



## Cavitation erosion wear behavior of ship propeller material: Analysis of surface roughness ( $R_a$ ) using the taguchi method

Sedat Can Tini<sup>1\*</sup>, Adalet Zeren<sup>1</sup>, Yasemin Yıldırım Avcu<sup>1</sup>, Eray Abakay<sup>2</sup>, Egemen Avcu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kocaeli University, 41001, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Sakarya University, 54050, Sakarya, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Machinery and Metal Technologies, Ford Otosan Automotive Vocational School, Kocaeli University, 41650, Kocaeli, Türkiye

### Highlights:

- Design of cavitation erosion test rig at different cavitation attack angles
- Taguchi analysis with cavitation erosion parameters
- The most important parameter affecting surface roughness ( $R_a$ )

### Keywords:

- Wear
- Marine applications
- Copper alloy
- Taguchi method
- Cavitation water jet

### Article Info:

Research Article

Received: 30.07.2024

Accepted: 07.10.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1525114

### Correspondence:

Author: Sedat Can Tini

e-mail:

sedatcantini@hotmail.com

phone: +90 534 815 4434

### Graphical/Tabular Abstract

The study involved conducting cavitation erosion tests on copper alloy, which is a commonly used material for ship propellers that are prone to cavitation erosion. The tests were performed in a high-pressure cavitation water jet test setup, which was designed following the guidelines specified in ASTM G134-95 standards. Tests were conducted at different levels using the Taguchi experimental design method to examine the impact of parameters on surface roughness caused by cavitation erosion. The graphical representation in Figure A displays the average Signal/Noise (S/N) ratios obtained from the Taguchi experiment results.

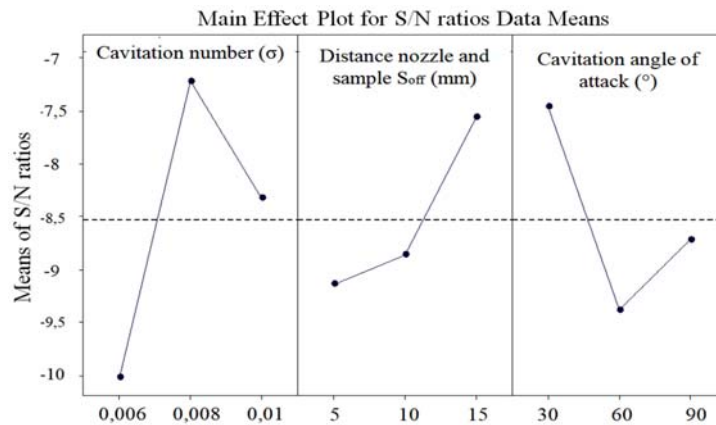


Figure A. Taguchi  $R_a$  surface roughness variation Signal/Noise (S/N) ratio graphs

**Purpose:** This study aims to examine the impact of various parameters on the erosion behavior of Manganese Aluminum Bronze (MAB-CU4) alloy. This alloy has received limited attention in previous research and is susceptible to cavitation erosion during operation. The study specifically focuses on how these parameters affect the change in surface roughness ( $R_a$ ), using the Taguchi experimental design. The research findings aim to offer crucial insights into the variations in damage mechanisms caused by cavitation erosion, based on different parameters.

**Theory and Methods:** The foundation of the research lies in the cavitation number, a dimensionless quantity derived from Bernoulli's principle. It is calculated by dividing the static pressure by the dynamic pressure. The experiments were conducted using the L9 orthogonal array experimental design recommended by the Taguchi method. The parameters and levels considered for analysis were the cavitation attack angle, distance between the nozzle and the sample, and cavitation number, all of which are known to be influential in cavitation erosion. 3D optical profilometer and SEM images were taken for material characterization.

**Results:** Based on the Taguchi experimental design principle of "The Large is Better" the surface roughness  $R_a$  value change is identified as the factor that has the greatest impact on surface roughness change at the  $\sigma=0.008$  cavitation number level,  $S_{off}=15$  mm nozzle-sample distance level, and  $30^\circ$  cavitation attack angle level. The variance (ANOVA) analysis showed that the cavitation number has the highest impact, accounting for 42.57%, on the change in surface roughness ( $R_a$ ).

**Conclusion:** The study findings emphasize the significance of employing surface design and material selection strategies in order to mitigate the impact of cavitation erosion. The parameters of cavitation attack angles, cavitation number, and nozzle distances were optimized to directly impact the surface roughness and durability, which in turn affect cavitation erosion.



## Gemi pervane malzemesi kavitasyon erozyonu aşınma davranışı: Yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) değişiminin Taguchi yöntemiyle analizi

Sedat Can Tini<sup>1\*</sup>, Adalet Zeren<sup>1</sup>, Yasemin Yıldırım Avcu<sup>1</sup>, Eray Abakay<sup>2</sup>, Egemen Avcu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, 41001, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup>Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 54050, Sakarya, Türkiye

<sup>3</sup>Kocaeli Üniversitesi, Ford Otosan Otomotiv Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Bölümü, 41650, Kocaeli, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Farklı kavitasyon hücum açılarında kavitasyon erozyonu test cihazı tasarımı
- Kavitasyon erozyonu parametreleri ile Taguchi analizi
- Yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) etkileyen en önemli parametre

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.07.2024

Kabul: 07.10.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1525114

### Anahtar Kelimeler:

Aşınma,  
denizcilik uygulamaları,  
bakır alaşımı,  
Taguchi methodu,  
kavitasyon su jeti

### ÖZ

Bu çalışmada, çalışma sırasında kavitasyon olayına maruz kalan ve gemi pervanelerinde tercih edilen Mangan Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımının kavitasyon aşınması davranışında etkili olan farklı parametreler incelenmiştir. Çalışma, özellikle bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğündeki ( $R_a$ ) değişimi nasıl etkilediğine odaklanmıştır. Verileri analiz etmek için Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Bu özel bağlamda, MAB-CU4 malzemesinin kavitasyon erozyonu özellikleri mevcut literatürde yalnızca asgari düzeyde araştırılmıştır. Bu kapsamda çalışma; kavitasyon sayısı, hücum açısı ve mesafe gibi çeşitli parametreler dikkate alınarak yüzey pürüzlülüğü etkisinin ilk kapsamlı incelemesini temsil etmektedir. ASTM G134-95 standartlarında belirtilen özelliklere uygun olarak kavitasyon erozyonu deneyleri için yüksek basınçlı kavitasyon su jeti test cihazı tasarlanmış ve üretilmiştir. Deneyler, Taguchi deney tasarımı L9 ortogonal dik düzen kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistemin tasarımı ve analizi; kavitasyon hücum açısı ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $90^\circ$ ), nozul ile numune arasındaki mesafe ( $S_{off}=5$ ,  $10$  ve  $15$  mm) ve kavitasyon sayısı ( $\sigma=0,01$ ,  $0,008$  ve  $0,006$ ) olmak üzere belirli parametreleri ve seviyeleri içermektedir. Sonuçlar analiz edildiğinde, MAB-CU4 alaşımı yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) değişiminin,  $90^\circ$ 'ye kıyasla  $30^\circ$ 'lik kavitasyon hücum açısında iki kattan daha fazla arttığı bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğündeki bu değişimi etkileyen en önemli faktör, %42,57 değerine sahip olan kavitasyon sayısıdır. Ayrıca, elde edilen 3B optik profilometre ve SEM görüntüleri, kavitasyon erozyon parametrelerine dayalı hasar mekanizmalarındaki çeşitliliği göstermiştir.

## Cavitation erosion wear behavior of ship propeller material: Analysis of surface roughness ( $R_a$ ) using the taguchi method

### H I G H L I G H T S

- Design of cavitation erosion test rig at different cavitation attack angles
- Taguchi analysis with cavitation erosion parameters
- The most important parameter affecting surface roughness ( $R_a$ )

### Article Info

Research Article

Received: 30.07.2024

Accepted: 07.10.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1525114

### Keywords:

Wear,  
marine applications,  
copper alloy,  
Taguchi method,  
cavitation water jet

### ABSTRACT

In this research, different factors affecting the cavitation wear behaviors of Manganese Aluminum Bronze (MAB-CU4) material, which is preferred in ship propellers exposed to cavitation during operation, were investigated. The study focuses specifically on how these factors affect the change in surface roughness ( $R_a$ ). The Taguchi experimental design is employed to analyze the data. Within this particular context, the cavitation erosion characteristics of the MAB-CU4 alloy have only been minimally investigated in existing literature. This study represents the first comprehensive examination of the impact of surface roughness, considering various parameters such as cavitation number, angle of attack, and distance. A high-pressure cavitation jet test rig was designed and produced for cavitation erosion experiments, following the specifications outlined in ASTM G134-95 standards. The experiments were carried out using the L9 orthogonal array design as recommended by the Taguchi method. The design and analysis of the system included certain parameters and levels, namely distance the nozzle and the specimen ( $S_{off}=5$ ,  $10$  and  $15$  mm), cavitation attack angle ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$ ), and cavitation number ( $\sigma=0.006$ ,  $0.008$  and  $0.01$ ). When the results are analyzed, it was observed that the surface roughness ( $R_a$ ) of MAB-CU4 increases more than twice as much at a cavitation angle of attack of  $30^\circ$  compared to  $90^\circ$ . The most significant factor influencing this change in surface roughness ( $R_a$ ) is the cavitation number, which has a value of 42.57%. Furthermore, the acquired 3D optical profilometry and SEM images demonstrated the variation in damage mechanisms based on the cavitation erosion parameters.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*sedatcantini@hotmail.com, adaletz@kocaeli.edu.tr, yasemin.yildiran@kocaeli.edu.tr, eabakay@sakarya.edu.tr, avcuegemen@gmail.com / Tel: +90 534 815 4434

