

Hızlandırılmış Erozyon Testleriyle Malzemelerin Kavitasyon Erozyonu Özelliklerinin İncelemesi

Onur Usta¹

ousta@dho.edu.tr¹

¹Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Deniz Harp Okulu, Milli Savunma Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, kavitasyon ve kavitasyonun en olumsuz ve zararlı etkilerinden birisi olan kavitasyon erozyonunun deneysel olarak incelenmesi sunulmaktadır. Bu bağlamda, kavitasyon erozyonu oluşumu açıklanmış ve erozyon testlerinde kullanılan bazı matematiksel parametreler; kavitasyon sayısı, erozyon hızı ve erozyon şiddeti incelenmiştir. Farklı malzemelerin kavitasyon erozyonuna karşı dirençlerini test etmede kullanılan beş farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlar en basitinden en gelişmiş olana doğru sıralanırsa, döner diskli cihaz ile gerçekleştirilen testler, titreşim cihazları ile ultrasonik ortam oluşturularak gerçekleştirilen testler, hava jeti tekniği, su jeti (kavitasyon jeti) tekniği ve kavitasyon tüneli testleridir. Çalışma kapsamında bu beş teknik incelenerek literatürden elde edilen örneklerle anlatılmıştır. Hava jeti tekniği ve su jeti tekniğine özel ilgi gösterilmiş, çalışma kapsamında İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi'nde kurulan hava jeti ve su jeti deney düzenekleri ile gerçekleştirilen testlerden örnekler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Kavitasyon erozyonu testi, kavitasyon sayısı, ASTM G134 standartları, su jeti test tekniği.

Makale geçmişi: Geliş 18/11/2019 – Kabul 15/12/2019

Investigation of Cavitation Erosion Characteristics of Materials by Accelerated Erosion Tests

Onur Usta¹

ousta@dho.edu.tr¹

¹ Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Academy, National Defense University, Istanbul, Turkey

ABSTRACT

In this study, an experimental investigation of cavitation erosion, which is one of the most negative and detrimental consequences of cavitation is presented. Within this context, cavitation and cavitation erosion formations are explained and some of the mathematical parameters used in erosion tests; cavitation number, erosion rate, erosion intensity are examined. There are five different test methods used to investigate the resistance of different materials to cavitation erosion. They can be sorted from the simplest to the most advanced as rotating disc apparatus, vibratory apparatus that generates an ultrasonic environment, air jet technique, water jet (cavitation jet) technique and cavitation tunnel tests. Within the scope of this study, these five techniques are investigated and explained with examples obtained from the literature. Special attention is paid to the air jet technique and water jet technique; examples from the tests carried out by the air jet and water jet test rigs which are built at ITU, the Faculty of Naval Architecture and Marine Engineering were presented.

Keywords: Cavitation erosion test, cavitation number, ASTM G-134 standards, water jet test technique.

Article history: Received 18/11/2019 – Accepted 15/12/2019

1. Giriş

Akışkanın hareketi esnasında herhangi bir bölgedeki basınç, buharlaşma basıncının altına düştüğü zaman o bölgede su içerisindeki çözünmüş yada serbest kabarcıklar gözle görülmeye başlar. Bu kabarcık oluşumu olayı, kavitasyon olarak adlandırılmaktadır. Oluşan kabarcıklar, basıncın daha yüksek olduğu bir bölgeye geldiğinde patlar ve boşalan yerlere akışkan hareket eder. Bu mekanik etki, yüzey üzerinde şiddetli basınç darbeleri oluşturarak malzeme üzerinde aşınmaya neden olur. Kavitasyon kabarcıklarının malzemede oluşturduğu aşınmaya kavitasyon erozyonu denilmektedir.

Kavitasyon; akış olan tüm sistemlerde görülmektedir ve gemi pervaneleri, pompalar, türbinler hatta insan vücudu için çok önemli bir olgudur (Vallier, 2013). Kavitasyonun olumsuz etkileri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Performans kaybı,
- Gürültü oluşumu,
- Titreşim,
- Erozyon (aşınma).

Kavitasyon esnasında sıvının içerisinde yayılan dalgalar, etraftaki kabarcıkların dinamiğini de etkileyerek bir enerji değişimine sebep olmaktadır. Kabarcıkların patlamasıyla yayılan şok dalgaları, katı duvar yakınındaki kabarcıkları da etkilemekte ve onların da patlayarak yüzeyi aşındırmasına neden olmaktadır. Böylece, erozyon oluşumunda kabarcık kümelerinin etkileşimlerinin önemli etkisinin olduğu söylenebilir. Bu bilgiler ışığında erozyon, şok dalgası ile güçlü bir jet akışının bir arada gerçekleştiği, kabarcık patlaması ile yüzeyde aşınma yaratan bir olay olarak açıklanabilir (Vallier, 2013).

Kavitasyon erozyonu, kavitasyonun en ciddi problemi, en zararlı etkisidir. Malzeme yüzeyindeki hasar artan bakım maliyetlerine, performansta ciddi bir kayba, titreşim ve gürültünün aşırı derecede artmasına sebep olabilir. Erozyon başladığında akıştaki türbülansın ve yüzeydeki bozulmanın da artmasına sebep olmaktadır.

Erozyon, sadece kavitasyon tipi ve kavitasyonun fiziksel özelliklerine değil, malzeme özelliklerine de bağlı bir olgudur. Farklı malzemelerin kavitasyon erozyonu özelliklerini araştırma çalışmaları 1930'lu yıllarda başlamıştır ve o zamandan günümüze kadar büyük çoğunlukla su, nadiren de farklı akışkanlar kullanılarak çok geniş kapsamlı çalışmalar yürütülmüştür (Sreedhar ve diğ. 2017). Araştırmacılar erozyon olgusunu fiziksel olarak doğru bir şekilde anlamak ve erozyona daha dayanıklı, yeni malzemeler geliştirmek için uğraşmışlardır. Her yeni çalışmada kavitasyon erozyonu olgusunun daha da karmaşık olduğunu ve tahmininin zor olduğunu kanıtlayan yeni sonuçlara ve fiziksel arka planlara ulaşmışlardır (Dular, 2016). Bu çalışmalar kapsamında çeşitli erozyon test teknikleri ortaya konmuş ve böylece erozyon hakkındaki bilgi ve anlayış geliştirilmiştir.

Hızlandırılmış erozyon testi teknikleri, erozyon oluşumunu incelemek için kullanılan yöntemlerdir. Farklı malzemeler için gerçekleştirilen hızlandırılmış erozyon testleri ile, numunenin kısa bir süre içerisinde erozyona uğraması (yüzeyinin aşınması) sağlanır. Oysa gerçek durumda, örneğin bir pervanede, gözle görülür mertebede erozyonun çok uzun süre kavitasyonlu akışa maruz kaldıktan sonra oluşması beklenir.

Kavitasyon erozyonu testleri aşağıdaki hedefler doğrultusunda gerçekleştirilir: (Sreedhar ve diğ. 2017).

- Fiziksel olarak kavitasyon erozyonunun fiziğini anlamak,
- Malzemeleri kavitasyon hasarına (erozyonuna) dirençleri açısından sıralamak,
- Kolayca ölçülen malzeme özelliklerine sahip olan test edilmiş yüzeylerle daha önceden test edilmemiş malzemeler arasında bir korelasyon oluşturmak,
- Erozyon açısından daha zayıf malzemeler kullanarak test süresini kısaltmak ve sonrasında bu testlerden elde edilen sonuçlar ile erozyon hızı arasında ilişki kurarak kullanılan malzemenin erozyona karşı direncini tahmin etmek,
- Model ölçekte gerçekleştirilen testler ile tam ölçekte erozyon tahmininde kullanılacak düzeltme faktörleri geliştirmek,
- Erozyon hasarı ile çekme mukavemeti, akma dayanımı, gerilme enerjisi, sertlik, uzama, alanda azalma ve elastik modülü gibi fiziksel özellikler arasında korelasyon kurmak,
- Yeni erozyon modelleri geliştirmek.

Hızlandırılmış erozyon testleri en basitinden en gelişmiş olana doğru sıralanırsa, döner diskli cihaz ile gerçekleştirilen testler, titreşim cihazları ile ultrasonik ortam oluşturularak gerçekleştirilen testler, hava jeti tekniği, su jeti (kavitasyon jeti) tekniği ve kavitasyon tüneli testleridir. Çalışmanın ana amacı bu test tekniklerini detaylıca ele almaktır.

