

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPI SAĞLIĞI İZLEME İÇİN ÇOK KANALLI TİTREŞİM ÖLÇÜM SİSTEMİ
TASARIMI VE YAPISAL PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Yusuf YANIK

AĞUSTOS 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPI SAĞLIĞI İZLEME İÇİN ÇOK KANALLI TİTREŞİM ÖLÇÜM SİSTEMİ
TASARIMI VE YAPISAL PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Yusuf YANIK

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 / 08 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 23 / 08 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Temel TÜRKER

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Yapı Sağlığı İzleme İçin Çok Kanallı Titreşim Ölçüm Sistemi Tasarımı ve Yapısal Parametrelerin Belirlenmesi” adlı bu çalışma; Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi tarafından desteklenen FDK-2023-10915 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasını bana öneren, yoğun çalışma temposu içerisinde çalışmamın her aşamasında benim yanımda olan, engin bilgi ve tecrübelerinden daima yararlandığım ve daha iyi ve daha güzel çalışmalar için beni sürekli olarak teşvik etmeyi ihmal etmeyen çok değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Temel TÜRKER’e teşekkürlerimi sunarım.

Tez ile ilgili değerli görüş ve önerilerini benimle paylaşan ve tezimi inceleyerek bana yol gösteren çok değerli Sayın Prof. Dr. Tayfun DEDE ve Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ hocalarıma ve uzaktan katılarak bilgilerini paylaşan Sayın Prof. Dr. Mehmet Aydın KÖMÜR ve Doç. Dr. Alirıza İlker AKGÖNEN hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, görüşlerinden faydalandığım, Doç. Dr. Hasan Tahsin ÖZTÜRK’e, İnş. Yük. Müh. Abdullah AYMELEK’e, Arş. Gör. Utku USLU’ya, Dr. Öğr. Üyesi Betül DEMİRTAŞ’a, Arş. Gör. Dr. Osman Tuğrul BAKİ’ye, Dr. Öğr. Üyesi Ali Fuat GENÇ’e, Arş. Gör. Gonca Kamber YILMAZ’a, Arş. Gör. Halime SOLAK’a, Arş. Gör. Kübra SAKA YILDIRIM’a, İnş. Yük. Müh. Bilal KUNT’a, İnş. Yük. Müh. Mohammed KARİMİ’ye ve Dr. İsmet ÇALIK’a teşekkür ederim. Ayrıca hayatım boyunca yanımda olan tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma minnettarlığımı belirtirim.

Akademik ve özel hayattaki güçlüklerle birlikte göğüs gerdiğimiz, acıları ve mutlulukları birlikte paylaştığımız gerek iyi gerekse en zor zamanlarımda her zaman maddi ve manevi olarak yanımda olan değerli kardeşim Yük. Müh. Ömer YILDIRIM’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde ellerinden gelen tüm imkanları sağlayan, özellikle hayatımın bu önemli aşamasında maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim ve bana her türlü desteği sağlayan eşim Nurgül YANIK ve ailesine; babam Turan YANIK’a, annem Aysel YANIK’a, kardeşlerim Bahar, Yakup ve Oktay YANIK’a müteşekkir olduğumu belirtir, bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Yusuf YANIK

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yapı Sağlığı İzleme İçin Çok Kanallı Titreşim Ölçüm Sistemi Tasarımı ve Yapısal Parametrelerin Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Temel TÜRKER’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 23/08/2024

Yusuf YANIK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	3
1.2.1. Yapısal Takip Sistemleriyle İlgili Yapılan Çalışmalar	3
1.2.2. Dinamik Davranışın Belirlenmesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar	5
1.2.3. Çevresel Etkilerin Dinamik Davranışa Etkisini İçeren Çalışmalar	19
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı	30
1.4. Yapı Sağlığı İzleme Sistemleri.....	31
1.4.1. Modal Parametre Belirleme Yöntemleri	33
1.4.2. Ölçüm Sistemleri.....	36
1.5. Model Kalibrasyon/Güncelleme/İyileştirme İşlemi	48
1.5.1. Başlangıç Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	49
1.5.2. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	50
1.5.3. Sınır Şartlarının Tanımlanması	51
1.5.4. Sonlu Eleman Yöntemiyle Modal Analiz	51
1.5.5. Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması	54
1.5.6. Amaç Fonksiyonlarının Belirlenmesi	54
1.5.7. Değişkenlerin Belirlenmesi.....	55
1.5.8. Değişim Aralığının ve Yakınsama Kriterinin Tayin Edilmesi.....	55
1.6. İstatistiksel Değerlendirmeler.....	56
1.6.1. İstatistiksel Kavramlar	56
1.6.2. Regresyon Analizi.....	59

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	64
2.1. Titreşim Ölçüm Sisteminin Oluşturulması.....	64
2.1.1. Titreşim Ölçüm Sisteminin Donanım Kısımının Oluşturulması.....	64
2.1.2. Titreşim Ölçüm Sisteminin Yazılım Kısımının Oluşturulması.....	76
2.2. Geliştirilen Sistemin Doğrulanması	89
2.2.1. Çelik Model Ölçümleri	89
2.2.2. Farklı Yapılar Üzerinde Gerçekleştirilen Ölçümlerle Yapılan Karşılaştırmalar	95
2.3. Tuğla Duvar Model Çalışmaları.....	102
2.3.1. TDM-1'in Ölçümleri.....	103
2.3.2. TDM-2'nin Ölçümleri.....	110
2.3.3. TDM-3'ün Ölçümleri.....	115
2.3.4. Tuğla Modellerin Regresyon Analiz Çalışmaları	120
2.4. Trabzon Ayasofya'daki Kule Üzerinde Yapılan Çalışmalar.....	130
2.4.1. Kuleye ait Genel Bilgiler	131
2.4.2. Kulenin Ölçümleri.....	133
2.4.3. Kuleye ait Modelin Regresyon Analiz Çalışmaları	142
2.4.4. Kulenin Sonlu Eleman Modellemesi	149
2.4.5. Kulenin SE Model Güncellemeleri	151
2.4.6. Kulenin Deprem Analizleri.....	152
2.5. İskenderpaşa Cami'sinin Minaresi Üzerinde Yapılan Çalışmalar	154
2.5.1. İskenderpaşa Cami'sine ve Minaresine ait Genel Bilgiler.....	154
2.5.2. Minarenin Ölçümleri.....	155
2.5.3. Minareye ait Modelin Regresyon Analiz Çalışmaları.....	160
2.5.4. Minarenin Sonlu Eleman Modellemesi.....	167
2.5.5. Minarenin SE Model Güncellemeleri	169
2.5.6. Minarenin Deprem Analizleri	171
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	173
3.1. Tuğla Duvar Model Verilerinin İncelenmesi	173
3.1.1. Tuğla Modellerin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri	173
3.1.2. Tuğla Modellerin Neme Bağlı Değişimleri	175
3.1.3. Tuğla Modellerin Nem ve Sıcaklığa Bağlı Değişimleri.....	176
3.1.4. Tuğla Modellerin Nem, Sıcaklık ve Doygunluğa Bağlı Değişimleri.....	178
3.1.5. Tuğla Modelde Nem, Sıcaklık ve Hacme Bağlı Değişimler.....	179

3.1.6. Tuğla Modelde Nem, Sıcaklık, Doygunluk ve Hacme Bağlı Değişimler	179
3.1.7. Parametre Sayısına Göre Elde Edilen Sonuçların İrdelenmesi	180
3.2. Trabzon Ayasofya'daki Kuleye ait Verilerin İncelenmesi.....	182
3.2.1. Kulenin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri	182
3.2.2. Kulenin Neme Bağlı Değişimleri.....	183
3.2.3. Kulenin Nem ve Sıcaklığa Bağlı Değişimleri	184
3.2.4. Kulenin Model Güncelleme Etkilerinin İncelenmesi.....	184
3.2.5. Kulenin Deprem Analizlerinin Değerlendirilmesi	185
3.3. İskenderpaşa Cami'sinin Minaresine ait Verilerin İncelenmesi.....	186
3.3.1. Minarenin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri.....	186
3.3.2. Minarenin Neme Bağlı Değişimleri.....	187
3.3.3. Minarenin Nem ve Sıcaklığa Bağlı Değişimleri	188
3.3.4. Minarenin Model Güncelleme Etkilerinin İncelenmesi.....	188
3.3.5. Minarenin Deprem Analizlerinin Değerlendirilmesi	189
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	191
5. KAYNAKLAR	197
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

YAPI SAĞLIĞI İZLEME İÇİN ÇOK KANALLI TİTREŞİM ÖLÇÜM SİSTEMİ TASARIMI VE YAPISAL PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Yusuf YANIK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Temel TÜRKER
2024, 214 Sayfa

Bu tez çalışmasında, yapıların yapısal davranışlarının takibinde yaygın olarak kullanılan titreşim ölçüm sistemlerine benzer, yerli üretim sonucu düşük maliyetli olan, titreşim ölçümlerine birçok kolaylık getiren ve pek çok avantajıyla mevcut sistemlerden üstün olan yüksek hassasiyetli çok kanallı titreşim ölçüm sistemi geliştirilmiş ve bu sistemle çevresel sıcaklık-nem gibi parametreler altında seçilen yapıların yapısal davranışlarındaki değişiklikler değerlendirilmiştir. Geliştirilen sistemle laboratuvar modelleri ve gerçek yapılar üzerinde belirli zaman aralıklarında doğal frekanslar çevresel titreşim testi yöntemiyle takip edilmiş ve doğal frekanslarla sıcaklık, nem vb. parametreler arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Sunulan çalışma dört ana bölümü içermekte ve ilk bölümde, konuyla ilgili yapılmış çalışmalara ve kullanılan yöntemlere ait bilgilere yer verilmiştir. İkinci bölümde, geliştirilen ölçüm sistemine, veri toplama yazılımına, geliştirilen sistemin doğrulanmasına, laboratuvar ve gerçek yapılar üzerinde yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, gerçekleştirilen analizler değerlendirilmiş ve son bölümde ise elde edilen sonuçlar ile öneriler sunulmuştur. Çalışmadan, titreşim testinin yapısal davranıştaki değişiklikleri belirlemede etkin bir yöntem olduğu ve sıcaklık-nem gibi çevresel etkilerin yapısal davranış üzerindeki etkisinin dikkate alınmasının gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çevresel etkiler, Doğal frekans, Model güncelleme, Nem, Sıcaklık, Titreşim ölçüm sistemi, Yapısal davranış

PhD. Thesis

SUMMARY

MULTI-CHANNEL VIBRATION MEASUREMENT SYSTEM DESIGN FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING AND DETERMINATION OF STRUCTURAL PARAMETERS

Yusuf YANIK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Temel TÜRKER
2024, 214 Pages

In this thesis, a high precision multi-channel vibration measurement system has been developed that is similar to vibration measurement systems commonly used in monitoring the structural behavior of structure. The system, which is low-cost as a result of domestic production, brings many conveniences to vibration measurements and is superior to existing systems with its many advantages. With this system, changes in the structural behavior of selected structures under parameters such as environmental temperature-humidity were evaluated. With the system, frequencies were monitored at certain time intervals on laboratory models and real structures using ambient vibration test method, and the relationship between the natural frequencies and parameters was attempted to be determined. The presented study includes four main sections and in the first section, information on the studies conducted on the subject and the methods used is given. In the second section, the developed system, data acquisition software, verification of the developed system, and studies on laboratory and real structures are included. In the third section, the analyses performed were evaluated and in the last section, the results and recommendations were presented. From the study, it was concluded that vibration testing is an effective method to determine changes in structural behavior and that the effect of environmental effects such as temperature-humidity on structural behavior should be taken into consideration.

Key Words: Environmental effects, Humidity, Model update, Natural frequency, Structural behavior, Temperature, Vibration measurement system

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Kulenin ilk 2 modunun sıcaklıkla değişimi (Saisi vd., 2015).....	20
Şekil 2. Yapının ilk modunun sıcaklıkla değişimi (Masciotta vd., 2016)	21
Şekil 3. Yapının 2. moduna ait frekansta deprem sonrasındaki kayma (Gentile vd., 2016).....	21
Şekil 4. Sıcaklığın frekansla ilişkisi (a), çatlak genişliğinin frekansla ilişkisi (b), çatlak genişliğinin sıcaklıkla ilişkisi (c) (Kita vd., 2019).....	24
Şekil 5. Yapının 1. moda ait frekansının nemle ilişkisi (Barsocchi vd., 2021)	28
Şekil 6. Minarenin ilk 2 frekansının sıcaklıkla ilişkisi (Akhlaq vd., 2022).....	29
Şekil 7. İlk frekansın sırasıyla sıcaklıkla ve nemle ilişkisi (Standoli vd., 2023).....	30
Şekil 8. ÇTT ölçüm düzeneği örneği	35
Şekil 9. İvmeölçer örneklerinden bazıları.....	37
Şekil 10. Veri toplama ünitelerine ait örneklerden bazıları	39
Şekil 11. SE yönteminde kullanılan elemanlar (Türker, 2011)	49
Şekil 12. Sistem elemanları ve sistemin genel olarak çalışma prensibi.....	65
Şekil 13. Sistemin bir yapı üzerindeki veri akış şeması.....	65
Şekil 14. ADXL355z dijital ivmeölçer sensörü ve blok diyagramı.....	67
Şekil 15. Arduino nano modülü ve pinleri.....	68
Şekil 16. HC-05 arduino-bluetooth modülü	69
Şekil 17. İvmeölçer-arduino-bluetooth modüllerindeki I2C ve UART bağlantı şeması	70
Şekil 18. Şarj modülü ve lityum batarya.....	70
Şekil 19. BMP180 basınç sensörü	71
Şekil 20. AHT10 sıcaklık-nem sensörü	71
Şekil 21. I2C protokolüyle tasarlanmış CEVS sistemleri.....	73
Şekil 22. Titreşim ölçüm sistemi board tasarımı ve baskısı.....	73
Şekil 23. Kutu tasarımı ve SPI protokolüyle çalışan titreşim ölçüm sistemi.....	74
Şekil 24. PCB devre tasarımı ile devre üzerine yerleştirilen sistem elemanları	75
Şekil 25. Logic 2.3.39 programından bazı görüntüler	76
Şekil 26. MATLAB CEVA Data Logger yazılımı	78
Şekil 27. MATLAB CEVA Data Logger ile bir ölçüme ait veri görüntüsü.....	80
Şekil 28. MATLAB veri toplama yazılımı	81

Şekil 29.	Veri toplama C# yazılımı.....	83
Şekil 30.	CEVS sistemiyle deneme ölçüm görüntüleri.....	83
Şekil 31.	FFT_Deneme MATLAB yazılımı	84
Şekil 32.	Deneme ölçüm verilerinin geliştirilen yazılımda incelenmesi	85
Şekil 33.	CEVA veri toplama yazılımı	85
Şekil 34.	Titreşim ölçümleri için veri akış şeması.....	87
Şekil 35.	Geliştirilen sistem, yazılım ve alınan sinyal örneğinin analizi	88
Şekil 36.	Doğrulanma için kurulan ölçüm düzeneği.....	90
Şekil 37.	NI ve CEVS sistemlerine ait yazılımlar.....	92
Şekil 38.	NI ve CEVS sistemleriyle alınan ivme değerlerinin grafikleri.....	93
Şekil 39.	NI ve CEVS sistemleriyle işlenen verilerin tekil değer grafikleri.....	94
Şekil 40.	Fatih Cami'sine ve minaresine ait görüntü	96
Şekil 41.	CEVS sistemi ile alınan ölçüm düzeneklerine ait bazı görüntüler	97
Şekil 42.	Minarede önceki çalışmalara ait bazı görüntüler (Çalık, 2017)	97
Şekil 43.	Fatih Cami'sinin minaresine ait tekil değer grafiklerinden bazıları	98
Şekil 44.	KTÜ kampüsünde bulunan camiye ve minareye ait görüntü	99
Şekil 45.	Minarede bazı ölçüm düzenekleri.....	100
Şekil 46.	Minarenin tekil değer grafiklerinden bazıları	101
Şekil 47.	Tuğla duvar modeller (soldan sağa 1., 2. ve 3. model).....	103
Şekil 48.	TDM-1'in kuru, ıslak ve doygun durumları için ÇTT'sine ait görüntü	104
Şekil 49.	TDM-1 üzerinde CEVS yerleşim düzeni ve eksenleri	105
Şekil 50.	CEVA Data Logger yazılımında ölçüm sonucu alınan bir görüntü	106
Şekil 51.	TDM-1'in sıcaklık ve nem ölçümü.....	106
Şekil 52.	TDM-1'in tekil değer grafiklerinden bazıları	108
Şekil 53.	TDM-2'nin kuru, ıslak ve doygun durumları için ÇTT'sine ait görüntü	110
Şekil 54.	TDM-2 üzerinde CEVS yerleşim düzeni ve eksenleri	111
Şekil 55.	TDM-2'nin sıcaklık ve nem ölçümü.....	111
Şekil 56.	TDM-2'nin tekil değer grafiklerinden bazıları	113
Şekil 57.	TDM-3'ün kuru, ıslak ve doygun durumları için ÇTT'sine ait görüntü.....	115
Şekil 58.	TDM-3 üzerinde CEVS yerleşim düzeni ve eksenleri	116
Şekil 59.	TDM-3'ün sıcaklık ve nem ölçümü.....	116
Şekil 60.	TDM-3'ün tekil değer grafiklerinden bazıları	118
Şekil 61.	TDM-1'in doğal frekanslarının sıcaklıkla ilişkisi.....	122
Şekil 62.	TDM-2'nin doğal frekanslarının sıcaklıkla ilişkisi.....	123

Şekil 63.	TDM-3'ün doğal frekanslarının sıcaklıkla ilişkisi.....	124
Şekil 64.	TDM-1'in doğal frekanslarının nem ile ilişkisi.....	125
Şekil 65.	TDM-2'nin doğal frekanslarının nem ile ilişkisi.....	126
Şekil 66.	TDM-3'ün doğal frekanslarının nem ile ilişkisi.....	127
Şekil 67.	Ayasofya Cami'si ve kuleye ait görüntü	131
Şekil 68.	Kulenin 2009 ve 2012 yıllarına ait görüntüsü (Osmancikli vd., 2012)	132
Şekil 69.	Kulenin son restorasyonuna ait cephe görüntüleri.....	132
Şekil 70.	Kuleye yerleştirilen sistemlere ait ölçüm düzeneklerinden bazıları	133
Şekil 71.	CEVA Data Logger yazılımı ile ivme verilerine ait görüntü	134
Şekil 72.	Kulenin sıcaklık-nem ölçümüne ait bazı görüntüler.....	135
Şekil 73.	Kulenin tekil değer grafiklerinden bazıları.....	138
Şekil 74.	Kulenin doğal frekanslarının sıcaklığa göre değişimi	143
Şekil 75.	Kulenin doğal frekanslarının sıcaklıkla ilişkisi	145
Şekil 76.	Kulenin doğal frekanslarının neme göre değişimi.....	146
Şekil 77.	Kulenin doğal frekanslarının nemle ilişkisi.....	147
Şekil 78.	3-D görünüş ve kesitler.....	149
Şekil 79.	Kulenin SE modeline ait mesh görünüş ve kesitleri.....	149
Şekil 80.	Kulenin ilk 5 moduna ait mod şekilleri ve frekans değerleri.....	150
Şekil 81.	Kulenin SE model güncelleme aşaması.....	151
Şekil 82.	Pazarcık depremine ait ivme zaman grafiği.....	153
Şekil 83.	Kulenin başlangıç modeline ait yer değiştirme ve gerilme değerleri	153
Şekil 84.	İskenderpaşa Cami'sine ve minaresine ait görüntü	154
Şekil 85.	Minareye ait görüntüler	155
Şekil 86.	Minarenin ölçüm düzeneklerinden bazıları	156
Şekil 87.	Minare üzerinde gerçekleştirilen bir ölçüme ait ivme değerleri.....	156
Şekil 88.	Minarenin tekil değer grafiklerinden bazıları	158
Şekil 89.	Minarenin ilk 7 frekansının sıcaklığa göre değişimi	161
Şekil 90.	Minarenin doğal frekanslarının sıcaklıkla ilişkisi.....	162
Şekil 91.	Minarenin ilk 7 frekansının neme göre değişimi.....	164
Şekil 92.	Minarenin doğal frekanslarının nem ile ilişkisi.....	165
Şekil 93.	Minarenin başlangıç SE modeline ait bazı görünüşler	168
Şekil 94.	Minarenin ilk 7 moduna ait mod şekilleri ve frekansları.....	169
Şekil 95.	Minarenin SE model güncelleme aşaması.....	170
Şekil 96.	Düzce depremine ait ivme-zaman grafiği.....	171

Şekil 97.	Minarenin başlangıç SE modelinin yer değiştirme (m) ve gerilmeleri (N/m ²).....	172
Şekil 98.	TDM-1'in frekansları ile sıcaklık ilişkisindeki r ve r ² değerleri.....	173
Şekil 99.	TDM-2'nin frekansları ile sıcaklık ilişkisindeki r ve r ² değerleri.....	174
Şekil 100.	TDM-3'ün frekansları ile sıcaklık ilişkisindeki r ve r ² değerleri.....	174
Şekil 101.	TDM-1'in frekansları ile nem ilişkisindeki r ve r ² değerleri	175
Şekil 102.	TDM-2'nin frekansları ile nem ilişkisindeki r ve r ² değerleri	175
Şekil 103.	TDM-3'ün frekansları ile nem ilişkisindeki r ve r ² değerleri	176
Şekil 104.	ÇDRA ile elde edilen nem ve sıcaklığa bağlı r ² değerleri	177
Şekil 105.	Tuğla modeller için nem ve sıcaklığa bağlı r ² değerleri (MARS).....	177
Şekil 106.	Tuğla modeller için 3 değişkene bağlı r ² değerleri.....	178
Şekil 107.	Tüm veriyi içeren model için 3 ve 4 parametrelili r ² değerleri.....	179
Şekil 108.	TDM-1 için 2 ve 3 parametrelili r ² karşılaştırma grafikleri.....	180
Şekil 109.	TDM-2 için 2 ve 3 parametrelili r ² karşılaştırma grafikleri.....	181
Şekil 110.	TDM-3 için 2 ve 3 parametrelili r ² karşılaştırılması.....	181
Şekil 111.	Modellerin en yüksek r ² değerlerinin karşılaştırılması.....	182
Şekil 112.	Kulenin frekans-sıcaklık ilişkisinde elde edilen r ² değerleri	183
Şekil 113.	Kulenin frekans-nem ilişkisinde elde edilen r ² değerleri.....	183
Şekil 114.	Kulenin frekanslarıyla N-S ilişkisinde elde edilen r ² değerleri	184
Şekil 115.	Minarenin frekans-sıcaklık ilişkisinde elde edilen r ² değerleri	187
Şekil 116.	Minarenin frekans-nem ilişkisinde elde edilen r ² değerleri.....	187
Şekil 117.	Minarenin frekanslarıyla N-S ilişkisinde elde edilen r ² değerleri	188

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Sistemlerin teknik özellikleri.....	91
Tablo 2. CEVS ve NI ile elde edilen frekanslar ve karşılaştırmalar	95
Tablo 3. Fatih Cami'sinin minaresine ait doğal frekanslar ve karşılaştırmalar	99
Tablo 4. Minarenin deneysel doğal frekansları ve karşılaştırmalar	102
Tablo 5. Tuğla duvar modellere ait geometrik bilgiler	103
Tablo 6. TDM-1'de gerçekleştirilen ölçümlere ait bilgiler.....	107
Tablo 7. TDM-1'in deneysel doğal frekansları.....	109
Tablo 8. TDM-2'de gerçekleştirilen ölçümlere ait bilgiler.....	112
Tablo 9. TDM-2'nin deneysel doğal frekansları.....	114
Tablo 10. TDM-3'te gerçekleştirilen ölçümlere ait bilgiler.....	117
Tablo 11. TDM-3'ün deneysel doğal frekansları.....	119
Tablo 12. Tuğla modellerin doğal frekanslarının sıcaklığa bağlı denklemleri	121
Tablo 13. Tuğla modellerin doğal frekanslarının neme bağlı denklemleri.....	126
Tablo 14. Tuğla modellerin frekanslarının nem ve sıcaklık ile ilişkileri (ÇDRA)	128
Tablo 15. TDM-1 için 2 parametrelili (N-S) MARS analizi.....	128
Tablo 16. TDM-2 için 2 parametrelili (N-S) MARS analizi.....	128
Tablo 17. TDM-3 için 2 parametrelili (N-S) MARS analizi.....	129
Tablo 18. TDM-1 için 3 parametrelili (N-S-D) MARS analizi.....	129
Tablo 19. TDM-2 için 3 parametrelili (N-S-D) MARS analizi.....	129
Tablo 20. TDM-3 için 3 parametrelili (N-S-D) MARS analizi.....	129
Tablo 21. Tüm verili model için 3 parametrelili (N-S-H) MARS analizi.....	130
Tablo 22. Tüm verili model için 4 parametrelili (N-S-D-H) MARS analizi.....	130
Tablo 23. Kulede gerçekleştirilen ölçümlere ait bilgiler.....	135
Tablo 24. Kulenin deneysel doğal frekansları (Hz)	140
Tablo 25. Kulenin frekanslarının sıcaklığa bağlı denklemleri.....	144
Tablo 26. Kulenin 1 parametrelili (S) MARS analizi	145
Tablo 27. Kulenin doğal frekanslarının neme bağlı denklemleri.....	148
Tablo 28. Kulenin 1 parametrelili (N) MARS analizi.....	148
Tablo 29. Kulenin doğal frekanslarının nem-sıcaklık ile ilişkileri (ÇDRA).....	148
Tablo 30. Kulenin 2 parametrelili (N-S) MARS analizi	148

Tablo 31.	Kulenin SE modellerindeki malzeme özellikleri.....	152
Tablo 32.	Kulenin deneysel, sayısal doğal frekansları (Hz) ve farkları.....	152
Tablo 33.	Kulenin deprem analizlerinden elde edilen değerler	153
Tablo 34.	Minarede gerçekleştirilen ölçümlere ait bilgiler	157
Tablo 35.	Minarenin doğal frekansları.....	159
Tablo 36.	Minarenin doğal frekanslarının sıcaklığa bağlı denklemleri	162
Tablo 37.	Minarenin 1 parametrelili (S) MARS analizi.....	163
Tablo 38.	Minarenin doğal frekanslarının neme bağlı denklemleri.....	165
Tablo 39.	Minarenin 1 parametrelili (N) MARS analizi	166
Tablo 40.	Minarenin frekanslarının nem-sıcaklıkla ilişkileri (ÇDRA).....	167
Tablo 41.	Minarenin 2 parametrelili (N-S) MARS analizi	167
Tablo 42.	Minarenin başlangıç SE modelinde kullanılan malzeme özellikleri	168
Tablo 43.	Minarenin SE modellerindeki malzeme özellikleri	170
Tablo 44.	Minarenin deneysel, sayısal doğal frekansları (Hz) ve farkları.....	171
Tablo 45.	Minarenin deprem analizlerinden elde edilen değerler	172

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ADC	: Analog dijital dönüştürücü
A_k	: Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunun k. artık değer matrisi
AMMK	: Ağırlıklı mutlak modal kütle kriteri
AMMY	: Ağırlıklı mutlak modal yer değiştirme kriteri
AMNF	: Ağırlıklı mutlak nispi fark kriteri
ANF	: Ağırlıklı nispi fark kriteri
A-OMA	: Otomatik operasyonel modal analiz
A_*	: Durum matrisi
a	: Sabit değer
a_k	: k. temel fonksiyon kat sayısı
a_0, a_n	: Fourier dönüşümü katsayı fonksiyonları
BDRA	: Basit doğrusal regresyon analizi
BRA	: Basit regresyon analizi
B_*	: Veri matrisi
b_n	: Fourier dönüşümü katsayı fonksiyonu
b_0	: Regresyon katsayısı
CEVA	: Civil engineering vibration analysis
CEVS	: Civil engineering vibration system
C_*	: Sistem davranış matrisi
c	: Yapının sönüm katsayısı
[C]	: Sönüm matrisi
ÇDRA	: Çoklu doğrusal regresyon analizi
ÇRA	: Çoklu regresyon analizi
ÇSDS	: Çok serbestlik dereceli sistem
ÇTT	: Çevresel titreşim testi
D	: Doygunluk
DAFZ	: Doğu Anadolu fay zone
DMA	: Deneyisel modal analiz
DRA	: Doğrusal regresyon analizi

D.N.	: Düğüm noktası
D_*	: Doğrudan iletim matrisi
dB	: Decibel
E_{duv}	: Duvarın elastisite modülü
E_*	: Beklenen değer operatörü
e	: Hata miktarı
FFT	: Hızlı Fourier dönüşümü
F_s	: Örnekleme frekansı
FTAA	: Frekans tanım alanında ayrıştırma
$F(t)$	: Sisteme dışarıdan uygulanan dinamik kuvvet
f_b	: Taşın dayanımı
f^d	: Deneysel doğal frekans
f_k	: Karakteristik basınç dayanımı
f^t	: Teorik doğal frekans
f_m	: Harcın dayanımı
f_{max}	: Maksimum frekans
$\{f(t)\}$	: Kuvvet vektörü
GFTAA	: Geliştirilmiş frekans tanım alanında ayrıştırma
GPS	: Global positioning system
GUI	: Grafik kullanıcı arayüzü
Güncel _{min}	: Minimum deneysel doğal frekanslara göre güncellenmiş SE modeli
Güncel _{maks}	: Maksimum deneysel doğal frekanslara göre güncellenmiş SE modeli
$G_{xx}(j\omega)$	: Etki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	: Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu
g	: Yerçekimi ivmesi
H	: Hacim
Hertz	: Hz
$H(j\omega)$	: Frekans davranış fonksiyonu
I2C	: Inter-integrated circuit
KTÜ	: Karadeniz Teknik Üniversitesi
K	: Temel fonksiyon sayısı
K	: Yapının rijitliği

k	: Düğüm sayısı
$k_{1,m}$	: Düğüm değeri
$[K]$	: Rijitlik matrisi
L_m	: Etkileşim derecesi
LVDT	: Doğrusal değişken diferansiyel transformatör
MAC	: Modal güvence kriteri
MARS	: Çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (ÇDURE)
MEMS	: Mikro elektro mekanik sistem
MISO	: Master giriş slave çıkış
MOSI	: Master çıkış slave giriş
m	: Yapının kütlesi
m_r	: r . moda ait genelleştirilmiş kütle matrisi
$[M]$	: Kütle matrisi
N	: Nem
NDT	: Hasarsız ölçüm teknikleri
NS	: Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı
N_s	: Zaman örnek sayısı
OMA	: Operasyonel modal analiz
OMGK	: Ortalama modal güvence kriteri değeri
PSB	: Baskı devre kartı (printed circuit board)
PSD	: Güç spektral yoğunluk
RH	: Rölatif fark kriteri
R_k	: Artık değer fonksiyonu
RSM	: Tepki yüzeyi yöntemi
RS-HDMR	: Rastgele örnekleme yüksek boyutlu model gösterimi
r	: Korelasyon katsayısı
r^2	: Determinasyon katsayısı
$\{R(t)\}$	: Titreşim kuvveti
S	: Sıcaklık
SAB	: Stokastik altalan belirleme
SCL	: Serial clock
SDA	: Serial data
SE	: Sonlu eleman

S_i	: Skaler tekil değerleri içeren diyagonal matris
SH	: Standart hata
SPI	: Serial peripheral interface
SS	: Slave select
SVD	: Tekil değerlerin ayrıştırılması
s_{ij}	: Skaler tekil değerler
T	: Periyot
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TDM	: Tuğla duvar model
TSDS	: Tek serbestlik dereceli sistem
UART	: Universal asynchronous receiver transmitter
U_i	: Tekil vektörleri içeren bütün matris
USART	: Universal synchronous and asynchronous receiver transmitter
u_{ij}	: Tekil vektörler
u_k	: Belirgin etki sinyal vektörü
$u(t)$	: Yapının zamana bağlı yer değiştirmesi
$\dot{u}(t)$	: Yapının zamana bağlı hızı
$\ddot{u}(t)$	: Yapının zamana bağlı ivmesi
$\{U\}$	: Zamandan bağımsız genlik
$\{u(t)\}$	: Zamana bağlı yer değiştirme vektörü
$\{\dot{u}(t)\}$	: Zamana bağlı hız vektörü
$\{\ddot{u}(t)\}$	: Zamana bağlı ivme vektörü
v_k	: İvmeölçer kusurlarından dolayı işlenen gürültü sinyalleri
WSN	: Kablosuz sensör ağı
w_k	: Modeldeki belirsizlikler ve kusurlar nedeniyle işlenen gürültü sinyalleri
X_i	: X serisinin i. elemanı
x	: Bağımsız değişken
x_k	: Ayrık-zaman durum vektörü
$x_{v(1,m)}$	: Bağımsız değişken değeri
$x(t)$	: Durum vektörü
Y_i	: Y serisinin i. elemanı
YSA	: Yapay sinir ağı
YSİ	: Yapı sağlığı izleme

y	: Bağımlı değişkenin gerçek değeri
$\hat{y}$	: Bağımlı değişkenin tahmini (beklenen, teorik) değeri
ZTT	: Zorlanmış titreşim testi
β_0	: Modeldeki sabit terim
$\beta_k(X_t)$	: t. bağımsız değişken için k. temel fonksiyonu
Δf	: Frekans aralığı
Δt	: Zaman örnekleme aralığı
δ_f	: Frekanslardaki değişim oranı
δ_{pq}	: Kronecker delta
λ_k	: Kutup fonksiyonu
μ	: Aritmetik ortalama
μ_x	: X serisinin aritmetik ortalaması
μ_y	: Y serisinin aritmetik ortalaması
σ	: Standart sapma
σ_x	: x değişkeninin standart sapması
σ_y	: y değişkeninin standart sapması
σ^2	: Varyans
ω	: Sönümsüz doğal açısal frekans

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Tarih boyunca insanoğlu ihtiyaçlarını gidermek için farklı malzemelerle ve farklı yöntemlerle birçok yapı inşa etmiştir. Bu yapıların yapısal davranışları, malzeme özelliklerindeki zamana bağlı değişimle, aşırı ve düzensiz yüklemelerle, zemin oturmalarıyla, savaşlarla, hava değişimiyle, deprem, sel, yangın vb. doğal veya suni etkenlerle değişiklik gösterebilmektedir. Bunun sonucunda yapılarda kısmi yıkılmalar ya da tam yıkılmalar görülebilmektedir.

Yapıların dinamik karakteristikleriyle yapısal davranışlar tanımlanabilmektedir. Dinamik karakteristikler arasında yapının doğal frekansları ilk akla gelenler arasındadır. Doğal frekanslar çeşitli sebeplerle zaman zaman artmakta/azalmakta ya da kalıcı değişimlere uğrayabilmektedir. Birçok yapı mevsimsel değişimlerden büyük oranda etkilenebilmekte ya da aldığı hasar sonucu kalıcı değişim gösterebilmektedir. Yapılara ait doğal frekans değerleri özellikle sıcaklık-nem gibi çevresel etmenlerle bir dalgalanma yaşayabilmektedir. Yani doğal frekanslardaki ani değişimler, sadece yapıda oluşan hasardan değil de sıcaklık-nem vb. çevresel etkilerle oluşan geçici değişimlerden de oluşabilmektedir. Bu sebeplerle frekanslardaki değişimin sırf rijitlikle alakalı olmadığı başka durumların da etkili olabileceği yapılan birçok çalışmada ortaya konulmuştur. Sayılan sebeplerden ötürü frekans değerlerindeki değişimin nedeninin ortaya konulması, değişimin çevresel etkilere mi yoksa yapının etrafında ya da yapının kendisinde oluşan etkilere mi bağlı olduğuna dair yapılacak doğru bir değerlendirme açısından son derece önemlidir. Yapıların yapısal takibini yapabilme ve yapısal davranışı belirleme yöntemlerinin genel adına yapı sağlığı izleme (YSİ) yöntemi denilmektedir. Bu yöntem görüntü işleme tabanlı, titreşime dayalı, lazer tabanlı yöntemler gibi alt yöntemlere ayrılabilen, sayılan bu yöntemlerin birbirlerine göre avantaj-dezavantajları bulunabilmekte ve günümüzde yaygın olarak kullanılabilmektedir.

Titreşime dayalı YSİ yöntemi yapının dinamik karakteristiklerindeki değişikliklerin periyodik ya da uzun süreli olarak gözlemlenmesine bağlı olup yapı üzerinden alınan titreşim verileriyle gerçekleştirilebilmektedir. Yapının takibi sonucunda yapının dinamik

karakteristiklerinin değişim bandı belirlenebilmekte ve yapısal davranıştaki değişimler değerlendirilebilmektedir.

Titreşim verilerinin toplanmasında birçok sistem bulunmakta olup bu mevcut sistemlerin birçoğu yazılımsal ve donanımsal olarak kendine özgü özelliklere sahip değiştirilemeyen, yapı üzerinden alınan veriyi sadece kendi formatında kaydeden, verileri başka programlar tarafından açılmayan ve yurt dışı kaynaklı olduğundan maliyeti oldukça fazla olan sistemlerdir. Ayrıca mevcut titreşim ölçüm sistemlerinin daha çok tek ve üç eksenli ivmeölçerler için tasarlanmış olması kullanıcının kanal giriş sayısını etkilemekte ve kullanıcıları kısıtlayabilmektedir. Tez çalışması kapsamında, yapıların yapısal parametrelerinin belirlenmesi için yüksek hassasiyetli çok kanallı titreşim ölçüm sistemi (civil engineering vibration system-CEVS) ve veri toplama yazılımı (civil engineering vibration analysis-CEVA) geliştirilerek ülkemizde bu alandaki çalışmalar için bir altyapı oluşturulmasına katkı sağlanmış ve mevcut sistemlere alternatif bir sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sistemde en küçük titreşimleri bile ayırt edebilen üç eksenli dijital ivmeölçer kullanılması ölçüm sonuçlarının verimliliğini büyük oranda artırmaktadır. Ayrıca sistemde harici bir veri toplama ünitesi kullanılmayarak daha pratik bir kullanım sağlamaktadır. CEVS sisteminin küçük boyutlarda ve hafif olması nedeniyle ölçüm sisteminin taşınmasını, yapıya monte edilmesini ve yapıdan sökülmesini kolaylaştırmaktadır. Geliştirilen sistemle yapıların davranışları hem yapay hem de çevresel etkiler (dış yükler, trafik, sıcaklık, nem, patlatma vb.) kullanılarak belirlenebilmekte ve böylece yapıda oluşan olası değişimler incelenebilmektedir.

Olası bir hasar durumunda meydana gelecek değişimin, çevresel koşullara (sıcaklık ve nem) bağlı değişimden ayırt edilebilmesi için yapının hasarsız durumdaki sıcaklık ve neme bağlı değişim aralığının belirlenmesi oldukça önemlidir. Bununla ilgili gerçek yapılar üzerinde yapılan çalışmalar sınırlı olup literatür incelendiğinde ülkemizde böyle çalışmaların yetersiz kaldığı, bu çalışmaların yurt dışında daha çok tarihi yapılar katedral (Gentile vd., 2019a), kilise (Masciotta vd., 2016) ve çan kuleleri (Ubertini vd., 2017; Cavalagli vd., 2017; Gentile vd., 2019b) üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Ülkemizde yakın geçmişte olan felaketlerden sonra yapısal davranışı belirlemeye yönelik yapılacak kapsamlı çalışmaların ülkemiz açısından faydalı olacağı düşünülmekte ve yapılar üzerinden ölçümler alınırken sıcaklık-nem gibi çevresel etkenlere bağlı değişimlerin de ölçülebilmesi ile yenilikçi yaklaşımların ortaya konulabilmesi hedeflenmektedir.

1.2. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Bu bölümde konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar incelenmiş ve bu kısım üç bölüme ayrılmıştır. Birinci bölümde, dinamik davranışı belirlemeyi sağlayan ölçüm sistemleriyle ilgili bazı yapılan çalışmalara yer verilmiştir. İkinci bölümde dinamik davranışın deneysel ve numerik olarak elde edilmesi, model kalibrasyon/güncelleme çalışmalarına yer verilmiş ve üçüncü bölümde ise sıcaklık-nem gibi çevresel etkilerin yığma/diğer yapıların yapısal davranışına etkisiyle ilgili yapılan çalışmalar sunulmuştur.

1.2.1. Yapısal Takip Sistemleriyle İlgili Yapılan Çalışmalar

Dinamik karakteristiklerin deneysel olarak belirlenmesinde, yapı üzerinden ivme/yer değiştirme/görüntü vb. verilerin algılanması ve bilgisayar ortamına aktarılmasında yazılımsal ve donanımsal sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için farklı firmalar tarafından üretilen donanım ve yazılım olarak kendine özgü ölçüm sistemleri kullanılabilmektedir. Kullanılan bu sistemlerdeki cihazların farklı ölçme kapasiteleri veya farklı özellikleri bulunmaktadır. Bunlardan bazıları LVDT (doğrusal değişken diferansiyel transformatör) tabanlı sistemler, potansiyometrik tabanlı sistemler, etki yankı tabanlı sistemler, ivmeölçer tabanlı sistemler, GPS (global positioning system) tabanlı sistemler, lazermetre tabanlı sistemler ve görüntü işleme tabanlı sistemlerdir (Mortaş, 2018). LVDT sistemlerinin ölçüm hassasiyeti milimetre (mm), kurulumu zor, maliyeti çok yüksek, sıcaklık değişiminden etkilenme ve elektromanyetik etkilere yatkınlığı çok olmakla birlikte kurulum sonrası bakımı fazladır. Potansiyometrik tabanlı sistemlerinin ölçüm hassasiyeti mm, kurulumu zor, maliyeti normal, sıcaklık değişiminden etkilenme ve elektromanyetik etkilere yatkınlığı çok olmakla birlikte kurulum sonrası bakımı fazladır. GPS tabanlı sistemlerinin ölçüm hassasiyeti santimetre (cm), kurulumu kolay, maliyeti çok yüksek, sıcaklık değişiminden etkilenme ve elektromanyetik etkilere yatkınlığı az olmakla birlikte kurulum sonrası bakımı azdır. Görüntü işleme tabanlı sistemlerinin ölçüm hassasiyeti cm, kurulumu kolay, maliyeti düşük, sıcaklık değişiminden etkilenme ve elektromanyetik etkilere yatkınlığı az olmakla birlikte kurulum sonrası bakımı azdır. Lazermetre tabanlı sistemlerinin ölçüm hassasiyeti mm, kurulumu kolay, maliyeti çok yüksek, sıcaklık değişiminden etkilenme ve elektromanyetik etkilere yatkınlığı az olmakla birlikte kurulum sonrası bakımı azdır. Etki yankı tabanlı sistemlerinin ölçüm hassasiyeti mm, kurulumu kolay, maliyeti çok yüksek, sıcaklık değişiminden etkilenme ve elektromanyetik etkilere yatkınlığı az olmakla

birlikte kurulum sonrası bakımı azdır. İvmeölçer tabanlı sistemlerinin ölçüm hassasiyeti mm, kurulumu zor, maliyeti çok yüksek, sıcaklık değişiminden etkilenme ve elektromanyetik etkilere yatkınlığı çok olmakla birlikte kurulum sonrası bakımı fazladır (Mortaş, 2018). İvmeölçerlerden yıllardır ölçüm sistemlerinde statik ve dinamik ivme değişimleri belirlemek için yararlanılmaktadır (Park vd., 2005; Türker, 2005; Arraigada & Part, 2006). İvmeölçer tabanlı mevcut titreşim ölçüm sistemlerinden B&K4507 ve B&K8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler, B&K3560-C tipi on yedi kanallı veri toplama ünitesi, B&K8210 tipi darbe çekici ve bilgisayar kısmındaki yazılımla birlikte çalışabilen Brüel Kjaer firmasına ait sistem oldukça etkin bir şekilde birçok çalışmada kullanılmıştır (Türker, 2011).