## 1. Giriş (Introduction)

Malzeme yüzeyinde kavitasyon baloncuklarının çökmesi ve deformasyon yaratması sonucunda oluşan kavitasyon erozyonu, bir hasar türüdür. [1, 2]. Ortaya çıkan hasarlar kavitasyon şiddetinin düşük olduğu durumlarda elastik kusur olarak ortaya çıkarken; yüksek olduğu şiddetli durumlarda ise plastik deformasyon sebebiyle yüzey sertleşmesine sebep olur ve sonucunda kavitasyon çukurlarını meydana getirir [3]. Bu tür aşırı deformasyonlar, malzeme yüzeyinin pürüzlülük değerlerinin artmasına, yorulma çatlaklarının oluşmasına ve malzeme kaybına yol açar [4]. Bu kaynaklı kusurlar sistem, mekanizma ve makinelerin çalışma sürelerini azaltarak arızalara, çalışma sırasında yüksek düzeyde titreşim, gürültü, performans kaybı ve iş kazaları nedeniyle can kaybına neden olabilmektedir. Kavitasyon olayı gemi pervaneleri, pompalar, hidrolik türbinler, valflar, yataklar, kaplinler, içten yanmalı motorlar, yakıt sistemleri, dinamometreler, hidrofiller ve hatta insan vücudunda dahi (kalp ve diz eklemleri gibi) hasarlara neden olarak yıkıcı ve zararlı sonuçlara yol açabilir [5]. Çalışma koşullarında kavitasyonun zararlı etkilerine maruz kalan gemi pervane malzemesi alaşımları CU1, CU2, CU3 ve CU4 gibi farklı tiplerde sınıflandırılmaktadır [6]. Bahsedilen bakır alaşımı malzemelerindeki kavitasyon olayı, özellikle pervane kanat basıncının düşük olduğu kesitlerde meydana gelir ve bu bölgelerde erozyon sürecini başlatır [7]. Bu sebeplerden ötürü, kavitasyon olayının zararlı etkileri ve mekanizmaları karmaşık bir süreç olup kavitasyon olayının etkilediği malzemelerin aşınma davranışlarının detaylı bir şekilde analiz edilmesi, incelenmesi ve önem verilmesi gerekmektedir [8]. Bu nedenle, tasarımcıların kavitasyonun zararlı etkilerini önlemek amacıyla neden olduğu mekanizmaları iyi kavramaları ve bu faktörleri dikkate almaları gerekmektedir. Ancak, gemi ana tahrik sistemi elamanlarından biri olan pervane malzemesi üretiminde kullanılan Mangan Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımının kavitasyon olayı kaynaklı erozyon aşınmasına dair yeterli ayrıntıda çalışmalar bulunmamaktadır.

Malzemelerin kavitasyon erozyonu aşınma davranışlarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen testler, mühendislik malzemelerinin kısa bir süre içinde aşındırılmasını sağlar. Bu süreçte, ASTM G134-95 standartlarına uygun kavitasyon su jeti erozyon testleri ile malzemelerin kavitasyon sonucunda meydana gelen aşınma hasarları test edilebilir hale getirilir [9]. Lichtarowicz (1972) ve Momma (1991)'in yaptıkları ilk araştırmalarda, katı malzemelerin kavitasyon erozyonu aşınmasına karşı dirençlerini incelemek amacıyla yüksek basınçlı su jeti ile kavitasyon erozyonu test tekniği geliştirilmiştir. Yöntemin sağladığı faydalar üzerine kısa sürede aşınma mekanizmalarının incelenmesi sağlanabileceği için pek çok araştırmacı su jeti test düzenekleri ve yöntemleri üzerine yaptıkları önemli araştırmalarla bilim dünyasına katkı sağlamışlardır [10-13]. Çalışmamızda, ASTM G134-95 için belirlenmiş standartlara uygun olarak ortaya çıkarılmış özgün yüksek basınçlı kavitasyon erozyonu test düzeneğimizin farklı kavitasyon hücum açıları kullanılarak gemi pervane malzemesi alaşımı üzerinde kavitasyon erozyonu oluşturacak şekilde özelleştirilmesi sağlanmıştır. Bu tasarım, kavitasyon erozyonunun etkilerini detaylı bir şekilde incelememize olanak tanımış ve çalışmamızın özgünlüğünü artırmıştır. Araştırmanın temeli [9], Bernoulli ilkesinden türetilen ve statik ile dinamik basınçların oranlanmasıyla akışkan dinamiği analizinde boyutsuz bir parametre olarak kullanılan kavitasyon sayısı parametresine dayanır. Kavitasyon sayısı, sıvı içindeki kavitasyon oluşumunu değerlendirmek için önemli bir gösterge olup, kavitasyonun başlangıç koşullarını belirlemeye yardımcı olur (Eş. 1) [14]. Eşitlikte  $\sigma$ , kavitasyon katsayısı,  $P_1$ , giriş basıncı (Pa) ve  $P_2$  ile iç basınç (Pa) ifade edilmektedir.

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{P_1 - P_2} = \frac{P_2 - P_v}{P_1 - P_2} = \frac{P_{iç}}{P_{giriş}} = \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

Gemi pervanesi kanatlarında yüksek yüzey pürüzlülük değerleri istenmeyen durumlardır. Bunun nedeni, pervane yüzeyindeki pürüzlülüğün deniz canlılarının bu yüzeye tutunmasına ve geminin hareketinin kısıtlanmasına yol açmasıdır. Bu sebeple, gemi pervanesi kanatları minimum pürüzlülük değerlerine sahip olacak şekilde işlenir [6]. Sonuç olarak, MAB-CU4 alaşımının çok sayıda kavitasyon erozyonu aşınmasını etkileyen değişken parametreleri (kavitasyon sayısı, nozul ile numune arası mesafe, kavitasyon hücum açısı vb.), yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) üzerindeki etkisinin derinlemesine incelenmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda deney tasarımı yöntemleri, mühendislik çalışmalarında önemli avantajlar sunarak malzemelerin performansını ve dayanıklılığını değerlendirmede etkili bir yaklaşım sağlamaktadır [15]. Bu yüzden çalışmada MAB-CU4 alaşımının yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) davranışına etki eden parametrelerin etkinliği, Taguchi deney tasarımı yöntemi ile incelenmiştir. Deneyler sonrası ortaya çıkan sonuçların analiz edilmesinde ise, Sinyal/Gürültü (S/N) oranı analizi, Regresyon analizi ve Varyans (ANOVA) analizi yöntemlerinden yararlanılmıştır. Değişen kavitasyon erozyonu parametrelerinin malzeme yüzeyinde kavitasyon hasarına neden olan farklılıkları incelemek amacıyla ise 3 boyutlu optik profilometre ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Bu çalışmada, literatürde sınırlı sayıda araştırma konusu olmuş ve kullanım şartlarında kavitasyona maruz kalan Mangan Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımının kavitasyon erozyon davranışını etkileyen parametrelerin yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) değişimi üzerindeki etkisinin Taguchi deney tasarımı ile irdelenmesi yer almaktadır. Araştırma sonuçlarının, kavitasyon erozyonuna bağlı hasar mekanizmalarının parametrelere bağlı değişiminin daha iyi anlaşılmasına önemli bilgiler sunması amaçlanmaktadır.

## 2. Deneysel Metotlar (Experimental methods)

### 2.1. Malzeme ve Hazırlama İşlemleri (Material and Preparation Procedures)

Araştırmada kullanılan Mangan Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımı; beş kanatlı, 1800 mm çapında aktif olarak çalışan gemi pervanesi malzemesi olup kum kalıpta dökülmüş ve ortam sıcaklığında soğutulmuş üretilmiştir (Şekil 1). Döküm aşamasında, sıvı dökümü için tasarlanmış yolluk kısmındaki kısımdan ise testler için numune oluşturacak silindirik parça temin edilmiştir. Müteakiben bu parça torna tezgâhi talaşlı imalat işlemleri sonrası  $t=10$  mm kalınlığında ve  $d=20$  mm çapında dairesel kesitli olarak test numuneleri olarak hazırlanmıştır. İmalat sonrası deneylerde kullanılacak farklı pürüzlülük ve özellikteki numunelerin standart ve benzer özellikte olmaları önemlidir [9]. Bu nedenle, test numunelerinin yüzeydeki kesici takım izleri ve deforme olmuş pürüzlü tabakaları kaldırılarak yüzeylerinin standart hale getirilmesi sağlanmıştır. Bu kapsamda, döküm ve talaşlı imalat işlemleri tamamlanan MAB-CU4 test numunelerinin aynı koşullarda kavitasyon erozyonu testlerinin gerçekleştirilmesi için yüzey zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Zımparalama sırasında 320, 400 ve 600 numara zımpara kâğıtları kullanılmıştır. Mekanik parlatma yöntemi için 2400 d/dk hızla dönebilen diske bağlı branda bezi ve beze sürülen polisaj parlatma pastasından oluşan kendi tasarımı parlatma cihazı kullanılmıştır. Parlatma işlemi, aşındırıcı partiküller içeren bir pastanın belirli aralıklarla parlatma bezine sürülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Parlatılan numuneler kir, toz, tortu ve yabancı maddelerin temizlenmesi için özel sprey ile temizlenmiş, Bondelin Sonorex (Almanya) ultrasonik banyo cihazında 30 °C sıcaklıkta 20 dakika boyunca etil alkol banyosu ile yıkanmış ve saç kurutma makinesi ile kurutularak ön kavitasyon erozyonu deneysel çalışmalara hazır hale getirilmiştir. Yapılan işlemler sonrası standart hale getirilen MAB-CU4 alaşımı numunelerinin Mitutoyo Surftest SJ-210 (Japonya) marka problu taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazı ile yüzey pürüzlülük ölçümleri farklı bölgelerden ölçüm ortalamaları

alınarak yapılmıştır. Alman değerlerin ASME B46.1-2002'de tanımlanan yüzey pürüzlülük parametreleri:  $R_a$ , değerlendirilen profilin aritmetik ortalama sapma değerleridir. Tablo 1'de ise MAB-CU4'ün PMI Master Pro (İngiltere) cihaz ile yapılan spektrometre analiz sonuçları verilmektedir.

