

POMPALARDA TİTREŞİM VE ZAMANA BAĞLI AKIŞTA OLUŞAN BASINÇ DALGALANMALARININ ETKİLERİ

Özgür CANBAZ

Makina Yüksek Mühendisi
Layne Bowler Pompa Sanayi A.Ş.
ozgurc@laynebowler.com.tr

Onur KONURALP

Makina Yüksek Mühendisi
Layne Bowler Pompa Sanayi A.Ş.
konuralp@laynebowler.com.tr

Ramazan ÖZCAN

Makina Mühendisi
Layne Bowler Pompa Sanayi A.Ş.
ramazano@laynebowler.com.tr

Prof. Dr. Kahraman ALBAYRAK
Makina Mühendisliği Bölümü, ODTÜ
albayrak@metu.edu.tr

ÖZET

Titreşim kaynaklı pompa arızalarının önceden tespiti için geliştirilmiş durum izleme ve kestirimci bakım yaklaşımları bakım ve onarım periyotları için kolaylık sağlayabilir ve işletmelerde arıza kaynaklı maliyetleri büyük ölçüde azaltabilir. Bu yaklaşımlar ile pompalarda oluşan titreşimin kaynağı hakkında yorumlar yapılabilmektedir. Balanssızlık, kaplin hizasızlıkları ya da rulman arızaları gibi mekanik sebeplerin yanında pompalarda akış kaynaklı titreşimler de oluşabilmektedir. Pompalarda ve su bastıkları hatlardaki basınç ölçümleri klasik tip basınç algılayıcıları ile yapılmaktadır. Bu tip cihazlar ile detaylı basınç değişiminin ölçümü yapılamaz. Basınç dalgalanmalarının örnekleme frekansı yüksek basınç algılayıcıları ile ölçülmesi gerekir. Akışkan kaynaklı titreşimler için basınç değerlerinin FFT (Fast Fourier Transform) algoritması ile spektrumunun çıkartılması ve baskın frekansların kanat geçiş frekansları ile ilgisi incelenmelidir. Bu çalışmada, pompalarda meydana gelen arızaların tespitinde titreşim analizinin kullanımı ve zamana bağlı akışta oluşan basınç dalgalanmalarının spektral incelenmeleri ile pompa yapısındaki titreşim spektrumu eş ilişkilerinin belirlenmesi hakkında genel bilgiler verilmiştir.

GİRİŞ

Rotodinamik pompalar bir tahrik motoru sayesinde sabit hızda dönen çarkların oluşturduğu açıl momentum farkı ile akışkanı basınçlandırmaktadırlar. Çark, difüzör ya da salyangoz ve pompa elemanlarının her birinin içerisinde dinamik olarak değişen bir basınç-hız ilişkisi vardır.

Bilindiği gibi dinamik olarak çalışan her makinada belirli oranlarda titreşim vardır. Pompalar ve çalıştıkları sistemler de

titreşimlere yoğun olarak maruz kalmaktadırlar. Her makinada olduğu gibi pompaların da güvenilir çalışabilmeleri için belirli titreşim standartları vardır ve maksimum değerleri geçmemesi beklenir.

Yüksek titreşimler, dinamik olarak pompalarda ve sistemlerde yüksek gerilme değişimlerine sebep olmaktadır. Hatalı montaj, hatalı üretimler ya da tasarım kaynaklı sebepler ile başlangıçta yüksek olan ya da zamanla artan titreşim seviyeleri pompalarda büyük arızalara sebep olabilmektedir. Titreşim analizi ile arızalar meydana gelmeden önce pompadaki yüksek titreşimin kaynağı hakkında yorumlar yapıp, gerekli bakım-onarım ya da iyileştirmelerden sonra pompa düzgün çalışır hale getirilebilmektedir.

Bu bildiriye yüksek titreşimlere sebep olabilecek mekanik etkiler hakkında genel bilgiler verilmiş ve titreşim analizinde hangi frekanslarda kendilerini gösterdiklerinden bahsedilmiştir.

