

ISSN: 1012 - 0726 (Baskı)
ISSN: 1308 - 2477 (Online)



SAYI: 126
YIL : EKİM 2017

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

Sahibi

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
Adına Genel Müdür
Murat ACU

Sorumlu Müdür

Turkay ÖZGÜR

Yayın Kurulu (DSİ)

Murat Ali HATİPOĞLU
Mehmet ALP
Dinçer AYDOĞAN
Oğuzhan BEKTAŞ
Şenay ÖZKAN
Harun MEYDAN
Ali Alper ÇETİN
Vehbi ÖZAYDIN
Erkan EMİNOĞLU
Bekir YAPAN
Hasan ÇAKIRYILMAZ
Mehmet KÖSEOĞLU
Tuncer DİNÇERGÖK

Editörler

Figen ÖZYURT KUŞ
Özgür KÜÇÜKALİ

Haberleşme Adresi

DSİ Teknik Araştırma ve
Kalite Kontrol (TAKK)
Dairesi Başkanlığı 06100
Yüce-tepe - Ankara

Tel (312) 454 38 00
Faks (312) 399 27 95
bulten@dsi.gov.tr

Basıldığı Yer

Destek Hizmetleri Dairesi
Başkanlığı
Basım ve Foto-Film Şube
Müdürlüğü
Etilik - Ankara

SAYI : 126

YIL : EKİM 2017

Yayın Türü

Yaygın süreli yayın
Üç ayda bir yayınlanır
(Ocak, Nisan, Temmuz,
Ekim)

ISSN 1012 - 0726 (Baskı)
1308 - 2477 (Online)

İÇİNDEKİLER

KEMER BARAJLARIN YAPISAL DAVRANIŞLARINI BELİRLEMEK AMACIYLA GELİŞTİRİLEN MÜHENDİSLİK YAZILIMI Ahmet Can ALTUNIŞIK, Ebru KALKAN, Hasan Basri BAŞAĞA	1
HİDROLİK JENERATÖR SİSTEMİNDE OLUŞAN ARIZALAR VE İZLEME TEKNİKLERİ Hakan SOLAK	22

DSİ Teknik Bülteni uluslararası veritabanı EBSCO tarafından taranmaktadır.

DSI TECHNICAL BULLETIN

Publisher

On behalf of GENERAL
DIRECTORATE OF
STATE HYDRAULIC
WORKS
Murat ACU
General Director

Director in charge

Turkay ÖZGÜR

Editorial Board (DSI)

Murat Ali HATİPOĞLU
Mehmet ALP
Diñer AYDOĞAN
Oğuzhan BEKTAŞ
Şenay ÖZKAN
Harun MEYDAN
Ali Alper ÇETİN
Vehbi ÖZAYDIN
Erkan EMİNOĞLU
Bekir YAPAN
Hasan ÇAKIRYILMAZ
Mehmet KÖSEOĞLU
Tuncer DİNÇERGÖK

Editors

Figen ÖZYURT KUŞ
Özgür KÜÇÜKALİ

Contact Address

DSİ Teknik Araştırma ve
Kalite Kontrol (TAKK)
Dairesi Başkanlığı 06100
Yücetepe – Ankara /
TURKEY

Tel (312) 454 38 00
Faks (312) 399 27 95
bulten@dsi.gov.tr

Place of Publication

Destek Hizmetleri Dairesi
Başkanlığı
Basım ve Foto-Film Şube
Müdürlüğü
Etilik – Ankara / TURKEY

ISSUE: 126

YEAR : OCTOBER 2017

Publication Type

Widely distributed
periodical
Published quarterly
(January, April, July,
October)

ISSN

1012 - 0726 (Press)
1308 - 2477 (Online)

CONTENTS

DEVELOPMENT OF ENGINEERING SOFTWARE TO DETERMINE THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF ARCH DAMS Ahmet Can ALTUNIŞIK, Ebru KALKAN, Hasan Basri BAŞAĞA	1
FAILURES AND MONITORING TECHNIQUES IN HYDRAULIC GENERATOR SYSTEM Hakan SOLAK	22

DSI Technical Bulletin is indexed by international database EBSCO.

DSİ TEKNİK BÜLTENİ'NİN AMACI

DSİ Teknik Bülteni'nde, su ile ilgili konularda, temel ve uygulamalı mühendislik alanlarında gönderilen bildirimler yayınlanır. Bildirimler, ilk önce konunun uzmanı tarafından incelenir ve değerlendirilir. Daha sonra, Hakem Kurulu uzman görüşünü de esas alarak bildirim yayınlanıp yayınlanmamasına karar verir. Bildirimlerin tamamı veya büyük bir kısmı diğer yayın organlarında yayınlanmamış olması gereklidir. DSİ Teknik Bülteni Eylül 2016 tarihi itibarı ile uluslararası veritabanı kuruluşu EBSCO tarafından taranmaya başlamıştır.

DSİ TEKNİK BÜLTENİ BİLDİRİ YAZIM KURALLARI

1. Gönderilen yazılar kolay anlaşılır dilde ve Türkçe kurallarına uygun şekilde yazılmış olmalıdır.
2. Yazıların teknik sorumluluğu yazarına aittir (yazılardaki verilerin kullanılması sonucu oluşabilecek maddi ve manevi problemlerde muhatap yazardır).
3. Yayın Kurulu, bildirim üzerinde gerekli gördüğü düzeltme ve kısaltmaları yapar.
4. Bildirimler bilgisayarda Microsoft Word olarak bir satır aralıkla yazılmalı ve Arial 10 fontu kullanılmalıdır. Bildirimler A4 normundaki kâğıdın her kenarından 25 mm boşluk bırakılarak yazılmalıdır.
5. Sadece ilk sayfada, yazı alanı başlangıcından sola dayalı olarak, italik 10 fontunda Arial kullanılarak ilk satıra "*DSİ Teknik Bülteni*" yazılmalıdır.
6. Konu başlığı: Yazı alanı ortalanarak, "*DSİ Teknik Bülteni*" yazısından sonra dört satır boş bırakıldıktan sonra Arial 12 fontu kullanılarak büyük harflerle koyu yazılmalıdır.
7. Yazar ile ilgili bilgiler: Adı (küçük harf), soyadı (büyük harf), yazarın unvanı ile bağlı olduğu kuruluş (alt satıra) ve elektronik posta adresi (alt satıra) başlıktan iki boş satır sonra ilk yazardan başlamak üzere Arial 10 fontu ile yazı alanı ortalanarak yazılmalıdır. Diğer yazarlar da ilk yazar gibi bilgileri bir boşluk bırakıldıktan sonra yazılmalıdır.
8. Türkçe özet, elektronik posta adresinden dört boş satır sonra, özetten bir boş satır sonra ise anahtar kelimeler verilmelidir. Aynı şekilde, Türkçe anahtar kelimelerden iki boş satır sonra İngilizce özet, bir boş satır sonra ise İngilizce anahtar kelimeler verilmelidir.
9. Bölüm başlıkları yazı alanı sol kenarına dayandırılarak Arial 10 fontu kullanılarak koyu ve büyük harfle yazılmalı. Bölüm başlığının üzerinde bir boş satır bulunmalıdır.
10. Ara başlıklar satır başında başlamalı, üstlerinde bir boş satır bulunmalıdır. Birinci derecedeki ara başlıktaki bütün kelimelerin sadece ilk harfi büyük olmalı ve koyu harflerle Arial 10 fontunda yazılmalıdır. İkinci ve daha alt başlıklar normal harflerle Arial 10 fontu ile koyu yazılmalıdır.
11. Yazılar kâğıda iki sütun olarak yazılmalı ve sütun aralarındaki boşluk 10 mm olmalıdır.
12. Paragraf sola dayalı olarak başlamalı ve paragraflar arasında bir boş satır bırakılmalıdır.
13. Eşitlikler bilgisayarda yazılmalı ve numaralandırılmalıdır. Eşitlik numaraları sayfanın sağına oturmali ve parantez içinde yazılmalıdır. Her eşitlik alttaki ve üstteki yazılardan bir boş satır ile ayrılmalıdır. Eşitliklerde kullanılan bütün semboller eşitlikten hemen sonraki metinde tanımlanmalıdır.
14. Sayısal örnekler verildiği durumlarda SI veya Metrik sistem kullanılmalıdır. Rakamların ondalık kısımları virgül ile ayrılmalıdır.
15. Yararlanılan kaynaklar metinde kaynağın kullanıldığı yerde köşeli parantez içerisinde numaralı veya [Yazarın soyadı, basım yılı] olarak belirtilmelidir. Örneğin: "..... basamaklı dolusavaklar için geometri ve eşitlikler [1]" veya "..... basamaklı dolusavaklar için geometri ve eşitlikler [Aktan, 1999]" gibi.
16. Kaynaklar yazar soyadlarına göre sıralanmalı, listelenirken yazar (veya yazarların) soyadı, adının baş harfi, yayın yılı, kaynağın ismi, yayınlandığı yer ve yararlanılan sayfa numaraları belirtilerek, köşeli parantez içerisinde numaralandırılmalı ve yazarken soldan itibaren 0,75 cm asılı paragraf şeklinde yazılmalıdır. Makale başlıkları çift tırnak içine alınmalı, kitap isimlerinin altı çizilmelidir. Bütün kaynaklara metin içinde atıf yapılmalıdır.
17. Çizelgeler, şekiller, grafikler ve resimler yazı içerisine en uygun yere gelecek şekilde yerleştirilmelidir. Fotoğraflar net çekilmiş olmalıdır. Şekil ve grafikler üzerine el yazısı ile ekleme yapılmamalıdır.
18. Bildirim tamami 20 sayfayı geçmemeli, şekil, çizelge, grafik ve fotoğraflar yazının 1/3'ünden az olmalıdır.
19. Sayfa numarası, sayfaların karışmaması için sayfa arkalarına kurşun kalem ile hafifçe verilmelidir.
20. Yazım kurallarına uygun olarak basılmış bildirim tam metni hem A4 kâğıda baskı şeklinde (2 adet) hem de dijital ortamda (CD veya DVD) yazışma adresine gönderilmelidir.
21. Yayınlanan bütün yazılar için "Kamu Kurum ve Kuruluşlarınınca ödenecek telif ve işleme ücretleri hakkındaki yönetmelik" hükümleri uygulanır.
22. Bildiriyi gönderen yazarlar yukarıda belirtilenleri kabul etmiş sayılırlar.
23. Yazışma adresi aşağıda verilmiştir:

Yasal Uyarı

Bu Teknik Bülten yalnızca genel bilgilendirme amacıyla yayımlanmaktadır ve içeriğinde yer alan malzemelerin, prosedürlerin veya yöntemlerin tek mevcut ve uygun malzeme, prosedür veya yöntem olduğunu ima etmemektedir. Malzemeler, prosedürler veya yöntemler özel koşullara, yerel imar kanunlarına, tasarım şartlarına veya tüzel ve yasal şartlara göre değişebilir. Bu Teknik Bülten'deki bilgilerin doğru ve güvenilir olduğuna inanılmakla beraber, yayımlayıcı olarak Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü bu Teknik Bülten'in içeriğinde bulunan yöntemlerin, malzemelerin, talimatların veya fikirlerin herhangi bir şekilde kullanılması kaynaklı mal veya can kaybından veya oluşabilecek zararlardan sorumlu değildir.

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı

06100 Yüce-tepe ANKARA

Tel (312) 454 3800

Faks (312) 399 2795

E-posta bulten@dsi.gov.tr

Web <http://www.dsi.gov.tr/yayinlarimiz/dsi-teknik-bultenleri>

KEMER BARAJLARIN YAPISAL DAVRANIŞLARINI BELİRLEMEK AMACIYLA GELİŞTİRİLEN MÜHENDİSLİK YAZILIMI

Ahmet Can ALTUNIŞIK
Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon, Türkiye
ahmetcan@ktu.edu.tr

Ebru KALKAN
Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon, Türkiye
ebrukalkan@ktu.edu.tr

Hasan Basri BAŞAĞA
Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon, Türkiye
hasanbb@ktu.edu.tr

(Makalenin geliş tarihi: 15.03.2017, Makalenin kabul tarihi: 24.10.2017)

ÖZ

Barajlar, üstlendikleri görevler, inşa aşamalarındaki zorluklar ve yüksek maliyet gibi nedenler dikkate alındığında, İnşaat Mühendisliğinin en önemli yapı elemanları ve çalışma alanları arasında yer almaktadır. Bu derece önemli olan ve yıkılıp/hasar gördüklerinde maddi ve manevi büyük zarar oluşturabilecek yapıların, yapısal davranışlarının tasarım ve projelendirme aşamasında çok hassas/detaylı bir şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir. Uzman mühendisler tarafından gerçekleştirilen analizler ise; modelleme, analiz ve yorumlama kısımlarının zor ve uğraştırıcı olmasından dolayı da oldukça fazla zaman almaktadır. Yapılan bu çalışma kapsamında, yukarıda açıklanmaya çalışılan nedenlerden dolayı oldukça fazla zaman alan baraj analizlerini kolaylaştırmak ve yapısal davranış hakkında hızlı bir bilgi sahibi olmak amacıyla genel bir mühendislik yazılımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım kapsamında, tek eğrilikli kemer barajlar için yapı-zemin etkileşimi de dikkate alınarak modal analiz, statik analiz ve dinamik analiz sonuçları elde edilebilmektedir. Başlangıç modeli olarak, 1968 yılında "Kemer Barajlar Sempozyumu"nda sunulan ve beş tip kemer barajdan birisi olan tek eğrilikli Tip-1 kemer barajı seçilmiştir. Laboratuvar ortamında belirli ölçekte inşa edilmiş ve çevresel titreşim testleriyle doğruluğu ortaya konulmuş referans Tip-1 kemer barajının, ANSYS programıyla oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinden farklı ölçekler dikkate alınarak (1, 10, 20, 30, ..., 500) detaylı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Analizlerde değişken parametre olarak, baraj yüksekliği, malzeme özelliği, kütle, zemin sınıfı, taşıyıcı sistem davranış katsayısı, etkin yer ivme katsayısı, yapı-zemin etkileşimi vb. parametreler dikkate alınmış olup, analizler sonucunda elde edilen statik ve modal analiz sonuçları (frekans, periyot, yer değiştirme, gerilme ve şekil değiştirme) alan denklemleriyle, dinamik analiz sonuçları ise (yer değiştirme, gerilme ve şekil değiştirme) regresyon analizleri sonucunda edilen en uygun denklemlerle ifade edilmiştir. Elde edilen çok fazla sayıdaki formül, denklem ve sonuçların bir araya getirilmesi, belirtilen her bir belirsiz parametreye bağlı yapısal davranıştaki değişimlerin belirlenebilmesi, sonuçlara ait grafiklendirmelerin yapılabilmesi ve bu işlemlerin otomatik olarak sunulması amacıyla EXCEL programı kullanılarak bir yazılım geliştirilmiştir. Yazılımın doğruluğunu kanıtlamak amacıyla, rastgele seçilen parametreler dikkate alınarak gerçekleştirilen sonlu eleman analiz sonuçlarının, hazırlanan yazılım kullanılarak elde edilen sonuçlar ile oldukça yakın olduğu görülmüş olup, bu durumun hazırlanan yazılımın doğruluğu ve/veya kullanılabilirliğini ortaya koyduğu düşünülmektedir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında, farklı tip kemer barajlar için yapı-sıvı-zemin etkileşimi de dikkate alınarak yazılımın genişletilmesi amaçlanmaktadır. Hazırlanacak yazılımın, ilgili kurum ve kuruluşlarda görev yapan mühendisler için, barajların yapısal davranışlarının hızlı bir şekilde belirlenmesi ve değerlendirilmesinde

oldukça faydalı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, yazılımın tasarım aşamasında görev yapan firma ve/veya mühendisler için de bir kontrol mekanizması olması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Alan Denklemleri, Çevresel Titreşim Testi, Kemer Baraj, Mühendislik Yazılımı, Regresyon Analizi, Yapısal Davranış

DEVELOPMENT OF ENGINEERING SOFTWARE TO DETERMINE THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF ARCH DAMS

ABSTRACT

The dams are among the most important building elements and fields of study of Civil Engineering when considering the reasons such as the duties they undertake, the difficulties in construction stages and high cost. It is important that structures that are so important and can cause great pecuniary loss and intangible damages when they are destroyed and damaged are determined very precisely and detailed at the design and project stage of their structural behavior. Analyzes carried out by expert engineers are also taking considerable time due to the difficult and challenging of parts of modeling, analysis and interpretation. In the scope of this study, general engineering software has been developed in order to facilitate the analysis of the dam which takes considerable time due to the reasons explained above and to have a quick knowledge about the structural behavior. Modal analysis, static analysis and dynamic analysis results can be obtained by considering the structure-ground interaction for single curved arch dams within the scope of the developed software. As the initial model, a single curved Type-1 arch dam selected that is one of five types of arch dam, presented in the "Arch Dams Symposium" in 1968. Detailed studies have been carried out on the reference type 1-arch dam, built on a certain scale in the laboratory environment and verified by environmental vibration tests, taking into account the different scales (1, 10, 20, 30, ..., 500) through the finite element model created by the ANSYS program. In the analyses, dam height, material property, mass, soil class, seismic load reduction factor, effective ground acceleration coefficient, structure-ground interaction etc. are used as variable parameters. In the end of analyses, static and modal analysis results (frequency, period, displacement, strain and deformation) with the most appropriate equations obtained by the regression analysis, dynamic analysis results (displacement, stress and deformation) are expressed by the equations of field. Software has been developed using the EXCEL program in order to combine the large number of formulas, equations and results obtained, to determine the changes in the structural behavior depending on each of the specified indeterminate parameters, to make graphs of the results, and to automatically present these operations. In order to prove the correctness of the software, it is seen that the results of the finite element analyses performed considering randomly selected parameters are very close to the results obtained by using the prepared software and it is considered that this situation shows the correctness and/or usability of the prepared software. It is aimed to extend the software by taking into consideration the structure-liquid-soil interaction for different types of arch dams at later stages of the study. It is thought that the software to be prepared will be very useful for the engineers working in related institutions and organizations to quickly determine and evaluate the structural behavior of the dams. It is also aimed to software have a control mechanism for the firms and/or engineers working in the design phase.

Keywords: Arch Dam, Engineering Software, Environmental Vibration Test, Equations of Field, Regression analysis, Structural behaviors

1 GİRİŞ

Barajlar, yüzyıllardır sulama, su biriktirme, enerji üretme gibi farklı amaçlar için kullanılmakta olup, yerleşim bölgesi, tutacağı su kapasitesi, yüksekliği, depremsellik ve zemin türü gibi parametrelere bağlı olarak farklı geometrik özelliklerde inşa edilmektedirler. Büyük hacimli ve yapısal anlamda çok önemli mühendislik

yapıları arasında yer alan barajların, geometrik özelliklerine bağlı olarak modellenmesinin zor ve zaman alıcı oluşu, lineer ve lineer olmayan statik ve dinamik analizlerinin uzun sürmesi, tasarım ve projelendirme aşamasında karşılaşılan zorlukların başında gelmektedir. Bu çalışma kapsamında, oldukça fazla zaman alan baraj analizlerini kolaylaştırmak ve yapısal davranış

hakkında hızlı ve detaylı bir bilgi sahibi olmak amacıyla genel bir mühendislik yazılımının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Geliştirilen yazılım kapsamında, tek eğrilikli kemer barajlar için yapı-zemin etkileşimi de dikkate alınarak modal analiz, statik analiz ve dinamik analiz sonuçları elde edilebilmektedir. Başlangıç modeli olarak, 1968 yılında “*Kemer Barajlar Sempozyumu*”nda sunulan ve beş tip kemer barajdan birisi olan tek eğrilikli Tip-1 kemer barajı seçilmiştir [1]. Laboratuvar ortamında belirli ölçekte inşa edilmiş ve çevresel titreşim testleriyle doğruluğu ortaya konulmuş referans Tip-1 kemer barajının, ANSYS programıyla oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinden farklı ölçekler dikkate alınarak detaylı çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Literatür kapsamında, barajların yapısal davranışlarının laboratuvar ortamında belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen birçok çalışma mevcuttur [2-9]. Ayrıca, benzer çalışmalar farklı tür mühendislik yapıları içinde gerçekleştirilmiştir [10-14].

Hazırlanan mühendislik yazılımı kapsamında, analizlerde değişken parametre olarak, baraj yüksekliği, malzeme özelliği, kütle, zemin sınıfı, taşıyıcı sistem davranış katsayısı, etkin yer ivme katsayısı, yapı-zemin etkileşimi vb. parametreler dikkate alınmış olup, analizler sonucunda elde edilen statik ve modal analiz sonuçları alan denklemleriyle, dinamik analiz sonuçları ise regresyon analizleri sonucunda edilen en uygun denklemlerle ifade edilmiştir.

Benzerlik yasası ve boyut analizi, prototip ve ölçekli model arasında ilişkinin ifade edilmesinde önemli rol oynamaktadır [15-19]. Regresyon analizi de özellikle istatistik biliminde bu amaç

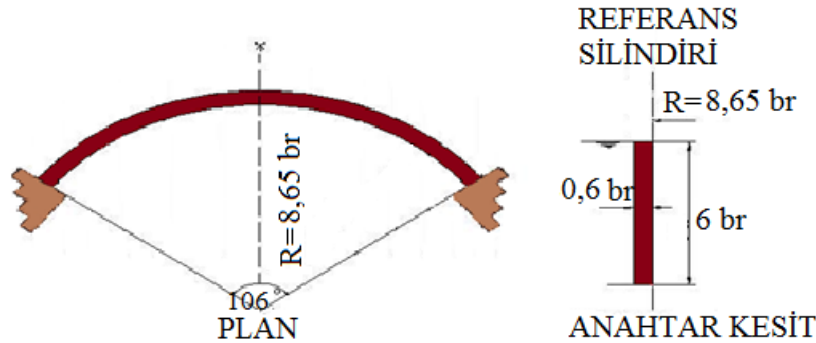
doğrultusunda yaygın olarak kullanılmaktadır [20-24]. Ayrıca, elde edilen verilerin görselleştirilmesi ve kullanım kolaylığının sağlanması amacıyla da yazılım geliştirilmesi üzerinde önemli çalışmalar devam etmektedir [25-34].

Programın doğruluğunu kanıtlamak amacıyla, rastgele seçilen parametreler dikkate alınarak gerçekleştirilen sonlu eleman analiz sonuçlarının, hazırlanan yazılım kullanılarak elde edilen sonuçlar ile oldukça yakın olduğu görülmüş olup, bu durumun hazırlanan programın doğruluğu ve/veya kullanılabilirliğini ortaya koyduğu düşünülmektedir.

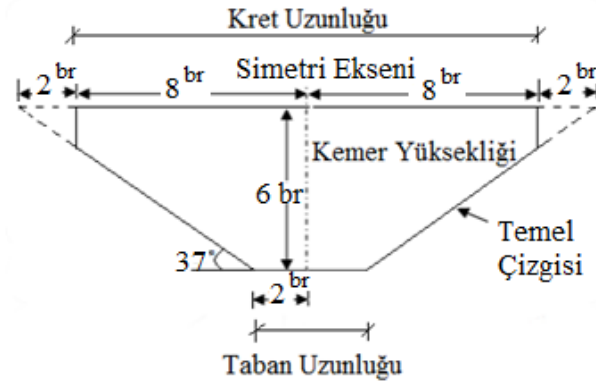
2 TEK EĞRİLİKLİ KEMER BARAJ MODELİ

1968 yılında İngiltere’de düzenlenen “Arch Dams” [1] sempozyumunda önerilen farklı geometrilere sahip beş tip kemer baraj bulunmaktadır. Laboratuvar ortamında küçük ölçekli kemer baraj modellemek amacıyla önerilen beş tip barajdan Tip-1 kemer barajı seçilmiştir. Tip-1 kemer barajı, sabit yarıçaplı, sabit açılı ve tek eğrilikli bir geometriye sahiptir.

Tip-1 kemer barajının plan ve anahtar kesit görünüşüne ait geometrik özellikleri Şekil 1’de verilmektedir, 106°’lik sabit merkez açısına ve 8,65 birimlik sabit yarıçapa sahip Tip-1 kemer barajı, mansap yüzü referans kabul edilen simetrik bir barajdır. Tip-1 kemer barajının, yüksekliği 6 birim, kret ve taban genişliği 0,6 birimdir. En kesiti Şekil 2’de verilen trapez kesitli bir vadi üzerine yerleştirildiği kabul edilmiştir [1]. Tip-1 kemer barajının yerleştirildiği vadi, kret seviyesinde 16 birim, taban seviyesinde ise 4 birim genişliğe sahiptir.



