



Kullanımda Olan 2,5 MW Kapasiteli Bir Rüzgâr Türbininden Veri Toplanması, Sistem Tanımlama ve Model Güncelleme **Data Acquisition, System Identification and Model Updating of an In-Service 2.5 MW Wind Turbine**

Onur Öztürkoğlu^{1*}, Yaşar Taner², Veysel Yurtseven³, Özgür Özçelik³, Serkan Günel³

^{1,2,3,4} Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

⁵ Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: onur.ozturkoglu@deu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 17.09.2022

Kabul Tarihi / Accepted: 05.12.2022

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2023257508

Atıf şekli/How to cite: ÖZTÜRKOĞLU, O., TANER, Y., YURTSEVEN, V., ÖZÇELİK, Ö., GÜNEL, S. (2023). Kullanımda Olan 2,5 MW Kapasiteli Bir Rüzgâr Türbininden Veri Toplanması, Sistem Tanımlama ve Model Güncelleme. DEUFMD, 25(75), 611-622.

Öz

Rüzgâr enerjisi, dünya genelinde hızla artan enerji ihtiyacı ve bu ihtiyacın çevreci çözümlerle giderilmesi gerekliliğiyle önemini her geçen gün arttırmaktadır. Kısa zamanda daha çok enerji üretebilen görece büyük rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerji potansiyelinin fazla olması nedeniyle deprem bölgelerinde de inşa edilmektedir. Rüzgâr türbinlerinin ekonomik ömrü boyunca operasyonel kalabilmesi için yapısal bütünlüğünün izlenmesi ve dinamik özelliklerinin değişken operasyonel ve çevresel faktörler altında belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, kullanımda olan 2,5 MW üretim kapasiteli bir rüzgâr türbini için özgün veri toplama sistemi tasarlanmıştır. Sistemin kendi sensörlerinin topladığı ivme, sıcaklık ve nem verilerine ek olarak türbin SCADA sisteminden alınan rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, rotor hızı, nasele yönü, pitch açısı ve anlık enerji üretim değeri verileri senkronize olarak kaydedilmiştir. Farklı çevresel ve operasyonel koşullar altında toplanan ivme verileri ile operasyonel modal analizler yapılmış ve türbinin dinamik özellikleri belirlenmiştir. Son olarak mod frekanslarının çevresel ve operasyonel faktörler ile ilişkisi de göz önünde bulundurularak, türbinin sayısal modeli güncellenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Model Güncelleme, Sistem Tanımlama, Operasyonel Modal Analiz, Operasyonel ve Çevresel Etkiler, rüzgâr Türbinleri

Abstract

The importance of wind energy is increasing day by day due to the rapidly increasing energy needs around the world and the necessity of meeting these needs with renewable solutions. Relatively large wind turbines, which can produce more energy in a short time, are also built in earthquake zones due to high wind energy potential. In order for wind turbines to remain operational throughout their economic life, it is important to monitor their structural integrity and to determine their dynamic (modal) properties under different operational and environmental conditions. In this study, a novel data acquisition system is designed for a wind turbine with a production capacity of 2.5 MW. In addition to real-time acquisition of acceleration, temperature and humidity data collected by the novel system, wind speed, wind direction, rotor speed, nacelle direction, pitch angle and instantaneous energy production data obtained from the turbine SCADA system are recorded and merged with the other data synchronously. Using the acceleration data collected under different

environmental and operational conditions, numerous operational modal analysis are performed, and the dynamic modal properties of the turbine tower are estimated and a correlative work between the estimated modal parameters with environmental and operational factors are presented. Finally, the numerical model of the turbine is updated using the estimated values by a Bayesian method.

Keywords: Model Updating, System Identification, Operational Modal Analysis, Operational and Environmental Factors, Wind Turbines

1. Giriş

Yüksek enerji üretimi ve yatırım maliyetinin hızlı bir şekilde geri dönmesi nedeniyle rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki önemini gün geçtikçe arttırmaktadır. Rüzgâr enerjisindeki kurulu güç kapasitesi son on iki yılda dünya genelinde 4.5 katına çıkarken [1] ülkemizde bu kapasite 4.7 katına çıkmıştır [2]. Rüzgâr enerjisine olan talebin karşılanması amacıyla birçok ülkede olduğu gibi Türkiye’de de deprem riskinin yüksek olduğu bölgelere enerji üretim kapasitesi yüksek daha büyük/yüksek rüzgâr türbinleri inşa edilmektedir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın "Türkiye Rüzgâr Enerjisi Kapasite Faktörü Dağılımı Haritası" [3] ve Afet ve Acil Durum Yönetimi Kurumu'nun (AFAD) "Türkiye Deprem Tehlike Haritası"na [4] birlikte bakıldığında, rüzgâr enerjisi potansiyeli yüksek bölgelerin aynı zamanda deprem tehlike düzeylerinin yüksek bölgeler olduğu görülmektedir. Bu sebeple ülkemizde kurulan rüzgâr enerjisi çiftliklerinin büyük çoğunluğu deprem bölgelerindedir. Rüzgâr türbinlerinin ekonomik ömrü boyunca sürekli olarak operasyonel kalabilmesi için, bu büyük yapıların yapısal bütünlüğünün izlenmesi ve dinamik özelliklerinin değişken operasyonel ve çevresel faktörler altında anlaşılması git gide artan bir ihtiyaçtır.

Yapıların gerçek çevresel ve operasyonel koşullar artında dinamik özelliklerinin belirlenmesinde gerçek sistemler üzerinde yapılan saha çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Yalnızca çıktı tabanlı modal analiz yöntemleri olarak da bilinen operasyonel modal analiz (OMA) yöntemleri; yapıların dinamik özelliklerinin belirlenmesi için operasyonel ve çevresel titreşimlere karşı yapıda oluşan tepkinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır. Sistem tanımlama için kullanılan girdi-çıkıtı yöntemlerinin aksine OMA yöntemleri, yapıyı dışarıdan uyarmanın imkânsız/zor olduğu ya da pratik olmadığı durumlarda çokça kullanılmaktadır [5-13].

Rüzgâr türbinlerinin dinamik özellikleri çevresel ve operasyonel koşulların değişiminden etkilenmektedir. Hu ve diğerleri tarafından yapılan çalışmalarda [14-15] sıcaklığın artışıyla birlikte bazı modların frekanslarında azalmalar gözlenirken nasele yönünün değişiminin ise daha çok mod şekillerini etkilediği görülmüştür. Rotor hareket halinde iken türbin kanatlarının kule yakınından geçişlerinde etkileşime girmesi sonucunda klasik sönüme ek olarak aero-dinamik sönümler meydana gelmektedir. Pozitif ve negatif değer alabilen aero-dinamik sönüm, yalnızca deneysel yöntemlerle tespit edilebilmektedir. Çalışmalarda rotor hızının değişimi ile birlikte türbin kulesinin farklı titreşim modlarına ait sönüm oranlarının da değiştiği bulgulanmıştır.