Ayrıca pompa içerisindeki basınç dalgalanmalarının etkilerinin titreşim ile ilişkileri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Ülkemizde titreşim ve basınç dalgalanmaları üzerine yapılmış birçok çalışma mevcuttur.

İTÜ Makina Fakültesi'nde Karadoğan [1] tarafından yapılan bir çalışmada düşük özgül hızlı 5 adet yatay pompa incelenmiştir. Pompaların çıkışındaki basınç dalgalanmalarının örnekleme frekansı yüksek basınç algılayıcısı ile tespit edilmesi ve FFT algoritması ile spektrumlarının çıkartılması bakımından önemli bir çalışmadır. Baskın frekansların incelenmesi ile tasarım parametrelerinin titreşime etkisi ve boyutsuz parametrelerle karşılaştırılması yapılmıştır.

Tural [2] tarafından yapılan çalışmada ise pompalarda oluşan akış kaynaklı titreşimlerin sayısal olarak incelenmesi yapılmıştır. Zamana bağlı yapılan HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) çalışmaları ile çift emişli bir pompadaki basınç değişimleri bulunmuş ve FFT algoritması ile spektrumları çıkartılmıştır. HAD'dan alınan basınç bilgileri yapısal analiz kısmında kullanılmıştır. Pompanın modal analizleri yapılmış ve belirlenen doğal frekansların pompanın dönme frekansı ve kanat geçiş frekansları ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Çağlayan [3] tarafından yazılan bir makalede titreşim analizi ve arıza tanımları anlatılmıştır.

Akışkan kaynaklı titreşimler hakkında kapsamlı açıklamalar Gülich [4] tarafından yapılmıştır. Makalesinde çark çıkışındaki zamana bağlı akışın oluşumu ve fiziği hakkında önemli bilgiler mevcuttur. Çark çıkışındaki dinamik basınç değişiminin basınç dalgalanmaları ile ilgisi ve basınç dalgalanmalarını etkileyen parametreler anlatılmıştır.

SEMBOLLER

c_2 : Çark çıkışındaki mutlak hız (m/s)

u_2 : Çark çıkışındaki çevresel hız (m/s)

P_2 : Çark çıkışındaki statik basınç (Pa)

$P_{2,toplam}$: Çark çıkışındaki toplam basınç (Pa)

ρ : Özkütle (kg/m³)

n : Dönüş hızı (d/d)

f_n : Doğal frekans (Hz)

m : Kütle (m)

k : Yay sabiti

$Z_{çark}$: Çark kanat sayısı

RMS : Karekök ortalama

TİTREŞİM

İyi tasarlanmış pompalar çalıştıkları sistemlerin de uygun yapılması ile birlikte düşük titreşim seviyelerinde çalışırlar. Ancak tasarım kaynaklı ya da hatalı üretim, hatalı montaj sebepleriyle pompalar yüksek titreşimlere maruz kalabilirler. Başlangıçta belirli bir seviyedeki titreşim zamanla daha kötü hale gelebilmektedir. Aşırı titreşimde çalışan pompalar kopma, kırılma gibi durumlara sebep olarak pompanın çalışmamasına

sebepler olur. Pompalardaki titreşim davranışını takip etmek için durum izleme yöntemleri kullanılır. Burada temel mantık pompaların genellikle rulmanlarının çalıştığı bölgelerden titreşim değerlerini almak ve bu değerleri işleyerek, elde edilen sonuçları arıza varlığı ya da yokluğu açısından yorumlamaktır. Genel olarak makinalardaki titreşim seviyeleri için ISO 10816 standardı verilmiştir. Pompalar için ISO 9906 ve ANSI/HI 9.6.4 standartlarında titreşim limitleri ve ölçüm noktaları belirtilmiştir.

Titreşim analizi ile makinalarda durum izleme yapılırken zaman ortamı analizleri ya da frekans ortamı analizleri kullanılmaktadır.