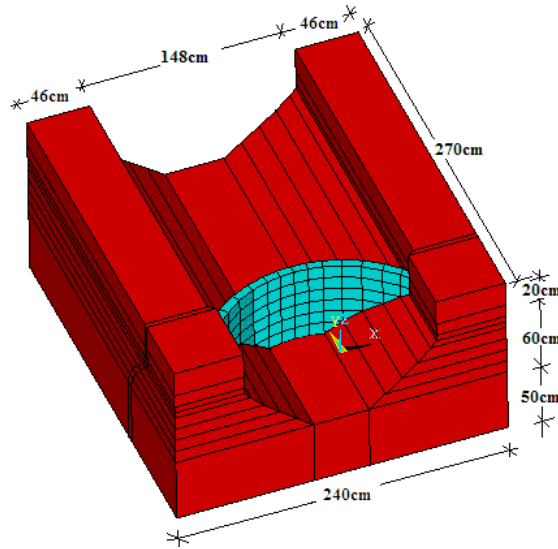
Şekil 1 - Tip-1 kemer barajının geometrik özellikleri [1]



Şekil 2 - Tip-1 kemer barajının yerleştirildiği vadinin en kesiti [1]

Boyutları birim olarak verilen Tip-1 kemer barajında, 1 birim=10 cm olarak seçilerek laboratuvar modeli oluşturulmuştur. Elde edilen verilere göre, baraj yüksekliği (H) 60 cm, kret ve taban genişliği 6 cm olarak belirlenmiş olup, kret uzunluğu, memba kısmında **171,13** cm ve mansap kısmında **160,03** cm olarak hesaplanmıştır. Sevim [3] tarafından yapılan doktora tezi kapsamındaki çalışmalarda, Tip-1

kemer barajının dinamik davranışının gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi için baraj modeli, temel ve rezervuar içerecek şekilde oluşturulmuştur. Bu özelliklere göre hazırlanan Tip-1 kemer barajına ait üç boyutlu yapı-zemin etkileşimli model ve bu modelin sahip olduğu boyutlar Şekil 3'te verilmektedir [3]. Tip-1 kemer barajının laboratuvar modeline ait bazı fotoğraflar ise Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 3 - Tip-1 kemer barajının üç boyutlu yapı-sıvı-zemin modeli [3]



Şekil 4 - Tip-1 kemer barajının laboratuvar modeline ait bazı fotoğraflar [3]

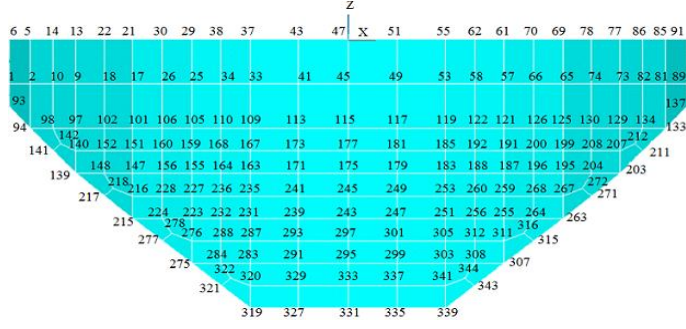
3 ÇEVRESEL TİTREŞİM TESTLERİ

Sevim [3] tarafından hazırlanmış doktora tezi kapsamında, laboratuvar ortamında modellenen Tip-1 kemer barajı üzerinde, baraj rezervuarının boş ve dolu olması durumları için yapılan çalışmalarda dinamik karakteristikler çevresel titreşim yöntemi ve zorlanmış titreşim yöntemleri ile birlikte elde edilmiştir. Tip-1 kemer barajının inşasında kullanılan betona ait malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla tek eksenli basınç deneyleri ve ultrasonik hız testleri yapılmış olup, betonun birim kütle yoğunluğu (γ_{beton}) ve Poisson oranı (μ) sırasıyla yaklaşık olarak 2300kg/m^3 ve 0,2 şeklinde elde edilmiştir. Yapılan testlerde betonun Elastisite Modülü $13000\text{-}30000\text{MPa}$ arasında olduğu tespit edilmiş olup, bu konu hakkında net bir bilginin olmadığı değerlendirilmesi de yapılmıştır. Elastisite Modülünü belirlemek amacıyla oluşturulan sonlu eleman modelinde, Elastisite Modülleri değişken olarak seçilmiş olup, deneysel frekanslara en yakın analitik frekansları elde edecek şekilde kemer ve temel betonunun Elastisite Modülleri sırasıyla 15500MPa ve 20000MPa olarak tespit edilmiştir.

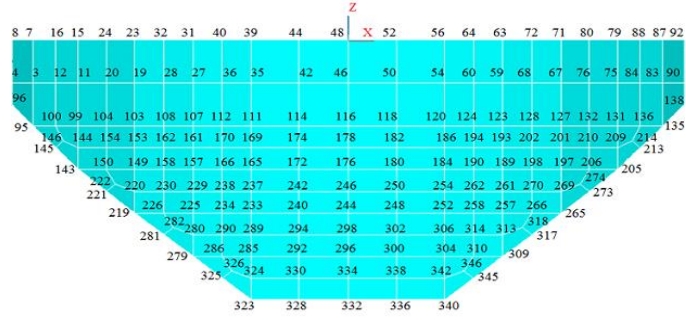
Barajın analizlerinde kullanılacak olan sonlu eleman modeline karar vermek amacıyla sonlu

eleman ağı seçimi de yapılmıştır. Bu amaçla, kemer barajın altı farklı sonlu eleman ağı içerecek şekilde modelleri oluşturulup, modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen frekans ve periyotlar her bir model için birbiriyle karşılaştırılarak uygun olan sonlu eleman ağına karar verilmiştir. Tip-1 kemer barajının sonlu eleman modeli ANSYS [35] yazılımı kullanılarak oluşturulmuş olup, barajın kemer ve temel kısmı SOLID45 eleman tipi kullanılarak tanımlanmıştır. Seçilen sonlu eleman ağına bağlı olarak kemer gövdesi üzerinde, memba ve mansap yüzeylerinde toplam 346 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Şekil 5'te, kemere ait memba ve mansap yüzeylerinin düğüm noktaları numaraları verilmektedir.

Laboratuvar modeli üzerinde Çevresel ve Zorlanmış Titreşim Yöntemlerine göre deneysel modal analiz ölçümleri gerçekleştirilmiş olup, Sevim [3] tarafından yapılan doktora tezi kapsamında detaylı bir şekilde sunulan deneysel ve analitik dinamik karakteristikler Çizelge 1'de özetlenmektedir.



a) Memba yüzeyi



b) Mansap yüzeyi

Şekil 5 - Kemere ait memba ve mansap yüzeylerindeki düğüm noktası numaraları

Çizelge 1 - Tip-1 kemer baraja ait frekans değerleri

Mod	Frekans Değerleri (Hz)		
	Sonlu Eleman Yöntemi	Çevresel Titreşim Yöntemi	Zorlanmış Titreşim Yöntemi
1	348,87	339,20	340,00
2	364,81	372,60	372,00
3	510,22	552,30	552,00
4	658,45	619,80	616,00
5	680,42	-----	-----
6	701,66	-----	-----
7	740,70	741,10	740,00
8	793,32	-----	-----
9	836,73	839,00	828,00

4 SONLU ELEMAN MODEL ANALİZLERİ

Sevim [3] tarafından hazırlanan doktora tezi kapsamında, Tip-1 kemer baraja ait sonlu eleman modeli, barajların dinamik karakteristiklerini ve yapısal özelliklerini belirlemeye yönelik yazılımın geliştirilmesi amacıyla bu çalışma kapsamında referans olarak kullanılmıştır.

4.1 Modal Analizler

Laboratuvar modeline ait ve deneysel olarak doğruluğu teyit edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde detaylı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapı-sıvı-zemin ilişkili Tip-1 kemer barajının, temel etkileşimi olmadan yalnızca ankastre mesnetli olma durumu da ayrıca incelenmiştir. Tip-1 kemer barajının, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak ve ankastre mesnetli durumları

için oluşturulan sonlu eleman modellerinin rezervuarın boş olma durumuna göre gerçekleştirilen modal analizleri sonucunda elde edilen ilk on frekans ve periyot değerleri ile mod

şekilleri Çizelge 2 ve 3'te detaylı olarak sunulmaktadır. Analizlerde, deneysel ölçüm sonuçlarına göre iyileştirilen malzeme özellikleri dikkate alınmıştır.

Çizelge 2 – Yapı-sıvı-zemin etkileşimli Tip-1 kemer barajına ait dinamik karakteristikler

Mod	Modal Analiz Sonuçları		
	Frekans (Hz)	Periyot (sn)	Mod Şekli
1	344,58706	0,002020	Anti-Simetrik Eğilme
2	361,20676	0,002768	Simetrik Eğilme
3	505,56430	0,001978	Simetrik Eğilme
4	652,08387	0,001534	Anti-Simetrik Eğilme
5	674,36188	0,001483	Düşey Eğilme
6	860,11709	0,001163	Düşey Eğilme
7	890,79624	0,001125	Simetrik Eğilme
8	917,23440	0,001090	Düşey Eğilme
9	954,16860	0,001048	Simetrik Eğilme
10	958,79734	0,001043	Simetrik Eğilme

Çizelge 3 – Ankastre mesnetli Tip-1 kemer barajına ait dinamik karakteristikler

Mod	Modal Analiz Sonuçları		
	Frekans (Hz)	Periyot (sn)	Mod Şekli
1	362,74	0,0028161	Anti-Simetrik Eğilme
2	376,40	0,0027139	Simetrik Eğilme
3	525,12	0,0019453	Simetrik Eğilme
4	679,00	0,0015044	Anti-Simetrik Eğilme
5	698,13	0,0014632	Düşey Eğilme
6	904,96	0,0011288	Düşey Eğilme
7	923,45	0,0011062	Simetrik Eğilme
8	1196,00	0,0008541	Düşey Eğilme
9	1231,80	0,0008293	Simetrik Eğilme
10	1235,20	0,0008270	Simetrik Eğilme

4.2 Statik Analizler

Tip-1 kemer barajının statik analizleri, rezervuarının boş olması durumu dikkate alınarak yapının kendi ağırlığı altında gerçekleştirilmiştir. Statik analizler sonucunda, baraj gövdesi üzerindeki bütün düğüm noktalarında, yer değiştirme, asal gerilme ve asal şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Kemer memba ve mansap yüzeyleri üzerinde

bulunan düğüm noktalarından, yer değiştirme, asal gerilme ve asal şekil değiştirmeler için ortak olarak kritik değerleri verecek şekilde 10 adet düğüm noktası seçilmiştir. Tip-1 kemer barajının statik analizleri sonucunda seçilen düğüm noktaları için; yer değiştirme değerleri Çizelge 4 ve 5'te, asal gerilme değerleri Çizelge 6 ve 7'de, asal şekil değiştirme değerleri Çizelge 8 ve 9'da verilmektedir.

Çizelge 4 - Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen yer değiştirmeler

Düğüm Noktaları	Yer değiştirmeler (cm)		
	Kret Doğrultusu	Memba-Mansap Doğrultusu	Düşey Doğrultu
48	7,8151E-20	1,7834E-05	-5,3070E-05
103	3,1855E-07	5,5562E-06	-4,4862E-05
115	2,3717E-20	1,3267E-05	-5,1530E-05
125	7,0024E-07	5,3223E-06	-4,5459E-05
169	-4,6662E-07	9,6484E-06	-4,7358E-05
185	1,5728E-06	9,8743E-06	-4,8836E-05
238	-7,9775E-07	5,5382E-06	-4,2099E-05
246	9,8158E-20	8,3769E-06	-4,3518E-05
260	1,9853E-06	5,8581E-06	-4,3770E-05
332	2,2340E-20	1,8290E-07	-2,6190E-05

Çizelge 5 – Ankastre mesnetli Tip-1 kemer barajında elde edilen yer değiştirmeler

Düğüm Noktaları	Yer değiştirmeler (cm)		
	Kret Doğrultusu	Memba-Mansap Doğrultusu	Düşey Doğrultu
48	-1,4647E-19	3,0146E-05	-2,2164E-05
103	3,7272E-06	1,5754E-06	-9,3188E-06
115	1,7788E-20	2,0645E-05	-2,2550E-05
125	-2,5929E-06	1,2345E-06	-8,8506E-06
169	1,5256E-06	1,2330E-05	-1,5822E-05
185	1,4175E-06	1,2109E-05	-1,8003E-05
238	1,5023E-06	5,6791E-06	-1,0008E-05
246	-2,6012E-20	1,2182E-05	-1,3890E-05
260	8,4133E-07	5,5834E-06	-1,1964E-05
332	0	0	0

Çizelge 6 - Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen asal gerilmeler

Düğüm Noktaları	Asal Gerilmeler (MPa)	
	Maksimum	Minimum
48	-0,00014200	-0,00118540
103	0,00030622	-0,00416980
115	0,00042557	-0,00403250
125	0,00000265	-0,00389940
169	0,00001503	-0,00585250
185	0,00012880	-0,00527620
238	0,00002984	-0,00866150
246	-0,00001120	-0,00844570
260	0,00002497	-0,00747870
332	-0,00135100	-0,00852830

Çizelge 7 – Ankastre mesnetli Tip-1 kemer barajında elde edilen asal gerilmeler

Düğüm	Asal Gerilmeler (MPa)	
	Noktaları	Minimum
48	-0,000155300	-0,0032515
103	0,00209600	-0,0042684
115	0,00110900	-0,0034780
125	0,00006272	-0,0046365
169	0,00002708	-0,0054861
185	0,00048807	-0,0049661
238	0,00002854	-0,0071746
246	-0,00001620	-0,0075281
260	0,00002407	-0,0073603
332	-0,00223850	-0,0085459

Çizelge 8 - Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak Tip-1 kemer barajında elde edilen asal şekil değiştirmeler

Düğüm	Asal Şekil değiştirmeler	
	Noktaları	Minimum
48	1,5484E-08	-6,7991E-08
103	7,5816E-08	-2,8226E-07
115	8,2162E-08	-2,7448E-07
125	5,3448E-08	-2,5871E-07
169	8,5846E-08	-3,8356E-07
185	7,8758E-08	-3,5364E-07
238	1,1440E-07	-5,1575E-07
246	1,2372E-07	-5,5104E-07
260	1,0653E-07	-4,9376E-07
332	6,1314E-08	-5,1287E-07

Çizelge 9 – Ankastre mesnetli Tip-1 kemer barajında elde edilen asal şekil değiştirmeler

Düğüm	Asal Şekil değiştirmeler	
	Noktaları	Minimum
48	4,9696E-08	-1,9800E-07
103	1,9575E-07	-3,2961E-07
115	1,2043E-07	-2,6378E-07
125	6,6524E-08	-3,0941E-07
169	8,7642E-08	-3,5341E-07
185	9,8610E-08	-3,3772E-07
238	1,0287E-07	-4,7338E-07
246	1,2493E-07	-4,7602E-07
260	1,0459E-07	-4,8616E-07
332	2,6227E-07	-8,9783E-07

5 BENZERLİK FORMÜLLERİ

Frekans değeri için ilgili matematik model mevcut olduğu için, geometrik, kütle ve malzeme ölçeklerine bağlı farklı kombinasyonlarla benzerlik ilişkisi elde edilmiş ve sonuçlar birbiriyle karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Farklı sistemlere ait matematik formüller değişmektedir. Örnek olarak, sonuçları bilinen basit kolon elemanın frekans formülü seçilmiştir. Elde edilen benzerlik formülü genelleştirilerek farklı sistemler içinde kullanılabilir.

➤ olon elemanın prototip (gerçek boyutlu hali) durumu için, matematik model yardımıyla çözüm aşağıdaki şekilde özetlenmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Boyutlar} &= abx \cdot l \cdot m \\ \text{Parametreler} &= \gamma, E_p, g \\ \text{Rijitlik} &= k = \frac{12E_p I}{L^3} \end{aligned}$$

Burada; γ yoğunluğu, E Elastisite Modülünü, g yerçekimi ivmesi göstermekte olup, ilgili çözüm aşağıdaki şekilde yapılarak ilgili bağıntılar elde edilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{ab^3}{12} \\ k &= \frac{12E_p \frac{ab^3}{12}}{L^3} = \frac{12E_p ab^3}{12L^3} = \frac{E_p ab^3}{L^3} \\ m &= \frac{abL\gamma}{g} \\ \omega_n &= \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{E_p ab^3}{L^3} \frac{g}{abL\gamma}} = \sqrt{\frac{E_p b^2 g}{L^4 \gamma}} \\ f_{n(\text{Prototip})} &= \frac{\omega_n}{2\pi} = \sqrt{\frac{E_p b^2 g}{L^4 \gamma}} \frac{1}{2\pi} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Kolon elemanın ölçekli modeli için, matematik model yardımıyla yapılan işlem adımları aşağıda sıralanmaktadır.

➤ kütle değişiminin de dikkate alınmasıyla, 1/S geometri ve malzeme ölçeklendirmesi durumunda;

$$\begin{aligned} \text{Boyutlar} &= \frac{a}{S} \times \frac{b}{S} \times \frac{l}{S} \cdot m \\ \text{Parametreler} &= \gamma, E_m, g \end{aligned}$$

olmak üzere ilgili çözüm aşağıdaki şekilde yapılarak ilgili bağıntılar elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} I &= \frac{a \left(\frac{b}{S} \right)^3}{12} = \frac{ab^3}{S^4 12} \\ k &= \frac{12E_m \frac{ab^3}{S^4 12}}{\left(\frac{L}{S} \right)^3} = \frac{12E_m ab^3 S^3}{12S^4 L^3} = \frac{E_m ab^3}{L^3} \frac{1}{S} \\ m &= \frac{abL}{SSS} \gamma = \frac{abL\gamma}{S^3 g} = \frac{abL\gamma}{g} \frac{1}{S^3} \\ \omega_n &= \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{E_m ab^3}{L^3} \frac{1}{S} \frac{g}{abL\gamma} \frac{1}{S^3}} = \sqrt{\frac{E_m b^2 g}{L^4 \gamma}} S \\ f_{n(\text{Model})} &= \frac{\omega_n}{2\pi} = \sqrt{\frac{E_m b^2 g}{L^4 \gamma}} \frac{1}{2\pi} S \end{aligned} \quad (2)$$

Kolon elemanın prototipi ile ölçekli modeli arasındaki ilişkinin kurulması ile aşağıdaki bağıntı elde edilmektedir. Elde edilen bu formül, frekans değeri için oluşturulan benzerlik formülüdür.

$$\left. \begin{aligned} f_{n(\text{Model})} &= \sqrt{\frac{E_m}{E_p}} S \\ f_{n(\text{Prototip})} &= \sqrt{\frac{E_p}{E_m}} \\ f_{n(m)} &= S \sqrt{\frac{E_m}{E_p}} f_{n(p)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Yer değiştirme, asal gerilme ve asal şekil değiştirmelere ait matematik modeller kullanılarak kurulan benzerlik ilişkisi ile ölçekli model ve prototip arasındaki ilişkiyi ifade eden genel denklemler Çizelge 10'da sunulmaktadır.

Çizelge 10 – Yer değiştirme, asal gerilme ve şekil değiştirmelere ait benzerlik formülleri

Yapısal Davranış	Formül
Yer değiştirme	$\delta_m = \frac{E_p}{E_m} \frac{1}{S^2} \delta_p$
Asal Gerilme	$\sigma_m = \frac{1}{S} \frac{\gamma_m}{\gamma_p} \sigma_p$
Asal Şekil değiştirme	$\varepsilon_m = \frac{1}{S} \frac{\gamma_p}{\gamma_m} \frac{E_p}{E_m} \varepsilon_p$

Elde edilen bu formüller kolon örneği kullanılarak oluşturulmuş olup, örnekte gerçek kolon boyutuna prototip, küçültülmüş kolonlara

ise model adı verilerek gerekli işlemler yapılmıştır. Formüllerin baraja uygulanmasında laboratuvar modeli mevcut olan küçük ölçekli baraj prototip kabul edilip büyütülmüş ölçekli durumları ise model olarak isimlendirilmiş olup benzerlik formülleri yeniden düzenlenmiştir (Çizelge 11).

Çizelge 11 – Düzenlenmiş yer değiştirme, asal gerilme ve şekil değiştirmelere ait benzerlik formülleri

Yapısal Davranış	Formül
Frekans	$f_m = \frac{1}{S} \frac{\sqrt{E_m}}{\sqrt{E_p}} f_p$
Yer değiştirme	$\delta_m = \frac{E_p}{E_m} \frac{\gamma_m}{\gamma_p} S^2 \delta_p$
Asal Gerilme	$\sigma_m = S \frac{\gamma_m}{\gamma_p} \sigma_p$
Asal Şekil değiştirme	$\epsilon_m = S \frac{\gamma_p}{\gamma_m} \frac{E_p}{E_m} \epsilon_p$

5.1 Modal ve Statik Analiz Sonuçlarına Benzerlik Formüllerinin Uygulanması

Tip-1 kemer barajına ait laboratuvar modeli üzerinde gerçekleştirilen deneysel

çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile sonlu eleman analiz sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmalı olarak irdelenerek modelin doğruluğu ortaya konulmaya çalışılmıştır. Böylelikle, aynı kemer baraj üzerinde farklı boyut ve malzeme özellikleri kullanılarak oluşturulacak sonlu eleman modellerinin de benzer doğrulukta sonuçlar vereceği kanaatine varılmıştır. Yapılan sonlu eleman modellemesinin doğruluğunun tespitindeki amaç, Tip-1 kemer barajına ait birimlerin belirli aralıklarda seçilmesi ile birlikte büyük ölçekli gerçek baraj modelleri elde ederek farklı yüksekliklerdeki barajların dinamik karakteristiklerini ve yapısal özelliklerini belirlemektir. Bu amaç doğrultusunda, kemer yüksekliği 0,6m ile 300m arasında değişecek şekilde detaylı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ülkemizde inşa edilen kemer baraj yükseklikleri dikkate alındığında, örnek olarak seçilen 201m, 240m, 250m ve 270m kemer yükseklikleri için benzerlik formülleri ile sonuçlar elde edilmiştir.

Tip-1 kemer barajı referans alındığında, barajın 201m (Model-1), 240m (Model-2), 250m (Model-3) ve 270m (Model-4) kemer yüksekliğine sahip olması durumları için sırasıyla; 335, 400, 416,67 ve 450 kat büyütülmesi gerekmektedir. Barajın mevcut durumu prototip olarak isimlendirilmiştir.

Çizelge 12’de prototip ve modellere ait özellikler sunulmaktadır.

Çizelge 12 – Tip-1 kemer barajının prototip ve ölçekli modellerine ait bazı özellikler

Tip-1 Kemer Barajı	Ölçek	Kemer Yüksekliği (m)	Kemer iç Yarıçapı (m)	Kret ve Taban kalınlığı (m)	Elastisite Modülü (MPa)
Prototip	1	0,60	0,8650	0,06	15000
Model-1	335	201	289,78	20,1	34000
Model-2	400	240	346,00	24,0	34000
Model-3	416,67	250	360,42	25,0	34000
Model-4	450	270	389,25	27,0	34000

Boyut analiziyle elde edilen formüller kullanılarak Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4’e ait frekans değerleri elde edilmiştir. Çizelge 2’de detaylı olarak verilen ve prototip için yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak elde edilen frekans değerleri kullanılarak, Çizelge 11’deki frekans denklemi yardımıyla yapılan hesaplamalara göre, Model-1 için birinci doğal frekans değeri,

$$f_{m_1} = \frac{1}{S} \frac{\sqrt{\gamma_p}}{\sqrt{\gamma_{m_1}}} \frac{\sqrt{E_{m_1}}}{\sqrt{E_p}} f_p$$

$$f_{m_1} = \frac{1}{335} \frac{\sqrt{2300}}{\sqrt{2300}} \frac{\sqrt{34000}}{\sqrt{15000}} 344,58706 \quad (4)$$

$$f_{m_1} = 1,548611 \text{ Hz}$$

olarak hesap edilmektedir. Aynı denklemlerle elde edilen diğer frekans değerleri ise sonlu eleman analiz sonuçları ile birlikte Çizelge 13 ve 14’te karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Çizelge 11'deki yer değiştirme, asal gerilme ve asal şekil değiştirme formülleri kullanılarak elde edilen değerlerde Çizelge 15-20'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Karşılaştırmalı tablolar, yapı-zemin

etkileşiminin dikkate alındığı durum için verilmiştir. Çizelgeler incelendiğinde sonuçların birbiriyle uyum içerisinde olduğu ve hata oranının yaklaşık olarak %0 olduğu görülmektedir.