Titreşim ölçümleri pek çok alanda kullanılmış olup bu alanlardan biri de demiryolu aracının izlemesidir. Demiryolu aracında bulunan bileşenlerin titreşimini izlemek amacıyla demiryolu araçlarına yönelik bir titreşim izleme yöntemi kullanılmıştır (URL-1, 2024). Bu sistem demiryolu aracında parçaların titreşimini ölçmekte ve parçada anormal titreşim meydana geldiğinde parçada anormal titreşimin meydana geldiğini belirten uyarı verilerini ve tanımlama verilerini üretmektedir. Bu sistemde verilerle parçanın durumu gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir. Bu çalışma Seo Jong-cheol tarafından “KR101477993B1” numarayla patentlenmiş olup belirtilen çalışmada demiryolu araçlarında bulunan elektrik motoru, fren, redüktör gibi mekanik bileşenlerin titreşimlerini inceleyerek herhangi bir arıza yapması durumunu tespit edebilmesi için analog bir ivmeölçer sensöründen yararlanılmıştır (URL-1, 2024). Sistem anormal bir titreşim oluşması durumunda uyarı verilerini ve tanımlama verilerini kablosuz olarak iletebilmektedir.

Analog sensörlerin kullanıldığı bir başka çalışmada geliştirilen veri toplama ünitesiyle titreşim verileri toplanıp analog olarak işlenmiş, bilgisayarın ses kartı kullanılarak bu veriler tekrar analog olarak bilgisayar ortamına aktarılmış ve bilgisayarın işleyebileceği sayısal verilere dönüştürülmüştür (Yanık, 2018).

Bir geminin performans değerlendirmesi için kablosuz bir titreşim ölçüm sistemi kullanılmıştır. Bu sistem “KR20200142741” numarayla patentlenmiş olup sistem üzerinde kablosuz modül için Bluetooth modülü bulunmaktadır. Bu sistemde kablosuz ölçüm sistemi gemideki titreşimi algılamaktadır (URL-2, 2024).

Bir başka çalışmada bir trenin mekanik sistemindeki sorunlarını izleyen ve bir arızanın ne zaman, nerede olacağını tahmin edebilen gerçek zamanlı bir durum izleme sistemi ortaya konulmuştur (URL-3, 2024). Bu sistem hem donanım hem de yazılım kısımlardan

oluşmaktadır. Sistemde donanımsal kısımda hız, basınç, titreşim ve sıcaklık sensörleri bulunmaktadır.

Yapılan diğer bir çalışma rüzgâr türbinleri üzerinde olup rüzgâr türbinlerinin genellikle değişken yüklere, aşırı hava koşullarına maruz kaldığı ve makine bileşenin bozulmasını hızlandırdığı ortaya konulmuştur (URL-4, 2024). Dış faktörler, hava koşulları gibi zor şartlarda türbinlere ulaşım güç olabilmektedir. Makine bileşenlerinde titreşim ölçümleriyle yapı gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte ve oluşacak anormallikler bir durum izleme sistemiyle tespit edebilmektedir (URL-4, 2024).

Köprülerin yapısal takiplerin gerçekleştirilmesinde kullanılan sistemlerin çok sayıda sensör içermesi ve bu sensörlerin yüksek çözünürlükte olması gerektiği ortaya konulmuştur (URL-5, 2024). Bu yapıların yapısal takipleriyle yorulma, sünme gibi davranışları da takip edilebilmektedir.

1.2.2. Dinamik Davranışın Belirlenmesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Dinamik davranışın deneysel ve analitik olarak belirlenmesi ilgili çalışmalar inşaat mühendisliğinde oldukça önemli olan ve tarihi yapılar dahil tüm mühendislik yapılarına uygulanmaktadır. Bu çalışmalar uygulanabilirlik açısından mevcut durum tespiti, hasar görmüşse hasar tespiti ve güçlendirme-onarım yöntemleri ile doğru müdahale yöntemleri vb. pek çok alanda kullanılmaktadır. Yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesinde farklı uygulama yöntemleri geliştirilmiştir. 1960'lı yıllarda Fourier dönüşümleriyle bu alandaki temeller atılmıştır. Hızlı Fourier dönüşümü (FFT) petrol endüstrisi şirketleri, makine, inşaat, havacılık ve uzay mühendisliği gibi pek çok alanda dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılmıştır (Ramos, 2007).

Kömür & Deneme (2015) laboratuvar ortamında üretilen simetrik ve simetrik olmayan çelik yapıların dinamik karakteristiklerini deneysel modal analiz (DMA) yöntemiyle bir diğer adıyla operasyonel modal analiz (OMA) yöntemiyle belirlemiştir. Simetrik ve simetrik olmayan bu yapılarda 6 adet tek eksenli ivmeölçer ve veri toplama ünitesi kullanılarak yapılan deneysel ölçümlerin sonucunda alınan veriler ARTeMIS programında frekans ve zaman alanındaki yöntemlerle çelik modellerin dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Daha sonra bu yapıların sonlu eleman (SE) modal analizi sonucu elde edilen frekans değerleri ile deneysel ölçümden elde edilen değerleri karşılaştırılmış ve bu değerlerin

arasında oldukça fark olduğu görülmüştür. Farklılıkların simetrik olmayan çelik modelde daha açık bir şekilde ortaya çıktığı vurgulanmıştır.

Livaoğlu vd. (2016) Bursa’da yer alan Bedrettin, Emirsultan, Hacılar, Hoca Muslihiddin, Hoca Tabip, Hocaalizade, Kayhan Cami minarelerinin deneysel dinamik karakteristiklerini çevresel titreşim testi (ÇTT) yöntemiyle, numerik dinamik karakteristiklerini ise Abaqus programında üç boyutlu (3-D) modelin modal analizleriyle elde etmiştir. Aynı zamanda bu çalışmada, minarelerin geometrik özelliklerinin dinamik davranışlarına etkisi de incelenmiştir. Minarelerin SE modelleri deneysel verilere göre kalibre edildikten sonra sayısal ve deneysel olarak elde edilen verilere göre geometrik özelliklerinin dinamik davranışa etkileri değerlendirilmiştir. Minarelerin hâkim titreşim periyodunun belirlenebilmesi için analitik bir formül geliştirilmiş ve geliştirilen formülden elde edilen periyodun numerik ve deneysel sonuçlara yakın olduğu görülmüştür.

Başaran vd. (2016) Afyonkarahisar’daki Hacı Mahmut Cami Minaresi’nin yapısal davranışını incelemiştir. Minareye yerleştirilen sensörler yardımıyla çevresel titreşim testi yapılmış ve minarenin deneysel dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Minarenin SE modeli deneysel verilere göre kalibre edilmiş ve zaman tanım alanında analiz edilerek minarenin deprem davranışı incelenmiştir.

Tongut (2017) İstanbul Fatih Camisi üzerinde zemin-yapı etkileşimini, rijit yapı titreşimlerinin caminin dinamik davranışına olan etkilerini ve camide mevcut olan hasarları araştırmıştır. Bunun için 13 adet ivmeölçer ve 4 adet tiltmetreden oluşan YSİ sistemiyle 4 yıllık verileri toplamış ve topladığı verileri işleyip değerlendirmiştir.

Bartoli vd. (2017) San Gimignano (Siena, İtalya) şehrindeki tarihi yığma kulelerin doğal frekanslarını deneysel olarak belirlemiş ve toplanan verileri kulelerin mekanik ve geometrik özelliklerinin toplandığı bir veri tabanına aktarmıştır. Literatürden de benzer veriler toplanarak yığma kulelerin dinamik davranışlarını etkileyen temel fiziksel özelliklerin belirlenmesi ve ilk doğal frekansının elde edilmesi için geliştirilen formüller incelenmiştir. Çalışmada yığma kulelerin ilk doğal frekansının belirlenmesi için yeni bir formül geliştirilmiştir.

Ekmen (2017) Şanlıurfa’daki tarihi Ulu Cami Minaresi’nin dinamik karakteristiklerini deneysel ve analitik olarak belirlemiştir. Minarenin sonlu eleman programında modal analizini gerçekleştirmiş ve dinamik karakteristiklerini elde etmiştir. Çevresel titreşim testi yöntemiyle de minarenin deneysel dinamik karakteristiklerini belirlemiş ve analitik verilerle kıyaslamıştır. SE modeli deneysel verilere göre kalibre edildikten sonra farklı deprem ivme

kayıtları kullanılarak deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda minarenin yer değiştirme ve gerilme değerlerinin yönetmeliğe uygun olduğu fakat kayma gerilmesi bakımından yetersiz olduğu görülmüştür.

Torres vd. (2017) Şili'deki Santiago Metropolitan Katedrali'nin dinamik karakteristikleri ile mekanik malzeme özelliklerini deneysel olarak belirlemiş ve SE model iyileştirmesini gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmada, çevresel titreşime maruz yapının çevresel titreşim testlerini 6 adet üç eksenli ivmeölçer kullanarak gerçekleştirmiştir. Toplanan veriler, frekans ve zaman alanındaki ayrıştırma yöntemleriyle işlenmiş ve yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Ayrıca katedralin taş bloklarına mekanik testler uygulanmış ve deneysel verilere göre oluşturulan SE modeli iyileştirilmiştir.

Erkal (2017) İstanbul'daki tarihi önemi olan Küçük Ayasofya Cami Minaresi'nin dinamik karakteristiklerini hem deneysel yöntemle hem de SE yöntemle belirlemiştir. Küçük Ayasofya Cami Minaresi üzerinde titreşim ölçümleri gerçekleştirmiş, minarenin malzeme özellikleri belirlendikten sonra minarenin 3-D SE modelini oluşturmuştur. Titreşim ölçümlerinden elde edilen frekans değerlerine göre SE modeli doğrulanmıştır. Minarenin SE modeli üzerinde doğrusal analizler gerçekleştirilmiş ve gerilme değerleri sınır değerlerle karşılaştırılmıştır.

Bağbancı & Köprülü Bağbancı (2018) Sakarya'daki Ağa, Ali Kuzu, Fethiye, Teşvikiye, Güllük Cami minarelerinde minarelerin inşa tekniklerinin ve geometrik özelliklerinin minarelerin dinamik davranışlarına olan etkilerini incelemiştir. Minarelerin dinamik parametreleri çevresel titreşimler altında titreşim testi yöntemiyle belirlenmiştir. Çalışmada minarelerin inşa tekniklerinin ve geometrik özelliklerinin minarelerin dinamik davranışlarını oldukça etkilediği görülmüştür. Ayrıca çalışma kapsamında minarelerin hâkim titreşim periyotlarının belirlenmesi için ampirik bir formül geliştirilmiştir.

Erdoğan (2018) farklı devirlerde inşa edilen Kalyan, Jam, Sivas Ulu Cami, Konya İnce, Bursa Ulu Cami, Edirne Üç Şerefeli, Edirne Selimiye Cami minarelerinin SE modellerine 1999 Kocaeli deprem ivme kayıtları uygulayarak zaman tanım alanında analizlerini gerçekleştirmiştir. Analizler sonucunda minarelerin yapım sistemi, form ve malzeme bakımından geçirdiği değişimin deprem performanslarına nasıl etki ettiği değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışmada yığma yapıların güçlendirilmesinde kullanılan yöntemler incelenmiştir.

Calp (2018) Süleymaniye Cami'nin 2 minaresinin ve Ramazan Efendi Cami'nin 1 minaresinin SE modellerini SAP2000 programında oluşturmuş ve 3 farklı deprem ivme

kaydı kullanarak minarelerin doğrusal zaman tanım analizlerini yapmıştır. Çalışmada minarelerde oluşan çekme-basınç gerilmelerinin sırasıyla çekme-basınç dayanımlarının altında ve sınır değere yakın olduğu görülmüştür.

Bayraktar vd. (2018a) Trabzon'daki yığma taş ile inşa edilmiş Hacıbaşı, Hacı Kasım ve Gülbahar Cami minareleri üzerinde yapılan restorasyon çalışmalarının dinamik davranışına etkilerini incelemiştir. Çalışma kapsamında minareler üzerinde gerçekleştirilen restorasyon çalışmaları, bu minarelerin OMA yöntemiyle elde edilen restorasyon öncesine ve sonrasına ait deneysel dinamik karakteristikleri sunulmuştur. Elde edilen frekans, mod şekli ve sönüm oranı verileri değerlendirilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda restorasyon etkilerinin minarelerin dinamik davranışı üzerinde olumlu ya da olumsuz etkilerinin olduğu sonucuna varılmıştır.

Bayraktar vd. (2018b) Diyarbakır'daki Ulu Cami Minaresi'nin hasar dağılımlarına yer hareketinin etkisini araştırmıştır. Minarenin SE modeli üzerinde modal analizi gerçekleştirilerek ampirik bir frekans tahmin formülü elde edilmiştir. Yapıya 1 Mayıs 2003'te gerçekleşen Bingöl depreminin ivme kaydı kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yatay ve düşey bileşenin iki farklı analizi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde yer hareketinin düşey bileşeninin dikdörtgen minarelerin aldıkları hasarın yüzdesini ve dağılımını etkilediği ortaya konulmuştur.

Altıok (2019) Manisa ilinde yer alan İbrahim Çelebi ve Lala Mehmet Paşa Cami minarelerinin deprem davranışlarını incelemiştir. Minarelerin dinamik karakteristiklerinden doğal frekans değerleri OMA yöntemiyle belirlenmiştir. Minarelerin SE modelleri Abaqus yazılımında modellenmiş ve modal analizleri yapılmıştır. Modal analizlerden elde edilen deneysel ile numerik doğal frekans değerleri karşılaştırılmış ve başlangıç SE modellerdeki malzeme parametreleri iyileştirilerek minarelerin model kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. İyileştirilmiş SE modeller üzerinde doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiş ve minarelerin kritik bölgelerindeki yer değiştirme ve gerilme değerleri bulunmuştur.

Alamehmet (2019) Bursa Ulu Cami Doğu Minaresi'nin doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerini SAP2000 programında minareyi makro ve mikro modelleyerek gerçekleştirmiştir. Rölöve bilgilerine göre oluşturulan makro modele ait modal analiz yapılmış ve periyot değerlerini etkileyen durumlar incelenmiştir. Tuğla ve harcın ayrı olarak modellendiği mikro modelde statik itme analizi de gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda birçok önemli bulgu edinilmiş ve bunlardan biri de minarenin geçiş bölgesinde bulunan küp

elemanın, merdiven ve çekirdek kısmının, kaidenin yapı rijitliğine katkısının olduğu, külahın ise rijitliğe oranla kütsel katkısının daha fazla olduğudur.

Uğurlu (2019) Diyarbakır ilinin tarihi kent alanı olan Sur içinde yer alan Şeyh Mutahhar Cami Dört Ayaklı minaresini yapısal olarak araştırmıştır. Minarenin SE modelini oluşturmak için lazer tarama yöntemini kullanmış ve analizleri SE programında oluşturulan model üzerinde gerçekleştirmiştir. Yapılan analizler sonucunda Dört Ayaklı Minare sütunlarının hemen üzerinde yer alan kirişlerin çalışma mekanizması yapının konstrüktif olarak açılmasına karşı mukavemet göstermesiyle yapı stabilitesine önemli katkılar yaptığı görülmüştür. Ayrıca SE model üzerinde sismik risk değerlendirilmeleri de yapılmıştır.

Çelik (2019) 13. yüzyılda Anadolu Selçuklu Devleti tarafından Antalya’da yaptırılan Yivli Minare üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla dinamik parametreleri belirlemiştir. Yivli Minare’nin deneysel dinamik parametrelerini belirlemek için yapıya sensör yerleştirmiş ve verilerden minarenin frekansları elde etmiştir. Yivli Minare’nin 3-D SE modeli üzerinde modal analiz yapılarak numerik frekanslar belirlenmiştir. Minarede düşey yükler altında statik, eşdeğer deprem kuvveti yöntemine göre ve mod birleştirme yöntemine göre de dinamik analizler yapılmıştır. Analiz sonucu elde edilen gerilme değerleri sınır değerlerini aştığı görülmüş ve muhtemel hasar oluşması beklenen bölgeler belirlenmiştir.

Pavlovic vd. (2019) tarihi yığma kulelerin yapısal tanımlanması için basitleştirilmiş ve uygun maliyetli bir yöntem önermiştir. SE model kalibrasyonu için temel frekansı elde etmeye dayanan yöntem servis yükleri altında ortalama mekanik özelliklerin tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Önerilen yöntemde titreşim testi için tek bir kompakt dijital tromografin kullanımını ve servis yükleri altında ortalama mekanik özelliklerin tahmini için model güncelleme tekniği de mevcuttur. Yöntem önce temel bir laboratuvar numunesi üzerinde kanıtlanmış, daha sonra Frari Çan Kulesi üzerinde uygulanmıştır. Çalışma sonucunda dijital tromografin yapısal amaçlar için uygulanması sadece son yıllara dayandığından, cihazın ölçüm hatalarını değerlendirmek ve yorumlamak için ivmeölçer veya velosimetrik bir ağ ile doğrudan bir karşılaştırma yapılmasının uygun olacağı ve önerilen yöntemin ön yapısal tanımlama için hızlı bir çözümleme sağladığı vurgulanmıştır.

Alpaslan vd. (2020) Samsun ilinde bulunan Büyük Cami Minaresi’nin SE model kalibrasyonunu deneysel parametrelere göre gerçekleştirmiştir. Büyük Cami Minaresi’nin deneysel parametreleri OMA yöntemiyle, numerik parametreleri ise SE modal analizle elde edilmiştir. Başlangıç SE modeli deneysel verilere göre kalibre edilmiş ve kalibre edilen

modelin sonuçları deneysel ve başlangıç modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada başlangıç SE modellerin kalibre edilmediği takdirde yapının mevcut durumunu yeterince temsil edemediğine ve kullanılan tepki yüzeyi yönteminin model kalibrasyonunda etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Türker & Yanık (2020) Aydın ilindeki tarihi İlyasbey Cami'sinin yapısal davranışını ÇTT ile deneysel ve SE modelinde uygulanan modal analiz ile numerik olarak belirlemiştir. Başlangıç SE modeli deneysel verilere göre kalibre edilmiş ve yapı sabit yük, rüzgâr ile deprem yükleri altındaki analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada gerilme ve yer değiştirme değerleri deprem yönetmeliğindeki ilgili sınırlarla karşılaştırılmış ve yapının performansının uygulanan yükler altında yeterli dayanımı gösterdiği görülmüştür.

Türkeli (2020) Trabzon'daki İskenderpaşa Cami'sinin minaresinin deprem ve rüzgâr yükleri altındaki yapısal davranışını farklı yöntemler ve zemin tipleri için belirlemiştir. Kocaeli ve Düzce deprem kayıtları kullanılarak minarenin zaman tanım alanında analizleri gerçekleştirilmiş, minarenin gerilme dağılımları ve yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Minarenin dinamik davranışında rüzgâr yükünün etkili olduğu görülmüştür.

Hökelekli & Al-Helwani (2020) Afyonkarahisar'daki Alaca Cami Minaresi'nin yatay deprem yer hareketi etkisindeki hasar dağılımlarını araştırmıştır. Minarenin SE modelinde farklı zemin türlerin bağlı olarak esnek mesnetler tanımlanarak doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Deprem yer hareketi olarak 1995 yılında meydana gelen Dinar depreminin ivme kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen analizlerden gerilme ve yer değiştirme değerleriyle hasar oranları da elde edilmiştir. Çalışma sonucunda yapı-zemin etkileşiminin minarenin davranışı üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Adam vd. (2020) Mısır'daki yığma bir yapı olan Al-Rifa'i Cami Minaresi'nin yapısal durumunu incelemiştir. Minarenin SE modeli ANSYS programında oluşturulmuş ve minarenin modal analizi ile deprem ve rüzgâr yükleri altında statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Statik ve dinamik analizler ile doğrusal ve doğrusal olmayan analizler karşılaştırılmış ve hasar durumları ile gerilmeler incelenmiştir. Çalışma sonucunda minarenin mevcut durumda güvenli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Hökelekli vd. (2020) Afyonkarahisar'daki tarihi Alaca Cami Minaresi'nin güncellenmiş SE modeli üzerinde farklı deprem etkilerindeki hasar durumunu değerlendirmiştir. Minarenin başlangıç SE modeli Abaqus programında modellenerek numerik dinamik parametreler belirlenmiştir. OMA yöntemiyle de deneysel dinamik parametreler elde edilmiştir. Deneysel verilere göre başlangıç SE modeli güncellenmiş ve

güncel model üzerinde Çay ve Dinar deprem ivme kayıtları kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Çalışma sonucunda doğrusal analiz doğrusal olmayana göre daha kötü sonuç verdiği görülmüştür.

Yanık vd. (2020) çelik yapı elemanının elastisite modülünü ÇTT yöntemiyle elde ettiği dinamik karakteristikleri kullanarak SE modelinin kalibrasyonu ile elde etmiştir. Deneysel dinamik karakteristikleri belirlemek için analog ivmeölçerlerden ve veri toplama ünitesinden oluşan bir ölçüm sistemi geliştirmiş ve çelik model üzerinden titreşim verilerini toplamıştır. SAP2000 programında numerik frekansları elde ettikten sonra deneysel frekans değerleri ile arasındaki fark, MATLAB’da oluşturulan yazılımla SE modelindeki elastisite modülünün değişimiyle yapılan tekrarlı analizler sonucunda minimuma indirgenmiştir.

Çaktı vd. (2020) İstanbul’daki Mihrimah Sultan, Ayasofya, Süleymaniye Cami minarelerinin harmonik uyarım altındaki dinamik davranışlarını araştırmıştır. SE modelleri ayırık elemanlar yöntemiyle oluşturulmuş ve doğal frekanslara göre SE modelleri güncellenmiştir. Uygulanan harmonik etkisi sonucunda genlik ve frekans değerleriyle bağlantılı olarak 4 farklı hasar durumunun sınır değerleri elde edilmiştir.

Bayraktar & Hökelekli (2021) taş, tuğla duvar ve betonarme minarelerin güçlendirilmesi için bir teknik sunmuştur. Minarelerin 3-D SE modelleri güçlendirilmiş ile güçlendirilmemiş durumlar için ayrı ayrı modellenmiş ve yatay-düşey deprem yükleri altındaki doğrusal olmayan deprem analizleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda sunulan güçlendirme tekniğinin minarelerin sismik davranışlarını olumlu etkilediği görülmüştür.

Karantoni & Dimakopoulou (2021) 2017’de meydana gelen depremden etkilenen Kos Adası’ndaki Gazi Hasan Paşa Cami’sinin yapısal durumunu araştırmıştır. Yapıda oluşan hasarlar belirlenmiş ve SE modeli üzerinde gerçekleştirilen yapısal analizle kıyaslanmıştır. Yapı mevcut durum analizi ilgili yönetmeliklere göre değerlendirilmiş ve çelik elemanlarla yapının güçlendirmesi önerilmiştir.

Usta (2021) Antalya’da yer alan Elmalı İsimsiz, Kutuk, Yivli, Müsellim ve Kesik (Korkut) Cami minarelerdeki sismik hasarı değerlendirilmek amacıyla SE modellerini oluşturmuş ve kırılgenlik analizlerini yapmıştır. SE modelleri katı elemanlar kullanılarak SAP2000’de oluşturmuş ve daha sonra minarelerin deprem analizlerini gerçekleştirmiştir. Ayrıca her bir minare için olasılıksal sismik tepki değerlendirme analizi de yapılmıştır. Analizlerin sonuçlarına dayanarak sürüklenme oranı ve gerilme dağılımları tahmin edilmiştir. Sonuçlardan maksimum kayma gerilmelerinin geçiş ve balkon seviyesinde

yoğunlaştığı görülmüştür. Minarelerin maksimum kayma kapasitesinin de kritik performans seviyesi değerlerinin altında olduğu gözlenmiştir.

Pallarés vd. (2021) ince yağma yapılarında yapı sağlığı izleme (YSİ) ve hasarsız ölçüm teknikleri (NDT) ile statik ve dinamik çalışmaların geniş kapsamlı bir incelemesini pratik bir bakış açısıyla sunmuştur. Dinamik testlerle ilgili olarak en sık kullanılan tekniklerden biri olan OMA ve diğer bir yöntem olan radar interferometrisini araştırmıştır. Bu araştırmalar yapısal sağlık değerlendirmesi ve sinyal işleme araçlarına ilişkin bazı örneklerin kısa bir incelemesi ile sonlandırılmıştır. Çalışma kapsamında ince yağma yapı özellikleri, doğal frekansları, kullanılan deneysel-sayısal teknikleri (sonlu eleman modellemesi, frekans ve zaman alanında ayrıştırma algoritmaları) ve referans değerleri içeren kapsamlı bir araştırma listesi verilerek pratik bir bakış açısı oluşturulmuştur.

Calayır vd. (2021) Türkiye'nin Elâzığ ilinde bulunan Mustafa Şahin Cami Minaresi'nin titreşim testlerini OROS-OR36 firmasına ait sistemle gerçekleştirmiş ve OMA yöntemiyle minarenin dinamik karakteristiklerini belirlemiştir. Daha sonra yağma minarenin ANSYS programında oluşturulan SE modeli manuel güncelleme yöntemiyle yapılmış ve yapı-temel-zemin etkileşimini incelemiştir.

Standoli vd. (2021) İtalya'nın Ferrara şehrindeki San Giorgio Katedrali Çan Kulesi, Ferrara şehrindeki San Benedetto Kilise Çan Kulesi, Bondeno şehrindeki Santa Maria Kilise Matildea Kulesi ve Codigoro şehrindeki Pomposa Manastırı Çan Kulesi'ne çevresel titreşim testlerini uygulayarak OMA yöntemiyle elde ettiği deneysel dinamik karakteristikleri SE model kalibrasyonunda kullanmıştır. Kaydedilen veriler frekans ve zaman alanındaki teknikler kullanılarak işlenmiş ve kulelere ait dinamik karakteristikler elde edilmiştir.

Milani & Clementi (2021) İtalya'da bulunan 4 adet yağma çan kulesinin sismik değerlendirmesini sunmuştur. Çalışmada kulelere elastik parametrelerin daha önce OMA ile tanımlandığı Abaqus kullanılarak oluşturulan 3-D SE modellerine doğrusal olmayan statik (itme) ve tam doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler için SE modelleri, ilk dört anlamlı modun deneysel frekansları mevcut olduğundan, dinamik bir tanımlama yoluyla elastik ve geometrik özellikleri açısından kalibrasyonu yapılmıştır. Gerçekleştirilen analizlerde doğrusal olmayan statik ve doğrusal olmayan dinamik analizlerle elde edilen sonuçların uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

Maraş vd. (2022) Malatya'da bulunan tarihi Sütlü Minare Cami'nin 3-D SE modelini ANSYS ile oluşturmuş, caminin malzeme özelliklerini deneysel testlerle elde etmiş ve caminin sismik davranışını elde etmek için 6 farklı ivme kaydı kullanarak deprem

analizlerini gerçekleştirmiştir. Analizler sonucunda camideki yer değiştirme ve gerilme değerlerini bulmuş ve birbirleriyle karşılaştırmıştır.

Pouraminian (2022) İran'ın kuzeyinde bulunan yaklaşık 16m yüksekliğindeki Gaskar Minaresi'nin rüzgâr ve deprem tehlikelerine karşı yapısal davranışını incelemiştir. Yapısal değerlendirmeler için minarenin ANSYS programında SE modeli oluşturulmuş ve bu model üzerine rüzgâr ve deprem yükleri uygulanarak yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sismik sonuçlardan minarenin hafif hasar riski altında olduğu gözlenmiştir. Minarenin kendi ağırlığı ve tasarım rüzgâr yükleri ve hatta dünyada bugüne kadar kaydedilmiş en yüksek rüzgâr hızına göre yeterince güvenli olduğu görülmüştür.

Işık vd. (2022) Bitlis ilinin önemli kültürel mirası olan Ulu, Gökmeşdan, Meydan, Kalealtı ve Şerefiye Cami minarelerinin yapısal analizlerini gözlemsel ve SE yöntemleriyle incelemiştir. Çalışma kapsamında minarelerin deprem davranışları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY) verilen tasarım spektrumu kullanılarak ve farklı yükleme koşulları dikkate alınarak elde edilmiştir. Ayrıca minarelerin yapımında kullanılan Bitlis taşının mekanik özellikleri tahribatsız yöntemle belirlenmiştir. Elde edilen değerler kullanılarak makro modelleme yöntemiyle minarelerin yapısal analizi yapılmış ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Minarelerin geçiş bölgelerinde maksimum gerilme olduğu ve minarenin bu gerilmeleri taşıyabileceği görülmüştür.

Shabani vd. (2022) Norveç'in Tønsberg kentindeki taş yığma bir kule olan Slottsfjell Kulesi üzerinde lazer tarayıcılar kullanarak 3-D SE modellerini oluşturmuş ve kulenin frekans değerlerini ile mod şekillerini belirlemek için OMA yöntemini kullanmıştır. Tønsbergite taşının mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla SE model güncellemesinde titreşim tabanlı güncelleme yapılmıştır. Zemin-yapı etkileşiminin SE model güncelleme sonuçları üzerindeki etkisini araştırmak için ankastre olarak tanımlanan FB modeli, üç eksenli yaylar ile tanımlanan SM modeli ve üçüncü model olarak tanımlanan DM modeli ile 3 farklı SE modeli geliştirilmiştir. Kule için rezonans etkisi değerlendirilmiş, güncellenen modellerde doğrusal dinamik analiz gerçekleştirilmiş ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Sangirardi vd. (2022) sarsma tablasında test edilen 3 taş duvarın doğal frekansını belirlemek ve deneysel araştırma boyunca meydana gelen frekans azalmasıyla ilişkili ilerleyen hasar birikimini izlemek için bilgisayarlı görüş tabanlı bir YSİ yöntemi uygulamıştır. Videolar standart alım frekanslarında olup sarsma tablası tarafından üretilen beyaz gürültü uyarımları altında, çevresel titreşimler altında ve rüzgâr veya trafiğin etkisi

altındaki gerçek saha koşullarını yakından temsil edecek şekilde kaydedilmiştir. Beyaz gürültü uyarımı altındaki frekanslar, sarsma masası laboratuvarına kurulan 3-D vision adlı yüksek çözünürlüklü pasif 3-D hareket yakalama sistemi tarafından ölçülen verilerle kıyaslanmış ve veriler arasında iyi bir uyumun olduğu görülmüştür.

Vuoto vd. (2022) İspanya Granada'da UNESCO dünya mirası altında bulunan Alhambra Sarayı'ndaki Alcazaba'nın ana kulesi olan Torre de la Vela Kulesi'nin sismik değerlendirmesini gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında kulenin SE modelinin oluşturulması, hasarsız ölçümlerle detaylı deneysel inceleme, SE model güncellenmesi ve güncellenen SE modeli üzerinde doğrusal olmayan statik analizler kullanılarak sismik incelemeler mevcuttur. Analizler sonucu elde edilen veriler sistematik olarak karşılaştırılmış ve tarihi yapılarda yerinde yapılan çalışmanın önemi vurgulanmıştır.

Zini vd. (2022) Floransa'daki (İtalya) San Niccolò Şehir Kapısı'na yerleştirilen YSİ sistemiyle uzun dönemde yapısal izlemenin optimum sensör konumunu tasarlamak için kullanılan SE modeli üzerinde çalışmıştır. Bu optimum sensör ağı sürdürülebilir bir dinamik izleme sistemi sağlamak için önemli olduğundan çalışma kapsamında şehir kapısının dinamik karakteristikleri belirlenmiş ve çevresel titreşim testlerini simüle etmek için deneysel frekanslara dayalı olarak SE modeli güncellenmiştir.

Saidin vd. (2022) Sungai Raia Köprüsü'nün doğal frekans ve mod şekli gibi dinamik karakteristiklerini belirlemek için titreşim testi yöntemiyle titreşim verilerini toplamış ve 3 farklı modal tespit yaklaşımıyla dinamik karakteristiklerini elde etmiştir. Her bir yöntemin mod şekilleri, modal güvence kriteri (MAC) kullanılarak doğrulanmıştır. Deneysel verilere dayanarak, köprü yapılarının SE modelini güncellemek için duyarlılığa dayalı bir güncelleme yöntemi uygulanmıştır. Güncellenen SE modeliyle deneysel sonuçlar arasındaki fark ilk 5 doğal frekans için %5'ten az olmuştur. Çalışma sonucunda köprünün kullanılabilirlik titreşim sınır durumu belirlenmiş ve köprünün araç kullanımında güvenli olduğu görülmüştür.

Nguyen & Livaoğlu (2022a) Bursa şehrinde 1467 yılında taş ve tuğla kullanılarak inşa edilen Hacılar Cami Minaresi'nin hasar tespiti üzerinde çalışmıştır. Minaredeki hasarın ters teknik kullanılarak tespit edilmesi amaçlanmış ve minarenin SE modeli oluşturularak minare üzerinde hasar tespit yaklaşımı kullanılmıştır. Modal değişiklikleri minarenin yüksekliği (24.45m) boyunca yerleştirilmiş 4 YSİ sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada minareler ve giriş benzeri yapılar arasındaki düşük modlardaki bükülme davranışı açısından benzerlikler dikkate alınarak kurulan sensör ağına uygun olarak toplu bir kütle sistemine

aktarılmış ve 2 eğilme modunda değişiklikler nedeniyle, basitleştirilmiş sistemin rijitliği açısından azalmaya dayalı olarak minaredeki hasarı lokalize etmek için özdeğer problemine dayalı ters bir çözüm kullanılmıştır. Sonuç olarak, modal veriler gürültüsüz olduğu veya düşük düzeyde gürültü kirliliği olduğu sürece güvenilir hasar tespiti sağlamıştır. Nguyen & Livaoglu (2022b) yüksek binaların ters çözüm tabanlı hasar tespitinin, iki yapı türü arasındaki eğilme davranışı açısından benzerlik nedeniyle minaredeki hasarın yerini belirlemek için uygun olduğunu varsaymış ve benzer çalışmalar yapmıştır.

Sözen (2022) tarihi bir yığma yapı olan Tokat Saat Kulesi'nin SE yöntemiyle sismik hasar değerlendirmesini yapmıştır. Çalışma kulenin SE modelini, malzeme karakterizasyonunu, doğrusal ve doğrusal olmayan statik ile dinamik analizlerini içermektedir. Doğrusal olmayan dinamik analiz öncesinde bölgenin depremselliği ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Malzemenin basınç dayanımı kaya kütlelerine benzetilerek ve duvardaki çatlak yoğunluğunun kullanıldığı ampirik denklemler kullanılarak belirlenmiştir. Doğrusal olmayan statik analizde gerilmeler ve yer değiştirmeler değerlendirilirken düşey yükler için risk durumları da tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre saat kulesinin bölgedeki olası depremlere karşı restorasyonlarla güçlendirilmesinin gerekli olduğu görülmüştür.

Requena-Garcia-Cruz vd. (2023) UNESCO dünya mirası listesinde yer alan Cordoba Cami-Katedrali'nin yapısal analizlerini ve sismik performansını değerlendirmiştir. Yapının yapısal ve sismik değerlendirmesi için kapsamlı bir araştırma gerçekleştirmiş, makro modelleme yöntemiyle SE modelini oluşturmuş, hasarsız yöntemler Schmidt çekici ve titreşim testi yöntemlerini uygulamış ve yapının davranışı ile dinamik karakteristikleri elde edilmiş ve mevcut veriler aracılığıyla SE modelinin kalibrasyonu tamamlanmıştır. Yerçekimsel nonlinear (doğrusal olmayan) analizler ve yatay yük etkisinde nonlinear statik (pushover) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler hasar ve çatlak incelemelerine olanak sağlamış ve yapının sismik güvenliği bu analizler sonucunda edinilen bilgiler ışığında değerlendirilmiştir.

Providakis vd. (2023) Yunanistan Girit'te bulunan Saint George Mormoris Şapeli üzerinde lazer taramalı doppler vibrometre ile lazer taramasını ve titreşime dayalı bir model kalibrasyon yaklaşımını sunmuştur. Çevresel titreşimlerden elde edilen verileri frekans ortamında işleyerek yapının frekans değerlerini elde etmiştir. Aynı zamanda da şapelin gerçek davranışını tamamen karakterize etmek için yapı özellikleriyle eşleşen SE modelini oluşturmuş, deneysel verilere göre SE modelinin kalibrasyonunu yapmıştır.

Chácará vd. (2023) Peru'nun Cusco şehrinde bulunan yığma taş tonozlu Jesuit Kilisesi'nin sismik tepkisini değerlendirmiştir. Hasarsız ölçüm tekniklerinden (NDT) kızılötesi termografi testi ve titreşim testi yöntemleriyle duvarın malzeme özellikleri ile modal parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca itme analizlerinin uygulanması yapının maksimum yük kapasitesinin ve pik sonrası davranışının tahmin edilmesine olanak sağlamıştır.

Şakalak (2023) yapılarda kullanılan farklı malzemelerin yapının deprem davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla Isparta'daki yığma kule üzerinde çalışmıştır. Kulenin taş ve tuğla olarak iki ayrı 3-D SE modelleri SAP2000'de oluşturulmuş ve modeller üzerinde modal, yapının kendi ağırlığı altında statik, tepki spektrumu ve zaman tanım alanında doğrusal dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Modal analizler sonucunda taş ve tuğla modellerin sonuçları karşılaştırıldığında tuğla modelin periyot değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Kulenin tepe noktasındaki en büyük yatay yer değiştirme tuğla modelde daha büyük olduğu görülürken kendi ağırlığı altında statik ile sismik analizlerde gerilme değerlerinin taş modelde daha büyük olduğu görülmüştür.

Onat vd. (2023) Malatya'daki Alacakapı Cami Minare'sinin mevcut durumunu ve sismik performansını incelemiştir. Minarenin titreşim testleri ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilmiş, ivme verileriyle minarenin frekans, mod şekli ve modal sönüm oranı elde edilmiş, malzeme özelliklerinin de belirlenmesi için tahribatlı-tahribatsız testler yapılmış, SE modeli oluşturulmuş ve model kalibrasyonu yapılmıştır. Model kalibrasyonu için homojenleştirilmiş malzeme yaklaşımını yansıtan 8 farklı formülasyon değerlendirilmiş ve minarenin en iyi malzeme özelliklerini elde etmek için 3 farklı harç mukavemeti incelenmiştir. Alacakapı Cami Minaresi'nin SE modeline 6 farklı deprem kaydı uygulanmıştır. Minarenin geçiş bölgesinin sonunda, gövde kısmının başlangıcında hasarların başladığı gözlenmiş ve bu kısımların güçlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Romero-Sánchez vd. (2023) İspanya'nın Sevilla şehrinde bulunan tuğla ve taştan yapılmış yığma yapı olan Giralda Kulesi'nin sismik davranışını incelemiştir. Kulenin 3-D SE modeli oluşturulmuş ve deneysel verilere göre kalibre edilmiştir. Kulenin sismik davranışını değerlendirmek için modal analizler ve doğrusal olmayan statik analizler yapılmıştır. Çalışmada modelin iyi bir kalibrasyonunun sağlanmasında sınır koşullarının dikkate değer bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca analizler sonucunda elde edilen hasar verilerinin tarihi kayıtlarla örtüştüğü tespit edilmiştir.

Trešnje vd. (2023) Bosna-Hersek'in Mostar şehrinde 16. ve 17. yüzyılların başında inşa edilen Tabačica Cami Minaresi'nin dinamik incelemesini gerçekleştirmiştir. Minarenin çevresel titreşim testiyle dinamik karakteristikleri belirlenmiş ve 4 ampirik formülle de bulunan değerler kıyaslanmıştır. Ayrıca sonik darbe hızı testi uygulanmıştır. Minarenin SE modeli oluşturulmuş ve modal analizi yapılarak tarihi minarenin davranışı değerlendirilmiştir. İvme kayıtları kullanılarak SE modeline zaman tanım alanı analizi yapılmış ve minarenin sismik değerlendirmesi incelenmiştir.

Erkek & Yetkin (2023) 6 Şubat 2023 depreminde hasar gören tarihi Envar-ül Hamit Cami Minaresi'nin sismik performansını incelemiştir. Tarihi minarenin basınç dayanımının belirlenmesi için laboratuvar deneyleri yapılmış, SE modeli oluşturulmuş ve OMA testinden elde edilen sonuçlara göre SE modeli güncellenmiştir. Güncellenmiş SE modeli kullanılarak minarenin zaman alanındaki analizleri yapılmıştır. Çalışmada üst nokta yer değiştirme, taban kesme kuvveti, asal gerilmeler ve plastik deformasyonlar değerlendirilmiştir.

Ghini vd. (2023) Castel San Pietro'daki (Bologna, İtalya) tarihi yığma çan kulesinin SE modelini oluşturmuş ve SE model kalibrasyonunu gerçekleştirmiştir. Çalışmada manuel olarak sonlu eleman modeli kalibre edilmiş ve yer değiştirme zaman geçmişlerinden eşdeğer statik yer değiştirme alanlarını çıkararak yapının dinamik tepkisini hesaba katan orijinal, basitleştirilmiş bir yöntem önerilmiştir. Çalışma sonucunda güçlendirme müdahalelerinin tasarımı için yararlı bilgiler gösterilmiştir.