- Zaman ortamı analizlerinde dalga formundaki genlik artışları izlenerek, shaft yörüngesindeki sapmalara bakılarak ya da istatistiksel göstergeler yardımı ile hata tespiti yapılır.
- Frekans ortamı analizlerinde Fourier dönüşümü yardımıyla frekans spektrumu içerisinde belirli frekansların olup olmadığı kontrol edilir. Her makina ve sistemde olduğu gibi pompalar için de bu frekansların neler olabileceği belirlenmiştir.

Titreşim deplasman, hız ve ivme birimlerinde tepeler arası değer, tepe değer ve RMS olarak incelenebilmektedir.

Deplasman : Zamana bağlı yer değiştirmeyi verir, genellikle mikron mertebesinde. Düşük frekanslı titreşimler için kullanılır.

Hız : Birim zamandaki yer değişim miktarı için kullanılır. Genellikle pompalarda hız ölçümü yapılır, birimi mm/s 'dir. 10 Hz ile 1000 Hz arasındaki titreşimlerde kullanılır.

İvme : Birim zamandaki hız değişimlerini verir. Yüksek frekanslı titreşimler için uygundur. m/s² birimindedir. Genellikle darbe kaynaklı titreşimlerin ölçümlerinde kullanılır.

Bu titreşim birimleri birbirlerine dönüştürülebilmektedirler.

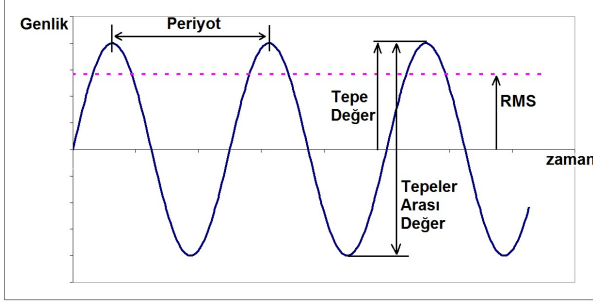
Titreşim ölçümü yapılırken dikey, yatay ve eksenel yönde ölçümler alınır. Bir titreşimi anlamlı hale getirip iyi ölçümler alabilmek için en iyi mekanik aktarım noktalarından ölçüm alınmalıdır. Pompalarda genellikle rulmanların bulunduğu göbeklerden ölçüm alınır.

Yukarıda bahsedilen ve standartlarda belirtilen titreşim limitlerini incelerken toplam değer ölçen titreşim cihazları kullanılabilir. Bunun yanında pompada ölçüm yapılan noktalara yine 4-20 mA çıkışlı titreşim algılayıcıları bağlanabilir.

Detaylı titreşim analizi yapabilmek ve arıza teşhisi için spektrum analizörleri kullanılır. Bu cihazlar ile alınan zaman

formundaki titreşim değerlerine otomatik olarak FFT analizi yapılır ve hangi frekansta ne kadar genlik olduğu ölçülür.

Saf sinüs sinyali incelendiğinde zamana bağlı titreşim genliği Şekil 1'deki gibi olmaktadır.

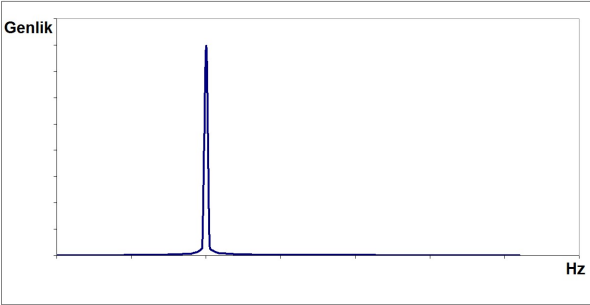


Şekil 1 - Sinüs sinyali

Bu sinyalin frekansı aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$Frekans, [Hz] = \frac{1}{Periyot, [s]}$$

Saf sinüs sinyaline FFT yapıldığı zaman tek bir frekansta tepe oluşur.



Şekil 2 - Sinüs sinyali spektrumu

Pompalarda titreşim sinüs sinyallerinden çok daha karmaşıktır. Karmaşık görünen spektrumdaki her tepe, ölçüm yapılan bölgede oluşan belirli frekanslardaki kuvvetlerin etkileri sonucu oluşur.