## 2.2. Kavitasyon Erozyonu Testleri (Cavitation Erosion Tests)

Deneysel çalışmalar için kavitasyon su jeti erozyon test düzeneğinin tasarım aşaması ve üretimi ASTM G134-95 standartlarına uyularak özgün bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Kavitasyon erozyonu test cihazı, sızdırmaz silindirik şekilde tasarlanmış paslanmaz çelik bir kaptan oluşmaktadır. Test odası; 32 mm kalınlığında, 273 mm iç çapında ve 300 mm uzunluğunda olup, iki mika cam ile kapatılmıştır. Ayrıca, numunelerin farklı kavitasyon hücum açılarında ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $90^\circ$ ) kavitasyona maruz bırakılmasına imkân verecek şekilde tasarlanmıştır. Test cihazı; nozul, numune tutucu ve kavitasyon engelleyici millerinin yanı sıra tahliye devresi, basınç ve sıcaklık ölçerler ile valflar gibi hidrolik yardımcı elemanlardan oluşmaktadır. İlgili çalışmaların incelenmesi sonucunda belirlenen iyileştirme ihtiyaçları doğrultusunda, tasarım süreci SolidWorks paket programında başlatılmıştır (Şekil 2) [16-19].

Tasarımlar sonrası, oluşturulan teknik resimler kullanılarak imalat, montaj ve test aşaması gerçekleştirilmiştir. Şekil 3 (a), (b) ve (c) görsellerinde kavitasyon su jeti test düzeneği ekipmanları gösterilmektedir. Sistemin çalışma prensibi şöyledir: deneyler başlamadan önce test düzeneğinde gerekli ön kontroller yapıldıktan sonra numune ve nozul aynı ekseninde olacak şekilde kavitasyon test kabı içerisine yerleştirilir. Kavitasyon test kabı sabit ve açılıp

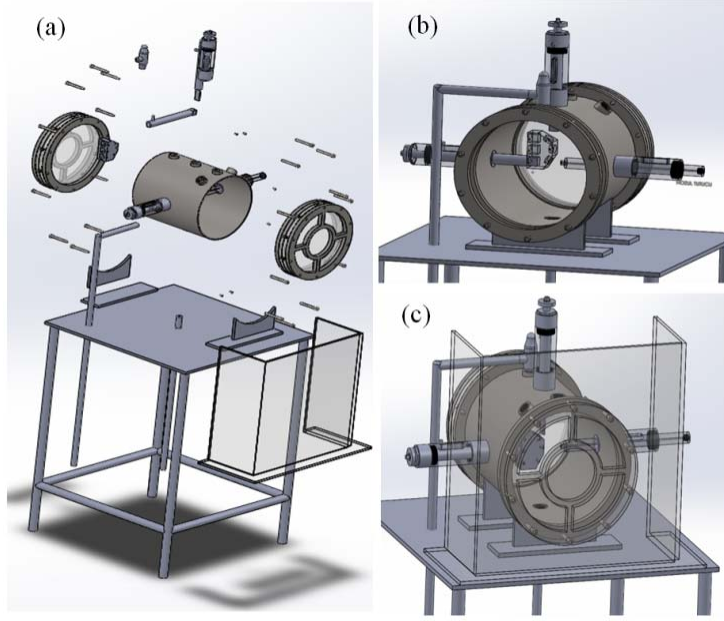
kapabilir kapak sistemi ile o kapaklara montajlı mika camları sayesinde numunelerin yerleştirilmesini ve deneyler esnasında görüntü alınabilmesini sağlamaktadır. Şebeke suyu ile doldurulan kavitasyon kabı içerisindeki iç basınç tahliye vanası ile kısılarak ayarlandıktan sonra su jeti makinesi ile gönderilen akışkan, test numunesinin yüzeyine doğru püskürtülür. Bu şekildeki kavitasyon erozyon testleri, püskürtme basıncının şebeke suyunun buhar basıncına ( $P_v$ ) eşit olduğu koşullardaki nozulda meydana gelen kavitasyon ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3 (d)'de yer alan şematik diyagram, test düzeneğinde bulunan tüm bileşenleri ve bunların işlevlerini gösterir. Deneylerin güvenli ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi için bu bileşenlerin her birinin düzgün çalışması, ayarlanması ve kontrolü büyük önem taşımaktadır. Gemi pervanesi gibi serbest form ve pitch açılara sahip tasarımlarda farklı kavitasyon hücum açılarında erozyon testlerinin değerlendirilmeleri ve analiz edilmeleri önem arz etmektedir. Bu kapsamda kurduğumuz test düzeneğinde bu eksikliği dikkate alarak numune tutucu mil aparatını, numunelerin  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $90^\circ$  düzlem açılarında monte edilebilmesini sağlayacak şekilde numune tutucu aparat ile birlikte geliştirilmiştir. Böylece kavitasyon erozyonu etkisinin farklı hücum açılarında değerlendirilebilmesine imkân sağlanmıştır. Bu özgün tasarım, konu ile ilgili kavitasyon erozyonu testleri içeren makale ve çalışmalarda bulunmamaktadır. Benzer çalışmalarda numune yüzeylerine eğim verilmeye çalışılmıştır. Ancak bu yönlü bir çalışma fazlaca talaşlı imalat işi gerektirmekte ve işçilik ve zaman kaybına neden olabilecektir [26]. Test kabının bir diğer önemli bileşeni olan nozul tutucu milinin bir ucunda imal ettiğimiz nozul monteli iken, diğer bağlantı ucuna su jeti makinesinin giriş bağlantısı yapılmıştır. Bahse konu bu millerinin yatay olarak aynı ekseninde hareket edebilme özellikleri sayesinde, istenilen nozul ile numune arası (stand off - $S_{off}$ ) mesafesinde yerleşimler yapılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.



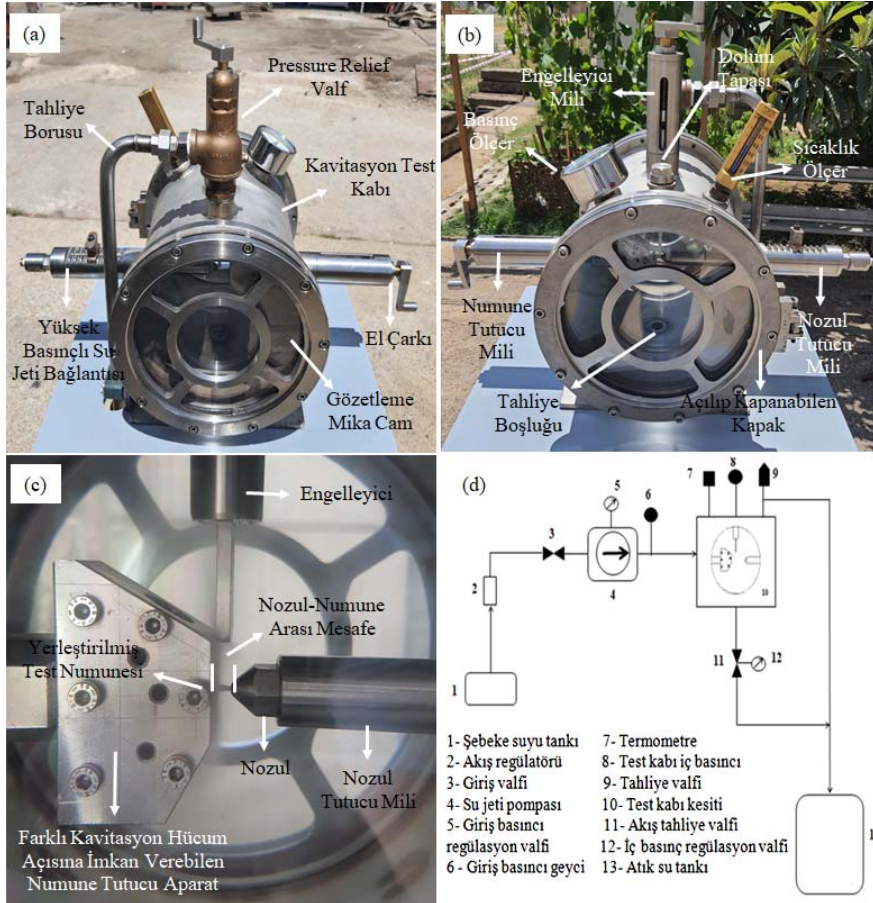
Şekil 1. MAB-CU4 numune dökümü ve kavitasyon erozyon testleri için hazırlanması (Casting of MAB-CU4 sample and preparation for cavitation erosion tests)

Tablo 1. MAB-CU4 spektrometre sonucu (% kütlece) (MAB-CU4 spectrometer result (% by weight))

Alaşım	Kimyasal Bileşim (% kütlece)									
	%Cu	%Mn	%Al	%Ni	%Fe	%Zn	%Pb	%Si	%Cd	%Se
Dökme MAB Alaşımı	75,3	12,5	7,03	2,5	2,31	0,242	<0,0050	0,0052	<0,0020	0,0630
	%Mg	%Cr	%Sn	%As	%Be	%Ag	%Co	%Bi	%Zr	
	<0,001	0,0104	0,0072	0,0183	<0,0010	<0,0010	0,0020	0,0073	0,0045	



Şekil 2. Test kabının tasarım görselleri şunlardır: (a) montaj elemanları, (b) arkadan görünüşü, (c) önden görünüşü  
(Design images of the test rig are as follows: (a) assembly elements, (b) rear view, (c) front view)



Şekil 3. Kaviteasyon su jeti düzeneği: (a) ön görünüş, (b) arka görünüş (c) kaviteasyon test kabı içi görseli (d) kaviteasyon su jeti erozyonu test düzeneği şematik diyagramı (Cavitation water jet test rig assembly: (a) front view, (b) rear view (c) visual of cavitation test rig interior (d) schematic diagram of cavitation water jet erosion test apparatus)

Test düzeneğinde yer alan yardımcı elamanlar incelendiğinde ise Lavor Hyper 1515 LP (İtalya) marka yüksek basınçlı su jeti makinesi; aksel pistonlu pompaya (5,5 kw, 15 lt/dk, 40-200 bar) sahip bir ekipman olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, kaviteasyon test kabı içerisindeki ortamın belirlenen iç basınç şartına ulaşması sürecinde, numune ile nozul arasında dik eksende ayarlanabilme kabiliyetine sahip engelleme aparat mili bir bariyer oluşturarak yüksek basınçlı akışkanın numune üzerinde kaviteasyon oluşturmasını önlemiştir. Sistemin diğer elemanlarından biri olan basınç tahliye valfi, olası sistem basıncının artması durumunda basınç tahliye görevinde; termometre, test kabı iç sıcaklığını kontrol etmekte; manometre ile ise test kabı iç basınç değerinin kontrol edilmesi sağlanmıştır.