Çizelge 13 - Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen frekans değerleri

Mod Numarası I	Frekans (Hz)			
	Model-1		Model-2	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
1	1,5486	1,5486311	1,297	1,2969786
2	1,6233	1,6233228	1,3595	1,3595329
3	2,2721	2,2720894	1,9029	1,9028749
4	2,9306	2,9305726	2,4544	2,4543545
5	3,0307	3,0306936	2,5382	2,5382059
6	3,8655	3,8655082	3,2374	3,2373631
7	4,0034	4,0033854	3,3528	3,3528352
8	4,1222	4,1222028	3,4523	3,4523449
9	4,2882	4,2881912	3,5914	3,5913601
10	4,3090	4,3089935	3,6088	3,6087821

Çizelge 14 - Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen frekans değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	Model-3		Model-4	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
1	1,2451	1,2450895	1,1529	1,1528698
2	1,3051	1,3051411	1,2085	1,2084736
3	1,8267	1,8267453	1,6914	1,6914444
4	2,3562	2,3561615	2,1816	2,1816485
5	2,4367	2,4366582	2,2562	2,256183
6	3,1078	3,1078437	2,8777	2,8776561
7	3,2187	3,2186961	2,9803	2,980298
8	3,3142	3,3142246	3,0688	3,068751
9	3,4477	3,4476782	3,1923	3,1923201
10	3,4644	3,4644031	3,2078	3,2078063

Çizelge 15 - Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen yer değiştirme değerleri

Düğüm Noktası	Yer değiştirme (cm) [Membra-mansap Doğrultusu]			
	Model-1		Model-2	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	0,88300	0,88298	1,25890	1,258871
103	0,27509	0,275093	0,39220	0,392202
115	0,65684	0,656863	0,93647	0,936494
125	0,26351	2,635126	0,37569	0,375692
169	0,4777	0,477702	0,68106	0,681064
185	0,48889	0,488887	0,69701	0,697009
238	0,27420	0,274202	0,39093	0,390932
246	0,41475	0,414749	0,59131	0,591311
260	0,29004	0,290041	0,41351	0,413513
332	0,00906	0,009056	0,01291	0,012911

Çizelge 16 - Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen yer değiştirme değerleri

Düğüm Noktası	Yer değiştirme (cm) [Membra-mansap Doğrultusu]			
	Model-3		Model-4	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	1,366	1,3659839	1,59330	1,5932581
103	0,42558	0,4255736	0,49638	0,4963811
115	1,01610	1,0161774	1,18520	1,1852504
125	0,40766	0,4076582	0,47548	0,4754849
169	0,73901	0,7390130	0,86197	0,8619710
185	0,75631	0,7563157	0,88215	0,8821525
238	0,42419	0,4241949	0,49477	0,494773
246	0,64162	0,6416233	0,74838	0,7483775
260	0,44870	0,4486974	0,52335	0,5233523
332	0,014009	0,0140091	0,01634	0,016340

Çizelge 17 - Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen asal gerilme değerleri

Düğüm Noktası	Asal Gerilmeler (MPa)							
	Model-1				Model-2			
	Maksimum		Minimum		Maksimum		Minimum	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	-0,04756	-0,04757	-0,39711	-0,39711	-0,05679	-0,05680	-0,47416	-0,47416
103	0,10258	0,102584	-1,39690	-1,39688	0,12249	0,122488	-1,6679	-1,66792
115	0,14257	0,142566	-1,35090	-1,35089	0,17023	0,170228	-1,6130	-1,61300
125	0,000887	0,000888	-1,30630	-1,30630	0,001059	0,001060	-1,5597	-1,55976
169	0,005034	0,005035	-1,96060	-1,96059	0,006011	0,006012	-2,3410	-2,34100
185	0,043147	0,043148	-1,76750	-1,76753	0,051519	0,051520	-2,1105	-2,11048
238	0,008146	0,009996	-2,63060	-2,90160	0,009727	0,011936	-3,1410	-3,46460
246	-0,00376	-0,00375	-2,82930	-2,82931	-0,00449	-0,00448	-3,3783	-3,37828
260	0,008366	0,008365	-2,50540	-2,50536	0,009989	0,009988	-2,9915	-2,99148
332	-0,45258	-0,45259	-2,85700	-2,85698	-0,5404	-0,54040	-3,4113	-3,41132

Çizelge 18 - Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen asal gerilme değerleri

Düğüm Noktası	Asal Gerilmeler (MPa)							
	Model-3				Model-4			
	Maksimum		Minimum		Maksimum		Minimum	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	-0,04756	-0,04757	-0,39711	-0,39711	-0,05679	-0,0568	-0,47416	-0,47416
48	-0,05915	-0,05917	-0,49392	-0,49392	-0,06389	-0,06390	-0,53343	-0,53343
103	0,12759	0,12759	-1,7374	-1,73743	0,1378	0,13780	-1,8764	-1,87641
115	0,17732	0,17732	-1,6802	-1,68022	0,19151	0,19151	-1,8146	-1,81463
125	0,001103	0,00110	-1,6248	-1,62476	0,001191	0,00119	-1,7547	-1,75473
169	0,006262	0,00626	-2,4386	-2,43856	0,006762	0,00676	-2,6336	-2,63363
185	0,053666	0,05367	-2,1984	-2,19843	0,057958	0,05796	-2,3743	-2,37429
238	0,010132	0,01243	-3,2719	-3,60899	0,010943	0,01343	-3,5337	-3,89768
246	-0,00468	-0,00467	-3,5191	-3,51907	-0,00505	-0,00504	-3,8005	-3,80057
260	0,010405	0,01040	-3,1161	-3,11615	0,011238	0,01124	-3,3654	-3,36542
332	-0,56292	-0,56292	-3,5535	-3,55349	-0,60795	-0,60795	-3,8377	-3,83774

Çizelge 19 - Model-1 ve Model-2'ye ait elde edilen asal şekil değiştirme değerleri

Asal Şekil değiştirmeler								
Düğüm	Model-1				Model-2			
Noktası	Maksimum		Minimum		Maksimum		Minimum	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	2,288E-6	2,288E-6	-1,005E-5	-1,005E-5	2,733E-6	2,733E-6	-1,200E-5	-1,200E-5
103	1,121E-5	1,121E-5	-4,172E-5	-4,172E-5	1,338E-5	1,338E-5	-4,981E-5	-4,981E-5
115	1,214E-5	1,214E-5	-4,057E-5	-4,057E-5	1,450E-5	1,450E-5	-4,844E-5	-4,844E-5
125	7,899E-6	7,899E-6	-3,824E-5	-3,824E-5	9,432E-6	9,432E-6	-4,566E-5	-4,566E-5
169	1,269E-5	1,269E-5	-5,669E-5	-5,669E-5	1,515E-5	1,515E-5	-6,769E-5	-6,769E-5
185	1,164E-5	1,164E-5	-5,227E-5	-5,227E-5	1,390E-5	1,390E-5	-6,241E-5	-6,241E-5
238	1,691E-5	1,691E-5	-7,623E-5	-7,622E-5	2,019E-5	2,019E-5	-9,102E-5	-9,102E-5
246	1,829E-5	1,829E-5	-8,144E-5	-8,144E-5	2,183E-5	2,183E-5	-9,724E-5	-9,724E-5
260	1,574E-5	1,575E-5	-7,298E-5	-7,297E-5	1,880E-5	1,880E-5	-8,713E-5	-8,713E-5
332	9,062E-6	9,062E-6	-7,580E-5	-7,579E-5	1,082E-5	1,082E-5	-9,051E-5	-9,049E-5

Çizelge 20 - Model-3 ve Model-4'e ait elde edilen asal şekil değiştirme değerleri

Asal Şekil değiştirmeler								
Düğüm	Model-3				Model-4			
Noktası	Maksimum		Minimum		Maksimum		Minimum	
	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül	ANSYS	Formül
48	2,846E-6	2,846E-6	-1,250E-5	-1,250E-5	3,074E-6	3,074E-6	-1,350E-5	-1,350E-5
103	1,394E-5	1,394E-5	-5,189E-5	-5,189E-5	1,505E-5	1,505E-5	-5,604E-5	-5,604E-5
115	1,510E-5	1,510E-5	-5,046E-5	-5,046E-5	1,631E-5	1,631E-5	-5,449E-5	-5,449E-5
125	9,825E-6	9,825E-6	-4,756E-5	-4,756E-5	1,061E-5	1,061E-5	-5,136E-5	-5,136E-5
169	1,578E-5	1,578E-5	-7,051E-5	-7,051E-5	1,704E-5	1,704E-5	-7,615E-5	-7,615E-5
185	1,448E-5	1,448E-5	-6,501E-5	-6,501E-5	1,564E-5	1,564E-5	-7,021E-5	-7,021E-5
238	2,103E-5	2,103E-5	-9,481E-5	-9,481E-5	2,271E-5	2,271E-5	-1,024E-4	-1,024E-4
246	2,274E-5	2,274E-5	-1,013E-4	-1,013E-4	2,456E-5	2,456E-5	-1,094E-4	-1,094E-4
260	1,958E-5	1,958E-5	-9,077E-5	-9,077E-5	2,115E-5	2,115E-5	-9,803E-5	-9,803E-5
332	1,127E-5	1,127E-5	-9,428E-5	-9,427E-5	1,217E-5	1,217E-5	-1,018E-4	-1,018E-4

5.2 Dinamik Analiz Sonuçlarına Benzerlik Formüllerinin Uygulanması

Zamana bağlı değişen yükler altında gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçları karşılaştırılmalı olarak irdelendiğinde, prototip baraj modelinden elde edilen yer değiştirme, gerilme ve şekil değiştirme değerleri ile ölçekli bir şekilde büyütülmüş baraj modellerinden elde edilen değerlerin orantılı olmadığı belirlenmiştir. Bu durum, dinamik analizler sonucunda elde edilen değerlerin (yer değiştirme, asal gerilme ve asal şekil değiştirme) tek bir formülle genelleştirilemeyeceğini göstermektedir. Bu nedenle, prototip sonuçlardan referansla büyük ölçekli gerçek sistemlere ait sonuçları yaklaşık olarak tahmin etmek ve değerlendirmek için istatistiksel bir yöntem olan ve sonuçlar arasında eğri uydurarak istenilen verilere ulaşılmasını sağlayan regresyon analizi kullanılmıştır. Parametrik bir çalışma olan regresyon

analizinde, Tip-1 kemer baraj üzerinde istenilen herhangi bir verinin başlangıç parametresi olarak kabul edilmesi, farklı parametreler ile farklı kombinasyonlardan oluşan analiz sonuçlarıyla regresyon analizi yapılarak istenilen sonuçların tamamını kapsayacak şekilde bir eğri elde edilmesi ile bu eğrinin formülüyle birlikte sonuca ulaşılması gerçekleştirilmektedir.

6 REGRESYON ANALİZİ

6.1 Analiz Parametrelerinin Seçilmesi

Tip-1 kemer barajının, yapı-zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli durumları için oluşturulan modeller esas alınarak; 1, 10, 20, ..., 500 kat ölçekli toplam 102 adet sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Ölçekler, kemer yüksekliği olarak ifade edildiğinde, 0,60m ile 300m arasında değişen değerler almakta olup, bu

değerler regresyon analizi için de ilk parametreyi oluşturmaktadır.

İkinci parametre olarak seçilen Elastisite Modülü için, her bir modelde C14/16, C16/20, C18/22,5, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50 ve C45/55 olmak üzere dokuz farklı beton dayanım sınıfı göz önünde bulundurulmuştur. Bu iki parametrenin esas alınmasıyla ve parametrelerin kombinasyonlarıyla oluşturulan 918 modele, dört zemin grubu olan Z1, Z2, Z3 ve Z4'ün dikkate alınmasıyla 3672 tepki spektrum analizi uygulanmıştır. Tüm analizler ANSYS sonlu eleman paket programıyla gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar, her bir düğüm noktasına ait yer değiştirmeleri, maksimum ve minimum asal gerilmeleri, maksimum ve minimum asal şekil değiştirmeleri kapsamaktadır. Elde edilen veriler arasında herhangi bir ilişkinin var olup olmadığı ya da ilişki var ise doğrusal veya doğrusal olmayan ilişki mi olduğu öncelikle belirlenmesi gerekmektedir.

6.2 Sonuçlar için Uygun Regresyon Analizlerinin Uygulanması

Seçilen ölçek ve Elastisite Modülü'nün dikkate alınmasıyla, ilişki türlerine uygun iki parametrelili regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

Doğrusal analizler EXCEL programı ile doğrusal olmayan analizler ise Başağa [29] tarafından oluşturulan program kodu kullanılarak ikinci derece denklemlere ait katsayılar elde edilmiştir. Şekil 6'da, Z1 zemin sınıfı için gerçekleştirilen spektrum analizi sonucunda yapı-zemin etkileşimli kemer barajın ilk dört düğüm noktasının sonuçlarına ait regresyon analizi formül katsayıları verilmektedir. 1 nolu düğüm noktasına ait katsayıların bulunduğu satırlar, sırasıyla yer değiştirme, maksimum asal gerilme, minimum asal gerilme, maksimum asal şekil değiştirme ve minimum asal şekil değiştirmeleri göstermektedir. 1 nolu düğüm noktasına ait yer değiştirme formülü oluşturularak Denklem (5) elde edilmektedir. Burada, $\bar{\alpha}_0$ ölçek, E Elastisite Modülünü ifade etmek üzere, denkleme A_0 ve R katsayıları, eklenerek 1 nolu düğüm noktasına ait genel ifade Denklem (6) olarak elde edilmektedir.

1. Dugum Noktasi				
0.102387238972190E+00	0.299115582354694E-03	-0.341889438941842E-07	0.157132907379631E-05	-0.168832096842433E-14
-0.313732655891295E+02	0.351489255936679E+00	0.159667161648412E-04	-0.353596306018798E-03	-0.190666219033982E-11
-0.365580821788276E+01	0.397552046714140E-01	0.220975861474975E-05	-0.289505009502752E-04	-0.302517073226579E-12
0.110010970464182E-04	0.122877565857039E-06	-0.285753242760636E-11	-0.119708364619089E-09	-0.288923988346074E-18
0.209850747131279E-05	0.888670364418563E-10	-0.114190139019655E-11	0.770188354474771E-11	0.137995610525371E-18
2. Dugum Noktasi				
0.121356682406741E+00	0.340434718918405E-03	-0.417629259726682E-07	0.176070443309146E-05	-0.145608415573028E-14
-0.599469177702752E+02	0.678420358837229E+00	0.295921309507400E-04	-0.791415625048460E-03	-0.329866790186901E-11
0.110050847510152E+01	-0.122002417005805E-01	-0.556322417025728E-06	0.247630706344315E-04	0.4292019106684892E-13
0.148647485201306E-04	0.236609708971829E-06	-0.244780275646765E-11	-0.275390317976501E-09	-0.818332467594373E-18
-0.155406739097992E-05	-0.386424760160359E-07	-0.147410288459474E-12	0.501854493810413E-10	0.196570982553512E-18
3. Dugum Noktasi				
0.154879123008439E+00	0.594937620776024E-03	-0.554875143679419E-07	0.196599987194085E-05	-0.154935480953513E-14
-0.433614266545481E+02	0.954516122516818E+00	0.128050796980639E-04	-0.109426133214759E-02	-0.322760080903858E-12
-0.20499529555681E+01	0.152356299601744E-01	0.105462769713768E-05	-0.966706113461806E-05	-0.143789058127543E-12
0.322962075932741E-04	0.318703172330477E-06	-0.123726476461658E-10	-0.365907236404394E-09	0.334095088536823E-18
-0.635331889893772E-05	-0.583369557493320E-07	0.268623384907163E-11	0.699891562747817E-10	-0.143355679223576E-18
4. Dugum Noktasi				
0.109180052168351E+00	0.312152710723259E-03	-0.373509078080746E-07	0.161280395000299E-05	-0.144123155231271E-14
-0.214161019001941E+02	0.443100565646857E+00	0.748004767117211E-05	-0.432295529216510E-03	-0.54113452903224E-12
-0.114291469796648E+01	0.344428034116858E-01	0.604673375223327E-06	-0.101620411074534E-04	-0.101771763570497E-12
0.185788623011292E-04	0.148026072998157E-06	-0.716964680051110E-11	-0.140604454148803E-09	0.220087986032748E-18
-0.214163359232558E-06	-0.981348514827775E-08	0.132849466713076E-12	0.191345926552047E-10	-0.150274075328463E-19

Şekil 6 - Bazı düğüm noktalarına ait ikinci derece regresyon analiziyle elde edilen formülasyon katsayıları

$$Y = 0,1023872389219 + 0,299115582354694E - 3 * \bar{\alpha}_0 - 0,341889438941842E - 07 * E + 0,157132907379631E - 05 * \bar{\alpha}_0^2 - 0,168832096842433E - 04 * E^2 \quad (5)$$

$$Y = \frac{\bar{\alpha}_0}{\bar{\alpha}_0} * 0,1023872389219 + 0,299115582354694E - 3 * \bar{\alpha}_0 + \frac{\bar{\alpha}_0}{\bar{\alpha}_0} * 0,157132907379631E - 05 * \bar{\alpha}_0^2 + \frac{\bar{\alpha}_0}{\bar{\alpha}_0} * A_0 / R - \frac{\bar{\alpha}_0}{\bar{\alpha}_0} * 0,168832096842433E - 04 * E^2 \quad (6)$$

Kemer gövdesi üzerindeki 346 düğüm noktasının her birinde, yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilmeler ile maksimum ve minimum asal şekil değiştirmeler olmak üzere beş farklı yapısal davranış tepkisini veren toplam 13840 adet formül oluşturulmuştur.

6.3 Gerçek ve Regresyon Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapılan regresyon analizleri sonucunda elde edilen formüllerin vereceği sonuçlar, ANSYS programından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak çalışmanın doğruluğu kontrol edilmiş olup, hata oranları incelenmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde, hata oranlarının %10'u geçmediği görülmektedir. Sadece, 50 kat ölçek için yapılan karşılaştırmalarda, hata

oranları %20-40 değerlerine ulaşmaktadır. 30m'lik bir baraj yüksekliğine denk gelen ölçek değerinde hata oranı fazla olduğu için bu yükseklik alt sınır kabul edilmiştir. Regresyon analizinde kullanılan üst sınır ise 500 kat ölçeğin denk geldiği 300m kemer yüksekliğidir. Bu nedenle oluşturulan formüllerin 30m ile 300m arasındaki baraj yükseklikleri için uygun olduğuna karar verilmiştir. Bu sınırlar dışındaki herhangi bir kemer yüksekliği değerinde, formüllerden elde edilen tahmini sonuçların %10'un üstünde bir hata değeri vereceği ortaya çıkmaktadır. Şekil 7'de bazı düğüm noktalarında, seçilen farklı parametre değerlerine göre elde edilen yer değiştirme sonuçlarının karşılaştırılması ve hata oranlarının elde edilmesi gösterilmiştir.

Yerdeğiştirme			
500 ölçek, Ao=4, R=1, c30, Z1			
D. Noktası	ANSYS	FORMÜL	%HATA
1.	1,912806	1,872897	2,086368
10.	3,043458	3,221922	-5,86386
19.	7,591565	7,561946	0,390151
31.	12,77068	12,48698	2,22151
37.	16,31958	16,74372	-2,59896
47.	28,29404	27,3858	3,21
48.	28,33737	27,3858	3,358014
50.	14,99984	14,2395	5,068934
72.	12,42	12,21506	1,65014
81.	2,167173	2,332794	-7,64224
90.	1,977952	1,872897	5,311278
105.	6,075831	6,33973	-4,34342

Yerdeğiştirme			
350 ölçek, Ao=4, R=1, c20, Z1			
D. Noktası	ANSYS	FORMÜL	%HATA
1.	1,265894	1,275612	-0,76764
10.	2,009601	1,888803	6,011048
19.	5,347013	5,271597	1,410442
31.	8,795554	8,682542	1,284874
37.	11,42325	11,6339	-1,84402
47.	19,67354	18,9694	3,579159
48.	19,70543	18,9694	3,735203
50.	10,57422	9,896279	6,411273
72.	8,575083	8,49446	0,940204
81.	1,422197	1,311373	7,792426
90.	1,304489	1,275612	2,213687
105.	4,197693	4,399873	-4,81646

Şekil 7 - Bazı düğüm noktalarının yer değiştirme değerleri için elde edilen sonuçlara ait karşılaştırmalar

7 YAZILIMIN OLUŞTURULMASI

Tip-1 kemer barajı üzerinde yapılan çalışma kapsamında, birçok değişken parametrenin olması, parametrelerin seçiminde oluşacak kombinasyonların çok olması, oluşturulan formüllerin uzun ve her düğüm noktasına özel oluşu gibi nedenlerden dolayı elde edilen bütün sonuçların aynı anda sunulmasının mümkün olmadığı kanaatine varılmıştır. Sayfalarca veri ve sonuç içerisinden istenilen bir verinin bulunması ve depolanması oldukça zor bir süreçtir. Bu nedenle, yalnızca istenilen veriye ait sonuçların, seçilen bir düğüm noktasında elde edilmesi ve bu sonuçlara ait çeşitli grafik ve kontur diyagramlarının görüntülenmesini sağlayacak bir yazılımın geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

EXCEL programında tasarlanan yazılım yardımıyla, belirsiz parametreler kullanıcının seçimine bırakılmış olup, yapılacak seçimler sonucunda kemer barajda istenilen düğüm noktasına ait regresyon analizinden elde edilen formüllerle statik ve dinamik analize ait tahmini sonuçlar görüntülenebilecektir. Aynı zamanda, seçilen parametrelere bağlı olarak herhangi bir düğüm noktasında, sonuçların kesit boyunca değişim diyagramlarının ve kemere ait kontur diyagramlarının değişimi de elde edilebilecektir.

Hazırlanacak yazılım kapsamında ilk olarak, kullanıcıya sunulacak olan parametrelerin seçilmesi hedeflenmektedir. Sonuçların bu

parametrelere bağlı olarak elde edilmesi hedeflendiğinden dolayı, yazılımın temeli bu parametreler üzerine kurulmuştur. Çizelge 21'de kullanıcının seçimine sunulan parametreler ve ilgili sınır değerleri sunulmaktadır. Çizelge 21'de ise belirtilen parametrelerin yazılıma tanıtılması ile birlikte kemer barajın gövdesindeki herhangi bir düğüm noktasında meydana gelecek sonucun hangi formüle bağlı olarak hesaplanacağı EXCEL'de oluşturulan formül tabloları yardımıyla otomatik olarak seçilecektir. Yazılımda, modal analizlerden elde edilecek dinamik karakteristiklerle, statik ve dinamik analizler sonucunda elde edilen yer değiştirme, gerilme ve şekil değiştirmelerin belirlenmesi hedeflenmektedir. Elde edilebilecek analiz sonuçları başlıca,

- Modal Analiz Sonuçları
- Statik Analiz Sonuçları
- Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Gerçekleştirilen Dinamik Analiz Sonuçları
- Ankastre Mesnetli Durum için Gerçekleştirilen Dinamik Analiz Sonuçları
- Kesit Boyunca Değişim Diyagramları
 - Statik Analiz
 - Dinamik Analiz
- Kontur Diyagramları
 - Statik Analiz
 - Dinamik Analiz

şeklinde sıralanabilmektedir.

Çizelge 21 - Yazılımda kullanılan parametreler ve sınırları

Yazılımda Kullanılan Parametreler	
Kemer Yüksekliği	30m-300m arası
Beton Dayanım Sınıfı	C14/16, C16/20, C18/22,5, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C45/55
Zemin Sınıfı	Z1, Z2, Z3, Z4
Etkin Yer İvme Katsayısı	0,1g; 0,2g; 0,3g; 0,4g
Deprem Azaltma Katsayısı	Taşıyıcı sistem davranış katsayısına göre DBYBHY-2007'den elde edilmektedir
Düğüm Noktası Numarası	1-346 arası

Tip-1 kemer barajına ait olan regresyon analizleriyle oluşturulan tahmini sonuçlara istenilen parametreye bağlı olarak kullanıcının

rahat ulaşımını sağlamak amacıyla EXCEL'de hazırlanan yazılım tamamlanmış olup, yazılıma ait bazı görseller Şekil 8-13'te sunulmaktadır.