Yapıların sayısal modellerinin oluşturulması ve bu modeller kullanılarak çeşitli analizlerin yapılması mühendislik alanında her zaman yapılan bir uygulamadır. Ancak genelde tüm gerçek yapılar karmaşık yapılar ve sayısal modelleme sırasında yapılan modelleme kabulleri ve yapısal olmayan elemanların varlığı nedeniyle rijitlik, kütle ve sönüm gibi parametrelerin, deney verileri ışığında güncellenmesine ihtiyaç vardır [16]. Olasılıksal model güncelleme tekniklerinden biri olan Bayesian yöntemi, güncellenecek olan fiziksel parametrelerin olasılık yoğunluk fonksiyonları ile temsil edilmesi esasına dayanmaktadır [17-18]. Yapı sağlığı izleme çalışmalarında sistem tanımlama yoluyla sayısal model güncellemesi sık kullanılan bir yöntemdir [19-25]. Bu yöntemde, dinamik davranışla sıkı ilişkisi nedeniyle, birincil öncelik mod frekanslarının yakınsanması olarak değerlendirilmektedir [26].

Bu çalışmada hub yüksekliği 90 metre olan, 2,5 MW kapasiteli halihazırda kullanımda olan bir rüzgâr türbini kulesine, kule yüksekliği boyunca dağıtılmış olarak tasarlanan veri toplama sistemi yerleştirilmiştir. Veri toplama sisteminin sensörlerinden toplanan ivme, sıcaklık ve nem verileri; türbinin SCADA sistemi tarafından toplanan rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, rotor hızı, nasele doğrultusu, pitch açısı ve anlık enerji

üretimi verileri ile senkronize olarak toplanmaktadır. Özgün bir tasarıma sahip olan bu sistemde tüm veriler eş zamanlı olarak Dokuz Eylül Üniversitesi kampüsüne gerçek zamanlı olarak aktarılmaktadır. 600 saniye uzunluğunda oluşturulan 78 adet veri paketi ile iki farklı doğrultuda toplam 156 adet operasyonel modal analiz yapılmış ve türbinin dinamik özellikleri belirlenmiştir. Türbinin ilk üç yapısal frekansının operasyonel ve çevresel etkiler olan rüzgâr hızı, rotor hızı, sıcaklık ve nem ile ilişkisi grafiklerle sunulmuştur. Daha sonra rüzgâr türbininin detaylı sayısal modeli yerinde yapılan dinamik ölçümlerin sonuçlarına bağlı olarak güncellenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Rüzgâr türbinin tanıtılması

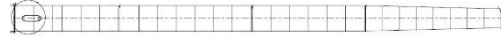
Çalışma kapsamında İzmir'in Urla ilçesinde yer alan ve yerel bir enerji şirketi tarafından işletilen 2.5 MW üretim kapasitesine sahip bir rüzgâr türbini incelenmiştir. Yatay eksenli türbinler sınıfında yer alan yapı, dairesel betonarme temel üzerinde oturtulmuş çelik kule ve kulenin tepesinde yer alan nasel, hub ve üç adet rotor kanadından oluşmaktadır (Şekil 1). Rüzgâr türbininin belli başlı özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. İncelenen rüzgâr türbini (kişisel arşiv)

Figure 1. Monitored wind turbine (personal archive)

Türbin kulesi, birbirine flanşlar ve civatalarla bağlı 4 bölümden oluşmaktadır. Her bölümün yüksekliği yaklaşık 20 metre olup, tüm yükseklik boyunca kule çapı ve cidar kalınlığı genel olarak azalmaktadır. Altta bulunan 3 segmentte kule çapı daralması oldukça yavaş iken en üst 4. segmentte ise daha hızlı bir daralma mevcuttur (Şekil 2). Kule S355 çeliğinden yapılmış olup bazı malzeme özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Türbin kulesinin şematik görünümü (sol yan temel, sağ yan kule tepe noktasıdır)

Figure 2. Schematic view of the turbine tower (left side is the foundation, right side is the tower top)

Tablo 1. Rüzgâr türbini özellikleri

Table 1. Wind turbine properties

Özellik	Değer
Kurulu güç	2,5 MW
Nominal rüzgâr hızı	13 m/sn
Devreye giriş rüzgâr hızı	3 m/sn
Devreden çıkış rüzgâr hızı	25 m/s
Rotor hızı	9,6-16 rpm
Rotor çapı	90 m
Kule yüksekliği	80 m
Nasel kütlesi	91 ton
Rotor kütlesi	55 ton

Tablo 2. Kule üretiminde kullanılan çeliğin malzeme özellikleri

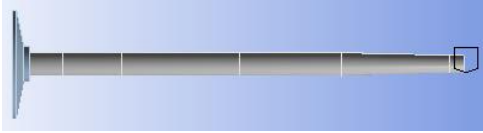
Table 2. Material properties of steel used in tower production

Özellik	Değer
Akma dayanımı	355 MPa
Çekme dayanımı	510 MPa
Elastisite modülü	200.000 MPa
Kayma modülü	81.000 MPa
Birim hacim ağırlık	7850 kg/m ³
Poisson oranı	0,3

2.2. Rüzgâr türbininin sayısal modeli

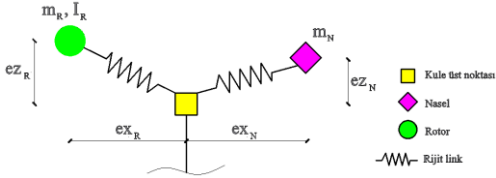
Bahsi geçen rüzgâr türbini 4 ana bileşenden oluşmaktadır: betonarme temel, çelik kule, rotor ve nasel. 2021 yılında yapılan bir çalışmaya [27] göre rüzgâr türbinleri için sayısal model oluşturulurken rotor ve naselin kule üst noktasına referansla eksantrisitelerinin ve rotorun dönme atalet momentinin dikkate

alınması, türbinin dinamik özelliklerinin doğru belirlenmesi için önem taşımaktadır. Bu çalışmanın sonuçları ve hesaplama kolaylığı dikkate alınarak; temel ve kulenin sonlu elemanlar (Şekil 3) ile rotor ve naselin ise ayrıntıları aşağıda verilen basitleştirilmiş bir yaklaşımla (Şekil 4) modellenmesine karar verilmiştir. Modelde altı yüzeye ve yirmi dört serbestlik derecesine sahip sonlu elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 3. Temel ve kulenin sayısal modeli

