik olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür. Pistonlu, diyaframlı, dişli pompalar hacimsel pompalar sınıfına girerken, enerji akışkana, kapalı hacmin daraltılmasıyla statik basıncının artırılmasıyla aktarılmaktadır. Rotodinamik pompalarda ise akışkan, bir çark ile bir kanaldan çarkın merkezine doğru emilir ve hareket halindeki dönel çark kanatları vasıtasıyla momentum kazanarak pompa gövdesini terk eder. Bu gruba giren santrifüj tipi pompalar, düşük maliyetli, imalatı ve bakımı kolay olması sebebi ile endüstride yaygın olarak tercih edilmektedirler. Enerji kaynaklarının gitgide azaldığı bu sebeple verimliliğinin hayati önem arz ettiği günümüz şartlarında daha verimli çalışan bir pompa tasarımı kaçınılmaz olmuştur.

Nataraj ve Arunachalam [1] bir santrifüj pompanın performansını iyileştirmek amacıyla Taguchi parametrik tasarım yöntemini kullanarak optimum çark geometrisi üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada pompanın tahliye ettiği debiyi artırmak, güç tüketimini en aza indirmek ve dolayısıyla verimi iyileştirmek için santrifüj pompanın 8 farklı çark modeli, farklı çark çapı, kanat genişliği, kanat çıkış açısı ve kanat çapı kombinasyonları ile belirlenmiştir. Ayrıca çalışmalarında ticari HAD yazılımı kullanılarak farklı çalışma koşullarında sayısal çalışma gerçekleştirmişler ve sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Zhou ve ark. [2] santrifüj bir pompanın hidrodinamik performansını iyileştirmek amacıyla ortogonal deney yöntemini kullanmışlardır. Pompa performansının tahmin edilebilmesi için HAD analizi gerçekleştirilmiştir. Orjinal pompanın hazırlanan prototipi test edilmiş ve elde edilen deneysel sonuçlar, HAD analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ortogonal tabloya göre 16 çark geometrisi belirlenmiş ve modellenmiştir. Salyangozu aynı 16 çark benzer şekilde nümerik modellenmiş ve varyans analizi yardımıyla en yüksek verimi veren en iyi parametre kombinasyonu elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar orjinal pompa ile karşılaştırılmış, pompa veriminin ve optimum basma yüksekliğinde artış sağlandığı gözlenmiştir. Nataraj ve Singh [3] CFD analizleri ile elde ettikleri verileri kullanarak Cevap Yüzeyi Yöntemini (RSM) kullanarak

çark tasarım büyüklükleri değiştirerek bir pompanın performansını iyileştirme üzerine çalıştılar. Çark tasarım parametreleri olarak çark giriş çapı, kanat çıkış açısı ve kanat çıkış genişliğini kullandılar. Bu yöntemle pompanın basma yüksekliklerini büyüttükleri gibi güç tüketimini de azalttıklarını belirtmişlerdir. Singh ve Nataraj [4] HAD yazılımı ve Taguchi deneysel tasarım metodunu kullanarak, bir çark performansının iyileştirilmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Çarkın giriş çapı, çıkış çapı, kanat genişliği ve yüksekliği optimizasyon tasarım parametreleri olarak seçilmiştir. En yüksek verimli vantilatörü elde etmek için belirli aralıklarda parametrik belirleme seviyeleri seçilmiştir. HAD yazılımının verdiği sonuçlar elde edilen deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Spence ve Amaral-Teixeira [5] çift salyangoz hacimli olan çift girişli bir santrifüj pompa içindeki basınçların zamanla değişimlerini incelemek için çoklu-blok, yapısal bir CFD kodu kullanmışlardır. Çark ucu ile salyangoz gövdesi arasındaki en küçük radyal aralık (cutwater gap), kanat yerleşimi, Salyangoz gövdesi ile kanat mahfazası arasındaki en küçük aksel mesafe (sidewall clearance), Salyangoz gövdesi ile kanat mahfazasının dış çapı arasındaki radyal mesafe (snubber gap) olmak üzere dört geometrik parametreyi içine alan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu dört parametrenin aldığı üç seviye için herbiri dokuz taneden oluşmak üzere üç farklı debi için toplam 27 analize olanak veren Taguchi metodu kullanılmıştır. Bu analizlerde pompanın önemli bölgelerinde yer alan 15 farklı yer için basınç vuruntuları incelenmiş ve radyal aralık ile kanat yerleşiminin bu vuruntular üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Basınç vuruntuları yoluyla ortaya çıkan gürültü/titreşimi azaltmak ve komponent ömrünü artırmak için tasarımcılara geometrik tavsiyeler sundular. Baek ve ark. [6], haddeleme işleminde yüksek metal kalitesi elde etmek ve optimum proses parametrelerini bulmak amacıyla Taguchi metodunu, sinyal-gürültü oranı ve varyans analizini uygulamışlardır. Deneysel verilerle doğrulanmış en uygun proses parametreleri elde edilmiştir. Grapsas ve ark. [7] HAD yazılımını kullanarak test çarkındaki sıkıştırılmaz türbülanslı akışın analizini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen nümerik sonuçlar, deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Ayrıca parametrik çalışma gerçekleştirilerek kanat uzunluğu, giriş genişliği ve eğim açısı gibi çarkın performans parametrelerinin etkisi incelenmiştir.

Santrifüj pompalar salyangoz ve çark denen iki ana bölümden oluşur. Yapılan literatür araştırması sonucunda santrifüj pompa performansının çarkın tasarım esaslarına dayandığı görülmüştür. Santrifüj pompa çarkının bazı geometrik özelliklerini değiştirilerek daha verimli hale getirilebilir olduğu deneylerle kanıtlanmıştır. Pompa performansındaki ilgili tasarım parametreleri; çark çapı, kanat sayısı, kanat giriş

ve çıkış açısı, kanat giriş genişliği, çıkış genişliği, yüksekliği olarak sıralanabilir.