Işık vd. (2023) Türkiye'de yakın zamanda 9 saatlik zaman aralıklarında gerçekleşen 6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş ilinde meydana gelen 2 büyük bağımsız deprem sırasında yığma, betonarme cami ve minarelerin aldığı hasarları değerlendirmiştir. Çalışma kapsamında bu depremlerde önemli kayıpların yaşandığı illerden biri olan ve Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerinde yer alan Adıyaman'da 27 farklı cami ve minarenin yapısal hasarları incelenmiştir. İncelenen yığma, betonarme cami ve minarelerde önemli yapısal hasarlar ve tamamen yıkılmalar meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca çalışmada incelenen cami ve minarelerin çok azı depreme dayanıklı yapılar gibi herhangi bir hasar görmediği belirtilmiştir.

Nguyen vd. (2023) Hacılar Cami Minaresi'nin modelini oluşturmak için yapay sınır ağı (YSA) tabanlı bir prosedür sunmuştur. İnce minarelerin sallanma davranışları kiriş benzeri bir sistemle karşılaştırılabilir olduğundan, tuğla elemanlardan oluşan 3-D bir sistem, yalnızca kiriş elemanlardan oluşan basitleştirilmiş bir sisteme aktarılmıştır. Basitleştirilmiş modelde sadece en düşük modları yakalayan 4 eksenli bir ivmeölçer ağı kullanılmış ve 3-D

model üzerinde üretilen modal değerler hedef alınarak kalibre edilmiştir. Fiziksel basitleştirilmiş model, sadece sertlik değil aynı zamanda kütle ve Poisson oranı parametreleri de eş zamanlı ayarlanarak kalibre edilmiştir. Sonuç olarak, kalibre edilmiş modelin modal değerler özellikle temel modda, 3-D sistemden elde edilen değerlerle benzerlik göstermiştir.

Genç (2023) tarihi yapılar ve laboratuvar modelleri üzerinde DMA yöntemiyle hasar tespit çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Tarihi yapılardan Trabzon Cephanelik Binası, Çorum Saat Kulesi, Trabzon Yavuz Selim Okul Binası, Trabzon İskenderpaşa Cami'si ve minaresi, Trabzon Santa Maria Kilisesi-Misafirhanesi ile Trabzon Yeniköy Köprüsü üzerinde DMA testlerini gerçekleştirmiş, SE modellerini oluşturmuş ve SE model güncelleme işlemlerini tamamlamıştır. Daha sonra hasar tespit yöntemlerinin uygulanabilmesi amacıyla laboratuvar ortamında tek açıklıklı taş kemer köprü üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Köprü modeli üzerinde çeşitli hasar simülasyonları ile hasar tespitlerini yapmıştır. Ayrıca basit onarım ve enjeksiyon uygulamaları ile köprü modelini onarmış ve titreşim testlerini tamamlamıştır. Çalışma sonucunda titreşim testleri ile elde edilen frekans ve mod şekilleri verilerinin hasarın varlığını belirlemede oldukça etkili bir yöntem olduğu vurgulanmıştır.

Spinelli vd. (2023) İtalya'da inşa edilmiş yığma kulelerden biri olan Floransa'daki Giotto's Çan Kulesi'nin sismik davranışını değerlendirmiştir. Kulenin deneysel dinamik özellikleri Pieraccini vd. (2005; 2009) ve Lacanna vd. (2019a; 2019b) yapılan önceki çalışmalarda incelenmiştir. Giotto's Çan Kulesi'nin SE modeli duvar kalınlıklarındaki en büyük açıklıklar, yığma duvarların içindeki merdiven boşluğu ve diğer geometrik düzensizlikleri içeren ayrıntılı bir modelin oluşturulmasına olanak tanıyan lazer tarayıcıyla oluşturulmuştur. Ayrıca oluşturulan SE modeli zemin-yapı etkileşimini basitçe hesaba katmaktadır. Bu SE modeli üzerine Floransa'nın sismik tehlikesi baz alınarak ivme kayıtları kullanılmış ve kulenin doğrusal-doğrusal olmayan zaman analizleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda uygun koruma stratejileri önerilmiştir.

Ergün & Tayfur (2024) Bayburt'ta yığma saat kulesinin restorasyon öncesi ve sonrası sismik performansını değerlendirmek amacıyla numerik ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Kulenin SE modeli oluşturularak numerik dinamik özellikleri elde edilmiştir. Kule üzerine yerleştirilen sistem yardımıyla gerçekleştirilen titreşim verilerinin analizi ile deneysel dinamik özellikleri belirlenmiştir. Kulenin restorasyon öncesi ve sonrasına ait SE modelleri tabu arama algoritması aracılığıyla dinamik özellikler arasındaki farkların en aza indirilmesine dayalı bir güncelleme işlemi yapılmıştır. Güncellenen SE modellerin dinamik analizleri 11 deprem yer hareketi kaydı kullanılarak mod süperpozisyon yöntemiyle

gerçekleştirilmiştir. Sismik tepkiler yer değiştirme, maksimum-minimum asal gerilim ve maksimum-minimum asal şekil değiştirmeye dayalı olarak değerlendirilmiştir.

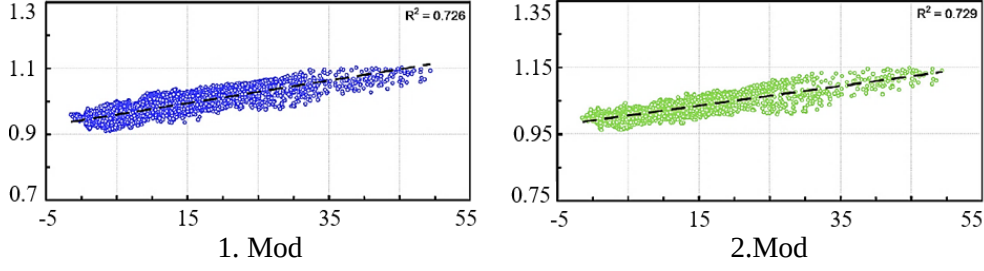
Cuadros-Rojas vd. (2024) Huaytará, Peru'daki San Juan Bautista-İnka tapınağı-kilisesinin sismik performansını incelemiştir. Sismik değerlendirmeye yönelik geometrik model, fotogrametri kullanılarak çok az bir hatayla geliştirilmiştir. Sismik yük altında tepkileri değerlendirmek için 3-D SE model üzerinde doğrusal olmayan statik itme analizleri yapılmıştır. Ayrıca kilisenin farklı yapı malzemelerinin mekanik özellikleri üzerinde yapılan laboratuvar deneysel testleriyle değerlendirilmiştir. Bu çalışmayla fotogrametrinin mevcut yapıların geometrik modellerinin oluşturulmasında ve mevcut durum görselleştirilmesinde etkili olduğu gösterilmiştir.

Xu vd. (2024) tarihi kulelerin hasar performansını değerlendirmek için tarihi bir Çin kulesi olan Small Wild Goose Pagoda yapısının 3-D SE modelini oluşturmuştur. SE modelinin dinamik özellikleri ve sismik analiz sonuçlarını, 1/8 ölçekli oluşturulan laboratuvar modeli üzerinde gerçekleştirilen sarsma masası testleri kullanarak elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulamıştır. Kule modelindeki ilk çatlaklar ve eğim gibi hasar faktörleri Box-Behnken hesaplaması yoluyla belirlenmiştir. Daha sonra modifiye edilmiş Park-Ang hasar modeli kullanılarak duvar bileşenlerinin hasar endeksi elde edilmiş ve kule katlarının hasar endekslerini elde etmek için kullanılmıştır.

1.2.3. Çevresel Etkilerin Dinamik Davranışa Etkisini İçeren Çalışmalar

Sıcaklık, nem, gürültü seviyesi vb. gibi çevresel etkilerin yapı davranışına etkisini içeren çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Saisi vd. (2015) 2012'de İtalya'da meydana gelen depremde sonra yaklaşık 54m yüksekliğindeki tarihi Gabbia Kulesi'nin yapısal durumunu değerlendirmiştir. Kulenin yapısal davranışını kontrol etmek amacıyla kuleye dinamik bir izleme sistemi kurmuş ve 8 aylık bir süre boyunca sürekli takip etmiştir. Çalışmada sıcaklığın doğal frekanslar üzerindeki etkisi incelenmiştir (Şekil 1). Şekildeki yatay eksen sıcaklık değerini, düşey eksen ise frekans değerlerini göstermektedir. Ölçümler alınırken meydana gelen deprem sonrasında frekanslarda bir değişimin olduğu da gözlenmiştir.

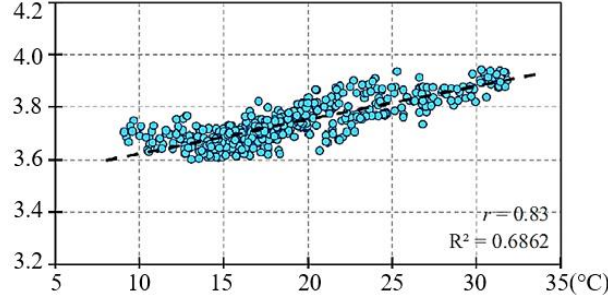


Şekil 1. Kulenin ilk 2 modunun sıcaklıkla değişimi (Saisi vd., 2015)

Saisi vd. (2016) İtalya'daki Gabbia Kulesi'nin yapısal durumunu belirlemek için görsel incelemeler, malzeme testleri ve ÇTT gibi yöntemler üzerinde çalışmıştır. İncelemelerde kulenin üst kısmının oldukça zayıf olduğu tespit edilmiş ve kuleye ivmeölçer ile sıcaklık sensörlerinden oluşan bir YSİ sistemi yerleştirilmiştir. Sistemin yerleştirilmesinden yaklaşık 6 ay sonra yapıdan uzakta meydana gelen depremin doğal frekanslarda bir kaymaya yol açtığı görülmüştür. Çalışma sonucunda, doğal frekansların sıcaklıkla birlikte kayda değer bir değişim gösterdiği ve sıcaklık artışının doğal frekansların artışına neden olduğu belirlenmiştir.

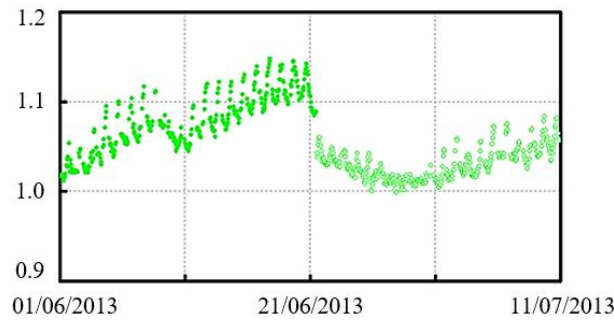
Hejazi vd. (2016) İran'ın İsfahan şehrindeki tarihi 9 minarenin deprem, rüzgâr ve sıcaklık gibi etkiler altındaki yapısal davranışlarını incelemiştir. Minarelerin 3-D SE modellerinde doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Merkezi kolon ve merdivenin yapısal davranış üzerindeki etkisini araştırmak için minarenin tamamında ve sadece dış kabukta olacak şekilde 2 farklı durum için analizler gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değişimleri altında minarelerin yapısal analizi, belirli iç ve dış sıcaklık farkları için minarelerin aldığı hasarın arttığı görülmüştür. Minareler İsfahan'ın maksimum rüzgâr hızı nedeniyle yıkılmamakta iken deprem yüküne maruz kaldığında tüm minareler yıkılmıştır.

Masciotta vd. (2016) Portekiz'in Lizbon şehrindeki Jerónimos Manastırı'nın yapısal performansını değerlendirmek amacıyla yapının geometrik ve mekanik özelliklerini belirlemiş, yapıya YSİ sistemi kurarak çevresel etkilerle yapının statik ve dinamik davranışını incelemiş ve yapının SE modelini oluşturarak düşey yükler altında analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda yapı modelinin düşey yükler altında iyi dayanım gösterdiği ve sıcaklığın nemle birlikte yapısal davranış üzerinde önemli bir etkisinin bulunduğu görülmüştür. Sıcaklık ve frekanslar arasında korelasyonu belirtmiş ve bunu sıcaklığın artmasıyla malzemedeki ısı genleşme olması ve duvarın nem içeriğinin azalması sonucu malzemedeki rijitlik artışıyla açıklanmıştır. Şekil 2'de bir moda ait °C cinsinden sıcaklık ve Hertz (Hz) cinsinden frekans ilişkisi verilmiştir.



Şekil 2. Yapının ilk modunun sıcaklıkla değişimi (Masciotta vd., 2016)

Gentile vd. (2016) İtalya’da yer alan Gabbia Kulesi’ne ivmeölçer ve sıcaklık ölçerden oluşan bir sistemin yerleştirilmesiyle çevresel değişimlerin dinamik parametreler üzerindeki etkilerini belirlemiş ve bu etkilerin azaltılmasıyla deprem etkilerini daha doğru bir şekilde elde etmiştir. Kulenin tepesine 3 ivmeölçer ve 1 sıcaklıkölçerden oluşan düşük maliyetli bir YSİ sistemi kurulmuştur. İzleme süreci 15 ay boyunca sürmüş ve başlangıçtan yaklaşık 6 ay sonra uzak bir bölgede deprem meydana gelmiştir. OMA yardımıyla yapıya ait doğal frekanslar bulunmuş ve bu değerlerin sıcaklıkla değişimleri incelenmiştir. İstatistiki yöntemlerle sıcaklık değişimlerinin doğal frekanslar üzerindeki etkileri ayrıştırılmıştır. Anormal yapısal değişiklikler belirlenmiş ve depremin neden olduğu hasar tespit edilmiştir. Çalışmadan, sıcaklığın doğal frekanslar üzerinde önemli bir etkisinin olduğu ve sıcaklık artışıyla frekanslarda bir artışın olduğu görülmüştür. Doğal frekanslardaki ani değişimlerle depremin hasar oluşturduğu tespit edilmiş fakat hasarın büyüklüğü ve yeri için farklı testlerin de yapılması gerektiği vurgulanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Yapının 2. moduna ait frekansta deprem sonrasındaki kayma (Gentile vd., 2016)

Ubertini vd. (2017) İtalya’daki tarihi bir yığma yapı olan San Pietro Çan Kulesi’nin yapısal sağlığını 9 aydan fazla bir süre boyunca takip etmiş ve sıcaklık ile nemin kulenin doğal frekanslara etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmalarda sıcaklığın doğal frekanslar

üzerinde oldukça etkili olmasına rağmen nemin daha az etkili olduğu görülmüştür. Sıcaklık artışının, genleşmeyle çatlakların kapanması nedeniyle eğilme modlarının frekanslarında artışa sebep olduğu görülmüştür. Bağlantı çubukları ve fiber elemanların gevşemesiyle burulma modlarının frekanslarında ise azalışa sebep olduğu ve donma durumunda da doğal frekanslarda azalış olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca değerlendirme için 4 sıcaklık sensörü ve 1 nem sensörünün optimum olduğu sonucuna varılmış ve hızlı bir değerlendirme için 10 günlük bir sürenin yeterli olduğu belirtilmiştir.

Cabboi vd. (2017) İtalya'daki San Vittore Çan Kulesi'ne ivmeölçerlerden oluşan bir YSİ sistemi kurarak kulenin dinamik parametrelerini birkaç ay boyunca takip etmiş ve kulenin SE modelini oluşturmuştur. Çalışma kapsamında sıcaklığın doğal frekanslara etkisi incelenmiş ve regresyon modelleri yardımıyla bu etki frekanslardan ayrıştırılmaya çalışılmıştır. Çevresel etkilerden ayrılmış modal parametreler yeni yaklaşımda kullanılmış ve hasarın varlığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Deneysel frekanslara göre SE modeli kalibre edilmiş ve bu model yardımıyla hasar değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmada frekanslardaki %1'lik bir kaymaya karşılık gelen hasarın varlığı, geliştirilen yaklaşımla tespit edilebildiği görülmüştür.

Cavalagli vd. (2017) Gabbia Kulesi'ne ve San Pietro Çan Kulesi'ne yerleştirilen YSİ sistemleriyle kuleleri yaklaşık 2 yıl boyunca takip etmiş ve bu sürede gerçekleşen sismik olaylar sonucunda kulelerde ortaya çıkan hafif hasarların, çevresel etkilerin kaldırılması yoluyla belirlemeyi amaçlamıştır. Çevresel etkilerin kaldırılması için regresyon ve temel bileşen analizleri uygulanarak gerçekleştirilen DMA ile belirlenen doğal frekansların zamanla değişimi incelenip depremin bıraktığı etki değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, depremin neden olduğu hafif hasarların tespiti başarıyla gerçekleştirilmiş ve hasar tespitinde sadece görsel yöntemlerin kullanılmasının yeterli olmadığı vurgulanmıştır.

Azzara vd. (2018) İtalya'nın Lucca şehrindeki tarihi San Frediano Çan Kulesi'nin uzun süreli yapısal takibini gerçekleştirerek çevresel parametrelerin dinamik karakteristiklere etkisini araştırmıştır. Kuleye 4 adet 3 eksenli ivmeölçer yerleştirilmiş ve 1 yıl boyunca titreşim ölçümlerini gerçekleştirmiştir. Ölçümler sonrasında yapının modal karakteristikleri elde edilmiştir. Kulenin doğal frekanslarını ve sıcaklık değerleri ile arasındaki ilişkiyi doğrusal ve doğrusal olmayan şekilde incelemiştir. Çevresel etkilerin doğal frekanslar üzerindeki etkisi temel bileşen analiziyle ayrıştırılmıştır. Çalışmada frekansların sıcaklıkla pozitif bir ilişkisinin olduğu ve sıcaklık artışıyla frekanslardaki artışın yapı malzemesinin genleşmesiyle çatlakların kapanmasıyla açıklanmıştır.

Gentile vd. (2019a) İtalya'daki Milan Katedrali'ne 120 adet sensörden oluşan bir YSİ izleme sistemi kurarak 4 ay boyunca kulenin yapısal takibini gerçekleştirmiş ve kulenin dinamik karakteristiklerinin sıcaklık ile nem gibi çevresel koşullara bağlı değişimini incelemiştir. Sıcaklığın doğal frekanslar üzerindeki etkisi tüm modlarda görülürken nemin sadece ilk modda etkili olduğu görülmüştür. Yapıda metal bağlantı çubukların olması sebebiyle sıcaklık ve frekans değerleri arasında negatif bir doğrusal ilişki sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca yapının mod şekillerinde sıcaklığa bağlı ayırt edilebilir bir değişim oluşmazken, frekanslarda kayda değer bir değişim gözlenmiştir.

Gentile vd. (2019b) İtalya'daki Santa Maria del Carrobiolo Çan Kulesi'ne kurulan YSİ sistemiyle kulenin yapısal durumunu 2 yıl boyunca takip etmiştir. ÇTT yöntemiyle doğal frekanslar ve mod şekilleri gibi dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Çalışmada ilk iki modun sıcak zamanlarda birbirlerine oldukça yaklaştığı ve sıcaklık arttıkça doğal frekans değerlerinde bir artış olduğu görülmüştür. Ayrıca sıcaklığın dinamik parametreler üzerindeki etkisi için regresyon ve temel bileşen analizleri gibi istatistiki yöntemler gerçekleştirilmiştir.

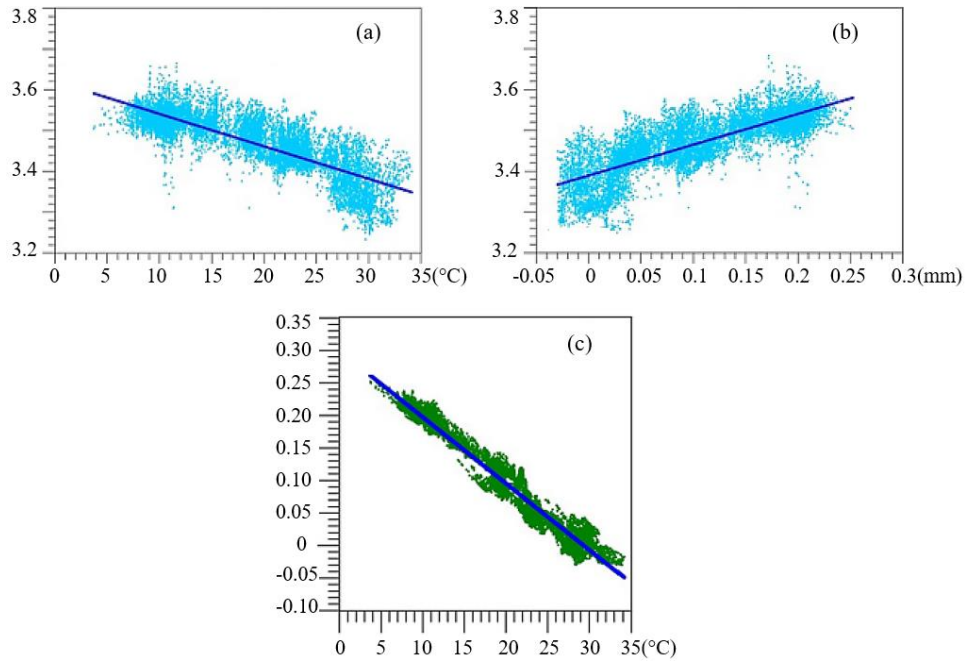
Cavalagli vd. (2019) tarihi bir yığma yapının dış cephelerinde iklim değişikliğinin neden olduğu malzeme bozulma risklerini belirlemek için yapısal hasarlar (çatlaklar vb.) arasındaki etkileşimini hesaba katan yenilikçi bir metodoloji önermiş ve bu metodolojiyi İtalya Gubbio'deki tarihi bir yapı olan Consoli Sarayı'na uygulamıştır. Çalışma saha incelemelerinden, hasar ve bozulma araştırmalarından, yapısal-termal tepkiyi tahmin eden sayısal modellerin geliştirilmesi ve gelecekteki iklim koşulları ve yapısal hasarın potansiyel kötüleşmesini hesaba katan malzeme bozulmasının tahmininden oluşmaktadır. Çalışma sonucunda iklim değişikliğine maruz kalan tarihi yapıların yüzey malzemelerinin korunmasında termal enerji ve yapısal hususların birlikte değerlendirilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır.

Boffill vd. (2019) yığma yapıların maruz kaldığı gerilme değişimlerinin sürekli izlenmesi için mevcut gerilme durumunun tahmin edilmesine ve zaman içinde sürekli izlenmesine dayanan hafif tahribatlı bir teknik sunmuştur. Geliştirilen cihaz yardımıyla laboratuvarında inşa edilen yığma duvar üzerinde yaklaşık 10 aylık periyot boyunca farklı gerilme durumları incelenmiş ve gerilme değerleri takip edilmiştir. Çalışmada gerilme değerleri ile cihazdan okunan değerler arasında iyi bir uyum sağlanmış fakat sıcaklık değişimlerinin sensör kayıtları üzerinde bir etkisi de gözlenmiştir. Bu etkiyi en aza indiren bir korelasyon katsayısıyla sıcaklığın gerilme kayıtlarına etkisi azaltılmıştır. Takip süresince

duvarda oluşan deformasyonlarda önemli bir artış görülmemiştir. Ayrıca geliştirilen cihazın gerilmeleri belirlemede başarılı olduğu vurgulanmıştır.

Sen vd. (2019) çevresel etkilere maruz sürekli kirişin sayısal modelini oluşturarak birden fazla hasar senaryosu için hem sıcaklığa bağlı sınır koşullarının hem de malzeme özelliklerinin temel yapısal parametreler üzerindeki etkisini incelemek için bir yaklaşım üzerinde çalışmıştır. Titreşim verilerindeki ani süreksizliklere göre sıcaklık etkisi yapısal hasarlardan ayrıştırılmış ve sıcaklığa bağlı olarak sınır koşulları ile malzeme özelliklerinin temel yapısal parametrelere etkisi incelenmiştir. Çalışmayla, uygulanan yaklaşımın sıcaklık etkisinin belirlenmesinde önemli olduğu görülmüş ve 1 yıllık yapısal takibi gerçekleştirilen İsviçre'deki Z24 köprüsünün uygulanan bu yaklaşımı doğruladığı vurgulanmıştır.

Kita vd. (2019) İtalya'da yer alan tarihi Consoli Sarayı'nın sıcaklığın statik ve dinamik davranış üzerindeki etkisini ve bu etkiyi yapısal parametrelerden kaldırarak deprem hasarlarını tespit etmiştir. Sarayın uzun süreli takibi için saraya bir YSİ sistemi kurulmuştur. Mevcut durum incelenip çatlakların tespiti yapıldıktan sonra sarayın SE modeli oluşturulmuş ve DMA yöntemi ile elde edilen verilerle SE model kalibrasyonu tamamlanmıştır. Sıcaklığın artmasıyla doğal frekansların azaldığı gözlenmiş, bunun sebebi ise saraya güçlendirme için yerleştirilen metal bağlantı çubuklarından kaynaklanabileceği ön görülmüştür. Ayrıca sıcaklığın artmasıyla çatlak genişliğinde doğrusal bir azalma görülmüştür (Şekil 4).



Şekil 4. Sıcaklığın frekansla ilişkisi (a), çatlak genişliğinin frekansla ilişkisi (b), çatlak genişliğinin sıcaklıkla ilişkisi (c) (Kita vd., 2019)

Hanbay (2019) 900kW kara tipi bir rüzgâr türbininin çevresel ve işletim koşullarını kapsayan titreşim bazlı YSİ ile modal parametrelerdeki değişim aralığını incelemiştir. Türbin üzerine yerleştirilen YSİ sistemi aracılığıyla 12 aylık veriler toplanmış ve toplanan veriler işlenerek rüzgâr türbininin modal tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr türbininin dinamik davranışına rüzgâr hızının, rotor hızının, sıcaklık ve nasele konumunun etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca türbinin SE modeli SAP2000 programında modellenmiş ve modal değerlerle doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda modal parametrelerin çevresel ve işletim koşullarından etkilendiği vurgulanmıştır.

Zonno vd. (2019) laboratuvar ortamında farklı kalınlıklardaki 1:1 ölçekli inşa edilen 3 kerpiç duvarın dinamik karakteristiklerinin ortam koşullarıyla ilişkisi incelenmiştir. Bu amaçla duvarlara YSİ sistemleri kurulmuş ve duvarlar 240 gün boyunca takip edilmiştir. Titreşim ölçümleri süresince nem, iç ve dış sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Çalışmada günlük ve mevsimsel olarak incelendiğinde çevresel etkilerin dinamik karakteristiklerdeki önemli değişiklikler görülmüştür. Mevsimsel ölçekte sıcaklık ve nemin doğal frekansla arasında iyi bir ilişki bulunamamışken günlük ölçekte iç sıcaklığın doğal frekansla iyi bir ilişki gösterdiği ancak dış sıcaklığın etkisinin gecikmeli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada çevresel etkilerin sadece doğal frekanslara etkisi araştırılmıştır. Mod şekilleri ve sönüm oranlarıyla da çalışmaların gerçekleştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Baraccani vd. (2020) İtalya'daki Garisenda ve Asinelli kulelerinin doğal frekanslarını uzun bir süre boyunca takibini YSİ sistemleriyle gerçekleştirmiş ve trafiğin doğal frekanslara etkisini araştırmıştır. Çalışmada YSİ sistemlerinden elde edilen doğal frekans verilerinin mevsimsel ve yıllık değişimi her iki kule için de %1'in üzerine çıkmadığı gözlenmiştir. Ayrıca elde edilen bu verilerle SE modellerinden alınan veriler arasında iyi bir uyum olduğu belirlenmiştir. Sinyal genliğiyle trafik yoğunluğu arasında net bir ilişki belirlenmiş ve trafiğin yoğun olduğu saatlerde sinyal genliğinin daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

García-Macías & Ubertini (2020) İtalya'daki Sciri Kulesi üzerine 12 yüksek hassasiyetli tek eksenli ivmeölçerlerden oluşan titreşim tabanlı bir izleme sistemini kulenin 4 farklı yüksekliklerine kurmuş ve 200, 1000 ve 5000Hz gibi 3 farklı örnekleme frekansı kullanarak 13 Şubat-10 Mart 2019 tarihleri arasında titreşim testlerini gerçekleştirmiştir. Kulenin tam yapısal sistem tanımlaması için otomatik operasyonel modal analiz (A-OMA) yönteminin yanında ANDI yöntemiyle de ortam gürültü dalgalarını değerlendirmeye çalışmıştır. Çalışmada 1000Hz ve 5000Hz örnekleme frekansları kullanılarak dalga hızları ile çevre sıcaklığı arasında pozitif bir korelasyon bulunmuş, çevre sıcaklığının etkisinin

tespit edilmesinde yüksek örnekleme frekanslarının ve bunun sonucunda da erken hasar tespiti için YSİ sistemlerinin önemini vurgulamıştır. Ayrıca ANDI'nin OMA'yı tamamlayıcı bir tekniği temsil ettiği de kanıtlanmıştır.

Giordano vd. (2020) İtalya'nın Perugia kentindeki San Pietro Bazilika Çan Kulesi'ne yapısal davranıştaki anormallikleri tespit edebilen titreşim tabanlı bir YSİ sistemi yerleştirmiş ve titreşim verilerini toplamıştır. Kuleden uzakta meydana gelen depremin etkisiyle meydana gelen YSİ verileri de toplanarak, deprem sonrası koşullarda kulenin yapısal davranışındaki değişikliklerin değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Çalışma sonucunda sismik olaydan önce ve sonra sıcaklık ve doğal frekanslar arasındaki korelasyon analizi, korelasyon katsayıları ve en uygun doğrusal regresyon açısından veri kümelerindeki ilişkilerdeki değişiklikler gösterilmiştir.

Tronci vd. (2020) İtalya'daki betonarme-yığma olarak inşa edilen Civic Kulesi'nin dinamik karakteristiklerini kuleye yerleştirilen 6 adet yüksek hassasiyetli ivmeölçer ve 1 sıcaklık sensöründen oluşan YSİ sistemiyle elde etmiştir. Kule 3 yıl boyunca takip edilmiş ve ÇTT ile zorlanmış titreşim testi (ZTT) yöntemleriyle ilk 5 ölçüme ait doğal frekanslar başlangıç referans durumu olarak seçilmiştir. SE modeliyle de yapının dinamik davranışı belirlenmiştir. Yapısal takip esnasında meydana gelen bir depremin doğal frekanslarda değişikliğe yol açtığı görülmüş ve bu değişikliğin yapıda deprem nedeniyle meydana gelen hasarların sebep olduğu tahmin edilmiştir. Ancak deprem öncesi durumun bilinmemesi herhangi bir karşılaştırma yapılamamasına sebep olmuştur. Çalışmada ortam titreşiminin az olmasına rağmen sistemin yapının frekanslarının çevresel etkiler altındaki değişimini belirleyebildiği vurgulanmıştır. Çalışmada doğal frekanslarla sıcaklık arasındaki ilişki istatistiki yöntemlerle elde edilmiştir. Ayrıca sistemin güvenilirliğinin yapıya ait doğrulanmış referans karakteristiklerden sağlandığı ifade edilmiştir.

García-Macías vd. (2021) tarihi yapıların gerçek zamanlı yapısal değerlendirmesi için yenilikçi bir vekil model güncelleme yaklaşımı önermiş ve bu yaklaşımı İtalya'nın Perugia şehrindeki orta çağ yığma kulesi olan Sciri Kulesi'ne uygulamıştır. Önerilen yaklaşımda A-OMA tarafından belirlenen modal özellikler kullanılmış ve kulenin hasara duyarlı belirli parametrelerinin sürekli olarak değişmesine izin verilmiştir. Sciri Kulesi'nin ve bitişik binanın tamamen ayrıntılı 3-D SE modeli makro elemanlar ile oluşturulmuştur. Vekil modeller için kullanılan eğitim popülasyonu, 3-D SE modeli kullanılarak Monte Carlo simülasyonlarıyla elde edilmiştir. Bunu yapmak için SE modeli geometriyi parametrik elastik özelliklere sahip dört makro öğeye bölerek parametrelendirilmiş ve bu

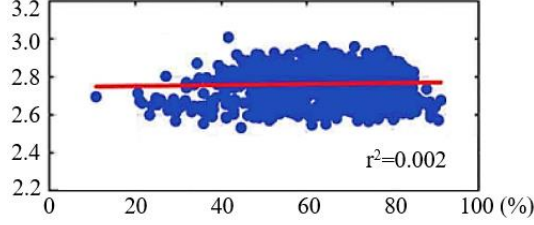
parametreleştirmeye dayanarak ikinci dereceden tepki yüzeyi yöntemi (RSM), Kriging yöntemi ve rastgele örnekleme yüksek boyutlu model gösterimi (RS-HDMR) dahil olmak üzere 3 farklı vekil model dikkate alınmıştır. Kulenin modal özelliklerinin ve ortam sıcaklığının belirlenmesi için 13 Şubat'tan 10 Mart 2019'a kadar sürekli çevresel titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında belirlenen modal özellikler ile modellerin tahminleri arasındaki uyumsuzluk en aza indirilerek tasarım parametreleri sürekli olarak uyarlanmıştır.

Teng vd. (2021) çelik kemerli bir köprü olan Gökkuşluğu Köprüsü üzerinde sıcaklığın frekans üzerindeki mekânsal-zamansal etkisini belirlemek için korelasyon analizlerini gerçekleştirmiştir. Sıcaklığın frekans üzerindeki etkisinin belirlenmesinde geometrik boyut, iç kuvvet, sınır koşulları ve elastisite modülü açısından nicel olarak analizleri gerçekleştirilmiş ve sıcaklık alanının köprü frekansı üzerindeki etkisini ayırmak için bir sinir ağı algoritması önerilmiştir. Uzun süreli takip sonucunda artan sıcaklıkla birlikte hem kemerin hem de kirişin frekanslarının azaldığı görülmüştür.

Cai vd. (2021) basit mesnetli kirişlerin doğal titreşim özellikleri üzerinde sıcaklığın etkisini incelemiş ve kirişlerin doğal frekansının sıcaklıkla değişimi için teorik bir formül önermiştir. Çalışmada basit mesnetli kirişlerin -40°C ile 60°C aralığındaki elastisite modülü, düşen top testi ile teorik formül aracılığıyla elde edilmiş ve oda sıcaklığında 3 nokta bükülme testiyle elde edilen elastisite modülü ile karşılaştırılmıştır. Farklı sıcaklıklarda basit mesnetli kirişlerin doğal frekansı için bir SE simülasyonu da yapılmıştır. Teorik analizle sıcaklığın basit mesnetli kirişin doğal frekansı üzerindeki etkisinin esas olarak basit mesnetli kiriş malzemesinin elastik modülündeki değişiklikten kaynaklandığı görülmüştür. Çalışma sonucunda basit mesnetli kirişlerin doğal frekansının değişmesinde sıcaklığın etkili olduğu gözlenmiştir.

Barsocchi vd. (2021) mikro elektro mekanik sistemden (MEMS) oluşan ve kablolu sensör ağı (WSN) ile bağlanabilen bir izleme sistemini detaylı olarak tanıtmıştır. Bu sistemi İtalya Livorno'daki bir yığma kule olan Matilde Kulesi'ne yerleştirerek titreşim verileri WSN yardımıyla toplanmıştır. Toplanan veriler FFT ve SSI algoritmalarıyla işlenerek kulenin yapısal parametreleri belirlemiştir. WSN tarafından kaydedilen veriler, geleneksel sismik ivmeölçerlerle gerçekleştirilen ön test sırasında elde edilen verilerle uyumlu olduğu, ilk hata ayıklama ve ayarlama periyodunun ardından sistemin artık kararlılık gösterdiği görülmüştür. Çalışmada otomatik bir modal tanımlama prosedürü de oluşturulmuş ve sıcaklık ile rüzgâr hızının kule modal özellikleri üzerindeki etkileri, diğer çalışmalarda gözlemlenen davranışlarla aynı doğrultuda olduğu gözlenmiştir. Nemdeki değişimin izlenen

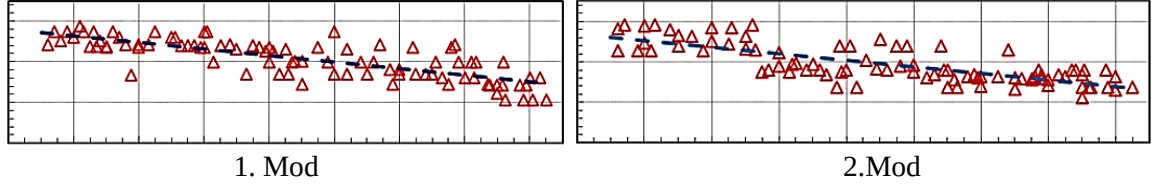
modlar üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı da vurgulanmıştır (Şekil 5). Şekilde düşey eksen frekans ekseni yatay eksen ise nem değerleridir.



Şekil 5. Yapının 1. moda ait frekansının nemle ilişkisi (Barsocchi vd., 2021)

Giordano vd. (2022) İtalya'nın Marche bölgesindeki bir yığma kule olan Cagli Kulesi üzerinde farklı sıcaklık ve nem koşullarında birer yıl arayla 2 ortam testini gerçekleştirmiş ve kulenin dinamik karakteristiklerini zaman ve frekans alanındaki ayrıştırma yöntemleriyle belirlemiştir. Gerçekleştirilen 2 deneysel çalışmada elde edilen frekanslar ve modal şekillerinin benzer olduğu görülmüştür. Bu sonuç kule üzerinde herhangi bir hasar oluşmadığını ve kulenin dinamik tepkisinin sıcaklık ve nem değişimlerinden etkilenmediğini göstermiştir. Ayrıca kulenin SE modeli oluşturularak deneysel verilerle arasındaki uyum, mutlak frekans hataları ve modal vektörler modal güvence kriterleri aracılığıyla değerlendirilmiştir.

Akhlaq vd. (2022) Pakistan'ın başkenti İslamabad'daki 90m yüksekliğindeki Faysal Cami Minaresi'nin dinamik özelliklerini belirlemiştir. Minareye 11 adet 3 eksenli MEMS yerleştirilerek 3 gün boyunca deneysel veriler toplanmış ve modal özellikler 3 farklı OMA yöntemiyle elde edilmiştir. Minarenin SE modeli ETABS'ta oluşturulmuş ve elde edilen numerik sonuçlarla deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra SE modeli üzerinde malzeme özelliklerinin değiştirilmesi ile yapısal olmayan elemanların ağırlığının eklenmesiyle SE modeli güncellenmiş ve elde edilen SE sonuçlarıyla deneysel sonuçlar arasındaki fark en aza indirilmiştir. Ayrıca frekansların ortam sıcaklığına göre değişimi de inceleyerek bu değişimin doğrusal bağımlı olduğu ve sıcaklıktaki artışıyla birlikte frekanslarda genel bir azalma eğiliminin olduğu gözlenmiştir (Şekil 6).

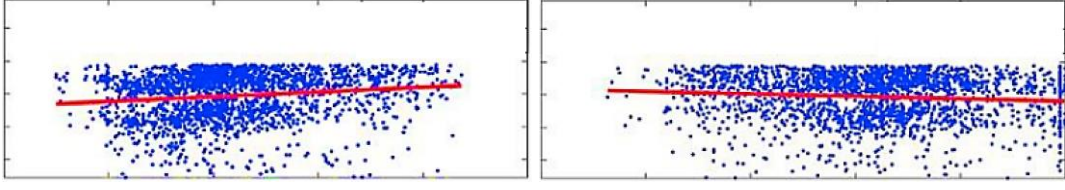


Şekil 6. Minarenin ilk 2 frekansının sıcaklıkla ilişkisi (Akhlaq vd., 2022)

Bayraktar vd. (2022) Kömürhan Köprüsü'nde hava sıcaklığının tabliye, pilon ve kablo elemanlarının yıllık ve günlük şekil değiştirme davranışları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Köprü elemanlarının mevsimsel ve günlük birim deformasyon eğilimlerini belirlemek amacıyla birim deformasyon ve sıcaklık verileri 12 ay boyunca izlenmiş ve detaylı bir şekilde işlenmiştir. Ana açıklıklı çelik tabliyenin günlük ve yıllık şekil değiştirme tepkileri, trafik ve rüzgâr etkilerine göre ağırlıklı olarak hava sıcaklığından etkilendiği görülmüştür. Beton direkte ise yıllık şekil değiştirme tepkileri hava sıcaklığı ile güçlü bir korelasyon göstermemiştir. Ana açıklık tabliyesi ve arka açıklık ankraj bloğunun kablo kuvvetlerindeki yıllık değişiklikler genellikle artan hava sıcaklığıyla birlikte arttığı görülmüştür. Çalışmada normal işletme koşulları altında hizmet veren kablolu askılı köprülerin günlük ve yıllık yapısal şekil değiştirme davranışları üzerinde termal etkilerin ana faktör olduğu vurgulanmıştır.

Pellegrini vd. (2023) çevresel parametrelerin bir yapının dinamik özelliklerinin değişimi üzerindeki etkisini sayısal açıdan hesaba katmaya olanak tanıyan bir yöntem sunmuştur. Yöntem benzer geometriye sahip ancak farklı takviye elemanları içeren iki sayısal örnekle ve aynı zamanda Portekiz'de 1559 yılında inşa edilen Mogadouro Kulesi'nin ivmeölçerler, sıcaklık, nem sensörleri ile izlenen tam ölçekli bir simülasyonu yoluyla test edilmiş ve doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda kulenin doğal frekanslarının sıcaklığa bağlı olduğu vurgulanmıştır.

Standoli vd. (2023) İtalya'da bulunan Camerino Santa Maria Annunziata Katedrali İkiz Çan kulelerinin 2016 yılındaki depremden sonra meydana gelen hasarları ve dinamik davranışını değerlendirmek için kuleleri YSİ sistemiyle takip etmiştir. Deneysel verileri elde etmek için kulelere 4 adet 3 eksenli MEMS yerleştirmiş ve toplanan verileri işleyerek kulelerin modal özelliklerini elde etmiştir. Çalışmada sıcaklık, bağıl nem ve rüzgâr hızı gibi iklim koşulları da toplanmış ve sıcaklık artışıyla birlikte frekans değerlerinde doğrusal bir artış gözlenirken, frekanslar ile bağıl nem arasında ters bir ilişki gözlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. İlk frekansın sırasıyla sıcaklıkla ve nemle ilişkisi (Standoli vd., 2023)

Gentile vd. (2023) Milano Katedrali'ne yerleştirilen YSİ sistemiyle dinamik karakteristikleri elde etmiş ve çevresel parametrelerle birlikte değerlendirmiştir. Yapının dinamik tepkisi 27 kanallı sistemle sürekli olarak toplanmıştır. Çevresel parametrelerin katedralin modal davranışı üzerindeki etkileri incelenmiş ve YSİ sırasında gerçekleşen sismik olaylara verilen tepkiler de kayıt altına alınmıştır. Daha sonra katedralden elde edilen verilere ilişkin yorumlarda bulunmuştur.