Figure 3. Analytical model of the foundation and the tower



Şekil 4. Rotor ve naselin sayısal modeli

Figure 4. Analytical model of the rotor and the nacelle

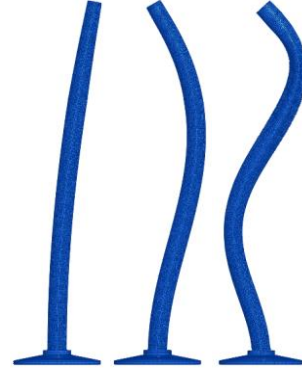
Şekil 4'e referansla, m_R rotor kütle, I_R rotorun dönme atalet momenti, m_N nasele kütle, eZ_R , eX_R , eZ_N ve eX_N , sırasıyla, naselin ve rotorun kule tepe noktasına göre eksantrisite değerleridir.

Türbinin modellenmesi ANSYS [28] ortamında tamamlandıktan sonra modal analiz yapılmış ve yapının ilk üç yapısal modu elde edilmiştir. Bu modele ait doğal mod frekansları Tablo 3'te, doğal mod şekilleri ise Şekil 5'te sunulmuştur. Analiz üç boyutta gerçekleştirildiğinden birbirine dik düzlemlerde elde edilen modlardan yalnızca mod şekli rotor-nasele doğrultusunda olanlar sunulmuştur.

Tablo 3. Türbin kulesine ait ilk üç mod frekansı

Table 3. First three mode frequencies of the turbine tower

Frekans (Hz)	Açıklama
0,36	1. yapısal mod
3,03	2. yapısal mod
8,32	3. yapısal mod



Şekil 5. Sayısal modele ait mod şekilleri (sırasıyla 1., 2. ve 3. mod)

Figure 5. Mode shapes of the analytical model (1st, 2nd. and 3rd. mode respectively)

2.3. Veri toplama sistemi

Rüzgâr türbini kulesinden ivme, nem ve sıcaklık verileri toplamak amacıyla kule yüksekliği boyunca dağıtılmış (distributed) şekilde özgün bir veri toplama sistemi tasarlanmıştır. 80 metre kule yüksekliği boyunca 20 metrede bir üzerinde yürünebilen yatay platformlar bulunmaktadır. Sensörlerin yerleştirilmesi için temel seviyesi ve bahsi geçen 4 adet platform seviyesi seçilmiş ve zeminden yüksekliğine göre aşağıda sıralanan şekilde isimlendirilmiştir:

Seviye 1 (0 metre): Bu seviyede bir adet üç eksenli ivmeölçer, üç adet tek eksenli ivmeölçer, sıcaklık ölçer ve nem ölçer sensörleri bulunmaktadır. Sensörlerden veri toplamak amacıyla iki adet NI 9239 modülü ve bir adet NI 9203 modülü cDAQ-9185 şasesine bağlanmıştır. Bunlara ek olarak temel seviyesinde endüstriyel bilgisayar, PoE (Power over Ethernet) switch, güç kaynağı, UPS (Uninterruptible Power Supply) ve P2P (Point to Point) anten de sistemi oluşturan diğer bileşenlerdir.

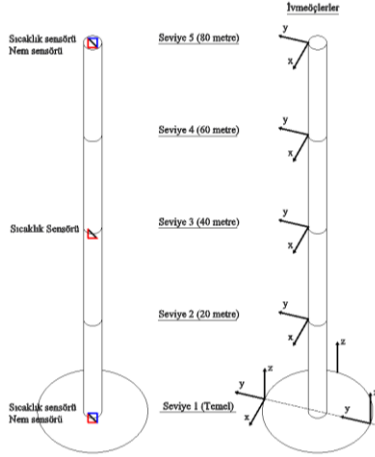
Seviye 2 (20 metre): Bu seviyede iki adet tek eksenli ivmeölçer bulunmaktadır. Sensörlerden veri toplamak amacıyla bir adet NI 9239 modülü cDAQ-9185 şasesine bağlanmıştır.

Seviye 3 (40 metre): Bu seviyede iki adet tek eksenli ivmeölçer ve sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Sensörlerden veri toplamak amacıyla bir adet NI 9239 modülü cDAQ-9185 şasesine bağlanmıştır.

Seviye 4 (60 metre): Bu seviyede iki adet tek eksenli ivmeölçer bulunmaktadır. Sensörlerden

veri toplamak amacıyla bir adet NI 9239 modülü cDAQ-9185 şasesine bağlanmıştır.

Seviye 5 (80 metre): Bu seviyede iki adet tek eksenli ivmeölçer sıcaklık sensörü ve nem sensörü bulunmaktadır. Sensörlerden veri toplamak amacıyla bir adet NI 9239 modülü cDAQ-9185 şasesine bağlanmıştır.



Şekil 6. Türbin üzerinde bulunan sensörler

Figure 6. Sensors on the turbine

Veri toplama sisteminde bulunan sensörler ve yerleştirildikleri seviyeler Şekil 6'da sistemin

tüm bileşenleri ve sistemdeki görevleri Tablo 4'te verilmiştir.

NI-9185 şasesi, sensörler aracılığıyla toplanan ve NI 9239 ve NI 9203 modülleri tarafından dijitalize edilen verileri senkronize bir şekilde endüstriyel bilgisayara aktarmaktadır. Bu çalışma için özel olarak üretilen 8 girişli switch, türbin içindeki cihazların haberleşmesini sağlarken sistemdeki enerji ve veri akışı PoE kablolar üzerinden gerçekleşmektedir. Kule üzerinde bulunan beş seviyedeki hareketin ölçülmesini sağlayan ivmeölçerlere ait teknik özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. İvmeölçer özellikleri

Table 5. Accelerometer properties

Ölçüm aralığı	±5 g
Duyarlılık	540 mV/g
Frekans bandı	700 Hz
Gürültü	0,1 µg/√Hz
Bias sıcaklığı	17 mg/°C
Şok dayanımı	2500 g
Çalışma gerilimi	5-20 V