Bu çalışmanın amacı en iyi performansı sağlayacak olan kanat geometrisini elde etmektir. Başlangıç olarak sonuç üzerinde etkili olacak tasarım parametrelerinin ve bu parametrelerin olası değer aralıklarını tespiti yapılmıştır. Bu maksatla kurulan matematiksel bir hesaplama metoduyla analitik bir pompa tasarım metodu kullanılarak referans olacak bir çark tasarımı tespiti edilmiş, önemli parametreler ve bunların değer aralıkları şekilde belirlenmiştir. Pompa performansı üzerinde etkili dört geometrik parametre ve bunların alacağı üç farklı değer ile olası 81 adet tasarım kombinasyonu meydana getirmektedir. Bu çarkların hepsinin imal edilip test edilmesi hem yüksek maliyetli olması hem de önemli zaman alacağı göz önüne alınarak Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılarak sadece 9 adet çark üzerinde çalışılmış ve geri kalan 72 çarkın performansı bu 9 çarkın pompa üzerinde test edilmesi sonucu elde edilen test verileri kullanılarak Taguchi metodu ile tahmin edilmiş ve böylece optimal çark tasarımı tespit edilmiştir. Ayrıca ANOVA analizi ile hangi parametrenin sonuç üzerinde hangi oranda etkili olduğu tespiti de yapılmıştır. Tüm analizler en iyi verim, en büyük basma yüksekliği ve debi için gerçekleştirilmiştir.

2. TAGUCHİ YAKLAŞIMI (TAGUCHI APPROACH)

Taguchi metodu, kontrol edilebilen değişkenlerin belirlenen amaç doğrultusunda etkin seviyelerini tespit edip, aynı zamanda kontrol edilemeyen faktörlerin tüm kombinasyonlarına karşı duyarsız ürünler/prosesler tasarlamaktadır. Taguchi deney tasarım tekniğini uygulayabilmek için beş temel adım söz konusudur (Şekil 1).



Şekil 1. Taguchi deney tasarımı uygulama adımları (Steps of Taguchi experimental design)

Deneysel planlama adımında, amaçlar, ölçüm metodu, sonuçları etkileyen faktörler gibi proje hakkındaki tüm kararlar verilir ve projenin başarısı bu adıma bağlıdır. Taguchi performans istatistiği Sinyal/Gürültü (S/N) oranı olarak adlandırılan üç adet ölçüt kullanılmaktadır. Bunlar aşağıdaki verilmiştir [8];

$$\begin{array}{ll} \text{Karakteristik tipi} & \text{S/N Oranı} \\ \text{En küçük en iyi} & -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum y_i^2 \right) \end{array} \quad (1)$$

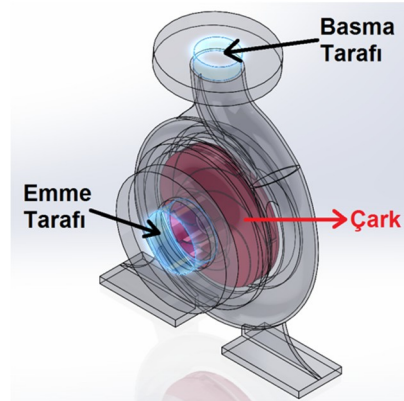
$$\begin{array}{ll} \text{Hedef değer en iyi} & -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum (y_i - y_0)^2 \right) \\ \text{En büyük en iyi} & -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right) \end{array}$$

Bu denklemler araç içine yazılan kısım ortalama kareler sapmasıdır (MSD) ve sonuçların hedeflenen değerden olan ortalama sapma miktarını belirler. Sapma kelimesi, daima mümkün olan en küçük miktarın istendiği durumlarda kullanılır. Diğer bir ifadeyle sapma veya ortalama sapma için her zaman en küçük en iyidir denebilir. Ancak S/N oranları için verilen bu denklemlerde her zaman sonucun en büyük olması en iyi sonucu vermektedir.

Taguchi, çok faktörlü deneyler için ortogonal dizileri oluşturarak özel bir tasarım geliştirmektedir. Ortaogonal dizilerin seçiminde toplam serbestlik derecesi (DOF) kriterinden yararlanılmaktadır. Deneyler gerçekleştirildikten sonra elde edilen sonuçlara bakarak, belirlenen faktörler hangilerinin ürünün performansı üzerinde ne kadar etkili olduğuna karar verilmektedir. Deney verilerinin yorumlanmasında ve gerekli kararların verilmesinde varyans analizi de (ANOVA) kullanılmaktadır.

3. TEST POMPASI TASARIM HESAPLAMALARI (DESIGN CALCULATIONS OF TEST PUMP)

Tipik bir santrifüj pompada akışkan önce Şekil 2'de gösterilen pompanın merkezine (emme tarafı) girer. Çark kanatları arasından geçen akışkan, çarkın dönme hareketleriyle teğetsel bir hız kazanır. Çark kanatları ile çarkın ön ve arka duvarı ile sınırlanan kanallar arasındaki akışkan meydana gelen santrifüj kuvvetler etkisiyle basma tarafına doğru itilir. Bu şekilde oluşan hareket, sıvının sürekli akışını ve pompanın emme tarafındaki emişini sağlar.



Şekil 2. Pompa genel görünüşü (General view of the pump)

3.1. Hidrolik Tasarım (Hydraulic Design)

Deneysel tasarım ile optimal bir pompa çarkı aramaya başlamadan önce bir referans pompa tasarımı gerçekleştirilmiştir. Analitik hesaplamalar sayesinde bir çark tasarımı elde edilmemiş aynı zamanda bu tasarım ile deneysel tasarım parametreleri ve onların seviyelerinin tespit edilmiştir. Bu pompa için tasarım parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Referans pompanın tasarım parametreleri (Design parameters of the reference pump)

Debi (Q)	0.001 m ³ /s
Basma Yüksekliği (H_m)	5 m
Devir (n)	1500 d/dk

Buna göre özgül hız;

$$n_q = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}} = 14,18$$

değeri ile tam santrifüj olarak bulunmuştur.