### 2.3. Deneysel Tasarım ve Taguchi Yöntemi (Experimental design and Taguchi method)

Taguchi yöntemi, ortogonal matris deneylerine dayalı olarak optimum süreç parametrelerinin ayarlanması yoluyla sistem tasarımına olanak sağlar. Literatürde birçok deneysel çalışmada Taguchi deney tasarımı yönteminden faydalanılmaktadır [20-22]. Bu çalışmada da bu yöntemden yararlanılarak, kaviteasyon erozyonu aşınmasını etkileyen üç ana faktör ve seviye kaviteasyon sayısı ( $\sigma$ ), nozul ile numune arasındaki mesafe ( $S_{off}$ ) ve kaviteasyon hücum açısı olarak seçilmiştir. Tablo 2’de bu amaçla belirlenmiş parametre ve seviyeler ile Taguchi analizi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde giriş basıncı ( $P_1$ ) yüksek basınçlı su jeti makinesi ile sağlanırken, iç basınç ( $P_2$ ) test kabının basıncının ayarlanması ile sağlanmıştır.

Kaviteasyon erozyonu aşınmasında etkili olan parametreler, Taguchi deney tasarımı L9 ortogonal dik dizilim kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntem, deney sayısını azaltarak parametrelerin etkilerini daha etkin bir şekilde değerlendirmeye olanak tanımış ve tam faktöriyel deney tasarımında yapılması gereken deney sayılarının azaltılmasını sağlamıştır. Deney tasarımında kaviteasyon erozyonu aşınması analizi için üç adet parametre ve onlara bağlı seviyelerin belirlenmesi ile tam faktöriyel deney tasarımında  $3^3$  adet deney sayısı ortaya çıkmaktadır. Fakat Taguchi deney tasarımı L9 dik ortogonal düzen kısmi faktöriyel

ile Tablo 3’te yer alan deney tasarımı kapsamında deneysel çalışmalarda 9 adet deney için toplam 27 saat deney yapılmış ve her deney öncesi ve sonrasında test numunelerinin yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Tablo 4’te deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği deney koşulları yer almaktadır. Bahse konu yüzey pürüzlülük ölçümleri, Mitutoyo SurfTest SJ-210 (Japonya) taşınabilir problu pürüzlülük yüzey ölçüm cihazı ile numune yüzeylerinde kaviteasyon erozif aşınmaya maruz kalan bölgelerde yapılmış ve her numuneden en az beş farklı bölgede pürüzlülük değerleri alınarak bu değerlerin ortalamaları hesaplanmıştır.

Yapılan çalışmalarda MAB-CU4 alaşımı numunesinin belirlemek istediğimiz en optimum yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değerlerinin olduğu deney programının elde edilebilmesi için Minitab programı Taguchi analizinde “En Büyük En İyi (Large is Better)” karakteristiği seçilmiştir. Bu ifadeye göre Sinyal/Gürültü (S/N) oranını hesaplamakta kullanılacak olan eşitlik verilmiştir (Eş. 2). Eşitlikte sinyal değeri (S); ölçülen değer, gürültü faktörü (N); ölçümler için istenmeyen parametre değerini, Y; ölçülen karakteristik değeri ( $R_a$  yüzey pürüzlülük değeri), n; ise deney sayısını ifade etmektedir.

$$S/N = -10 \log_{10} [\Sigma(1/Y^2)/n] \quad (2)$$

### 2.4. Yüzey Topografyası ve Morfolojisi İncelemeleri (Surface Topography and Morphology Studies)

Çalışmamızda kaviteasyon su jeti erozyonuna maruz bırakılan numunelerin yüzey aşınma izleri, 3 boyutlu optik profilometre cihazında yüzey profillerinin çıkarılması ile sağlanmıştır. Böylece optik profilometre ile numunelerin yüzey topografisi, yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü hassas bir şekilde belirlenebilmiştir. Kaviteasyon su jeti erozyonu testleri sonrası meydana gelen yüzey topografisi ve gerçekleşen hasarlar Huvitz HDS-5800 (Kore Cumhuriyeti) marka model 3 boyutlu optik profilometre cihazı ile görüntülenmiştir. Daha sonra 3 boyutlu yüzey topografyalarını ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerini değerlendirmek için Mountains® 9 (Digital Surf, Besançon, Fransa) programından yararlanılmıştır. Ayrıca kaviteasyon su jeti erozyonu testleri sonrası ortaya çıkan yüzey morfolojisi ve

**Tablo 2.** Taguchi analizi parametre ve seviyeleri (Taguchi analysis parameters and levels)

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kaviteasyon Sayısı ( $\sigma$ )	0,006	0,008	0,01
Nozul ile Numune Arası Mesafe ( $S_{off}$ ) (mm)	5	10	15
Kaviteasyon Hücum Açısı ( $^\circ$ )	30	60	90

**Tablo 3.** Taguchi L9 ortogonal dizime göre yapılacak deney sayısı  
(Number of experiments to be performed according to Taguchi L9 orthogonal array)

Deney Sayısı	Kaviteasyon Sayısı ( $\sigma$ )	Nozul ile Numune Arası Mesafe ( $S_{off}$ ) (mm)	Kaviteasyon Hücum Açısı ( $^\circ$ )
1	0,006	5	30
2	0,006	10	60
3	0,006	15	90
4	0,008	5	60
5	0,008	10	90
6	0,008	15	30
7	0,01	5	90
8	0,01	10	30
9	0,01	15	60

**Tablo 4.** Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği koşullar (Conditions in which experimental studies were carried out)

Malzeme	Giriş Basıncı ( $P_1$ ) (Bar)	İç Basınç ( $P_2$ ) (Bar)	Deney Süresi (saat) (h)	Nozul Çapı ( $D_{nozlu}$ ) (mm)	Sıcaklık (T) ( $^\circ$ C)	Yoğunluk ( $g/cm^3$ )	Kullanılan Akışkan
MAB-CU4	150- 180- 200	1- 1,5- 2	Her bir numune için 3 Saat	1,5	22-27	7,52714	Şebeke suyu

numunelerde gerçekleşen hasar mekanizmaları Jeol JSM 6060 LV (Japonya) marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Elde edilen incelemeler sayesinde gemi pervanesi alaşımı malzemesindeki kavitasyon erozyonu kaynaklı hasarların görüntülenebilmesi sağlanmıştır.

### 3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussions)

Taguchi analizleri için Tablo 5'te "En Büyük En İyi (Large is Better)" eşitliği ile hesaplanan ve her deney için ölçülen yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değerleri değişimi değerleri üzerinden Sinyal/Gürültü (S/N) oranları (SNRA1) verilmiştir. Her bir faktör için Tablo 6'daki Sinyal/Gürültü (S/N) cevap tablosu incelendiğinde seviye değerleri içindeki en fazla olan değerler;

- Kavitasyon sayısı parametresinde  $\sigma=0,008$  seviyesi (S/N=-7,215 oranı ile 2. seviyeye denk gelen parametre),
- Nozul ile numune arası mesafe parametresinde  $S_{off}=15$  seviyesi (S/N=-7,561 oranı ile 3. seviyeye denk gelen parametre)
- Kavitasyon hücum açısı parametresinde  $30^\circ$  seviyesi (S/N=-7,458 oranı ile 1. seviyeye denk gelen parametre) değerlerinden oluşmuştur.

Böylece cevap tablosundaki en büyük değer en ideal parametrelerinin oluştuğu deney değerleri ortaya çıkmıştır.

#### 3.1. Sinyal/Gürültü (S/N) Analizi (Signal/Noise (S/N) Analysis)

Şekil 4'te, Taguchi deney sonuçlarına göre ortaya çıkan ortalama Sinyal/Gürültü (S/N) oranları grafik olarak gösterilmektedir. Analiz için seçilen "En Büyük En İyi (Large is Better)" karakteristik seçimi; S/N oranı grafiklerinde, grafikte belirtilen seviye değerleri içerisinde en yukarıda olan değer tüm parametrelerin seviyeleri arasında en ideal parametre olduğu anlamı kullanılarak ulaşılır. Ortaya çıkan grafik sonuçlarına ve karakteristik seçimine göre ise yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri farkı değişimi;  $\sigma=0,008$  seviyesinde,  $S_{off}=15$  mm seviyesinde ve  $30^\circ$  kavitasyon hücum açısı seviyesinde en yüksek yüzey pürüzlülük değişimini etkileyen sahip optimum değerler olacaktır.