Tablo 4. Veri toplama sistemi bileşenleri

Table 4. Data acquisition system components

Cihaz	Kullanılma Amacı
Tek eksenli ve üç eksenli ivmeölçerler	İvme ölçümü
Sıcaklık sensörü	Sıcaklık ölçümü
Nem sensörü	Nem ölçümü
NI 9239 ve NI 9203 analog veri girişi modülleri	Sürekli ve analog olan zaman-genlik sinyallerinin sonlu dijital verilere çevrilmesi
NI cDAQ-9185 şase	Zamanlama, senkronizasyon ve veri transferi
NI PS-16 Endüstriyel güç kaynağı	Tüm sistem için gerekli gücün sağlanması
PtP antenler	Şalt sahasından türbine veri aktarımı ve internet bağlantısı paylaşımı
Endüstriyel bilgisayar	Veri toplanması, aktarılması ve kontrol amacıyla hazırlanmış LabVIEW kodunun çalıştırılması
İş istasyonu	Verinin kampüse aktarılması ve çeşitli analizlerin yapılması
NAS	Toplanan verinin depolanması
UPS	Elektrik kesintisi durumunda sistemin çalışır durumda tutulması
Endüstriyel switch	Türbindeki tüm cihazların haberleşmesinin sağlanması

İvme verilerinin doğru bir şekilde toplanması için sensörler kule üzerindeki yerlerine lazer metre ve su terazisi kullanılarak yerleştirilmiştir. İvmeölçerler çelik türbin kulesine güçlü mıknatıslarla sabitlenmiştir.

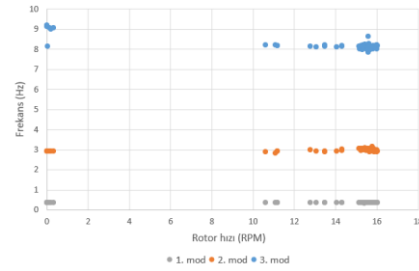
Rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, rotor hızı, nasel doğrultusu, pitch açısı ve anlık enerji üretimi verileri türbinin SCADA sisteminden, veri toplama sisteminin sensörleri aracılığıyla toplanan ivme, sıcaklık ve nem verileri ile senkronize olarak toplanmaktadır. Tüm verilerin toplanması, işlenmesi ve kaydedilmesi LabVIEW [29] kullanılarak geliştirilmiş özgün bir yazılım aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

2.4. Çevresel ve operasyonel faktörlerin mod frekanslarına etkisi

Oluşturulan türbin modelini güncellemek amacıyla seçilecek olan hedef modları belirlemek için öncelikle yapısal modların çevresel ve operasyonel faktörler ile ilişkisini belirlemek gereklidir. Bu amaçla Bölüm 2.3'te detaylı olarak sunulan veri toplama sistemi aracılığıyla 78 adet, 600 saniye uzunluğunda ivme verisi 2048 Hz. örnekleme frekansı ile toplanmıştır. Türbinin ilk üç yapısal mod frekansı daha önce sayısal model ile yapılan modal analiz sonuçlarına (Tablo 3) bakıldığında 0-10 Hz. arasında olduğu tespit edilmiştir. Düşük frekanslar üzerindeki tayf örtüşmesini (aliasing) önlemek için ivme verileri, köşe frekansı 30 Hz. olan düşük geçirgen (low-pass) dijital filtre kullanılarak filtrelenmiştir. Devamında, analiz yükünü azaltmak için ivme verileri 256 Hz. örnekleme frekansı ile yeniden örneklenmiştir. Son olarak detrend işlemi uygulanarak, veri setleri operasyonel modal analize hazır hale getirilmiştir. Tüm bu işlemler LabVIEW üzerinde otomatik ve gerçek zamanlı olarak yapılmaktadır.

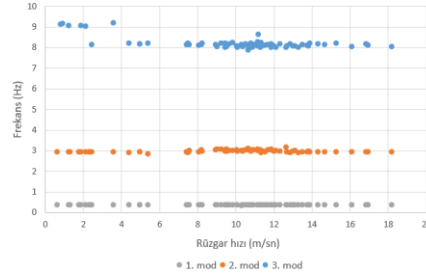
Şekil 5'te görüldüğü üzere ivmeölçerler türbin kulesi üzerinde teğetsel ve radyal doğrultuda olmak üzere birbirine dik iki doğrultuda yerleştirilmiştir. İlgili doğrultulardaki toplanan ivmeölçer verileri kullanılarak teğetsel ve radyal doğrultularda toplamda 156 adet operasyonel modal analiz Artemis [30] programı kullanılarak, İyileştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (Enhanced Frequency Domain Decomposition, EFDD) metodu [31] ile işlenmiştir. Analizler sonucunda rüzgâr türbininin ilk üç yapısal modu belirlenmiş ve mod frekansları ilgili veri seti boyunca kaydedilen operasyonel ve çevresel

parametrelerin belli ortalama değerleri kullanılarak ile eşleştirilmiştir. Operasyonel ve çevresel etkiler görece çok daha yavaş değişen parametrelerdir, dolayısıyla ortalama değerlerinin kullanılması uygundur. Radyal ve teğetsel doğrultularda elde edilen frekans değerleri birbirine çok yakın olduğundan çalışmada yalnızca radyal doğrultudaki analiz sonuçları grafiklerle sunulmuştur. Mod frekanslarının rotor hızı ve rüzgâr hızı ile olan ilişkisi sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Rotor hızı ve mod frekansları

Figure 7. Rotor speed and mode frequencies



Şekil 8. Rüzgâr hızı ve mod frekansları

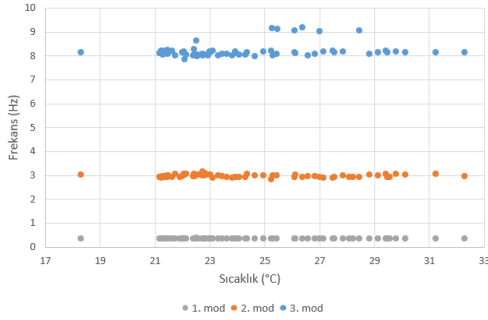
Figure 8. Wind speed and mode frequencies

Rüzgâr hızının 3 m/sn'den daha düşük olduğu durumlarda rüzgârın enerjisi rotora hareket ettirecek seviyede olmadığı için türbin operasyonel durumda olmayıp, rotor hızı sıfır veya sıfıra oldukça yakın ölçülmektedir (Tablo 1). Türbin durağan haldeyken rotor hızının sıfırdan farklı ölçülmesinin sebebi bu durumda rotor frenlerinin sıkılı olmayıp kanatların kendi serbestçe hareket edebilmesindedir. Bu hareket oldukça yavaş olduğundan, rotor durağan halde kabul edilmektedir.