Rotodinamik pompalar belirli bir hızda dönmektedirler. Bu hız genellikle dakikadaki devir sayısı cinsinden verildiğine göre pompanın dönüş hızı frekans cinsinden şu şekilde ifade edilebilir.

$$Dönüş Frekansı, [Hz] = \frac{n[d/d]}{60} [1/s]$$

Pompa arızalarının tespiti için bu frekans değeri dikkate alınır ve çizilen spektrum grafiğinin alt eksenini dönüş frekansına göre normalize edilerek dönüş frekansı 1X olarak ifade edilir.

Buraya kadar anlatılan bilgiler ışığında pompalarda oluşabilecek titreşim kaynakları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Balanssızlık

Dönen pompa elemanlarının ağırlık merkezinin dönme ekseninde olmadığı durumlar balanssızlık kaynaklı titreşim problemlerine sebep olur. Balans bozukluğu kendini dönüş frekansı 1X'te gösterir.

Rulman Arızaları

Rulmanlar için geliştirilmiş bir hesap yöntemi ile hangi rulman tipinin hangi frekanslarda ne tip bir arıza verebileceği hesaplanabilmektedir. Ölçüm yapılan pompadaki titreşim spektrumunda belirlenmiş rulman arıza frekansları ile çakışma durumlarına bakılır ve titreşimin rulmanlardaki bir hasar kaynaklı olup olmadığı hakkında yorum yapılabilmektedir.

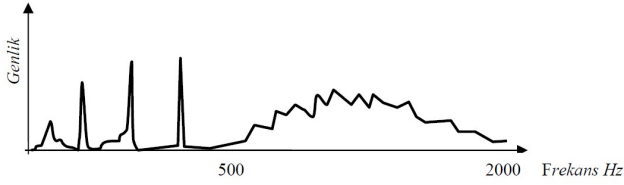
Kaplin Ayarsızlığı

Pompalarda miller üzerindeki hareketi aktaran kaplinler millerin eş eksenliliğini sağlamalıdır. Aksi durumda büyük titreşim sorunları meydana gelmektedir. Paralel ve açısız olarak kaplinlerin ayarları belirli tolerans aralığında yapılmalıdır. Açısız kaplin ayarsızlığı eksenel yönde yapılan ölçümde 1X frekansında, paralel kaplin ayarsızlığı yatay ve dikey yönde yapılan ölçümde 2X ve 3X frekansında görülür. 2X frekansındaki titreşimin 1X titreşim seviyesinden yüksek olması durumlarında kesin olarak kaplin ayarsızlığının varlığı söylenebilir. [3]

Akış Kaynaklı Titreşimler

Akış kaynaklı titreşimler, pompa içerisinde meydana gelen zamana bağlı değişen akış koşullarında oluşmaktadır. Kanat geçiş frekansı olarak tanımlanan çark kanat sayısının dönüş frekansı ile çarpımında oluşan frekansta tepe yaratarak kendini gösterir. Çark kanatlarının difüzör kanatları ya da salyangoz dili ile etkileşimi önemlidir. Pompa içerisindeki basınç dalgalanmaları titreşimin önemli kaynağıdır. Basınç dalgalanmaları ile ilgili detaylı bilgiler ilerleyen bölümlerde anlatılacaktır.

Kavitasyon durumu, bir başka akış kaynaklı titreşim kaynağıdır. Pompalarda kavitasyon belirtilerinin de titreşim analizi ile tespiti yapılabilir ve literatürde bu tür çalışmalara sıkça rastlanmaktadır. Kavitasyon titreşim spektrumunda geniş ve yüksek frekans bandında titreşim eşliğinin yükselmesine sebep olmaktadır.



Şekil 3 - Kavitasyonlu çalışan bir pompadaki spektrum, [3]

Doğal Frekans

Bütün makinalar kütle ve dirençlilik (k, yay katsayısı, stiffness) olarak iki parametre üzerinde incelenir. Kütle hareket etmek isteyen ya da dönen elemanı, dirençlilik ise hareketin sınırlarını temsil eder.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Doğal frekansın tanımına göre kütle arttıkça doğal frekans düşmekte, azaldıkça doğal frekans artmaktadır. Dirençlilik ise bunun tam tersi olup dirençlilik arttıkça doğal frekans artmakta, azaldıkça doğal frekans azalmaktadır.