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Tez kapsamında titreşim ölçüm yöntemine dayalı yapısal parametrelerin belirlenmesi için yüksek hassasiyetli kablolu/kablosuz ölçüm alabilen, donanım ve yazılım kısımlarıyla bütünleşik çok kanallı yerli bir titreşim ölçüm sistemi geliştirilmesi ve geliştirilen bu sistemle yapısal davranışlardaki/frekanslardaki sıcaklık-neme bağlı değişiminin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Belirtilen amaçlara yönelik ilk hedef titreşim ölçüm sisteminin yapılmasıdır. Bunun için çok kanallı harici bir veri toplama ünitesine (Data Logger'a) ihtiyaç duymayan, 3 eksende titreşimleri ölçebilen, bir yazılım aracılığıyla verileri elde edebilen ve alınan sinyalleri işlenmeye hazır hale getiren bir sistem geliştirilmiş ve geliştirilen bu sistemin doğrulanması farklı yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Diğer bir hedef ise literatür incelendiğinde yurt dışında yapılan çalışmalarda katedral, kilise, kule vb. çeşitli yığma yapılar üzerinde sıcaklık-nem gibi çevresel etkilerin frekanslar üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla birçok çalışmanın ortaya konulduğu görülmüştür. Ülkemizde de böyle bir etkinin spesifik olarak araştırıldığı çalışmalar sınırlı olup Trabzon ilindeki birkaç yapı üzerinde sıcaklık-neme bağlı frekans değişiminin (yapısal davranışlardaki değişiminin) belirlenmesi hedeflenmiştir. Buradaki değişimin takip edilmesinde en kolay yöntemlerden biri frekanslardaki değişimin belirlenmesidir. Ayrıca yapının bütünü temsil edebilen dinamik parametre olduğu için frekanslar üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır. Bu hedefle gerçek yapılar üzerinden ölçüm yapmadan önce sıcaklık-neme bağlı olarak özellikle de

yığma yapılardaki değişimin nasıl olduğunu belirlemek ve buradaki işlem algoritması ile yöntem akışını ortaya koyabilmek adına laboratuvar ortamında geometrik özellikleri farklı olan 3 tane model oluşturulmuştur. Bu modellerden farklı sıcaklık ve nem durumları için ölçümler alınmıştır. Bunun yapılmasındaki amaç kontrollü sıcaklık ve nem değişimi durumunda frekanslarda ne düzeyde değişim olacağının belirlenmesi ve frekanslar için formülasyon geliştirmesinde hangi parametrelerin daha etkin olduğunun belirlenmesidir. Bu modeller üzerinde yapılan çalışmaya benzer bir şekilde gerçek yapılardaki ölçümlerden frekansların sıcaklık ve neme bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Belirli bir süre bu yapılardan ölçümler alınarak ortalama frekans, alt-üst frekans değerleri belirlenmiş ve meydana gelen değişim değerlendirilmiştir. Yapıdan ölçülen değerlerin karşılaştırılması sonucunda değişimin hasardan mı olduğu yoksa yapının normal döngüsü içerisindeki olaylardan mı gerçekleştiğine karar verilebilecektir. Dolayısıyla seçilen yapılar üzerinde belirli sıcaklık değerleri için takipler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar için regresyon analizleri yapılmıştır. Ayrıca minimum ve maksimum frekans değerleri için yapının performansının nasıl etkilendiğinin görülebilmesi adına frekansa bağlı elastisite modülü değişimi ortaya konulmuş ve yapılara ait SE modellerin üzerinde dinamik analizler yapılmıştır. Böylece en düşük ve en yüksek frekans değerlerine karşılık gelen durumlar için yapısal davranış belirlenmiştir.

1.4. Yapı Sağlığı İzleme Sistemleri

Geçmişten günümüze inşa edilmiş çeşitli yapı türlerinin kullanım ömürleri boyunca kullanım amaçlarını güvenli ve ekonomik olarak yerine getirebilmeleri oldukça önemlidir. Yapılar ister tarihi ister modern yapı olsun günlük kullanım, dış faktörler (trafik yükleri, sıcaklık, nem, rüzgâr vb. çevresel faktörler), doğal afetler/ani etkiler (deprem, sel ve heyelan vb.), zamansal etmenler (yıpranma, aşınma, bitkilenme) vb. çeşitli etmenler sonucunda sahip oldukları kapasitelerini kaybedebilir veya yıkılabilir (Pallarés vd., 2021). Örneğin İtalya'daki Pavia Civic Kulesi görünür hiçbir hasar belirtisi olmadan yıkılmıştır (Binda vd., 1992). Bu yüzden yapıların mevcut durumunun iyi bilinmesi oldukça önemlidir. Mevcut durumun belirlenebilmesi amacıyla YSİ sistemleriyle yapıların yapısal takibi gerçekleştirilebilmektedir.

Yapı sağlığı izleme (YSİ), bir izleme sistemi yardımıyla bir yapının yapısal durumunun periyodik olarak izlenmesi ve zamanla oluşabilecek yapısal değişimlerinin

belirlenmesi işlemidir. Yapıların mevcut yapısal sağlığının değerlendirilmesi bir defa, periyodik veya sürekli olarak belirli parametrelerin izlenmesi yoluyla yapıdaki performans seviyesi hakkında bilgi sağlanabilmektedir. Bu işlem bir kez yapıldığında, yapının o andaki durumu, hasar değerlendirmesi, iyileştirme ve güçlendirme değerlendirmesi vb. veriler elde edilebilmektedir. Bu işlem sürekli yapıldığında ise yapının yapısal sağlığının zaman içerisindeki değişimi incelenebilmektedir. YSİ prosedürü veri toplama, veri analizi (sinyal işleme), hasar tespit ve performans değerlendirmesi gibi önemli unsurlardan oluşmaktadır. YSİ prosedürü, Bassoli vd. (2015) yapısal tanımlama ve hasar tespiti için mevcut yapılarının karakterizasyon süreci olarak, Saisi vd. (2018) yapısal sağlığın mevcut durumunu temsil eden özelliklerin belirlenmesi için yapıya yerleştirilmiş sensörlerin sürekli sorgulanması olarak tanımlanmıştır.

YSİ ile yapının tepkilerinin sürekli olarak ölçülmesi ve bu tepkilerde herhangi bir değişiklik olması durumunda yapıda meydana gelen yapısal hasarlar yapı rijitliğini değiştirmektedir. Yapının rijitliği ve kütlesi, yapının dinamik karakteristiklerini (doğal frekans, mod şekli ve modal sönüm oranı) etkilediğinden yapısal hasarlar bu karakteristiklerin değişimlerinden ele edilebilmektedir. Yapının doğal frekansları konumdan bağımsız olarak yapının tek bir noktasından ya da birçok noktasından elde edilebildiğinde doğal frekansa dayalı yaklaşımın daha fazla yaygınlık kazanmasına sebep olmuştur (Bicanic & Chen, 1997).

Hasar tespitiyle ilgili Rytter (1993) tarafından dört ayrı seviye sınıflandırması yapılmış olup daha sonraları araştırmacılar tarafından (Yam vd., 2004; Worden & Dulieu-Barton, 2004) ilave bir hasar tespit seviyesi eklenmiştir. Hasar tespit sınıflandırmaları 1. seviye, yapıda hasarın var olup olmadığının belirlenmesi; 2. seviye, hasar bölgesinin belirlenmesi; 3. seviye, hasarın türünün belirlenmesi; 4. seviye, hasar şiddetinin belirlenmesi; 5. seviye, yapının kalan ömrünün tahmin edilmesidir.

YSİ sistemleri verilerin algılanması, toplanması, iletilmesi, işlenmesi, yönetilmesi ve yapı sağlığın değerlendirilmesi gibi süreçlerden oluşmaktadır (Chen, 2018). Bu süreçlerden en iyi şekilde yararlanabilmek için sensör tipinin seçimi (ivmeölçerler, gerinim ölçerler, fiber sensörler, anemometreler, sıcaklık sensörleri vb.), sensör sayısının ve sensörlerin yerleştirileceği konumların belirlenmesi, veri toplama donanımının seçilmesi, ölçülen verilerin aktarım ağının belirlenmesi, toplanan verilerden filtrelenmesi ve yapısal sağlığın değerlendirilmesi gibi konularda dikkat edilmesi oldukça önemlidir.

YSİ yöntemleri yapının özellikle belirlenmiş bir bölge incelendiği durumlarda yerel yöntemler ve yapının tamamının değerlendirileceği veya belli bir bölümüne erişimin sağlanamadığı durumlarda genel yöntemler olmak üzere 2 gruba ayrılabilir (Frangopol & Messervey, 2009). Yerel yöntemler genellikle belirli periyotlarla sahadan ölçümler alınarak uygulanmaktadır. Yerel yöntemlerle ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır (Riva, 1994; Garavaglia vd., 2008; Wang vd., 2019; Loverdos & Sarhosis, 2022; Abu-Haifa & Lee, 2022; Rozsas vd., 2022). Yapının tamamının değerlendirileceği veya belli bir bölümüne erişimin sağlanamadığı durumlarda genel yöntemler, yapı genelinde inceleme olanağı sağladığı için güncel bir konu olma özelliğini devam ettirmektedir. Genel yöntemlere, ivmeölçerden oluşan bir titreşim ölçüm sistemiyle alınan verilerin işlenmesiyle yapıya ait dinamik karakteristiklerinin belirlenerek SE model güncellemesinin yapılmasıyla yapısal sağlığın değerlendirilmesi örnek olarak verilebilir. Genel yöntemlerle hasarın olup olmadığı belirlendikten sonra hasarın yeri ve büyüklüğü yerel yöntemlerle değerlendirilebilmektedir (Chang vd., 2003). Hasar tespit yöntemleri uygulama biçimi olarak model tabanlı ve modelden bağımsız yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Modelden bağımsız yöntemlerde deneysel veriler değerlendirilirken, model tabanlı yöntemlerde sayısal modellerin deneysel verilerle kalibrasyonu sonucunda hasar tespiti gerçekleştirilmektedir (Fan & Qiao, 2011; Genç, 2023).

YSİ yöntemlerinde her bir yöntemin kendine özgü olumlu ve olumsuz yönleri bulunduğundan her yapı türündeki tüm sorunları aynı anda çözebilecek bir yöntem yoktur. Bazı durumlarda tek bir yöntem yeterli olmamaktadır. Bu sebeple yerel ve genel yöntemlerin bazen birlikte kullanılması gerekmektedir.

1.4.1. Modal Parametre Belirleme Yöntemleri

Yapıların modal parametrelerinin belirlenmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin kullanım amacına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. İvmeölçer tabanlı sistemler deneysel modal analiz (DMA) yöntemiyle yaygın olarak kullanılmakta olup çalışma sisteminin genel adı olan YSİ sistemlerindendir. DMA yöntemi, yapılarda oluşan titreşimlerden kaynaklı tepkilerin ölçülerek dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde; yapının restorasyon öncesi-sonrası, deprem öncesi-sonrası hasar ve durum tespit çalışmalarında; yapının projelendirme öncesi-sonrası durumunun belirlenmesinde; SE model kalibrasyon/güncelleme çalışmalarında; çevresel etkilerin yapı davranışı üzerindeki

etkisinin incelenmesinde vb. birçok araştırma konusunda teknolojinin gelişmesi ve yaygınlaşması sayesinde günümüzde tarihi ve diğer birçok yapı türünde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemin yapının tamamı hakkında bilgi vermesi ve uygulanabilirlik açısından yapıya hiçbir hasar vermemesi sebebiyle sıkça tercih edilmektedir (Türker, 2011). Özellikle kültürel miraslar olan tarihi yapılarda yapıya hasar verilmeden incelemelerin yapılması önemli olduğundan bu yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde DMA yöntemi etkili olmaktadır.

Titreşim testi ölçümlerinin etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmesi ve incelenen yapı hakkında doğru değerlendirmelerin yapılabilmesi için ölçümlerde dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Ölçülecek yapının davranışı yaklaşık olarak bilinmelidir. Bu da yapının SE modeli oluşturularak SE analizinin gerçekleştirilmesiyle belirlenebilmektedir.
- DMA yöntemlerinden çevresel titreşim testi ve zorlanmış titreşim testi yöntemlerinin hangisinin kullanılacağı ölçülecek yapının büyüklüğü ve çevresel koşullarına bağlı olarak değiştiğinden ilgili koşullar dikkate alınarak en elverişli yöntem yapıya uygulanmalıdır.
- Ölçümlerde, yapıya uygun sensör tipi seçilmelidir. Örneğin esnek yapılarda düşük g değerine sahip sensör, rijit yapılarda g değeri yüksek sensör tipi seçilmelidir. Ayrıca sensörlerin yerleşim düzenine, sayısına ve gerekli ayarlamaların yapılmasına özen gösterilmelidir.
- Titreşim testlerinde frekans aralığına, ölçüm süresine, örnekleme frekansına, kullanılacak kablo boyutuna vb. özelliklere dikkat edilmesiyle gürültüsüz titreşim verilerinin alınabileceği göz önünde tutulmalıdır.

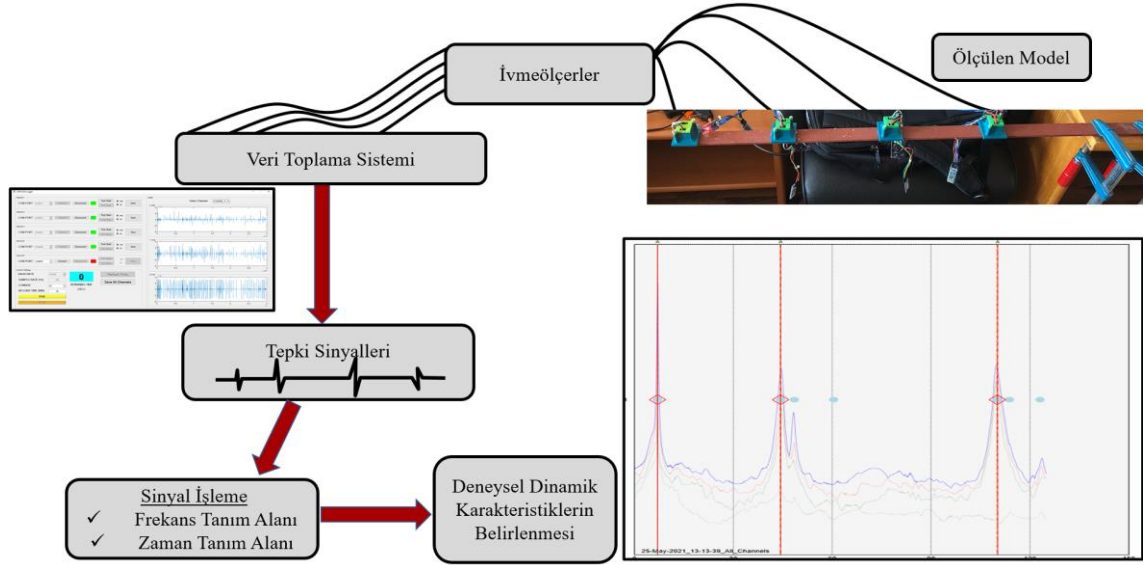
Dinamik karakteristikleri elde etmeye yarayan DMA yöntemi ölçüm sırasında dikkate alınan etkiye bağlı olarak çevresel titreşim testi yöntemi ve zorlanmış titreşim testi yöntemi olarak 2 gruba ayrılmaktadır. Tez çalışması kapsamında, incelenen tüm yapılarda çevresel titreşim testi yöntemi kullanılarak geliştirilen CEVS sistemi ile dinamik karakteristikler belirlenmiştir.

- Çevresel Titreşim Testi Yöntemi

Yapının genelinde inceleme olanağı sağlayan YSİ yöntemlerinden titreşime dayalı bir yöntem olan DMA yöntemi diğer adıyla operasyonel modal analiz (OMA) yöntemi tüm

yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde OMA yöntemi yapılarda deprem, rüzgâr, trafik, patlatma vb. çevresel etkiler altında yapının bir etkiye verdiği tepki sadece incelendiğinden bu yöntem genellikle çevresel titreşim testi (ÇTT) yöntemi olarak bilinmektedir. ÇTT yönteminde yapı rastgele titreşimler altında incelendiğinden yapıya etkiyen titreşimler (etki kuvveti) bilinmemekte ve literatürde sadece tepki modal analizi olarak da adlandırılabilir. Ayrıca ÇTT yöntemi yapıya herhangi bir hasar da vermemektedir.

Yapının dinamik karakteristikleri yapının belli noktalarından ölçülen tepki verilerinin frekans veya zaman tanım alanında ayrıştırma yöntemleriyle işlenmesi sonucu belirlenmektedir (Brincker vd., 2003; Türker, 2005; Zhang & Brincker, 2005). ÇTT yönteminde yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için kurulan ölçüm düzeneği örneği Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. ÇTT ölçüm düzeneği örneği

Yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan ayrıştırma yöntemlerinden frekans ve zaman tanım alanındaki algoritmaların veri işleme ve denklem çözme teknikleri ile matris dizilişleri birbirinden farklı olmasına rağmen bu yöntemlerin birbirlerine karşı çok belirgin bir üstünlükleri bulunmamaktadır. Frekans tanım alanındaki yöntem, her bir noktada ölçülen sinyalin analizine ve bu sinyaller arası korelasyona bağlı olup bu yöntemde birbirine yakın frekans değerleri daha kolay bir şekilde fark edilebilmektedir. Frekans tanım alanındaki başlıca yöntemler piklerin seçilmesi yöntemi,

frekans tanım alanında ayrıştırma yöntemi (FTAA), geliştirilmiş frekans tanım alanında ayrıştırma yöntemi (GFTAA) ve polimaks yöntemidir. Zaman tanım alanındaki yöntemlerde ise her bir noktada sinyalin zaman geçmişine ve korelasyon fonksiyonlarıyla model uydurmaya bağlı olup rastgele azalım yöntemi, rekürsif teknikler, en büyük olabilirlik yöntemleri ve stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemleri zaman ortamındaki başlıca yöntemlerdir (Ramos, 2007).

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, geliştirilen CEVS titreşim ölçüm sistemiyle çevresel titreşimler altında ÇTT yöntemi kullanılarak yapıların titreşim verileri elde edilmiş ve frekans alanındaki ayrıştırma yöntemiyle yapıların frekans değerleri belirlenmiştir.

- **Zorlanmış Titreşim Testi Yöntemi**

ZTT yöntemi, bilinen ve ölçülebilen bir etki yardımıyla (darbe çekici, sarsma tablası vb.) yapı titreştirildikten sonra yapının etkiye verdiği tepkilerin ölçülmesi işlemine dayanan bir yöntemdir. Zorlanmış titreşimde yük yapıya etkidiği sürece devam etmektedir (Ewins, 1995). Literatürde bazı yapı modellerinde bu yöntemin kullanıldığı görülmüştür (Chiostrini vd., 1992; Bıkçe vd., 2011; Soyöz vd., 2011; Aslan vd., 2020; Chopan & Noori, 2023). Ama ZTT yönteminde uygulanan etkinin büyüklüğünün bilinmesinin gerekmesi, büyük inşaat mühendisliği yapılarında önemli bir zorluk olabilmektedir.

1.4.2. Ölçüm Sistemleri

Titreşim ölçüm sistemleri inşaat mühendisliğinden havacılık ve uzay sanayisine, otomotiv sektöründen silah sanayisine, elektronikten makine mühendisliğine, insan vücudu titreşimlerinden şok testlerine, OMA yöntemi gibi birçok alanda sıkça tercih edilmektedir. Bu sistemler, yapı üzerinden titreşim verilerinin toplanması, makine bakım ve çalışma sistemlerinin ayarlanması gibi birçok amaca hizmet etmektedir. Titreşim ölçüm sistemleri kablolu-kablosuz sistemler olarak iki gruba ayrılabilen ve bu sistemler donanımsal ile yazılımsal kısımlardan oluşabilmektedir. Genel hatlarıyla titreşim ölçüm sistemleri sensörler, veri toplama üniteleri, kablolar, bluetooth, kablosuz haberleşme sensörleri, SD kart modülleri, şarj modülleri, titreşim kaynakları, diğer modüller, ledler, gömülü sistem yazılımları, sinyal işleme yazılımları vb. araçlardan oluşabilmektedir.

- Sensörler (Algılayıcılar)

İnsan vücudundaki duyu organları gibi çevresel değişiklikleri (titreşim, basınç, nem, sıcaklık vb.) elektronik ortamlarda algılayabilen cihazlara sensör (algılayıcı) adı verilmektedir. Algılayıcılar yaşanan dünyada geliştirilen elektronik cihazların çevre ile uyumlu bir şekilde çalışabilmeleri için en temel elemanlar arasında yer almaktadır.

Sensörler, yapıların yapı sağlığı değerlendirmesi için gereken yapısal tepkileri elde etmeye yarayan en önemli araçlardan olup YSİ sensörleri yapının mevcut durumunun değerlendirilmesi, gelecekteki performansının tahmin edilmesi, uygun bakım ve restorasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesi vb. amaçlarla kullanılmaktadır. Bu amaçlar için kullanılan piezoelektrik, mikro elektro mekanik sistemler ve fiber optik gibi birçok sensör türü mevcuttur (Chen, 2018).

DMA yöntemiyle yapılacak ölçümlerde kullanılacak sensörlerin seçiminde yapı türü, yapı malzemesi, çevresel koşullar gibi faktörler dikkate alınmalıdır. İnşaat mühendisliği yapıları için yer değiştirme, gerilme, sıcaklık, nem, korozyon vb. ölçümlerde doğru sensör türünün seçimine, sensörlerin yerleşimine özen gösterilmeli ve bu sensörlerin yapıya yapıştırıcı madde, mıknaş, silikon veya vida gibi farklı bağlanma şekilleri dikkatlice seçilmelidir. ÇTT yöntemiyle yapılarda çevresel etkiler nedeniyle oluşan titreşimleri ölçmek için ivmeölçerler kullanılmaktadır (Şekil 9). Piyasada çeşitli türleri bulunmaktadır (URL-6-10, 2024). İvmeölçerler, yapıda oluşan titreşimlere karşılık elektriksel voltajların üretilmesini ve bu sinyalin veri toplama ünitesine taşınabilir voltaj sinyaline dönüştürerek aktarılmasını sağlamaktadır. Bu işlemler uygulanırken ölçümü yapılacak sistem için yeterli hassasiyete sahip olan ivmeölçer seçiminde; ölçüm frekans aralığı, maksimum ivme değeri, hassasiyet, çalışma sıcaklığı, ağırlığı vb. özellikler oldukça önemlidir. İvmeölçerlerin hassasiyetinin az olması, ivmeölçer büyüklüğü ve ağırlığının fazla olması birtakım olumsuzlukları beraberinde getirebilmektedir (Türker, 2011).



Şekil 9. İvmeölçer örneklerinden bazıları

Titreşim verilerinin elde edilmesinde sensör tiplerinden 3 eksenli ivmeölçerler sıkça tercih edilmektedir. Bu ivmeölçerler X, Y ve Z eksenlerinde meydana gelen titreşimleri elektriksel sinyallere dönüştürebilmekte ve elektriksel dönüşüm işleminden sonra 3 eksenli titreşim verilerini ayrı ayrı alabilmektedir. 3 eksenli ivmeölçerler dijital ve analog olarak 2 gruba ayrılmaktadır. Dijital ivmeölçerler 3 eksenle aldığı titreşim verilerini kendi içerisinde bulunan analog dijital dönüştürücü (ADC) yardımıyla sayısal verilere dönüştürmektedir. Analog ivmeölçerler ise 3 eksene ait titreşim verilerini elektriksel sinyale dönüştürdükten sonra direkt olarak dışarı aktarmakta ve dışa aktarılan bu titreşim verileri harici bir ADC yardımıyla sayısal olarak dönüştürülüp alınabilmektedir. Analog ve dijital ivmeölçerler karşılaştırılırsa dijital ivmeölçerler dönüşüm işlemini kendi içerisinde yaptığı için veriler kablolar yardımıyla iletilirken dış ortamdaki şebeke gürültülerinden ve elektromanyetik gürültülerden çok fazla etkilenmemektedir. Bu bakımdan analog ivmeölçerlere oranla daha temiz (gürültüsüz) veriler elde edilebilmektedir. Ancak içindeki ADC'nin düşük bit derinliği ve kullandığı protokolün yavaşlığı nedeniyle istenilen örnekleme frekansında çalışmayabilmekte; verilerin ivmeölçer üzerinden alınması için harici bir işlemcinin kullanılması ve bilgisayar ile haberleşebilmesi için ayrı bir algoritma da geliştirilmesi gerekmektedir. Analog ivmeölçerlere bakıldığında çıkış sinyalleri sürekli sinyaller olduğundan dijital ivmeölçerlerdeki ADC'nin düşük bit derinliğinden etkilenmemekte; dış ortamda kullanılan örneğin ses kartında mevcut olan yüksek bit derinlikleri sayesinde daha doğru ölçümler yapılabilmekte ve 3 eksene ait titreşim verileri elektriksel olarak 3 ayrı kanaldan sürekli olarak verilebilmektedir.

- Veri Toplama Üniteleri

Veri toplama ünitesi ya da veri toplama sistemleri yapı üzerinden sensörler vasıtasıyla toplanan verilerin ilgili bilgisayar programına transfer edilmesinde kullanılmaktadır (Şekil 10). Veri toplama sistemi (data acquisition system), veri toplama kartları ve veri toplama yazılımlarından oluşmaktadır. Titreşim ölçüm sistemlerinde veri toplama kartları ivmeölçerlerden gelen sinyalleri toplayarak bilgisayar programına aktarırken, sinyaller bilgisayar ortamındaki veri toplama yazılımları yardımıyla alınmakta ve kaydedilmektedir. İvmeölçerlerden veri toplama sistemine tekrarlı ve tekrarsız titreşimler yani ham veriler şeklinde aktarılmakta ve aktarılan ham verilerin ayıklanmasında sinyal koşullamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Sinyallerin koşullanması, yapının dinamik karakteristiklerinin tam olarak

belirlenebilmesine engel olan istenmeyen frekansların filtrelenmesi ya da sinyallere belirli özelliklerin ortaya çıkabilmesini sağlamak için yapılan işlemlerin genel adıdır. İstenmeyen sinyaller belirlenen frekans ölçüm aralığı haricindeki yüksek frekans sinyalleridir.

Veri toplama ünitelerinin birçok farklı türü bulunmaktadır (URL-11-15, 2024). Yanık (2018) geliştirdiği veri toplama kartında 2 farklı analog ivmeölçerden gelen elektriksel sinyallerin toplama işlemlerini yapabilen bir toplama devresini PROTEUS programında tasarlamıştır (Yanık, 2018).



Şekil 10. Veri toplama ünitelerine ait örneklerden bazıları

Titreşim testlerinde birçok veri toplama üniteleri bulunmakla beraber yapılan bu tez çalışmasında geliştirilen CEVS sisteminde yer alan arduino modülü veri toplama ünitesi görevini üstlenmektedir.

- Titreştiriciler

Yapıların trafik yükü, yaya yükü, rüzgâr, dalga gibi birçok doğal çevresel etkiyle ya da darbe çekici, sarsma tablası, sarsıcılar gibi yapay (suni) etkilerle titreştiği bilinmektedir. DMA yönteminde doğal veya yapay titreştiricilerin hangisinin uygulanacağı yapının büyüklüğüne göre değerlendirilmekte fakat yapay etkilerle yapıları titreştirmenin zorlukları da bilinmektedir. Bu doktora tez çalışması kapsamında incelenen yapılarda hem trafik, rüzgâr gibi çevresel etkilerin oluşturduğu rastgele titreşimlerin hem de kauçuk tokmak yardımıyla suni olarak oluşturulan titreşimlerin oluşturduğu tepkilerin ölçülmesi ve birtakım sinyal işlemenin yapılması sonucu ölçülen yapılara ait dinamik karakteristikler elde edilmiştir.

- Verilerin Analizi ve Sinyal İşleme

ÇTT yönteminde yapı üzerinden ölçüm verilerinin toplanması ve işlenmesiyle yapıya ait dinamik karakteristikler belirlenmektedir. Yapıların bu karakteristiklerinin ÇTT

yöntemiyle belirlenebilmesi için sensörler ve veri toplama üniteleriyle alınan bu verilerin analiz edilmesi gerekmektedir. Verilerin analizinde sinyal işleme yazılımları kullanılmakta ve frekans ile zaman tanım alanlarında çeşitli algoritmalarla sahip yöntemlerle dinamik karakteristikler elde edilmektedir (Zhang vd., 2002; Brincker vd., 2003). Bu yöntemler karşılaştırıldığında birbirleri arasında üstün bir fark bulunmamakla birlikte yöntem seçiminde bu 2 yöntemin avantaj ve dezavantajları dikkate alınarak yapının dinamik karakteristikleri belirlenmelidir. Pratik sebepler ve hesaplama gereksinimlerinden dolayı bilgisayara zaman ortamında aktarılan sinyallerin frekans ortamına dönüştürülmesi işleminde Fourier dönüşümleri kullanılmaktadır (Fessler, 2004; Türker, 2011). Denklem 1’de $u(t)$ ile tanımlanan periyodik bir sinyalin sonsuz Fourier serisine açılımı verilmektedir (Ramos, 2007).

$$u(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right] \quad (1)$$

Denklem 1’deki a_0 , a_n ve b_n ifadeleri Denklem 2’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T u(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Sonsuz Fourier serisine açılan sinyal sonlu sinyal Fourier serisine açıldığında Denklem 3’teki gibi olmaktadır. Bu denklemdeki Fourier dönüşüm katsayısı fonksiyonları olan a_0 , a_n ve b_n aynı denklemde sunulmaktadır.

$$\begin{aligned}
u_k &= u(t_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) \right], k = 1, 2, \dots, N \\
a_0 &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N u_k \\
a_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k \cos \frac{2\pi nk}{N} \\
b_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k \sin \frac{2\pi nk}{N}
\end{aligned} \tag{3}$$

Sinyal işleme esnasında sinyal periyodunun tam katlı olmamasından yani sinyalin periyodik olmamasından kaynaklanan sızıntı hatası gibi birtakım problemler oluşabilmektedir. Sızıntı hatasının azaltılmasında ölçüm süresinin uzatılması ve sinyal periyodunun tam katlı hale getirilmesini sağlayan pencereleme yöntemi gibi çözümlerle problemlerin üstesinden gelinebilmektedir (Ramos, 2007; Heylen vd., 2007).

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda geliştirilen titreşim ölçüm sistemi yardımıyla elde edilen veriler geliştirilen CEVA yazılımı ile bilgisayar ortamında istenilen formatta kaydedilmiştir. Kaydedilen verilerin işlenmesi MATLAB (MATLAB, 2023), Visual Studio (Visual Studio, 2022) ve ARTeMIS (ARTeMIS, 2011) yazılımları kullanılarak yapılmıştır.

- FTAA Yöntemine ait Formülasyonlar

Yapıların dinamik karakteristiklerinin ÇTT yöntemiyle deneysel olarak belirlenmesinde, frekans alanındaki ayrıştırma yöntemlerinden FTAA ve GFTAA yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. FTAA yöntemi, hızlı Fourier dönüşümünden (FFT) tek bir frekans hattının kullanımına dayalı olmasından dolayı seçilen doğal frekansın kesinliği FFT'nin çözünürlüğüyle ilişkilidir. Frekans tanım alanına dayalı GFTAA yöntemi FTAA yönteminin gelişmiş versiyonudur. Bu yöntemde çözünürlük, örnekleme frekansı, frekans band aralığı, filtreleme, overlap, işlenecek kanal sayısı vb. birçok ayarlama yapıldıktan sonra veriler sinyal işleme işlemi sonucu elde edilen güç spektral yoğunluk (PSD) fonksiyonlarındaki tekil değerlerin ayrıştırılması (SVD) sonucu pik değerlerin seçilmesiyle dinamik karakteristikler belirlenmektedir. FTAA yönteminde yapının sönüm oranları belirlenememesine rağmen GFTAA yönteminde modal sönüm oranları elde edilebilmektedir (Jacobsen vd., 2006).

GFTAA yönteminde, bir titreşim pikinin etrafında tanımlanan tek serbestlik dereceli PSD, Fourier dönüşümüyle zaman tanım alanına geri dönüştürülebilmektedir. Buradaki Fourier dönüşümü ters ayırık Fourier dönüşümü olarak adlandırılmaktadır. Doğal frekans zamana bağlı sıfır geçiş sayısı, sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize edilmiş oto korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla elde edilmektedir. GFTAA yönteminde büyüklüğü ölçülmeyen etki kuvveti ve ölçülen davranış fonksiyonu arasındaki bağlantı Denklem 4 ile ifade edilmektedir (Bendat & Piersol, 2004).

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^* G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \quad (4)$$

Denklem 4'teki $G_{yy}(j\omega)$ tepki sinyalinin PSD fonksiyonunu, $G_{xx}(j\omega)$ etki sinyalinin PSD fonksiyonunu ve $H(j\omega)$ frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Denklem 4'teki * ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniği ve transpozesidir (Felber, 1993; Rainieri vd., 2007). Matematiksel düzenlemelerin yapılmasıyla tepki sinyaline ait PSD fonksiyonu Denklem 5'teki gibi olmaktadır.

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (5)$$

Denklem 5'teki fonksiyonda n mod sayısını, λ_k kutup fonksiyonunu ve R_k artık değer fonksiyonunu ifade etmektedir. Birtakım düzenlemeler yapıldıktan sonra Denklem 4, Denklem 6'daki gibi olmaktadır (Brincker vd., 2000).

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] G_{xx}(j\omega) \left[\frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^{\bar{H}} \quad (6)$$

Denklem 6'daki s tekil değerleri, $\bar{H}$ kompleks eşleniği ve transpozeyi ifade etmektedir. Matematiksel fonksiyonlar sadeleştirildiğinde tepki sinyaline ait PSD fonksiyonu Denklem 7'deki gibi olmaktadır.

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (7)$$

Denklem 7’de A_k tepki sinyalinin PSD fonksiyonunun k . artık değeri matrisini ifade etmektedir. GFTAA yönteminde ilk adım PSD matrisini belirlemektir. Ayrık frekanslarda tepki sinyalinin PSD’nin tahmini $\omega = \omega_i$ olarak bilinmekte ve tekil değeri ayırışım matrisi alınarak ayrıştırıldığında Denklem 7, Denklem 8’deki gibi olmaktadır.

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (8)$$

Denklem 8’de $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$ tekil vektörleri içeren bütün matrisi ve $S_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}]$ skaler tekil değerleri içeren diyagonal matrisi ifade etmektedir. Ayrıca u_{ij} ve s_{ij} sırasıyla tekil vektörleri ve skaler tekil değerleri göstermektedir. Denklem 8’deki PSD fonksiyonunda, pik değerlerin olduğu noktalar doğal frekanslara karşılık gelmektedir. Bu pik noktaları oluşturan tekil vektörler ise doğal mod şekillerini göstermektedir. Spektrumda pik etrafında k . mod baskınsa PSD fonksiyon matrisi Denklem 9’daki gibi ifade edilmektedir (Serhatoğlu, 2015).

$$G_{yy}(j\omega_i) = S_i \{U_{i1}\} \{U_{i1}\}^H \quad \omega_i \rightarrow \omega_k \quad (9)$$

Bu durumda ilk tekil değeri vektörü $\{U_{i1}\}$ mod şeklinin tahminidir ve ilgili TSD sistemin oto PSD fonksiyonuna ait tekil değerdir. Tekrarlanan modların olması durumunda PSD matrisinin sırası çoklu modların sayısına eşittir. Oto PSD fonksiyonu, mod şekil tahmini ile pik etrafındaki frekans çizgileriyle ilişkili tekil vektörlerin karşılaştırılmasıyla tanımlanmaktadır. Her çizgi tekil vektörler kullanılarak karakterize edilmektedir (Serhatoğlu, 2015).

- SAB Yöntemine ait Formülasyonlar

Zaman tanım alanında ayrıştırma yöntemlerinden stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemi korelasyon veya spektruma ihtiyaç duymadan doğrudan zaman verileriyle çalışmakta ve dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Overschee & Moor, 1996; Peeters, 2000; Peeters & Roeck, 2000; Yu & Ren, 2005). Bu yöntemde yapı sisteminin dinamik davranışı lineer (doğrusal), sabit katsayılı ikinci derece diferansiyel denklem olarak aşağıdaki Denklem 10 ile ifade edilmektedir.

$$[M]\{\ddot{U}(t)\}+[C]\{\dot{U}(t)\}+[K]\{U(t)\}=\{R(t)\}=[B]\{u(t)\} \quad (10)$$

Burada; $[M]$, $[C]$, $[K]$, $\{R(t)\}$, $[B]$ sırasıyla sistemin kütle matrisi, sönüm matrisi, rijitlik matrisi, titreşim kuvvetini ve ortamdaki verileri simgeleyen matrisi göstermektedir. $\{U(t)\}$, $\{\dot{U}(t)\}$, $\{\ddot{U}(t)\}$ ise zamana bağlı yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini ifade etmektedir. Denklem 10, titreşen yapının davranışını temsil etmesine rağmen SAB yöntemine uygun değildir. Bu yüzden Denklem 10 daha uygun bir form olan ayrık-zaman stokastik durum-uzayı modeline dönüştürülmektedir. Bu model inşaat mühendisliğinde viskoz sönüme sahip yapıların dinamik karakteristiklerini hesaplamak için kullanılmaktadır (Yu & Ren, 2005). Aşağıdaki tanımlamalar kullanılarak Denklem 10, aşağıdaki Denklem 11'deki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned} A_* &= \begin{pmatrix} 0 & I_{n_2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix} \\ B_* &= \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}B \end{pmatrix} \\ x(t) &= \begin{pmatrix} U(t) \\ \dot{U}(t) \end{pmatrix} \\ \dot{x}(t) &= A_*x(t) + B_*u(t) \end{aligned} \quad (11)$$

Denklem 11'deki A_* durum matrisini, B_* veri matrisini ve $x(t)$ durum vektörünü belirtmektedir. ÇTT yönteminde yapının bütün serbestliklerinin ölçülmesi pek mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla, durum-uzay vektörünün eleman sayısı, sistemin durumunu tanımlayan bağımsız değişken sayısına eşittir ve ifadesi Denklem 12'deki gibidir (Yu & Ren, 2005).

$$y(t) = C_*x(t) + D_*u(t) \quad (12)$$

Denklem 12'deki C_* sistem davranış matrisini, D_* doğrudan iletim matrisini ifade etmektedir. Denklem 11'deki $\dot{x}(t)$ 'li ifade ve Denklem 12 sürekli-zaman belirli durum-uzayı modelini göstermektedir. Ölçümler ayrık zamanlarda gerçekleştirildiğinden örnekleme

süresi ve ortamdaki gürültü sinyal verilerini her zaman için etkilemektedir. Örneklemeden sonra, durum-uzay modeli Denklem 13'teki gibi ifade edilmektedir (Yu & Ren, 2005).

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_* x_k + B_* u_k \\ y_k &= C_* x_k + D_* u_k \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Denklem 13'teki x_k ayrık-zaman durum vektörünü ve u_k belirgin etki sinyal vektörünü göstermektedir. Gerçek operasyonel koşullarda yapılan ölçümler yapıya ve dış ortamdaki gürültüye ait sinyalleri içerdiğinden Denklem 13'e stokastik gürültü bileşenleri eklendiğinde belirli-stokastik durum-uzay modeli Denklem 14'teki gibi olmaktadır.

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_* x_k + B_* u_k + w_k \\ y_k &= C_* x_k + D_* u_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Denklem 14'teki w_k modeldeki belirsizlikler ve kusurlar nedeniyle işlenen gürültü sinyallerini ifade ederken v_k ivmeölçer kusurlarından dolayı işlenen gürültü sinyalini göstermektedir. Her iki vektör de değeri ölçülemeyen sinyallerden oluşmaktadır. Etkisi olmayan beyaz gürültü ve kovaryans matrisleri Denklem 15'teki gibi ifade edilmektedir (Yu & Ren, 2005).

$$E_* \left[\begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (15)$$

Denklem 15'teki E_* ve δ_{pq} sırasıyla beklenen değer operatörünü ve Kronecker deltasını belirtmektedir. Kronecker delta 2 değişkenli bir fonksiyon olup Denklem 16'daki gibidir.

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } p=q \\ 0, & \text{eğer } p \neq q \end{cases} \quad (16)$$

SAB yönteminde yapı sisteminin davranışı, normal operasyonel koşullarda değeri ölçülemeyen sinyallerle titreştirilerek elde edilmektedir. Bu veri eksikliğinden dolayı, Denklem 14'te gösterilen belirgin sinyal verisi u_k 'yı, gürültü terimleri olan w_k ve v_k 'dan

ayırt etmek mümkün değildir. Bu durumda, u_k gürültü terimleri w_k ve v_k cinsinden yazılırsa yapının ayırık-zaman stokastik durum-uzay modeli Denklem 17'deki şekli almaktadır. Bu denklem çevresel titreşimlerden dinamik karakteristiklerin elde edilmesinden zaman tanım alanının temelini oluşturmaktadır.

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_* x_k + w_k \\ y_k &= C_* x_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

- Sinyal İşlemede Kullanılan Bazı Analiz Parametreleri

Sayısal sinyal işlemede kullanılan örnekleme frekansı, periyot (T), zaman örnekleme aralığı, frekans aralığı, maksimum frekans, zaman örnek sayısı gibi tanımlardan bazıları aşağıda verilmektedir (Heylen vd., 2007).

✓ Örnekleme frekansı (F_s): Analog sinyalin sayısal sinyale dönüştürülmesinde kullanılan örnekleme ve sayısallaştırma miktarı örnekleme frekansı olarak adlandırılmaktadır. Bir başka ifadeyle sistemin saniyede aldığı veri sayısıdır.

✓ Zaman örnekleme aralığı (Δt): Sinyaller belirli bir zaman aralığında örneklenmekte ve bu örnekleme aralığı zaman örnekleme aralığı olarak adlandırılmaktadır.

✓ Frekans aralığı (Δf): Frekans sinyalindeki aralık olarak tanımlanmaktadır.

✓ Maksimum frekans (f_{maks}): Sinyaldeki maksimum frekans değerine karşılık gelmektedir. Maksimum frekans değeri ise en fazla örnekleme frekansının yarısı olabilmekte ve bunun nedeni Nyquist teoremi ile açıklanabilmektedir (Eyer & Bartholdi, 1999).

✓ Zaman örnek sayısı (N_s): Frekans çizgilerinin toplam sayısı olarak tanımlanmaktadır.