Minitab programı Taguchi analizi sonrası Sinyal/Gürültü (S/N) oranı grafikleri incelendiğinde parametre ve seviyelerin etkisi şöyledir. Farklı kavitasyon sayılarına bağlı olarak yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değerinin değerlendirilmesinde; S/N oranları grafiği doğrusal bir değişim göstermemektedir. S/N oranı,  $\sigma=0,006$  kavitasyon sayısı seviyesinde en düşük değerde ve ortalamanın altında,  $\sigma=0,008$  kavitasyon sayısı seviyesinde diğer iki kavitasyon sayısındaki seviyelere göre en yüksek değerde olduğu görülmüştür. S/N oranı grafikte  $\sigma=0,006$  kavitasyon sayısı seviyesinden sonra artarak  $\sigma=0,008$  kavitasyon sayısı seviyesinde tepe noktaya ulaşarak tekrar azalmaya başlamıştır. Bundan yola çıkarak kavitasyon sayısı için en yüksek S/N oranına sahip optimum seviyenin, dolayısıyla en yüksek yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri değişimine  $\sigma=0,008$  kavitasyon sayısı civarında bir seviyede ulaşılmaktadır. Bu değerlerin Şekil 4'teki konumunu analiz ettiğimizde bu eğrinin ikinci dereceden bir modelle ifade edilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır ve optimum noktamın  $\sigma=0,008$  kavitasyon sayısındaki seviyesi üzerinde daha yüksek bir S/N oranında, yani daha yüksek bir  $R_a$  yüzey pürüzlülük değeri değişimi değerinde bulunduğu yorumunu yapmak mümkün olabilecektir. Ancak Taguchi analizine göre optimum performans verecek değerler faktörler için önceden belirlenen seviyeler arasından seçilebileceğinden kavitasyon sayısındaki optimum nokta olarak da  $\sigma=0,008$  kavitasyon sayısındaki seviyesi de alınabilmektedir. Grafiğinin incelenmesine devam edildiğinde  $\sigma=0,01$  kavitasyon sayısı için hesaplanan S/N oranı,  $\sigma=0,006$  kavitasyon sayısı için söz konusu olan orandan daha yüksek olmakla beraber  $\sigma=0,008$  kavitasyon sayısı için hesaplanan orandan daha düşüktür. Sonuçta ise  $\sigma=0,006$  seviyesi ile en az performans ve yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değişiminin; en yüksek yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değişimi ve performans değerlerinin ise  $\sigma=0,008$  kavitasyon sayısında olduğudur.

Nozul ile numune arası mesafe parametresi incelendiğinde;  $S_{off}=15$  mm mesafesi seviyesinin, formülasyonda en yüksek yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri değişimine ve en optimum seviye olduğu görülmüştür. Görüldüğü gibi artış doğrusal olup S/N oranı değerleri yukarı yönlü bir artış ile artma göstermektedir.  $S_{off}=5$  ve  $S_{off}=10$  mm mesafelerindeki seviyelerin S/N oranı ortalama değerinin altında olduğu ve ortalama değerinin üstünde olan  $S_{off}=15$  mm seviyesi en yüksek S/N oranına sahip değerdir. Öte yandan  $S_{off}=10$  mm mesafesi için

**Tablo 5.** Taguchi yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değişimi Sinyal/Gürültü (S/N) oranları (En Büyük En İyi) ve ortalamaları (Taguchi  $R_a$  surface roughness change Signal/Noise (S/N) ratios (Large is Better) and averages)

Deney No	Deney Süresi (saat)	Kavitasyon Sayısı ( $\sigma$ )	Nozul ile Numune Arası Mesafe ( $S_{off}$ ) (mm)	Kavitasyon Hücum Açısı ( $^\circ$ )	Yüzey Pürüzlülük Değerleri Değişimi ( $\mu\text{m}$ )			SNRA1 (dB)
					Deney Öncesi $R_a$	Deney Sonrası $R_a$	Değişim $\Delta R_a$	
1		0,006	5	30	0,157	0,478	0,321	-9,869899352
2		0,006	10	60	0,192	0,49	0,298	-10,51567472
3		0,006	15	90	0,103	0,431	0,328	-9,682523126
4		0,008	5	60	0,189	0,539	0,35	-9,118639113
5	180	0,008	10	90	0,162	0,558	0,396	-8,046096281
6		0,008	15	30	0,098	0,695	0,597	-4,480513377
7		0,01	5	90	0,12	0,499	0,379	-8,427215801
8		0,01	10	30	0,073	0,47	0,397	-8,024189865
9		0,01	15	60	0,143	0,518	0,375	-8,519374645

**Tablo 6.** Taguchi  $R_a$  yüzey pürüzlülük değişimi Sinyal/Gürültü (S/N) oranları cevap tablosu (Taguchi  $R_a$  surface roughness variation Signal/Noise (S/N) ratios answer table)

Seviye	Kavitasyon Sayısı ( $\sigma$ )	Nozul ile Numune Arası Mesafe ( $S_{off}$ ) (mm)	Kavitasyon Hücum Açısı ( $^\circ$ )
1	-10,023	-9,139	-7,458
2	-7,215	-8,862	-9,385
3	-8,324	-7,561	-8,719
Delta	2,808	1,578	1,926
Rank	1	3	2

hesaplanan S/N oranı,  $S_{off}=15$  mm mesafesi için söz konusu olan orandan daha düşük olmakla beraber  $S_{off}=5$  mm mesafesi için hesaplanan orandan daha yüksektir. Bu verilerden çıkarılan sonuç ise  $S_{off}=5$  mm mesafesi ile en düşük performans ve en düşük yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri değişimi elde edileceği, en yüksek yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri değişiminin ise  $S_{off}=15$  mm mesafesinde olduğudur.

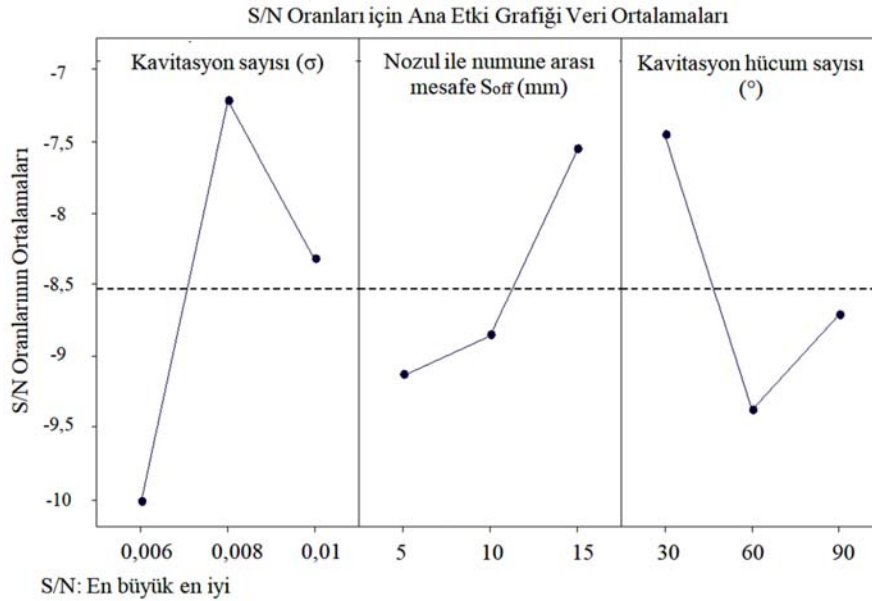
Kavitasyon hücum açısı faktörünün değerlendirilmesi sonucunda ise; ortalama Sinyal/Gürültü (S/N) oranları doğrusal bir değişim sergilememektedir. Ortalama S/N oranı,  $30^\circ$  kavitasyon hücum açısı seviyede en yüksek değerde olmakla beraber artan kavitasyon hücum açısı ile beraber azalma göstermektedir. Belirli bir seviyeden sonra ise hücum açısındaki artışla beraber ortalama S/N oranı tekrar artmaya başlamaktadır. Bundan yola çıkarak kavitasyon hücum açısı için en yüksek S/N, dolayısıyla en düşük yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri değişimi  $30^\circ$  kavitasyon hücum açısı seviyesi civarında bir seviyede bulunmaktadır. Şekil 4'teki bu değerlerin konumunu incelediğimizde bu eğrinin ikinci dereceden bir modelle ifade edilmesi gerektiği ve optimum noktanın  $30^\circ$  kavitasyon hücum açısı seviyesi üzerinde daha yüksek bir S/N oranında, yani daha yüksek bir yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri değişimi bulunduğu yorumunu yapmak mümkün olabilecektir. Ayrıca  $90^\circ$  kavitasyon hücum açısı için hesaplanan S/N oranı,  $60^\circ$  kavitasyon hücum açısı için söz konusu olan orandan daha yüksek olmakla beraber  $30^\circ$  kavitasyon hücum açısı için hesaplanan orandan daha küçüktür. Bu verilerden çıkarılan sonuç ise  $60^\circ$  kavitasyon hücum açısı ile en düşük performans ve en az yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri değişimi değerleri,  $90^\circ$  kavitasyon hücum açısı ile  $60^\circ$  kavitasyon hücum açısına oranla daha iyi performans elde edildiği, en yüksek yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri değişimi değerleri ise  $30^\circ$  kavitasyon hücum açısında olduğudur.

### 3.2. Varyans (ANOVA) ve Regresyon Analizi (Variance (ANOVA) and Regression Analysis)

Çalışmada başvurulan Varyans (ANOVA) analiz yönteminde belirlenmiş parametreler olan kavitasyon sayısı, nozul ile numune arasındaki mesafe ve kavitasyon hücum açısı parametreleri içinden en etkili ve güvenli olan parametre belirlenmiştir. Bu analiz sayesinde, her bir parametrenin kavitasyon erozyonu üzerindeki etkisi istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Tablo 7'deki Varyans (ANOVA) analizi tablosundaki katkı oranları incelendiğinde en fazla etki eden parametrenin %42,57 ile kavitasyon sayısı, en az etki eden parametrenin ise %19,51 ile nozul ile numune arasındaki mesafenin olduğu ortaya çıkmıştır. Minitab programı Regresyon analizi sonucu elde edilen eşitlik, yüzey pürüzlülük değişiminin istenilen parametrelere karşılık nasıl değişeceğini belirlemek için kullanılabilir (Eş. 3). Bu sayede, yeniden deney yapılmadan, belirli parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisini tahmin etmek mümkün hale gelmiştir. Bu sonuç, deneysel süreci önemli ölçüde basitleştirir ve zaman ile kaynak tasarrufu sağlar. Formülasyonda KS: Kavitasyon katsayısı ( $\sigma$ ), NNM: Nozul ile Numune Arası Mesafe (mm), KHA: Kavitasyon Hücum Açısı ( $^\circ$ )' nı ve YPD: Yüzey Pürüzlülük Değişimi ( $\mu\text{m}$ ) göstermektedir. Elde edilen tüm bu sonuçlar Minitab programı kullanılarak gerçekleştirilen Taguchi analizi sayesinde, MAB-CU4 alaşımının kavitasyon erozyonu sonrası yüzey pürüzlülük değerlerini etkileyen parametrelerin optimize edilmesini sağlamıştır. Bu tip analizler Taguchi optimizasyon çalışmalarında kullanılmakta ve analiz çalışmalarına yardımcı olmaktadır [23-25].