Şekil 7 ve 8 incelendiğinde, 1. yapısal mod frekansları tüm analizlerde 0,36 Hz. civarında standart sapması oldukça düşük olarak tahmin edilmiştir. 2. mod frekansları ise 3 Hz. civarında 1. mod frekanslarına göre biraz daha fazla

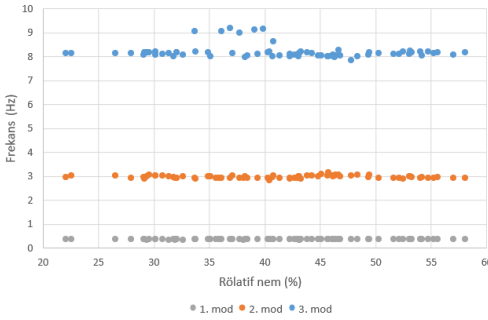
standart sapma ile bulunabilmiştir. İlk iki yapısal mod frekanslarında rotor hızı veya rüzgâr hızına bağlı bir değişim gözlenmemektedir. Üçüncü mod frekansları türbinin operasyonel olduğu durumlarda 8,20 Hz. değeri etrafında elde edilirken; rüzgâr hızının düşük, rotor hızının sıfır olduğu durumlarda 9,10 Hz. civarında elde edilmiştir.

İlk üç yapısal mod frekanslarının sıcaklık ve rölatif nem ile olan ilişkisi sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Sıcaklık ve mod frekansları

Figure 9. Temperature and mode frequencies



Şekil 10. Rölatif nem ve mod frekansları

Figure 10. Relative humidity and mode frequencies

Şekil 9 ve 10 incelendiğinde yapısal mod frekanslarının, incelenen sıcaklık ve nem değerleri arasında, bu parametrelerin değişiminden etkilenmediği, görece bu parametrelere bağımsız olduğu söylenebilir.

Yukarıda sunulan sonuçlar göze alındığında, 3. yapısal mod frekansları rotorun operasyonel olup olmadığına bağlı olarak farklılık gösterdiği için model güncelleme için hedef modlar olarak yalnızca 1. ve 2. yapısal modlar seçilmiştir. Bir başka deyişle, dış etkenlere bağımsız/değişmeyen modlar model güncellemede kullanılmıştır.

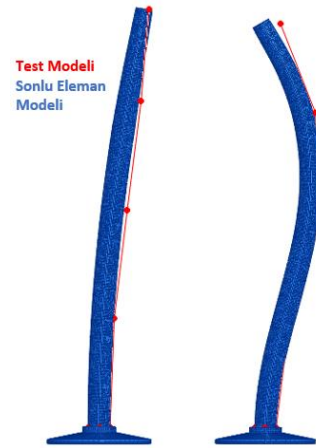
2.5. Rüzgâr türbininin sayısal modelinin güncellenmesi

Rüzgâr türbinin sayısal modelin güncellenmesi amacıyla Tablo 6'da sunulan koşullar altında toplanan 600 saniye uzunluğundaki ivme verisi daha önce bahsi geçen şekilde işlenerek türbinin dinamik özellikleri tahmin edilmiştir. Sayısal model kullanılarak elde edilen ilk iki yapısal titreşim modu, türbin üzerinden toplanan ivme verilerinin işlenmesiyle elde edilen modlar ile eşleştirilmiştir (Şekil 11). Eşleştirilen modların frekansları ve mod şekillerinin birbiri ile şekilsel (uzaysal) uyumunu gösteren Modal Gerçekleşme Kriteri (Modal Assurance Criterion, MAC) [32] değerleri Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 6. İvme verisinin kaydedildiği operasyonel ve çevresel koşullar

Table 6. Operational and environmental conditions in which acceleration data is recorded

Rüzgâr hızı	10 m/sn
Sıcaklık	26°C
Rölatif nem	%32
Rotor hızı	15,5 rpm
Anlık üretilen enerji	1645 kW



Şekil 11. Sonlu eleman modeli ve deneysel mod eşleşmeleri (sırasıyla 1. ve 2. mod)

Figure 11. Finite element model and experimental modes matches (1st, 2nd. and 3rd. mode respectively)

Tablo 7. Sonlu eleman modelinden ve deneysel olarak elde edilen doğal frekans ve mod şekli eşleşmeleri

Table 7. Finite element model and experimental mode frequencies/shapes matches

	1. mod	2. mod
Deneysel frekans	0.356 Hz	2,985 Hz
Analitik frekans	0,355 Hz	3,031 Hz
Frekans Farkı	- %0,30	%1,56
MAC değeri	%98,9	%94,6

Şekil 11 ve Tablo 7'den de görüldüğü gibi türbinin sayısal modelinden elde edilen sonuçlar deneysel verilerden elde edilen sonuçlar ile uyumludur. Ancak sayısal model kabulleri ve türbinde bulunan yapısal olmayan elemanlar sebebiyle farklılıklar da mevcuttur. Bu farklılıkları mümkün olduğunca en düşük seviyeye çekmek ve daha gerçekçi bir sayısal model oluşturmak sonrasında bu sayısal model kullanılarak yapılacak detaylı analizlerde daha gerçekçi sonuçlar elde etmek adına oldukça önemlidir. Bu amaçla türbin sayısal modelindeki bazı parametreler güncellenmek üzere belirlenmiştir. Yapısal olmayan elemanların varlığı ve üretim/imalat aşamasında yapılan hatalar ve farklılıklar yapının rijitliğini ve kütlelerini etkilemekle beraber bu durumları sayısal modelde dikkate almak oldukça güçtür. Bu yüzden yapıların sayısal modelleri güncellenirken rijitliği temsilen elastisite modülü ve kütle değerlerinin güncelleme parametresi olarak seçilmesi sık kullanılan bir yaklaşımdır.