Kavitasyon erozyonu testlerinin bilimsel bir geçerliliğinin olması için belli bir standarda göre gerçekleştirilmiş olması ve tekrarlanabilir olabilmesi gerekmektedir. Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials, ASTM), dünya çapında kabul gören kavitasyon erozyonu test yöntemleri standartlarını ortaya koymuştur. Titreşim cihazlarıyla yapılan ultrasonik testler (ASTM G32-10, 2010) ve su jeti ile gerçekleştirilen kavitasyon erozyon testleri (ASTM G134-95, 2010) malzemelerin kavitasyon erozyonuna karşı direnç özelliklerinin incelenmesinde kullanılan en yaygın iki tekniktir (Choi ve diğ., 2012).

2. Kavitasyon ve Kavitasyon Erozyonu Oluşumu

2.1 Kavitasyon sayısı – kavitasyon oluşumu ilişkisi

Fiziksel olarak kavitasyon, yerel basınç düşüşü nedeni ile sıvıdan buhara faz değişimi olayıdır ve sebebi sıvı içerisindeki nükle denilen küçük gaz çekirdekleridir (Plesset ve Prosperetti, 1977). Çekirdekler, çapları 10^{-3} ile 10^{-1} mm arasında değişen, gaz ve buhar içeren küçük kabarcıklardır (Vallier, 2013). Eğer bir kavitasyon kabarcığı, kendi buharlaşma basıncından daha düşük statik basınca sahip bir bölgeye girerse büyümeye başlar. Belli bir büyüklüğe ulaştuktan sonra da patlar. Bu durum, akış koşullarına bağlı olarak farklı kavitasyon formlarına neden olabilir. Her bir kabarcık yanındaki davranışını ve stabilitesini etkiler, böylece tek bir kabarcığın hareketi bile tüm akışı etkilemiş olur.

Brennen (1995) çalışmasında, kavitasyon başlangıcı için kabarcık yapısının boyutunun ve dağılımının en önemli faktörler olduğunu vurgulamıştır. Kavitasyon oluşumu için bir diğer önemli parametre de akışın türbülans seviyesidir. Türbülans karışımı, türbülanslı sınır tabaka içindeki kabarcık sayısını artırarak kavitasyon oluşumunu etkilemektedir (Franc, 2006).

Herhangi bir akışkan içerisinde kavitasyonun başlayıp başlamadığı o noktadaki yerel basınç ile sıvının buharlaşma basıncı kıyaslanarak anlaşılabilir. Kavitasyonun başlaması için akışkan içerisindeki bir noktadaki basıncın akışkanın buharlaşma basıncına eşit veya akışkanın buharlaşma basıncından daha küçük olması gerekmektedir. Kavitasyon oluşumu ve kavitasyonun şiddeti boyutsuz kavitasyon sayısı ile ifade edilmektedir. Kavitasyon sayısı matematiksel olarak ifade edilirse;

$$\sigma = \frac{\Delta P}{q} \quad (1)$$

Burada ΔP statik basıncı, q ise dinamik basıncı ifade etmektedir ve

$$\sigma \leq \frac{\Delta P}{q} \quad (2)$$

olduğu durumda kavitasyon oluşumu başlamaktadır. Statik ve dinamik basınç bileşenleri açık şekilde yazıldığında, kavitasyon sayısı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (3)$$

Burada P , referans noktasındaki ortam basıncını yani akış içerisindeki suyun basıncını, P_v ise suyun sıcaklıkla değişen buhar basıncını temsil etmektedir. ρ ve U ise sırasıyla suyun yoğunluğu ve akış hızıdır.

Erozyon testlerinde kavitasyonun hangi akış koşullarında başlayacağı, test türü ne olursa olsun statik basıncın dinamik basınca oranı ile hesaplanmaktadır. Ancak hesaplamalarda kullanılan büyüklükler değişkenlikler gösterebilmektedir. Örneğin, kavitasyon tüneli testlerinde dönen bir pervaneye gelen akış neticesinde pervane üzerinde ve etrafında kavitasyon oluşmaktadır. Dolayısıyla burada kavitasyon oluşumu incelenirken pervanenin dönüş hızı ve çapı da hesaba katılmalıdır. Su jeti testlerinde ise sabit şekilde duran bir numuneye yüksek hızda su püskürtülmekte, ortam basıncı ve püskürtülen suyun basıncı (hızı) kavitasyon oluşumunu doğrudan etkilemektedir. Kavitasyon tüneli testleri ve su jeti testlerinde kullanılan kavitasyon sayısının hesabına biraz daha değinmek gerekirse;

Kavitasyon tüneli testlerinde kavitasyon sayısı, (3) denkleminde akış hızı yerine pervane devri ve çapı yazılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \rho [V_A^2 + (0.7 \pi n D)^2]^2} \quad (4)$$

Burada; V_A pervaneye gelen ortalama akış hızı, n pervane devir sayısı, D ise pervane çapını temsil etmektedir.

Su jeti deneylerinde ise nozuldan çıkan akış hızı dinamik basıncı belirlemede tek parametredir. Su jeti deneylerinde kavitasyon sayısı;

$$\sigma = \frac{P_2 - P_v}{P_1 - P_2} \quad (5)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır (Momma, 1991; Momma ve Lichtarowicz, 1995). Burada P_1 ve P_2 sırasıyla nozuldan çıkan suyun basıncını ve kavitasyon kabı içerisindeki suyun basıncını temsil etmektedir. Kavitasyon kabı içerisindeki suyun buharlaşma basıncı, kavitasyon kabının iç basıncından çok daha küçüktür. Kavitasyon kabı içerisindeki basınç ise nozuldan püskürtülen suyun basıncına göre çok küçüktür (nozuldaki püskürtülen suyun basıncı pompa basıncına eşit kabul edilmektedir). Bu bilgiler ışığında su jeti testlerindeki kavitasyon sayısı yeniden düzenlendiğinde, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Momma, 1991; Momma ve Lichtarowicz, 1995).

$$P_v \ll P_1 \text{ ve } P_v \ll P_2 \quad \sigma = \frac{P_2 - P_v}{P_1 - P_2} = \frac{P_2 - P_v}{P_1 - P_v} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{P_{iç}}{P_{giriş}} = \frac{P_{test kabı}}{P_{nozul}} = \frac{P_2}{P_1} \quad (7)$$

Buna göre su jeti testlerinde kavitasyon sayısı, testin gerçekleştiği ortamın basıncının nozuldan püskürtülen suyun basıncına bölünmesi ile doğrudan hesaplanabilmektedir (Momma, 1991).

Kavitasyon sayısı sabitken, kavitasyonun jet uzunluğundaki değişim çok çok küçüktür. Buna göre nozul ile numune arasındaki maksimum erozyonu veren mesafe tespit edilebilir. Bu mesafe sabit tutularak, farklı kavitasyon sayılarında (farklı P_1 ve P_2 basınçlarında) erozyon testleri gerçekleştirilebilir (Momma, 1991). Literatürde su jeti ile kavitasyon erozyonu incelemesi yapılan pek çok çalışmada (Choi ve diğ., 2012; Momma, 1991; Momma ve Lichtarowicz, 1995; Mottyll ve R. Skoda 2016; Soyama, 2013; Kang, 2018; Hutli ve diğ., 2018; Usta, 2018) kavitasyon sayısının hesaplanmasında yukarıda verilen (7) eşitliği

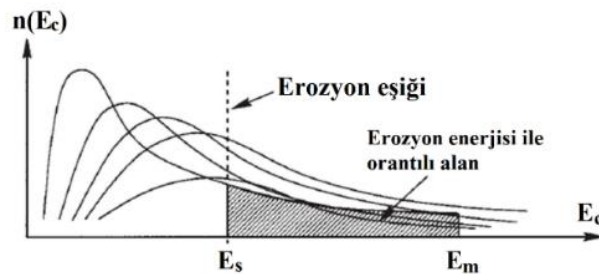
kullanılmaktadır. Bununla birlikte, oluşan kavitasyonun etkisiyle numune yüzeyinde meydana gelen erozyonda nozul ile numune arasındaki mesafe ve numune çapının da doğrudan etkili olduğu bilinmektedir.