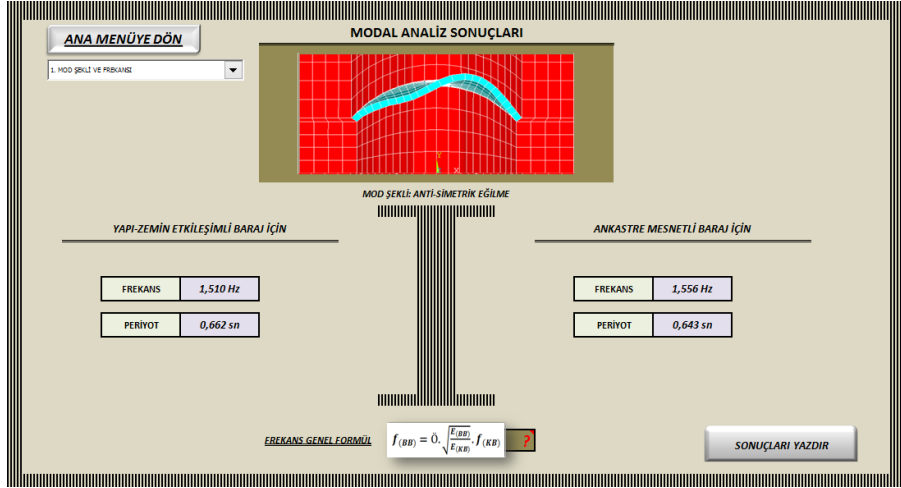
The screenshot displays the software interface for dam analysis, divided into three main sections:

- ANALİZ VERİLERİNİ GİRİNİZ (Input Data):**
 - KEMER YÜKSEKLİĞİ: 200
 - BETON DAYANIM SINIFI: C30
 - Ao: 1 DERECE DEPREM BÖLÜMÜ
 - R: 1
 - ZEMİN SINIFI: Z1
- ANALİZ VERİLERİNE AIT DETAYLI BİLGİLER (Analysis Details):**
 - Deprem Bölgesi:

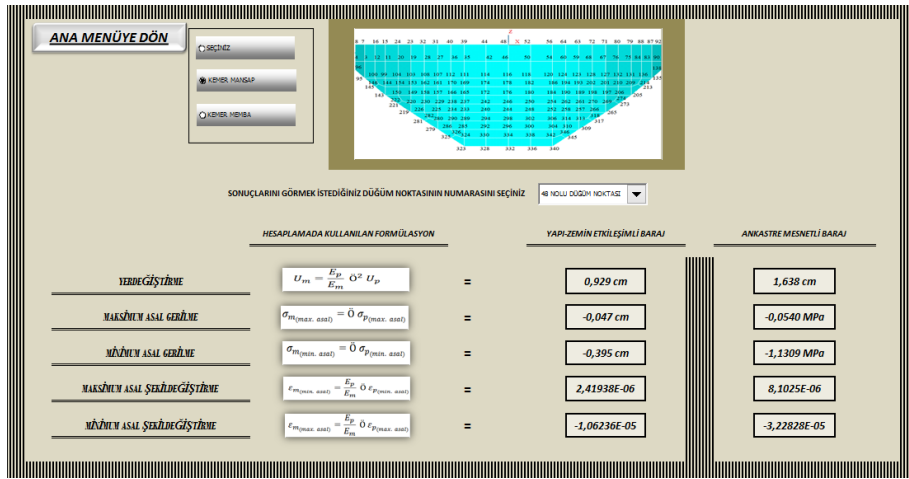
D	A ₀
1	0.40
2	0.30
3	0.20
4	0.10
 - Yerel Zemin Sınıfı:

Z	T _A (saniye)	T _B (saniye)
Z1	0.10	0.25
Z2	0.15	0.40
Z3	0.15	0.60
Z4	0.20	0.90
- ANALİZ SONUÇLARI (Analysis Results):**
 - MODAL ANALİZ
 - STATİK ANALİZ
 - YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK GERÇEKLEŞTİRİLEN DİNAMİK ANALİZ
 - ANKASTRE MESNETLİ DURUM İÇİN GERÇEKLEŞTİRİLEN DİNAMİK ANALİZ
 - KESİT BOYUNCA DEĞİŞİM DİYAGRAMLARI
 - STATİK ANALİZ
 - DİNAMİK ANALİZ
 - KONTUR DİYAGRAMLARI
 - STATİK ANALİZ
 - DİNAMİK ANALİZ

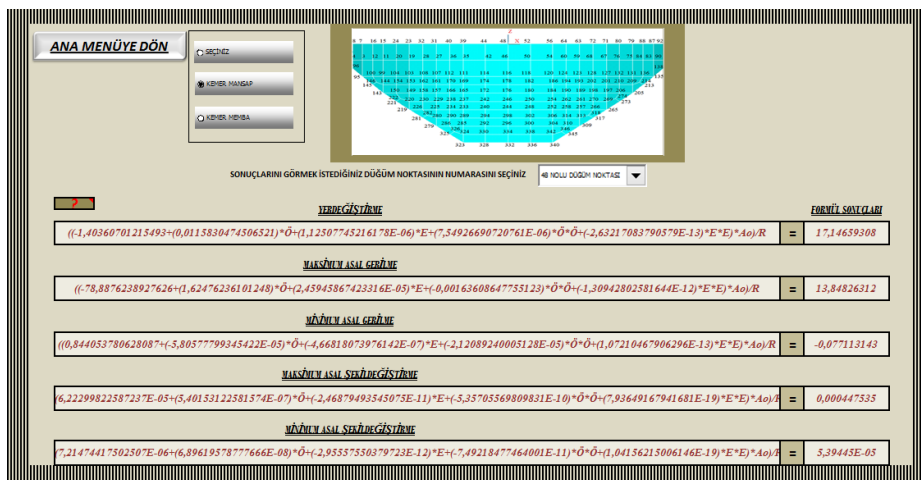
Şekil 8 - Yazılım ana sayfasında verilerin girilmesi



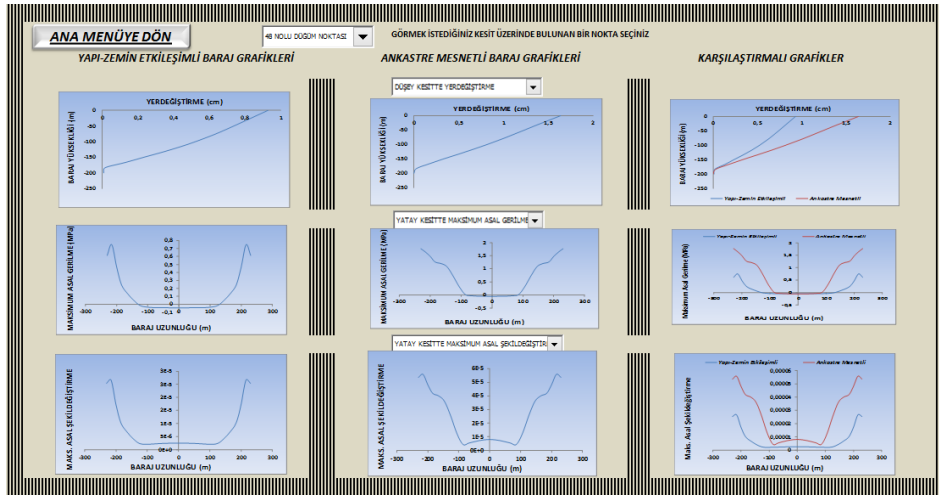
Şekil 9 - Modal analiz sayfasında örnek olarak 1. Titreşim modunun ve ilgili değerlerin görüntülenmesi



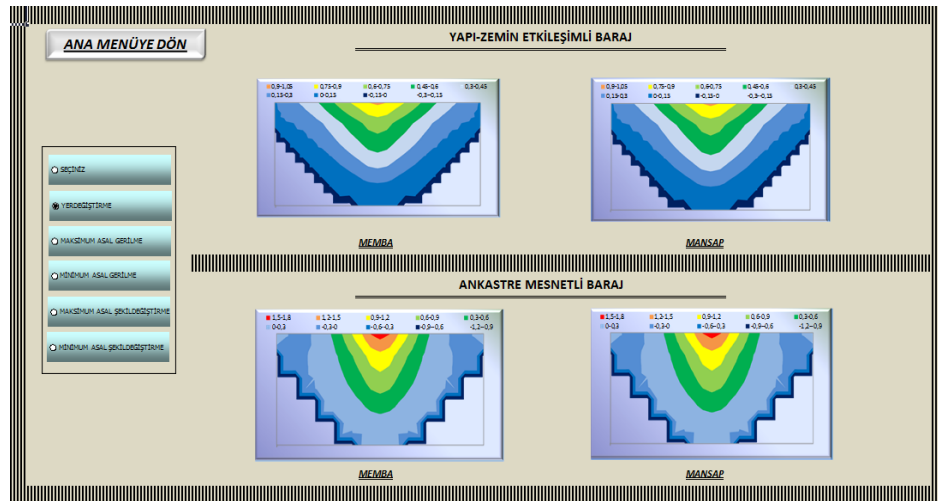
Şekil 10 - Statik analiz sayfasında örnek olarak 48 numaralı düğüm noktasının sonuçlarının ve ilgili formüllerin görüntülenmesi



Şekil 11 - Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı dinamik analiz sayfasında, 48 nolu düğüm noktasına ait sonuçların ve ilgili formüllerin görüntülenmesi



Şekil 12 - Statik analizler sonucu oluşan kesit boyunca değişim diyagramları sayfasında 48 nolu düğüm noktasının yapısal özelliklerine ait diyagramların görüntülenmesi



Şekil 13 - Statik analizler sonucu oluşan kontur diyagramları sayfasında kemere ait kontur diyagramların görüntülenmesi

8 SONUÇLAR

Bu çalışmada, kemer barajların statik ve dinamik yükler altındaki yapısal davranışlarının hızlı bir şekilde belirlenmesi amacıyla hazırlanan mühendislik yazılımı sunulmaktadır. Çalışma kapsamında ilk olarak, alan denklemleri kullanılarak yapısal davranışlara ait benzerlik formülleri elde edilmiştir. Elde edilen benzerlik formülleri, laboratuvar ortamında mevcut olan ölçekli Tip-1 kemer barajın sonlu eleman modeli üzerinde uygulanmıştır.

Prototip ve ölçekli modeller için gerçekleştirilen dinamik analizlerde Spektrum Analizi kullanılmış olup, elde edilen sonuçların benzerlik ilişkisinin kurulmasıyla oluşturulan formüllerden elde edilen sonuçlarla uyumlu olmadığı görülmüştür.

Dinamik analiz sonuçlarında orantılı bir değişim olmaması nedeniyle dinamik analiz ile

elde edilen sonuçlara ulaşmak amacıyla istatistiki yöntemler kullanılmıştır.

Tip-1 kemer barajda, yapı-zemin etkileşimi ve ankastre mesnetli durum dikkate alınarak oluşturulan iki farklı modelin, laboratuvar modeli esas alınarak 1,10,20,...,500 kat ölçeklenerek büyütülmesiyle toplamda 102 adet model elde edilmiştir. Oluşturulan 102 adet model üzerinde yapılan çalışmalarda, C14/16, C16/20, C18/22,5, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50 ve C45/55 olmak üzere dokuz farklı beton dayanım sınıfı ve Z1, Z2, Z3, Z4 olmak üzere dört zemin sınıfının dikkate alınmasıyla oluşturulan tepki spektrum analizleri yapılmıştır. Bu 3 parametrenin kombinasyonu ile oluşan 3672 analiz ANSYS sonlu eleman paket programı ile gerçekleştirilmiştir.

Analizler sonucunda, kemer üzerindeki 346 düğüm noktasının her birinde, yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilmeler,

maksimum ve minimum asal şekil değiştirmeler olmak üzere beş farklı yapısal davranışın sonucunu gösteren 13840 adet formül elde edilmiştir.

Elde edilen binlerce veri, formül ve formül sonuçlarının depolanması ve istenilen parametreye ait sonucun kolay şekilde elde edilebilmesi amacıyla, EXCEL programında bir yazılım oluşturulmuştur.

Tasarımda parametreler kullanıcının seçimine bırakılarak, yapılacak seçimler doğrultusunda kemer barajın istenilen düğüm noktasına ait modal, statik ve dinamik analiz formülleriyle ilgili tahmini sonuçlar görülebilmektedir. Aynı zamanda seçilen parametrelere bağlı olarak herhangi bir düğüm noktasında, sonuçların karşılaştırmalı olarak kesit boyunca değişim diyagramları ve kemere ait kontur diyagramlarının değişimi de elde edilebilmektedir.

9 KAYNAKLAR

- [1] Arch Dams, "A review of British Research and Development", Proceedings of the Symposium held at the Institution of Civil Engineers, Mart, Londra, İngiltere, 1968.
- [2] Oliveira, S. ve Faria, R., "Numerical Simulation of Collapse Scenarios in Reduced Scale Tests of Arch Dams", Engineering Structures, 28, 1430-1439, 2006.
- [3] Sevim, B., "Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi", Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2010.
- [4] Sevim, B., "The effect of Material Properties on the Seismic Performance of Arch Dams", Natural Hazards and Earth System Sciences, 11: 2253-2261, 2011.
- [5] Altunışık, A. C., Günaydın, M., Sevim, B., ve Adanur, S., "System Identification of Arch Dam Model Strengthened with CFRP Composite Materials", Steel and Composite Structures, 45: 231-244, 2017.
- [6] Wang, H. ve Li, D., "Experimental Study of Seismic Overloading of Large Arch Dam", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35: 199-216, 2006.
- [7] Wang, B. S. ve He, Z. C., "Crack Detection of Arch Dam using Statistical Neural Network Based on the Reductions of Natural Frequencies", Journal of Sound and Vibration, 302: 1037-1047, 2007.
- [8] Wang, H. ve Li, D., "Experimental Study of Dynamic Damage of an Arch Dam", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36: 347-366, 2007.
- [9] Zhou, J., Lin, G., Zhu, T., Jefferson, A. D. ve Williams, F. W., "Experimental Investigation into Seismic Failure of High Arch Dams", Journal of Structural Engineering, ASCE, 126, 926-935, 2000.
- [10] Datin, P. L. ve Prevatt, D. O., "Using Instrumented Small-Scale Models to Study Structural Load Paths in Wood-Framed Buildings", Engineering Structures, 54: 47-56, 2013.
- [11] Jiang, D. ve Shu, D., "Predication of Peak Acceleration of One Degree of Freedom Structures by Scaling Law", Journal of Structural Engineering, 131(4): 582-588, 2005.
- [12] Lu, X., Zhou, B. ve Lu, W., "Shaking Table Test and Numerical Analysis of a High-Rise Building with Steel Reinforce Concrete Column and Reinforce Concrete Core Tube", The Structural Design of Tall and Special Buildings, 24: 1019-1038, 2015.
- [13] Ramu, M., Prabhu, Raja, V. ve Thyla, P. R., "Establishment of Structural Similitude for Elastic Models and Validation of Scaling Laws", KSCE Journal of Civil Engineering, 17(1): 139-144, 2013.
- [14] Shehadeh, M., Shennawy, Y. ve El-Gamal, H., "Similitude and Scaling of Large Structural Elements: Case Study", Alexandria Engineering Journal, 54: 147-154, 2015.
- [15] Balaguer, P. ve Claramonte, J. A., "Characterization and Control of Dimensionally Similar Systems", Journal of the Franklin Institute, 348: 1814-1831, 2011.
- [16] Balawi, S., Shahid, O. ve Mulla, M. A., "Similitude and Scaling Laws-Static and Dynamic Behaviour Beams and Plates", Procedia Engineering, 114: 330-337, 2015.
- [17] Carpinteri, A. ve Corrado, M., "Dimensional Analysis Approach to the Plastic Rotation Capacity of Over-Reinforced Concrete Beams", Engineering Fracture Mechanics, 77: 1091-1100, 2010.
- [18] Ghosh, A., "Scaling Laws", Mechanics Over Micro and Nano Scales, ISBN: 10.1007/978-1-4419-9601-5_2, 2011.
- [19] Ramu, M., Prabhu, Raja, V. ve Thyla, P. R., "Development of Structural Similitude and Scaling Laws for Elastic Models", 18.11.2016, 2010.
- [20] Beşiktaş, M., "Doğu Karadeniz'de Debi Süreklilik Eğrilerinin Regresyon Analizi ile Belirlenmesi ve Akım Tahmini", Yüksek

- Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [21] Özdemir, Y., "Periyodik-Stokastik Hidrolojik Süreçlerde Regresyon Yoluyla Bilgi Aktarımı", Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2004.
- [22] Qiuqing, Z., Guoxin, Z., Haifeng, L., Yi, L. ve Bo, Y., "Study on Regression Analysis and Simulation Feedback-Prediction Methods of Super High Arch Dam during Construction and First Impounding Process", Earth and Space, ASCE, 1024-1033, 2012.
- [23] Serhatoğlu, C., "Bursa Tarihi Minarelerinin Dinamik Davranışlarının ve Performanslarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2015.
- [24] Sümerkan, S., "Ardgermeli Dengeli Konsol Köprüler için Doğal Frekans Formülü Geliştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2014.
- [25] Atmaca, H., "Yapı Stoklarının Tam Ölçekli Modellenmesi ve Analizi için Sistem Geliştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2016.
- [26] Başağa, H. B., "Yapıların Güvenilirlik Analizi İçin Bir Yaklaşım: Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi Yöntemi", Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2009.
- [27] Chan, Y. K., Lu, Y. K. ve Albermani, F. G., "Performance-Based Structural Fire Design of Steel Frames Using Conventional Computer Software", Steel and Composite Structures, 10(3): 207-222, 2010.
- [28] Cheng, J., "Development of Computational Software for Flutter Reliability Analysis of Long Span Bridges", Wind and Structures, 15(3): 209-221, 2012.
- [29] Gu, Q. ve Özçelik, Ö., "Integrating OpenSees with other Software-with Application to Coupling Problems in Civil Engineering", Structural Engineering and Mechanics, 40: 85-103, 2011.
- [30] Mittrup, I. ve Hartmann, D., "Structural Monitoring of Dams Using Software Agents", Computing in Civil Engineering, ASCE, 1-7, 2005.
- [31] Peng, J. ve Law, K. H., "A Prototype Software Framework for Internet-Enabled Collaborative Development of a Structural Analysis Program", Engineering with Computers, 18: 38-49, 2002.
- [32] Şahin, A., "Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri için Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirme Yazılımları: SignalCAD-ModalCAD-FemUP", Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2009.
- [33] Xiang, J., Jiang, Z., Wang, Y. ve Chen, X., "Study on Damage Detection Software of Beam-like Structures", Structural Engineering and Mechanics, 39(1): 77-91, 2011.
- [34] Yılmaz, O. ve Şahin, A., "Educational Software Development for Design of Steel Structures Lesson", Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 31(4): 571-581, 2013.
- [35] ANSYS, Swanson Analysis System, USA. 2016

HİDROLİK JENERATÖR SİSTEMİNDE OLUŞAN ARIZALAR VE İZLEME TEKNİKLERİ

Hakan SOLAK
DSİ Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı 06100 Yücetepe ANKARA
hakansolak@dsi.gov.tr

(Makalenin geliş tarihi: 27.11.2017, Makalenin kabul tarihi: 06.06.2018)

ÖZ

Günümüzde enerjinin önemi göz önüne alındığında, hidroelektrik santrallerin çalışmasında sürekliliğin ne kadar önemli olduğu çok açıktır. Hidroelektrik santrallerin en önemli bileşenleri türbin ve jeneratördür. Türbin ve jeneratörde oluşabilecek arızalarda, bakımlarda veya revizyonlarda işlerin süratle uzman kişilerce tamamlanması gerekir. -Kurulum maliyetleri yüksek olduğundan, arızalanan bu dönen makinaları değiştirmek işletmeci açısından büyük bir zorluktur. Bu sebeple makinaların ömrünü uzatmaya çalışmak işletmeciler için daha karlıdır. Kullanımda olan 25-30 yıllık bir makinaryı değiştirmek yerine bu makinanın yaşam ömrünün uzatılması aynı zamanda santral ömrünün de uzatılması anlamına gelir. Bu nedenle jeneratör sistemlerinde oluşabilecek arızaları iyi tanımak ve bu arızalar için iyi bir izleme sistemi geliştirmek büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, etkin bir durum izleme sistemi vasıtasıyla ekipmanların çalışma sürelerini ve güvenilirlik durumlarını izlemek gerekir.

Jeneratörün en önemli parçalarından birisi olan rotorda kutupların yerinden oynaması, gevşek ve eğrilmiş rotor çubukları, merkez çizgisinde kayma ve statorda eğrilik gibi ciddi arızalar oluşabilir. Rotor deformasyonu ve radyal rotor sapmaları nedeniyle de birçok titreşim sorunları meydana gelir. Rotor sebepli titreşim sorunları, stator ve rotor arasındaki statik ve dinamik hava aralığının ölçülmesinin çok önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışır durumdaki hidro jeneratörlerde rotor ile stator arasındaki mesafe tasarım sürecinde belirlenir. Çalışan bir jeneratörde, zaman içerisinde bu mesafelerde oluşan kaymaları bir hava aralığı sensörüyle ölçmek ve takip etmek mümkündür. Senkron motorların ve jeneratörlerin sargıları genellikle çok güvenilirdir. Ancak jeneratör rotoru ve statoru üzerinde ciddi termal ve mekanik gerilmeler meydana gelir. İşletme sırasında, makinaların günlük en az birkaç kez hızlanıp yavaşlaması gerekebilir. Bu durum, makinalarda yüksek sıcaklıkların oluşmasına, akabinde de malzemelerde yaşlanma ve hatta stator sargılarında bozulma meydana gelmesine sebep olur. Bu sargı kısa devreleri, doğrudan makinanın devre dışı kalmasına sebep olmasa da yüksek yatak titreşimlerine yol açar. Sargı kısa devreleri manyetik akı izlemek suretiyle tespit edilebilmektedir. Sargılardaki yalıtkan malzemelerin kalitesi ve tasarımı hakkında en iyi bilgi veren ölçümlerden birisi de kısmi deşarj ölçümüdür. Bu ölçümler sayesinde ciddi hasarlar meydana gelmeden makinaryı işletmeden almak büyük kazançlar sağlar.

Bu makalede hava aralığı ölçümü analizi temelli, hidroelektrik jeneratör rotor dinamikleri ve rotor-stator geometrilerinin analiz metotları uygulaması açıklanmaktadır. Ayrıca sürekli ve süratli olarak yükselen ve düşen darbeler nedeniyle oluşan kısmi deşarjlar ve sargı kısa devrelerinin tespitinde kullanılan manyetik akı ölçümleri ele alınmıştır.

Anahtar kelimeler: Hidro Jeneratör/Motor, Hava Aralığı Sensörleri, Senkron Makina, Rotor-Stator Hava Aralığı Problemleri, Durum İzleme ve Değerlendirme, Elektrik Enerji Üretimi, Kısmi Deşarj, Manyetik Akı, Çevrimiçi Teşhis

FAILURES AND MONITORING TECHNIQUES IN HYDRAULIC GENERATOR SYSTEM

ABSTRACT

It is obvious how important the continuity is for operation of hydroelectric power plants considering the importance of energy today. The most important components of hydroelectric power plants are turbine and generator. In the failures that may occur in turbine and generator and during maintenance or overhauls, it is required that works are completed immediately by specialists. Because installation costs are high, replacement of the failed rotating equipment is a big difficulty for operators. For this reason, it is more profitable for operators to endeavor to extend the life of the failed equipment.

Extending the lifetime of an equipment in operation for 25-30 years instead of replacing it also means extension of life of power plant. For this reason, it is of capital importance to know failures that may occur in generator systems and to develop a good monitoring system for these failures. For this purpose, it is required to monitor operating periods and reliability conditions of equipment by means of an effective condition monitoring system.

In the rotor which is one of the most important parts of generator, serious failures such as dislocation of poles, loose and bent rotor bars, eccentricity and bevel in stator may occur. Many vibration problems arise due to rotor deformation and radial rotor deviations. Vibration problems arising from rotor show that measurement of static and dynamic air gap between stator and rotor is very important. In hydro-generators in operating condition, distance between rotor and stator is determined in design process. In an operating generator, it is possible to measure and monitor the distortions in these distances over time by means of an air gap sensor. Windings of synchronous motors and generators are usually very reliable. However, significant thermal and mechanical stresses occur on generator rotor and stator. Equipment may need to accelerate and decelerate at least a few times daily during operation. This situation results in occurrence of high temperatures in equipment, and subsequently aging in materials and even distortion in stator windings. These winding short-circuits cause high bearing vibrations although they do not cause outage of equipment directly. Winding short-circuits can be detected by monitoring magnetic flux. One of the measurements providing best information on quality and design of insulating materials in windings is partial discharge measurement. Thanks to these measurements, decommissioning of equipment before occurrence of serious damages provides big benefits.

In this article, hydroelectric generator rotor dynamics based on air gap measurement analysis and application of analysis methods for rotor-stator geometries are explained. Furthermore, magnetic flux measurements used in detection of winding short-circuits and partial discharges occurring due to continuously and fast increasing and decreasing impacts are discussed.

Keywords: Hydro Generator/Motor, Air Gap Sensors, Synchronous Machine, Rotor-Stator Air Gap Problems, Condition Monitoring and Assessment, Electric Energy Production, Partial Discharge, Magnetic Flux, On-line Diagnostics

1 GİRİŞ

Yabancı cisim hasarı, kısmi deşarj, rotor sargı bozulması, aşırı sıcaklık, kirlilik, yorulma çatlakları, titreşim, stator kama gevşekliği ve stator çekirdek hasarı jeneratörlerde en sık karşılaşılan arızalardır. Arızaların çoğu ilk baş gösterdikleri andan itibaren makinada bir titreşim olarak kendisini gösterir. Bu tip arızalar, genellikle aniden oluşmamakta zaman içerisinde gelişen bir seyir izlemektedirler. Arızalar sürekli olarak takip edilerek hasara sebebiyet vermeden erkenden tespit edilebilmektedir.

Baraj ve santral gibi inşaat yapılarında ve bu yapılarda çalıştırılan elektromekanik teçhizatlar da periyodik izlemeler yapılmalıdır. Böylelikle bu yapıların güvenliklerini artırmak ve oluşabilecek büyük tehlikeleri önceden görmek mümkün olabilmektedir. Bir hidroelektrik santralin işletme sürecinin başarılı olması tasarımında, imalatında ve montajında mümkün olan bütün tedbirlerin en iyi şekilde düşünülmüş olmasına bağlıdır. Hidroelektrik santral işletmede en önemli husus üretimin sürekliliğidir. Üretimin sürekli olması, santralin durmasına sebebiyet verecek beklenmeyen etkenlerin neredeyse sıfıra düşürülmesiyle mümkün olmaktadır. Aksi halde oluşan ani

arızalar ciddi üretim kayıplarına yol açabilir. Bunun önüne geçebilmek için hidroelektrik santrallerde makine parametrelerinin sürekli olarak izlenmesi ve analiz edilmesi gerekir. Erken tespitler sayesinde oluşacak hasarların meydana gelmeden önce bakım planlamasının yapılması sağlanır. Sürekli izleme sistemleri, kullanıcılara modern teknolojinin imkânlarını sunarak maliyetleri ve harcanan zamanı en aza indirmektedir.

Jeneratörlerde arıza tespitinde çok etkili olan titreşim, manyetik akı, kısmi deşarj, hava aralığı ve proses değerleri izlenerek santraldaki veri tabanında saklanabilir[1]. Bu sayede, çeşitli bölgelere yayılmış olan genellikle ulaşımı zor noktalarda bulunan hidroelektrik santrallerin tümü, merkez ofisindeki bir kullanıcının bilgisayarından izlenebilmekte ve analiz edilebilmektedir. Bu çalışmada jeneratör arızaları ve bu arızaları tespit etmede kullanılan jeneratör hava aralığı, kısmi deşarj ve manyetik akı izleme sistemine ait esaslar ele alınmıştır.