Buradan hareketle bir pompanın tasarımında doğal frekans önemli yer tutmaktadır. Çalışan her sistemde olduğu gibi pompalarda da dönme frekansı ve yukarıda bahsedilen dönme frekansının katları ile ifade edilen hiçbir frekans doğal frekans değeri ile çakışmamalıdır. Eğer bu tip bir durum var ise pompa titreşimi tahmin edilemeyecek boyutlara yükselir ve engellenemez. Bu gibi durumlarda ya dönme frekansı değiştirilir ya da pompadaki kütle ve dirençlilik değerleri ile doğal frekans değiştirilmeye çalışılır.

Pompanın ve sistemin doğal frekansı sayısal olarak modal analiz yöntemleri ile tahmin edilebilir. Dönüş frekansı ve harmonikleri, kanat geçiş frekansı, hat frekansıyla çakışmayacak şekilde pompaların tasarımları yapılmalıdır. Genellikle bu frekansların artı-eksi belirli bir yüzdesel uzağında doğal frekans ya da kritik hız olmaması sağlanmalıdır.

BASINÇ DALGALANMALARINI

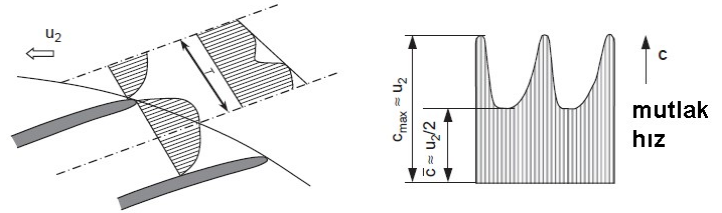
Pompa gövdesinden alınacak titreşim ölçümlerinden başka pompa içerisindeki basınç dalgalanmalarının ölçümü zamana bağlı oluşan hidrodinamik etkilerin frekansı ve yoğunluğu hakkında daha pratik ve kesin sonuçlar verebilmektedir.

Pompa çarkının çıkışındaki akış düzgün dağılımlı (üniform) değildir. Difüzör ve salyangoz girişleri zamana bağlı değişen akış ile karşı karşıyadırlar ve bu akış geriye doğru çark akışını etkilemektedir. Bu duruma "rotor-stator etkileşimi" denmektedir. Bu etkileşim sebebi ile hidrolik kuvvetler oluşmaktadır. Bu kuvvetler basınç dalgalanmalarının, mekanik titreşimlerin ve pompa parçalarında gerilmelerin artmasına sebep olmaktadır.

Basınç dalgalanmalarının seviyesi hakkında yorum yapabilmek için öncelikle zamana bağlı akışı anlamak gerekir.