3.2. Deneysel Tasarım Parametrelerin Tespiti (Determination of Parameters of Design Experimental)

En iyi verim, en yüksek basma yüksekliği ve debi için deneysel tasarım yapmak maksadıyla bu büyüklükler üzerinde etkili olan dört parametrelerin tespiti yapılmıştır. Bu parametreler imalat kolaylığını öneleyerek, literatür incelemesi, mevcut salyangoza uyumlu ve pompa çarkı üzerinde şimdiye kadar yaptığımız çalışmalardan elde edilen tecrübeler ışığında performans üzerinde etkili olduğu görülen, kanat sayısı (z), çıkış açısı (β_2), çıkış çapı (D_2) ve çıkış genişliği (b_2) tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir. Belirlemiş olduğumuz parametrelerin değerleri, Tablo 2’de verilen çark tasarımından elde edilen değerleri referans alınarak tespit edilmiştir. Dört parametre ve bu parametrelerin herbirine ait üç seviye için Taguchi deneysel tasarım metodunda L9 ortogonal dizisi kullanılarak 9 adet çark imalatı planlanmıştır. Eğer tam faktöriyel bir test planlamış olsaydık toplam 81 adet pompa çarkının imalatının ve testinin gerçekleşmesi gerekecekti. Böylece Taguchi deneysel tasarım metodu ve Varyans Analizi (ANOVA) ile test edilmeyen geri kalan 72 çarkın performansı da istatistiksel olarak tahmin edilebilecektir. Tasarım parametreleri olarak belirlene bu dört parametrenin dışında kalan diğer tasarım parametreleri yapılan analitik hesaplamayda elde edilen değerlerinde sabit tutulmuştur. Tablo 2’de deneysel tasarım içinde seçilen parametreler ve seviyeleri görülmektedir.

Tablo 2. Parametreler ve seviyeler (Parameters and levels)

Parametreler	Seviye			
	1	2	3	
Kanat sayısı	z	6	7	8
Çıkış açısı [$^\circ$]	β_2	17	19	21
Çıkış çapı [mm]	D_2	95	100	105
Çıkış genişliği [mm]	b_2	10.5	8.5	6.5

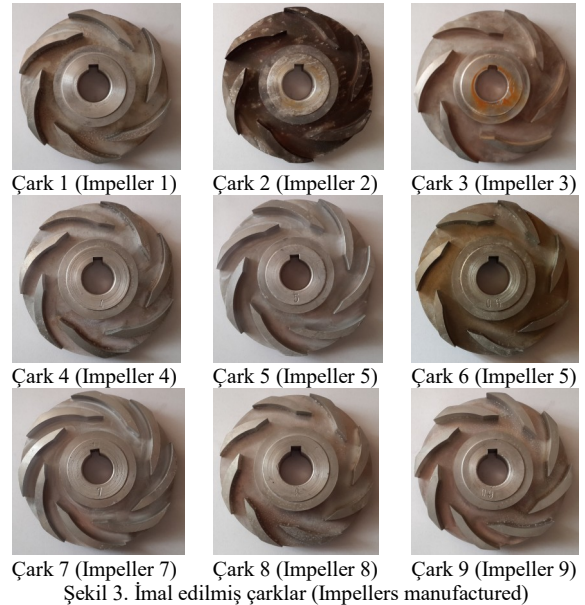
Bu parametre ve seviyelere için L9 ortogonal dizisine göre üretilip, test yapılması gereken çark tasarımları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. İmal edilecek çark geometrileri (Impeller geometries which will manufacture)

	(z)	(β_2) [$^\circ$]	D_2 [mm]	b_2 [mm]
Çark 1	6	17	95	10.5
Çark 2	6	19	100	8.5
Çark 3	6	21	105	6.5
Çark 4	7	17	100	6.5
Çark 5	7	19	105	10.5
Çark 6	7	21	95	8.5
Çark 7	8	17	105	8.5
Çark 8	8	19	95	6.5
Çark 9	8	21	100	10.5

3.3. Çarkların İmalatı (Manufacturing of Impellers)

Tablo 3’de verilen değerlere göre dokuz adet çark CNC tezgâhta işlenerek imal edilmiştir. Bu işlenmiş çarklar Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. İmal edilmiş çarklar (Impellers manufactured)

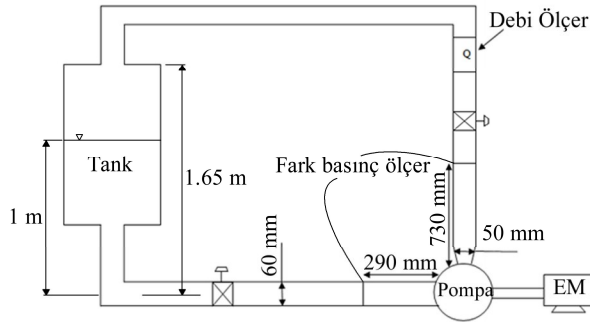
4. DENEY DÜZENEGİ VE ÖLÇÜMLER (EXPERIMENTAL SETUP AND MEASUREMENT)

4.1. Deneilerin Amacı (Purpose of The Experimental)

Bu deneylerin amacı Taguchi Deneysel tasarım metodu ile belirlenmiş olan 9 çarkın performansının ölçülmesidir.