2 JENERATÖR ARIZALARINA GENEL BAKIŞ

Çalışma ortamındaki yabancı nesnelere bir arıza sebebi olabilir. Bir jeneratör kontrol edilebilir

ortamda dikkatli bir şekilde çalıştırılmalıdır. Yabancı nesnelerin makinaya girişi büyük bir felakete sebebiyet verir. Bu yabancı maddeler harici kaynaklardan olabileceği gibi iç bileşenlerin arızalanmasından kaynaklanır. Makine içerisine giren nesneler rotorun dönmesiyle enerji kazanarak etrafına geniş yelpazede bir zarar verebilir. Mesela aşınmış ve sargıya uçan bir fan civatası bobin izolasyonuna neden olur. Bu tür arızaların önlenmesi için yerinden oynayabilen ve arızaya meyilli bütün iç parçalar düzenli olarak muayene edilmelidir. Ayrıca muayene, test ve bakım sırasında jeneratör içinde kalan maddelerden her zaman potansiyel bir tehlike geleceğini unutmamak gerekir. Hasar muayenesi yaparken dönen bileşenler üzerinde ultrasonik veya manyetik parçacık testleri ile birlikte görsel muayenede yapılmalıdır. En önemli arızalardan birisi kısmi deşarj (PD)' dir. Kısmi deşarj bazen korona olarak da adlandırılır. Hava soğutmalı jeneratörlerde oldukça yaygındır. Jeneratör bobin yalıtımı içindeki bir kısmi voltaj arızası nedeniyle oluşur. Bobin ve stator çekirdek arasındaki hava boşluğunda veya bobinler çok yakın olduğunda sargı sonlarında görülür. İzolasyon sisteminde tam bir bozulma olmadığından bütün elektriğin topraklanmasına neden olmaz. Ancak zamanla bu deşarjlar yalıtımı tamamen yiyebilir ve ünite tamamen çevrim dışı olabilir. Kısmi deşarjlar stator sargısı üzerinde beyaz bir toz olarak kendisini gösterir. PD' nin olduğu bölgede yarı iletken kaplamanın eksik olduğu söylenebilir. PD aktivitesini saptamak için özel ekipman gerekmektedir. Deşarj büyüklüğünü ve frekansını izlemek için stator kamalarının altına stator oyuk kipleri yerleştirilebilir. Eğer altı aylık bir süre boyunca PD seviyeleri iki katına çıkıyorsa bu bir endişe uyandırmalıdır. Hemen makine açılmalı ve görsel olarak incelenmelidir. PD aktivitesinin bazı tiplerini en aza indirebilmek için bobin yüzeylerine özel korona önleme tedavisi uygulanabilir. Faz faz deşarjları için de faz koruma düzenlemeleri kullanılabilir. Bir diğer arıza rotor sargı bozulmasıdır. Hava soğutmalı rotorlar bazen şiddetli rotor sargısı bozulması ve yer değiştirmesi hataları geliştirir. Bu durum kısa devre sargılara veya elektriksel topraklamaya neden olur. Bozulma, sargı sonu blokaj desteklerinin kötü tasarımından veya rotor bobinlerinin sarım uzamalarından kaynaklanabilir. Üst sarım uzama sıklığı uç sarımları ve tespit halkası arasında yetersiz kayma düzleminden kaynaklanır. Rotor bobinlerinin düzgün tasarımı ve aksiyel yükler altında bobinlerin iyi desteklenmesi bu tür sorunları engeller. Blokaj tasarımının iyi olması

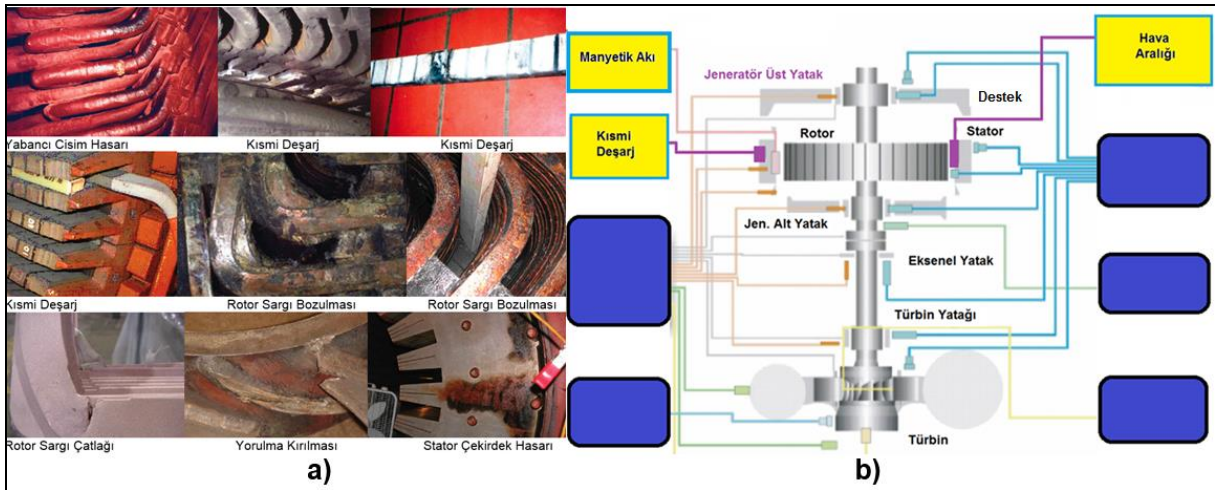
bobin desteğinin geliştirilmesini sağlar. Rotorun veya statorun aşırı ısınması yalıtım kaybına, sarım kısa devrelerine ve muhtemel toprak hatalarına neden olabilir. Aşırı ısınma, orijinal tasarımdaki veya anormal çalışmalardaki problemlerden kaynaklanabilir. Rotor yüzeyindeki koyulaşmış alanlar anormal çalışmanın neden olduğu tipik aşırı ısınma alanlarının belirtisidir. Kısa süreli aşırı ısınma, yalıtım bileşenleri veya oluk takozlarının kaymasından kaynaklanan tıkanmış havalandırma kanallarından olabilir. Bu yüzden rotor takozları sıkıca yerine oturtulmalıdır. Soğutma kanalları açık tutulmalıdır. Kirli yağdan ve diğer kimyasallardan kaynaklanan kirlilik, bir türbin/jeneratör üzerinde tahribat oluşturabilir. Gaz saflığı hidrojen soğutmalı jeneratörlerin verimli çalışması ve soğutulması için kritik öneme sahiptir. Jeneratöre sızan yağ hidrojen sağlığını düşürür. Bu yüzden makine hata vererek çevrim dışı olur. Hava soğutmalı makinalar için kir ve toz daha fazla problem oluşturmaktadır. Bu problemin en sık karşılaşılanı elektriksel topraklamadır. İyi bir bakım kirliliği önler. Hidrojen kurutucular, yağ ve su kaçaklarının sinyalleri için sızıntı dedektörleri ve hava soğutuculu makinalar için filtreler gerektiğinde temizlenmelidir. Polarizasyon indeks testleri rotor sargısının genel temizliğinin iyi bir gösterimini sağlar. Birçok jeneratör bileşeni çatlamayı başlatabilen yorulma gerilimlerine karşı hassastır. Döngüsel işlemlerden kaynaklanan düşük çevrimli yorulma kırılması, rotodaki dövme diş üstleri ve oluklu bölgeler, oluklu kamalar, yaylı segmanlarda meydana gelebilir. Bakırdaki düşük devirli yorulma gerilimlerine örnek olarak rotor sargı çatlaklarını örnek gösterilebilir. Dönen pervane kanadı ise yüksek çevrimli yorulma kırılmasına örnektir. Dönen pervanelerde genellikle arıza kaynak birleşim yerinde olmayıp kanadın taban alanında oluşur. Düzenli tahribatsız muayene(NDE) ile arıza oluşmadan çatlak tespiti yapılabilir. Ultrasonik, ıslak florasan manyetik parçacık, endüksiyon akımı ve basit boya testlerinden herhangi birisiyle de bu muayene yapılabilir. Gerilme aşınma çatlaması, manyetik olmayan tespit çemberinde, özellikle 18Mn-5Cr alaşımli çelikten yapılmış ise oluşur. Yüksek gerilmelerin varlığı, nem veya klorürler bu malzemede çatlama ve çukurlaşma başlatır. Çatlaklar saatte 0.0001 inç kadar hızla büyüyebilir. NDE, ultrasonik ve boya testleriyle çatlak erken tespit edilebilir. Diğer arızalar ise titreşim ve stator kama gevşekliliği ve stator çekirdek hasarıdır. Stator sargısı son sarım titreşimi bobin yalıtımını aşındırabilir, bir toprak arızası oluşturabilir veya bobin sarmalının

kopmasına neden olabilir. Bu durumda aşırı adlandırılan parçalar stator bobinlerini yuvalarında sıkı tutmak ve titreşimi en aza indirmek için çok önemlidir. Yine stator çekirdeği de zaman içerisinde gevşeyerek titreşime yol açabilir [27]. Çizelge 1' de jeneratör sisteminde oluşabilecek muhtemel

ısınlma oluşturur. Kamalar ya da takozlar diye arızalar ve izleme teknikleri [1], Şekil 1a' da jeneratör parça arızaları ve Şekil 1b' de de sürekli izleme sistemine ait ve çalışmamızda açıklık getireceğimiz ölçüm parametreleri gösterilmektedir [2].

Çizelge 1- Jeneratör Sisteminde Karşılaşılabilecek Arızalar ve İzleme Teknikleri [1]

Muhtemel Arızalar	İzleme Teknikleri		
	Hava Aralığı	Kısmi Deşarj	Manyetik Akı
Oluk ve korona deşarji, ark oluşumu	-	√	-
Stator çekirdek titreşimleri	-	-	-
Stator çubuk titreşimleri	-	√	-
Gevşek/kısa devreli stator çubukları	-	-	√
Tabakalar arası çekirdek kısa devreleri	√	-	-
Stator çub. bir kısmının hava aralığı içinde olması	√	-	-
Çekirdek havalandırması	-	-	-
Dönel çekirdek alanı	-	-	√
Hava aralığında anormallikler	√	-	√
Rotor kutbunun çemberden sapması	√	-	-
Hava aralığına kutup/çubuk göçü	√	-	-
Statorun çemberden sapması	√	-	-
Kısa devreli alan sargısı/çubuk sargıları/telleri	-	-	√
Stator çevresinin hareketi	-	-	-
İkazda hava aralığı	-	-	-



Şekil 1- a) Jeneratör Parça Arızaları, **b)** Jeneratör Sürekli İzleme Sistemi [2]

3 JENERATÖR HAVA ARALIĞI

Jeneratördeki en önemli ölçümlerden birisi rotor ve stator arasındaki “hava aralığı” ölçümüdür. Bu ölçüm birçok jeneratör arızası ile ilgili bize önceden bilgi verir. Jeneratör içerisine çepeçevre monte edilmiş kapasitif hava aralığı sensörleriyle her bir kutup geçişi sırasındaki hava aralığı ölçülerek izlenebilmektedir.

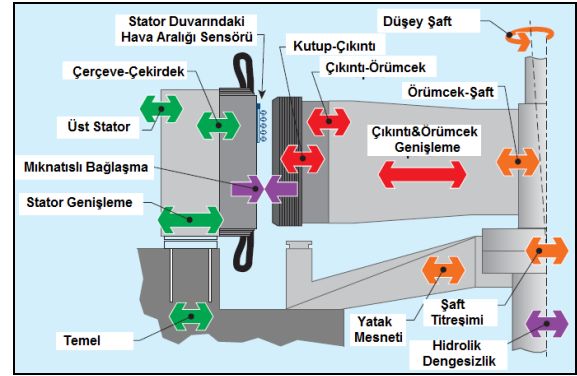
3.1 Rotor Stator Açıklığını Etkileyen Faktörler

Hava aralığı mekanik, termal, elektromanyetik ve hidrolik bileşenlerden etkilenir. Bu bileşenler hidro jeneratör genel durumu üzerinde ve dinamik davranışında bir etkiye sahiptir. Rotorun herhangi bir radyal hareketi, şaft ve stator parçaları ve de bu parçaların kurulumu hava aralığını etkilemektedir (Şekil 2)[3]. Hava aralığı ölçümlerinin yapılması ve anlık kaydedilmesiyle birçok jeneratör sorunu ortaya koyulabilmektedir. Hatta bu parametrenin diğer parametrelerle ilişkilendirilmesi suretiyle makinalardaki sorunların nedenlerini belirlemek çok daha basit hale gelmiştir. Büyük ve yavaş dönen bu makinalarda hava aralığı ölçümleri, problemlerin kesin nedenlerini ölçerken titreşim parametresi problemlerin etkilerini ölçmektedir.

Şekil 2’ de gösterildiği üzere hidroelektrik santrallerde bir jeneratörün operasyonel dinamikleri, hava aralığı içerisindeki mekanik etkiye, manyetik kuvvetlere ve geometriye bağlıdır[3]. Zayıf rotor ve stator geometrisi nedeniyle artan sorunların ortaya çıkması hava aralığı izlemenin giderek büyük önem kazanmasına neden olmaktadır[4]. İyi sonuçlar için birden çok ölçüm yapmakta fayda vardır. Gerçek geometri, her sensör için hava aralığı sinyalinden rotor titreşim etkilerinin ve çalışma çıkışlarının ayrılmasıyla elde edilir. Titreşim ölçümleri ve çalışma çıkışlarının etkisi rotor merkez dinamiklerini izlemek için kullanılır ve bu durum çeşitli çalışma modlarında değişiklik gösterir. Titreşim ölçümleri ve çalışma çıkışları, rotor şeklinin neden olduğu gerçek minimum

hava aralığını ve rotor merkezi ile stator ve ideal merkez pozisyon arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılır[5]. Çeşitli tiplerden jeneratörlere sahip birkaç santralde aşağıdaki parametrelerin belirlenmesi kolaylıkla yapılabilmektedir[5].

- Rotor ve stator kaçıklığı,
- Kötü rotor geometrisi,
- Stator geometrisi değişiklikleri,
- Dinamik rotor sapma çizgisi.



Şekil 2 - Rotor-Stator Açıklığını Etkileyen Faktörler [3]

3.2 Hidrolik Ünite Toleransları

Hidrolik ünite toleransları Kanada Elektrik Derneği (CEA) ve Hydro-Québec tarafından 20 yılda oluşturulmuştur ve oluşturulan kılavuz VibroSystM tarafından kullanılmaktadır[3]. Kabul edilebilir toleranslar beş ile on beş yıl hizmetteki jeneratör için uygulanmaktadır[13]. Kritik toleranslar acil eylem gerektiren jeneratörleri gösterir. Değerler nominal hava aralığı yüzdesi olarak ifade edilir. Bazı makinalar uzun bir süre için kritik seviyelerin ötesinde çalıştırılabilir ancak bazıları da hemen arıza verebilir[6]. Çizelge 2’ de hava aralığı toleransları gösterilmiştir.

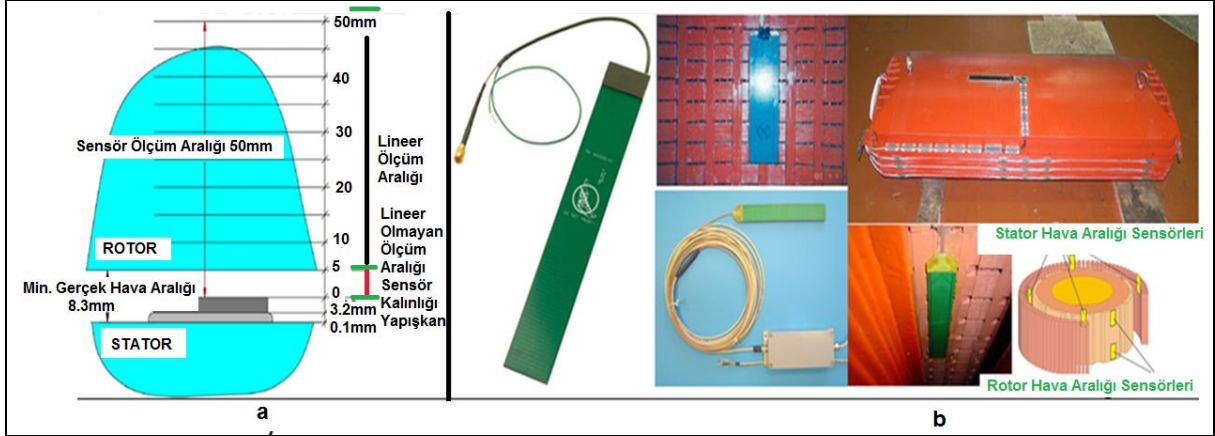
Çizelge 2- Hidro Jeneratörler İçin Hava Aralığı Toleransları [3,6]

Parametreler	Kabul Edilebilir Tolerans Değerleri		
	Montaj	Kabul Edilebilir	Kritik
Maksimum Hava Aralığı Değişimi	<13%	13-20%	> 30%
Stator Daireselliği	<7%	7-20%	> 20%
Stator Eş Merkezlilik	<5%	5-10%	> 10%
Rotor Daireselliği	<6%	6-10%	> 10%
Rotor Eş Merkezlilik	<1.2%	1.2-4%	> 4%
Minimum Hava Aralığı	> 85%	85-50%	< 50%

3.3 Hava Aralığı Sensör Sisteminin Montajı

Hava aralığı sensörlerinin tasarımı kolaydır ve imalatında yalıtılmış malzemeler kullanılmaktadır. Bu durum hava aralığı sensörü için büyük bir avantajdır. Bu avantaj bizlere montaj kolaylığı sağlamaktadır[8]. Hava aralığı sensörü stator duvar levhaları üzerine monte edilir. Ölçüm ucu rotor kutuplarına doğru bakar ve kutup yüzeyi ile hava aralığı sensörünün yüzeyi arasındaki mesafeyi ölçer.

Hava aralığı vericisi üretim sırasında kalibre edilmektedir. Yüksek frekanslı taşıyıcı sinyal öncelikli olarak işlenir ve doğrusallaştırılır. Sonra hava aralığı cihazı, ölçülen hava aralığı mesafesine orantılı olarak bir gerilim veya akım oluşturur. Hava aralığı cihazı 1kHz' e kadar düz bir frekans cevabına sahiptir ve 100Hz (120Hz)'lik kutup geçiş frekansının düzgün aktarımını sağlar.



Şekil 3-a) Minimum Gerçek Hava Aralığı-Ölçüm Aralığı [15], **b)** Hava Aralığı Sensörleri ve Jeneratör Üzerine Yerleştirilme Pozisyonları [4,7-8]

Öncelikle hava aralığı sensörlerinin monte edileceği yerler belirlenir. Sonra sensörler hava aralığının içerisine 20 ila 30 cm derinlikte ve kutbun yüzü sensörün ölçüm yüzünü kavrayacak şekilde monte edilir[14]. Hava aralığı sensörünün on metrelik entegre bir kablo uzunluğu vardır ve bu kablo dört kutuplu bir konektörle sonlandırılır. Montajda önemli olan makinenin işletimi sırasında cihaza erişilebilir olmaktır. Elektrik sinyalleri, özel çok damarlı zırlı kablolarla merkezi izleme ünitesine aktarılır. Hava aralığı sensörlerine ek olarak kutbun fiziksel referansını tanımlayan bir senkronizasyon probu vardır. Bu prob veri toplama sistemi tarafından kullanılan devir başına bir tetikleme darbesi sağlar[7]. Makinenin boyutu ile hava aralığı sensör sayısı arasında bir ilişki mevcuttur. Normal olarak stator etrafında 90°'lik düzenlemeyle dört hava aralığı sensörünün kullanımı idealdir. Hava aralığı sensörleri statorun üst tabakasına monte edilmelidirler. Çünkü statorun alt kısmı, taban düzleminde emniyete alınmıştır ve statorun üst kısmından daha az hareket sergiler. Şekil 3 a' da Mikrotrend uygulamalarındaki ölçüm aralıkları gösterilmiştir.

Şekil 3 b ve Şekil 4' de hava aralığı sensörleri ve jeneratöre montaj durumları gösterilmiştir. Hava aralığı sensörlerini hem rotora hem de statora monte etmek mümkündür. Yalnız

rotorda oluşan merkez kaç kuvveti rotora yapıştırılmış sensörler açısından sorun teşkil edebilir. Rotordaki bu riskten dolayı hava aralığı sensörlerini stator iç yüzüne düzenli aralıklarla yerleştirmek daha mantıklıdır. Genellikle küçük makinalarda 4 sensör 90° derece aralıklarla yerleştirilmelidir. Çapı 7m' den büyük rotorlar için 6 sensör, 10m' den büyük rotorlar için 8 sensör ve 13m' den büyük rotorlar içinde 12 sensör gereklidir. Yeterli alan olması durumunda sensör genişliği yuva genişliğinden daha büyükse montaj için bir destek adaptörü kullanılmalıdır. Birinci kutbun tam dalga formunu yakalamak için tako jeneratör tetiklendiğinde hava aralığı sensörü bir ara kutbun önünde veya iki orta kutbun arasında olmalıdır. Sonuç olarak 4 sensörlü düzende 90° aralıklarla, 6 sensörlü düzende 60° aralıklarla düzenleme yapılmalıdır.

3.4 Hava Aralığı İzleme Sistemi

Hava aralığı ölçümleri kapasitif tip sensörler kullanılarak yapılır. Bu sensörler 1,2mm' den 2,5mm' ye değişen kalınlıkta düşük profilli sensörlerdir ve anlık olarak dönen rotor kutup profili hakkında bilgi veren ölçümler sunar. Hava aralığı ölçümü rotor ve stator geometrilerini daha iyi anlamamızı sağlar. Bu geometriler de makina davranışları hakkında bilgi verir. Hava aralığı izlemenin özü, kutup profil analizinden rotor pozisyonunu belirlemek,

çerçeve de her hangi kutup gevşemesini görmek, hareket başlangıcını tespit etmek ve stator sürtünmelerini önlemektir. Monte edilmiş olan sensörlerin sayısına bağlı olarak bir hava aralığı analizi aşağıdaki parametrelerin kimliklerini ortaya koyabilir [5].

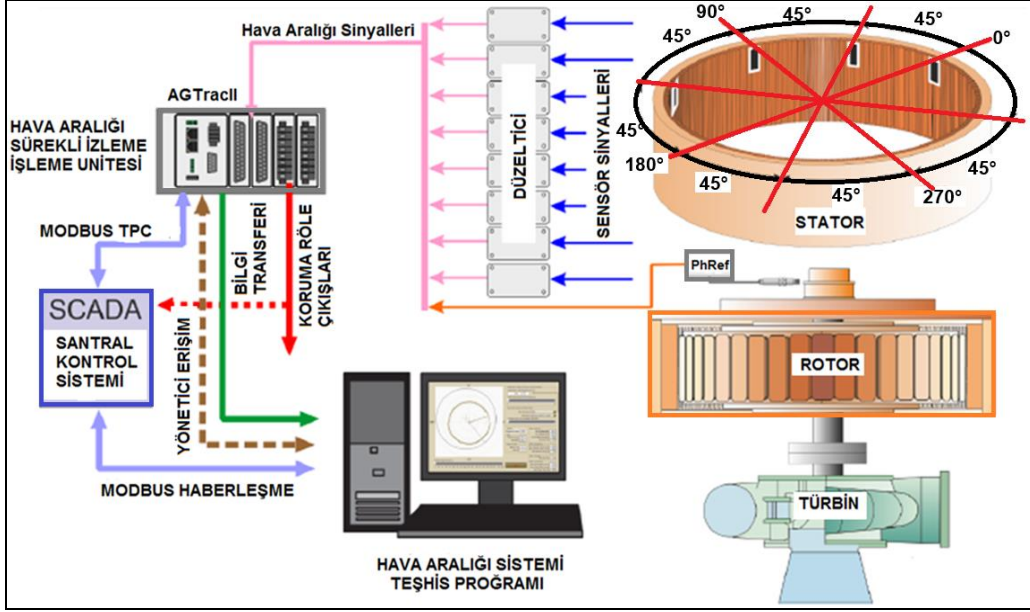
- Rotor geometrisi/dairesellik,
- Stator geometrisi/dairesellik,
- Rotor eşmerkezlilik,
- Stator eşmerkezlilik,
- Referans pozisyondan hem dinamik hem statik rotor merkezi,
- Referans pozisyondan stator merkezi.

Analiz yapabilmek için en az dört sensör kullanılır. Ancak sensör sayısı şu kadar olmalıdır diye bir ön görüde bulunmak doğru değildir. Stator iç çapı, çekirdek yüksekliği, üst

ve alt boyutlar arasındaki uzun stator çekirdeği farklılıkları sensör sayılarını etkiler. Tam teşhis sürecinde kutup profillerini ve gerçek kutup sayılarını belirlemek için bir senkron sensöre ihtiyaç vardır. Bu sensör aynı zamanda jeneratörün dönme hızını ölçmek için bir girdi olarak da kullanılır. Hava aralığı sensörlerinden toplanan verilerin analizini desteklemek adına makinanın aktif ve reaktif güç seviyelerini kaydetmek için de bir manyetik akı sensörü monte etmek her zaman tavsiye edilir. Ölçüm sinyalleri, gerçek zaman analizi için kullanılan bir kontrolöre bağlanır ve tüm veri masa üstü bilgisayarına gönderilir. Masa üstü bilgisayarında veri tabanı ve analiz yazılımına atanır. Şekil 5' de tipik bir sisteme ait genel görünüş verilmiştir [5].



Şekil 4 - a) Stator Sargı Çubukları, b) Iisu HES Rotor İndirme İşlemi ve Jeneratör Hava Aralığı Görünümü, c) Statora Yerleştirilen Hava Aralığı Sensörü



Şekil 5 - Hava Aralığı İzleme Sistemi [5]

En iyi uygulama, tam bir makine davranışının resmini elde edebilmek adına diğer izleme modülleriyle hava aralığı modülünü birleştirmektir. Bu durum oluşacak herhangi bir gelişim problemlerini de aydınlatmak adına kullanışlıdır. Hava aralığı dinamiklerinden kaynaklanan birçok düzensizlik ve farklılık makinanın titreşim cevaplarında görülür. Bu nedenle makinanın genel durumunu analiz ederken titreşim ve hava boşluğunu birlikte ele almak en doğru sonuçlara ulaşmamızı sağlayacaktır.