Türbin kulesi yaklaşık 20'şer metre yüksekliğindeki dört bölümün birleşiminden inşa edilmiştir. Sayısal modelde bu bölümlere karşılık gelen sonlu elemanlar gruplanarak her bölümün elastisite modülü ayrı bir güncelleme parametresi olarak belirlenmiştir. Bunlara ek olarak rotor ve naselin kütlesi model güncellemeye esas parametreler olarak seçilmiştir. Sayısal modelde değiştirilecek olan güncelleme parametreleri aşağıdaki gibi seçilmiştir:

Parametre 1: Türbin kulesinin 0-20 metrelik bölümünün elastisite modülü (200.000 MPa)

Parametre 2: Türbin kulesinin 20-40 metrelik bölümünün elastisite modülü (200.000 MPa)

Parametre 3: Türbin kulesinin 40-60 metrelik bölümünün elastisite modülü (200.000 MPa)

Parametre 4: Türbin kulesinin 60-80 metrelik bölümünün elastisite modülü (200.000 MPa)

Parametre 5: Rotorun kütlesi (55 ton)

Parametre 6: Naselin kütlesi (91 ton)

Model güncellemeye esas hedef tepkiler (modal parametreleri) aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

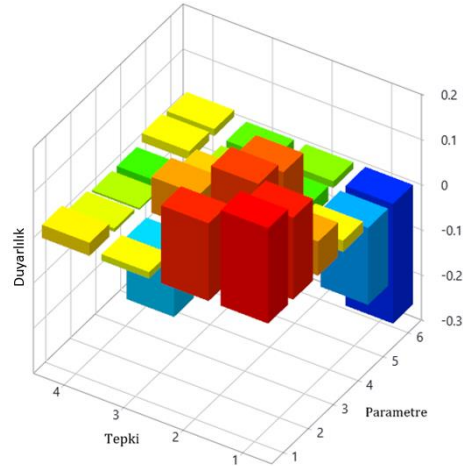
Tepki 1: 1. mod frekansı

Tepki 2: 2. mod frekansı

Tepki 3: 1. mod MAC değeri

Tepki 4: 2. mod MAC değeri

Güncelleme parametrelerinin değişiminin, hangi tepkileri ne kadar etkilediğini gösteren duyarlılık matrisi iki yatay eksenin tepki ve parametre olduğu, dikey üçüncü eksenin ise duyarlılık olduğu üç boyutlu bir grafik olarak Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Duyarlılık matrisi

Figure 12. Sensitivity matrix

Duyarlılık matrisinden görüldüğü üzere, türbin kulesinin elastisite modülleri arttıkça yapısal modların frekansları artarken, nasel ve rotordaki kütle artışı mod frekanslarını düşürmektedir. Rotor ve nasel kütlelerindeki değişim, 1. mod frekansı üzerinde oldukça etkiliyken (duyarlılık değerleri yüksek), 2. mod frekansı kütle değişimlerinden daha düşük oranda (duyarlılık değerleri düşük) etkilenmektedir. Modların MAC değerlerinin güncelleme parametrelerine olan duyarlılığı ise genel olarak düşük seviyelerde kalırken,

sırasıyla azalma ve arttırma etkisiyle, negatif ve pozitif değerler alabilmektedir.

FEMTools yazılımı ortamında, Bayesian yöntemi ile yapılan model güncelleme işleminde mod frekansları, MAC değerlerine göre öncelikli hedef tepkiler olarak (atanan ağırlık değerleri daha büyük seçilerek) tanımlanmıştır. Model güncelleme iki iterasyon sonucunda tamamlanmış ve güncellenmiş parametreler ile sayısal modelden elde edilen mod frekansları ile deneysel mod frekansları Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Sonlu eleman modelinden ve deneysel olarak elde edilen mod eşleşmeleri

Table 8. Finite element and experimental mode matches

	1. mod	2. mod
Deneysel frekans	0,356 Hz	2,985 Hz
Sayısal frekans	0,356 Hz	2,985 Hz
(Güncelleme öncesi)	(0,355 Hz)	(3,031 Hz)
Frekans Farkı	- %0,02	%0,01
(Güncelleme öncesi)	(- %0,30)	(%1,56)
MAC değeri	%99,2	%95,8
(Güncelleme öncesi)	(%98,9)	(%94,6)

Model güncelleme sonrasında ilk iki modun yapısal frekansları gerçek yapının mod frekanslarına eşitlenmiştir. Mod şekilleri ise toplanan veri kullanılarak tahmin edilen mod şekillerine bir miktar daha yaklaşmıştır. MAC değerlerinin daha çok yakınsaması için yapılması gereken parametre değişiklikleri, sayısal mod frekanslarının deneysel frekanslardan uzaklaşmasına neden olduğu için model güncelleme ikinci iterasyonda durdurulmuştur. Hali hazırda ulaşılan MAC değerlerinin ilk iki önemli yapısal modun mod şekillerinin yeterince yaklaştığı değerlendirilmiştir. Model güncelleme sonrasında elde edilen parametreler, güncelleme öncesi ile karşılaştırılmalı olarak Tablo 9’da sunulmuştur.

Güncelleme sonrasında türbin kulesinin ilk 20 metrelik bölümünün elastisite modülü %1 artarken, ikinci üçüncü ve dördüncü 20 metrelik bölümünde elastisite modülleri sırasıyla %1,5, %3,4 ve %8,6 azalmıştır. Sırasıyla, 55 ton ve 91 ton olan rotor ve nasel kütleleri, 55,37 ton ve 87,76 ton olarak güncellenmiştir.

3. Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında halihazırda kullanımda olan 2,5 MW enerji üretim kapasiteli bir rüzgâr türbini için kule yüksekliği boyunca dağıtılmış özgün bir veri toplama sistemi tasarlanmış ve sistem türbin üzerine kurulmuştur. Sistemin kendi sensörlerinin topladığı ivme, sıcaklık ve nem verilerine ek olarak türbin SCADA sisteminden alınan rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, rotor hızı, pitch açısı, nasel yönü ve anlık enerji üretim değeri verileri senkronize olarak kaydedilerek gerçek zamanlı olarak kampüs ortamına aktarılmaktadır. Farklı zamanlarda toplanan 78 adet 600 saniye uzunluğundaki veri paketleri, bir operasyonel modal analiz yöntemi olan EFDD ile işlenerek türbinin dinamik özellikleri belirlenmiştir.