$$YPD=0,234 + 17,0 KS + 0,00833 NNM - 0,00118 KHA \quad (3)$$

Kavitasyon erozyonu parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) değişimi üzerindeki etkilerinin Taguchi yöntemleri ile analiz edilmesi

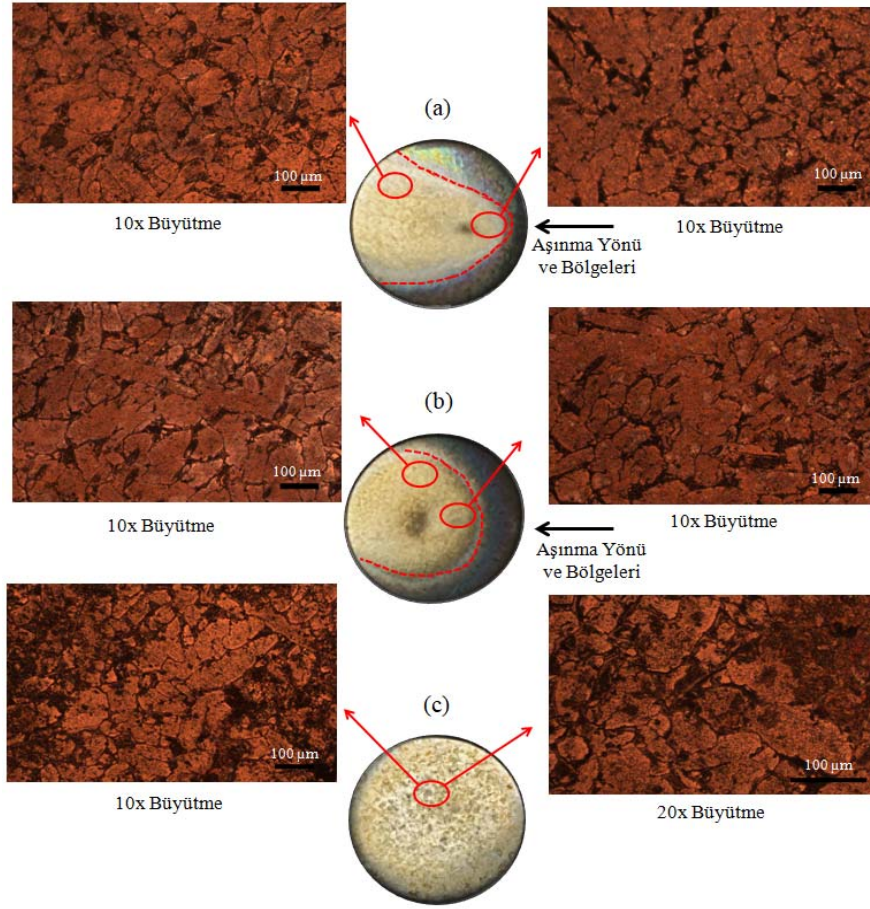


Şekil 4. Taguchi yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değişimi Sinyal/Gürültü (S/N) oranı grafikleri (Taguchi  $R_a$  surface roughness variation Signal/Noise (S/N) ratio graphs)

Tablo 7. Taguchi  $R_a$  yüzey pürüzlülük değişimi Varyans (ANOVA) analizi (Taguchi  $R_a$  surface roughness change Variance (ANOVA) analysis)

Parametre	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-Değer	P-Değer
Kavitasyon Sayısı ( $\sigma$ )	2	0,026144	%42,57	0,026144	0,013072	3,22	0,237
Nozul ile Numune Arası Mesafe ( $S_{off}$ ) (mm)	2	0,011985	%19,51	0,011985	0,005992	1,48	0,404
Kavitasyon Hücum Açısı ( $^\circ$ )	2	0,015179	%24,71	0,015179	0,007589	1,87	0,348
Hata	2	0,008113	%13,21	0,008113	0,004056		
Toplam	8	0,06142	%100,00				





**Şekil 5.** Taguchi deneyleri kavitasyon erozyonu sonrası (a) 30° (b) 60° (c) 90° kavitasyon hücum açısındaki numunelerin endüstriyel mikroskop görüntüleri

(Industrial microscope images of samples at cavitation attack angle of (a) 30° (b) 60° (c) 90° after cavitation erosion in Taguchi experiments)

malzeme analizini ve performansını optimize etmek için kritik önem taşımıştır. Literatürde daha önce kavitasyon erozyonu parametreleri ile Taguchi analizi kullanılarak bu tür bir araştırma yapılmamıştır. Bu çalışmada elde edilen bulgulara göre anahtar sonuçlar ve gözlemler elde edilmiştir. Bunlardan ilki kavitasyon hücum açısı arttıkça yüzey pürüzlülük değişiminin etkilenmiş olmasıdır. Kavitasyon su jeti test cihazı numune tutucu aparatının farklı yüzey eğimi tasarımı nedeniyle (30°, 60° ve 90°) nozul ile numune yüzeyleri arasındaki mesafe ( $S_{off}$ ) numune yüzey hattı boyunca değişmektedir. Bu yüzden mesafenin değişken ölçüleri, numunenin farklı kısımlarındaki hasar modelini etkilemiştir. Bu durum serbest form ve yüzeye sahip gemi pervaneleri için oldukça kritiktir. Hasarın daha iyi anlaşılması için Şekil 5'te farklı kavitasyon hücum açılarında aşınma bölgelerine yakın alınan mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Özellikle Şekil 5 (a) incelendiğinde 30° kavitasyon hücum açısında daha belirgin ve sık yüzey kusur görüntüleri görülürken Şekil 5 (b) 60° ve (c) 90° kavitasyon hücum açılarında bu değişimler daha az sıklıkta görülmüştür. Çünkü değişen kavitasyon hücum açısından dolayı aynı numunenin üst kısmındaki (30° kavitasyon hücum açısı), daha uzun mesafe daha fazla kavitasyona olanak sağlamıştır. Bu durumda da daha fazla kavitasyon baloncukları, sıçrama damlaları ve şok dalgalarının o alan üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmasına neden olmuştur. Belirtilen kısımlarda ayrıca hareket eden kavitasyon baloncuklarının geriye doğru akma olasılığı olmadığından çarpma anında oluşan ve düşük basınç bölgelerinde ortaya çıkan radyal jetlerin üst kısma doğru akması sıvının buradan uzaklaşmasına neden olmuştur. Şekil 6 (a) ile gösterilen 30° kavitasyon hücum açısı SEM

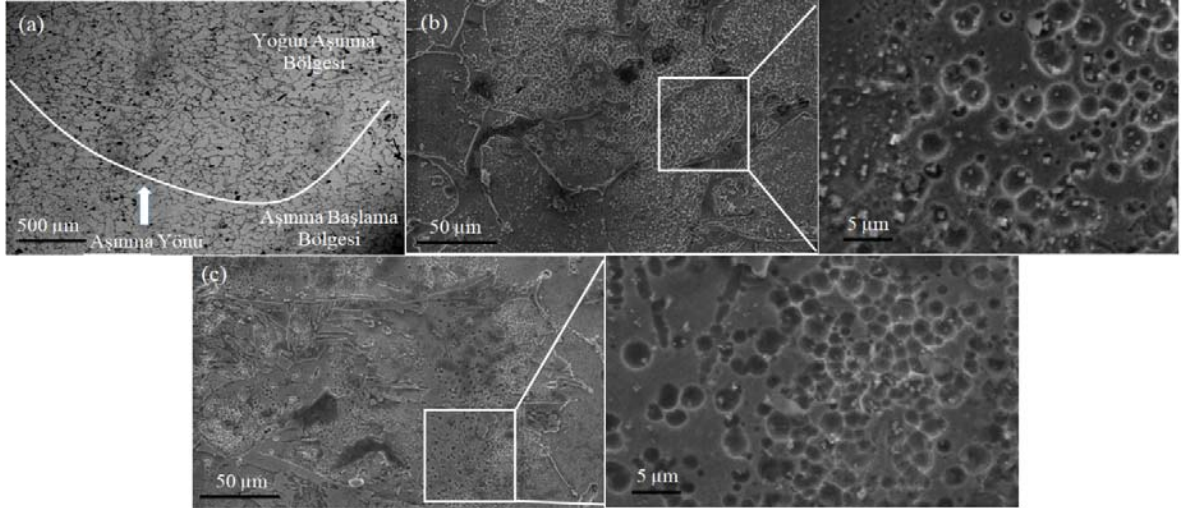
görüntüsündeki, farklı aşınma bölgelerinin varlığı alt kısımlardaki daha az, üst kısımlarda ise daha fazla hasarın görüntüsü ile bu durumu açıklamaktadır. Hutli vd. çalışmaları da kavitasyon jetlerinin çarpma açısına bağlı olarak numunenin üst kısmına kaydığını ve bu bölgede daha yüksek aşınma derecesi ile yüzey pürüzlülüğünde artma gözlemlendiğini açıklamıştır [26]. Benzer açıklamalar Kazama vd. tarafından da kavitasyon jetlerinin çarpması ile değişen yüzey geometrisinin etkisini incelemek için ortaya çıkan aşınma sonuçlarını yivli ve eğimli numuneler kullanılarak ortaya çıkarılmıştır [27].

Hasar mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 6'da 30° ve 90° kavitasyon hücum açılarında görülen farklı büyütmelerdeki (500x ve 3000x) ikincil elektron (Secondary Electron-SE) detektörü ile taranmış taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerine yer verilmiştir. Özellikle Şekil 6 (c)'ye göre daha fazla oyuk ve çukur görüntüleri Şekil 6 (b)'de dikkat çekmiştir. Bu durum, kavitasyon baloncuklarının 30° kavitasyon hücum açısında daha geniş alanda neden olduğu sık oyuk ve çukurlar nedeniyle değişen hasar mekanizması ve yüzey pürüzlülük değerlerinin artışı ile çalışmamızdaki bulguları desteklemektedir.