3.5 Hava Aralığı İzlemeye Yönelik Uygulama

3.5.1 Dairesellik ve Eş Merkezlilik

Hem rotorun hem de statorun şekli, ünitelerin dinamik cevaplarında bir etkiye sahiptir ve makine durumunun tam anlaşılması açısından önemli bilgilerin edinilmesini sağlar. Aşağıdaki Francis örnek ünite, a2*25MW gücünde çıkık kutuplu(10) ve 600RPM hıza sahiptir. Hem hava aralığı hem de titreşim izlemeye yönelik bir kurulumdur. Hava aralığı sistemi, düzlemde dört sensör (stator çekirdeğinin üstüne yakın) ve stator dibinde iki sensörden müteşekkildir. Stator çapı yaklaşık 4100mm (161 inç)' dir. İzleme sistemi aşağıdaki ölçümleri içermektedir [5] :

- Hava boşluğu,
- Manyetik akı,
- Bağlı şaft titreşimleri,
- Mutlak yatak titreşimleri,
- İşleme parametreleri(Aktif ve Reaktif güç, düşü, cebri boru akışı),
- RPM ve Anahtar fazör.

İlk ölçümler mekanik boşta çalışma sırasında nominal senkron hızda yapılmıştır. Data

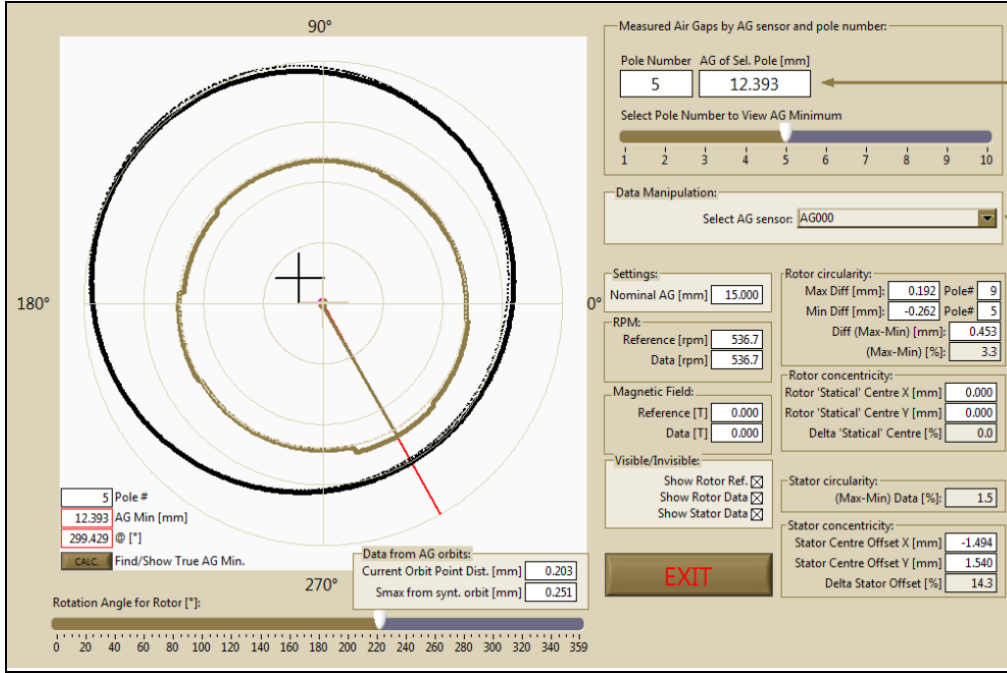
analizleri stator ve rotor arasında büyük bir eş merkezlilik farklılığını göstermektedir. Buradan da statorun merkez dışı olduğu anlaşılmaktadır[5]. Makina eksantrikliği, mekanik çalışma sırasında zıt sensör çiftlerinden elde edilen veri analiziyle belirlenir. Analiz aynı zamanda hava aralığı sinyalinden ölçülen titreşim bileşenini de göstermektedir. Hava aralığı analiziyle elde edilen veriler aşağıdaki sonuçları vermektedir[5]:

- Hava aralığı 5 nolu kutup geçtiğinde 299 derecede 12,39mm' dir,
- Rotor eşmerkezliliği - Rotorun doğal(ideal) merkezindeyken ki durumu referans pozisyon durumudur,
- Stator eşmerkezliliği 14,3%,
- Rotor daireselliği 3,3%,
- Stator daireselliği 1,5%,
- Hava boşluğundaki titreşimler- 0,251mm(0.010 inç).

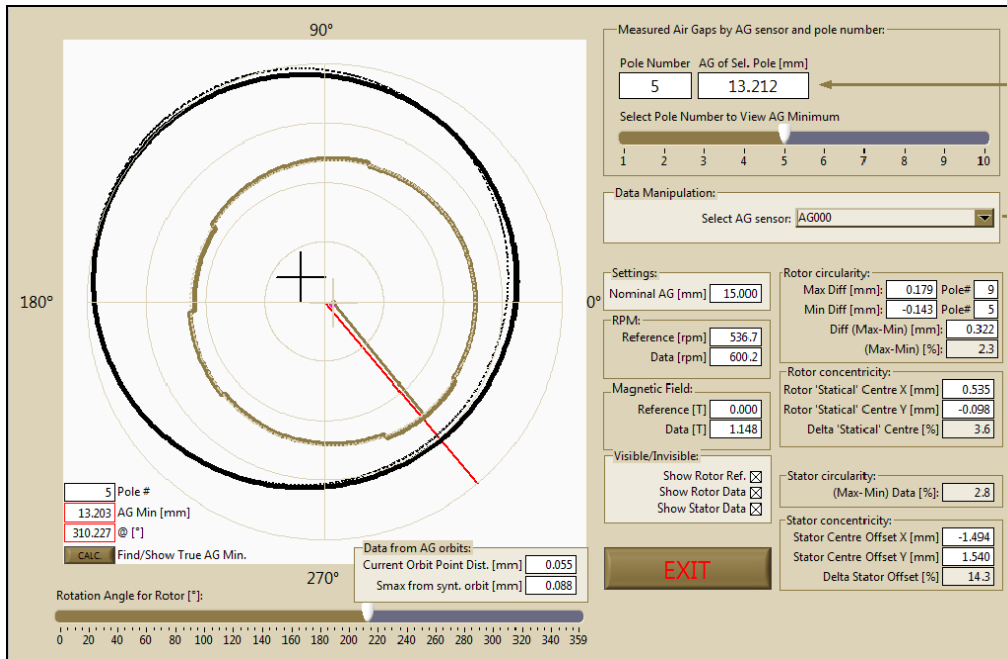
Bu sonuçlar Şekil 6' daki analiz ekranında gösterilmektedir. Rotor ve stator arasındaki başlangıç eksantrikliği, makine rotor alanına ikaz uygulandığında olası bir problemin görülebilir olduğunu ve rotor şeklide rotor daireselliğinin 3,3% olduğunu göstermektedir. Bir kez alan ikazlaması olduğunda manyetik alandan dolayı rotor merkezden kayar (Şekil 7). Aynı zamanda şaft titreşimleri makine dengeleme etkisiyle ikazdan sonra azalır. Mekanik boşta çalışmada yüksek titreşimler olmadığından rotor dengelemesi gerçekleşir. İkazlamayla makina, nispeten küçük titreşimlerle nominal gücüyle çalışabilir. Şekil 7' de gösterildiği üzere ikazdan sonra hava aralığı analiziyle elde edilen bilgi aşağıdaki sonuçları vermektedir[5]:

- Hava boşluğu 5 nolu kutup geçtiğinde 310 derecede 13,203mm' dir,
- Rotor eş merkezliliği 3,6% - Rotor ideal pozisyondan merkezden kaçmıştır,
- Stator eş merkezliliği 14,3%-İkazla rotor pozisyonu değişecektir,
- Rotor daireselliği 2,3%,
- Stator daireselliği 2,8%,
- Hava boşluğundaki titreşimler-0,088mm(0.0035 inç).

Stator içindeki rotorun pozisyonu, stator ve rotorun merkez dışı olmasının sonucu olarak ikazla birlikte değişmiştir. Bu gibi durumlarda dengesiz statik manyetik alan bir çekme kuvveti oluşturur. Rotor bu merkez etrafında döner ve aynı zamanda titreşimler müşterek olarak rotor dinamik eksantrikliği olarak bilinir[5]. Ayrıca dinamik shaft eğilmelerini de hava aralığı analizi ile yapabiliriz.



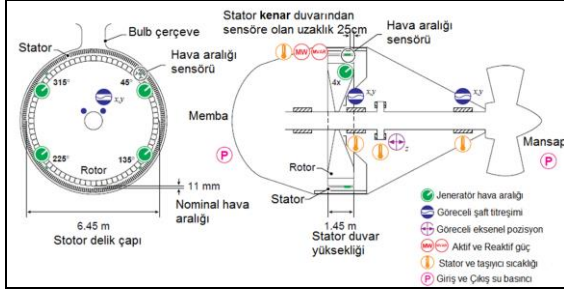
Şekil 6 - İkaz Uygulamasından Önce Hava Aralığı Analizi-Başlangıç Şartı [5]



Şekil 7- İkazdan Sonra Hava Aralığı Analizi [5]

3.5.2 Bulb Ünite Rotor-Stator Hava Aralığı Problemi

Aşağıdaki örnekte stator çekirdeğinin çevresine toplamda dört adet hava aralığı sensörü 45° , 135° , 225° ve 315° lik açılarla monte edilmiştir. Bu durum Şekil 8' de gösterilmiştir.

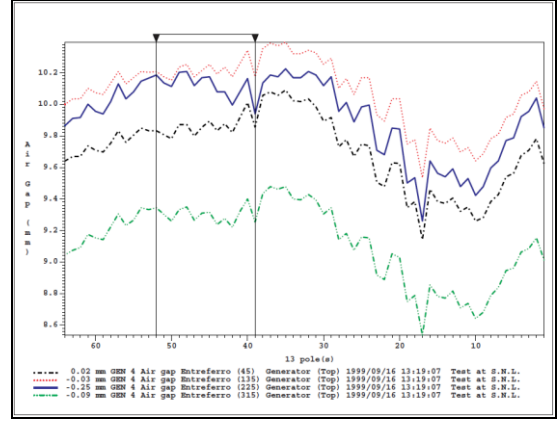


Şekil 8- Hava Aralığı Sensör Yerleşimleri ve Stator Duvarına Eklenmiş Diğer İzleme Parametrelerini Gösteren Bulb Ünite En Kesiti [9]

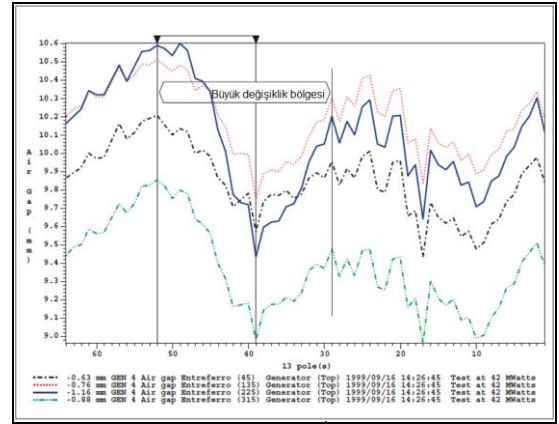
ZOOM sisteminin testi esnasında 225° lik açıyla yerleştirilmiş olan dördüncü ünitenin rotor-statorunda bir anormallik olduğu gözlenmiştir [9]. Hava aralığı veri yorumlamasını kolaylaştırmak için VibroSystM, rotor kutupları yerine zamana bakarak hava aralığı ölçümlerine başvurmuştur [10].

Şekil 9' da kararlı rim konumu (kutup 59) ile en kötü durumdaki rim konumu (kutup 39) arasındaki değişimler gösterilmiştir. Kutup 52 ile kutup 29 diğer sensörlerle ve Şekil 9 ile karşılaştırıldığında 225 derecedeki sensör için dinamik form değişimi Şekil 10' da gösterilmiştir. Dört hava aralığı sensöründe aynı işaretin görülmesi bir kalıcı tümseğin oluştuğunun kanıtıdır.

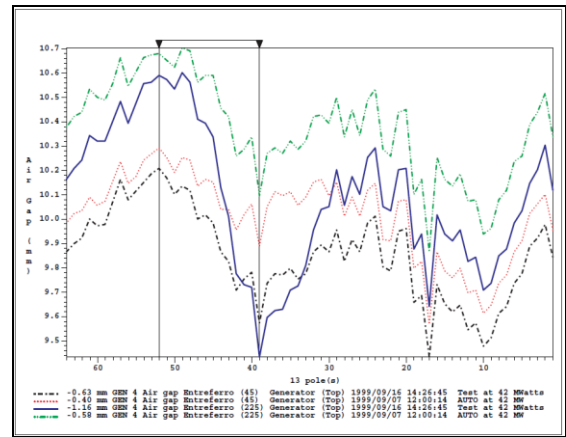
Geçici tümsek ise dört hava aralığı sensöründe farklı işaretlere neden olur. ZOOM yazılımını kullanarak tümsek genişliğinin değişiminin hangi rotorun dönme açısına bağlı olduğunu belirlemek mümkündür. Maksimum tümsek genişliği (veya en kritik hava boşluğu) 225° lik sensörün önünden 39. Rotor kutbu geçtiğinde meydana gelir [9]. Şekil 11'de ki gösterimde VibroSystM 225° ve 45° lik sensörlerin grafiğini çizmiş ve bunları bir hafta önceki benzer değerlerle karşılaştırmıştır. Çizelge 3' de bu kayıt altına alınmıştır [9].



Şekil 9 - Yüksüz Hızda (S.N.L) Rotor Profillerini Gösteren Dört Sensöre Ait Hava Aralığı İşaretleri [9]



Şekil 10 - Tam Yükte (42MW) Dört Sensörün Hava Aralığı İşaretleri [9]



Şekil 11- 45 ve 225 Derecedeki Karşılıklı Sensörlerde Hava Aralığı İşaretlerinin Dokuz Günlük Bir Süre Boyunca Hızlı Bozulmasının Gösterimi [9]

Çizelge 3- Dokuz Günlük Süre İçerisinde Kutup 39 (büyük rotor rim hareketinin yeri) için Hava Aralığı Farklılıkları[9].

SENSÖR	KUTUP 39/42MW (mm)		
	7 Eylül 99	16 Eylül 99	Fark
45°	9.89	9.57	-0.32
135°	10.17	9.74	-0.43
225°	10.10	9.44	-0.66
315°	9.37	8.98	-0.39

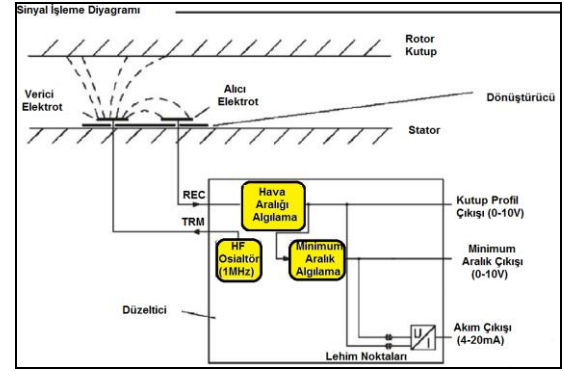
3.5.3 Compass ile Hava Aralığı İzleme

Vibro-meter tarafından geliştirilen Compass izleme sistemiyle rotor problemleri ve stator hataları rahatlıkla izlenebilmektedir. Vibro-meter tarafından üretilmiş hava aralığı ölçüm konsepti Şekil 12’ de verilmiştir. Hava aralığı ön ucunda, bir sensör ve bu sensörü sinyal işleyici ünitesine bağlayan bir çift koaksiyel kablodan oluşan basit bir yapı mevcuttur [16]. Sinyal işleyici ünite izleme durumu için kutup profil çıkışı ve koruma izlemesi için minimum hava aralığı çıkışı olmak üzere iki çıkış sağlar (0-10V). Şekil 13’ de hava aralığı ölçüm konseptleri ve Şekil 14’ de de rotor profilleri gösterilmiştir [11].

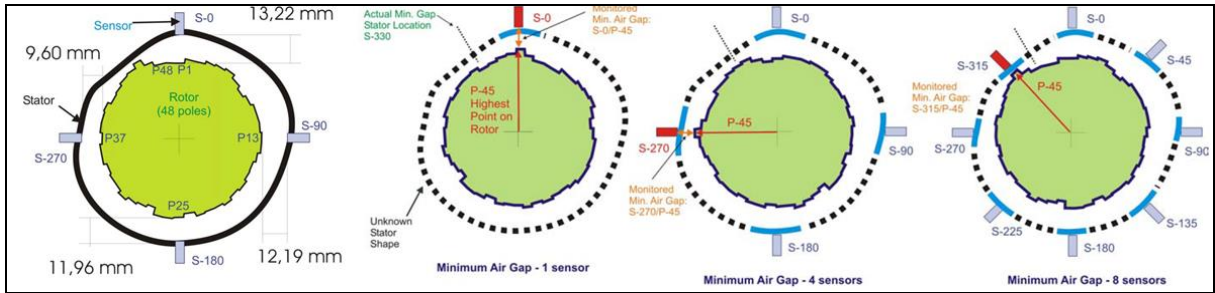
4 MANYETİK AKI

Yukarıda da bahsedildiği üzere stator sarımlarının, yatakların ve hava aralığının çevrimiçi izlenmesi işi hidro jeneratör tesis operatörleri için çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte rotor alan

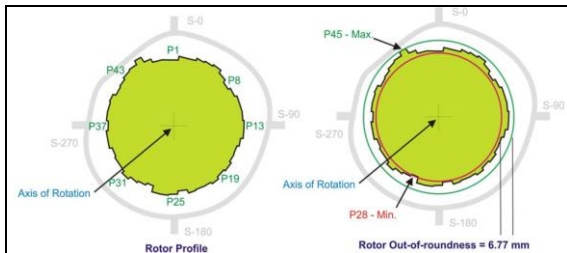
sargılarının durumunu açıkça belirleyen bir çevrimiçi izleme mevcut değildir. Çıkık kutup alan sargıları çok güvenilir olmasına rağmen yük atma/yük alma durumlarında alan sargılarında kısa devrelerin olup olmadığından emin olmak için kutup düşümü testi yapmak gerekir. Buda önemli bir zaman kaybıdır ve durma durumunda da etkili bir netice vermeyebilir. İşte bu sebeple hava boşluğuna yerleştirilen bir prob vasıtasıyla her bir kutbun dönüş anında manyetik akısını ölçme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Orta ve büyük boy jeneratörler ile pompaj depolamalı jeneratörlerde yaygın çıkık kutup rotorlar ve bu rotorlarda da şerit kenar tipi sargılar kullanılır. Kısaca sargı, kutup parçası etrafında bir resim çerçevesi gibi üretilen bakır şerittir. Bu sargılar cam elyaf takviyeli epoksi ile koruma altına alınmıştır.



Şekil 12 - Hava Aralığı Ön-Uç Blok Şeması (Vibro-meter) [11]



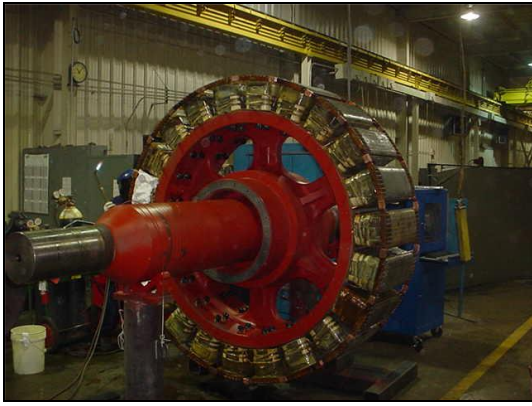
Şekil 13 a – Hava Aralığı Ölçüm Konsepti, b- Minimum Hava Aralığı İçin Bir Jeneratör üzerindeki 4-8 Sensör Durumunun Karşılaştırılması [11]



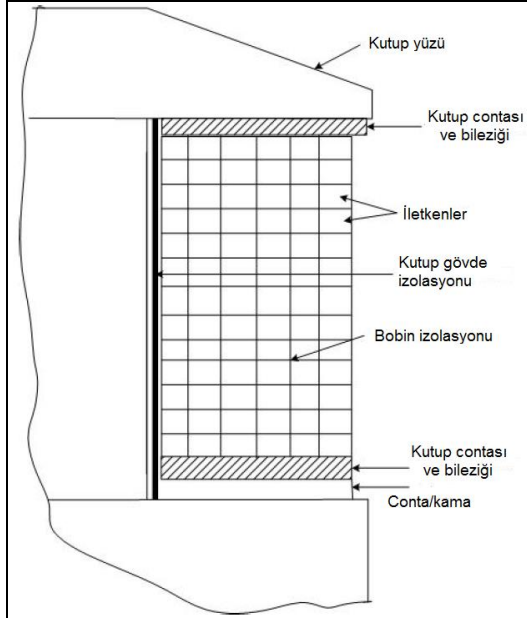
Şekil 14- Rotor Profili, Yuvarlaklık. Bozulması ve Denge Hesaplama Konsepti [11]

Gerek bir bakırın komşu bakır ile gerekse bakır ile rotor kutbu arasında izolasyon sağlanmalıdır. Buna rağmen yıllar geçtikçe rotor sargılarında yaşlanma buna bağlı olarak kısa devreler oluşur. Bu durumda toprak arızalarına sebep olur. İzolasyon bozulması aşırı ısınma ve kirlenmeden oluşur. Kısa devreler dengesiz manyetik çekmelere bu da yatak titreşimlerinin artmasına neden olur. Şekil 15’ de 20 kutuplu çıkık kutuplu senkron motora ait bir rotor fotoğrafı gösterilmiştir [17]. Çıkık kutup tasarımının iki temel tipi vardır.

Bunlardan birisi eski tip kutup tasarımıdır ki bu tip hala 1000HP' den daha az motorlarda kullanılır ve çok katmanlı tel sarımlı tip olarak adlandırılır. Bu tasarımda mıknatıs tel kutup etrafına sarılır (Şekil 16). Mıknatıs tel genellikle dikdörtgen kesite sahiptir ve kutba sarılmış yüzlerce sarım vardır, birçok mıknatıs teli katmanlar halindedir. Sarım izolasyonu mıknatıs tel izolasyonudur. Eksenel yönde bakıldığında plakaların belli bir düzende şekillendirildiği görülür. Merkez kaç kuvvetine karşı sargıları desteklemek için bu kutup başı(statora en yakın olan rotor kutup parçası) belli bir şekilde olmalıdır. Toprak yalıtımı gibi hareket etmesi için yalıtım contaları ve şeritleri mıknatıs tel ve plakalar arasına yerleştirilir.



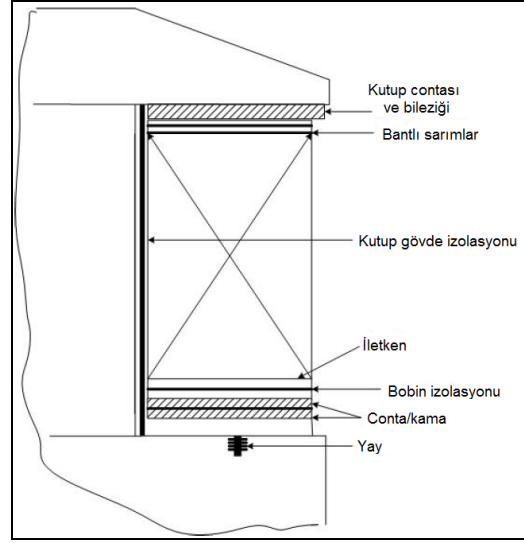
Şekil 15-Bir Çıkık Kutup Senkron Motora Ait Rotor [17]



Şekil 16-Çok Katmanlı Tel Sarımlı Tasarım [17]

Büyük makinalar için şerit kenar tasarımı tercih edilir. Çünkü bu tasarımla dönme kuvvetlerine daha iyi dayanmak mümkün olabilmektedir. Bu

durumda ince bakır şerit bir resim çerçevesi şeklinde oluşturulur. Öyle ki çerçeve kutup plakaları üzerinde kaydırılabilir (Şekil 17).



Şekil 17- Bakır Şerit Kenar Çıkık Kutup Tasarımı [17]

Plaka izolasyon ayırıcıları(epoksi cam plakalardan veya Nomex TM malzemelerden yapılır) her bakır çerçeveyi bir diğerinden izole etmek için bobin izolasyonu gibi davranır. Bazı bakır çerçeveler özellikle kutup yüzüne yakın olanlar, kayma mesafesini artırmak için bakır şerite doğru bir izolasyon bandı uygulanabilir. Bobin izolasyonundan band ve ayırıcılar ve bakır resim çerçevesi bobin yapmak için silsile içinde bağlanır.çok tabakalı tasarımlarda sargılar izolasyon contaları ve şeritleriyle kutup gövdesi topraktan izole edilir (Şekil 17). Çoğunlukla tüm kutup çeşitli bileşenlerin birbirine bağlanması için bir izolasyon sıvısı içerisine daldırılabilir [17]. Termal ve mekanik gerilmeler kademeli olarak bobin ve toprak izolasyonunda yaşanmalara neden olacaktır. Ayrıca buna ilave olarak rotor kutupları üzerinde kısmen iletken kirlenmesi olabilir ki buda izolasyonun düşmesine sebep olabilir. Eğer bir toprak hatası oluşursa toprak hata dedektörleri makinayı otomatik kapayacaktır. Bu otomatik kapamalardaki her hata bobin izolasyonunun seviyesini düşürür. Bakır bobinlerdeki bu kısa devrelerin bazıları makinada hata oluşumuna neden olmaz. Bunun yerine rotor kutbundaki manyetik alanın azalmasına sebebiyet verir. Bir kutuptaki manyetik alan diğer kutuplardaki manyetik alandan daha az olduğu için bu durum hava aralığına karşılık bir asimetrik manyetik güç oluşturur ve böylece devir başına bir frekansa karşılık gelen daha yüksek yatak titreşimi meydana gelir. Rotorda az sayıdaki kutupta, bu dengesiz manyetik çekmeden kaynaklanan

daha ciddi titreşimler olabilir. Çoğunlukla bir veya daha fazla kısa devre bobinler birçok durumda tolere edilebilir yüksek yatak titreşimlerine neden olur. Bununla birlikte zamanla eğer daha fazla bobin kısa devreleri olursa yüksek titreşim motoru kapatmaya zorlayabilir. Buna ek olarak fırçasız ikaz sistemli motorlar için güç sistemi motorunu senkronize etmek için kısa devre edilmiş bobinler tasarlanmış motor içerisindeki bileşen hatalarına yol açabilir. Böylece rotordaki kısa devre bobinlerine rağmen bir motor hatasına otomatik olarak yol açılmaz. Gelecekte bu durum bir sorun göstergesidir ve problemlere neden olabilir. Bu makalemizde çıkık kutuplu sargı izolasyon yaşlanma süreçlerini açıklamaktadır ve kısaca bobin kısa devrelerini sezmek için kullanılan off-line metot sunulmaktadır. Yeni on-line test gelişimi rotordaki ana manyetik akı ölçümü temeline dayanmaktadır. Bu temel bu yazımızda açıklanmaktadır. Bakım gerektiğinde daha iyi tahmine müsaade eden bu on-live test, bir kapatmaya gerek olmadan meydana gelen kısa devre olmuş sargıların sayısının zaman içerisindeki eğiliminin izlenmesine yardımcı olur. Hem hidro jeneratörlerde hem de motorlarda yeni akı test sonuçları sunulmuştur [17].