Sinyal işlemede etkili olan başka parametreler de bulunmaktadır. Bunlardan bazıları ölçümün yeterli sürede alınıp alınmaması, analiz yapılmadan önce yeni frekans aralığının ayarlanması, alçak geçiren veya yüksek geçiren gibi gerekli olan filtrelerin yapılması, 512, 1024, 2048, 4096 gibi uygun çözünürlük sayısının seçimi ve işleme tabi tutulacak kanal sayısının seçimidir. Bu parametreler sinyal işleme adımlarında oldukça etkili olmaktadır.

- Seri Haberleşme Yöntemleri

Seri haberleşme iletimi yapılacak sinyallerin tek hat üzerinden peş peşe gönderilmesi işlemidir. Hemen hemen tüm bilgisayarlarda bulunan USB ve ethernet portu seri haberleşmeye örnek olarak verilebilmektedir (URL-16, 2024). Seri haberleşmede bir byte veriyi oluşturan tüm bitler tek iletken üzerinden sırasıyla art arda gönderilmekte, verinin başında başlangıç biti, sonunda ise durdurma biti bulunmaktadır. Gönderim işleminin alıcı tarafa hatasız teslim edilmesinde gönderici ile alıcı cihazın bir saniyede gönderebileceği bit sayısının aynı olması gerekmektedir. Bu veri iletim hızına “baud rate” adı verilmekte ve baud rate 1 saniyede taşınan bit sayısını ifade etmektedir. 9600Baud oranıyla bir bitlik bilginin işlenme süresi $1/9600$ yani 104 mikro saniyedir (URL-16, 2024). Seri haberleşme için geçerli, standartlaşmış bazı senkron ve asenkron protokoller mevcut olup bunlar cihazların birbiriyle veya bir ana kontrolcüyle haberleşmesini sağlamaktadır (URL-17, 2024). Senkron haberleşmede gönderilen ve alınan veri biti birbiriyle eş zamanlı olarak çalışmalı yani alıcı ve vericinin aynı saat (clock) üzerinde olması gerekmektedir. Asenkron haberleşmede ise belirli bir saate gerek duyulmadan veri herhangi bir anda iletilebilmekte ama senkrona göre daha yavaş bir iletimle olmaktadır. (URL-18 & 19, 2024).

Seri haberleşme yöntemleri; universal asynchronous receiver transmitter (UART), universal synchronous and asynchronous receiver transmitter (USART), serial peripheral interface (SPI) ve inter-integrated circuit (I2C) olarak sıralanabilmektedir.

UART, data tipi ve hızı değiştirilebilen aynı zamanda programlanabilen bir çip olmakla birlikte belirli protokollere sahiptir (URL-20, 2024). Çift taraflı olarak asenkron bir haberleşmeye olanak sağlamak ve gelen seri veriyi paralel veriye veya paralel veriyi seri veriye çevirerek iletimi gerçekleştirebilmektedir. USART haberleşmesi, UART’ın yaptığı işi senkron haberleşmeyle de yapılabilme hali olarak tanımlanabilmekte ve bu haberleşmede hem senkron hem de asenkron veriler iletilebilmektedir. UART’a oranla daha fazla gelişmiş bir protokol olan USART, UART ile aynı haberleşme mantığına sahiptir (URL-21-23, 2024).

I2C ve SPI protokolleri hem çipler arası hem de çip içi düşük/orta bant genişliğine sahip veri aktarımları için en yaygın kullanılan seri haberleşme protokolleridir (Oudjida vd., 2009). I2C iletişimi, mikro denetleyiciler, mikro işlemciler, çeşitli entegre devreler ve sensörler arasında iletişim kurmak için kullanılmaktadır (Atmaca, 2002). 1982 yılında Phillips tarafından televizyon alıcılarındaki entegre devrelerin birbirleriyle iletişim

kurmasını sağlamak için geliştirilmiştir (URL-24 & 25, 2024). I2C senkron haberleşme protokolü olup yarı eş zamanlı çift yönlü master-slave yapısını kullanarak çalışabilmektedir. Yani veri iletimi çift yönlü ama aynı anda hem veri gönderilip hem de alınamamaktadır (URL-26 & 27, 2024). I2C protokolü, biri SCL (serial clock) diğeri de SDA (serial data) olmak üzere 2 adet iletişim kanalı vardır. SDA veri iletişimini, SCL ise gönderici ve alıcı taraflarda veri senkronizasyonunu sağlamaktadır. SDA ve SCL veri yolları üzerinde birçok aygıt bulunmakta ve bu aygıtlar, düğümleri (node) oluşturmaktadır. İletişimi başlatan taraf örneğin CPU, mikrodenetleyici master (usta, kontrolör); karşı taraf ise slave (köle, çevresel) olarak isimlendirilmektedir. I2C, standart 100kHz, hızlı 400kHz ve yüksek hızlı 3.4MHz olmak üzere 3 farklı hızı desteklemektedir (URL-28, 2024).

SPI protokolü, senkron haberleşme protokollerinden biri olup eş zamanlı çift yönlü olarak çalışabilmektedir. Haberleşme gerçekleştirilecek cihazlar arasında usta-köle (master-slave) ilişkisiyle 1'den fazla slave cihazla haberleşme sağlayabilmektedir. Senkron olarak çalıştığında bir clock sinyaline ihtiyaç duymaktadır (URL-29-31, 2024). Seri haberleşmelerde en fazla kullanılan SPI haberleşme protokolü; master-slave yapısıyla çalışmakta ve haberleşme için MOSI (Master çıkış slave giriş), MISO (Master giriş slave çıkış), SS (slave select) ve SCL pinleri gerekli olmaktadır (URL-32, 2024).

1.5. Model Kalibrasyon/Güncelleme/İyileştirme İşlemi

Yapının teorik (numerik) modal karakteristiklerinin belirlenmesi için yapıya ait SE modelinin oluşturulması, oluşturulan model üzerinde malzeme ve kesit özelliklerinin tanımlanması, sınır şartlarının atanması ve yapının modal analizinin yapılması gerekmektedir. Yapıların SE modelleri oluşturulurken SE yöntemi kullanılmakta ve bu yöntemle yapılar sayısal ortamda temsil edilerek doğrusal, doğrusal olmayan, statik ve dinamik gibi birçok analiz uygulanabilmektedir (Hökelekli, 2015).

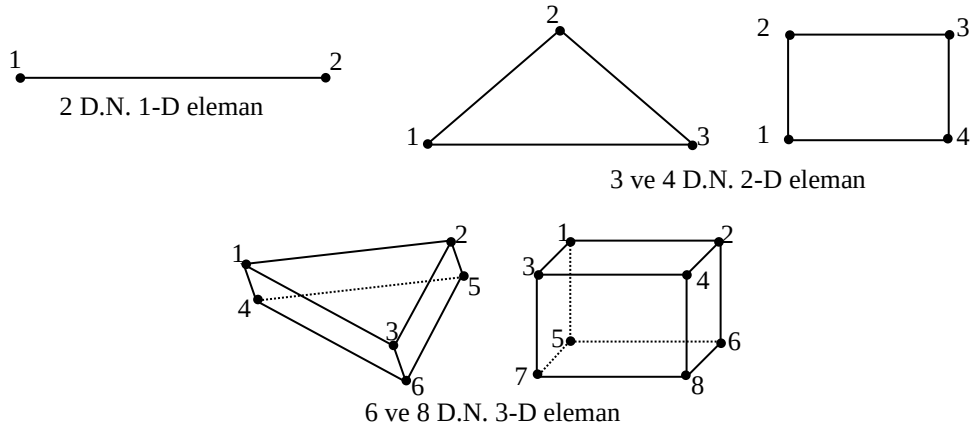
Yapının oluşturulan ilk SE modeli (başlangıç SE modeli) sınır şartlarından malzeme özelliklerine kadar birçok kabul içeren ve yapıdan alınan rölövelerden ya da proje verilerinden elde edilen malzeme ve kesit özelliklerine bakılarak oluşturulan SE modelidir. Fakat başlangıç SE modeli yapının mevcut davranışını göstermeyebilmekte ve bu model üzerinde birtakım işlemlerin yapılması gerekmektedir. Yapının gerçeğe en yakın (mevcut) dinamik davranışını en iyi şekilde temsil edebilen SE modelinin oluşturulmasında başlangıç SE modelinin deneysel verilere göre kalibre/güncelleme/iyileştirme işlemlerinin

gerçekleştirilmesi etkili olmaktadır. Yapının başlangıç SE modeli üzerinde malzeme özellikleri ve sınır şartları gibi parametreler dikkate alınarak deneysel ve teorik olarak elde edilen dinamik karakteristikler arasındaki farkın azaltılması işlemine model güncelleme adı verilmektedir.

1.5.1. Başlangıç Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Yapının gerçek davranışına en yakın davranışı temsil etmek için SE modelleme işlemlerinde yapının her bir elemanının sonlu sayıda parçalara (ağlara) bölünmesiyle yapılmaktadır. Bu elemanların sayısı arttıkça modelin gerçek yapının davranışını temsil etme oranı da artmakta, ama artan eleman sayısı ile işlem hacmi de büyümektedir. Ayrıca, belirli bir artımdan sonra sonuçlarda herhangi bir değişim de görülmemektedir. Bu sebeple oluşturulan modelin eleman sayısının yapıyı en iyi şekilde temsil edecek şekilde seçimi ve optimum miktarda olması oldukça önemlidir.

SE modellerinin yapının gerçek davranışını iyi bir şekilde temsil edebilmesi için 1 boyutlu (1-D), 2 boyutlu (2-D) ve 3 boyutlu (3-D) eleman türlerinden uygun olanların modellenecek yapının özellikleri dikkate alınarak seçilmesi gerekmektedir (Şekil 11). Şekil 11'deki D.N. ifadesi düğüm noktasını belirtmektedir.



Şekil 11. SE yönteminde kullanılan elemanlar (Türker, 2011)

Yapının SE modelinin oluşturulmasında genel olarak mikro ve makro modelleme yöntemleri kullanılmaktadır (Lourenço, 1996; Çakır, 2021). Mikro modelleme yönteminde, her bir yapı malzemesi ayrı olarak modellenmekte ve bu modelleme yöntemi detaylı mikro modelleme ile basitleştirilmiş mikro modelleme olarak 2 grupta sınıflandırılmaktadır.

Detaylı mikro modelleme yöntemi özellikle yığma elemanlarla beraber harçların da modellendiği yöntemdir (Hökelekli, 2015). Mikro modelleme yöntemiyle ulaşılan sonuçlar gerçeğe oldukça yakın olmasına rağmen oluşturulan eleman sayısının fazla artmasından dolayı analiz süresi oldukça uzundur. Bu yüzden mikro modelleme yöntemi büyük yapılarda kullanılmamakta, daha çok küçük boyutlu yapılarda tercih edilmektedir. Makro modelleme yönteminde yapıda bulunan bütün elemanlar tek bir eşdeğer malzeme kullanılarak modelleme yapılmaktadır. Karmaşık ve büyük ölçekli yapı sistemlerinin analizinde makro modelleme yöntemi kullanılmaktadır (Durgut, 2021).

Tarih yapılar genellikle dekoratif bileşenler içerdiğinden modellemelerde bazı zorluklar olabilmektedir. Bu sebeple geometrik olarak bazı idealleştirmelere gidilebilmektedir. Bu işlem yapılırken yapının yapısal davranışında değişikliklerin meydana gelmemesi gerekmektedir (Hökelekli, 2015). Yapısal davranışlar gerçeğe yakın olarak belirlenmelidir. Bu yüzden yapılan bu tez çalışmasında, yapının davranışını çok fazla etkilemeyecek bazı geometrik idealleştirmeler yapılmıştır.

1.5.2. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Mühendislik yapılarının SE yöntemi yardımıyla mevcut davranışlarının belirlenmesinde malzeme özellikleri, sınır şartları gibi parametreler etkin bir rol oynamakta ve bu parametreler yapısal değerlendirmenin doğru bir şekilde yapılabilmesi açısından oldukça önemli olmaktadır. Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde laboratuvar ortamında ve sahada birçok deney yapılabilmektedir. Bunlardan bazıları yapıya hasar vererek tahribatlı yöntem olarak bazıları ise yapıya herhangi bir hasar vermeden tahribatsız yöntem olarak uygulanmaktadır. Bu deneyler yardımıyla malzemelere ait elastisite ve kayma modülleri, basınç ve çekme dayanımları, Poisson oranı vb. özellikler belirlenebilmektedir (Altıok, 2019). Tahribatlı yöntemler malzeme özellikleri hakkında daha gerçekçi bilgiler verebilmektedir. Deneyler yardımıyla elde edilen malzeme özellikleri numune alınan yapı homojense numuneler genellikle tüm yapıyı iyi bir şekilde temsil edebilmektedir. Ancak bazı yapıların heterojen özelliğinden dolayı malzeme özelliklerinin sadece bir yöntem kullanılarak doğru olarak elde edilebilmesi oldukça zor olabilmektedir. Deneysel çalışmaların dışında yapıların malzemelerin özellikleri hakkında literatür çalışmalarından ve ilgili yönetmeliklerden de bilgi edinebilmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY) taşıyıcı duvarların elastisite modülü (E_{duv}), deneysel çalışmalarla veya karakteristik

basınç dayanımına (f_k) bağlı olarak Denklem 18'deki ifadeyle hesaplanmaktadır (TBDY, 2018).

$$E_{duv} = 750f_k \quad (18)$$

Duvarların karakteristik basınç dayanımları deneysel yöntemlerle ya da TBDY'de yer alan tablodan yararlanılarak belirlenebilmektedir. Tarihsel, görsel inceleme ve uzun süreli takip gibi yöntemlerle de yapının malzeme özellikleri hakkında bilgi edinebilmektedir (Özkul, 2016). Denklem 18'deki formüldeki sabit katsayı bazı yönetmeliklerde 200 olabilmektedir (DBYBHY, 2007). Ayrıca duvarların basınç dayanımı yığma yapılarda kullanılan taşın (f_b) ve harcın (f_m) dayanımının bilinmesi durumunda Denklem 19 ile hesaplanabilmektedir (Tomazevic, 1999).

$$f_k = 0.4f_b^{0.65}f_m^{0.25} \quad (19)$$

1.5.3. Sınır Şartlarının Tanımlanması

Başlangıç SE modelinde sınır şartlarının tanımlanması oldukça önemlidir. Yapının mevcut durum davranışının elde edilmesinde zemin-yapı etkileşimi ve mesnetlenme şartları gibi etkenler önemli bir rol oynamaktadır. Yapının mesnet özelliklerinin tanımlanmasında sabit, ankastre gibi mesnetler ile yay elemanlar kullanılmaktadır.

1.5.4. Sonlu Eleman Yöntemiyle Modal Analiz

Mühendislik yapıları birçok ani etkilere ve çevresel etkilere maruz kalmaktadır. Yapıların bu gibi etkiler altındaki dinamik davranışlarının değerlendirilebilmesi için yapıya ait doğal frekans ve mod şekilleri gibi dinamik parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Kütle, rijitlik ve sönüm özelliklerinin kullanılmasıyla doğal frekans ve mod şekilleri teorik yöntemlerle elde edilirken yapıdan titreşim ölçümleri alınarak yapının doğal frekansları, mod şekilleri ve modal sönüm oranları deneysel yöntemlerle elde edilebilmektedir (Türker, 2011).

Yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan teorik modal analiz yönteminde kullanılan SE, sonlu fark ve sınır eleman gibi sayısal yaklaşımlar arasında SE yönteminin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir.

Yapının tüm kütlelerinin başlangıç konumlarına göre yer değiştirmiş konumlarının tanımlanması için gereken bağımsız yer değiştirmelerin sayısına serbestlik derecesi adı verilmektedir (Chopra, 2007). Yapılar serbestlik dereceleri göre tek serbestlik dereceli sistemler (TSDS) ve çok serbestlik dereceli sistemler (ÇSDS) olarak 2 gruba ayrılmaktadır. TSDS’te kütlenin başlangıç konumuna göre yer değiştirmiş konumunun tanımlanması için tek değişken yeterliyken ÇSDS’te birden fazla değişkene ihtiyaç duyulmaktadır.

Gerçek yapılar çok serbestlik derecelerine sahip olmalarına rağmen bu sistemlerin çözümü TSDS süperpoze edilmesiyle yapılmaktadır. Yapıya ait kütle, rijitlik ve sönüm özelliklerine bağlı olan bu formülasyonlardan TSDS’ye ait serbest cisim diyagramına ait denge denklemi Denklem 20 ile ifade edilmektedir.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = f(t) \quad (20)$$

Denklem 20’de m , c , k ve $f(t)$ sırasıyla yapının kütlesini, sönüm katsayısını, rijitliğini ve sisteme dışarıdan uygulanan dinamik kuvveti; $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$ ve $u(t)$ ise sırasıyla yapının zamana bağlı olarak ivmesini, hızını ve yer değiştirmesini ifade etmektedir. Yapıya ait doğal frekansların ve mod şekillerinin belirlenebilmesi için genel hareket denkleminin sistemin sönümsüz serbest titreşim durumu için çözülmesi gerekmekte olup $c=0$ ve $f(t)=0$ alınarak sistemin sönümsüz hareket denklemi Denklem 21 ile gösterilmiş ve Denklem 21’in düzenlenmesiyle Denklem 22’deki ifadeler elde edilmiştir.

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (21)$$

$$k - \omega^2 m = 0 \Rightarrow \omega = \sqrt{k/m} \quad (22)$$

Denklem 22’deki ω ifadesi sönümsüz doğal açısal frekansı göstermektedir. Yapının doğal frekans ve periyodu açısal frekansa bağlı olarak Denklem 23’teki gibi ifade edilebilmektedir (Chopra, 2007).

$$f_n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, T = (2\pi) / \omega \quad (23)$$

TSDS'ye ait hareket denklemlerindeki skaler büyüklükler, ÇSDS'te vektörel ve matris büyüklüklerle yer değiştirmektedir (Chopra, 2007). ÇSDS'ye ait genel hareket denklemi Denklem 24'te verilmiştir.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\}+[C]\{\dot{u}(t)\}+[K]\{u(t)\}=\{F(t)\} \quad (24)$$

Denklem 24'teki $[M]$ kütle matrisini, $[C]$ sönüm matrisini, $[K]$ rijitlik matrisini; $\{\ddot{u}(t)\}$, $\{\dot{u}(t)\}$, $\{u(t)\}$ ve $\{F(t)\}$ ise sırasıyla zamana bağlı ivme vektörünü, hız vektörünü, yer değiştirme vektörünü ve kuvvet vektörünü ifade etmektedir. Yapıda sönüm olmaması ve yapının serbest titreşim durumunda olduğu varsayıldığında hareket denklemi Denklem 25'teki gibi olmaktadır.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\}+[K]\{u(t)\}=\{0\} \quad (25)$$

Denklem 25'in çözümünü gerçekleştirmek için $\{u(t)\}=\{U\}e^{i\omega t}$ olarak kabul edilmektedir (Petyt, 1990). $\{U\}$ zamandan bağımsız genliği göstermekle birlikte bu ifade Denklem 25'te yerine yazıldığında Denklem 26 elde edilmektedir.

$$([K]-\omega^2[M])\{U\}e^{i\omega t}=\{0\} \quad (26)$$

Denklem 26'nın 0'dan sıfırdan farklı bir çözümün elde edilmesi için Denklem 27'deki şart sağlanmalıdır.

$$\det|[K]-\omega^2[M]|=0 \quad (27)$$

Denklem 27'nin çözümünden n serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısal frekans (öz vektör) ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$) elde edilmektedir. Her bir doğal frekans, yapının aldığı farklı bir şekle karşılık gelmekte ve bu şekillere yapının mod şekilleri denilmektedir. Elde edilen frekanslar sıralandığında elde edilen ek küçük frekans hâkim frekans, buna karşılık gelen mod şekli ise hakim mod şekli olarak isimlendirilmektedir. Normalleştirmiş mod şekillerinin elde edilmesi için Denklem 28 ifadesi kullanılmaktadır (Petyt, 1990). Denklem 28'deki m_r , r . moda ait genelleştirilmiş kütle matrisidir.

$$\{\phi\} = \frac{1}{\sqrt{m_r}} \{\Psi\}_r \quad (28)$$

ÇSDS için modal analiz formülleri yardımıyla SE modellerinin bilgisayar programlarından yararlanmadan (elle) hesaplanması oldukça zordur. Bundan dolayı bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Bu çalışmada modal analizler ANSYS yazılımıyla gerçekleştirilmiştir (ANSYS, 2016).

1.5.5. Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması

Yapıların dinamik karakteristikleri teorik ve deneysel olarak belirlenebilmektedir. Teorik ve deneysel çalışmalar sonunda belirlenen bu değerlerin karşılaştırılması gerekmekte ve karşılaştırma işlemi için birçok kriter bulunmaktadır. Dinamik karakteristiklerden olan mod şekilleri modal ölçek faktörü, modal güvence kriteri, normalleştirilmiş modal fark, koordine modal güvence kriteri ve modal ortogonalite kriteri gibi kriterler kullanılarak karşılaştırılabilmektedir (Türker, 2011). Deneysel ve teorik doğal frekans değerleri ise Denklem 29 ile karşılaştırılabilmektedir.

$$\delta_f = |(f^d - f^t) / f^d| \quad (29)$$

Denklem 29'daki δ_f ifadesi frekanslardaki değişim oranı, f^d ve f^t ise sırasıyla deneysel ve teorik modal analizler sonucu belirlenen doğal frekanslardır. Yapının hasarsız durumunda teorik ve deneysel değerlerin birbirlerine oldukça yakın olmaları beklenmekte iken yapıda hasar oluşması durumunda bu değerler arasındaki fark, hasarın konumu ve büyüklüğüne de bağlı olarak değişebilmektedir. Bu farklılıkların düzeyi incelenerek yapının hasar durumu hakkında önemli bilgiler edinilebilmektedir. Bu yüzden doğal frekansların karşılaştırılması YSI'de yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.5.6. Amaç Fonksiyonlarının Belirlenmesi

Yapının deneysel ve teorik olarak elde edilen dinamik karakteristik değerleri arasında genellikle farklılık olmakta ve oluşturulan SE modeli üzerinde birtakım değişikliklerin yapılması gerekmektedir. SE modeli üzerinde malzeme ve sınır şartı gibi parametreler üzerinde yapılan değişikliklerin dinamik karakteristiklerde oluşturduğu etkiler de farklılık

gösterebilmektedir. Bu sebeple değişikliklerin istenilen doğrultuda olabilmesi için deneysel ve teorik dinamik karakteristikler arasında bir amaç fonksiyonu tanımlanmaktadır (Türker, 2011). Yapılan bu doktora tez çalışması kapsamında amaç fonksiyonu doğal frekanslar arasındaki farklılıklar dikkate alınarak yapılmış ve doğal frekanslar arasındaki farklılığın minimuma indirgenmesi amaçlanmıştır.

1.5.7. Değişkenlerin Belirlenmesi

Yapının SE modelinin oluşturulmasında elastisite modülü, kütle yoğunluğu, Poisson oranı, kesit özellikleri, atalet momenti, kesit alanı ve sınır şartları (sabit, ankastre mesnet yay katsayısı) vb. birçok önemli parametre mevcuttur. SE model güncellemesinde her bir parametrenin aynı anda değiştirilmesi işlem yükünü oldukça artırmakta ve bu sebeple SE modelinde değişim için en uygun parametrelerin seçilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında malzemelerin elastisite modülü ve yoğunluk değerleri ile sınır şartları değişken olarak belirlenmiş ve oluşturulan başlangıç SE modelleri güncellenmiştir.

1.5.8. Değişim Aralığının ve Yakınsama Kriterinin Tayin Edilmesi

Parametre seçiminden sonra parametrenin değişim aralığının belirlenmesi de önemli bir husustur. Bu değişim aralığı yapının gerçekte var olan durumu dikkate alınarak tayin edilmelidir (Blakely & Walton, 1984). Değişkene göre değişim aralığı da farklılık göstermektedir (Vanhonacker, 1980; Teughels & Roeck, 2003; Lord vd., 2003).

Yakınsama kriteri, doğal frekanslar ve mod şekillerine bağlı birçok kriter tarafından tanımlanan ve model güncelleme sırasında iteratif çözüm yapılmadan önce hangi şartların dikkate alınarak iterasyonun uygulanacağını tanımlayan kriterdir. İteratif çözüm yakınsama kriteri değerine yaklaşıncaya kadar bir döngü halinde süre gelmektedir. Bu kriterler genel olarak mod şekilleri için ortalama modal güvence kriteri (OMGK) ve ağırlıklı mutlak modal yer değiştirme (AMMY), doğal frekanslar için ağırlıklı nispi fark (ANF) ve ağırlıklı mutlak nispi fark (AMNF) ve kütle özellikleri için ağırlıklı mutlak modal kütle kriteri (AMMK) olarak gruplandırılabilir (Allemang & Brown, 1982; Okur, 2017). Doğal frekanslar arasındaki farkı en aza indirmek amacıyla Denklem 29'da mutlak değerce belirtilen rölatif fark kriteri (RH) kullanılmaktadır. Buradaki hata oranı gerçek değer ile hesaplanan frekans değerleri farkının gerçek frekans değerine bölünmesiyle elde edilen hata oranıdır. Bu

çalışmada da istenilen değerleri bulmak için rölatif hata denklemi kullanılarak belirlenen doğal frekans değerleri arasındaki fark en aza indirilmiştir.

1.6. İstatistiksel Değerlendirmeler

Yapılar kullanım ömürleri boyunca birçok etkiye maruz kalmaktadır. Çevresel sıcaklık, nem, rüzgâr gibi etkiler yapıların dinamik davranışlarını etkileyebilmektedir. Dinamik karakteristiklerin sıcaklık ve nem gibi çevresel etkilerle olan korelasyonlarının belirlenmesi, yapısal durumdaki anormalliklerin erkenden tespit edilmesinde kullanılmaktadır (Saisi vd., 2016). Dinamik karakteristiklerin çevresel koşullar gibi uzun süreli etkiler altındaki değişiminin bilinmesi durumunda deprem, patlatma vb. ani etkilerin yapının dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimler daha kolay bir şekilde tespit edilebilmektedir. Bu değişimin araştırılmasında regresyon analizleri yaygın olarak tercih edilmektedir.

1.6.1. İstatistiksel Kavramlar

İstatistik, verilerin toplanması, işlenmesi, analiz edilmesi ve bulunan sonuçların değerlendirilmesi amacıyla yöntemler içeren ve geliştiren bir bilim dalı olup veriyi bilimsel yöntemlerle analiz edilmesine olanak sağlamaktadır (URL-33, 2024). İstatistiksel kavramlardan bazıları aşağıda açıklanmıştır (Karagöz, 2009).

- ✓ Aritmetik ortalama (μ): Bir serideki tüm terimler toplamının terim sayısına oranıdır.
- ✓ Değişim aralığı: Bir serideki en büyük değerden en küçük değer çıkarılmasıyla elde edilmektedir.
- ✓ Ortalama sapma: Seride yer alan bütün değerlerin değişkenliğini dikkate alan bir değişkenlik ölçüsü olup serideki tüm değerlerin aritmetik ortalamalarından mutlak değerce sapmalarıdır.
- ✓ Standart sapma (σ): Bir serideki bütün elemanların aritmetik ortalamalarından farklarının karelerinin aritmetik ortalamalarının karekökü olup Denklem 30'daki gibi hesaplanmaktadır. Varyans (σ^2) ise bir serideki tüm değerlerin aritmetik ortalamadan farklarının karelerinin aritmetik ortalaması olup standart sapmanın karesi de varyans olarak

tanımlanmakta ve Denklem 30'daki gibi ifade edilmektedir. Denklemdeki X_i , serinin i. elemanını, n ise eleman sayısını belirtmektedir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \mu)^2}{n}}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X_i - \mu)^2}{n} \quad (30)$$

✓ Korelasyon katsayısı (r): 2 seri arasındaki ilişkinin derecesini nisbi olarak belirlemede kullanılmakta ve Denklem 31'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$r = \frac{\sum (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y)}{\sqrt{\sum (X_i - \mu_x)^2 \sum (Y_i - \mu_y)^2}} \quad (31)$$

Denklem 31'deki X_i ve μ_x sırasıyla X serisinin i. elemanı ve aritmetik ortalamasını; Y_i ve μ_y ise sırasıyla Y serisinin i. elemanını ve aritmetik ortalamasını belirtmektedir. Denklem $x_i = X_i - \mu_x$ ve $y_i = Y_i - \mu_y$ ifadeleri kullanılarak düzenlenirse korelasyon katsayısı Denklem 32 gibi hesaplanmaktadır.

$$r = \frac{\sum x_i y_i}{\sqrt{\sum x_i^2 \sum y_i^2}} \quad (32)$$

Korelasyon katsayısı kovaryans ve standart sapmalar cinsinden yazılırsa X ve Y arasındaki kovaryans Denklem 33, X'in ve Y'nin standart sapmaları Denklem 34'teki ifadeler ile hesaplanabilmektedir.

$$\sigma_{xy} = \frac{\sum (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y)}{n} \quad (33)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \mu_x)^2}{n}}, \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \mu_y)^2}{n}}, r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y} \quad (34)$$

Korelasyon katsayısı değeri her zaman -1 ve +1 arasında değer almakta ($-1 \leq r \leq +1$) ve X ile Y arasında hesaplanan r değeri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

- $r=-1$ olduğunda ters yönlü tam ilişki,
- $r<-0.5$ olduğunda ters yönlü kuvvetli ilişki,
- $r>-0.5$ olduğunda ters yönlü zayıf ilişki,
- $r<0$ olduğunda negatif (ters yönlü) ilişki,
- $r=0$ olduğunda ilişki yok,
- $r>0$ olduğunda pozitif (doğru yönlü) ilişki,
- $r<0.5$ olduğunda doğru yönlü zayıf ilişki,
- $r>0.5$ olduğunda doğru yönlü kuvvetli ilişki,
- $r=+1$ olduğunda doğru yönlü tam ilişki durumu mevcuttur. Bu ilişki başka bir şekilde aşağıdaki gibi de tanımlanabilmektedir.
- $r=0$ olduğunda doğrusal ilişki yok (nötr korelasyon),
- $0<r<0.3$ olduğunda zayıf korelasyon,
- $0.3\leq r\leq 0.7$ olduğunda orta düzeyde korelasyon,
- $0.7<r<1$ olduğunda güçlü korelasyon,
- $r=1$ olduğunda mükemmel korelasyonludur.

✓ **Determinasyon katsayısı (r^2):** Bir regresyon analizinin başarı yüzdesini ölçmek için kullanılmakta, korelasyon katsayısının karesi alınarak hesaplanmakta ve r^2 ile gösterilmektedir. Değeri 0 ile 1 arasında değişmekte olup determinasyon katsayısı 0.5'ten küçük olduğunda zayıf fonksiyonel ilişkili ve 0.5'ten büyük olduğunda kuvvetli fonksiyonel ilişkilidir. Determinasyon katsayısı 0 ve 1'e eşit olduğunda ise sırasıyla ilişki yok ve tam (deterministik) bir ilişki mevcuttur (Karagöz, 2009).

✓ **Normal ve standart normal dağılım:** Bir X değişkeninin olasılık dağılımı beklenen değeri etrafında simetrik olması durumunda böyle bir olasılık dağılımı normal dağılımdır. Normal dağılım olasılık fonksiyonundan elde edilen ve çan eğrisi olarak da adlandırılan normal olasılık eğrisi altında kalan toplam alan, toplam olasılığı ifade etmektedir ve bu değer 1'e eşittir. Ortalaması 0 ve varyansı 1 olan hayali normal dağılım ise standart normal dağılım olarak tanımlanmaktadır.

✓ Serpilme (saçılma) diyagramı: 2 değişken arasındaki ilişki derecesini kabaca belirlemede kullanılan grafiklerdir. X ve Y gibi 2 serinin karşılıklı i. değerlerinin birer nokta olarak (X_i , Y_i şeklinde) koordinat düzleminde işaretlenmesiyle elde edilmektedir.

1.6.2. Regresyon Analizi

Regresyon analizi pratikte en sık kullanılan istatistiksel yöntemlerden biri olup tıp, biyoloji, tarım, ekonomi, mühendislik, sosyoloji, jeoloji vb. birçok bilimsel alana uygulanabilmektedir (Yan & Su, 2009). Regresyon analizleri 2 veya daha fazla değişken arasındaki ilişkinin fonksiyonel biçimini belirlemek için yapılmaktadır (Karagöz, 2009). Değişkenler arasındaki ilişki basit veya karmaşık olabilmekte ve bağımlı (açıklanan) değişkenin bağımsız (açıklayıcı) değişkenlerdeki değişikliklere göre nasıl değiştiği incelenmektedir. Bu değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olabileceği gibi doğrusal olmayan bir ilişki de bulunabilmektedir (Öztürkcan, 2009). Regresyon analizlerinde değişkenler arasındaki ilişki doğrusal ise doğrusal regresyon analizi olarak tanımlanırken bu ilişki doğrusal değilse doğrusal olmayan regresyon analizi olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizlerine ek olarak çok değişkenli uyarlanabilir regresyon analizleri de sıkça kullanılmaktadır. Regresyon analizlerinde diğer bir sınıflandırma bağımsız değişken sayısına göre olabilmektedir. Bağımsız değişken sayısı tek ise basit regresyon analizi (BRA) ve birden fazla bağımsız değişken içeriyorsa çoklu regresyon analizi (ÇRA) olarak tanımlanabilmektedir.

- Doğrusal Regresyon Analizi

Değişkenler arasındaki ilişki doğrusal ise doğrusal regresyon analizi (DRA) uygulanmakta ve bu analiz bağımsız değişken sayısına bağlı olarak 2 gruba ayrılabilir.

- Basit Doğrusal Regresyon Analizi

Basit doğrusal regresyon analizi (BDRA) bağımsız değişkenle bağımlı değişken arasında doğrusal (lineer) bir ilişki olduğunda kullanılabilmektedir. Bağımsız değişken yardımıyla bağımlı değişkeni tahmininde kullanılmakta ve Denklem 35 ile gösterilmektedir.

$$\hat{y} = a + b_0 x \quad (35)$$

Denklem 35'teki x bağımsız değişkeni, $\hat{y}$ ise her bir x değeri için tahmin edilen, beklenen veya teorik bağımlı değişkeni belirtmektedir. b_0 , $\hat{y}$ değerinin bulunması için x değişkeninin çarpılması gereken regresyon katsayısıdır. b_0 , aynı zamanda regresyon doğrusunun eğimine eşittir ve Denklem 36'daki ifadelerden biriyle hesaplanmaktadır.

$$b_0 = \frac{\sum xy - n\mu_x \mu_y}{\sum x^2 - n\mu_x^2} \quad (36)$$

$$b_0 = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$$

Denklem 36'daki σ_x ve σ_y sırasıyla x ve y değişkenlerinin standart sapmalarını göstermektedir. Denklem 35'teki a sabit değeri göstermekte ve Denklem 37 ile hesaplanmaktadır.

$$a = \mu_y - b_0 \mu_x \quad (37)$$

Denklem 35'te verilen regresyon denklemindeki her x değeri için hesaplanan $\hat{y}$ değeri, her x değerine karşılık gelen y değerine eşit olmadığından x ve y değişkenleri arasındaki gerçek ilişki Denklem 38 ile ifade edilmektedir.

$$y = a + b_0 x + e \quad (38)$$

Denklem 38'deki y , her bir x değerine karşılık gelen bağımlı değişkenin gerçek değerini, e hata miktarını ifade etmekte ve e değeri Denklem 39 ile hesaplanmaktadır.

$$e = y - \hat{y} \quad (39)$$

Hata miktarı, değişkenler arasındaki ilişkinin açıklanamayan kısmından oluşmaktadır (Öztürkcan, 2009). Hata miktarı her bir x değeri için değişmekle birlikte hata miktarının tüm x değerleri için ortalaması 0'dır. Hatanın olmaması için 2 değişken arasındaki korelasyon katsayısının 1 veya -1 olması gerekmektedir. Bir veri setinin tamamı için standart hata (SH)

veri sayısına bağlı olarak veya korelasyon katsayısına bağlı olarak Denklem 40'taki ifadeler kullanılarak hesaplanmaktadır (Köklü vd., 2006; Büyüköztürk vd., 2006; Field, 2013).

$$\begin{aligned}
 SH &= \sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n}} \quad (n \geq 30) \\
 SH &= \sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n - 2}} \quad (n < 30) \\
 SH &= \sigma_y \sqrt{\frac{n - 1}{n - 2} (1 - r^2)}
 \end{aligned} \tag{40}$$

- Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi

Basit doğrusal regresyon modeli birer bağımlı ve bağımsız değişken, çoklu doğrusal regresyon modeli bir bağımlı ve birden fazla bağımsız değişken içermektedir (Günaşdı, 2014). Çoklu doğrusal regresyon analizinde (ÇDRA) temel olarak 2 amaç vardır. Bunlardan ilki bağımlı değişkeni etkilediği belirlenen değişkenler vasıtasıyla bağımlı değişkenin değerini tahmin etmektir. Diğeri ise bağımlı değişkeni etkilediği düşünülen bağımsız değişkenlerden hangisinin/hangilerinin bağımlı değişkeni daha çok etkilediğini ve aralarındaki ilişkiyi belirlemektir (Alpar, 2003). Yapılacak analizlerde daha etkili sonuçlar elde edebilmek amacıyla bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni ne yönde ve nasıl etkilediğinin tespiti oldukça önemlidir. Y bağımlı değişkeni ile p sayıda bağımsız değişken arasındaki ilişki doğrusalsa ve Y ile X'lere ait n tane gözlem değeriyle ÇDRA ifadesi Denklem 41'deki gibidir. Burada $b_0, b_1, \dots, b_p$ regresyon katsayıları olarak tanımlanabilmektedir (Günaşdı, 2014).

$$\begin{aligned}
 Y &= b_0 + b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} + \dots + b_p X_{ip} + e_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\
 Y &= b_0 + \sum_{k=1}^p b_k X_{ik} + e_i
 \end{aligned} \tag{41}$$

- Doğrusal Olmayan Regresyon Analizi

Değişkenler arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı durumlarda kullanılmaktadır. Bağımsız değişken sayısına göre basit doğrusal olmayan regresyon analizi ve çoklu doğrusal olmayan regresyon analizi olarak 2 gruba ayrılmaktadır.

- Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri

Birçok uygulamalı alanda değişkenler arasında doğrusallık bulunmayan olayları temsil edebilmek için parametrik olmayan regresyon yöntemlerinden faydalanılmaktadır (Yerlikaya, 2008). Bu yöntemlerden bazıları tahmin değişkeni ve bağımlı arasındaki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkiyi açıklayabildiğinden oldukça önemlidir (Kişi & Parmar, 2016; Baki, 2023). Friedman tarafından 1991 yılında geliştirilen çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (ÇDURE) diğer adıyla multivariate adaptive regression splines (MARS) parametrik olmayan bir regresyon yöntemidir (Friedman, 1991). MARS bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında fonksiyonel bir ilişki olmadığını varsaymaktadır (Zhang & Goh, 2016). Bunun yerine, değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklamak için böl ve yönet stratejisini uygulamaktadır (Suman, 2015; Mardani-Aghabaglou vd., 2021). Regresyon verisinden kendisinin çıkardığı temel fonksiyonlara dayanarak yeni bir ilişki oluşturmakta ve bağımsız değişkenlerin farklı aralıklarına karşılık gelen temel fonksiyonları kullanarak esnek bir regresyon modeli kurmaktadır (Toprak, 2011; Nacar vd., 2018). Genel bir MARS modeli Denklem 42 ve her bir temel fonksiyon Denklem 43 ile tanımlanmaktadır (Özfa1c1, 2008; Nacar vd., 2020).

$$Y = \beta_0 + \sum_{k=1}^K a_k \beta_k(X_t) + \varepsilon_i \quad (42)$$

Denklem 42'deki k düğüm sayısını; K temel fonksiyon sayısını; X bağımsız değişkeni; a_k k . temel fonksiyon kat sayısını; β_0 modeldeki sabit terimi; $\beta_k(X_t)$ t . bağımsız değişken için k . temel fonksiyonu; ε_i hata miktarını ifade etmektedir.

$$B_m(x) = \prod_{t=1}^{L_m} [S_{1,m}(x_{v(1,m)} - k_{1,m})] \quad (43)$$

Denklem 43'teki L_m etkileşim derecesini; $S_{1,m} \in [\pm 1]$ 'i; $k_{1,m}$ düğüm değerini; $x_{v(1,m)}$ bağımsız değişken değerini ifade etmektedir. MARS yönteminde en doğru sonuçları veren modelin oluşmasında 2 aşamalı bir süreç mevcuttur. 1. aşamada mümkün olan tüm temel fonksiyonlar oluşturulmakta ve modelin karmaşıklığı maksimum seviyeye ulaşınca kadar eklenen temel fonksiyonlarla model geliştirilmektedir. 2. aşamada önemli bağımsız

değişkenler ve bu değişkenlerin karşılıklı etkileşimleri belirlenerek hata miktarı en küçük olan en uygun model oluşturulmaktadır (Ünal, 2009).

Bu tez çalışması kapsamında, bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkileri BRA incelenmiştir. Ayrıca bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisi birlikte olarak ÇDRA ve MARS yöntemiyle incelenmiştir. MARS yöntemi için yapılan analizlerde gerekli olan “input ve output” dosyalarından “input” dosyasında bağımsız parametreler nem (N), sıcaklık (S), doygunluk (D) ve hacim (H) parametreleri, “output” dosyasında da işleme katılacak herhangi bir moddaki frekans değerleri bulunmaktadır.