2.2 Kavitasyon erozyonu oluşumu

Tukker ve Kuiper (2004), kavitasyonun erozyona yol açacak kadar şiddetli olması için aşağıda verilen üç temel şartı sağlaması gerektiğini söylemiştir:

- Katı yüzeyine çok yakın bir yerde oluşmalıdır,
- Kavitasyon kabarcığının patlama hızı yeterince yüksek olmalıdır,
- Patlamanın olduğu alan küçük olmalıdır.

Hammitt'in (1963) yaklaşımına göre, erozyon potansiyeli (E_c), ancak belirli bir eşik değerinin (E_s), üzerinde olduğunda erozyon gerçekleşir. Bu eşik değeri esasen kavitasyon türüne değil, kabarcık patlamalarının şiddetine ve erozyonun gerçekleştiği yüzeyin malzeme özelliklerine bağlıdır. Şekil 1, Hammitt'e göre enerji spektrumu ve kavitasyon erozyonu ile ilişkisini göstermektedir.



Şekil 1. Enerji spektrumu - kavitasyon erozyonu ilişkisi (Hammitt, 1963).

Şekil 1'de dikey eksendeki $n(E_c)$ kabarcık sayısı, yatay eksen (E_c) ise erozyon potansiyelini temsil etmektedir. E_m ise kavitasyon patlamalarının oluşturduğu enerjiyi göstermektedir. Grafik, ancak belli bir eşik şiddetinden yüksek şiddetteki patlamaların malzemede erozyon oluşturduğunu göstermektedir. Erozyon testleri gerçekleştirilirken bu şartın sağlanması ve malzemenin yapısal özelliklerine göre değişen eşik şiddetinin üzerinde bir şiddette kabarcık patlamalarına maruz bırakılması gerekmektedir.

2.3 Erozyon hızı ve erozyon şiddeti

Kavitasyon erozyonu testleri sonrasında, akış koşullarının veya farklı malzemelerin özelliklerinin kıyaslanabilmesi için "erozyon hızı" ve "erozyon şiddeti" kavramları ortaya konmuştur. Lichtarowicz (1972), erozyonun verilen bir zamandaki ağırlık kaybı ile sayısal olarak kıyaslanabileceğini belirtmiştir. Sonrasında da çeşitli araştırmacılar erozyonu malzemelerin ilk ağırlıkları ile deney sonrası ağırlıkları farkının deney süresine bölünmesi ile elde ettikleri erozyon hızları ile kıyaslamışlardır.

$$\text{Erozyon hızı (EH)} = \frac{\text{ağırlık kaybı (gr)}}{\text{test süresi (dk)}} = \frac{\Delta m}{t} \quad (8)$$

Yüzey inceleme teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte ağırlık kaybına ilaveten yüzey pürüzlülüğü incelenerek de erozyon hakkında sayısal yargılara varılabileceğini gösteren çalışmalar ortaya çıkmıştır. Mottyll ve Skoda (2016), erozyon testleri sonrasında yüzey üzerinde oluşan en derin çukurun derinliğinin numune çapına oranını optik profilometre ile belirleyerek erozyon şiddeti kavramını ortaya çıkartmıştır. Buna göre erozyon şiddeti aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Erozyon şiddeti (EŞ)} = \frac{\text{en derin çukurun yüksekliği } (\mu\text{m})}{\text{numune çapı (mm)} * \text{test süresi (dk)}} = \frac{h_{\text{maks}}}{D_{\text{numune}} * t} \quad (9)$$

Eğer kullanılan numunelerin boyutları aynı ise erozyon şiddeti yüzey üzerindeki en derin çukurun yüksekliğinin test süresine bölümü ile elde edilmektedir.

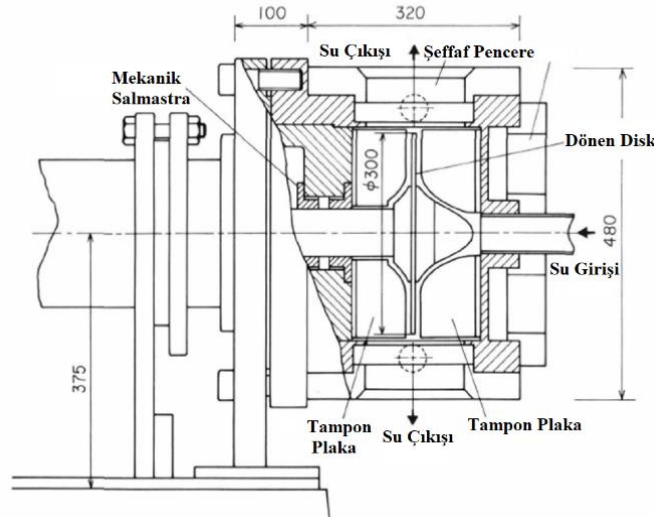
3. Hızlandırılmış Erozyon Testi Yöntemleri

Önceki bölümde verildiği gibi, mühendislik malzemelerinin kaviteasyon erozyonuna karşı dirençlerinin incelenmesinde 5 farklı yöntem kullanılmaktadır.

3.1 Döner diskli cihaz ile kaviteasyon erozyonu testi

Döner diskli cihazlar, hidrolik makinelerde gerçek akış koşullarının oluşturulmasını sağlayan bir hızlandırılmış erozyon testi yöntemidir. Hidrolik türbinler ve pompalar gibi döner makinelerde erozyonu simüle etmek için en yaygın olarak kullanılan yöntemdir (Rashed ve diğ., 2016). Pek çok araştırmacı döner diskli erozyon test cihazı kullanarak çeşitli mühendislik malzemelerinin erozyon dayanımlarını inceleyen çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Shima ve diğ. (1992), Şekil 2'de şeması verilen döner diskli cihazı kullanarak ortam sıcaklığı, hız ve statik basıncın; paslanmaz çeliğin kaviteasyon davranışı ve erozyon hızı üzerindeki etkilerini incelemiştir.



Şekil 2. Döner diskli erozyon testi cihazı şeması (Shima ve diğ., 1992).

Deneyleri 65.4–77.6 m/s gibi oldukça yüksek hızlarda gerçekleştirmelerine rağmen erozyon oluşumu ile ilgili bir sonuca rastlamamışlardır.

Iwai ve Okada (1987), Rao ve Rao (1981) hız; Hansen ve Rasmussen (1968) havanın içeriği; Lichtman ve Weingram (1964), Lightman ve diğ., (1961), Rao ve diğ., (1980), Wood ve diğ., (1967) test süresi; Rao ve Buckley (1987) ise ölçek etkilerini incelemiştir.

Bazanini ve diğ., (2008) daha gelişmiş bir döner disk cihazı ile metal numunelerde test süresine karşılık kütle kaybını kaviteasyonlu akış diyagramları oluşturarak göstermiştir. 25 saat süresince teste tabi tutulan alüminyum, pirinç ve dökme demirden imal edilen numunelerin yüzeylerinde oyuklaşmalar görülmüştür. Çalışmada test edilen tüm numunelerde erozyon olduğu, bunun yanında alüminyumdaki kütle kaybının beklenenden daha az olduğu belirtilmiştir.

Vatankhah ve diğ., (2011), Şekil 3 ile verilen döner disk cihazı ile iki farklı polimerik boyanın direnç özelliklerini incelemiştir.



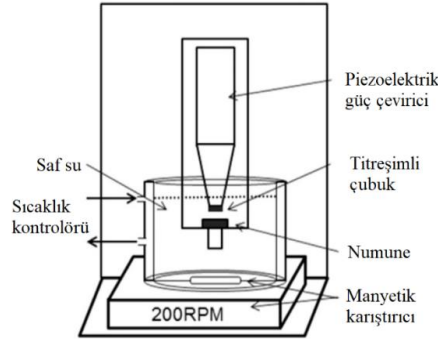
Şekil 3: Döner disk cihazı (Vatankhah ve diğ., 2011).

Döner diskli cihazlar, hidrolik türbinler ve pompalar gibi döner makinelerde erozyonu simüle etmek için geliştirilen en iyi teknik gibi görünmektedir (Rashed ve diğ., 2016). Yöntemin çalışma prensibi ve kullanım alanı ile ilgili daha kapsamlı bilgiye Rashed ve diğ., (2016) He ve Hammitt (1982), Hart ve Whale (2007) kaynaklarından ulaşılabilir.