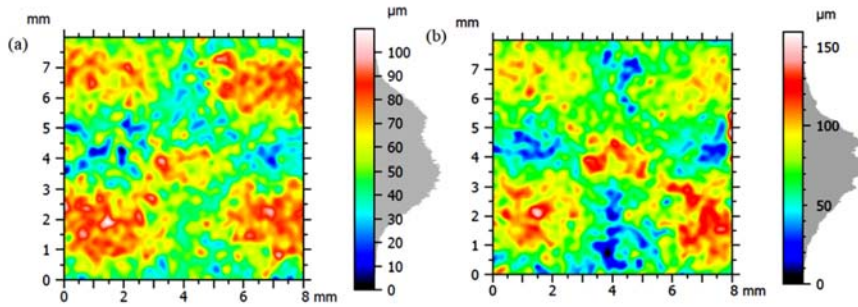
Kavitasyon hücum açısı etkisini daha iyi kavrayabilmek için kavitasyon baloncuklarının çökme ve sıçrama damlaları ile ilişkili olarak yüzeydeki hasar ve yüzey pürüzlülük değişimi kapsamını anlamak önemlidir. Böylece erozyonun zararlı etkileri daha iyi kavranarak, malzeme tasarımı ve koruma stratejilerinin geliştirilmesine yardımcı olunabilir. Bu kapsamda yapılan bir diğer

inceleme olan Şekil 7'de 30° ve 90° kaviteasyon hücum açısında etkili yüksek basınçlı akışkanın aşınma bölgelerindeki kaviteasyon erozyonu izlerini gösteren makro incelemelerin yer aldığı yüzey topografyaları gösterilmektedir. Yapılan incelemeler sonucunda 3B yüzey topografyaları, kaviteasyon su jetlerinin tekrarlı darbelerinden dolayı plastik deformasyon nedeniyle yüzeyde dağılmış tepeler ve çukurlar oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 7 a-b). Yüzey topografyaları incelendiğinde, kaviteasyon su jeti erozyonunun bir sonucu olarak, en yüksek tepe ile en derin vadi arasındaki mesafenin 90° kaviteasyon hücum açısında 110 µm civarında iken 30° kaviteasyon hücum açısında 160 µm civarında olduğu tepe ve vadilerin oluşumu ortaya çıkarılmıştır. Bu veriler altında erozyona uğrayan bölgelerin 90° kaviteasyon hücum açısında yüzey ortalama alansal pürüzlülük ( $S_a$ ) değeri 17,67 µm iken maksimum tepe yüksekliği ( $S_p$ ) 246,3 µm ve en derin vadi derinliği ( $S_v$ ) 243,1 µm'dir. 30° kaviteasyon hücum açısında erozyona uğrayan bölgelerin yüzey ortalama alansal pürüzlülük ( $S_a$ ) değeri ise 25,91 µm iken maksimum tepe yüksekliği ( $S_p$ ) 298,2 µm ve en derin vadi derinliği ( $S_v$ ) 224,8 µm'dir. Şekil 8'de bu değerlerin karşılaştırmalı alansal yüzey pürüzlülüğü değerleri grafiği verilmiştir. Patella vd. tarafından da araştırılan ve artan kaviteasyon erozyonu ile birlikte çukur sayısı ve hasarlı yüzeyde gözlemlenen sonuçlar 3B yüzey pürüzlülük topografya görüntülenerek yüzey pürüzlülük değişimleri ortaya çıkarılmıştır. Bu değişimleri malzeme özelliklerine, geometrik ölçeklere ve akış hidrodinamiğine bağlayarak çalışmamızla benzer başlıklara konu

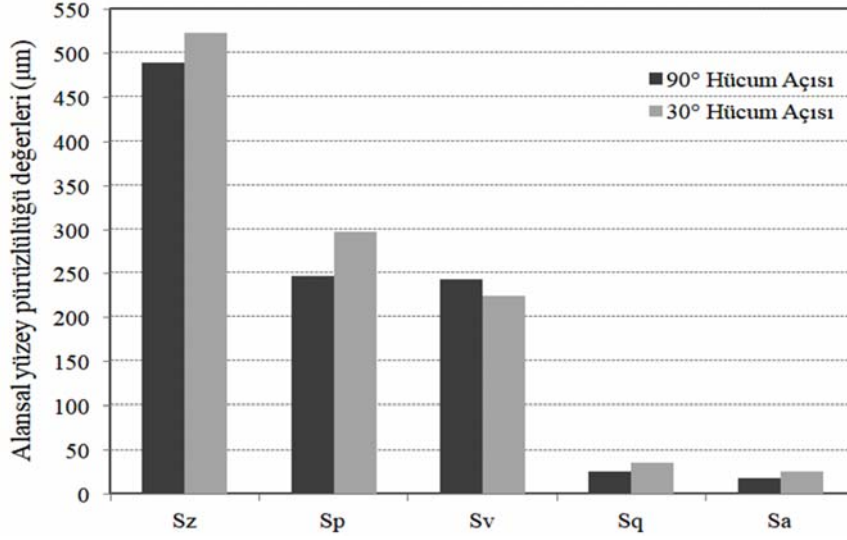
edinmişlerdir [28]. Kaviteasyon erozyonu parametrelerinin incelenmesine devam edildiğinde kaviteasyon sayısı parametresinin,  $\sigma=0,008$  olduğu değerlerde yüzey pürüzlülük değişiminin fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni, kaviteasyon sayısının giriş basıncı ( $P_1$ ) ve iç basınç ( $P_2$ ) ile ilişkili olmasıdır (Eş. 1). Gonzalez-Avila vd. çalışmalarında da artan giriş basıncının ( $P_1$ ) kaviteasyon erozyonunu artırdığını dolayısıyla yüzey pürüzlülüğünü değiştirdiğini savunmuşlardır [29]. Bunun yanında literatürde ayrıca analiz sonucu görülen 30° kaviteasyon hücum açısındaki numunenin alt kısımlarındaki daha az hasar, kaviteasyon baloncuklarının yüzeye çarpmadan önce çökmesine yol açan hidrodinamik basınçlar ile de ilişkilendirilmiştir [30-32]. Bir diğer parametre olan nozul ile numune arasındaki mesafelerde daha geniş püskürtme mesafeleri kaviteasyon su jetinin numune yüzeyine yayılması ve daha geniş bir alanda kaviteasyon erozyonu oluşmasına neden olmuştur. Daha az mesafelerde bu etkinin değiştiği ve azaldığı görülmüştür. Bu da pürüzlülük değerlerinin artmasına neden olmuştur. Peng vd. da düşük nozul ile numune arasındaki mesafesinde kaviteasyon erozyonunun etkisiz olduğu, stand-off ( $S_{off}$ ) mesafesi artırıldığında belli bir mesafeye kadar kaviteasyon erozyonunun arttığı (kaviteasyon oluşumu ile baloncuk patlamasının her ikisinin de optimum derecede etkili olduğu bir nozul ile numune arası mesafesi olduğu) ve bu mesafe aşıldığında kaviteasyon erozyonunun etkisini kaybettiğini belirtmişlerdir [33]. Sonuç olarak değişen kaviteasyon erozyonu parametreleri, numunelerin yüzeyinde meydana gelen yüzey



Şekil 1. Kaviteasyon hücum açısının (a) 30° hücum açısı aşınma bölgeleri (500x) (b) 30° (c) 90° (500x ve 3000x) olduğu durumdaki aşınmış numunelerin yüzey morfolojisi görüntüleri  
(Surface morphology of worn samples when the cavitation attack angle is (a) 30°, attack angle wear zones are (500x) (b) 30° (c) 90°(500x and 3000x))



Şekil 2. Aşınma bölgesinin merkezinde 8x8 mm<sup>2</sup>'lik bir bölgede yüzey topografya görüntüleri (a) 90° (b) 30° kaviteasyon hücum açısındaki makro incelemeler  
(3D surface topography images in an 8x8 mm<sup>2</sup> area in the center of the wear zone macro studies at (a) 90° (b) 30° cavitation angle of attack)



Şekil 8. Alansal yüzey pürüzlülüğü değerleri (Areal surface roughness values)

pürüzlülük değişimlerini belirgin şekilde etkilemiştir. Taguchi yöntemi ve yapılan analizler ile ortaya çıkarılan bu değişimler, belirlediğimiz parametreler ile en optimum ve yüksek yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değişimi elde etmek için kullanılmıştır. Elde edilen analiz ve sonuçlar kavitasyon erozyonunu etkileyen parametreler arasından en uygun hücum açısı, kavitasyon sayısı ve nozul ile numune arası mesafe kombinasyonlarını belirlemiş ve kavitasyon erozyonu deneylerinde malzeme erozyon davranışını değerlendirmek ve yüzey pürüzlülüğünü analiz etmek için önemli bir temel sunmaktadır. Kavitasyon erozyonu testleri ve Taguchi yöntemi ile elde edilen bu bulgular, gemi pervaneleri ve benzeri uygulamalarda kullanılan malzemelerin ve tasarımların geliştirilmesine yönelik değerli bilgileri sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

#### 4. Simgeler (Symbols)

$P_0$	: Akışın uniform olduğu yerdeki mutlak basınç (Pa)
$P_1$	: Giriş (su jeti makinesi) basıncı (Pa)
$P_2$	: Test kabı iç basıncı (Pa)
$P_v$	: Akışkan buharlaşma basıncı (Pa)
$R_a$	: Çizgisel ortalama pürüzlülük değeri ( $\mu\text{m}$ )
S	: Sinyal değeri
N	: Gürültü değeri
$S_a$	: Alansal ortalama pürüzlülük değeri ( $\mu\text{m}$ )
$S_{\text{off}}$	: Stand off distance, Nozul ile numune arasındaki mesafe (mm)
$S_v$	: Tarama yapılan alandaki en derin vadi derinliği ( $\mu\text{m}$ )
$S_z$	: Tarama yapılan alandaki en büyük tepe en düşük vadi mesafesi ( $\mu\text{m}$ )
t	: Numune kalınlığı (mm)
d	: Numune çapı (mm)
T	: Suyun sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\sigma$	: Kavitasyon katsayısı