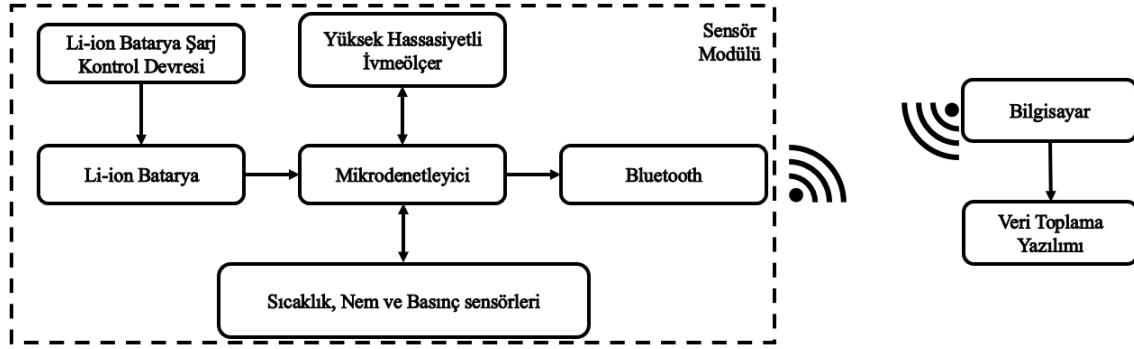
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tez kapsamında yapıların yapısal parametrelerinin belirlenmesi için yüksek hassasiyetli kablolu ve/veya kablosuz ölçüm alabilen, istenilen özelliklerdeki ölçümler için parametre seçimi yapabilen, ölçümlerde kurulum ve söküm işlemini basitleştiren çok kanallı titreşim ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen çok kanallı titreşim ölçüm sisteminin donanımsal ve yazılımsal kısımları detaylı olarak anlatılmıştır. Daha sonra geliştirilen titreşim ölçüm sisteminin doğrulanması farklı yöntemlerle yapılmıştır. Bu sistemle laboratuvar modelleri ile gerçek yapıların doğal frekanslarının çevresel etkiler altındaki değişimleri titreşim testi yöntemiyle incelenmiştir. Bu yapıların sıcaklık-nem ölçümleri dijital bir sıcaklık-nem ölçer cihazı ile yapılmıştır. Yapılara ait oluşturulan regresyon modelleri farklı yöntemlerle analiz edilmiştir. Ayrıca incelenen yapılar hakkında genel bilgilere yer verilmiş ve gerçekleştirilen deneysel testlere ait bilgiler de sunulmuştur. Çevresel etkiler sonucu frekanslardaki değişim miktarının ne düzeyde olduğu belirlenmiş ve herhangi bir zamanda elde edilen doğal frekansların çevresel etkilere bağlı geçici bir değişimden mi yoksa yapıyı kalıcı olarak etkileyen bir değişimden mi meydana geldiği incelenmeye çalışılmıştır. Seçilen yapıların başlangıç SE modelleri oluşturulmuş, deneysel frekanslara göre SE model güncellemeleri tamamlanmış ve deprem analizleri yapılmıştır. Bu sayede sıcaklık ve nemin ekstrem durumları için yapısal davranıştaki değişim ortaya konulmuştur.

2.1. Titreşim Ölçüm Sisteminin Oluşturulması

2.1.1. Titreşim Ölçüm Sisteminin Donanım Kısımının Oluşturulması

Yapılar üzerinden titreşim ölçümlerinin yapılabilmesine olanak sağlayan çok kanallı titreşim ölçüm sistemi (civil engineering vibration system-CEVS) donanım (sensör modülü) ve yazılım (civil engineering vibration analysis-CEVA) kısımlarından oluşmaktadır. Sistemin donanım kısmında ivmeölçer-arduino-bluetooth-sıcaklık-nem-basınç-batarya-şarj modülleri bulunurken yazılım kısmında Arduino_IDE, MATLAB ve Visual Studio programı C# dilinde geliştirilen yazılımlar bulunmaktadır (MATLAB, 2023; Visual Studio, 2022). Sistem elemanları ve sistemin genel olarak çalışma prensibi Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Sistem elemanları ve sistemin genel olarak çalışma prensibi

- Ölçüm Sisteminin Donanım Kısmı ve Bağlantı Şemaları

Titreşim ölçüm sisteminin donanım kısmı yapı/yapılar üzerine yerleştirilen sensör modülü (CEVS) ile deneysel verilerin çevresel etkiler altında algılanması amacıyla kullanılan ekipmanların tümüdür. Yapıya bağlanan CEVS sistemleriyle yapı üzerinden alınan veriler kablolu/kablosuz olarak bilgisayar ortamına gönderilmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. Sistemin bir yapı üzerindeki veri akış şeması

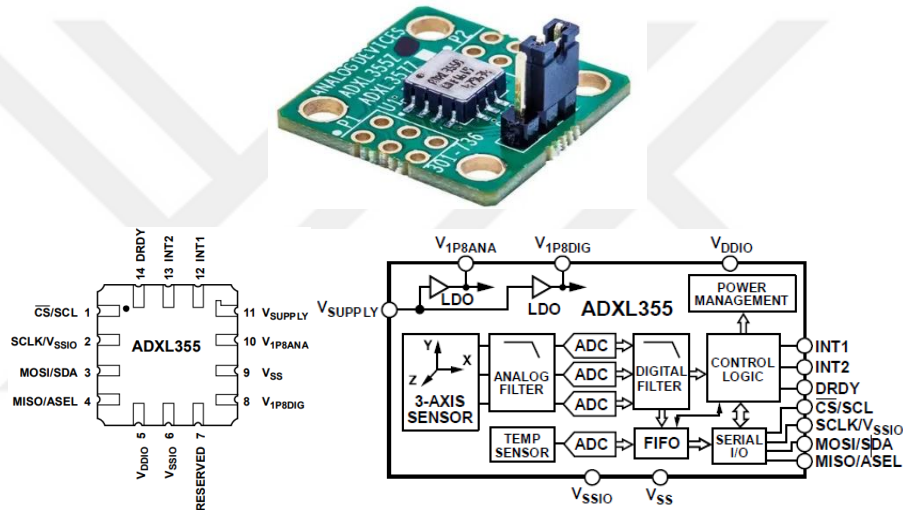
CEVS titreşim ölçüm sistemi; ADXL355z dijital ivmeölçer, arduino nano (mikro işlemci), HC-05 arduino-bluetooth, sıcaklık-nem, basınç, lityum-ion batarya ve şarj modüllerinden oluşmaktadır. Bu tez çalışmasında ölçümü yapılacak yapının titreşimlerini (ivme verilerini) elektronik ortamda algılayabilmek için ADXL355z dijital ivmeölçer sensörü kullanılmıştır. Verilerin alınmasında x-y-z eksenlerindeki verileri okuyabilmesi, 20-bitlik analog dijital dönüştürücüye sahip olması, yüksek hassasiyetli olması, alçak

geçiren, yüksek geçiren dijital filtrelerle sahip olması, şebeke gürültülerinden ve elektromanyetik gürültülerden çok az etkilenmesi sebebiyle ADXL355z dijital ivmeölçer sensörü seçilmiştir. Seçilen ivmeölçerin bazı özellikleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir (URL-34, 2024).

- Dijital seri çevresel arabirimi I2C veya SPI olarak seçilebilmekte,
- 20-bitlik analog-dijital dönüştürücüye (ADC) sahip,
- Senkron örnekleme için veri enterpolasyon rutinine sahip,
- Programlanabilir yüksek ve düşük geçişli dijital filtrelerle sahip,
- Elektromekanik olarak kendi kendini test edebilmekte,
- x, y ve z eksenlerinde (3 eksen) aynı anda veri okuma yapabilmekte,
- $\pm 2g$, $\pm 4g$ ve $\pm 8g$ farklı ölçüm hassasiyetlerine ayarlanabilmekte,
- $\pm 2g$ 'de sensör $3.9\mu g/LSB$ hassasiyetle, $\pm 4g$ 'de sensör $7.8\mu g/LSB$ hassasiyetle ve $\pm 8g$ 'de sensör $15.6\mu g/LSB$ hassasiyetle ölçüm yapabilmekte,
- Örnekleme frekansı 4 ile 4000Hz arasında seçilebilmekte,
- Alçak geçişli filtre geçiş bandı frekans bandı 1-1000Hz arasında seçilebilmekte,
- Yüksek geçişli filtre geçiş bandı frekans bandı 0.0095-10Hz arasında seçilebilmekte,
- Kendi içinde (FIFO'da) veri depolayabilmekte,
- Çalışma sıcaklığı $-40^{\circ}C$ ile $+125^{\circ}C$ arasında olan,
- Gürültü yoğunluğu $\pm 2g$ için $25\mu g/\sqrt{Hz}$ olan,
- Çip boyutları 6mm x 6mm x 2.1mm olan,
- İvmeölçer boyutları 21mm x 21mm x 12mm olan,
- Ağırlığı 0.26gram olan,
- 500000Baud gibi yüksek haberleşme hızlarında veri okuyup gönderebilmekte,
- Yapısal sağlık izleme ve sismik ölçüm yapabilmektedir.

ADXL355z ivmeölçer modülü ve pinleri Şekil 14'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere ivmeölçer modülü üzerinde 14 adet pin bulunmaktadır. ADXL355 ivmeölçer entegresi mikrodenetleyiciler ile haberleşmede hem I2C hem de SPI haberleşmesini desteklemektedir. Bu kapsamda 1 numaralı pin I2C haberleşmesi için SCL pini, yani saat pini, SPI haberleşmesi için ise CS pini, yani çip seçme pini olarak kullanılmaktadır. 2 numaralı pin

SPI haberleşmesi için SCLK pini, yani saat pini, I2C haberleşmesi için ise toprak pini olarak kullanılmaktadır. 3 numaralı pin SPI haberleşmesi için MOSI pini, yani master çıkış slave giriş pini, I2C haberleşmesi için ise seri data pini olarak kullanılmaktadır. 4 numaralı pin SPI haberleşmesi için MISO pini, yani master giriş slave çıkış pini, I2C haberleşmesi için ise alternatif adresleme pini olarak kullanılmaktadır. 5 numaralı pin dijital besleme gerilimi pini, 6 numaralı pin dijital toprak, 7 numaralı pin kullanım dışı, 8 numaralı pin dijital besleme, 9 numaralı pin analog toprak, 10 numaralı pin analog besleme, 11 numaralı pin entegre besleme gerilim, 12 numaralı pin bir numaralı kesme pini, 13 numaralı pin iki numaralı kesme pini ve 14 numaralı pin ise data hazır pini olarak kullanılmaktadır.

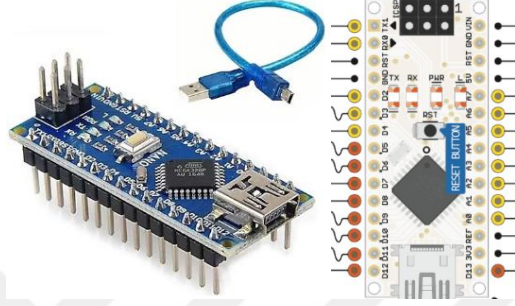


Şekil 14. ADXL355z dijital ivmeölçer sensörü ve blok diyagramı

İvmeölçer modülü $\pm 2g$, $\pm 4g$ ve $\pm 8g$ hassasiyete sahip olduğundan titreşim testini rijit cisimlerde (salınımı az) gerçekleştirirken daha yüksek g 'lerde, daha esnek cisimlerde ise daha düşük g 'lerde gerçekleştirmek daha doğru sonuçlar verebilmektedir. Ayrıca ölçüm esnasında sensörün düşey eksenini yerçekimi ivmesine (g) maruz kalmakta ve bu nedenle $1g$ civarında bir değer göstermektedir. Bu değer 0 'a getirilmesi amacıyla sensör içerisinde bulunan yüksek geçiren filtrelerle ayarlanarak yüksek g değerleriyle ölçümler alınabilmektedir.

Veri toplama üniteleri ölçümü yapılacak yapı/yapı elemanından ivmeölçerler vasıtasıyla alınan titreşimlerin elektrik sinyallerine dönüştürüldükten sonra bu sinyallerin ilgili bilgisayar programına transfer etmek için kullanılan sistemdir. İvmeölçerlerden veri toplama sistemine tekrarlı ve tekrarsız titreşimler yani ham veriler aktarılmaktadır. Tez

kapsamında geliştirilen CEVS titreşim sisteminde harici bir veri toplama ünitesi (Data Logger) kullanılmamıştır. Donanımsal ekipmandan olan arduino nano modülü mikro işlemci olarak kullanılmış bu modül yardımıyla sistem için gerekli ayarlamalar yapılmış, toplanan veriler bilgisayar ortamına iletilmiştir (Şekil 15). Arduino nanonun boyutunun küçük olması ve pin sayısının yeterli olması sebebiyle bu modül CEVS sisteminin üretiminde kullanılmıştır. Modülün öne çıkan bazı özellikleri aşağıda verilmiştir (URL-35, 2022).



Şekil 15. Arduino nano modülü ve pinleri

- Mikro denetçisi ATmega328P,
- Çalışma voltajı 5V,
- Dijital I/O pinleri 14 adet,
- Analog giriş pinleri 8 adet,
- I/O pin başına DC akımı 40mA,
- Hafıza kapasitesi 32kB (ATmega328),
- SRAM (geçici bellek, işlem yapmak için) 2kB (ATmega328),
- EEPROM (elektriksel olarak programlanabilir bellek, işlem yapmak için) 1kB (ATmega328),
- Saat hızı 16MHz,
- Boyutları 45mm x 18mm,
- Ağırlığı 7gramdır.

İvmeölçer ve arduino modülleri arasında hem I2C hem de SPI haberleşmesi kullanılarak bağlantı şemaları oluşturulmuş ve arduino programında gömülü yazılımları (embedded system) oluşturulmuştur. Geliştirilen CEVS sistemi ekipmanlarından ivmeölçer-arduino modülleri arasındaki I2C için kablo bağlantı şeması yapılmış ve bu şemaya göre ivmeölçerden arduinoya 4 farklı jumper kablo ile bağlantı sağlanmıştır.

Verilerin arduino üzerinden bilgisayar ortamına aktarımı sağlamak amacıyla açık alanda yaklaşık 10/15 metrelik bir haberleşme mesafesine sahip olması, titreşim verilerinin aktarılması için yeterli hıza sahip olması, tablet, telefon ve bilgisayarlarda donanımsal olarak bulunan bluetooth modülleri ile sorunsuz bir şekilde haberleşebilmesi sebepleriyle küçük bir modül olan HC-05 arduino-bluetooth modülünden yararlanılmıştır (Şekil 16). CEVS sisteminde kablosuz veri aktarımı bu modül ile sağlanmıştır. Bluetooth modülünün bazı özellikleri aşağıda verilmiştir (URL-36, 2022).



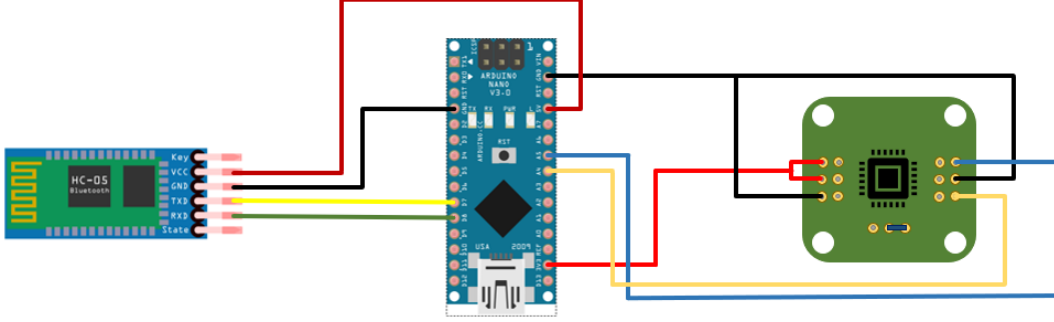
Şekil 16. HC-05 arduino-bluetooth modülü

- Bluetooth 2.0+EDR (gelişmiş veri hızı),
- 2.4GHz haberleşme frekansı,
- Hassasiyeti $\leq -80\text{dBm}$,
- Çıkış gücü $\leq +4\text{dBm}$,
- Asenkron hızı 2.1MBps/16kBps,
- Senkron hızı 1MBps/1MBps,
- Kimlik doğrulama ve şifreleme yapabilmekte,
- Çalışma gerilimi 1.8-5V (önerilen 3.3V),
- Akımı 50mA,
- 43mm x 16mm x 7mm boyutlara sahiptir.

HC-05 arduino-bluetooth modülü kablosuz seri haberleşme uygulamaları için uygundur. Modül üzerinde bulunan RX ve TX pinleri sayesinde iletişim sağlanmaktadır. Ayrıca bu pinler yardımıyla AT komutlarını kullanarak modülün baud rate değeri, ismi ve şifresi gibi çeşitli özellikleri de değiştirilebilmektedir. Çalışma kapsamında arduino nano ile bluetooth modülleri arasında seri haberleşme yöntemlerinden UART protokolü kullanılmıştır. Arduino modülündeki 5V, GND, D7 ve D8 pinleri bluetooth modülünde sırasıyla VCC, GND, TXD ve RXD pinlerine jumper kablolar yardımıyla bağlanmıştır.

Geliştirilen CEVS sistemi ekipmanlarından verilerin gönderilmesinde kullanılan HC-05 arduino bluetooth modülü, arduino nano modülü ve ivmeölçer modülleri arasındaki

I2C ve SPI için kablo bağlantı şemaları ayrı ayrı hazırlanmış ve I2C için bağlantı şeması Şekil 17’de verilmiştir. Farklı protokollerde sistemlerin oluşturulması özellikle veri alma kısmında farklılıklar oluşturmuştur.



Şekil 17. İvmeölçer-arduino-bluetooth modüllerindeki I2C ve UART bağlantı şeması

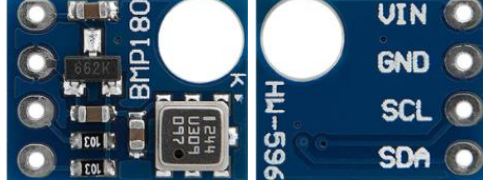
Geliştirilen sistemde donanımlara güç akışını sağlamak için şarj edilebilir lityum batarya ve bataryayı şarj etmek için sisteme TP4056 korumalı ve voltaj yükselticili şarj modülü sisteme ilave edilmiştir (Şekil 18) (URL-37 & 38, 2024). Kullanılan batarya modülü pilin bitmesi durumunda sistemden çıkarılmasına gerek duyulmaksızın şarj ünitesi yardımıyla şarj edilebilmekte ve şarjın durumuna göre sistemde olan led ışıkla birlikte şarjının ne durumda olduğu görülebilmektedir. TP4056 korumalı ve voltaj yükselticili şarj modülünün öne çıkan bazı özellikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 18. Şarj modülü ve lityum batarya

- Çıkış voltajı 4.3V ile 27Volt arası ayarlanabilmekte,
- Düşük akımla çalışan cihazlar için ideal olan,
- Şarj akımı 1Amper olan,
- Mikro USB şarj girişi mevcut,
- Boyutları 33mm x 25mm x 3mm ebatlarındadır.

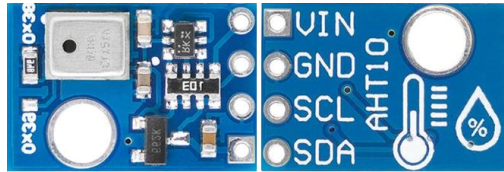
CEVS sisteminde basınç değerlerini ölçmek için BMP180 barometre basınç sensörü kullanılmıştır. Bu sensörün özellikleri aşağıda verilmiştir (Şekil 19) (URL-39, 2024).



Şekil 19. BMP180 basınç sensörü

- Basınç algılama aralığı 300-1100hPa (deniz seviyesinden 9000m ile -500m yukarıda) olan,
- -40 ile +85°C çalışma aralığına sahip,
- 1.8V/3.6V uyumlu olan,
- Altimetre olarak da kullanılabilir.

CEVS sisteminde bir başka sensör olan AHT10 sıcaklık ve nem sensörü sistemin dış sıcaklık değerlerini ve nem değerlerini ölçmek için sistemde kullanılmıştır. Bu sensörün özellikleri aşağıda verilmiştir (Şekil 20) (URL40, 2024).



Şekil 20. AHT10 sıcaklık-nem sensörü

- Sıcaklık değerini -40 ile +85°C arasında 0.01°C çözünürlükte ölçebilmekte,
- Sıcaklık değerinde $\pm 0.3^\circ\text{C}$ kesinlikte sonuç vermekte,
- Nem değerini %0 ile %100 değerleri arasında %0.024 çözünürlükte ölçebilmekte,
- Nem değerinde $\pm 2\%$ kesinlikte sonuç vermekte,
- Boyutları 16mm x 11mm olan,
- 1.8V-6V arasında sensör beslemesine sahiptir.

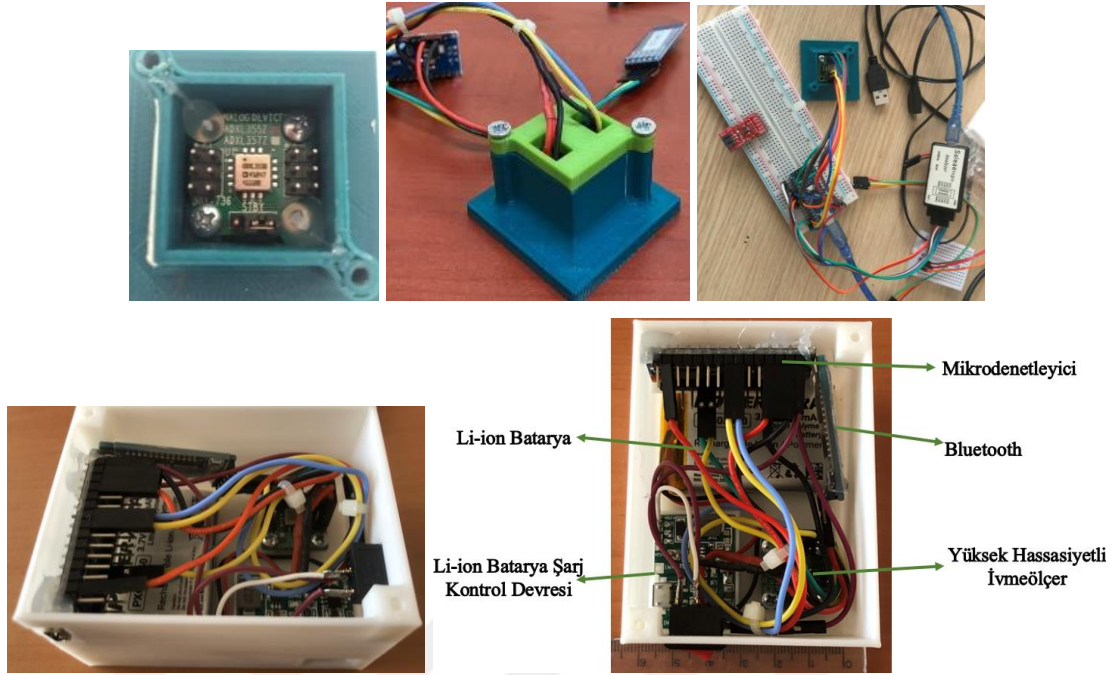
- Donanım Elemanlarının Bağlantılarının Yapılması

CEVS sisteminin üretimi için sistem elemanları ayrı ayrı olarak bağlantıya hazır hale getirilmiştir. İlk olarak ivmeölçer olarak kullanılan ADXL355z modülünün pinlerine soketler lehimlenmiştir. Arduino üzerinde de gerekli işlemler yapılmıştır. HC-05 arduino bluetooth modülü TTL dönüştürücü yardımıyla bilgisayara bağlanarak ismi, baud rate (haberleşme hızı), şifre vb. gibi parametreler ayarlanmış, modül çalışır ve montaj için uygun hale getirilmiştir.

Donanım elemanlarını bir araya getirmek için önce bağlantı kabloları oluşturulmuştur. Bu amaçla önce ivmeölçer-arduino daha sonra arduino-bluetooth arası kablo bağlantıları yapılmıştır. Kullanılan kablonun özelliği ve boyutu oldukça etkili bir parametre olduğundan kaliteli, esnek ve direnci düşük jumper kablo türü seçilmiştir. Bunun için yüksek sıcaklığa (200°C) ve soğuğa (-60°C) dayanıklı iletkeni kalaylı bakır malzeme, izolasyonu silikon kauçuk olan 28 AWD silikon kablolar seçilmiştir. Bağlantıları tamamlanan sistem multimetre aracılığıyla kısa devre testiyle kontrol edilerek sistem üzerinde kısa devre olup olmadığı gözlenmiştir. Bu sayede CEVS ölçüm sisteminin bağlantı düzenekleri hatasız hale getirilmeye çalışılmıştır.

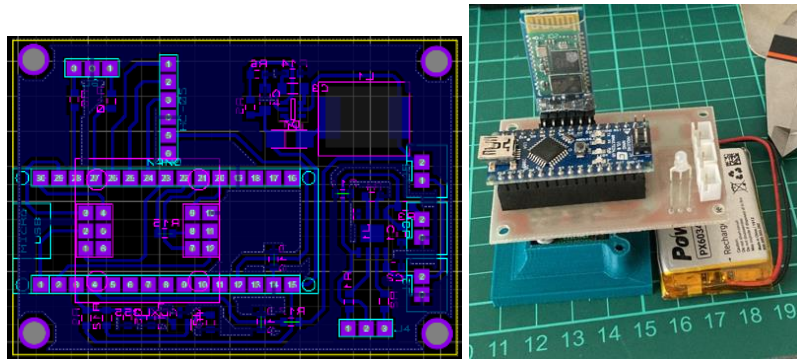
- Donanım Elemanlarının Kompakt Hale Getirilmesi

CEVS sistemindeki donanım ekipmanları için kutu tasarımı 3-D yazıcıda yapılmıştır. Kutunun tabanında %100 dolulukta 1.75mm'lik PLA özellikteki filament kullanılmıştır. Kutunun tasarımında kutu içerisine ivmeölçeri sabit ve stabil yerleştirmek amacıyla vida delikleri bırakılmıştır. ADXL355z dijital ivmeölçer modülü kutuya vida yardımıyla monte edilmiş, sıcak silikon yardımıyla da sağlamlaştırılmış ve ivmeölçer dış etkenlere karşı mukavemetli duruma getirilmiştir. İvmeölçerler kutuya yerleştirildikten sonra jumper kabloları takılarak arduino modülü ve diğer modül bağlantıları gerçekleştirilmiş ve I2C protokolüne ait sistem tasarımları tamamlanmıştır (Şekil 21).



Şekil 21. I2C protokolüyle tasarlanmış CEVS sistemleri

Sistemde bulunan entegre devreler ile modüller en küçük ağırlık ve boyutlarda olması için bir PCB (printed circuit board-baskı devre kartı) geliştirme kartı tasarlanmıştır. Geliştirilen baskı devrenin çizimi PROTEUS 8 programı ile yapılmıştır (Proteus, 2017). Baskı devrenin tasarımı tamamlandıktan sonra üretilen devre tasarımı bakır plaketa üzerinde gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen board üzerindeki baskı devrelerin lehimleme ve test işlemleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 22). Bu şekilde SPI protokolüyle çalışan CEVS titreşim ölçüm sistemi oluşturulmuştur. SPI protokolüne sahip CEVS sisteminde kablo sayısı en aza indirgenmiş, sistem tek bir board üzerinden haberleşme, veri alımı ve aktarımı sağlanmıştır.



Şekil 22. Titreşim ölçüm sistemi board tasarımı ve baskısı

Sistem için FreeCAD programında kutu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı tamamlanan kutu 3-D yazıcıda basılmıştır. 3-D yazıcıda basılan kutunun yapıya monte edilecek kısmın hemen üzerine ivmeölçer yerleştirilmiş bu şekilde diğer elemanların ölçüm esnasındaki gürültüsü minimize edilmiştir (Şekil 23). Tasarlanan bu sistemde önemli yenilikler/değişimler oluşturulmuştur. Özellikle yüksek hassasiyetli ivmeölçer ile arduino arasındaki seri haberleşme protokolü I2C iken bu sistemde SPI protokolüne ait pinler kullanılarak sistem yeniden tasarlanmıştır. Ayrıca arduino üzerindeki gömülü sistem yazılımı da tekrardan yapılarak veri toplama sayısında önemli bir artış meydana gelmiştir. Bu artış Logic 2.3.39 programına sistemin bağlanmasıyla test edilmiştir.



Şekil 23. Kutu tasarımı ve SPI protokolüyle çalışan titreşim ölçüm sistemi

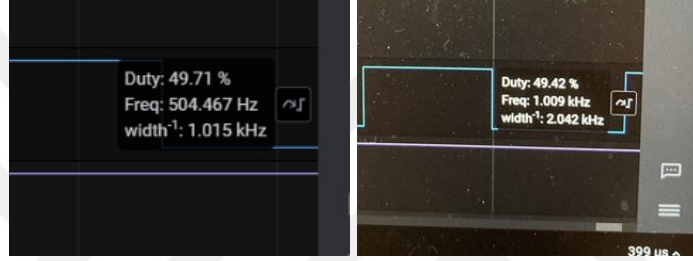
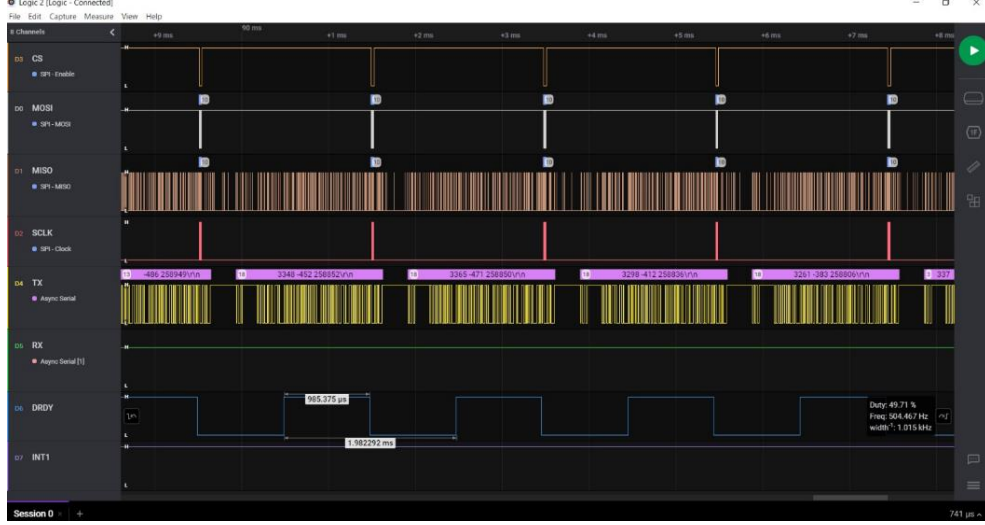
PROTEUS 8 programında daha sonra yeni yapılan geliştirmelerle sisteme basınç, sıcaklık ve nem sensörleri ilave edilmiştir. Bu şekilde ivme, sıcaklık, nem, basınç ve rakım değerleri de ölçülebilmektedir. Baskı devrenin tasarımı tamamlandıktan sonra devre tasarımı üretilmiştir. Geliştirilen board üzerindeki baskı devrelerin, modüllerin lehimleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. (Şekil 24). Kutunun en alt katmanına ivmeölçer en üst katmanında ise

batarya modülü yerleştirilmiştir. Ayrıca sistemde 2 adet led bulunmakta bunlardan ilki batarya azaldığında kırmızı yanmakta, batarya dolduğunda ise yeşile dönmektedir. Diğer led ise bağlantı led ışığı olup üst kapaktan görülebilmekte ve bağlantı sağlandığında yeşil yanmaktadır.



Şekil 24. PCB devre tasarımı ile devre üzerine yerleştirilen sistem elemanları

Geliştirilen board üzerindeki baskı devrelerin lehimleme işlemlerinden sonra sistem Analog Discovery 2 cihazı ve Logic programı kullanılarak test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu programda veri alımı ile gönderimi arasında gecikme olup olmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 25).



Şekil 25. Logic 2.3.39 programından bazı görüntüler

2.1.2. Titreşim Ölçüm Sisteminin Yazılım Kısımının Oluşturulması

Titreşim ölçüm sisteminin yazılımsal kısmı farklı programlar kullanılarak yapılmıştır. Bu yazılımlar veri akışı, veri alımı-gönderimi, sensör haberleşmesi vb. birçok amaç için oluşturulmuştur. Bu yazılımlar aşağıdaki başlıklarda detaylı olarak açıklanmıştır.

- Gömülü Sistem Yazılımı

Geliştirilen titreşim ölçüm sisteminde donanım kısmının kendi içinde ve bilgisayarla haberleşmesini sağlamak amacıyla gömülü sistem yazılımları gerçekleştirilmiştir. Gömülü sistem yazılımları arduino-ivmeölçer arasında I2C ve SPI, arduino-bluetooth arasında UART protokolü kullanılarak geliştirilmiş ve sistemlerin ayarlanması, veri aktarımı vb. işlemlerde kullanılmıştır.

Gömülü yazılım sistemi mikrodenetleyici olarak kullanılan arduino üzerine gerçekleştirilerek sistemde sinyallerin alınması, depolanması ve aktarılması ile ilgili süreçler tamamlanmıştır. Sinyallerin alımında örnekleme sayısının değişimi ile seçimi, ivmeölçer sensör hassasiyetinin ayarlanması, ölçüm süresi ve haberleşme hızının seçimi vb. önemli

parametreler gömülü yazılım aracılığıyla ayarlanmıştır. Ayrıca ölçüm düzeneği hazırlanırken sinyalin gelip gelmediği ve canlı izleme grafiklerinin görülebilmesinin arka planında gömülü sistem yazılımı bulunmaktadır.

- MATLAB Veri Toplama Yazılımları

Sensör sisteminin oluşturulması sonrasında sensör sistemini kontrol etmek ve sensör sistemi üzerinden veri alabilmek amacıyla bilgisayar üzerinde yazılımlar geliştirilmiştir. Bilgisayar tarafında sensör sistemini ayarlayabilen yazılımlardan biri MATLAB grafik kullanıcı arayüzü (GUI) kullanılarak geliştirilmiştir (MATLAB, 2023). Geliştirilen yazılımla aşağıda verilen maddelerin her birinin sağlanması amaçlanmıştır.

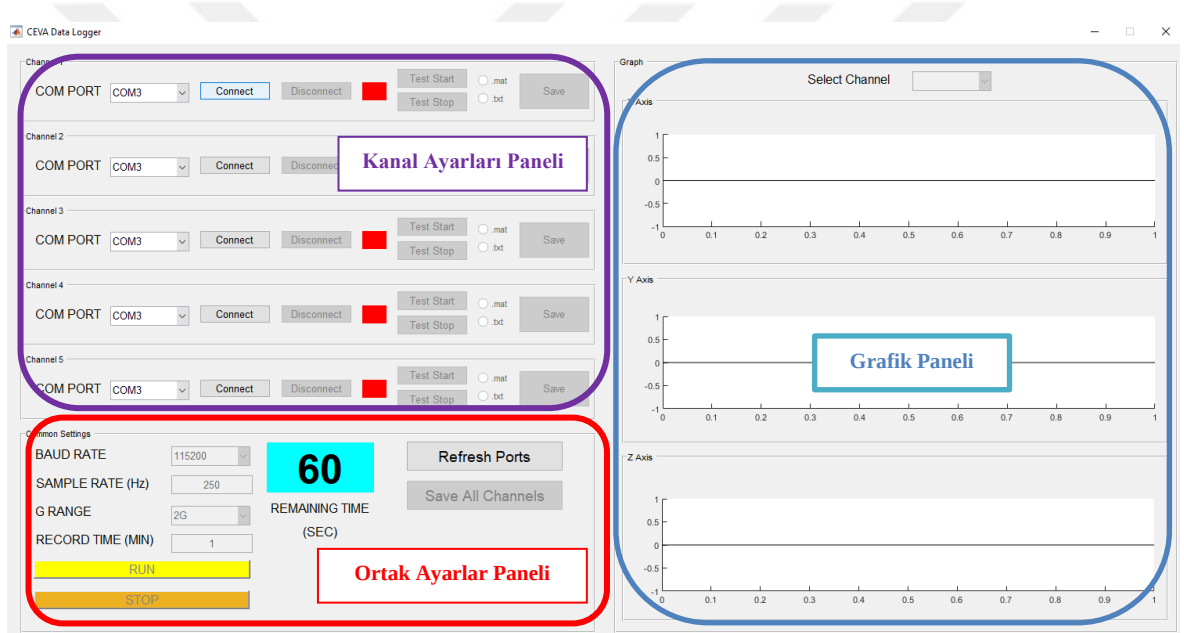
- Sensör sistemine kablolu/kablosuz bağlantının kesintisiz ve sağlıklı sağlanması,
- Örnekleme frekansının program üzerinden ayarlanabilmesi,
- Ölçüm süresinin ayarlanabilmesi,
- G değerlerinin ayarlanabilmesi,
- Kayıt öncesinde x-y-z eksenlerinden alınan sinyallerin gerçek zamanlı olarak test edilebilmesi,
- Sensörlerde herhangi bir sorunun olup olmadığının kontrol edilmesi,
- Kaydedilecek sinyallerin hangi kanaldan geleceğinin kullanıcı tarafından seçilebilmesi,
- Kayıt esnasında ölçümün kalan süresinin gerçek zamanlı olarak takibinin yapılabilmesi,
- Kayıt sonrasında verilerin “.mat, .txt vb.” formatlarda ve istenilen sensörlerden verilerin kaydedilebilmesi,
- Kayıt sonrasında bağlanan tüm sensörlere ait verilerin tek tuşla kaydedilebilmesi,
- Sensörlerden alınan sinyal verilerinin ölçüm sonrasında grafiklerinin gösteriminin sağlanabilmesidir.

Bu tez kapsamında yukarıda belirtilen amaçlara uygun olarak MATLAB GUI programında I2C ve SPI protokolleriyle çalışan yazılımlar geliştirilmiştir. I2C yazılımı 15 kanaldan veri alabilme yeteneğine sahipken SPI yazılımı 3 kanaldan veri alabilme özelliği

mevcuttur. SPI yazılımında 3 kanaldan veriler toplanırken gerçek zamanlı olarak alınan verinin kullanıcı tarafından grafiksel olarak görme imkanı da bulunmaktadır.

- I2C Protokollü Veri Toplama MATLAB Yazılımı

Geliştirilen CEVS titreşim ölçüm sistemiyle veri alabilmek için MATLAB GUI ortamında “CEVA Data Logger” adında bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım 5 farklı sisteme bağlanabilme, 5x3 yani 15 kanaldan veri alabilme özelliğine sahip olmakla birlikte, gerçek zamanlı (real time) veri akışını izleme, sistem parametrelerini değiştirme, ölçüm bilgilerinin takibi gibi birçok özellikler içermektedir (Şekil 26).



Şekil 26. MATLAB CEVA Data Logger yazılımı

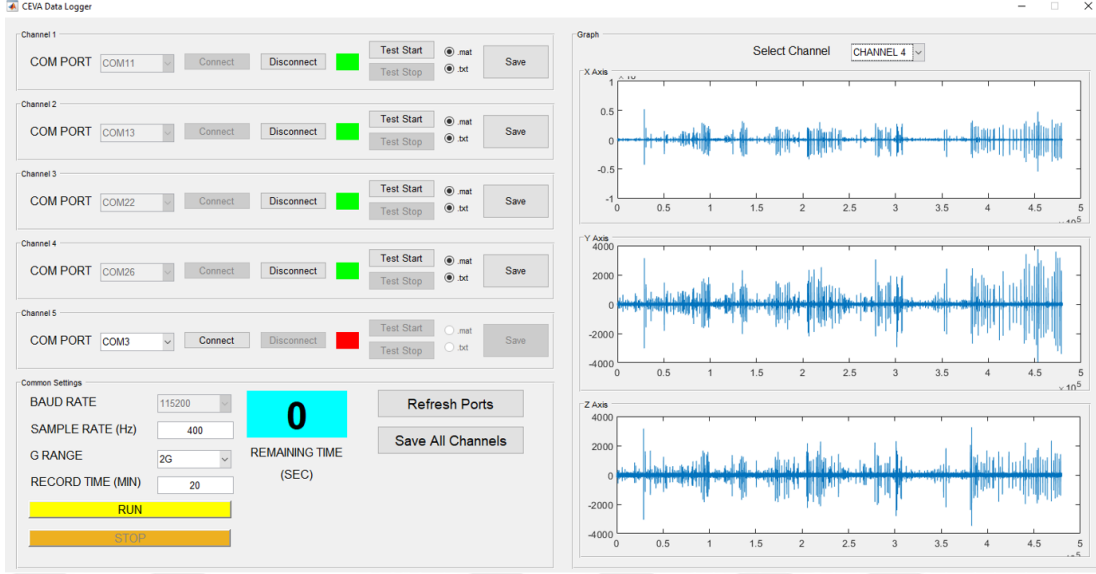
Geliştirilen yazılımdaki paneller ve bu panellerin işlevleri aşağıda verilmiştir.

- Kanal ayarları (Channel Settings) paneli; bilgisayar ile bağlantısı yapılan sensör sisteminin, oluşturulan yazılım ile haberleşmesi için gerekli olan bağlantı ayarlarının yapıldığı paneldir. Panel içerisinde sensör sisteminin bağlı olduğu port isminin seçilebildiği menüler bulunmaktadır. Geliştirilen sensör sistemi her bilgisayarda farklı bir port olarak atanabilmekte ve port ismi her bilgisayarda farklı olabilmektedir. Gerekli port ayarlarının yapılması durumunda bağlantı “Connect” butonu ile bu panel üzerinden sağlanmaktadır. Bağlantının sağlanmasından sonra

bağlantı “Disconnect” butonu ile bu panel üzerinden kesilebilmektedir. Bağlantı durumuna bağlı olarak göstergenin rengi (kırmızı bağlantı yok, yeşil ise bağlantı var) değişmektedir. Ayrıca bu panel üzerinde izlenmek istenen ya da kaydedilmek istenen sinyaller seçilebilmekte ve bu sayede sinyallerin durumları gerçek zamanlı olarak gözlemlenebilmektedir. Sinyallerin sağlıklı bir şekilde gelip gelmediklerinin kontrolü için “Test Start” ve “Test Stop” butonları da bu panel içindedir. “Test Start” butonu aktif olunca “Grafik Paneli” üzerinde veri akışı görüntülenebilmektedir. Bunlara ilaveten kayıt işlemi bittikten sonra sinyallerin veri dosyasına kaydı “Save” butonu ile belirtilen dosya konumuna “.mat veya .txt” dosyası olarak ayrı ayrı kaydedilebilmektedir. Kaydedilen dosyada hangi kanaldan verilerin olduğu, zaman bilgisi, örnekleme frekans bilgisi bulunmaktadır.

- Ortak ayarlar (Common Settings) paneli; bağlanan tüm sensör sistemini düzenleyen ve bu sistemler üzerinden alınan sinyallerin istenilen özelliklerde olması için gerekli parametrelerinin ayarlandığı, kayıt işlemlerinin başlatılıp durdurulduğu paneldir. Bu panel kullanılarak kaydedilmeye hazır sinyallerin örnekleme frekansı 250Hz ile 500Hz arasında ayarlanabilmektedir. Program açıldığında seri haberleşme hızı 115200Baud otomatik (default) olarak gelmekte ve istenilen durumlarda değişiklik yapılabilir. Kayıt süresi dakika cinsinden ve “G” değeri ($\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$) bu panel üzerinden ayarlanabilmektedir. Ayrıca yazılımla bilgisayar üzerinde açık olan portların listesini programın ilk başlatılmasıyla listelediğinden, yazılımın açılmasından sonra bağlanacak sensör sistemi “Refresh” butonu ile yenilenebilmektedir. Kaydın başlatılmasıyla birlikte kaydın bitmesi için kalan süre panel içerisinde gösterilmektedir. Kayıt işlemi bittikten sonra bağlanan tüm kanalların kaydedilmesi “Save All Channels” butonu kullanılarak belirtilen dosya konumuna “.txt” dosyası olarak kaydedilebilmektedir.
- Grafik paneli; bağlanan sensör sisteminin test işlemlerinin gerçekleştirildiği, canlı izlemenin X-Y-Z eksenlerinde görüldüğü paneldir. Ayrıca bu panelin üst kısmında yer alan “Select Channel” sayesinde kayıt işleminden sonra istenilen kanal seçilerek aldığı sinyal verileri 3 eksenle görüntülenebilmektedir.