Rüzgâr türbininin ilk üç yapısal titreşim mod frekansının; rüzgâr hızı, rotor hızı, rölatif nem ve sıcaklık ile ilgili korelatif ilişkileri grafikler ile sunulmuştur. Mod frekansları, birbirine dik iki yönde yapılan toplam 156 analiz sonucunda düşük standart sapma ile 1. mod için 0,36 Hz. ve 2. mod için 3,00 Hz. civarında elde edilmiştir. Ölçüm yapılan sıcaklık ve nem değerleri arasında bu parametrelerin mod frekansları ile doğrudan bir ilişkisi olmadığı tespit edilmiştir. Rüzgâr hızı ve rotor hızındaki değişimler, türbin kulesinin ilk iki yapısal mod frekansını belirgin bir şekilde değiştirmemektedir. Rüzgâr hızının devreye giriş hızından düşük olduğu zamanlarda türbin enerji üretmiyor olup, rotor kanatları sabit durmaktadır. Rotor hızının sıfır olduğu bu durumlarda 3. yapısal mod frekansı 9,1 Hz. civarında elde edilirken, rüzgâr hızının 3 m/sn’den yüksek, türbinin enerji ürettiği durumlarda bu değer 8,2 Hz. civarında elde edilmiştir. Bu sonuçlar dikkate alınarak, 3. yapısal modun türbinin çalışma durumundan etkilendiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, toplanan veriler 17-33°C sıcaklık, %21-57 rölatif nem ve 0-18 m/sn rüzgâr hızı aralıklarında toplanmıştır. Daha geniş aralıklı çevresel koşulları kapsayacak şekilde uzun süreli veri toplanması ve işlenmesini içeren çalışmalar, çevresel ve operasyonel faktörlerin rüzgâr türbini dinamik özelliklerine etkisinin daha iyi değerlendirilmesi için önem taşımaktadır. Oluşturulan sistem 7/24 çalışan bir sistem olduğu için uzun dönemli çevresel ve operasyonel etkilerin modal parametreler üzerindeki etkilerinin incelenebileceği bir ortam oluşturulmuştur.

Tablo 9. Model güncelleme sonrası parametre değişimleri

Table 9. Parameter changes after model update			
	Güncelleme Öncesi	Güncelleme Sonrası	Fark
0-20m elastisite modülü	200.000 MPa	202.049 MPa	%1,02
20-40m elastisite modülü	200.000 MPa	196.954 MPa	- %1,52
40-60m elastisite modülü	200.000 MPa	193.241 MPa	- %3,38
60-80m elastisite modülü	200.000 MPa	182.770 MPa	- %8,62
Rotor kütlesi	55,0 ton	55,37 ton	%0,67
Nasel kütlesi	91,0 ton	87,76 ton	- %3,56

Rüzgâr türbininin sayısal modeli kullanılarak yapılan modal analiz sonuçları ve deneysel/gerçek veriler ile yapılan operasyonel modal analiz sonuçları karşılaştırıldığında, kurulan sayısal modelin türbin özelliklerini iyi şekilde yansıttığı görülmektedir. Ancak, modellemedeki kabuller ve yapısal olmayan elemanların türbin içindeki varlığı nedeniyle sayısal modelin kalibre edilmesi gerekmektedir. Türbin kulesinin farklı bölümlerinin elastisite modülleri, rotor ve nasele kütleleri %1 ila %9 arasında değişen oranlarda güncellenerek hedef mod frekansları tatmin edici oranlarda yakalanmış ve sayısal modelden elde edilen mod şekilleri deneysel mod şekillerine yakınlştırılmıştır. Halihazırda çalışmakta olan gerçek rüzgâr türbininin dinamik özelliklerini daha iyi temsil eden bu sayısal model ileride kullanılarak, türbinin farklı deprem ve rüzgâr yükleri altında davranışı daha gerçekçi bir şekilde belirlenebilecektir.

5. Discussion and Conclusion

Within the scope of the study, a unique data collection system distributed along the height of the tower is designed for a wind turbine with a power generation capacity of 2.5 MW, which is currently in use, and the system is installed on the turbine. In addition to the acceleration, temperature and humidity data acquired by the system's own sensors, wind speed, wind direction, rotor speed, pitch angle, nacelle direction and actual power data obtained from the turbine SCADA system are recorded synchronously and transferred to the campus environment in real-time. The dynamic properties of the turbine are determined by processing 78 data files with a length of 600

seconds acquired at different times with EFDD, an operational modal analysis method.

The relationships of the first three structural vibration mode frequencies of the wind turbine with wind speed, rotor speed, relative humidity and temperature are presented with graphics. Mode frequencies were obtained around 0.36 Hz for the 1st mode and 3.00 Hz for the 2nd mode with a low standard deviation as a result of a total of 156 analyzes performed in two perpendicular directions. It has been determined that these parameters are not directly related to the mode frequencies in the range of measured temperature and humidity values. Changes in wind speed and rotor speed do not significantly change the frequency of the first two structural modes of the turbine tower. When the wind speed is lower than the cut-in wind speed, the turbine does not produce energy and the rotor blades are stationary. In these cases where the rotor speed is zero, the 3rd structural mode frequency is estimated around 9.1 Hz, while in cases where the wind speed is higher than 3 m/s and the turbine generates energy, this value is around 8.2 Hz. Considering these results, it is concluded that the 3rd structural mode is affected by the turbine operating condition. In this study, the data were recorded at 17-33°C temperature, 21-57% relative humidity and 0-18 m/sec wind speed ranges. Studies involving long-term data recording and processing to cover a wider range of environmental conditions are important for better evaluation of the effect of environmental and operational factors on wind turbine dynamic properties. Since the developed system is a 24/7 operating system, an environment has been created where the effects of long-term

environmental and operational effects on modal parameters can be examined.

When the modal analysis results using the numerical model of the wind turbine are compared with the operational modal analysis results using experimental data it is seen that the established numerical model reflects the turbine characteristics in a good manner. However, due to the modeling assumptions and the presence of non-structural elements in the turbine, the numerical model needs to be calibrated. By updating the elasticity modules of different parts of turbine tower, rotor mass and nacelle mass at rates ranging from 1% to 9%, the target mode frequencies were captured at satisfactory rates and the mode shapes obtained from the numerical model were approximated to the experimental mode shapes. By using calibrated numerical model, which better represents the dynamic properties of the real wind turbine currently in operation, the behavior of the turbine under different earthquake and wind loads will be determined more realistically.

4. Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, 120M218 numaralı projede verdiği mali destek için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK), saha çalışmalarında verdiği desteklerden ötürü Dost Enerji'ye ve verdiği ekipman desteği için Kentkart A.Ş.'ye teşekkürlerini sunmaktadır. Bu yayında ifade edilen tüm görüşler, bulgular, sonuçlar ve öneriler yazarlara aittir, sponsor kuruluşların görüşlerini yansıtmayabilir.