4.1 Rotor İzolasyon Bozulma Süreçleri

Rotor sargı izolasyonu termal yaşlanma nedeniyle ilerleyen zamanlarda bozulur, ısı döngü(veya yük), izolasyon kirlenmesi, hava aralığındaki parçacıklar nedeniyle izolasyonun aşınması ve şüphesiz yüksek hızda dönmeye yüksek mekanik güç oluşur [17].

4.1.1 Termal Bozulma

Modern çıkık kutup sargı dizaynları Nomex™ topraklaması ve sargıların şerit kenarlarında sarım izolasyonu kullanır. Dacron TM cam tel bobin kutuplarında yüksek sıcaklıklı emaye sarım izolasyonu ile kaplanır ve bir izolasyon sistemi sağlamak için ısıyla sertleşen reçineyle tutturulur. En az termal derecesi F sınıfı(155°C) olmalıdır. Eğer bu maddeler B sınıfı (130°C) sıcaklıklarda çalıştırılırsa bunlar 30 yıl veya daha fazla ısı yaşama sahip olur. Fakat 130°C' nin üzerindeki işlem yalıtım ömrünü kısaltır. Isıl bozulmaya en duyarlı malzemeler organik bağlı ve destek malzemeleridir(epoksi reçineler ve polyester filmler), ve yüksek sıcaklıklı ve yüksek sıcaklıkta uzun süreli, sonra daha kırılabilir hale gelir ve mekanik güç izolasyonu çatlatır. Eğer işlem sıcaklığı ve termal izlenme oranı arasındaki tolerans önemli derecede azalır sargıların içerisindeki sıcak noktadaki izolasyonun

termal ömrü de önemli derecede azalır. Bu etki eski B sınıfı izolasyon sistemlerinde çok kritiktir ve bu tür sıcak noktaların varlığını tespit etmek çok zordur. Çıkık kutuplu sargılarda termal yaşlanmanın en yaygın nedenleri aşağıda sıralanmıştır [17].

- Beklenen tasarım değerleri üzerindeki işletme sıcaklıklarında aşırı yüklenme başta gelen sebeptir.
- Yaygın olarak yüksek soğutma ortalama sıcaklıkları veya yetersiz soğutma örnek verilecek olursa yetersiz soğutulmuş hava veya soğutma suyu, veya zayıf tasarım(özellikle 3 kutup arasındaki blokaj) nedeniyle soğutma devresindeki yerel ölü noktalar, imalat veya bakım prosedürleri.
- Yetersiz ısı özelliklerine sahip malzemelerin kullanımı ve sonuç olarak tasarım sıcaklık sınırları dahilinde çalıştırıldığında kabul edilemez bir oranda bozulur.
- Uzun süreli rotor sargılarının aşırı ikazı
- Sistem voltaj dengesizliği nedeniyle rotor sargıları içerisindeki negatif ardışık akımlar.

4.1.2 Periyodik Aç-Kapa

Bir senkron motor çalışmaya başlatıldığında iki ısı kaynağı vardır. Başlıca nedeni doğrudan ulaşılarak çalıştırılan motor uygulamalarının çoğu, tek parça rotorların kutup uçlarında akımların akması sıcaklığa neden olur veya katmerlenmiş kutuplarda yastık sargısı. Ötekisi ise sargılara uygulanan birinci ikaz akımıyla üretilen sıcaklıktır. Sık başlamalar ve durmalar bakır genişleme ve büzüşmelerine neden olur. Bakır sıcaklığında artmalar ve azalmalar görülür. Çeşitli bileşenlerdeki farklı termal genişleme katsayıları nedeniyle bağlı hareket, bakır ve sarım izolasyonu arasındaki bağlı harekete neden olur ki bunun sonucu da tabiki aşınmadır. Sık başlamalar, durmalardan kaynaklı termal döngü sonuçları izolasyon sistem bileşenleriyle beraber reçinenin veya vernik bağlantılarının çatlamasına neden olur. Bu durum bileşenler arasında gevşekliğe ve bağlı harekete neden olur. Gevşekliklerin ve aşınmasının artmasına neden olur. Ayrıca eğer sargılar kendi soğuk pozisyonuna dönerken bastırılırsa bu işlemde bozulma olabilir. Kötü tasarım veya çok hızlı ya da çok sık yük değişimleri temel nedenlerdir. Açıkçası daha fazla motor başlamaları daha fazla muhtemel problemler demektir. Buna ek olarak birkaç başlama için tasarlanan motorlar, fakat işletme ve güç sistem şartları nedeniyle çok sıklıkla başlamalara maruz kalabilir, bu problemlere çokça maruz kalınabilir [17].

4.1.3 Kirlilik

Hava ayırma uygulamalarındaki rotor sargı kısa devrelerinin muhtemel nedeni kirliliktir.

Şerit kenar tip, kısmen iletken malzemeler tarafından kirlilikten eksikliklere kadar en duyarlıdır. Bu problemler yataklardan yağ sızıntısına ve yoğunlaşmadan neme kadar açık tip kapsamlı makinalarda sınırlandırılmamıştır. Birleştirilmiş parçacıklar sargıları kirlitebilir. Kirlilik kutuplar arasında arasın da engellemeye yakın bir eğilim gösterir. Bu tür problemler kirlenici maddeleri dışarıda tutmak için sargıları kapsamı nedeniyle tel bobinde muhtemelen daha azdır. Nem, kurum, toz, yağ ve toz karışımları gibi kirlerin çıkık kutuplu sargıların yüzeyini sardığında onlar sargılar ve toprak arasında iletkenlik yollarına neden olabilir. Bu elektrik geçmesi nedeniyle sargıdan sargıya bozukluklara ve toprak hatalarına neden olabilir. Bazı kimyasallar indirgenme nedeniyle izolasyon malzemeleriyle etkileşir. Organik vernikler tarafından bağlanmış asbest, pamuk fiberler, kağıt vb. gibi malzemeleri içeren eski izolasyon sistemleri nem emilimli kusurlara çok daha duyarlıdır [17].

4.1.4 Aşındırıcı Malzemelerle Aşınma

Atmosferi çevreleyen aşındırıcı tozlar, rotor sargı izolasyon yüzeylerini aşındırarak soğutulmuş hava tarafından motorun içerisine taşınır. Bobin kısa devrelerindeki sonuçlar çok katmanlı tel bobin kutup içindeki iletkenleri açığa çıkarmasına maruz bırakabilir. Ayrıca toprak hataları nedeniyle hem çıkık kutup sargılarında hem de onların bağlantılarındaki toprak izolasyonu aşınabilir. Giriş hava filtresiz açık muhafazalı makinaların çevredeki aşındırıcı malzemeleri kullanımı bu probleme neden olur [17].

4.1.5 Merkezkaç Kuvvetleri

Çıkık kutuplu rotor sargı bozukluklarının en yaygın nedenlerinden biri dönme nedeniyle sürekli merkez kaç kuvvetleriyle yüklenmesidir ve başlama ve durma tarafından periyodik kuvvetlerle uyarılma etkisidir. Merkez kaç kuvvetlerine maruz kalan rotor sargı izolasyon sistem bileşenleri bobin iletkenlerini bozmaya meyillidir ve eğer onlar yeterince desteklenmediyse bobin izolasyonu çatlar, veya termal yaşlanma veya açma kapama sonucuna göre izolasyon zayıflar. kutup sargısı yetersiz veya gevşek hale gelirse iletken ve topraklama izolasyonu aşınması nedeniyle kutuplardaki bobin titreşimi ve bobinlerin hareket etmesi sonucu ortaya çıkar. Büyük yüksek hızlı makinalarda yetersiz kutup desteklemesi, başlama ve durmalar oluştuğun sargılarda erozyon başladığında bobin bozulmasına yol açacaktır. Sargı gevşeklikleri kutup contası ve yorgunluktan iç bobin bağlantı çatlamlarına yol açar. Mekanik sargı

gerilmeleri fazla olacaktır ve eğer rotor aşırı hızda çalışıyorsa ciddi sargı hasarına neden olacaktır [17].

4.2 Kısa Devre Sargıların Off-Line (kapalı-devre dışı) Tespiti

Kısa devre olmuş sarımları tespit etmenin (ve başlangıç toprak arızaları) en yaygın yolu kutup düşümü testi yapmaktır. Kutup düşümü testinde bir AC voltaj, örneğin 120V AC, motor durduğunda pozitif ve negatif kayar bilezikler arasına uygulanır. Daha sonra her kutbun üstünde voltaj ölçülür. Eğer kısa devre sarımlar varsa bu kutup boyunca ortalama voltaj düşümünden daha küçük olacaktır. Bu testin üç önemli dezavantajı vardır [17]:

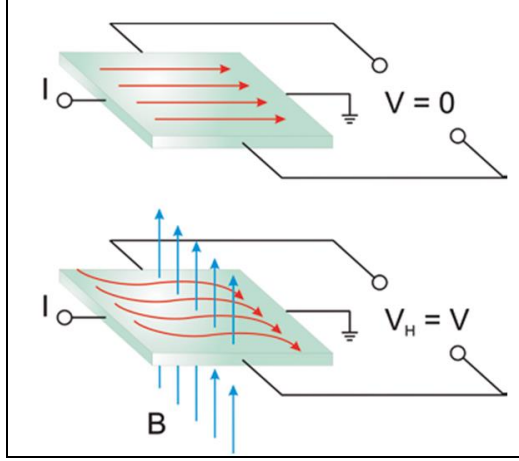
- Sadece motor kapalıyken gerçekleştirilebilir,
- Özellikle çok kutuplu büyük bir rotor üzerinde gerçekleştirmek zaman alıcıdır,
- Rotorun dönmediği durumdan beri santrifüj kuvvetler oluşmaz, böylece normal dönüş hızlarında mevcut olacak bazı kısa devreler kutup düşümü testinde oluşmayabilir. Aksine, rotor döndüğünde oluşmayan kısa devreler makine durduğunda oluşabilir.

Hava ayrımı için kullanılan motorlar genellikle her 5 yılda veya daha fazla zamanda planlı kapamalar görülebilir. Bununla birlikte her an kısa devre sarımlar meydana gelebilir ve sadece birkaç yıl içerisinde çok yüksek yatak titreşimi noktasına ulaşılabilir. Böylece 3-4 yıl önce yapılan bir test şu anki sargı izolasyonunun durumunun iyi bir göstergesi olmayabilir. Sadece bunu çevrim içi bir testle yapabiliriz. Buna ek olarak motor durduğunda bir kutup düşüş testiyle bobin kısa devreleri keşfedilebilir, arızalı kutupların yenilenmesi için gereken zamanın planlanması sağlanır.

4.3 Manyetik Akı İzleme Prensipleri

Bir rotorda akı izleme nedir denildiğinde akla jeneratör hava aralığına manyetik akı sensörü yerleştirilerek rotor kutuplarındaki alan sargı kısa devre oluşumlarının değişen manyetik akılarla tespiti gelmelidir. Tabiki manyetik akılar da manyetik akı sensörleriyle izlenebilmektedir [18]. Manyetik akı sensörü Hall etkisi ile manyetik akı yoğunluğunu ölçer. Bu ilke, 1879 yılında Dr. Edwin Hall tarafından keşfedilmiş ancak katıhal elektronığı gelişimiyle 30 yıl içinde kullanılır olmuştur. İçinden akım akan dikdörtgen bir iletken veya yarı iletken düşünelim. Manyetik alanın bulunmadığı mevcut akıma dik iletkenin en boyunca bir gerilim oluşur. Eğer dikdörtgen iletkeni dik olarak bir manyetik alan keserse Hall etkisi oluşur. Bu iletkenin genişliği boyunca bir potansiyel fark üretilir ki bu potansiyel fark, iletkene dik olan akım ve manyetik alan akı

yoğunluğu ile orantılıdır. Sensör akımını sabit sayarsak sensörün çıkış voltajı örneğin Hall etkisi voltajı V_H , her rotor kutubundan geçen manyetik alanının gücü ile doğrudan orantılı olacaktır (Şekil 18).



Şekil 18- Mevcut Manyetik Alan ve Hall Etkisi Prensibi (Manyetik alan mevcut) [11]

Yukarıda da bahsedildiği üzere radyal manyetik akı, stator dişlerine yapıştırılmış birkaç düzine sarımdan oluşan düz bir bobin(veya prob) vasıtasıyla tespit edilir. Her bir rotor kutbu akı probu tarafından süpürüldüğünde bobinde kutuptaki akıya orantılı bobinden geçen bir voltaj indüklenir. Voltaj dijital osiloskop veya analog-dijital (A/D) dönüştürücü gibi elektronik aletlerle ölçülür. Çıkık kutup bir makinada her bir rotor kutbuna karşılık radyal manyetik akı profili makinanın MW ve MVAR yüküne bağlıdır. Bir kutuptaki manyetik profilde değişim gözlenirse bunun sebebi kısa devre bobinlerdir. Rotordaki her bir kutup geçtikçe kutuptaki manyetik akı nedeniyle indüklenen voltajda bir tepe değer oluşacaktır. Voltaj daha sonra kaydedilir ve dalga formunun her bir tepe değeri bir rotor kutbuna karşılık ortalama manyetik akıyı temsil eder.

4.3.1 Hava Aralığı Manyetik Akı

Şirketler kısıtlı kaynaklar nedeniyle ünitelerin kapatılması sırasında yapılan çalışmaları(kutup düşmesi testleri gibi) en aza indirmeye çalışmaktadırlar. Buna ek olarak bir çok şirket online durum izleme temelli her hangi bir tamir çalışmasını planlamak için kestirimci bakıma geçmektedir. Bu nedenle kutup düşmesi testini değiştirebilecek bir çevrim içi araca ihtiyaç duyulmaktadır. Şirketler son zamanlarda raotor stator arasındaki hava boşluğunda manyetik akış denetimi yapmaktadır. Bu denetim sayesinde kısa devrelerin tespiti sağlanmaktadır. Bu teknoloji nadiren çıkık kutup sargılarına uygulanmaktadır. Çünkü çıkık

kutup rotorlar silindirik kutup rotorlardan çok farklıdır ve akı modellemesinin yorumlanması açık değildir [17]. Rotor akı izleme rotor kutuplarında alan sargı kısa devrelerinin meydana geldiğinde bunu belirlemek için jeneratördeki veya motordaki hava aralığındaki manyetik akının ölçülmesini içerir. Rotordan gelen radyal manyetik akı stator çekirdek dişine tutkalanmış birkaç düzine sarımdan oluşan bir bobin veya prob yardımıyla tespit edilir (Şekil 19). Her rotor kutbu akı probu tarafından süpürülür, bobin içerisinde bir voltaj indüklenir, bu voltaj kutup bobininden geçen akıyla voltaj bobininden geçen akıyla orantılıdır. Bu voltaj elektronik aletlerle ölçülür. Çıkık kutup makinelerde her bir rotor kutbunun radyal manyetik akı profili makinanın MW ve MVAR yüküne bağlıdır. Hava aralığındaki değişiklikler düzeltildikten sonra belirli bir yükte bir kutup içerisindeki manyetik akı profilindeki her hangi bir değişim kısa devre sargımlar nedeniyle oluşur.



Şekil 19- Stator Çekirdek Dişine Monte Edilmiş Akı Probu(siyah) ve Bağlantı Kablosu(beyaz) [17]

Rotordaki her kutup bobin içerisinde geçerken kutuptan gelen manyetik akı nedeniyle oluşan indüklenen voltajda bir zirveye ulaşılır. Daha sonra voltaj kaydedilebilir ve dalga formunun her tepe değeri bir rotor kutbundaki ortalama akıyı temsil eder. Bir kutuptaki herhangi bir sarım kısa devresi o kutbun etkin amper sargımlarının ve dolayısıyla kutupla ilişkili akı probunun sinyalini azaltır. Kaydedilen dalga formu verileri daha sonra rotor şaftında işaretlenmiş bir başlangıç konumundan kutup yerini kalibre ettiği sürece arıza içeren kutupları bulmak için analiz edilebilir. Kısa devre edilmiş bir kutupbun hassasiyetini maksimize etmek için bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritma her bir kutbun verilerini entegre eder otokorelasyon uygulanır ve her kutbun integralini zıt polarite kutbuyla karşılaştırır.

4.3.2 Akı Prob Tasarımı

Senkron yüksek hızlı makinelerde kullanılan akı problemleri genellikle bir silindir şeklinde

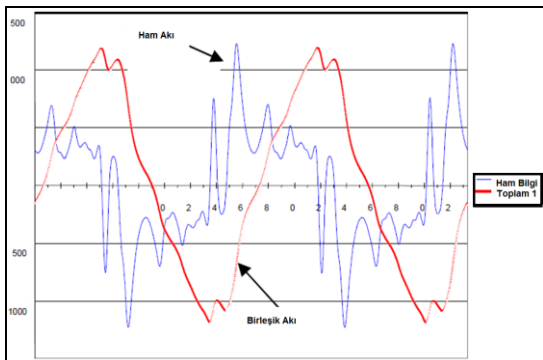
tasarlanır ve stator ile rotor arasındaki hava boşluğuna monte edilir. Rotor yapısı farklı ve çıkık kutuplu motorlardaki hava aralığından daha küçük hava aralıklı hidro jeneratörlerde ve motorlarda yüksek hızlı türbün jeneratörde kullanılan manyetik akı problemleri kullanılamaz. Bu yüzden mevcut tasarımların dezavantajlarını ortadan kaldıracak yeni proplar dizayn edilmiştir. Esnek temel bir materyal üzerine basılmış bir dizi devre katmanından oluşan bu problemler stator dişleri üzerine uygulanır. Bu problemler çok küçük hava boşluklarında da kullanılır. F sınıfı epoksi ile yapıştırılır [17].

4.3.3 Yapılan Testlere İlişkin Örnek Sonuçlar

Hidro jeneratörlerde yapılan testlere ilişkin aşağıda bir örnek gösterilmiştir. Bir akı probundan gelen voltaj dalga biçimi Şekil 20’de gösterilmiştir. Mavi çizgi ham, kırmızı çizgi ise birleşik akıyı temsil etmektedir (Jeneratör boşta çalışmakta olup 0MW ve 0MVAR). Sinyal şekli makinanın farklı yüklerinde değişim gösterir. Örneğin 125MW ve 0MVAR’da birleşik akı değişmez iken ham akı değişim gösterir. Sabit bir yükte kutup içindeki akı profilindeki değişiklik kısa devrelerden kaynaklıdır (Şekil 21).

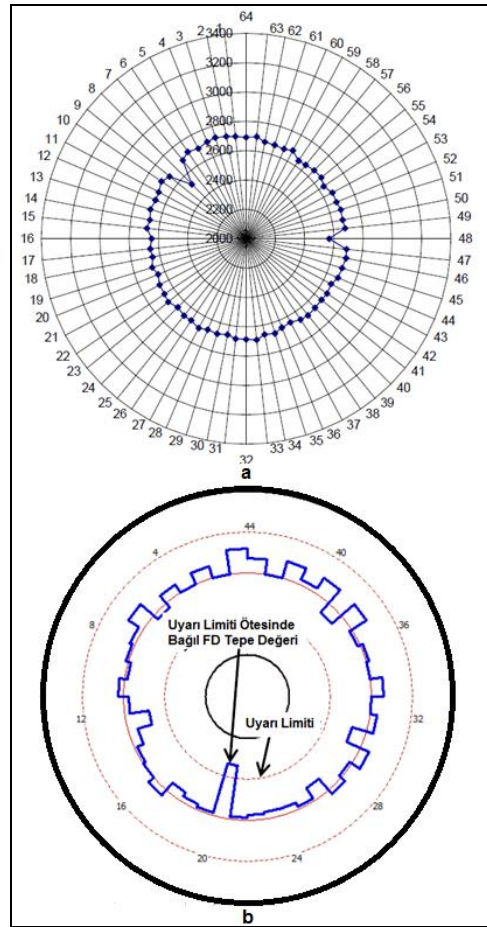


Şekil 20 - 0MW ve 0MVAR’da Akı Sinyalinin Şekli [17]



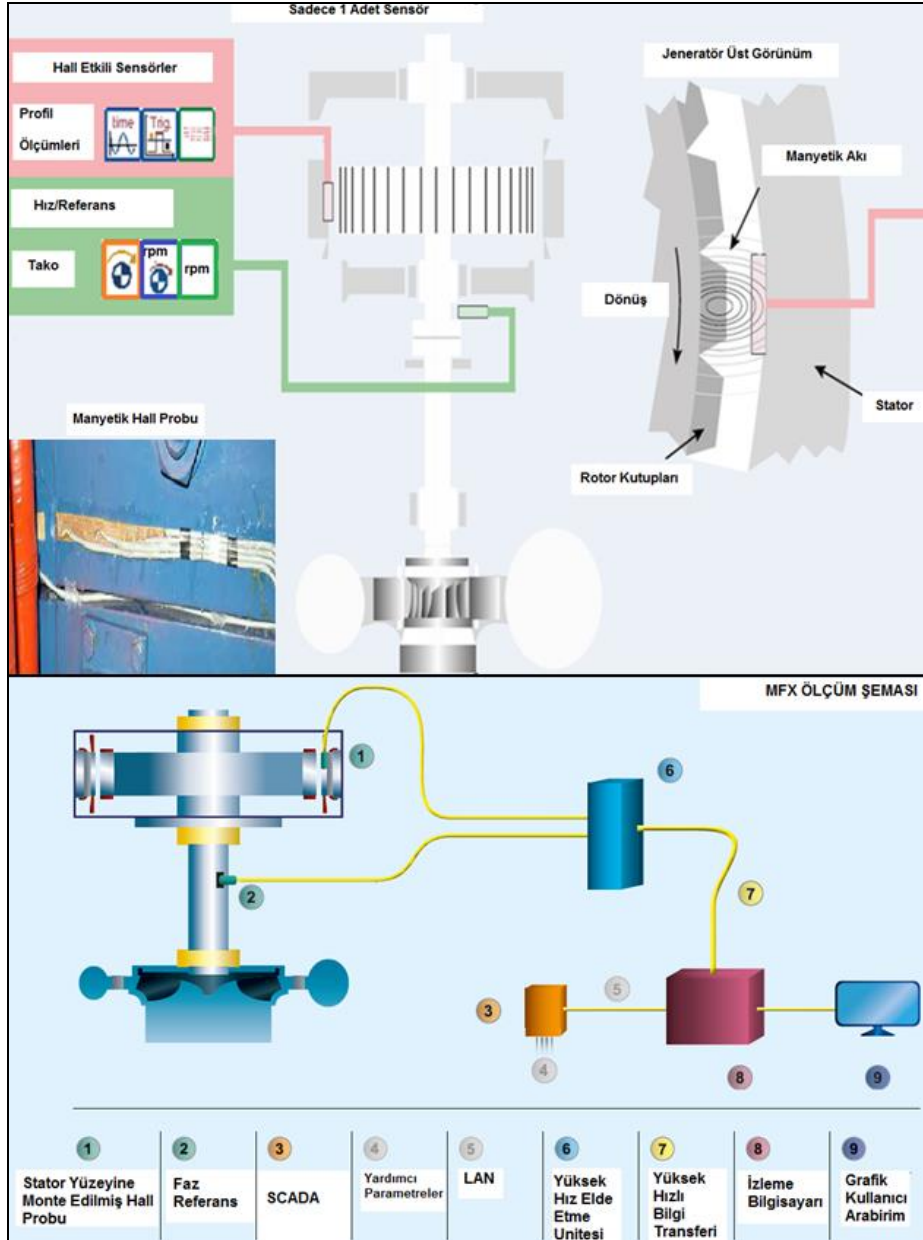
Şekil 21 - 125MW ve 0MVAR’da Akı Sinyalinin Şekli [17]

Sinyal şekli makinanın farklı yüklerinde değiştiğinden daha sonraki işlemler için ham veriler bir araya getirilmelidir. Dönüştürülen akı verilerinin daha sonra kutupsal bir çizimle gösterimi mümkündür. Bu gösterim şekli rotor veya stator eksantrikliği ile kutuplar arasındaki küçük farklar nedeniyle mükemmel bir daire değildir ancak daireye yakın bir sonuç vardır. Ayrıca 8 ve 48 nolu kutuplarda kısa devre mevcuttur (Şekil 22).