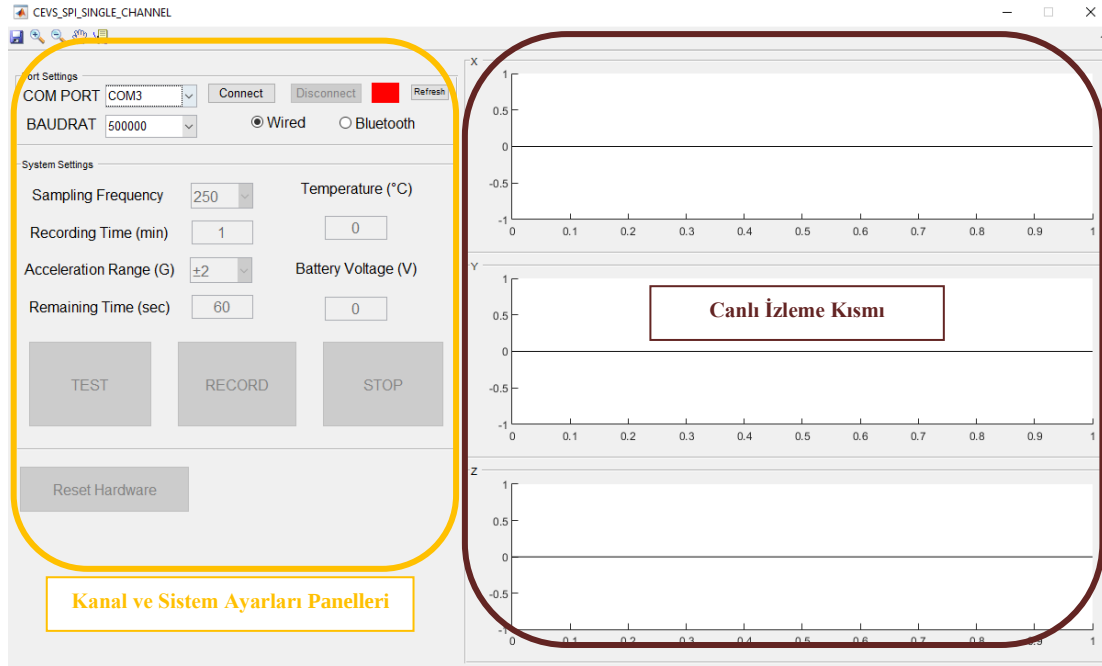
Geliştirilen CEVA Data Logger yazılımı ve CEVS sensör sistemi kullanılarak deneme ölçümleri yapılmış ve böylelikle eş zamanlı olarak sensörlerden çevresel titreşim sinyalleri başarılı bir şekilde elde edilmiştir (Şekil 27).



Şekil 27. MATLAB CEVA Data Logger ile bir ölçüme ait veri görüntüsü

- SPI Protokollü Veri Toplama MATLAB Yazılımı

Geliştirilen CEVS titreşim ölçüm sistemiyle veri alabilmek için MATLAB GUI platformunda “SPI Single Channel” adında bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım tek bir sisteme bağlanabilmekte yani 3 farklı kanaldan veri alabilmektedir. Ölçüm sırasında gerçek zamanlı (real time) veri akışını izleme, sistem parametreleri değiştirme gibi birçok özellikler yazılım içinde bulunmaktadır (Şekil 28). “SPI Single Channel” yazılımında geliştirilen paneller ve bu panellerin işlevleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 28. MATLAB veri toplama yazılımı

- Kanal ve sistem ayarları (Port and System Settings) panellerinde; bilgisayar ile bağlantısı yapılan sensör sisteminin, yazılım ile haberleşmesi için gerekli olan bağlantı ayarlarının yapıldığı ve sensör sistemi ile bu sistem üzerinden alınacak olan sinyallerin parametrelerinin ayarlandığı, kayıt işlemlerinin başlatılıp durdurulduğu panellerdir. Kanal ayarları panelinde sensör sisteminin bağlı olduğu port isminin seçilebildiği menüler bulunmakta ve verinin bilgisayar ortamına transferinde kablolu (wired) mu kablosuz (wireless) mu olacağı kullanıcı tarafından seçilebilmektedir. Seri haberleşme hızı kablosuz olarak 115200Baud değerindedir ve kablolu bağlantıda bu değer 500000Baud değerine çıkabilmektedir. Gerekli port ayarlarının yapılması durumunda bağlantı “Connect” butonu ile kanal ayarı paneli üzerinden sağlanmaktadır. Bağlantının sağlanmasından sonra bağlantı “Disconnect” butonu ile bu panel üzerinden kesilebilmektedir. Bağlantı durumuna bağlı olarak göstergenin rengi değişmektedir. Ayrıca bu panelde port listelerini yenileyen “Refresh” butonu da bulunmaktadır.
- Sistem ayarları panelinde kaydedilecek sinyallerin örnekleme frekansı 250/500/1000Hz arasında ayarlanabilmektedir. Kablolu seçim yapıldığında daha yüksek örnekleme frekansı ile ölçümler yapılabilir. Kablosuz seçimde ise 115200Baud hızıyla 250/500Hz örnekleme frekansından biri seçilerek ölçümler

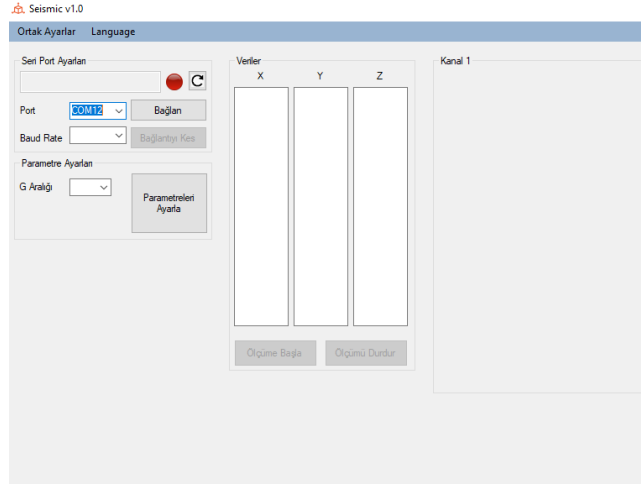
yapılabilmektedir. Ayrıca bu panelde kayıt süresi dakika cinsinden belirlenebilmekte ve ivmeölçerlerin “G” değeri ($\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$) panel üzerinden ayarlanabilmektedir. İzlenmek istenen kanal “Test Start” ve “Test Stop” butonlarıyla “Canlı İzleme” kısmında gerçek zamanlı olarak gözlemlenebilmektedir. Ölçüm kaydını başlatan “Record” butonuyla da kayıt başlatılmakta, kaydın başlatılmasıyla birlikte kaydın bitmesi için kalan süre saniye cinsinden ve batarya voltajı ile sıcaklık bilgileri de bu panel yardımıyla görülebilmektedir. Kayıt işlemi bitirilen sinyaller otomatik olarak veri dosyasına kaydedilmekte ve kaydedilen dosya içerisinde hangi kanaldan verilerin olduğu, zaman bilgisi ve örnekleme frekans bilgisi bulunmaktadır.

- Visual Studio C# Veri Toplama Yazılımları

Çalışma kapsamında Microsoft Visual Studio programında C# dilinde I2C ve SPI protokolleriyle çalışan yazılımlar geliştirilmiştir. Öncelikle geliştirilen sistemle veri alabilmek amacıyla I2C yazılımı daha sonra SPI Data Logger yazılımları geliştirilmiştir. I2C yazılımı 3 kanaldan (3 eksenli sensör) veri alabilme özelliğine sahipken SPI yazılımı 12 kanaldan veri alabilme ve verileri grafiksel olarak gösterme özelliği bulunmaktadır.

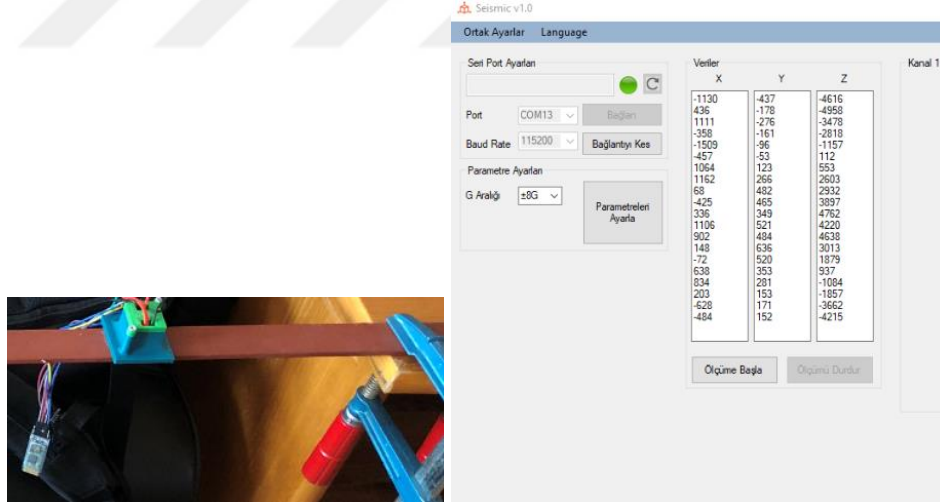
- I2C Protokollü Veri Toplama C# Yazılımı

Donanım sisteminin bilgisayar ile bağlantısında Microsoft Visual Studio programı C# dilinde “Seismic v1.0” adında bir yazılım geliştirilmiştir (Şekil 29). Bu programda port seçimi ve baud rate seçimi yapıldıktan sonra bağlan butonuyla bağlantı sağlanmıştır. Bağlantı yapıldıktan sonra ivmeölçer için g ayarı yapılabilmekte ve ivmeölçer bu komut yardımıyla ayarlanabilmektedir. Ayarlama işlemlerinden sonra CEVS sisteminden veriler 3 ayrı kanaldan okunabilmektedir.



Şekil 29. Veri toplama C# yazılımı

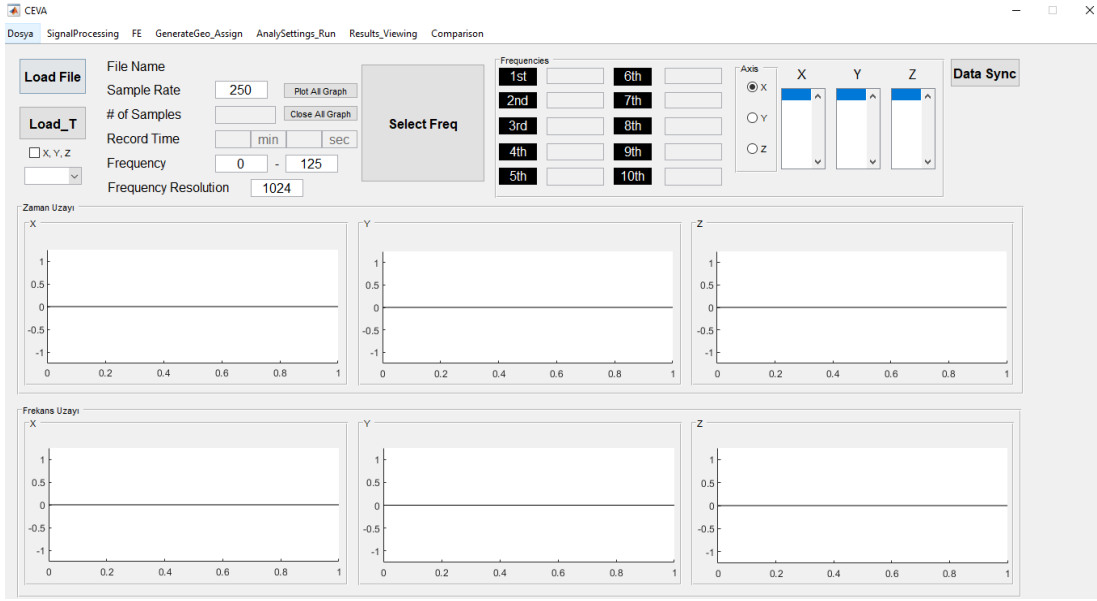
Geliştirilen yazılımla CEVS sistemiyle çelik model üzerinde deneme ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümde örnekleme frekansı 250Hz, ve baud rate (haberleşme hızı) değeri 115200Baud olarak ayarlanmış ve titreşim ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümde alınan veriler kablosuz olarak bluetooth aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır (Şekil 30).



Şekil 30. CEVS sistemiyle deneme ölçüm görüntüleri

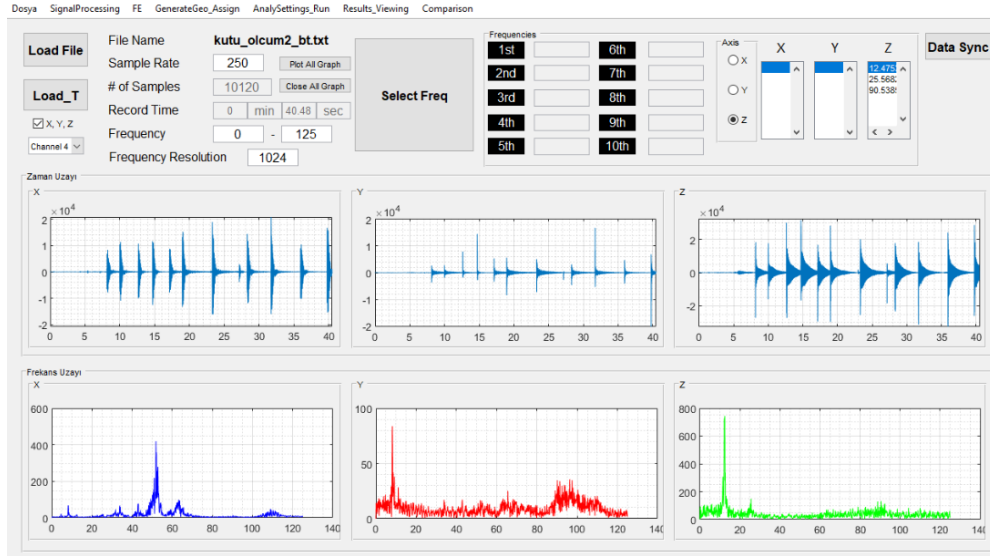
CEVS sistemiyle toplanan verilerin sayısı, çizdirilmesi, işlenmesi, pik değerlerinin seçimi, görseller ve diğer işlemler için MATLAB ortamında “FFT_Deneme” yazılımı oluşturulmuştur (Şekil 31). Oluşturulan yazılımın sol üst köşesinde dosya yükleme, dosya seçimi, alınan ölçümdeki kayıt süresini, örnek sayısını gösteren komutlar bulunmaktadır. Bu kısımda ölçüm 250Hz ile örneklendiğinde maksimum frekans 125Hz olmakta ve grafiksel

olarak frekans değerleri 0-125Hz'e kadar çizdirilmektedir. Ayrıca bu komutlara manuel olarak rakamlar yazıldığında en alttaki grafiklerde istenilen frekans aralığı daha ayrıntılı incelenebilmekte ve detaylandırılabilir. Geliştirilen yazılımda ilk 10 frekans değerleri seçilebilmekte, elde edilen verinin grafiği zaman uzayında ve verinin FFT dönüşümü sonrasındaki grafiği frekans uzayında aynı anda çizdirilebilmektedir. Çizdirilen bu grafiklerin frekans çözümü (frequency resolution) artırılıp azaltılabilmekte ve bu sayede pik değerleri daha kesin bir şekilde elde edilebilmektedir.



Şekil 31. FFT_Deneme MATLAB yazılımı

“Seismic v1.0” yazılımıyla kaydedilen veriler “FFT_Deneme” yazılımında açılarak X-Y-Z eksenlerine ait zaman uzayı grafikleri ve frekans grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca ölçüme ait diğer özellikler de bu yazılımda görüntülenmiştir. Düşey yöndeki hareket (Z eksen) dikkate alınmış ve Z ekseninde elde edilen ilk 3 deneysel doğal frekans değerleri belirlenmiştir (Şekil 32). Belirlenen bu frekans değerleri geliştirilen yazılım üzerinde (sağ üst kısımda) görüntülenmiştir.



Şekil 32. Deneme ölçüm verilerinin geliştirilen yazılımda incelenmesi

- SPI Protokollü Veri Toplama C# Yazılımı

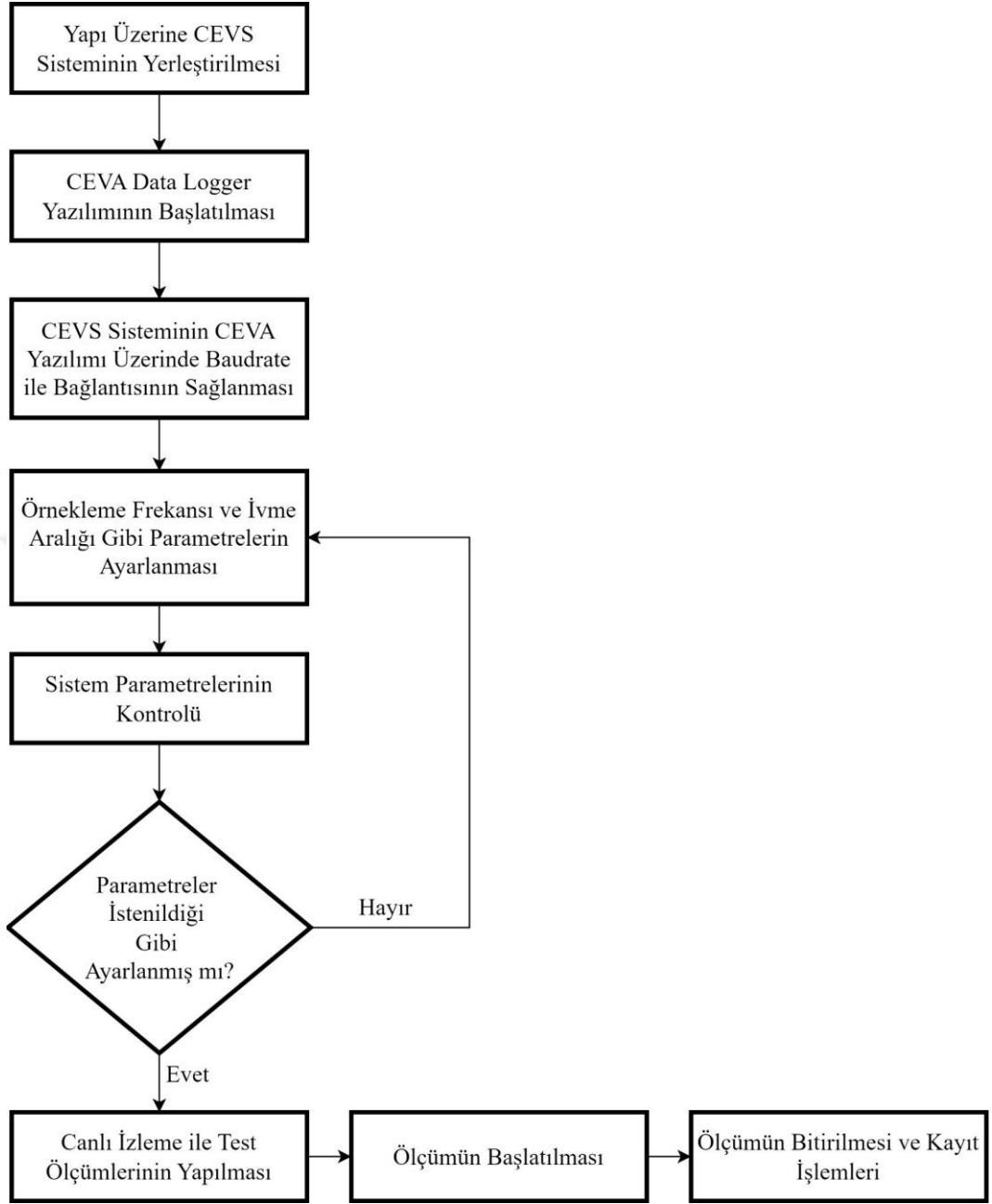
Sensör sistemini kontrol etmek ve sensör sistemi üzerinden veri alabilmek amacıyla Visual Studio programında C# dilinde “CEVA Data Logger” adında bir yazılım geliştirilmiştir (Visual Studio, 2022). Bu yazılım 4 adet CEVS sisteminden aynı anda veri toplayabilmektedir (Şekil 33).



Şekil 33. CEVA veri toplama yazılımı

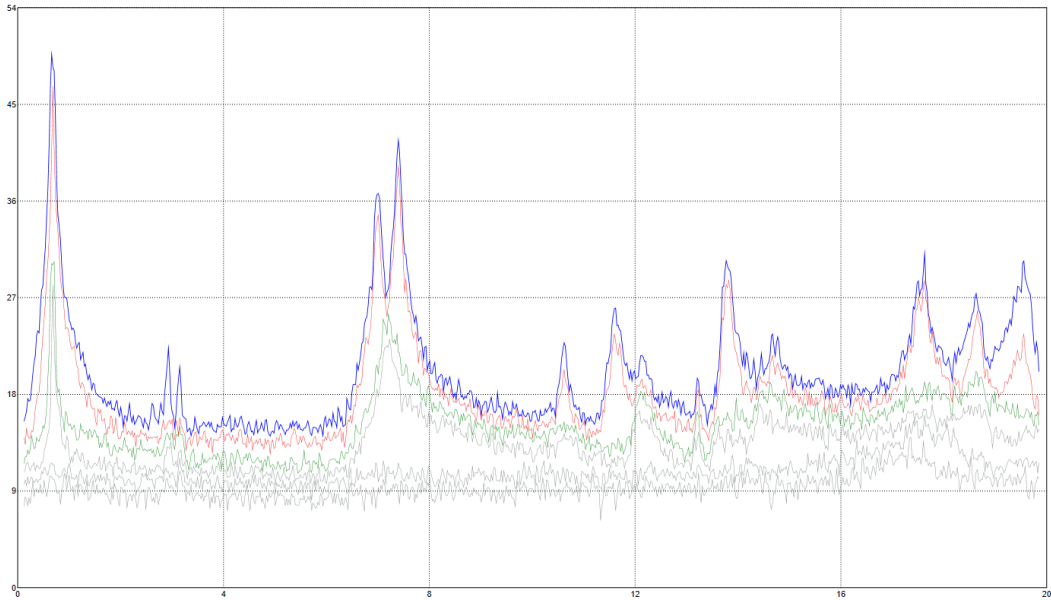
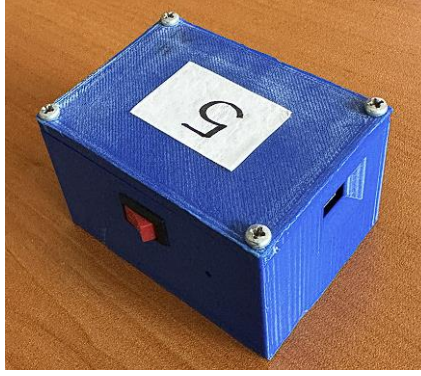
Geliştirilen yazılım üzerinde çeşitli paneller yardımıyla ölçümler gerçekleştirilmektedir. Program “.exe” formatında kullanılabilmekte ya da programın kurulum dosyası bilgisayar üzerinde kurulumu tamamlandıktan sonra program kısayolu üzerinden açılıp kullanılabilmektedir. Program açıldıktan sonra bağlantı ayarları “Connection” kısmından yapılmaktadır. Bağlanan sensör üst kısımdaki bağlantı yerinde (kırmızı kutu içindeki alan) port seçimi yapılarak tamamlanmakta, port gözükmezse “Refresh” butonuyla birlikte bağlantı portları yenilenebilmekte ve haberleşme hızı da ayarlanabilmektedir. Bu kısma 4 farklı CEVS sistemi bağlanabilmektedir. Program açıldıktan ve port seçimi yapıldıktan sonra bağlantı sağlanıp karşılıklı veri alışverişi yapılabilmektedir. Kayıt işlemi ile ilgili ayarlamalar “Common Settings” alanında (turuncu kutu içindeki alan) yapılmaktadır (G aralığı, örnekleme frekansı, kayıt süresi). Port seçiminden sonra default bir şekilde 500000Baud ile 2G ve 250Hz otomatik olarak gelmektedir. “Common Settings” panelinde istenilen özelliklere göre ayarlanabilmektedir. Bu panelin sağında (sarı kutu içindeki alan) “Recording” paneli bulunmakta ve bu panelde kayıt işlemi esnasında kalan ölçüm süresi saniye cinsinden gösterilmektedir. Ayrıca bu panelde ölçüm istenilen zamanda durdurulabilmekte ve alınan veriler kayıt butonuyla “.txt ya da .csv” formatıyla kaydedilebilmektedir. Yeşil kutu içindeki panellerde ivmeölçer sensörünün sahip olduğu parametre değerleri ile nem, sıcaklık, rakım, basınç ve batarya değerleri bulunmaktadır. Kablolu olarak bağlanıldığında batarya voltajı 0 ile gösterilmektedir. Verileri görsel olarak görmek için programın alt kısmında bulunan alan kullanılmaktadır. En alt panelde sensörlerin test ve görüntüleme işlemleri “T ile Show” butonları bulunmakta ve grafikler canlı olarak takip edilebilmektedir. Ayrıca ölçüm bittiğinde toplanan sinyallere ait X-Y-Z kanalları gösterilmekte, “Expand Data” butonuyla toplanan veriler daha büyük bir şekilde incelenebilmektedir.

Geliştirilen CEVS titreşim ölçüm sistemi ve CEVA Data Logger yazılımıyla yapı üzerinden titreşim ölçümlerinin gerçekleştirilmesine ait akış şeması Şekil 34’te sunulmuştur.



Şekil 34. Titreşim ölçümleri için veri akış şeması

Geliştirilen CEVS titreşim ölçüm sistemi, CEVA Data Logger yazılımı ve alınan sinyal örneğinin işlenmesine ait görüntü Şekil 35'te verilmiştir.



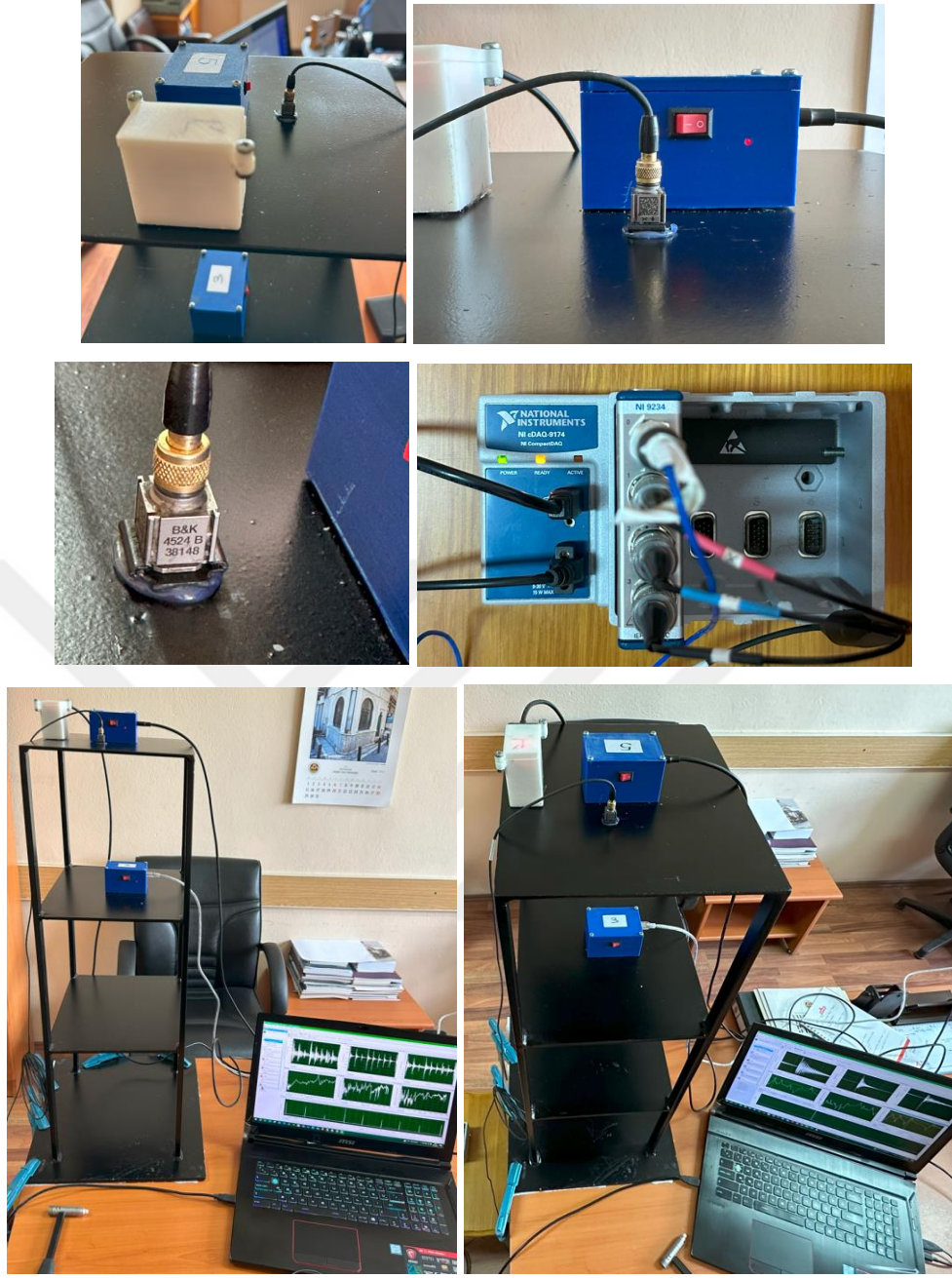
Şekil 35. Geliştirilen sistem, yazılım ve alınan sinyal örneğinin analizi

2.2. Geliştirilen Sistemin Doğrulanması

Donanımsal ve yazılımsal olarak tamamlanan CEVS titreşim ölçüm sisteminin doğruluk kontrolünün yapılması oldukça önemlidir. Geliştirilen bu sistemin doğru ölçüm verilerini toplayabilmesi ve istenilen özelliklere çıkabilmesi gerekmektedir. Bu yüzden bu tez çalışmasında, piyasadaki ölçüm sistemleri aracılığıyla yapılar üzerinden alınan ölçüm verileri ile aynı yapılar üzerinden CEVS titreşim ölçüm sisteminin ölçüm verileri incelenmiş daha sonrasında da bu değerler birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu işlem adımı oldukça önemli olduğundan laboratuvar ve gerçek yapılar üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. İlk olarak laboratuvar da 3 katlı çelik bir model üzerinde, daha sonra literatürde ölçüm sonuçları bulunan Trabzon ilindeki Karadeniz Teknik Üniversitesi kampüsü içerisinde bulunan caminin minaresi ve Büyük Fatih Cami'sinin minaresi üzerinde geliştirilen titreşim ölçüm sistemiyle titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler frekans ve zaman tanım alanındaki ayrıştırma yöntemleriyle analiz edilerek değerlendirilmiştir.

2.2.1. Çelik Model Ölçümleri

Geliştirilen CEVS titreşim ölçüm sistemi, National Instrument (NI) firmasına ait ölçüm sistemi ve bir çelik model yardımıyla test edilmiştir. Çelik model 3 katlı bir yapıya sahip olup 76.5cm yüksekliğindedir. Bu yapının taban döşeme kalınlığı 5mm ve diğer 3 katın döşeme kalınlığı 3mm'dir. Kolon en kesitleri 10mm ve 20mm'dir. Kolonların içi dolu dikdörtgen kesitlidir. Titreşim ölçümleri gerçekleştirilirken model 5 adet mengene yardımıyla tahta bir masa üzerine sabitlenmiştir. Daha sonra NI firmasına ait ölçüm sistemi ve CEVS ölçüm sistemi modelin en üst noktasına sıcak silikon yardımıyla yerleştirilmiş ve sabitlenerek ölçüme hazır hale getirilmiştir (Şekil 36).



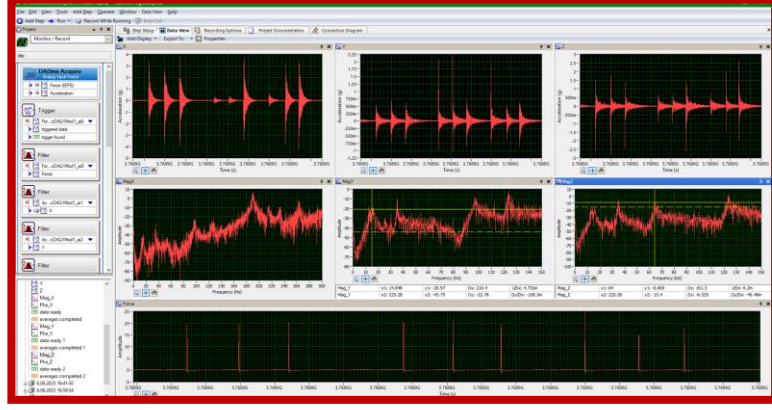
Şekil 36. Doğrulanma için kurulan ölçüm düzeneği

NI'ya ait ölçüm sistemi Brüel & Kjær 4524B model numaralı 3 eksenli ivmeölçer sensörü, NI firmasının veri toplama sistemi (NI-9234), IEPE tipi darbe çekici (PCB 086C03), kablolar ve bilgisayardaki LabVIEW SignalExpress yazılımından oluşmaktadır. Şekildeki mavi ve beyaz kutu CEVS sistemlerini, gri renkli olarak görülen ise NI firmasına ait ölçüm sisteminin ivme sensörünü göstermektedir. Bu sistemlere ait detaylı teknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sistemlerin teknik özellikleri

Özellik	Sistem	CEVS Ölçüm Sistemi	NI Ölçüm Sistemi
Donanım		Dijital ivmeölçer, basınç, sıcaklık ve nem sensörleri, arduino, bluetooth, Li-ion batarya, şarj modülü ve bilgisayar	Analog ivmeölçer, veri toplama ünitesi, çekiç, kablolar ve bilgisayar
Yazılım		Geliştirilen CEVA Data Logger C#	LabVIEW sinyal toplama yazılım
İvmeölçer tipi / Eksen Sayısı/ G aralığı		Dijital ADXL355z / 3 eksenli / $\pm 2G$, $\pm 4G$, $\pm 8G$	Analog BKS V 4524-B / 3 eksenli / 50g'ye kadar
Titreşim testi yöntemi		Çevresel (darbe çekici yok)	Zorlanmış (IEPE tipi darbe çekici PCB 086C03)
Örnekleme		20-bit yüksek çözünürlüklü ADC'ye sahip, I2C ve SPI protokolüyle çalışabilmekte, 250/500/1000/2000/4000 seçilebilmekte	Frekans bandı 0.25-3000Hz arasında seçilebilir
Veri alabilme		Kablolu veya kablosuz	Kablolu
Kanal sayısı		Bilgisayar kapasitesine bağlı	Veri toplama ünitesine bağlı
Kurulum		Sadece tek kutu bağlantısı / kolay	İvmeölçer, veri toplama ünitesi, çekiç, kablolar / daha zor
Taşınabilirlik		Küçük, hafif ve mobil	Orta ağırlıkta ve mobil

Çelik model üzerinde ölçüm düzenekleri hazırlandıktan sonra titreşim ölçümleri sistemlere ait veri toplama yazılımları aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. CEVS titreşim ölçüm sisteminde CEVA yazılımı kullanılırken NI ölçüm sisteminde LabVIEW SignalExpress yazılımı kullanılmıştır (Şekil 37).



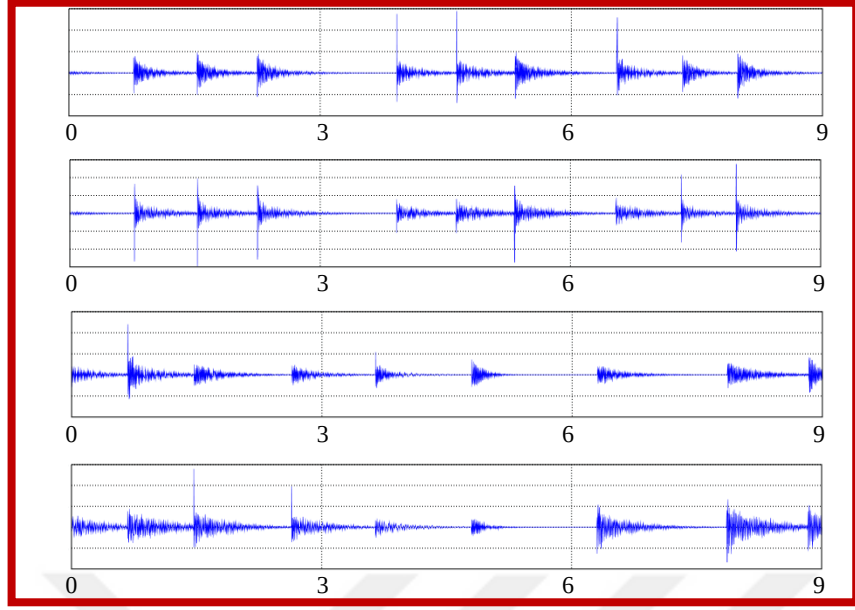
NI ölçüm sistemine ait LabVIEW SignalExpress yazılımı



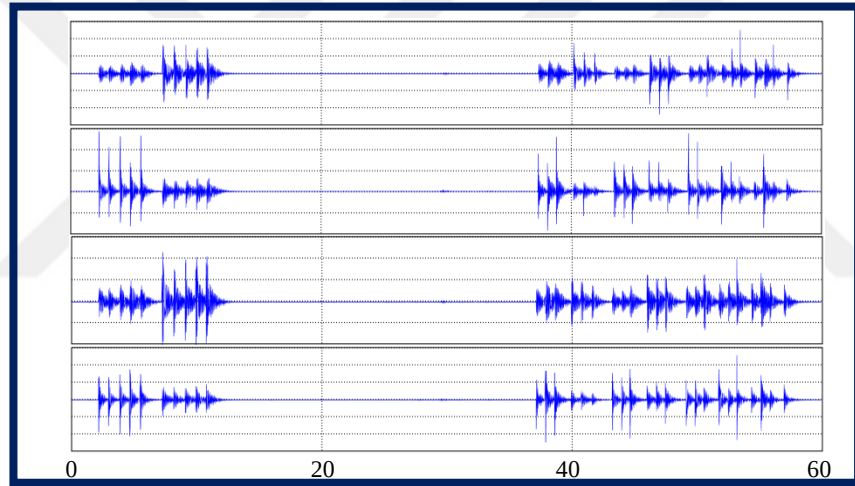
CEVS sistemine ait CEVA Data Logger yazılımı

Şekil 37. NI ve CEVS sistemlerine ait yazılımlar

Titreşim ölçüm verileri çelik çerçeveli model üzerinden alınmıştır. CEVS sistemiyle veriler saniyede 500Hz örnekleme sayısı ile 60sn boyunca 30000 ivme verisi toplanmıştır (Şekil 38). NI sistemiyle saniyede 1650Hz örnekleme sayısı ile 9sn boyunca yaklaşık 15000 ivme verisi toplanmıştır. Şekil 38’de yatay eksen saniye cinsinden zaman eksen, dikey eksen m/sn^2 cinsinden ivme eksenidir. CEVS ve NI sistemlerinden elde edilen veriler ARTeMİS programında analiz edilmiştir. Analiz işlemleri sırasında CEVS sisteminde Z eksen, NI sisteminde X eksen olan dikey eksenler olup bu eksenler analizlerde dikkate alınmamıştır. Analiz sonucu spektrum grafiğinin tekil değerleri aşağıdaki Şekil 39’daki gibi elde edilmiştir. Yatay eksen Hertz cinsinden frekans eksen, dikey eksen ise genliği ifade etmektedir (ARTEMİS, 2011).