Pompa içerisinde Zamana Bağlı Akış

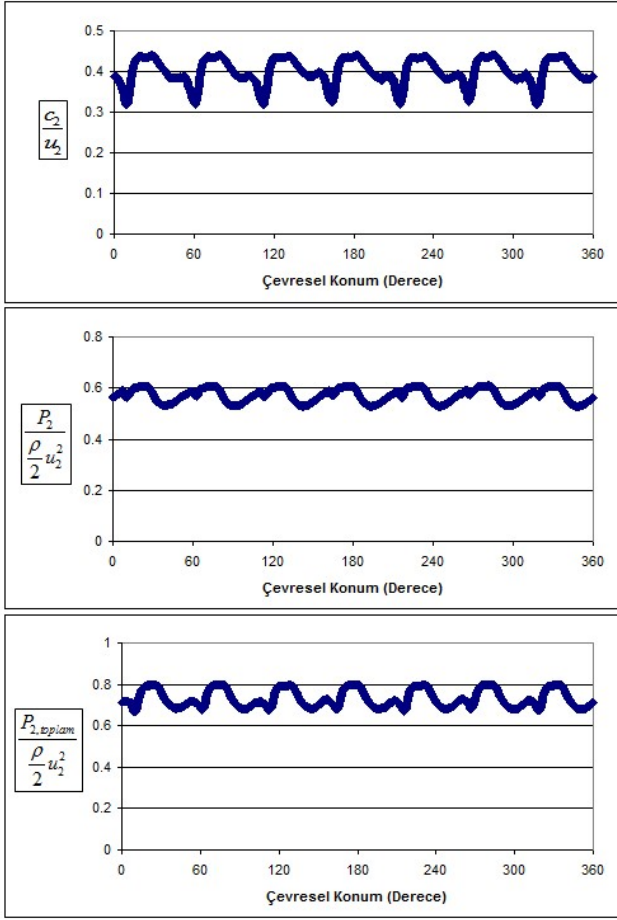
Kanat tarafından açısal momentumun arttırılması ve ikincil akışlar nedenleriyle çark çıkışındaki hız dağılımı çevresel olarak bakıldığında düzgün dağılımlı olmamaktadır. Bağlı hız bileşeni kanadın emme yüzeyinin yakınlarında maksimum olur. Bunun yanında kanat kalınlığı, sınır tabaka sebebi ile oluşan blokaj ve olası akış ayrılmaları yukarıda bahsedilen bağlı hız bileşenin düzgün dağılımlı olmamasına ayrıca sebep olarak hız profilini bozmaktadırlar.



Şekil 4 - Çark çıkışındaki hız profilleri (bir adım boyunca), [4]

Bağlı hızın minimum olduğu noktada mutlak hız maksimum olmaktadır. Kanat yüzeylerine yakın bölgelerden çıkan akışkan daha yüksek mutlak hıza sahiptir.

7 kanatlı bir pompa çarkının HAD analizi ile elde edilen bir turu boyunca mutlak hız, statik basınç ve toplam basınç değişimi Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5 - 7 kanatlı bir çarkın ardındaki mutlak hız, statik basınç ve toplam basınç değişimi

Görüldüğü gibi pompanın her kanadının ardında periyodik oluşan maksimum toplam basınç değeri vardır.

Çark çıkışında rotor-stator etkileşimi ile oluşan zamana bağlı hız değişimleri hızlı ölçüm yapan problar veya lazer hızölçerler ile ölçülebilmektedir.

Zamana bağlı akışta oluşan basınç dalgalanmaları genellikle piezoelektrik basınç sensörleri ile ölçülür. Zaman formundaki ölçüm noktaları Fourier dönüşümü ile frekans formuna dönüştürülür. Spektrum analizi yapılarak dönüş frekansında, kanat geçiş frekansında ve onların harmoniklerindeki değerlere bakılır.

Kanat geçiş frekansı,

$$z_{\text{çark}} \cdot \omega \text{ Dönüş Frekansı, [Hz]}$$

olarak tanımlanmaktadır.

Titreşim analizinde olduğu gibi basınç ölçümlerinin spektral olarak incelenmesinde tepeler arası, tepe değeri ve RMS olarak değerlendirilmeler yapılabilir.

Pompa en verimli noktada çalışırken önemli basınç dalgalanmaları beklenmemelidir. Kısmi yükteki akış ayrılmaları ve yoğun döngüsel akış pompanın debi basma yüksekliği eğrisinde kararsızlığa sebep olur ve basınç dalgalanmaları oluşturur. Basınç spektrumunda akış ile ilgili kanat geçiş frekansındaki tepeler kısmi yükte daha baskın şekilde görülebilir.

Yukarıda bahsedilen rotor-stator etkileşimleri ve kısmi yükte çalışma durumlarının yanında akış alanı içerisindeki simetrikliği bozan herhangi bir etki de çark ve difüzörde zamana bağlı değişen akış yaratır.