3.2 Titreşim cihazları ile kaviteasyon erozyon testi – ASTM-G32

Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (ASTM), 1898 yılında kurulmuş, 100'den fazla ülkeden 30.000'den fazla üyeye sahip, çeşitli testler için standartlar geliştiren uluslararası bir kuruluştur. Malzemeler, ürünler, sistemler ve hizmetler için standartlar geliştirmekte ve yayınlamaktadır (ASTM, 2019).

ASTM-G32 yöntemi, bir sıvı içerisine batırılmış yüksek frekansta titreşen bir çubuk vasıtasıyla numunenin yüzeyinde kaviteasyon hasarı oluşmasına dayanmaktadır. Çubuğun yüksek frekanslı titreşimi, sıvıda kaviteasyonun oluşumunu başlatmakta, patlayan kaviteasyon kabarcıkları numunede erozyon oluşumuna neden olmaktadır (ASTM G134-95, 2010; Taillon ve diğ., 2016). Şekil 4'te ASTM-G32 standartlarına göre oluşturulmuş bir erozyon test düzeneği verilmiştir.



Şekil 4: ASTM G32 standartlarına göre oluşturulmuş bir titreşim cihazı erozyon test düzeneği elemanları (Taillon ve diğ., 2016).

ASTM G32, düşük maliyeti ve kullanım kolaylığı nedeniyle kaviteasyon erozyonu incelemelerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilen ilk çalışmalar arasında en çok bilineni Zhou ve Hammitt'in (1963) karbon çeliğinin farklı sıcaklıklarda çeşitli sulu çözeltiler içerisindeki erozyon oluşum hızlarını incelediği çalışmadır. Hattori ve diğ. (2009) ise bir titreşimli test cihazı kullanarak çeşitli kaviteasyon sayılarında kaviteasyon kabarcıkları kaynaklı darbe yükleri testleri gerçekleştirmişlerdir. Laguna-Camacho ve diğ. (2013), saf alüminyum, St-104, St-4340, Al-6082 gibi farklı mühendislik malzemelerinin kaviteasyon erozyonuna dirençlerini incelemişlerdir. Dular (2016) ise, sıcaklığın kaviteasyon erozyonu üzerine etkisini ASTM G32 standartlarında, radyal kesitli bir deney düzeneğinde alüminyum numuneler ile incelemiştir. Çalışma 30°C ile 100°C sıcaklık aralığında su kullanılarak gerçekleştirilmiş ve maksimum kaviteasyon erozyonunun 60°C de olduğu sonucuna varılmıştır.

Azar ve diğ. (2017), İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi'nde kurdukları Şekil 5'te gösterilen titreşimli erozyon test cihazı ile metal numuneler yüzeyindeki droplet adı verilen çok küçük damlacıkların kaviteasyon

erozyonuna etkisini incelemişlerdir. Çalışmada 3.5 saat süredeki erozyon testlerinden sonra numune yüzeyleri optik profilometre ve elektron mikroskobu ile taranmış ve yüzeyde 100 µm yüksekliğinde çukurlar olduğu görülmüştür. Çalışmada, dropletlerin erozyonun başlaması ve büyüklüğündeki rolünün yeri ve şekline göre değiştiği sonucu elde edilmiştir.



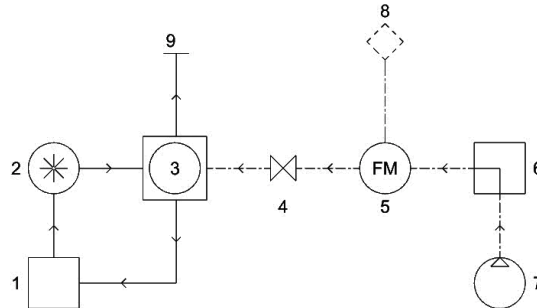
Şekil 5: İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi'ndeki titreşimli erozyon testi cihazı.

3.3. Hava jeti ile kavitasyon erozyonu

Hava jeti test düzeneği, içi sıvı (genellikle su) ile doldurulmuş bir basınçlı kap içerisine basınçlı hava üflenerek kavitasyon oluşturulmasını temel almaktadır.

Bu teknik kullanılarak gerçekleştirilen tek çalışmada Usta ve diğ. (2017), akrilik malzemeden imal edilen (Şekil 7'de verilen) kavitasyon kabının içerisine yerleştirilen nozul vasıtasıyla yüksek basınçta hava üfleyerek erozyon testleri gerçekleştirmişlerdir. Bu bölümde anlatılan hava jeti ile kavitasyon erozyonu deneyleri, İTÜ Gemi İnşaatı Fakültesi'nde bulunan İlham Artüz Deniz Bilimleri Laboratuvarında kurulan hava jeti test düzeneği ile gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6'dan incelenebileceği üzere test kabı içerisindeki hava ve suyun sirkülasyonu hava girişi (nozül), hava çıkışı, su girişi (peristaltik pompa) ve su çıkışı şeklinde kapalı bir çevrim ile sağlanmaktadır. Su tankından (1) peristaltik pompa (2) ile sabit bir debi ve basınçta basınçlı kaba (3) alınan su, test kabından tekrar su tankına gönderilmektedir. Hava kompresöründen (7) basınç regülatörüne (6) gelerek basıncı ayarlanan havanın, debi metrede (5) debisi ve basıncı istenen düzeye getirilerek, nozul vasıtasıyla basınçlı kaba (3) püskürtülmektedir. Test kabı üzerindeki hava tahliye borucuğu ile tahliye olan hava ise su tankına gitmektedir. Böylece, hava için de kapalı bir çevrim oluşturulmuştur. Kavitasyon erozyonu test ünitesinin şeması Şekil 6 ile verilmiştir.

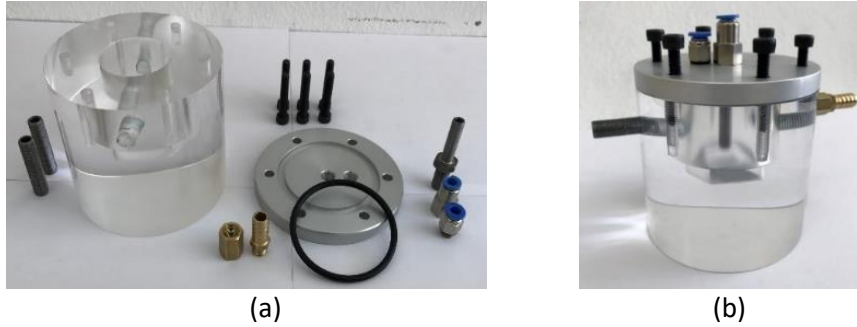


Şekil 6: Hava jeti ile kavitasyon erozyonu test ünitesi şeması.

1 – Su tankı 2 – Peristaltik pompa 3 – Test kabı 4 – Açma kapama valfi 5 – Debi metre
6 – Basınç regülatörü 7 – Hava kompresörü 8 – Basınç ayarlama valfi 9 – Hava çıkışı

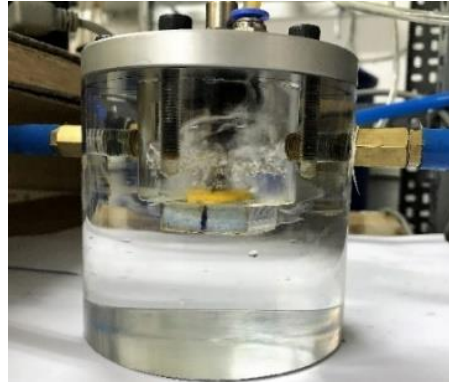
Tüm fiziksel olayın gerçekleştiği yer olan test kabının boyutları, kavitasyon erozyonu testlerinde kullanılacak numune boyutları ile akışkanın fiziksel büyüklükleri (basınç, hız vb.) göz önünde bulundurularak belirlenmiştir.