Şekil 22 - a) 64 Kutuplu Bir Rotorun Kutup Diyagramı (Kısa devreli kutuplar vardır), b) 21. Kutupta Saptanan Kutup Kısa Devresi [17, 21]

Şekil 23’de Manyetik akı ölçümünün genel gösterimi verilmiştir.



Şekil - 23 Manyetik Akı Ölçümü Şemaları [11, 19, 20]

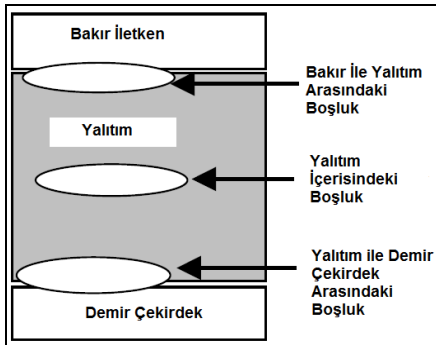
5 KISMİ DEŞARJ

Yüksek gerilim makina yalıtımlarının bozulmalarını saptamak için kısmi deşarj (PD) ölçümleri büyük oranda kullanılmaktadır. Bazı kusurlar PD ölçümleriyle tespit edilebilirken PD aktivitesi ve kalan yalıtım ömrü veya özünde var olan yalıtım kusurları arasındaki korelasyon tam olarak gösterilememiştir. Jeneratör çubuklarının ana elektriksel bozulma sebebi elektriksel kristalleşmedir. Elektriksel kristalleşmeler de malzemenin katmanlara ayrışmasına neden olur [24]. Bu tür ayrışmalardaki deşarjlar; belirgin şarjda, maksimum belirgin şarjda ve birikmiş şarjda yükselmeye yol açar. Yüksek voltajlı dönen makinelerin yalıtımı termal, elektriksel, çevresel ve mekaniksel etkilere

bağlıdır. Bu etkiler yalıtımın bozulmasına neden olur. Yalıtımda oluşan bozulmalar da arızaya neden olur. PD' ler olası malzeme bozulması için bir gösterge olarak kullanılabilir[22]. Yukarıda da bahsedildiği üzere orta ve yüksek gerilim seviyelerinde meydana gelen yalıtım arızaları genel olarak kısmi deşarj (PD) ile ilişkilendirilir. Kısmi deşarj; yalıtım malzemesinde meydana gelen kısmi bir hatanın iki iletken arasında tam bir kısa devreye mahal vermeyen bir köprü meydana getirmesidir. Yani iki iletken elektrot arasındaki dielektrik malzemenin yapısındaki boşluklar ya da devamlılığındaki problemler sebebiyle oluşan elektriksel boşalma ya da kıvılcımlardır. Kısmi deşarj çeşitli yollarla saptanabilen benzersiz bir

olaydır. Meydana gelen bu aktivitenin tespit edilmesi ile düzeltici eylemler gerçekleştirilerek sonradan geniş çaplı kalıcı bir arızanın önüne geçilebilir. Özellikle orta ve yüksek gerilim teçhizatları, kalıcı arızaların önlenmesi ve çalışma güvenliği amacıyla, düzenli olarak kısmi deşarj tespiti için test edilmelidir. Orta ve yüksek gerilim yalıtım sistemlerinde, boşluklar, bozukluklar, kirlenme, yanlış tasarım, kötü işçilik ve diğer problemler, elektrik alan içinde, yalıtımda sınırlı bozulmalara neden olan lokal gerilmelere sebep olur. Deşarj esasen lokal yalıtımı yok eden ve tam bir arıza meydana gelene kadar yalıtım malzemesinin içinden veya yüzeyinden yayılan bir kırılcımdır. Kısmi deşarj, yıllar geçtikçe aşama aşama birikerek yalıtıma zarar verecek ve nihayetinde yalıtımı bozarak arızaya neden olacaktır. Kısmi deşarj, yalıtım malzemesinde öncelikle belirtilere neden olur. Bu belirtileri erkenden tespit etmek, tamir etmeye olanak sağlar ve daha büyük zararların oluşmasını engeller. Kısmi deşarj anında ortama ışık, ses, elektromanyetik sinyal ve kimyasal reaksiyon yayılır. Test edilecek olan teçhizatın tipine göre kısmi deşarjı en iyi şekilde tespit edilebilmesi amacıyla çeşitli metotlar kullanılabilir [25].

Bu çalışmamızda kısmi deşarjı daha iyi anlayabilmek için basitleştirilmiş modeller ve elde edilmiş test sonuçları ele alınmıştır. Kısmi deşarjlar faz yalıtım ile toprak veya faz ile faz yalıtımı arasında görülür. Yalıtım sistemi içerisindeki boşlukların muhtemel yerleri şekil 24' de gösterilmiştir [22].



Şekil 24 - Yalıtım İçerisindeki PD [22]

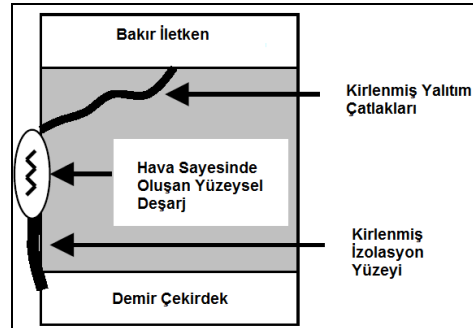
Kısmi deşarjlar, yalıtım yüzeyindeki çatlaklar veya kirlenmiş yollar vasıtasıyla uygulanan voltaj ve toprak arasındaki potansiyel değişimi köprüleyebilir.

5.1 Kısmi Deşarj Analizleri

Bir hidroelektrik santralde doğru seçilmiş sensör ve doğru seçilmiş bir izleme alet düzeneği ile jeneratörde meydana gelen kısmi deşarjlar çok doğru bir şekilde tespit edilebilir. Elde edilen verilerin ne kadar önemli olduğunun yorumlanması kısmi deşarj testinin en zor

yanıdır. Makinanın yalıtım sisteminin bozulması ısı, elektriksel, çevresel ve mekanik gerilmelerle daha da hızlanır. Kısmi boşalma seviyelerini tespit etmek için bozulmalar etkin bir şekilde izlenmelidir. Bütün yüksek gerilim makinaları, yeni bile olsalar kısmi deşarj gösterebilirler. Kısmi deşarjlar üzerine PD Tech, MICAMAXX™ ürün ailesi birçok çalışma yapmıştır. Bu MICAMAXX™ ürün ailesi teknolojinin son ürünü olup kısmi deşarj için yüksek elverişliliğe sahiptir. Kısmi deşarj hakkında aşağıda sıralanan maddeler genel çalışmalar sayesinde ortaya konulmuştur. Şekil 26' de bir kısmi deşarj sensörü gösterilmiştir [23].

- Bütün yüksek gerilim makinaları, yeni iken bile kısmi deşarj gösterir,
- Deşarj seviyeleri zamanla yükselir, sonunda arıza meydana gelir,
- Kısmi Deşarj Testi-Çevrim içi stator yalıtımına ulaşmanın tek yoludur,
- Test için hizmet kesintisine gerek yoktur,
- PD testi tahribatsızdır,
- Yapılabilen testler çevrim içi ve çevrim dışı olarak iki türlü yapılır,
- Yalıtımın durumunu belirler,
- Zararlı eğilimleri tespit eder,
- Bakım planlaması için vazgeçilmez bir araçtır.



Şekil 25 - Yüzeysel PD[22]



Şekil 26 - Kısmi Deşarj Sensörü [26]

Araştırmalar, hidro jeneratörlerdeki arızaların yüzde kırkının stator sargı yalıtımlarının bozulmasından kaynaklandığını göstermektedir [24]. Kısmi deşarj analizinde, sargı yalıtımının durumu, statora yerleştirilen kapasitif sensörlerle ölçülmektedir. Kısmi deşarjlar

yalıtım bozulmalarına yalıtım bozulmaları da titreşime sebep olur. Çubuk titreşimi, PD veya kıvılcım üretmedikçe günümüzdeki mevcut alet düzenekleriyle tanımlanamaz. Titreşim, yalıtım aşınıp bozuluncaya dek veya titreşim kırılmaları ve bakır çubuk teli arıza yapıncaya dek artan bir oranda devam eder. Tel bağlantı lehimindeki sızıntılar daha yavaş ilerleyen bir arızadır ve genellikle ortaya çıkması yıllar alır. Bu sızıntılar statorun kısmen ve tamamen geri sarılmasına ve bazı servis içi hatalara neden olur. Stator sargı bağlantı çatlakları daha kısa zamanda meydana gelmektedir. Sargılar doğru biçimde tasarlanmamış ve test edilmemiş ise sargı servise alındıktan hemen sonra başlayan bir rezonans titreşimi oluşur. İşletim sıcaklığı ve sargı aşınması nedeni ile parçanın doğal rezonans frekansı, çalışma frekans aralığına düştükçe rezonans titreşimin ortaya çıkması birkaç ay veya birkaç yıl sürebilir. Alan bobin/devir arızası birkaç ay ile birkaç yılda meydana gelir. Alan-devir çatlakları genel olarak yavaş yavaş meydana gelir ve kırılma oluncaya dek tespit edilemez. Bu noktada, akım akmaya devam edecektir ve ark yalıtım noktasından hızla yanacaktır. Tutma halkasının aşınması ve çatlama oldukça hızlı gelişen çok ciddi bozulma mekanizmasıdır ve izlenememektedir. Özetle kısmi deşarjların birçok farklı kaynakları vardır. Bu kaynaklar;

- Isı, sıcaklık,
- Elektrik, elektrik alanı,
- Ortam (çevre),
- Mekanik, titreşim.

5.2 Kısmi Deşarj Esasları

Elektrik alanının yalıtım ortamının delinme alanından büyük olduğu her yerde kısmi deşarj olur (Hava: Yaklaşık 27 kV/cm (1 bar), SF6: Yaklaşık 360 kV/cm (4 bar), Polimerler: 4000kV/cm). kısmi deşarjın olması için iki şart vardır. birincisi bir başlatma elektrodunun olması, ikinci ise elektrik alanının yalıtım ortamının iyonizasyon başlatma alanından büyük olmasıdır. Bu başlatma elektronunun varlığı her bir münferit deşarj darbesinin kısmi deşarj başlangıcını önemli ölçüde etkiler. Kısmi deşarjın nasıl başladığını açıklamak için, uygulanan 50Hz' lik sinüs dalgası gerilimin bir periyodunu ele almamız gerekir. Artma konumunda, gazdan gelen elektronlar ve iyonlar ayrılır ve yalıtım malzemesinin içinde "deliğin" yüzeyine gider (elektronlar bir tarafa, iyonlar diğer tarafa). Bir noktada yüzeyde daha yüksek bir gerilim olur ve yalıtım gazı delinir. Bu tam bir deşarj olmayıp yalıtım malzemesi içinde kısmi bir deşarjdır. Bu etkiyi görmek için, belli bir süre (30 saniye) boyunca bu deşarjlar kaydedilir. Kayıt esnasında bütün deşarjlar zaman konumlarına ve deşarjın genlik şiddetine

göre sıralanır. Eğer bu pencereler içinde birden fazla deşarj varsa bunlar eklenir ve sonuçta 3D matris elde edilir. Bu 3D matris tipik olarak bir 2D modelde gösterilir, deşarjların sayısının şiddeti renklerle belirtilir. Elektrik alanının yalıtım ortamının delinme alanından büyük olduğu her durumda kısmi deşarj meydana gelir. Kısmi deşarjlar yalıtımın içinde meydana gelir. Kıvılcım, ark ve elektrik deşarj olması yalıtım problemlerinin mevcut olduğunun açık göstergeleridir. Aşağıdaki kusurlardan birinin veya bir kaçının görülmesi muhtemeldir [23]:

- Bara titreşimleri (gevşek kamalar),
- Uç sargı kirlenmesi,
- Dilim deşarjı,
- Kırık iletkenler.

5.3 İzleme Gerekliliği ve Kısmi Deşarj Ölçümleriyle Tespit Edilen Kusurlar

Yalıtım durumu izlemesi, elektrik makinelerinin stator yalıtımındaki kritik problemleri için erken ikaz sağlar. Toprak arızaları, faz-faz arızaları veya kısa devre olmuş sarımlar netice itibarı ile bilinen kusurların sonucu olarak meydana gelecektir. Bu durumda makinanın sargılarının değiştirilmesi gerekecektir. Ancak sargıların değiştirilmesi uzun süre alacağından bu da büyük bir üretim kaybına sebebiyet verecektir. Deşarjdan kaynaklanan arızalar erken tespit ile önlenir. Eğer problem yeteri kadar erken tespit edilebilirse, makinanın ömrünü uzatmak için geçici tamirat yapılırken gerekli yedek parçalar imal edilebilir.

MICAMAXX™ bir kısmi deşarj eğilim belirleme sistemidir; bir çevrim içi izleme ünitesinden ve PD dönüştürücülerden meydana gelir, bunlar makinaya kalıcı montaj ile takılır, böylece yalıtım sisteminin sürekli çevrim içi izlemesi yapılır. Kısmi deşarj yüksek frekanslı akım darbeleri üretir, bunlar PD dönüştürücüler (her faza bir adet) tarafından yakalanır ki bunlar koaksiyel kablolar üzerinden MICAMAXX™ sistemine bağlıdır. Analiz programlandıktan sonra, sürekli çevrim içi izleme ünitesi MICAMAXX™ plus düzenlemesi yapılabilir. Tespit edilen kusurlar;

- Gevşek kamalar, bara titreşim, dilim deşarjları,
- Kırık iletkenler,
- Uç sargılarda kirlenme (Tuz, Çimento, Yağ) veya hasar,
- Fazlar arası deşarj. Özellikle yeni makineler olmak üzere titreşim ve tasarım problemleri sonucu olarak meydana gelir. Bu da yaşlanma/ana yalıtım katlara ayrılması dahil;
 - Fırça kıvılcımlanması, kollektör problemleri ve
 - Baralardaki PD'lerden kaynaklıdır.

Kısmi deşarj yerel bir arıza olgusudur, yalıtımın bir kısmını kısa devre yapar ve yaşlanmaya sebep olur ve yaşlanmayla beraber arıza

meydana gelir. Kısmi deşarj aşağıdaki yalıtım kusurlarının sonucudur [23].

- İyonize türlerin oluşması,
- Korozyona sebep olan iyonların, asitlerin, nitrojen oksitlerin, ozonun oluşması,
- Işık, ses ve elektromanyetik dalgalar yayılması.

Kısmi deşarjların teşhisi ve yerlerinin tespiti için yalıtım kusuru dikkate alınır (antenler, kimyasal sensörler, ultrasonik cihazlar, kameralar) ve ölçüm malzemesi belirlenir. Şekil 27' de bir sargıda oluşan deşarjın etkileri gösterilmiştir.

Bir yeni elektrot düzenlemeli model jeneratör çubukları üzerinde yapılan testlere ait düzenek Şekil 28' de görülmektedir. Çubuklar 0.75mm kesit yarıçaplı ve 8mmx2mm bakır iletkenlerden yapılmıştır. Bar ölçüleri 1000mmx40mm ve yalıtım kalınlığı 2mm' dir. Gerilim uygulamasının başlangıcından itibaren kristalleşme sağlamak için standart imalat ekipmanı ile imalat işlemi sırasında ana duvar yalıtımına özel bir elektrot yerleştirilmiştir. Yerleştirilen bu elektrot 20mmx20mm boyutunda ve 0.2mm kalınlığındadır. Bu elektrotun kenarlarındaki yüksek elektrik alan nedeniyle voltaj uygulandıktan hemen sonra elektriksel kristalleşme başlar. İstenmeyen yüzeysel deşarjların olmaması için özel elektrotların üzerine 2mm kalınlıkta bir yalıtım uygulanmış, yüksek gerilim bağlantısı şekillendirilmiş ve epoksiyle kapatılmıştır. Bu test düzeneği temel olarak 5kVA, 50Hz yüksek gerilim tarafosu, 1:1000 kapasitif gerilim bölücü, kublaj empedanslı 700pF kuplaj kapasitörü ve faz çözümlenmeli PD izleme sistemi içeren geleneksel bir PD devresinden oluşur. Aşağıdaki ölçüm düzeneği verilen deneyde kristalleştirme için 32kV rms gerilimi kullanılmıştır. PD ölçümleri ise 2mm kalınlığındaki yalıtım için tipik seviye olan 12kV rms gerilimle gerçekleştirilmiştir. Gömülü elektrotlara yüksek gerilim uygulanmış ve bakır iletkenler topraklanmıştır. Testler 20°C ±5°C' de yapılmıştır. Sonuç olarak böyle bir düzenekle kristalleşmeden kaynaklanan maddi bozulmalar analiz edilebilmektedir. Şekil 29' da ise kısmi deşarj izleri gösterilmiştir.

6 SONUÇ

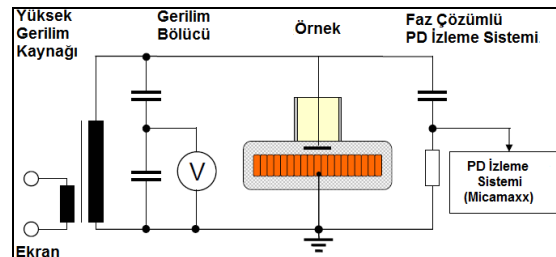
Yukarıda incelenen uygulama örneklerinden de anlaşılacağı üzere hidroelektrik santrallerde jeneratör hava aralığı izleme iki ana nedenden dolayı çok önemlidir. Birincisi statorun esnek montajından dolayı merkezden kayması ve bozulması, ikincisi ise rotor kutuplarının gevşeyerek mevcut hava aralığına doğru çıkıntı yapmasıdır. Bu iki sorun makinanın kontrolsüz bırakılması durumunda çok büyük hasarlara sebebiyet verecek potansiyele sahiptir. Bir rotorun statora sürtünmesi gibi büyük

sonuçların ortaya çıkması bile mümkündür. Ayrıca hidro jeneratörlerin yeni tasarımları için nominal hava aralığı azalan bir trend izlemektedir. Hava aralığının azalan trend izlemesi bu boşlukların daha özenle izlenmesini gerekli kılmaktadır. Hidro jeneratör ünite davranışları mekanik, manyetik ve termal güçlere bağlıdır. Bu güçlerin tümü çeşitli çalışma şartlarından etkilenir ve de aynı zamanda stator-rotor deformasyonu ve kinematikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Verimli ve kaliteli bir elektrik enerjisi üretiminde çok önemli görevlerden biri olan hava aralığı parametresi iyi bir kontrol için makine davranışı ve emniyeti hakkında bizlere önemli bilgiler sunar.



PD KOROZYONU

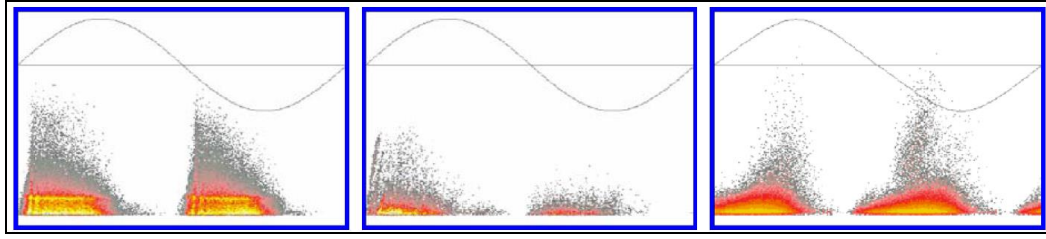
Şekil 27- Sargılardaki Deşarjlar [23]



Şekil 28 - PD Ölçümlerinin Test Prensipleri [24]

Çevrimiçi hava boşluğu ölçümleri jeneratör statoru ve rotor merkez pozisyonları ve onların dairesellik veya yuvarlaklığı hakkında bilgi sağlar. Jeneratör dinamik davranışını güçlü bir şekilde etkileyen bu değerler düzgün makine işletmesi için gereklidir. Bu ölçümler makine durum izlemelerinin önemli bir bileşenidir. Kısmi deşarj ve manyetik akı da hidro jeneratörlerde önemli diğer iki parametredir ve sürekli izlenmesi gereklidir. Akı izleme senkron

makinalarda rotor kısa devreleri için uygun bir araçtır. Rotor sargılarının çevrim içi testleri akı izlemeyle mümkündür. Böylelikle hidro jeneratörlerde kısa devreler tespit edilir. Makinaların izlenmesi hidroelektrik santrallerde önceden bir bakım planlaması yapmamıza olanak sağlar. Böylece önemli hasarların ortaya çıkmadan önlenmesi sağlanır ki bu durum da bizleri büyük maddi zararlardan korur.



İsıl Yaşlanma Gevşek Bakır Kirlenme
Şekil 29-Kısmi Boşalma İzleri, Kısmi Boşalma Modeli Darbe Dağılımı Modeli[23].

7 KAYNAKLAR

- [1] ORHON E., "Bir Hidroelektrik Santralda Sürekli Titreşim İzleme Sistemi Uygulaması", Bakım Teknolojileri Kongresi, Cilt: 50 Sayı: 598
- [2] ProvibTech's Application Note_ Power Generation. www.provibtech.com 23 / 33 Application_Hydro Turbine
- [3] Bissonnette M. R., Stevenson A., Wallman R., "Case Studies of Problems Diagnosed Using On-Line Machine Monitoring on Hydro-Generating Machines", 2006 www.hcipub.com
- [4] Hee-Dong Kim, Young-Ho Ju Kepri, Yong-Ju Kim Keri, Kyu-Bock Cho Hanseo University (KOREA), Session 2004, "Study and Development of On-Line Monitoring System for a Kepco Pumped Storage Generator/Motor". A1-208 Session 2004
- [5] Orešković O. - Veski Ltd., Goodeve E.–Qualitrol-Iris Power. "Identification of Geometry and Dynamic Properties of Hydro Generators Based on Signal Analysis of Air Gap"
- [6] Tétrault A., Director Tests & Diagnostics Division VibrosystM Inc. "Air Gap Monitoring Key Element To Avoid Unnecessary And Costly Repairs"
- [7] MC-monitoring SA Route des Daillettes 6, PO Box 198, CH-1709 Fribourg / Switzerland. www.mc-monitoring.com, "Air Gap Monitoring System".
- [8] www.mikrotrend.com, "Air Gap Sensor AGS -Installation and user manual 121126"
- [9] Metzker R. J. I., CEMIG, Bissonnette M. R., VibrosystM, Tétrault A., VibrosystM, Lin J., VibrosystM, "Avoiding major damage on a new hydrogenerator by monitoring air gap at Igarapava H.E.P.P."
- [10] Rolim F., 2004, "Air Gap Monitoring System Key Element To Correctly Diagnose Generator Problems", II ENAM –November 07 to 10, 2004
- [11] Air Gap and Magnetic Flux Monitoring with COMPASS, Brüel&Kjaer Vibro.
- [12] Azuaje C., "Stator Deformation Of Large Hydrogenerators And Its Effects On The MachineS" 21, <http://www.cigre.org>, A1-208 Session 2004
- [13] Major C., P. Eng., Allen G., T. Sc. A., "Benefits of On-line Monitoring System in Operating and Refurbishing Generators at Rapide-des-Iles Powerplant", UPRATING AND REFURBISHING HYDRO POWER PLANTS VI, October 1997
- [14] TÉTREULT A., Director Tests & Diagnostics Division Vibrosystem Inc. Montréal, Canada, "Air Gap Monitoring Key Element To Correctly Identify Source Of Shaft Vibration"
- [15] MIKROTREND, AGS Installation and user manual 140425,

- www.mikrotrend.com, "Air Gap Sensor AGS -Installation and user manual.
- [16] Despalatovic M., Jadric M., Terzic B., 2008, "Real-time power angle determination of salient-pole synchronous machine based on air gap measurements", *Electric Power Systems Research* 78 (2008) 1873–1880, ELSEVIER,
- [17] Stone G. C., Sasic M., Stein J., Stinson C., "Using Magnetic Flux Monitoring To Detect Synchronous Machine Rotor Winding Shorts", IEEE, Paper No. PCIC-2011-17
- [18] Campbell S.R., Stone G.C., Krikorian M., Proulx G., Stein J., "On-line Hydrogenerator Rotor Winding Condition Assessment Using Flux Monitoring", *Waterpower* XIV, 2005 - www.hcipub.com
- [19] Vrazic M., Gasparac I. And Kovacic M., "Measurement Systems for Electrical Machine Monitoring", www.intechopen.com.
- [20] Andritz Hydro, Dia Tech Mfx, www.andritz.com/diatech.
- [21] Sasic B. M., Stone G., and Rojas P., Qualitrol - Iris Power, Canada, "Using Magnetic Flux Monitoring to Detect Hydrogenerator Rotor Winding Insulation Problems"
- [22] Paoletti G., Golubev A.,P.E., "Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Systems", IEEE IAS Pulp and Paper Industry Conference, 1999
- [23] MICAMAXXTMplus – Partial Discharge Basics, "Partial discharge Basics of Monitoring". PD Tech Power Engineering AG.
- [24] Vogelsang R. Fruth B. and Fröhlich K., "Detection of Electrical Tree Propagation in Generator Bar Insulations by Partial Discharge Measurements", Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, ICPADM, Nagoya, Japan, June 2003
- [25] İlkahraman M, Özdemir C., Yıldız M., Ünlü Ö., "Yüksek Gerilim Şalt Teçhizatları Üzerinde Meydana Gelen Kısmi Deşarjların Ultrasonik/TEV Yöntemi İle Tespiti ve Saha Uygulamaları", 21. Bölge Müdürlüğü
- [26] Maughan C. V., Maughan Generator Consultants, "Options for monitoring generator condition and their limitations"
- [27] Moore B. W. G., PE, National Electric Coil, "Why generators fail, *Generators, Combined Cycle Journal*, First Quarter 2005