Basınç dalgalanmaları özetlenirse; kanat ardındaki akış, kısmi yükte çalışma durumu, geometrik bazı parametreler, sistemsal etkiler, çark tipi basınç dalgalanmalarının yoğunluğunu etkileyen parametrelerdir. [4]

Bunlar:

- Çark ardındaki akışı etkileyen parametreler
 - Kanat firar ucu kalınlığı ve yapısı
 - Kanat yüklenmesini etkileyen ve basınç-emiş kenarları arasındaki hız farkına sebep olacak detaylı akış pasajı geometrisi, kanat sayısı ve kanat giriş hız profili
 - Reynolds sayısı
- Kısmi yükte oluşan döngüsel akış (kararsızlık durumu)
 - Çark ve difüzör-salyangoz yapılarının tasarım parametreleri
 - Çarka giriş koşulları ve elemanları
- Geometrik bazı parametreler
 - Çark kanatları ile difüzör kanatları veya salyangoz dil arası mesafe
 - Çark ve difüzör kanat sayısı kombinasyonları
 - Ayarlanabilir kanatlı çarkların farklı konumları

- Çark içerisindeki akış hacimleri genellikle döküm gibi yöntemlerle üretildiği için birbiri ile eşit olmayan akış hacimleri
- Sistemsel etkiler
 - Hatlardaki boru sistemlerinin mekanik etkileri
 - Akışkan tipleri ve içerdiği gaz miktarları
 - Yetersiz daldırma derinliği yüzünden oluşabilecek vorteksler
 - Yetersiz ENPY (Emmedeki Net Pozitif Yük) ve kavitasyon
- Çark tipi
 - Basınç dalgalanmaları özgül hız arttıkça artmaktadır. (çark giriş-çıkış genişliklerinin artması)

SONUÇ

Pompalardaki titreşim kaynaklarının tespiti için geliştirilmiş yöntemler ve ölçüm metotları mevcuttur. Bu bildiride pompalarda titreşime sebep olabilecek mekanik etkiler ile akış kaynaklı etkilerin üzerinde durulmuştur. Titreşim analizi yardımıyla durum izleme ve kestirimci bakım amaçlanmakta olup titreşim kaynağı arıza meydana gelmeden bulunabilmektedir. Akışın titreşime etkisinin titreşim ölçümleri ile elde edilen spektrumda ayıklanması zor olabilmektedir. Tıpkı titreşim gibi basıncın da yüksek örnekleme frekanslı cihazlar yardımıyla ölçülüp spektrumları çıkartılabilir. Titreşim ve basınç spektrumlarının birlikte incelenmesi ile daha kesin sonuçlara gidilebilir. Bu şekilde hem Ar-Ge çalışmalarına katkı sağlanabilir hem de var olan bir titreşim problemi giderilebilir

KAYNAKLAR

1. K. Y. Ulaş, H. Karadoğan, H. N. Tural, “Merkezkaç Pompa Çıkışındaki Basınç Çalkantılarının Deneysel Olarak İncelenmesi”, 5. Pompa-Vana Kongresi
2. H. N. Tural, 2013 “Pompaların Dinamik Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ
3. Dr. İ. H. Çağlayan, “Değişik Tip Pompalarda Titreşim Ölçüm ve Analizi ile Arıza Tanımı”, Vibratex Teknik Bülten 25
4. J. F. Gulich, U. Bolleter, “Pressure Pulsations in Centrifugal Pumps”

5. Z. Kırıl, “Mekanik Titreşimler Ders Notları”, Makina Müh. Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi

ABSTRACT

Vibration-induced pump failures can be determined with condition monitoring and predictive maintenance approach which provide ease of maintenance and repair resulting reduction of operational costs greatly. With this approach the source of vibration in pumps can be determined. Besides mechanical problems such as unbalance, coupling misalignment or bearing failure, flow-induced vibration can occur in pumps. The pressure measurement of pumps and pipeline are done with classical pressure sensors. Detailed pressure fluctuations can not be captured by this type of sensors. Pressure fluctuations must be measured by high sampling frequency sensors. For flow-induced vibration, the pressure values are transformed to spectrums with using FFT (Fast Fourier Transform) algorithm and the relationship between dominant frequency and blade passing frequency should be studied. In this paper, the basic information are given for vibration analysis for detection of source of vibration in pumps and the relationship between spectral examination of pressure fluctuations at the unsteady flow and the vibration spectrum at the pump structure.