Şekil 7’de gösterilen test kabı, deney ortamının dışarıdan gözlemlenmesine elverişli olacak şekilde, işleme kolaylığı ve malzeme dayanımı da göz önünde bulundurularak, akrilik malzemeden imal edilmiştir. Akrilik malzemenin 3 eksenli CNC’de işlenmesi ile imal edilen test kabının yüksekliği 80 mm, çapı ise 100 mm’dir. Tamamen kapalı bir çevrim şeklinde gerçekleştirilen testlerde su çevrimi, peristaltik pompa kullanılarak sağlanmıştır. Hava ise kompresör ile basınçlandırılmıştır. Havanın debisi akış ölçer, basıncı ise basınç ölçer ile kontrol edilmiştir. Deney düzeneği için basınç ve su seviyesi, kontrollü deney düzeneğine uygun olacak şekilde sürekli hale getirilmiştir.



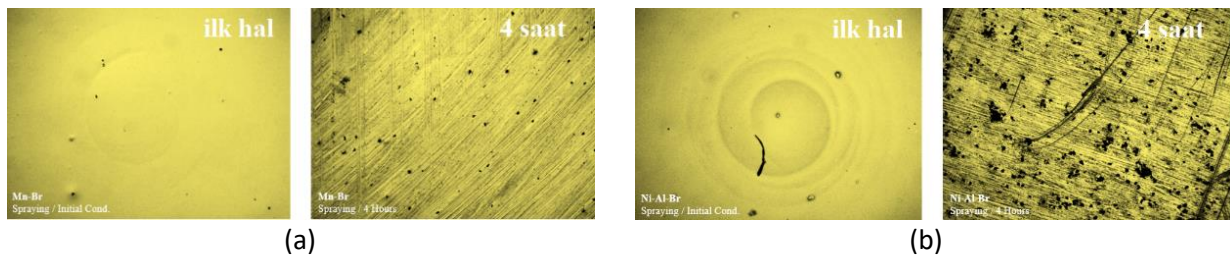
Şekil 7: (a) Test kabını oluşturan parçalar, (b) Test kabının son hali (Usta, 2018).

Usta ve diğ. (2017), farklı teknikler ile boyanan bakır alaşımli Cu1 (Mn-Br) ve Cu3 (Ni-Al-Br) malzemelerinin farklı test sürelerinde erozyon testlerini gerçekleştirmiştir. Numuneler aynı akrilik boya ile daldırma, sprej (püskürtme), fırça, kalem ile boyama gibi teknikler ile boyanmıştır. Farklı nozul ucu mesafeleri ve hava basıncı koşullarında, malzeme ve boyama tekniğinin kavitasyon erozyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Her 4 saatlik testten sonra numune yüzeyleri ışık mikroskobu ile analiz edilmiştir. Şekil 8’de testlerden bir görüntü sunulmaktadır.

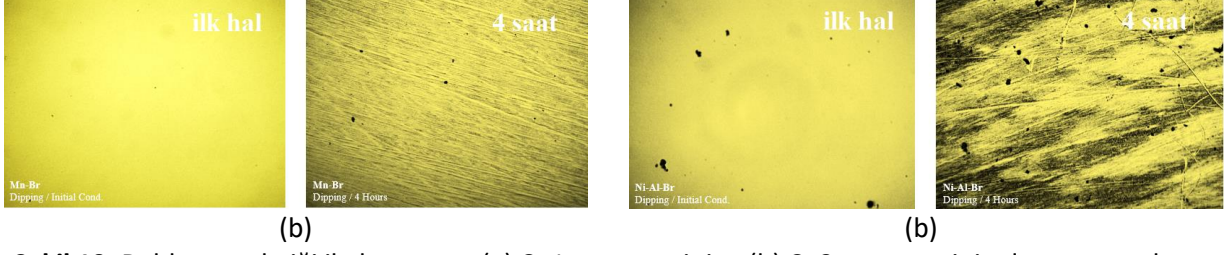


Şekil 8: Daldırma tekniği ile boyanmış Cu3 numunesi ile kavitasyon erozyonu testi (Usta, 2018).

Şekil 9 ve Şekil 10’da farklı boyama teknikleri ile boyanmış numune yüzeylerinin, ilk hali ve 4 saatlik testler sonrası elde edilen mikroskop görüntülerinden örnekler sunulmaktadır.



Şekil 9: Sprej (püskürtme) ile boyanmış (a) Cu1 numunesinin, (b) Cu3 numunesinin deney sonuçları (Usta, 2018).



Şekil 10: Daldırma tekniği ile boyanmış (a) Cu1 numunesinin, (b) Cu3 numunesinin deney sonuçları (Usta, 2018).

Şekil 9 ve Şekil 10'dan görüldüğü üzere, hava jeti tekniği ile belirli bir test süresinde boya üzerinde hasar meydana gelmektedir. Diğer boyama tekniklerinde (fırça ve kalem ile boyama) de benzer sonuçlar elde edilmiştir ancak boyama teknikleri ile erozyon arasında sayısal bir ilişki kurulamamıştır. Boyanmadan bırakılan Cu1 ve Cu3 yüzeylerinde ise 12 saatlik test sonrasında erozyon oluşumu görülmemiştir.

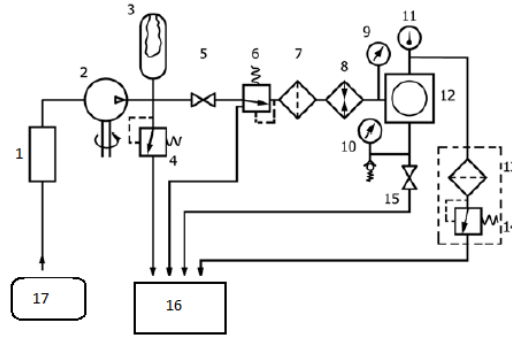
Sonuç olarak, hava jeti tekniği ile oluşturulan kavitasyon kabarcıkları boya üzerinde hasar meydana getirebilecek bir etki oluşturabilmiştir. Bunun dışında çalışmada, test süresi ve nozul ucundan çıkan havanın basıncı arttırıldığında boya üzerinde daha fazla erozyonun oluştuğu sonucu elde edilmiştir. Nozul ucu mesafesi azaldığında erozyonun artması da elde edilen bir diğer sonuçtur.

3.4 Su jeti ile kavitasyon erozyonu testleri – ASTM-G134

Su jeti tekniği, malzemelerin kavitasyon erozyonuna karşı direnç karakteristiklerini ve deney koşullarının erozyon üzerine etkilerini incelemek amacıyla ortaya konmuş bir yöntem olup, titreşim cihazları ile erozyon testi (ASTM-32) ile birlikte ASTM'nin en yaygın kullanılan 2 erozyon test yönteminden birisidir (Choi ve diğ., 2012).

Su jeti test tekniği, ilk olarak Lichtarowicz (1972 ve 1979) tarafından mühendislik malzemelerinin kavitasyon erozyonuna karşı dirençlerini incelemek amacıyla uygulanmıştır. Sonrasında Yamaguchi ve Shimizu (1987) ve Momma (1991) test düzeneklerini ve uygulamalarını anlattıkları başarılı çalışmaları ile yöntemin gelişmesine katkıda bulunmuşlardır. Su jeti tekniğini kullanarak mühendislik malzemelerinin erozyona karşı dayanımını, test süresi, kavitasyon sayısı, iç basınç, nozul basıncı, su sıcaklığı, nozul ile numune arasındaki mesafe, nozul geometrisi gibi parametrelerin erozyona etkilerinin incelendiği çalışmalara Choi ve diğ., (2012), Soyama, (2013), Hutli ve diğ., (2018), Usta, (2018), Soyama ve Asahara, (1999), Soyama ve Kumano, (2002), Peng ve diğ., (2018) örnek olarak verilebilir.

Su jeti deney tekniğinde, içi sıvı ile dolu bir kavitasyon kabında yüksek basınçlı bir pompa ve nozul vasıtasıyla basınç farkı ve dolayısıyla da kavitasyon oluşturularak bu kavitasyonun oluşumu ve etkileri (erozyon, gürültü vb.) incelenebilir. Su jeti testleri belirlenen basınç ve sıcaklık koşullarında, genellikle su kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Test düzeneğini kısaca anlatmak gerekirse, içi sıvı ile dolu basınçlı bir kap içerisinde nozul ve numune karşılıklı olarak yerleştirilir. Yüksek basınçlı bir pompa ile su basınçlı kabın içerisindeki nozula gönderilir. Pompanın gönderdiği yüksek hızdaki akış, nozul içerisinde bir miktar daha hız kazanarak belirli bir mesafeden numune yüzeyine doğru püskürtülür. Nozuldan numuneye doğru yüksek hızla (düşük basınçta) püskürtülen suyun etkisiyle zaten oldukça düşük bir basınçta olan kavitasyon kabındaki suyun basıncı daha da düşerek buharlaşma basıncının altına inmekte, dolayısıyla da kabın içerisinde ve özellikle de numune etrafında kavitasyon kabarcıkları oluşmaktadır. Belli bir süre sonra bu kabarcıklar numune yüzeyinde kavitasyon erozyonu oluşturmaktadır. Şekil 11'de ASTM'nin su jeti yöntemi ile kavitasyon erozyonu testi şeması verilmiştir. ASTM standartlarına göre (ASTM G134-95, 2010), 0.4 mm çapındaki nozul ile, 4.5 litre/dakika debide, 210 bar basınç veren bir pompa testler için yeterlidir.