4.2. Denei Düzenegi (Experimental Setup)

Test düzeneğinde pompa seviyesinden 1 m yukarısına kadar su dolu olan bir tanktan emiş yapmakta ve aynı tanka 1,65 m'ye basmaktadır. Test düzeneğinde kullanılan boru çapı 60 mm, sadece pompa çıkışında 50 mm çapa sahip olup çıkıştan 5 cm sonra tekrar boru çapına yavaş olarak genişlememektedir. Bunun için her bir çark için pompa girişinden 290 mm öncesinden ve çıkışından 730 mm sonrasında problemleri olan alan bir fark basınç ölçer ve pompa çıkışındaki fark basınç ölçer probundan sonra bir debi ölçer kullanılmıştır. Test düzeneği şematik gösterimi Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. Denei düzeneginin şematik gösterimi (Schematic view of test unit)

4.3. Ölçüm Cihazları (Measurement Devices)

Ölçümler %0.5 hassasiyete sahip Krohne IFC 010D model elektromanyetik debi ölçer ve %2.5 hassasiyete sahip Fischer DE28 model diferansiyel basınç farkı ölçer ile yapılmaktadır. Testlerde kullanılan elektrik motoru için $W_{nominal} = 1.5$ kW ve $n_{nominal} = 2820$ d/dk'dır. Ayrıca elektrik motorunu başlatma, durdurma, devir ve dönüş yönü kontrolü ve meydana gelen tork değeri okumaları için SIEMENS Micro Master 6SE3121 model invertör kullanılmıştır.

4.4. Ölçüm Prosedürü (Measurement Procedure)

İmal edilen çarkların hepsi maliyetler ve mevcut test düzeneği göz önüne alınarak aynı sabit dairesel kesitli bir salyangoz içinde test edilmiştir. Testlerde Şekil 4'de

görülen pompa çıkışından sonraki vana başlangıçta kapanarak ve her seferinden bir kademe açılarak onbir kademeden sonra tamamen açık hale gelmiştir. Her bir kademede elde edilen debi, basınç ve tork değeri kaydedilerek pompa karakteristik ve verim eğrileri çıkarılmıştır. Tüm ölçümler sabit oda sıcaklığı yaklaşık 20°C'de yapılmıştır.

Manometrik basma yüksekliği H_m aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$H_m = \frac{\Delta P}{\rho g} + (z_b - z_e) \quad (2)$$

Burada ΔP fark basınç ölçer tarafından ölçülen çıkış ve girişteki basınç farkı ve $(z_b - z_e)$ ise bu iki ölçüm noktası arasındaki seviye farkıdır. Pompanın verimi;

$$\eta = \frac{\rho g Q H_m}{W_{mil}} \quad (3)$$

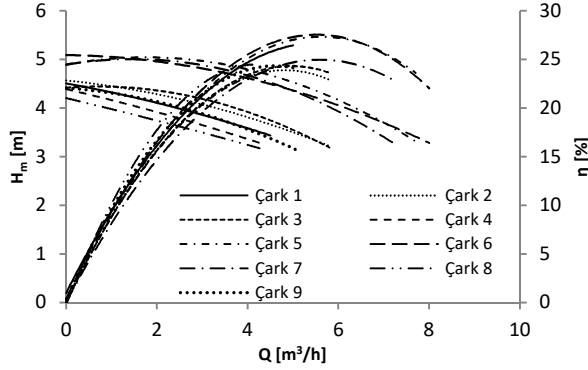
$$W_{mil} = T_{\%nom} \frac{n \cdot W_{nominal}}{n_{nominal}} \quad (4)$$

Burada $T_{\%nom}$ pompa miline verilen nominal motor torkunun %'sidir ve deneyde deneyde invertör ekranından okunmaktadır.

Deneiler 1500 d/dk için üç kez tekrar edilmiştir. Her çark salyangoza takılıp o çark için bir karakteristik eğri çıkarılmış, daha sonra bu çark çıkarılarak diğeri sırayla takılmış ve onların da karakteristik eğrisi çıkarılmıştır. Bu şekilde tüm çarklar test edildikten sonra aynı süreç iki kez daha tekrar edilerek toplam üçer kez test edilmiştir. Tüm bu testlere göre pompaların en yüksek verim noktası ve bu noktalara karşılık gelen basma yüksekliği ve debi değerleri dikkate alınarak Taguchi ve ANOVA hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

4.5. Denei Sonuçları (Experimental Results)

Deneileri yapılan 9 çarka ait 1500 d/dk dönme hızında pompa karakteristik ve verim eğrileri aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi çarkların maliyeti düşürmek için mevcut basit bir salyangoz ile ve basit çark tasarımları ile yapıldığı için verimleri yüksek değildir. Ancak çalışmanın amacı çarkın geometrik bazı parametrelerinin pompa performansı üzerinde etkilerini incelemek olduğundan tüm pompaların kendi içlerinde yapılacak bir değerlendirme ile bu parametrelerin sonuç üzerindeki etkilerine bakılabilir.



Şekil 5. Çarkların karakteristik ve verim eğrileri (Characteristic and efficiency curves of impellers)

Tüm pompalar için yapılan gerekli net pozitif emme yükü yaklaşık 9.8 m hesaplanmış olup pompaların kavitesiz çalıştığı tespit edilmiştir.