#### 5. Sonuçlar (Conclusions)

Çalışmada, kullanım durumlarında kavitasyon olayı kaynaklı şiddetli aşınma olayı meydana gelen gemi pervane malzemesi kullanılarak, ASTM G134-95 standartlarına bağlı tasarlanmış ve imal edilmiş kavitasyon su jeti test düzeneğinde erozyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler için Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak, kavitasyon erozyonunu etkileyen parametrelerin yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla çeşitli

parametre ve seviyelerin etkisi değerlendirilmiştir. İşte bu çalışmaların sonuçları aşağıdaki maddelerde verilmiştir:

- Çalışma sonuçları, kavitasyon erozyonunun etkilerini azaltmak için yüzey tasarımı ve malzeme seçimi stratejilerinin önemini vurgulamaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ve dayanıklılığı sağlamak için kavitasyon hücum açıları, kavitasyon sayısı ve nozul mesafeleri üzerinde optimize edilmiş parametreler kavitasyon erozyonunu doğrudan etkilemektedir.
- Taguchi analizi “En Büyük En İyi (Large is Better)” seçimine göre en yüksek yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) değişimini etkileyen parametre ve seviyeler;  $\sigma=0,008$ ,  $S_{\text{off}}=15$  mm ve  $30^{\circ}$  kavitasyon hücum açısı değerleridir.
- Varyans (ANOVA) sonuçlarında, kavitasyon sayısı parametresinin yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) değişimini etkileyen en önemli parametre olduğu belirlenmişken nozul ile numune arasındaki mesafe parametresinin ise yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) değişimi üzerinde en az etkiye sahip parametre olduğu saptanmıştır.
- Kavitasyon baloncuklarının çökmesi ve sıçrama damlalarının etkileri, yüzey pürüzlülüğündeki değişiklikleri belirlemede kritik rol oynamıştır. Bu etki 3B optik profilometre ve SEM görüntüleri ile yüzeydeki hasarların oyun ve çukurların sıklık, boyut ve şekli ile gösterilmiştir.  $30^{\circ}$  kavitasyon hücum açısındaki alansal yüzey pürüzlülük değerlerinin  $90^{\circ}$  kavitasyon hücum açısındaki değerlere göre daha yüksek olduğu bölgeler analiz edilmiştir.

Elde edilen bulgular, gemi pervanesi ve benzeri uygulamalarda kullanılan malzemelerin kavitasyon erozyonuna karşı dayanıklılığını artırmak için kavitasyon erozyonunu etkileyen parametrelerin etkinliğinin iyi irdelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Deneyler sonucunda belirlenen kavitasyon sayısı, hücum açıları ve nozul ile numune arasındaki mesafe parametrelerinin, gerçek uygulamalarda malzeme tasarımı ve bakım stratejileri için dikkate alınması gerekmektedir. Bu stratejiler, kavitasyon erozyonu etkisini minimize ederek malzeme ömrünü uzatabilir. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, kavitasyon erozyonu olgusunun anlaşılmasına ve bu tür aşınma etkilerini azaltmak için malzeme ve tasarım iyileştirmeleri yapmaya yönelik önemli bilgiler sunmaktadır.

#### Teşekkür (Acknowledgment)

Çalışmalarımızın ortaya çıkarılmasında sağladıkları mali destekler nedeniyle Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Koordinasyon Birimine (Proje No: FDK-2022-2964) teşekkür ve şükranlarımızı sunarız.

**Kaynaklar (References)**

1. Sun, W., Chen, M., Wang, F., Enhancing cavitation erosion resistance of sputtered NiCrAlTi coatings with coherent nanoprecipitates, *Materials Letters*, 331, 133390, 2023.
2. Gao, G., Zhang, Z., Cavitation erosion mechanism of 2Cr13 stainless steel, *Wear*, 488, 204137, 2022.
3. Soyama, H., Cavitating jet: a review, *Applied Sciences*, 10 (20), 7280, 2020.
4. Paolantonio, M., & Hanke, S., Damage mechanisms in cavitation erosion of nitrogen-containing austenitic steels in 3.5% NaCl solution, *Wear*, 464, 203526, 2021.
5. Carlton, J., *Marine Propellers and Propulsion* (3rd ed.), Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
6. Germanischer Lloyd Aktiengesellschaft. *Rules for Classification and Construction, Materials and Welding*, Hamburg, 2009.
7. Yusvika, M., Prabowo, A. R., Baek, S. J., Tjahjana, D. D. P., Achievements in observation and prediction of cavitation: Effect and damage on the ship propellers, *Procedia Structural Integrity*, 27, 109-116, 2020.
8. Soyama, H., Kumano, H., The fundamental threshold level-A new parameter for predicting cavitation erosion resistance, *Journal of Testing and Evaluation*, 30 (5), 421-431, 2002.
9. Annual Book of ASTM Standards, Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by Cavitating Liquid Jet (G134-95), ABD, 2010.
10. Chi, P., Shilong, Z., Jianhong, F., Qinfeng, L., Yu, S., Hao, C., Yun, Y., Erosion experiments of shale using a cavitation jet, *Ocean Engineering*, 261, 112115, 2022.
11. Momma, T., Cavitation loading and erosion produced by a cavitating jet. Thesis for the degree of doctor of philosophy, University of Nottingham, Nottingham., 1991.
12. Soyama, H., Effect of nozzle geometry on a standard cavitation erosion test using a cavitating jet, *Wear*, 297 (1-2), 895-902, 2013.
13. Hattori, S., Takinami, M., Comparison of cavitation erosion rate with liquid impingement erosion rate, *Wear*, 269 (3-4), 310-316, 2010.
14. Xu, C., Zhao, X., Khoo, B. C., Numerical investigation of ventilated cavitating flow from high to low cavitation numbers, *Ocean Engineering*, 266, 112782, 2022.
15. Taguchi, G., *Introduction to Quality Engineering*, Tokyo: Asian Productivity, 97-132, 1990.
16. Lichtarowicz, A., Use of a simple cavitating nozzle for cavitation erosion testing and cutting, *Nature Physical Science*, 239 (91), 63-64, 1972.
17. Momma, T., Lichtarowicz, A., A study of pressures and erosion produced by collapsing cavitation, *Wear*, 186, 425-436, 1995.
18. Usta, O., Köksal, Ç. S., Korkut, E., A systematic study into the cavitation erosion test for marine propeller materials by cavitating jet technique, *Ocean Engineering*, 284, 115252, 2023.
19. Zhuang, D. D., Zhang, S. H., Liu, H. X., Chen, J, Cavitation erosion behaviors and damage mechanism of Ti-Ni alloy impacted by water jet with different standoff distances, *Engineering Failure Analysis*, 139, 106458, 2022.
20. Imrek B., Oral A., Experimental investigation of flank wear in variable feed turning of cold work tool steel DIN 1.2379, optimization of variable feed levels, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 409-419, 2023.
21. Gülcan O., Simsek U., Özdemir M., Günaydin K., Tekoğlu E., The effect of build parameters on distortion, dimensional deviation and surface roughness of laser powder bed fusion built lattice structures, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (1), 101-112, 2023.
22. Yurdakul M., Güneş S., İç Y.T., Improvement of the surface quality in the honing process using Taguchi method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (2), 347-360, 2016.
23. Sahoo, P., Wear behaviour of electroless Ni-P coatings and optimization of process parameters using Taguchi method, *Materials & Design*, 30 (4), 1341-1349, 2009.
24. Aslantas, K., Ekici, E., Cicek, Optimization of process parameters for micro milling of Ti-6Al-4V alloy using Taguchi-based gray relational analysis, *Measurement*, 128, 419-427, 2018.
25. Kalyon, A., Özcan, M. T., Cicek, Experimental investigation of the machinability of caldie cold work tool steel, *Acta Physica Polonica, A.*, 135, 2019.
26. Hutli, E., Nedeljkovic, M. S., Bonyár, A., Légrády, D., Experimental study on the influence of geometrical parameters on the cavitation erosion characteristics of high speed submerged jets, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 80, 281-292, 2017.
27. Kazama, T., Kumagai, K., Osafune, Y., Narita, Y., Ryu, S., Erosion of grooved surfaces by cavitating jet with hydraulic oil, *Journal of Flow Control Measurement & Visualization*, 3 (02), 41-50, 2015.
28. Patellaa, R., Reboud, J. L., Archer, A., Narita, Y., Ryu, S., Erosion Cavitation damage measurement by 3d laser profilometry, *Wear*, 246 (1-2), 59-67, 2000.
29. Gonzalez-Avila, S. R., Nguyen, D. M., Arunachalam, S., Domingues, E. M., Mishra, H., Ohl, C. D., Mitigating cavitation erosion using biomimetic gas-entrapping microtextured surfaces (GEMS), *Science Advances*, 6 (13), 1-10, 2020.
30. Zhang, S., Qian, Z., Ji, B., Estimation of cavitation erosion area in unsteady cavitating flows using a modified approach, *Ocean Engineering*, 262, 112229, 2022.
31. Chen, H. S., Wang, J. D., Li, Y. J., Chen, D. R., Effect of hydrodynamic pressures near solid surfaces in the incubation stage of cavitation erosion, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 222 (4), 523-531, 2008.
32. Soyama, H., Nagasaka, K., Takakuwa, O., Naito, A., Optimum injection pressure of a cavitating jet for introducing compressive residual stress into stainless steel, *Journal of Power and Energy Systems*, 6 (2), 63-75, 2012.
33. Peng, C., Tian, S., Li, G., Joint experiments of cavitation jet: high-speed visualization and erosion test, *Ocean Engineering*, 149, 1-13, 2018.