Şekil 11: ASTM-G134 yöntemi test şeması (ASTM G134-95, 2010).

- | | | |
|---|-----------------------|---|
| 1 – Akış regülatörü | 2 – Pompa | 3 – Hidrolik akümülatör |
| 4 – Basınç emniyet valfi | 5 – Açma kapama valfi | 6 – Basınç ayarlama valfi |
| 7 – H.P. filtresi | 8 – Isıtıcı | 9 – Dış basıncı (Nozul basıncını) ayarlama vanası (0-250 bar) |
| 10 – İç basıncı (basıncılı kabın içi) ayarlama vanası (0-6 bar) | 11 – Termometre | |
| 12 – Test kabı (basıncılı kap) | 13 – İç filtre | 14 – Basınç regülatörü |
| 15 – Tahliye valfi | 16 – Atık su tankı | 17 – Su tankı |

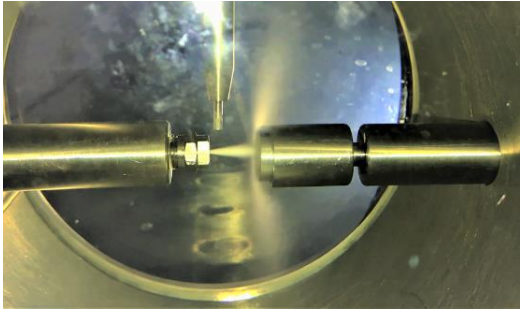
ASTM standartlarından yararlanarak İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi'nde kurulan su jeti test düzeneği Şekil 12'de sunulmaktadır. Test düzeneği ve gerçekleştirilen erozyon testleri ile ilgili detaylı bilgi için Usta (2018)'e bakılması önerilir.



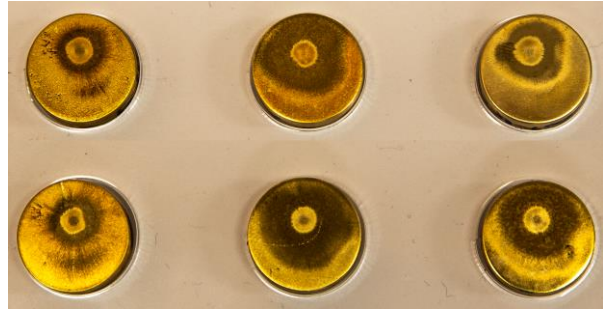
Şekil 12: İTÜ GİDB Fakültesi Ata Nutku Laboratuvarı'nda kurulan su jeti test düzeneği (Usta, 2018).

Su jeti ile oluşturulan kavitasyonun şiddeti kavitasyon kabının iç basıncı ile nozuldan çıkan suyun basıncı (bu ikisinin oranı kavitasyon sayısını vermektedir), akış hızı, nozul türü ve çapı, nozul açısı, numune ile nozul arasındaki mesafeye doğrudan bağlıdır. Parametrelerin çokluğu ve kontrol edilebilirliği bu metodu kavitasyon erozyonunun malzeme davranışı üzerindeki etkisini parametrik olarak incelemek için büyük bir araştırma ve test aracı haline getirmektedir (Choi ve diğ., 2012). Bu yöntem ile kurulan bir su jeti sistemi ile numune yüzeyinde çok çeşitli boyutlarda patlayan gerçek kabarcık bulutları oluşur. Yukarıda verilen kavitasyon sayısı, nozul ile numune arasındaki mesafe, nozul geometrisi ve test süresi parametreleri kullanılarak istenilen malzemeler için kavitasyon erozyonu testleri yapılabilir.

Su jeti test düzeneği ve testler sonrası numune yüzeyleri sırasıyla Şekil 13 (a) ve (b) ile sunulmaktadır.



(a)



(b)

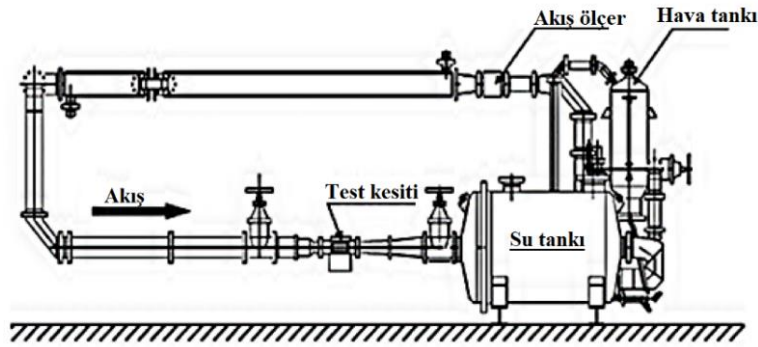
Şekil 13: (a) Su jeti tekniği ile erozyon testi, (b) Su jeti testleri sonrası numune yüzeyleri (Usta, 2018).

Şekil 13 (a)'dan görüldüğü üzere, basınçlı kap içerisinde numune yüzeyinde ve etrafında kavitasyon oluşumu vardır. Şekil 13 (b)'de, numune yüzeyinde akış koşulları (kavitasyon sayısı) ve test süresine göre değişen miktarlarda erozyon olduğu görülmektedir (altın sarısı rengindeki numune yüzeyinde siyah kısımlar erozyonu göstermektedir).

Şekil 13 (b)'de nozuldan yüksek hızda püskürtülen suyun numune yüzeylerine çarptığı kısımlar numunelerin ortasında yer alan sarı renkli, küçük dairesel bölgelerdir. Bu bölgelerin etrafında yer alan siyah bölgeler ise kavitasyon sebebiyle yüzeyde oluşan erozyondur.

3.5 Kavitasyon tüneli deneyleri ile erozyon incelemeleri – ASTM-G134

Kavitasyon tüneli, Şekil 14'de gösterildiği gibi dikey düzlemde kapalı bir kanaldır. Su, yatay alt kanaldaki bir motor vasıtasıyla sirküle edilir. Kavitasyon tünelleri, anlatılan diğer test düzeneklerine göre çok daha büyük ve maliyetlidir.



Şekil 14: Kavitasyon tüneli genel gösterimi.

Kavitasyon tüneli ile gerçekleştirilen erozyon deneyleri, bir pervane etrafındaki gerçek akış durumlarının en benzer şekilde oluşturulduğu tekniktir. Kavitasyon oluşumu ve kavitasyonun davranış özelliklerinin doğru bir şekilde elde edilebilmesi için yerçekimi, viskozite, yüzey gerilimi, buharlaşma özellikleri, statik basınç, hız, akışkan yoğunluğu gibi faktörlerin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Kavitasyon tünellerinde kavitasyon testlerinin yanı sıra pervane performans testleri, su altı ve su üstü araçlar için detaylı iz ve sınır tabaka ölçümleri, hassas akustik ölçümler gibi hidrodinamik ve hidroakustik deneylerin gerçekleştirilebilmektedir (SSB, 2019).

Almanya'da bulunan SVA Potsdam Kavitasyon Tüneli Şekil 15'te görülmektedir (SVA, 2019) . Bu tünelde, 260cm x 85cm x 85cm test kesitinde 13 m/s hıza kadar akış elde edilebilmektedir. Benzer bir kavitasyon tüneli ülkemizde İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda da bulunmaktadır. Bu tünelde pervane kavitasyon testleri, açık su pervane testleri, dalmış cisimler (dümen, hidrofoil vb.) ile deneyler, hidroakustik deneyler, akım görüntüleme deneyleri, viskos direnç ölçümleri gerçekleştirilmektedir.