4.6. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Verim denklemine (Denk. 3) göre deney sonuçları üzerinde debi ve basınç ölçümleri göz önüne alarak yapılan belirsizlik analizi aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir [9];

$$w_{\eta} = \mp \left[\left(\frac{\partial \eta}{\partial Q} w_Q \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial H_m} w_{H_m} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

burada w_Q ve w_{H_m} sırasıyla debi ve basınç ölçümlerinden kaynaklanan belirsizliklerdir. Bu denkleme göre Çark 1'in en iyi verim noktasındaki deneysel sonuçlara ve ölçüm cihazlarının hassasiyetlerine bakılarak yapılan hesaplama göre $w_{\eta} = \mp 0.692$ hesaplanmıştır, buna bu noktadaki verim %27.18 olduğuna göre belirsizlik % ∓ 2.548 olacaktır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Faktörlerin ortalama etkileri hesaplanan ve böylece istenilen ortalama faktör seviyelerine karar veren geleneksel metot, sonuçların basit ortalamalarına bakar. Bu ortalama hesabı daha basit olmasına rağmen, grup içindeki verilerin değişkenliğini yakalayamaz. Başka bir ifadeyle, deney sonuçlarının ortalaması optimum tasarıma karar vermek için kullanıldığında, o sadece yeni tasarımın sonuçlarının ortalamasını tahmin edebilir, ortalama etrafındaki varyasyon için kullanılmaz. Varyasyonu azaltmak, güçlü bir tasarımın amacı ve niçin birden fazla test yapmamız gerektiğinin sebebidir. Çok sonuçlu deneylerdeki değişkenlik bilgisini yakalamak için, hem değişkenliği hem de ortalamaları tanımlayabilmeliyiz [8]. Bu nedenlerden dolayı ortalama

sapma yerine, ortalama kareler sapma (MSD) kullanılması tercih edilmelidir. Denklem 1'de verilen S/N oranları bu MSD değerlerinin logaritmasının alınmış ve -10 ile çarpılmış halidir. Böylece her zaman S/N oranlarının en büyük değeri en iyi koşulu sağlaması garanti altına alınmıştır.

Deneysel veriler kullanılarak en büyük verim, basma yüksekliği ve debiyi verecek çark tasarımları ayrı ayrı yapılan analizler ile Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılarak tespit edilmiştir. ANOVA analizi ile her bir parametrenin sonuçlar üzerinde etki oranları belirlenmiştir. Aynı zamanda bu optimal koşulları sağlayan pompalardan beklenen performanslar da hesaplanmıştır.

5.1. En Büyük Verim İçin Optimum Çark Geometrisinin Tespiti (Optimal Impeller For Maximum Efficiency)

Deneysel olarak elde edilen verim değerleri için denklem 1'deki en büyük en iyi Sinyal/Gürültü oranları hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4'da verilmiştir.

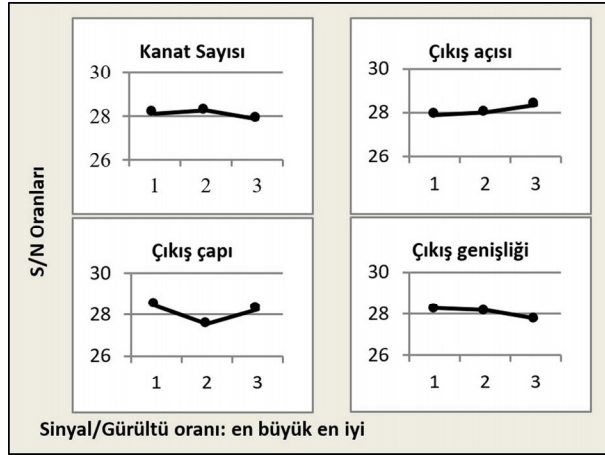
Tablo 4. En büyük verim sonuçları ve S/N oranları (S/N rates and results of maximum efficiency analysis)

Çark No	Test 1	Test 2	Test 3	S/N
1	27.18	26.51	26.04	28.486
2	23.82	23.94	24.37	27.619
3	24.52	26.4	26.71	28.239
4	23.2	22.35	23.46	27.230
5	25.66	27.32	27.56	28.565
6	27.74	28.05	28.38	28.960
7	24.83	25.1	24.9	27.939
8	24.91	24.99	24.01	27.827
9	24.29	25.37	24	27.795

Her bir parametre seviyesinin aldığı değerlerin S/N oranı için örnek hesaplama şu şekildedir: *kanat sayısı* (z) parametresinin 1 nolu seviyesinde olduğu 1, 2 ve 3 no'lu çarkların aldığı S/N oranlarının aritmetik ortalaması alınarak bu parametrenin 1 nolu seviyesine ait S/N oranı hesaplanış olur. Bu hesaplama aşağıdaki gibidir.

$$S/N_{z,1} = \frac{28.486 + 27.619 + 28.239}{3} = 28.115$$

Bu yöntemle hesaplanan parametrelerin her seviyelerinde alacağı S/N oranı değerleri Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. En büyük verim için parametrelerin seviyelerine göre aldığı S/N oranları (S/N rates of the parameters in terms of levels for maximum efficiency analysis)

S/N oranlarının daima en büyük değerde olması arzu edildiği için Tablo 5’de her parametrenin optimal seviyeleri verilmiştir. Bu belirlenen çark geometrisi test edilen 9 çark içinde bulunmamaktadır. İmal edilmeyip test edilmeyen geri kalan 72 çark geometrisi içinde yer almaktadır.

Tablo 5. En büyük verim için optimum koşullar (Optimal conditions for maximum efficiency analysis)

Parametre	Optimum seviye	Optimum Değer
z	2	7
β_2	3	21 ⁰
D_2	1	95 mm
b_2	1	10.5 mm

Parametreler arasındaki etkileşim yaygın bir durumdur. İki parametre arasındaki etkileşimi anlamak, deneysel sonuçları yorumlamada önemli bir etkiye sahiptir. Etkileşimleri içeren deneylerimizi nasıl tasarlayacağımız ve etkileşimlerin varlığı söz konusu ise sonuçları nasıl analiz edeceğimiz ya da hangi parametrenin hangi seviyesi daha çok istenen bir seviye olduğu kararı önemlidir. Çalışmamızın bu aşamasında tespit ettiğimiz parametreler arasındaki etkileşim Tablo 6’da görülmektedir. Bu sonuçlara göre Kanat sayısı ve Çıkış açısı %63.65 ağırlığıyla birbirleriyle en büyük etkileşime sahip iki parametredir.