Kaynakça

- [1] World Wind Energy Association. 2022. World Market for Wind Power Saw Another Record Year in 2021. <https://wwindea.org/world-market-for-wind-power-saw-another-record-year-in-2021-973-gigawatt-of-new-capacity-added/> (Erişim Tarihi: 10.09.2022).
- [2] Türkiye Rüzgâr Enerjisi Santralleri Birliği. 2022. Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu Ocak 2022.
- [3] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. 2022. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Kapasite Faktörü Dağılımı Haritası. <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/bolgeler/TURKIYE-GENELI.pdf> (Erişim tarihi: 10.09.2022).
- [4] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). 2018. Türkiye Deprem Tehlike Haritası. <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi> (Erişim tarihi: 10.09.2022).
- [5] Tcherniak, D., Chauhan, S., Hansen, M.H. 2010. Applicability Limits of Operational Modal Analysis to Operational Wind Turbines. IMAC-XXVIII February 1-4 Şubat, Jacksonville, USA.
- [6] Tcherniak D., Allen, M.S. 2015. Experimental characterization of an operating Vestas V27 wind turbine using harmonic power spectra and OMA SSI. 6th International Operational Modal Analysis Conference 12-14 Mayıs, Gijon, Spain.
- [7] Magalhães, F., & Cunha, Á. 2011. Explaining operational modal analysis with data from an arch bridge. Mechanical systems and signal processing, Cilt 25(5), s. 1431-1450. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.08.001>
- [8] Kim, H. C., Kim, M. H., Choe, D. E. 2019. Structural health monitoring of towers and blades for floating offshore wind turbines using operational modal analysis and modal properties with numerical-sensor signals. Ocean Engineering, Cilt 188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106226>
- [9] Zhao, Y., Zhang, Y., Xu, J., Yu, P., Sun, B. 2022. Shaking table test on seismic performance of integrated station-bridge high-speed railway station, Structures. Cilt 46, s. 1981-1993. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.042>
- [10] Pacheco-Chérrez, J., & Probst, O. 2022. Vibration-based damage detection in a wind turbine blade through operational modal analysis under wind excitation. Materials Today: Proceedings, Cilt 56, s. 291-297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.159>
- [11] Saidin, S. S., Kudus, S. A., Jamadin, A., Anuar, M. A., Amin, N. M., Ibrahim, Z., ... & Sugiura, K. 2022. Operational modal analysis and finite element model updating of ultra-high-performance concrete bridge based on ambient vibration test. Case Studies in Construction Materials, Cilt 16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01117>
- [12] Avci, O., Alkhamis, K., Abdeljaber, O., Alsharo, A., & Hussein, M. 2022. Operational modal analysis and finite element model updating of a 230 m tall tower. Structures Cilt 37, s. 154-167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.078>
- [13] Li, J., Bao, T., & Ventura, C. E. 2022. An automated operational modal analysis algorithm and its application to concrete dams. Mechanical Systems and Signal Processing, Cilt 168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108707>
- [14] Hu, W. H., Thöns, S., Rohrmann, R. G., Said, S., Rücker, W. 2015. Vibration-based structural health monitoring of a wind turbine system. Part I: Resonance phenomenon, Engineering Structures, Cilt 89, s. 260-272. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.12.034>
- [15] Hu, W. H., Thöns, S., Rohrmann, R. G., Said, S., Rücker, W. 2015. Vibration-based structural health monitoring of a wind turbine system Part II: Environmental/operational effects on dynamic properties, Engineering Structures, Cilt 89, s. 273-290. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.12.035>
- [16] Worden, K., Tomlinson, G. R. 2019. Nonlinearity in structural dynamics: detection, identification and modelling. CRC Press.

- [17] Beck, J. L., & Katafygiotis, L. S. 1998. Updating models and their uncertainties. I: Bayesian statistical framework, *Journal of Engineering Mechanics- Proceedings of the ASCE*, Cilt 124(4), s. 455-462. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1998\)124:4\(455\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1998)124:4(455))
- [18] Katafygiotis, L. S., & Beck, J. L. 1998. Updating models and their uncertainties. II: Model identifiability, *Journal of Engineering Mechanics*, Cilt 124(4), s. 463-467. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1998\)124:4\(463\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1998)124:4(463))
- [19] Katafygiotis, L. S., Papadimitriou, C., Lam, H. F. 1998. A probabilistic approach to structural model updating, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Cilt 17(7-8), s. 495-507. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(98\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(98)00008-6)
- [20] Lam, H. F., Katafygiotis, L. S., & Mickleborough, N. C. 2004. Application of a statistical model updating approach on phase I of the IASC-ASCE structural health monitoring benchmark study, *Journal of engineering mechanics*, Cilt 130(1), s. 34-48. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2004\)130:1\(34\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2004)130:1(34))
- [21] Au, S. K. 2012. Connecting Bayesian and frequentist quantification of parameter uncertainty in system identification, *Mechanical systems and signal processing*, Cilt 29, s. 328-342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.01.010>
- [22] Giagopoulos, D., Arailopoulos, A., Dertimanis, V., Papadimitriou, C., Chatzi, E., Grompanopoulos, K. 2019. Structural health monitoring and fatigue damage estimation using vibration measurements and finite element model updating, *Structural Health Monitoring*, Cilt 18(4), s. 1189-1206. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921718790188>
- [23] Ching, J., Beck, J. L. 2004. New Bayesian model updating algorithm applied to a structural health monitoring benchmark, *Structural Health Monitoring*, Cilt 3(4), s. 313-332. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921704047499>
- [24] Yuen, K. V., Beck, J. L., Katafygiotis, L. S. 2006. Efficient model updating and health monitoring methodology using incomplete modal data without mode matching, *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, Cilt 13(1), s. 91-107. DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.144>
- [25] Azam, S. E., Papadimitriou, C., Chatzi, E. 2014. Recursive Bayesian filtering for displacement estimation via output-only vibration measurements, In *Proceedings of the 2014 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research*.
- [26] Mottershead, J. E., & Friswell, M. I. 1993. Model updating in structural dynamics: a survey. *Journal of sound and vibration*, Cilt 167(2), s. 347-375. DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1993.1340>
- [27] Ali, A., De Risi, R., Sextos, A. 2021. Seismic assessment of wind turbines: How crucial is rotor-nacelle-assembly numerical modeling?, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Cilt 141
- [28] ANSYS 2019 R3 Issued by ANSYS, Inc., Southpointe 2600 ANSYS Drive Canonsburg, PA 15317, USA.
- [29] LabVIEW 2020 Professional development system by National Instruments. 11500 North Mopac Austin, Texas 78759 USA.
- [30] ARTeMIS Modal Pro 4.0.1.5 2016 Ambient response testing and modal identification software by Structural Vibration Solutions ApS. NOVI Science Park, Niels Jernes Vej 10, DK 9220 Aalborg East, Denmark.
- [31] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. 2001. Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart materials and structures*, Cilt 10(3), s. 441.
- [32] Allemang, R. J. 2003. The modal assurance criterion- twenty years of use and abuse. *Sound and Vibration*, Cilt 37 (8), 14-23.