Şekil 15: SVA Potsdam Kaviteasyon Tüneli ve Test Kesiti (260 cm x 85 cm x 85 cm) (SVA, 2019).

Çok daha büyük test kesitine sahip, daha yüksek akış hızı elde edilebilen ve çok ileri akış görselleme tekniklerinin kullanıldığı büyük kaviteasyon tünelleri de bulunmaktadır (large cavitation tunnel). Örneğin, ülkemizde İTÜ’de kurulma aşamasında olan büyük kaviteasyon tüneli 5.5m x 1.5m x 1.2m boyutlarında büyük test kesitinde 15 m/s akış hızına kadar deneysel çalışmalar yapmaya imkan sağlayacaktır (SSB, 2019).

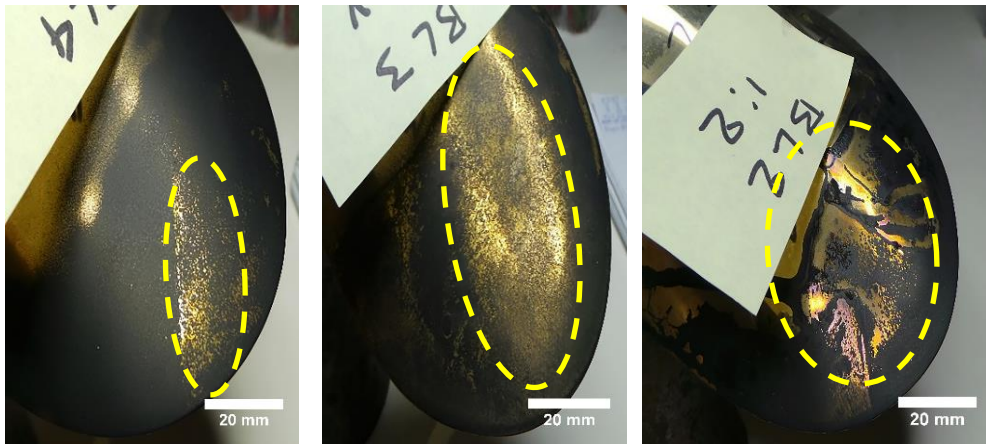
Pervanede kaviteasyon testleri Şekil 16’da verildiği gibi stroboskopik ışık altında, zaman aralıklı video kameralar ile yüksek hızlı video kullanarak yapılabilir.



Şekil 16: Kaviteasyon deneyi gözlem araçları (Usta, 2018; Aktas ve diğ., 2020).

Erozyon testleri esnasında pervane kanatları yumuşak boya ile tek bir hat şeklinde düzgünce boyanır. Bu testlerde, boyalı ve boyasız kanatlar için kaviteasyon gözlemleri, yüzey görünümünün değişip değişmediğini belirlemek için karşılaştırılmalıdır (Aktas ve diğ., 2020). Erozyon testlerinin amacı pervane kanatlarında hasar görmesi beklenen bölgelere dair bir tahminde bulunmaktır.

Şekil 17’de, yumuşak boya ile boyanmış bir pervanenin erozyon testi sonrası kanatları gösterilmiştir. Burada, aşınan kısımlar (altın sarısı renkte) pervanenin erozyona uğraması beklenen kısımlarıdır. Koyu renkli bölgeler ise boyanın aşınmadığı, dolayısıyla erozyon oluşumunun beklenmediği bölgelerdir.



Şekil 17: Kaviteasyon erozyonu testi sonrası pervane kanatları (Aktas ve diğ., 2020).

4. Genel Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Kavitasyon; tüm hidrolik sistemlerde, gemi pervanelerinde, pompalarda görülen ve istenmeyen bir akışkanlar dinamiği problemidir. Gürültü, titreşim, performans kaybı ve erozyona sebebiyet vermektedir. Farklı malzemelerin kavitasyon erozyonuna karşı dirençlerini ve akış koşullarını oluşturan kavitasyon sayısı, basınç değerleri, akış hızı gibi özelliklerin incelenmesinde 5 farklı erozyon test tekniği kullanılmaktadır. Bu teknikler döner diskli cihaz ile gerçekleştirilen testler, titreşim cihazları ile ultrasonik ortam oluşturularak gerçekleştirilen testler, hava jeti tekniği, su jeti (kavitasyon jeti) tekniği ve kavitasyon tüneli testleridir. Çalışma neticesinde literatürde yer alan erozyon testi teknikleri ile ilgili aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir:

- Döner diskli cihazlar, hidrolik türbinler ve pompalar gibi döner makinelerde erozyonu incelemek için en iyi yöntemdir.
- Titreşim cihazları ile ultrasonik kavitasyon erozyon testleri tekniği, ASTM tarafından standartlaştırılmıştır (ASTM G32). ASTM G32, düşük maliyeti ve kullanım kolaylığı nedeniyle kavitasyon erozyonu incelemelerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir.
- Hava jeti tekniği, hava basıncı ne kadar yüksek olursa olsun metal bir yüzeyde erozyona sebep olacak kadar şiddetli olamadığı için pek tercih edilen bir teknik değildir. Bunun yanı sıra, boyalı yüzeylerde boyama tekniği, test süresi, nozul ile numune arasındaki mesafe, nozul çapı, hava basıncının büyüklüğü gibi parametrelerin incelenmesinde kullanılmaktadır.
- Su jeti tekniği, mühendislik malzemelerinin kavitasyon erozyonuna karşı direnç karakteristiklerini ve deney koşullarının erozyon üzerine etkilerini incelemek amacıyla ortaya konmuş bir yöntem olup ultrasonik test tekniği ile birlikte ASTM'nin en yaygın kullanılan kavitasyon erozyonu test yöntemidir.
- Su jeti testleri ile yeterince küçük kavitasyon sayısı koşulları oluşturulduğunda farklı mühendislik malzemelerinin kavitasyon erozyonuna karşı dirençleri araştırılabilir. Kavitasyon kabının iç basıncı, nozul basıncı, nozul çapı, nozul ile numune arasındaki mesafe gibi parametrelerin erozyon ile ilişkisi incelenebilir.
- Kavitasyon tüneli ile gerçekleştirilen erozyon deneyleri, bir pervane etrafındaki gerçek akış durumlarının en benzer şekilde oluşturulduğu tekniktir. Bunun yanında, diğer test yöntemlerine kıyasla kavitasyon tüneli testleri çok daha maliyetlidir.

Teşekkür

Bu makalede görselleri paylaşılan deneysel çalışmalar, yazarın Doktora Tezi kapsamında gerçekleştirdiği çalışmalardan alınmıştır. Bu sebeple, yazar Tez danışmanı Prof. Dr. Emin Korkut ve çalışma arkadaşı Araş. Gör. Çağatay Sabri Köksal'a en içten teşekkürlerini sunmaktadır. Yazar ayrıca deneylerin gerçekleştirildiği İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi'nde bulunan Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı ve İlham Artüz Deniz Bilimleri Laboratuvarı sorumlularına ve personeline teşekkürlerini sunmaktadır.

5. Kaynaklar

Aktas, B., Usta, O., Atlar, M. (2020). Systematic investigation of coating application methods and soft paint types to detect cavitation erosion on marine propellers, Applied Ocean Research, Vol. 94, 101868. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101868>

ASTM Standard, Standard No: G134-95. (2010). Standard Test Method for Erosion of Solid Materials

by Cavitating Liquid Jet, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.02.

ASTM Standard, Standard No: G32-10. (2010). Standard Test Method for Erosion for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.02.

ASTM, (2019). American Society for Testing and Materials, URL: <http://www.astm.org/>, (Eriřim zamanı; 5 Mayıs 2019).

Azar, G. T. P., Yelkarasi, C. & Ürgen, M. (2017). The role of droplets on the cavitation erosion damage of TiN coatings produced with cathodic arc physical vapor deposition, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 322, pp. 211–217, (2017).

Bazanini, G., Bressan, J. D. & Klemz, M. A. (2008). Cavitation Erosion Wear of Metallic Specimens Using the New Compact Rotating Disk Device, *Thermal Engineering*, Vol. 7(1), pp. 31–36.

Choi, J. K., Jayaprakash & A. Chahine, G. L. (2012). Scaling of Cavitation Erosion Progression with Cavitation Intensity and Cavitation Source, *Wear*, Vol. 278–279, pp. 53–61.