Tablo 6. En büyük verim analizi için parametreler arasındaki etkileşim (Interactions of the parameters for maximum efficiency analysis)

Etkileşen parametre çiftleri	Etkileşim ağırlığı (%)
Kanat sayısı x Çıkış açısı	63.65
Kanat sayısı x Çıkış genişliği	36.49
Çıkış açısı x Çıkış çapı	30.27
Kanat sayısı x Çıkış çapı	24.92
Çıkış çapı x Çıkış genişliği	18.78
Çıkış açısı x Çıkış genişliği	11.52

Tablo 7’de bu deneysel tasarımın ANOVA hesaplaması sonuçları görülmektedir. ANOVA analizi sonucuna göre en büyük verim değerine ulaşmak için pompa çarkının performansını etkileyen en önemli parametre %56.08 etkiye sahip olan çıkış çapıdır. Bunu %19.31 ile çıkış genişliği, %13.95 ile çıkış açısı takip etmektedir. Kanat sayısı %10.66 ile bu çalışmada pompa çarkının performansı en az etkileyen parametredir. Performans üzerindeki parametrelerin bu etkileri göreceli bir yüzdelik etkiyi gösterir. Aynı pompa çarkı değerlendirme kriteri değiştirilerek yapılacak olan başka bir analizde etki yüzdeleri değişebilmektedir. Bu yüzden bu etkiler mutlak değil görecelidir.

Tablo 7. En büyük verim için ANOVA hesaplaması (ANOVA calculation for maximum efficiency analysis)

	Serbestlik derecesi (DOF)	Karelerin Toplamı (S)	Varyans (V)	Yüzde (P%)
z	2	0.245	0.122	10.66
β_2	2	0.32	0.16	13.95
D_2	2	1.288	0.644	56.08
b_2	2	0.443	0.222	19.31
Hata	0			0.00

Toplam serbestlik derecesi (9-1) ile her bir parametrenin serbestlik derecelerinin toplamlarının (2+2+2+2) farkı sıfır olduğu sürece hata terimi de sıfır olacaktır. Bu deneysel bir hata veya analize eklenmemiş faktörlerin sonuca herhangi bir etkisinin olmadığı anlamına gelmemektedir. Bu sadece deneysel hataları yakalayabilmek için, deneylerde herhangi durumun bulunmadığı anlamına gelir. Hata terimi ancak DOF sıfıra eşit olmadığı koşulda bir değere sahip olacaktır.

Tablo 7’de verilen maksimum verim için optimum koşulları göz önüne alarak bu koşullarda beklenen S/N oranı:

$$S/N_{tahmin} = S/N_{z,2} + S/N_{\beta_2,3} + S/N_{D_2,1} + S/N_{b_2,1} - 3 \frac{\bar{T}}{n}$$

$$S/N_{tahmin} = 28.251 + 28.331 + 28.424 + 28.282 - 3 \frac{252.66}{9} = 29.068$$

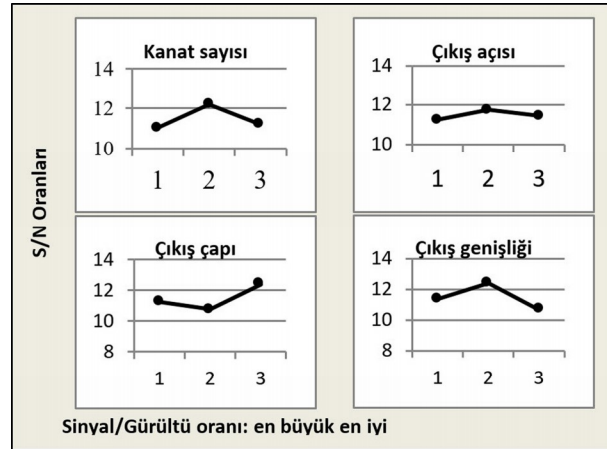
Bu sonuç verime dönüştürüldüğünde bu optimum pompa çarkından beklenen verim % 28,4’tür.

5.2. En Büyük Basma Yüksekliği İçin Optimum Çark Geometrisinin Tespiti (Optimal Impeller For Maximum Head)

Aynı işlemleri en iyi verim noktasındaki basma yüksekliğinin en büyük değerini elde etmek için yaptığımızda elde edilen sonuçlara göre Tablo 8'de S/N oranları ve Şekil 7'de en büyük basma yüksekliği için parametrelerin seviyelerine göre aldığı S/N oranları verilmiştir.

Tablo 8. Basma yüksekliği sonuçları ve S/N oranları (S/N rates and results of head analysis)

Çark No	Test 1	Test 2	Test 3	S/N
1	3.536	3.303	3.2	10.469
2	3.486	4	3.923	11.554
3	3.217	3.872	3.822	11.120
4	3.159	3.434	3.434	10.461
5	4.505	4.638	4.679	13.266
6	4.546	4.242	4.485	12.905
7	4.505	4.261	4.373	12.822
8	3.281	3.291	3.413	10.440
9	3.054	3.465	3.434	10.373



Şekil 7. En büyük basma yüksekliği için parametrelerin seviyelerine göre aldığı S/N oranları (S/N rates of the parameters in terms of levels for maximum head analysis)

Bu S/N oranlarına göre sonra Tablo 9'da her parametrenin optimal seviyeleri verilmiştir.

Tablo 9. En büyük basma yüksekliği için optimum koşullar (Optimal conditions for maximum head analysis)

Parametre	Optimum seviye	Optimum Değer
z	2	7
β_2	2	19°
D_2	3	105 mm
b_2	2	8.5 mm

Parametreler arasındaki etkileşime bakıldığında Tablo 10'da verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 10. En büyük basma yüksekliği için parametreler arasındaki etkileşim (Interactions of the parameters for maximum head analysis)

Etkileşen parametre çiftleri	Etkileşim ağırlığı (%)
Çıkış açısı x Çıkış genişliği	71.07
Kanat sayısı x Çıkış çapı	62.17
Kanat sayısı x Çıkış genişliği	27.54
Kanat sayısı x Çıkış açısı	25.06
Çıkış çapı x Çıkış genişliği	24.38
Çıkış açısı x Çıkış çapı	15.12

Tablo 11'de bu deneysel tasarım için ANOVA hesaplaması sonuçları görülmektedir.

Tablo 11. En büyük basma yüksekliği için ANOVA hesaplaması (ANOVA calculation for maximum head analysis)

	Serbestlik derecesi (DOF)	Karelerin Toplamı (S)	Varyans (V)	Yüzde (P%)
z	2	2.376	1.188	20.62
β_2	2	0.381	0.19	3.31
D_2	2	4.087	2.043	35.48
b_2	2	4.676	2.338	40.59
Hata	0			0.00

ANOVA analizi sonucuna göre maksimum basma yüksekliği değerine ulaşmak için pompa çarkının performansını etkileyen en önemli parametre %40.49 etkiye sahip olan çıkış çapıdır. Bunu %35.48 ile çıkış çapı, %20.62 ile kanat sayısı takip etmektedir. Çıkış açısı %3.31 ile bu çalışmada pompa çarkının performansı en az etkileyen parametredir.

Tablo 11'de verilen maksimum verim için optimum koşulları göz önüne alarak bu koşullarda beklenen S/N oranı:

$$S/N_{tahmin} = 12.210 + 11.753 + 12.403 + 12.427 - 3 \frac{103.41}{9} = 14.323$$

Bu sonuç verime dönüştürüldüğünde bu optimum pompa çarkından beklenen basma yüksekliği 5,2 m'dir.

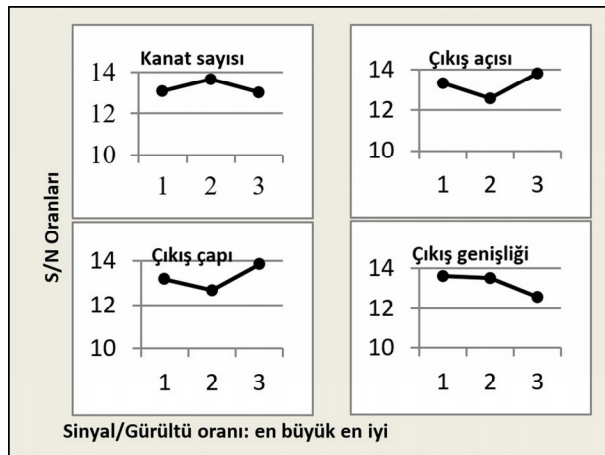
5.3. En Büyük Debi İçin Optimum Çark Geometrisinin Tespiti (Optimal Impeller For Maximum Flow Rate)

Aynı işlemleri en iyi verim noktasındaki debinin en büyük değerini elde etmek için yaptığımızda S/N oranları için Tablo 12'de aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 12. Debi sonuçları ve S/N oranları (S/N rates and results of flow rate analysis)

Çark No	Test 1	Test 2	Test 3	S/N
1	4.5	4.7	5	13.479
2	5	3.5	4	12.120
3	5.8	4.39	4.5	13.599
4	4.3	4	4.4	12.512
5	5	5	5	13.979
6	5	6	5	14.446
7	5	5	5	13.979
8	4	4	3.5	11.619
9	5.12	4.5	4.5	13.407

Parametrelerin her seviyelerinde alacağı S/N oranı değerleri Şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 8. En büyük debi için parametrelerin seviyelerine göre aldığı S/N oranları (S/N rates of the parameters in terms of levels for maximum flow rate analysis)

Bu S/N oranlarına göre sonra Tablo 13’de her parametrenin optimal seviyeleri verilmiştir.

Tablo 13. En büyük debi için optimum koşullar (Optimal conditions for maximum flow rate analysis)

Parametre	Optimum seviye	Optimum Değer
z	2	7
β_2	3	21^0
D_2	3	105 mm
b_2	1	10.5 mm

Parametreler arasındaki etkileşime bakıldığında Tablo 14’deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 14. En büyük debi için parametreler arasındaki etkileşim (Interactions of the parameters for maximum flow rate analysis)

Etkileşen parametre çiftleri	Etkileşim ağırlığı (%)
Kanat sayısı x Çıkış çapı	49.99
Çıkış açısı x Çıkış genişliği	41.74
Çıkış çapı x Çıkış genişliği	39.86
Kanat sayısı x Çıkış genişliği	32.29
Çıkış açısı x Çıkış çapı	25.96
Kanat sayısı x Çıkış açısı	10.16

Tablo 15’de bu deneysel tasarımımızın ANOVA hesaplaması sonuçları görülmektedir.

Tablo 15. En büyük debi için ANOVA hesaplaması (ANOVA calculation for maximum flow rate analysis)

	Serbestlik derecesi (DOF)	Karelerin Toplamı (S)	Varyans (I)	Yüzde (P%)
z	2	0.755	0.377	10.53
β_2	2	2.355	1.177	32.84
D_2	2	2.077	1.038	28.97
b_2	2	1.984	0.992	27.67
Hata	0			0.00

ANOVA analizi sonucuna göre maksimum debi değerine ulaşmak için pompa çarkının performansını etkileyen en önemli parametre %32,84 etkiye sahip olan çıkış açısıdır. Bunu %28,97 ile çıkış çapı, %27,67 ile çıkış genişliği takip etmektedir. Kanat sayısı %10,53 ile bu çalışmada pompa çarkının performansı en az etkileyen parametredir.

Tablo 15’de verilen maksimum verim için optimum koşulları göz önüne alarak bu koşullarda beklenen S/N oranı:

$$S/N_{tahmin} = 13.646 + 13.817 + 13.852 + 13.622 - 3 \frac{119.14}{9} = 15.223$$

Bu sonuç verime dönüştürüldüğünde bu optimum pompa çarkından beklenen debi $5.77 \text{ m}^3/\text{h}$ ’dir.