Brennen, C. E. (1995). *Cavitation and Bubble Dynamics*, New York Oxford University Press, New York.

Dular, M. (2016). Hydrodynamic cavitation damage in water at elevated temperatures", *Wear*, 346-347, pp. 78–86.

Franc, J. P. (2006). Physics and control of cavitation, *Design and Analysis of High Speed Pump*, 2, 1–36.

Hammit, F.G. (1963). Observations on Cavitation Damage in a Flowing System, *Journal of Basic Engineering*, 85 (3), pp. 347–356.

Hansen, B. W. & Rasmussen, R. E. H. (1968). Cavitation Damage Experiments in a Rotating Disk Apparatus Especially with Regard to the Gas Content of Water, *Journal of Ship Research*, Vol. 12, pp. 83–88.

Hart, D. & Whale, D. (2007). A review of cavitation-erosion resistance weld surfacing alloys for hydroturbines", *Eutectic Cast. Pty. Ltd.*, 15-30.

Hattori, S., Hirose, T. & Sugiyama, K. (2009). Prediction method for cavitation erosion based on measurement of bubble collapse impact loads, *J. Phys. Conf. Ser.*, 147.

He, J. & Hammit, F. G. (1982). Comparison of cavitation erosion test results from venturi and vibratory facilities", *Wear*, Vol. 76, pp. 269–292.

Hutli, E., Nedeljkovic, M. S. & Bonyár, A. (2018). Cavitating Flow Characteristics, Cavity Potential and Iwai, Y. & Okada, Y. (1987). Cavitation Erosion Induced by Rotating Disk Apparatus, In *Lecture Note of the Fifth Cavitation Symposium in Japan*, 93–100.

Kinetic Energy, Void Fraction and Geometrical Parameters-Analytical and Theoretical Study Validated by Experimental Investigations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 117: pp. 873-886.

Kang, C. Liu, H., & Soyama, H. (2018). Estimation of aggressive intensity of a cavitating jet with multiple experimental methods, *Wear*, 394–395, 176–186.

Laguna-Camacho, J. R., Lewis, R., Vite-Torres, M., & Mendez-Mendez, J. V. (2013). A study of cavitation erosion on engineering materials, *Wear*, Vol. 301, pp. 467–476.

- Lichtarowicz, A. (1972). Use of a simple cavitating nozzle for cavitation erosion testing and cutting, *Nature Physical Science*, Vol. 239 (9), pp.63.
- Lichtarowicz, A. (1979). Cavitating jet apparatus for cavitation erosion testing, *A.S.T.M. STP*, Vol. 664 pp. 518.
- Lightman, J. Z., Kallas, D. H., Chatten, C. K. & Cochran, E. P. (1961). Cavitation Erosion of Structural Materials and Coatings", *Corrosion*, Vol. 17, pp. 497–505. <http://dx.doi.org/abs/10.5006/0010-9312-17.10.119>
- Lichtman, J. Z. & Weingram, E. R. (1964). The Use of a Rotating Disk Apparatus in Determining Cavitation Erosion Resistance of Materials, In *ASME Symposium on Cavitation Research Facilities and Techniques*, 185–196.
- Momma, T. (1991), *Cavitation Loading and Erosion Produced by a Cavitating Jet*, Ph.D. Thesis, University of Nottingham.
- Momma, T. & Lichtarowicz, A. (1995). A study of Pressures and Erosion Produced by Collapsing Cavitation, *Wear*, Vol. 186-187, pp. 425-436.
- Mottyll, S. & Skoda R. (2016). Numerical 3D flow simulation of ultrasonic horns with attached, cavitation structures and assessment of flow aggressiveness and cavitation erosion sensitive wall zones, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 31, pp. 570–589.
- Peng, C., Tian, S. & Li, G. (2018). Joint Experiments of Cavitation Jet: High-speed Visualization and Erosion Test, *Ocean Engineering*, Vol. 149, pp. 1-13.
- Plesset, M. S., & Prosperetti, A. (1977). "Bubble dynamics and cavitation", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 9, pp. 145–187.
- Rao, P. V. & Rao, B. C. S. (1981). Some Erosion Studies and Scale Effects with Rotating Disk Device, In *ASME Symposium on Cavitation Erosion in Fluid Systems*, 119–131.
- Rao, P. V., Rao, B. C. S. & Rao, N. S. L. (1980). Erosion and Cavity Characteristics in Rotating Components", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 8, pp. 127–142. <http://dx.doi.org/10.1520/JTE10609J>
- Rao, P. V. & Buckley, D.H. (1987). Unified Empirical Relations For Cavitation And Liquid Impingement Erosion Processes", *Wear*, Vol.120, pp. 253–288. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(87\)90022-6](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(87)90022-6)
- Rashed, M. K., Abdulbari, H. A., Salled, M. A. & Ismail, M. H. (2016). Rotating disc apparatus: types, developments and future applications, *Modern Applied Science*, Vol. 10, pp. 198-229.
- Shima, A., Tomaru, H., Ihara, A. & Miura, N. (1992). Cavitation damage study with a rotating disk at the high peripheral velocities", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 30(4), pp. 521–538. <http://dx.doi.org/10.1080/00221689209498898>
- Soyama, H. & Asahara, M. (1999). Improvement of the Corrosion Resistance of a Carbon Steel Surface by a Cavitating Jet, *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 18 (23), pp. 1953-1955.
- Soyama, H. & Kumano, H. (2002). The Fundamental Threshold Level—a New Parameter for Predicting Cavitation Erosion Resistance", *Journal of Testing and Evaluation*, 30 (5).
- Soyama, H. (2013). Effect of nozzle geometry on a standard cavitation erosion test using a cavitating

jet, *Wear*, Vol. 297, pp. 895-902.

Sreedhar, B. K. Albert, S. K. & Pandit, A. B. (2017). Cavitation damage: Theory and measurements – A review, *Wear*, 372-373, pp. 177–196.

SVA, (2019). Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, URL: <https://www.sva-potsdam.de/en/cavitation-tunnel/>, (Eriřim zamanı; 5 Kasım, 2019).

Taillon, G., Pougoum, F., Lavigne, S., Ton-That, L., Schulz, R., Bousser, E., Savoie, S., Martin, L. & Sapieha, J. E. K. (2016). Cavitation erosion mechanisms in stainless steels and in composite metal–ceramic HVOF coatings, *Wear*, Vol. 364-365, pp. 201–210.

T.C. Cumhurbaşkanlığı, Savunma Sanayii Başkanlığı (SSB). 2019. Türk Savunma Sanayii Ürün Katalođu. URL: <https://www.ssb.gov.tr>, (Eriřim zamanı; 10 Aralık, 2019).

Tukker, J. & Kuiper, G. (2004). High-speed video observations and erosive cavitation, PRADS 2004, Luebeck-Travemuende, 941–948.

Usta, O. (2018). Gemi Pervanelerinde Kaviteasyon ve Kaviteasyon Erozyonu Modellemesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı ve Gemi Mak. Müh. ABD, Doktora Tezi.

Usta, O., Koksall, Ç. S., Aktas, B., Fitzsimmons, P., Atlar, M. & Korkut, E. (2017). An Experimental Study to Detect Cavitation Erosion for Different Coated Surfaces, The 5th International Conference on Advanced Model Measurement Technology for The Maritime Industry (AMT'17), Glasgow.

Vallier, A. (2013). Simulations of cavitation – from the large vapour structures to the small bubble dynamics, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering, Lund University, Sweden.

Vatankhah, C., Jafarholinejad, S. & Mozaffarinia, R. (2011). Experimental Investigation on Drag Reduction Performance of Two Kind of Polymeric Coatings with Rotating Disk Apparatus, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 5(4), pp. 143-148.

Wood, G. M., Kundsen, L. K. & Hammitt, F. G. (1967). Cavitation Damage Studies with Rotating Disk in Water, *Journal of Basic Engineering ASME*, Vol. 89, pp. 98–110. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3609577>

Yamaguchi, A. & Shimizu, S. (1987). Erosion due to impingement of cavitating jet, *Trans.A.S.M.E. J.Ruid Eng.* Vol.109 (4), pp.442.

Zhou, Y. K. & Hammitt, F. G. (1963). Cavitation erosion incubation period, *Wear*, Vol. 86 (2), pp. 299–313.