5.4. Tartışma (Discussion)

Tüm bu analizlere göre, S/N analizlerinden elde edilen en uygun çark tasarımlarına göre, en yüksek verim değerini için; kanat sayısı 7, çıkış açısı 21^0 , çıkış çapı 95 mm ve çıkış genişliği 10,5 mm, en yüksek basma yüksekliğini için; kanat sayısı 7, çıkış açısı 19^0 , çıkış çapı 105 mm ve çıkış genişliği 8,5 mm ve en yüksek debi için de kanat sayısı 7, çıkış açısı 21^0 , çıkış çapı 105 mm ve çıkış genişliği 10,5 mm olarak hesaplanmıştır. Her bir durum farklı bir tasarım kombinasyonu bu çarkların hiçbiri imalat ve testleri yapılan 9 çark arasında yer almamaktadır. Ancak kanat sayısı her analizde 7 olarak bulunmuştur. Çıkış açısı için genel bir optimal değer 21^0 alınabilir çünkü basma yüksekliği analizinde optimal değer olarak 19^0 ile 21^0 arasında S/N gürültü oranlarındaki fark çok küçüktür, yani bu değerden birini tercih edilmesi sonucu değiştirmeyecektir. Ayrıca basma yüksekliği analizinde çıkış açısı ANOVA sonuçlarına göre göre %3.31 oranında etkili olması, herhangi bir değer seçimi basma yüksekliği üzerinde ciddi bir etkiye sahip değildir. ANOVA sonuçlarına göre çıkış çapı 95

mm optimal değerinde %56.08 ile en büyük etkiye debi üzerinde sahiptir. Ancak diğer analizlerde elde edilen 105 mm'lik değerinin tercih edilmesi verimi çok fazla düşürmeyeceği S/N oranları değerlerinden de görülmektedir. Ancak 95 mm seçimi debi ve özellikle de basma yüksekliği kayda değer şekilde azaltmaktadır. Çıkış genişliğinin bulunan optimal değerleri olan 8.5 mm ve 10.5 mm seçimleri debi ve verim üzerindeki etkisi azdır. Ancak basma yüksekliği üzerindeki etkisi daha büyüktür. Bu yüzden çıkış genişliğinin 8.5 mm olarak seçilmesi daha doğru olacaktır. Sonuç olarak kanat sayısının 7, çıkış açısının 21 °, çıkış çapının 105 mm ve çıkış genişliğinin 8.5 mm olarak seçilmesi hem verim, hem basma yüksekliği hem de debinin en büyük değerlerini elde edebilmek için optimal seçim olacaktır.

6. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bir pompa çarkının kanat sayısı, çıkış açısı, çıkış çapı ve çıkış genişliği olmak üzere dört farklı tasarım parametresinin her birinin aldığı dört farklı değer ile yapılan Taguchi deney tasarımında 9 adet çark imalatı yapılmıştır. 1500 d/dk için testleri gerçekleştirilen bu çarkların verim, basma yüksekliği ve debi gibi sonuçlarını en büyük yapmak için yapılan S/N analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun neticesinde her biri için üç farklı optimal çark tasarımı elde edilmiştir. Bu optimal çarklar ile elde edilebilecek sonuçlar da tahmin edilmiştir. Yapılan her S/N analizi için de varyans analizleri (ANOVA) yapılarak her parametrenin bu sonuçlar üzerindeki etki oranları hesaplanmıştır. Bu analizlerin neticesinde kanat sayısının 7, çıkış açısının 21 o, çıkış çapının 105 mm ve çıkış genişliğinin 8.5 mm olarak seçilmesi hem verim, hem basma yüksekliği hem de debinin en büyük değerlerini elde edebilmek için optimal seçim olacağı görülmüştür. Bu çalışmanın sonunda böylece verim, basma yüksekliğini ve debi değerlerini aynı anda maksimize edecek parametre değerleri tespit edilmiştir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] M. Nataraj ve V. Arunachalam, "Optimizing impeller geometry for performance enhancement of a centrifugal pump using the Taguchi quality concept," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, cilt 220, no. 7, pp. 765-782, 2006.
- [2] L. Zhou, W. Shi, W. Lu, R. Xu ve C. Wang, "Orthogonal test and optimization design of submersible pump guide vanes," *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, cilt 29, no. 4, pp. 312-315, 2011.
- [3] M. Nataraj ve R. R. Singh, "Analyzing pump impeller for performance evaluation using RSM and CFD," *Desalination and Water Treatment*, cilt 52, no. 34-36, pp. 6822-6831, 2014.
- [4] R. R. Singh ve M. Nataraj, "Optimizing impeller geometry for performance enhancement of a centrifugal blower using the taguchi quality concept," *International Journal of Engineering Science and Technology*, cilt 1, no. 4, pp. 4308-4314, 2012.
- [5] R. Spence ve J. Amaral-Teixeira, "A CFD parametric study of geometrical variations on the pressure pulsations and performance characteristics of a centrifugal pump," *Computers & Fluids*, cilt 38, no. 6, pp. 1243-1257, 2009.
- [6] S.-H. Baek, S.-H. Hong, S.-S. Cho, D.-Y. Jang ve W.-S. Joo, "Optimization of process parameters for recycling of mill scale using Taguchi experimental design," *Journal of Mechanical Science and Technology*, cilt 24, no. 10, p. 2127-2134, 2010.
- [7] V. Grapsas, F. Stamatelos, J. Anagnostopoulos ve D. Papantonis, "Numerical study and optimal blade design of a centrifugal pump by evolutionary algorithms," *International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems*, Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 26-33.
- [8] R. R. K., Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement, John Wiley & Sons, 2001.
- [9] J. P. Holman, Experimental methods for engineers, McGraw-Hill, 2001.