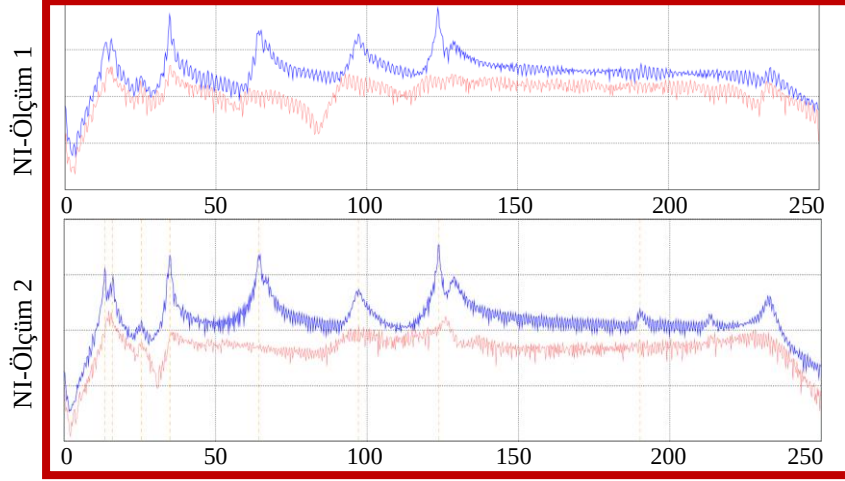


NI sistemiyle alınan ölçümlerin Y ve Z eksenlerine ait ivme grafikleri

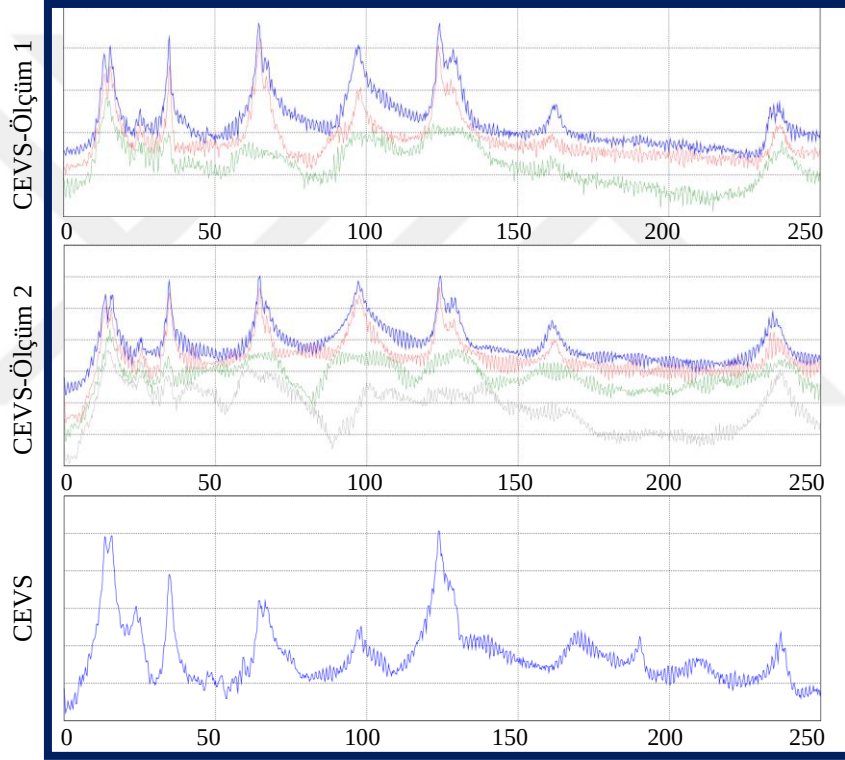


CEVS sistemiyle alınan ölçümlerin X ve Y eksenlerine ait ivme grafikleri

Şekil 38. NI ve CEVS sistemleriyle alınan ivme değerlerinin grafikleri



NI sistemiyle alınan ölçümlere ait tekil değer grafikleri



CEVS sistemiyle alınan ölçümlere ait tekil değer grafikleri

Şekil 39. NI ve CEVS sistemleriyle işlenen verilerin tekil değer grafikleri

Geliştirilen CEVS titreşim ölçüm sisteminin doğrulanması öncelikle 3 katlı çelik model üzerinde yapılan testlerle gerçekleştirilmiştir. Bu modelden alınan ivme verilerinin işlenmesi sonucu elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Çelik modele ait ilk 7 doğal frekans değerleri incelendiğinde her 2 ölçüm sistemine ait elde edilen değerlerin oldukça yakın olduğu ve modele ait frekans değerlerinin yaklaşık 13 ile 125Hz arasında olduğu görülmüştür. Ayrıca ortalama fark değeri %0.27 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2. CEVS ve NI ile elde edilen frekanslar ve karşılaştırmalar

Mod No	Ölçüm Sistemleri ile Çelik Modelden Elde Edilen Deneysel Doğal Frekanslar (Hz)						Ortalama Farklar (%)
	CEVS Ölçüm-1	CEVS Ölçüm-2	CEVS Ortalama	NI Ölçüm-1	NI Ölçüm-2	NI Ortalama	
1	13.4220	13.5450	13.4835	13.4610	13.4720	13.4665	-0.126
2	15.4050	15.7610	15.5830	15.2960	15.9290	15.6125	0.189
3	25.3240	25.4940	25.4090	25.2130	25.5130	25.3630	-0.181
4	34.8610	34.8380	34.8495	34.6750	34.9420	34.8085	-0.118
5	64.4550	64.5200	64.4875	64.0610	64.3010	64.1810	-0.478
6	97.4620	97.6040	97.5330	97.2740	97.1660	97.2200	-0.322
7	124.2620	124.2150	124.2385	123.5620	123.6870	123.6245	-0.497

2.2.2. Farklı Yapılar Üzerinde Gerçekleştirilen Ölçümlerle Yapılan Karşılaştırmalar

CEVS sisteminin doğrulanması literatürde yer alan farklı yapılar üzerinde gerçekleştirilen ölçüm verilerinin kıyaslanması ile tamamlanmıştır. Trabzon'da bulunan yığma minare Büyük Fatih Cami'sinin minaresi ve betonarme olarak inşa edilen Karadeniz Teknik Üniversitesi kampüsü içerisinde bulunan caminin minaresi üzerinde çevresel titreşimler altında belirli zaman aralıklarla CEVS ölçüm sistemiyle titreşim verileri alınmıştır. Alınan bu ölçümlerin sonuçlarıyla daha önce farklı sistemlerle alınan ölçüm sonuçlarıyla kıyaslanmış ve detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Ölçüm sonuçları kıyaslanırken minarelerde zamanla herhangi hasarın oluşmadığı ve çevresel etkilerle bir değişimin olmadığı varsayılmıştır.

- Fatih Cami'sinin Minaresi ve Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Büyük Fatih Cami, Trabzon'un ilk yerleşim alanlarından birisi olan Ortahisar bölgesinin merkezinde yer almaktadır. Yapının inşa tarihi kesin olarak bilinmemekle birlikte, muhtemelen Konstantin tarafından bölgenin idaresine verilen yeğeni Hannibalinus tarafından 914 yılında kilise olarak yaptırıldığı bilinmektedir (Özen vd., 2010). Osmanlı padişahı Fatih Sultan Mehmet'in Trabzon'u fethetmesinden sonra kilise camiye çevrilmiştir (Şekil 40).



Şekil 40. Fatih Cami'sine ve minaresine ait görüntü

Fatih Büyük Cami'nin taşıyıcı duvarlarında, kubbelerinde, tonozlarında ve kemerlerinde taş, tuğla ve harç bulunmaktadır. Caminin minaresinde ise kesme taş ve harç kullanılmıştır. Caminin dış ölçüleri 42.33m x 17.23m olup son cemaat uzunluğu 6.75m'dir. Taş duvar kalınlığı ortalama olarak 110cm'dir. Caminin kuzey cephesinde yer alan minare, çokgen kaideli ve taş külahlı silindirik bir gövdeye sahiptir. Kesme taş malzeme ile inşa edilmiş olan minarenin toplam yüksekliği 35.78m, kaide genişliği ise 2.8m'dir. Minare, Trabzon ilindeki kesme taş minarelerin en zarif örneklerinden birisidir (Çalık, 2017).

Minarenin dinamik karakteristiklerinden olan doğal frekans değerlerini belirlemek için tez kapsamında CEVS titreşim ölçüm sistemiyle Fatih Cami'sinin minaresinde 21.03.2022 ve 06.04.2023 tarihlerinde saat 17.00 civarında yaklaşık 7°C ve 15°C sıcaklıklarda birçok titreşim ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçüm verileri, haberleşme hızı 500000Baud ve saniyede alınan örnek sayısı (Fs) 250 seçilerek yaklaşık 15 dakika sürelerle toplanmıştır. CEVS sistemi minarenin çekirdeğine ve minare iç duvar çeperlerine sıcak silikon yardımıyla sabitlenmiş ve çevresel titreşimler geliştirilen CEVA yazılımıyla toplanmıştır (Şekil 41). Literatürde Fatih Cami'sinin minaresi üzerinde gerçekleştirilen önceki çalışmaya ait deneysel ölçüm düzeneği Şekil 42'de sunulmuştur.



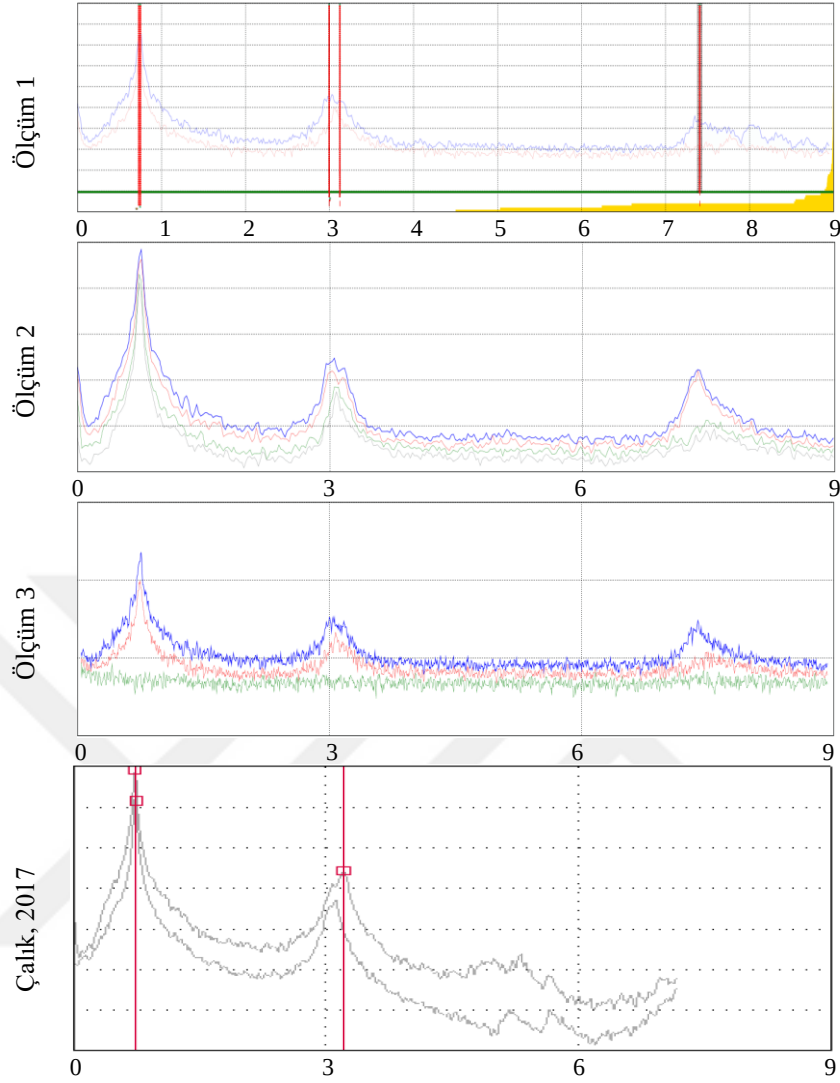
Şekil 41. CEVS sistemi ile alınan ölçüm düzeneklerine ait bazı görüntüler



Şekil 42. Minarede önceki çalışmalara ait bazı görüntüler (Çalık, 2017)

CEVS sistemi ile Büyük Fatih Cami'sinin minaresinden toplanan 3 eksenli (X-Y-Z) titreşim ölçüm verileri ARTeMIS programında 0-25Hz frekans aralığında analiz edilmiştir (Şekil 43).

Analiz sonucu spektral yoğunluk fonksiyonuna ait tekil değer grafikleri elde edilmiştir. GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak minareye ait deneysel doğal frekanslar bulunmuştur. Analizlere ait bazı tekil değer grafikleri ile önceden yapılmış çalışmaya ait grafik Şekil 43'te birlikte verilmiştir. Bu grafiklerde yatay eksenler frekanslar değerlerini, düşey eksenler ise decibel (dB) cinsinden genlikleri göstermektedir.



Şekil 43. Fatih Cami'sinin minaresine ait tekil değer grafiklerinden bazıları

Geliştirilen CEVS titreşim ölçüm sisteminin doğrulanması için minarenden alınan ölçüm sonuçları Tablo 3'teki gibi olup daha önceki çalışmalara ait verilerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işlemi yapılırken zaman içinde minarede herhangi bir hasarın oluşmadığı ve çevresel etmenlerle değişmediği varsayılmıştır. Tablo 3'te ilk 3 moda ait deneysel doğal frekans değerleri verilmiş ve bu değerler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda elde edilen farklar sırasıyla 0.00813, -0.02027 ve 0.02619 olarak bulunmuştur. CEVS sistemiyle elde edilen deneysel doğal frekans değerlerinin diğer çalışmadaki frekans değerlerine yakın olduğu ve kıyaslanan bu değerler arasında mutlak değerce ortalama farkın %1.82 olduğu görülmüştür.

Tablo 3. Fatih Cami'sinin minaresine ait doğal frekanslar ve karşılaştırmalar

Ölçüm No	Tarih	Doğal Frekanslar (Hz)			
		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod
CEVS Ölçüm 1	21.03.2022	0.731	0.752	3.126	3.138
CEVS Ölçüm 2	21.03.2022	0.732	0.757	3.113	3.162
CEVS Ölçüm 3	21.03.2022	0.732	0.755	3.128	3.143
CEVS Ölçüm 4	10.04.2023	0.732	0.757	3.125	3.149
CEVS-Ortalama		0.732	0.755	3.123	3.148
Çalık, 2017 Ölçüm Sonuçları		0.738	0.740	3.207	-
Çalık, 2017-CEVS Farklar (%)		0.813	-2.027	2.619	-

- KTÜ Kampüsü İçindeki Caminin Minaresi ve Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) içindeki cami 1979 yılında cami derneği tarafından betonarme olarak inşa edilmiştir. Toplam 225m² iç alana sahip olan caminin kapasitesi 350 kişidir. Bu caminin iki şerefeli bir minaresi mevcuttur (Şekil 44) (Bayraktar vd., 2009; Bayraktar vd., 2010). Minare caminin yapılmasından 11 yıl sonra yapılmıştır. Caminin kuzeydoğusunda camiden ayırık olarak bulunan minareye güneyindeki ahşap kapıdan ulaşılmaktadır. Minare betonarme olarak inşa edilmiş olup uzun ve ince geometrisiyle narin bir yapıya sahiptir.



Şekil 44. KTÜ kampüsünde bulunan camiye ve minareye ait görüntü

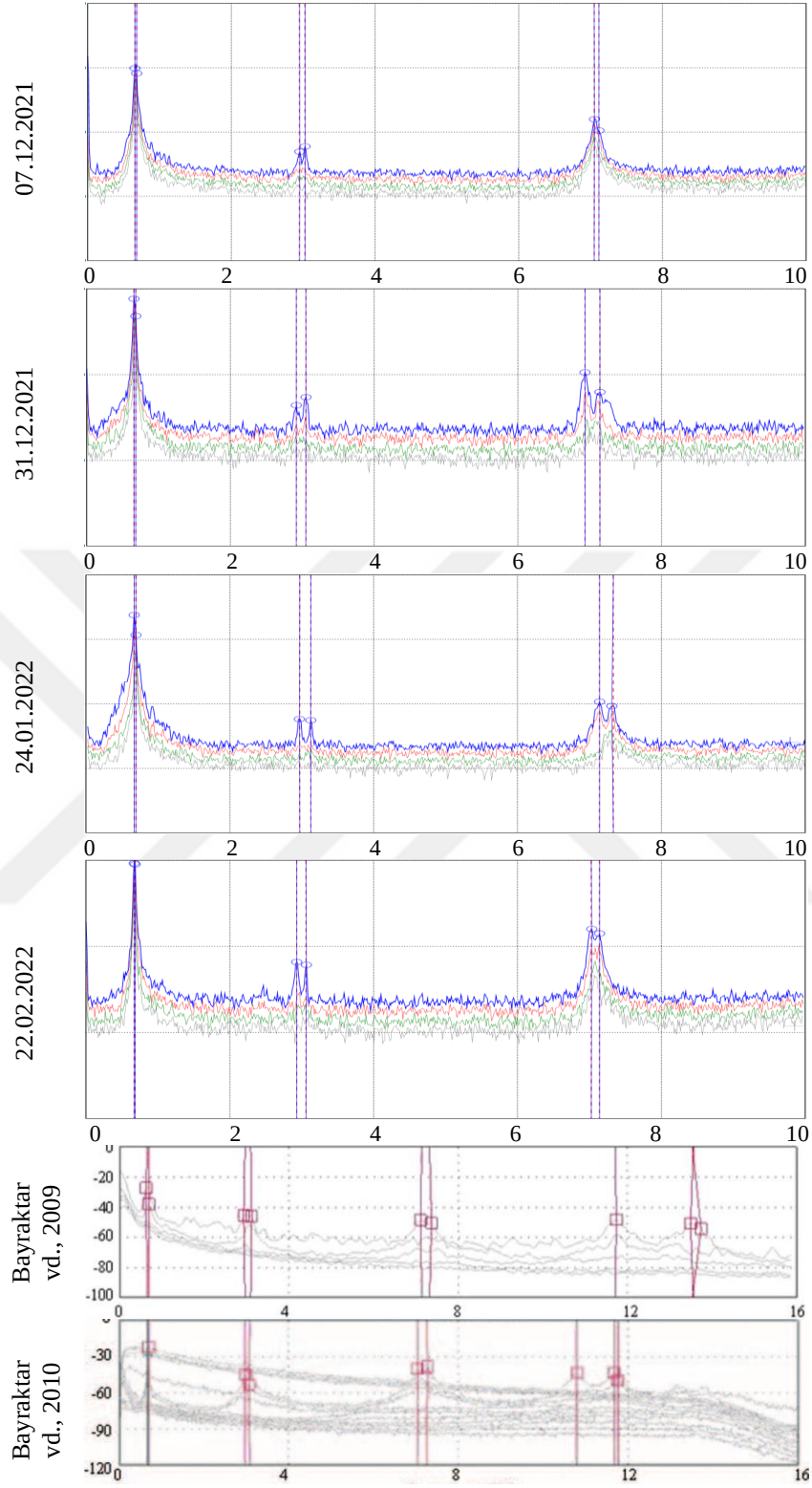
Minarenin toplam boyu yaklaşık olarak 53.5m ve minarenin iç kısmında yer alan taş sütunun (çekirdeğin) çapı 23cm'dir. Çekirdeğin etrafında basamaklarının ortalama yüksekliği 22.84cm olan merdiven bulunmaktadır. Merdivenin iç ile dış yarıçapları sırasıyla

11.5cm ile 67.5cm ve toplamda 141 adet merdiven basamağı bulunmaktadır. Minarenin çevresel titreşim ölçümleri geliştirilen CEVS titreşim ölçüm sistemi yardımıyla farklı zamanlarda gerçekleştirilmiş ve bu ölçümlere ait ölçüm düzeneği örneklerinden bazıları aşağıda verilmiştir (Şekil 45). CEVS ölçüm sistemi minarenin çekirdeğine, merdivenlerden birine ya da iç çepere sıcak silikon yardımıyla yerleştirilmiştir.



Şekil 45. Minarede bazı ölçüm düzenekleri

Titreşim ölçümlerinden elde edilen verilerin işlenmesiyle minareye ait deneysel doğal frekanslar belirlenmiştir. Sinyal işlemeden elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonları ve tekil değerler Şekil 46’da verilmiştir. Grafiklerde dikey eksen genliği yatay eksen ise Hz cinsinden frekansları temsil etmektedir (Aymelek, 2022).



Şekil 46. Minarenin tekil değer grafiklerinden bazıları

Geliştirilen CEVS titreşim ölçüm sisteminin doğrulanması için betonarme minareden alınan ölçüm sonuçları Tablo 4'teki gibi olup daha önceki çalışmalara ait verilerle

karşılaştırılmıştır. Tablo 4'te görüldüğü üzere ilk 6 mod değeri önceki çalışmalarla kıyaslandığında oldukça yakın değerlere sahip olduğu görülmüş ve farkların mutlak değerce ortalaması sırasıyla %0.85 ve %1.29 olarak bulunmuştur.

Tablo 4. Minarenin deneysel doğal frekansları ve karşılaştırmalar

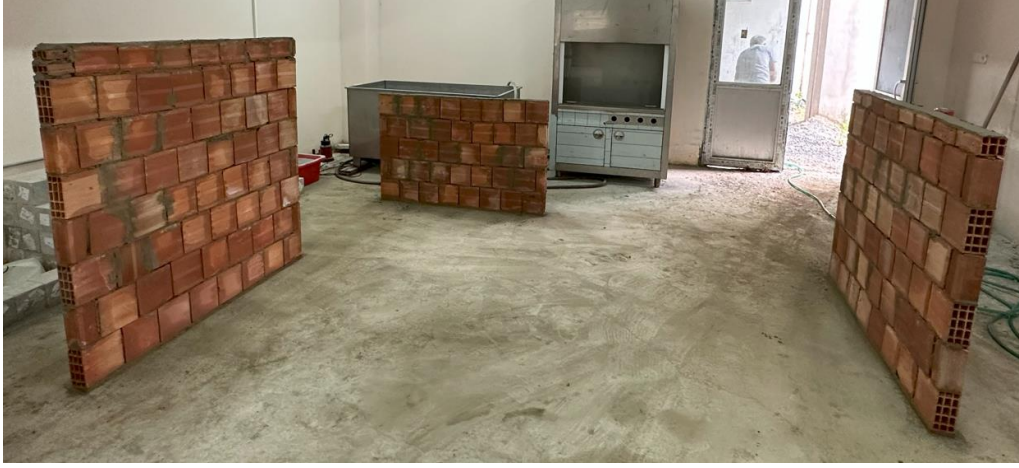
Ölçüm No	Tarih	Deneysel Doğal Frekanslar (Hz)					
		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod	6. Mod
1	07.12.2021	0.659	0.684	2.949	3.026	7.068	7.117
2	17/12/2021	0.664	0.684	2.944	3.132	7.012	7.384
3	31/12/2021	0.659	0.684	2.917	3.050	6.934	7.140
4	12/01/2022	0.655	0.684	2.882	3.028	6.911	7.117
5	12/01/2022	0.656	0.671	2.892	3.047	6.913	7.106
6	12/01/2022	0.659	0.684	2.883	3.035	6.905	7.086
7	24/01/2022	0.673	0.696	2.971	3.127	7.141	7.332
8	22/02/2022	0.671	0.684	2.929	3.059	7.025	7.141
9	08/03/2022	0.654	0.671	2.903	3.087	6.995	7.226
10	22/03/2022	0.680	0.696	3.006	3.146	7.202	7.336
11	18/04/2022	0.659	0.684	2.911	3.081	6.970	7.214
12	09/06/2022	0.647	0.680	2.847	3.049	6.897	7.178
13	26/05/2023	0.659	0.684	2.930	3.149	7.007	7.397
CEVS-Ortalama		0.661	0.684	2.920	3.078	6.998	7.213
Bayraktar vd., 2009		0.660	0.670	2.960	3.070	7.040	7.260
Bayraktar vd., 2010		0.660	0.680	2.980	3.100	7.170	7.350
2009-CEVS Farklar (%)		-0.152	-2.090	1.351	-0.261	0.597	0.647
2010-CEVS Farklar (%)		-0.152	-0.588	2.013	0.710	2.399	1.864

2.3. Tuğla Duvar Model Çalışmaları

Sıcaklık ve nem gibi çevresel etkilerin frekanslar üzerindeki etkisini belirlemeye yönelik ön çalışma olarak laboratuvar ortamında oluşturulan 3 farklı tuğla model üzerinde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında tuğla modeller üzerinde çevresel titreşim testleri uygulanmış ve ivme değerleri sayısal olarak elde edilmiştir. İvme değerleri alınırken eş zamanlı olarak sıcaklık, nem, doygunluk ve hacim parametreleri de ölçülmüştür. Daha sonra modellerden elde edilen verilerle regresyon analizleri yapılmıştır. Yığma duvarlarla ilgili detaylı bilgiler ve yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Laboratuvar ortamında yapılan modellere ait geometrik özellikler Tablo 5'te detaylı verilmiş ve tamamlanmış hallerine ait görüntüler Şekil 47'de sunulmuştur.



Şekil 47. Tuğla duvar modeller (soldan sağa 1., 2. ve 3. model)

Tuğla Duvar Model-1 (TDM-1), Tuğla Duvar Model-2 (TDM-2) ve Tuğla Duvar Model-3 (TDM-3) olarak adlandırılan modeller 8.5cm kalınlığına sahip ince delikli tuğladan yükseklikleri farklı olacak şekilde inşa edilmiştir. Farklı yüksekliklere sahip bu modellere 28 günlük kür işlemi uygulanmıştır.

Tablo 5. Tuğla duvar modellere ait geometrik bilgiler

Modelin Adı	Genişlik (m)	Yükseklik (m)	Kalınlık (m)	Hacim (m ³)
TDM-1	1.525	1.500	0.085	0.194437500
TDM-2	1.535	0.985	0.085	0.128517875
TDM-3	1.520	1.255	0.085	0.162146000

2.3.1. TDM-1'in Ölçümleri

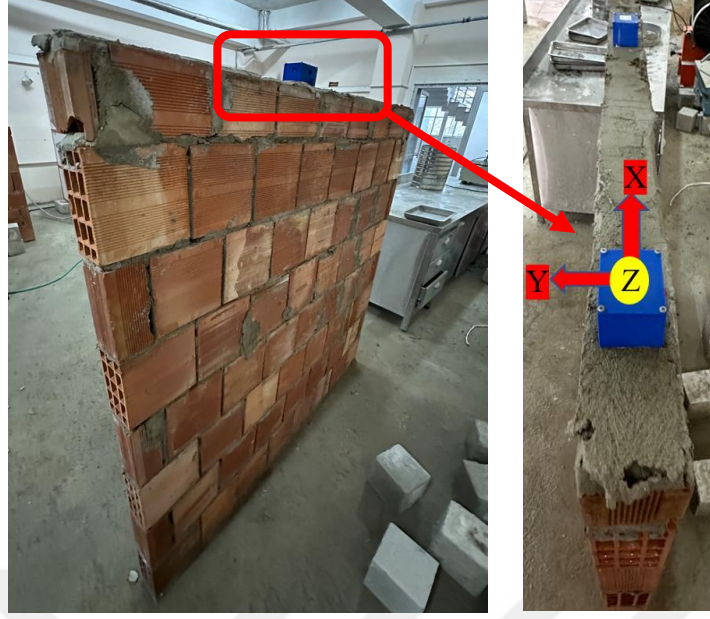
Modeller kür işlemine tabi tutulup dayanım kazandıktan sonra modeller üzerinde deneysel testler gerçekleştirilmiştir. TDM-1'in dinamik karakteristiklerinden olan doğal frekansları belirlemek için çevresel titreşim testiyle titreşim verileri toplanmış ve analiz edilmiştir. Titreşim ölçümleri esnasında sıcaklık ile nem değerleri de ölçülmüştür. Deneysel ölçümler esnasında geliştirilen yüksek hassasiyetli CEVS titreşim ölçüm sistemi ve dijital sıcaklık-nem ölçer kullanılmıştır. CEVS titreşim ölçüm sistemi model üzerine sıcak silikon eritilerek sabitlenmiş ve titreşim ölçümleri rastgele oluşturulan titreşimler altında modelin 3 farklı durumu olarak tanımlanan “kuru, ıslak ve extra doygun (doygun)” durumları için yapılmıştır (Şekil 48).



Şekil 48. TDM-1'in kuru, ıslak ve doygun durumları için ÇTT'sine ait görüntü

Titreşim ölçümleri saniyede 250/500/1000Hz örnekleme yapılarak 4-15 dakika aralığında toplamda 42 farklı ölçüm verisi kaydedilmiştir. Örnekleme frekansı (F_s) 250Hz olduğunda elde edilen veriler maksimum 0-125Hz frekans aralığında analiz edilebilmekte, 500Hz olduğunda elde edilen veriler maksimum 0-250Hz frekans aralığında analiz edilebilmekte, 1000Hz olduğunda elde edilen veriler maksimum 0-500Hz frekans aralığında analiz edilebilmektedir. Tuğla model için yapılan literatür taramasından seçilen örnekleme frekanslarının yeterli olduğu değerlendirilmiştir.

CEVS sistemi tüm ölçümlerde yapının en üst noktasındaki rastgele bir yere sıcak silikon yardımıyla sabitlenmiş ve CEVS sisteminde kullanılan yüksek hassasiyetli 3 eksenli ivmeölçer sensörüyle titreşim verileri toplanmıştır (Şekil 49). Modelin üzerine yatay olarak yerleştirilen CEVS ölçüm sisteminde yatay eksen (sistemin uzun kenarı doğrultusunda) X eksen, ona dik olan diğer yatay eksen (sistemin kısa kenarı doğrultusunda) Y eksen ve bu 2 eksene dik olan eksen Z eksenidir.



Şekil 49. TDM-1 üzerinde CEVS yerleşim düzeni ve eksenleri

TDM-1’den alınan ivme, sıcaklık, nem ve basınç değerleri ölçümden önce yapılan parametre ayarlarıyla birlikte “.txt” ya da “.csv” uzantılı olarak aynı veri dosyasına kaydedilmiştir. Ayrıca ölçüm başlamadan önce bağlanan CEVS ölçüm sistemi “Test (T)” butonu ile canlı olarak anlık görüntülenmiş ve sistemin veri alıp almadığı incelenmiştir. Bu sayede bağlantıda herhangi bir aksamanın olmaması sağlanmış ve ölçüm sağlıklı bir şekilde yapılmıştır. CEVS sistemini bilgisayar üzerinden kontrolünü ve çalışmasını sağlayan CEVA Data Logger yazılımıyla toplanan sinyal örnekleri ve diğer parametreler görüntülenerek kaydedilmiştir (Şekil 50).

TDM-1’in doğal frekanslarının nem ve sıcaklığa bağlı olarak değişimleri incelenmek istendiğinden ölçüm sırasında TDM-1’in sıcaklık ile nem değerleri Şekil 51’de verilen dijital ölçüm cihazıyla belirlenmiştir. TDM-1 için yapılan testlerin sonucunda titreşim ölçümlerinin sayıları ile tarihleri, dakika cinsinden ölçüm süreleri, G Range ($\pm 2g$, $\pm 4g$ veya $\pm 8g$), Hz cinsinden örnekleme frekansı (F_s), sıcaklık değerleri, nem değerleri ve görsel durum gibi değerler Tablo 6’da verilmiştir.



Şekil 50. CEVA Data Logger yazılımında ölçüm sonucu alınan bir görüntü



Şekil 51. TDM-1'in sıcaklık ve nem ölçümü

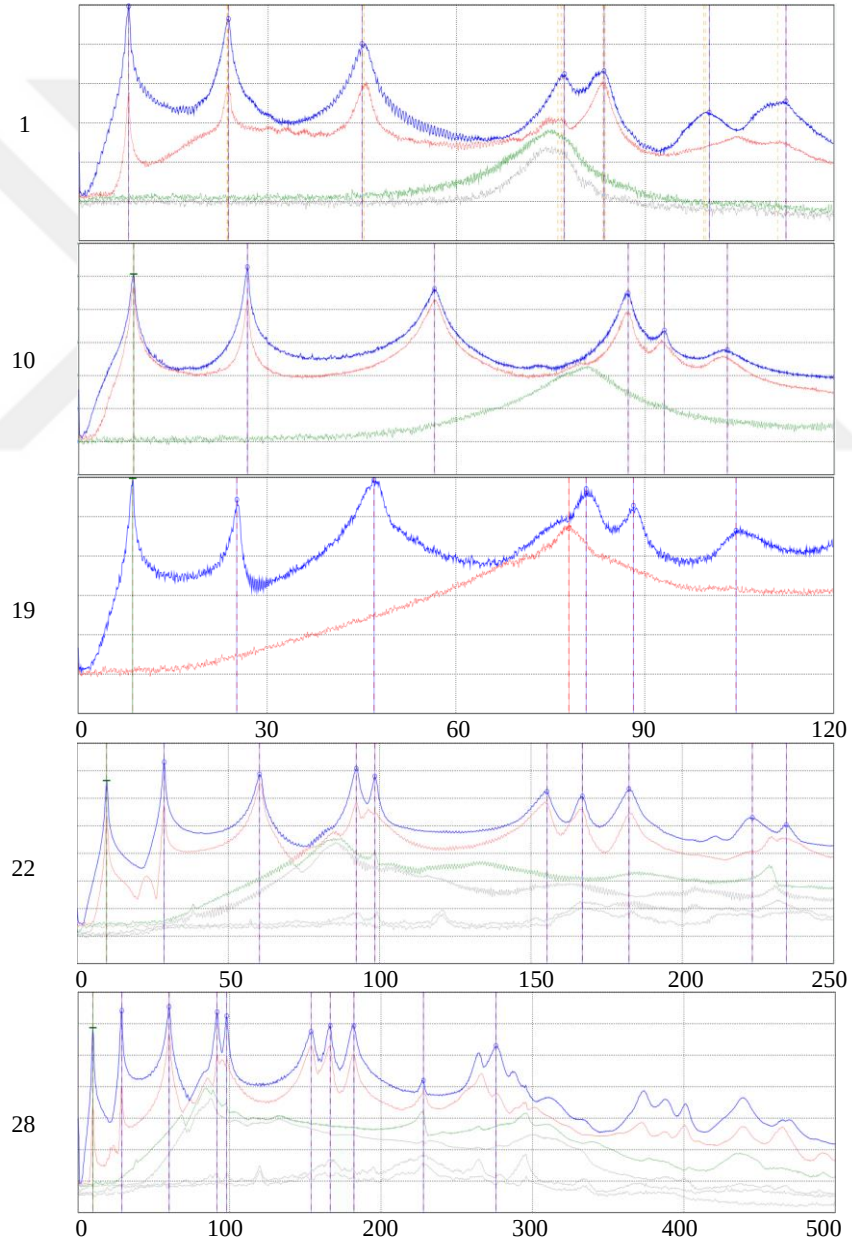
Tablo 6. TDM-1’de gerçekleştirilen ölçümlere ait bilgiler

Ölçüm No	Tarih	Süre (dk)	G	Fs (Hz)	Bağıl Nem (%)	Sıcaklık (°C)	Durum
1	19.06.2023	10	2	250	87	46.0	Kuru
2	19.06.2023	5	2	250	87	45.8	Kuru
3	19.06.2023	5	2	250	87	45.2	Kuru
4	19.06.2023	5	2	1000	87	45.2	Kuru
5	19.06.2023	10	2	250	87	25.3	Islak
6	19.06.2023	5	2	250	86	24.9	Islak
7	19.06.2023	5	2	250	85	24.8	Islak
8	20.06.2023	10	2	1000	99	19.3	Islak
9	20.06.2023	10	2	250	98	19.2	Islak
10	23.06.2023	10	2	250	85	19.1	Islak
11	23.06.2023	5	2	250	86	19.1	Islak
12	23.06.2023	10	2	1000	95	19.0	Islak
13	26.07.2023	5	2	250	86	21.1	Islak
14	26.07.2023	10	2	500	87	21.0	Islak
15	10.07.2023	10	2	250	85	20.9	Doygun
16	10.07.2023	5	2	250	84	20.8	Doygun
17	10.07.2023	10	2	1000	84	20.8	Doygun
18	1.08.2023	5	2	250	74	40.2	Kuru
19	1.08.2023	10	2	250	74	40.2	Kuru
20	1.08.2023	15	2	1000	74	40.2	Kuru
21	4.09.2023	5	2	250	81	22.9	Doygun
22	4.09.2023	5	2	500	84	22.9	Doygun
23	4.09.2023	5	2	1000	84	22.7	Doygun
24	4.09.2023	10	2	1000	87	22.9	Doygun
25	4.09.2023	10	2	250	91	22.9	Doygun
26	4.09.2023	5	2	250	91	22.7	Doygun
27	4.09.2023	5	2	500	87	22.9	Doygun
28	4.09.2023	5	4	1000	91	22.8	Doygun
29	4.09.2023	5	4	250	92	22.9	Doygun
30	4.09.2023	5	8	250	92	22.8	Doygun
31	4.09.2023	5	8	1000	94	22.8	Doygun
32	4.09.2023	5	2	250	99	23.0	Islak
33	4.09.2023	5	2	1000	98	23.0	Islak
34	4.09.2023	5	2	500	99	23.1	Islak
35	4.09.2023	5	2	250	99	23.0	Islak
36	23.10.2023	5	2	250	65	19.6	Doygun
37	23.10.2023	4	2	250	66	19.2	Doygun
38	23.10.2023	5	2	250	70	18.2	Doygun
39	23.10.2023	6	2	250	71	18.1	Doygun
40	23.10.2023	5	2	250	73	17.8	Doygun
41	23.10.2023	4	2	250	73	17.7	Doygun
42	23.10.2023	10	2	250	74	17.7	Doygun
Maksimum		15	8	1000	99	46.0	-
Minimum		4	2	250	65	17.7	-
Ortalama		7	2	452	85	25.0	-

TDM-1 için tüm ölçümler laboratuvar ortamında minimum 17.7°C sıcaklık ile %65 bağıl nem ve maksimum 46°C sıcaklık ile %99 bağıl nem aralığında gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen titreşim ölçüm sistemiyle toplanan ivme verileri ARTeMIS yazılımı kullanılarak 0-125Hz, 0-250Hz ya da 0-500Hz frekans aralığında çözünürlük değeri (resolution) 1024 veya 2048 seçilerek ayrıştırılmıştır. Bu ayrıştırma işlemi sonucu spektral

yoğunluk fonksiyonları ve tekil değer grafikleri elde edilmiştir. Aşağıdaki şekillerde 1. düşey eksen ölçüme ait ölçüm numarasını, 2. düşey eksen ölçüme ait tekil değer diyagramlarını ve yatay eksen ise TDM-1'e ait deneysel doğal frekans değerlerini ifade etmektedir. Ayrıca tekil değer diyagramlarında düşey eksen grafiklerdeki genliklerin dB cinsinden gösterimidir. Toplanan 42 ölçüme ait 42 tane grafik elde edilmiş olup aşağıdaki şekilde bunlardan birkaçı sunulmuştur (Şekil 52). TDM-1 üzerinde geliştirilen CEVS titreşim ölçüm sistemiyle alınan verilerin frekans tanım alanındaki yöntemle ayrıştırma sonucu elde edilen tekil değer grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle modelin frekansları belirlenmiştir (Tablo 7).



Şekil 52. TDM-1'in tekil değer grafiklerinden bazıları

Tablo 7. TDM-1'in deneysel doğal frekansları

Ölçüm No	Tarih	Deneysel Doğal Frekanslar (Hz)				
		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
1	19.06.2023	7.840	23.652	45.251	76.942	83.254
2	19.06.2023	8.081	23.767	45.786	77.198	83.895
3	19.06.2023	8.136	24.207	47.723	76.914	84.855
4	19.06.2023	8.073	24.141	47.312	78.548	84.744
5	19.06.2023	7.972	23.941	47.960	78.694	84.247
6	19.06.2023	8.118	24.414	49.927	79.224	85.327
7	19.06.2023	7.996	24.414	50.171	78.674	85.205
8	20.06.2023	9.033	26.611	56.885	81.055	91.309
9	20.06.2023	8.972	26.489	56.702	80.994	91.370
10	23.06.2023	8.728	26.794	56.519	87.280	93.018
11	23.06.2023	8.667	26.773	56.641	87.219	92.590
12	23.06.2023	8.789	26.855	56.641	87.158	93.262
13	26.07.2023	9.216	28.076	59.265	90.088	96.619
14	26.07.2023	9.155	27.710	57.739	89.478	95.459
15	10.07.2023	9.766	28.564	61.890	92.590	98.633
16	10.07.2023	9.827	28.625	62.195	92.712	98.450
17	10.07.2023	9.766	28.564	62.012	92.773	98.389
18	1.08.2023	8.789	25.635	47.913	77.026	82.825
19	1.08.2023	8.667	25.208	46.997	80.688	88.196
20	1.08.2023	8.789	25.391	48.096	81.787	88.867
21	4.09.2023	9.888	28.931	60.913	92.773	98.877
22	4.09.2023	9.766	28.809	60.303	92.285	98.389
23	4.09.2023	9.766	28.809	60.547	92.285	98.633
24	4.09.2023	9.818	28.703	60.547	92.900	98.350
25	4.09.2023	9.766	28.687	60.425	91.919	98.267
26	4.09.2023	9.766	28.564	60.303	91.675	98.022
27	4.09.2023	9.766	28.564	60.059	91.533	98.145
28	4.09.2023	9.766	28.809	60.059	91.797	98.145
29	4.09.2023	9.766	28.687	59.814	91.797	98.145
30	4.09.2023	9.766	28.687	60.181	91.553	98.022
31	4.09.2023	9.766	28.320	59.570	91.309	98.145
32	4.09.2023	9.521	27.954	58.960	89.722	95.703
33	4.09.2023	9.277	27.832	58.594	89.844	95.703
34	4.09.2023	9.521	27.832	58.350	89.600	95.703
35	4.09.2023	9.277	27.710	57.983	89.844	95.825
36	23.10.2023	9.766	29.419	62.500	95.093	101.318
37	23.10.2023	9.766	29.541	62.256	95.581	101.074
38	23.10.2023	9.766	29.419	62.256	95.581	101.074
39	23.10.2023	9.766	29.541	62.378	95.459	101.318
40	23.10.2023	9.888	29.541	62.378	95.459	101.196
41	23.10.2023	9.766	29.297	62.256	95.337	101.318
42	23.10.2023	9.644	29.297	62.378	95.093	100.830
Maksimum		9.888	29.541	62.500	95.581	101.318
Minimum		7.840	23.652	45.251	76.914	82.825
Ortalama		9.237	27.447	57.063	88.226	94.588
Standart Sapma		0.667	1.883	5.615	6.352	5.980
*Min-Ort. Değişim (%)		15.120	13.827	20.700	12.821	12.436
**Maks-Ort. Değişim (%)		7.052	7.628	9.529	8.337	7.115
Ortalama Değişim (%)		11.086	10.728	15.114	10.579	9.776

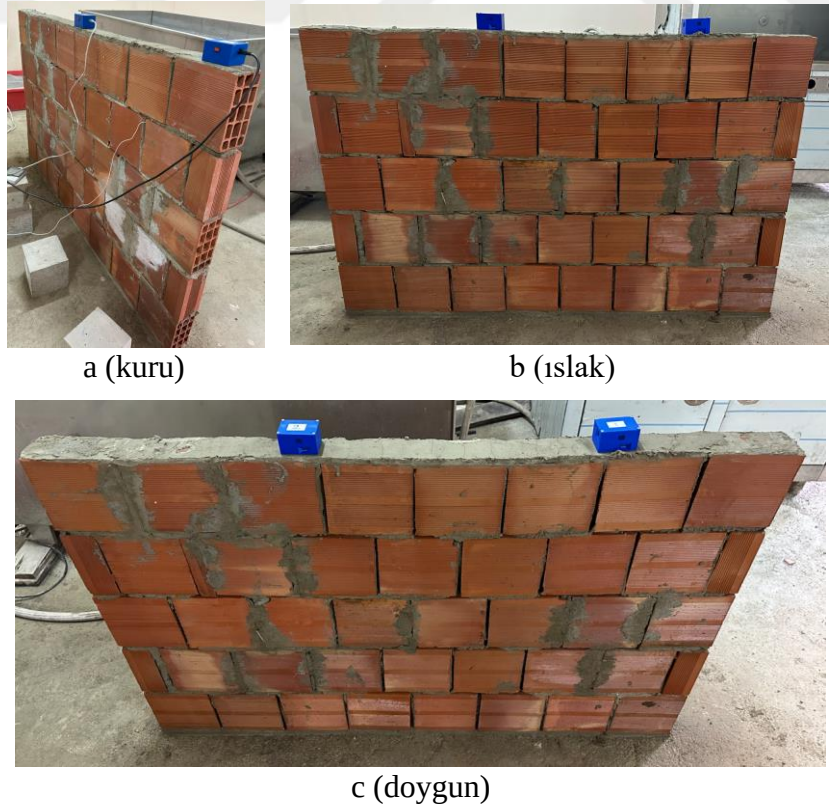
*Minimum-ortalama değişim yüzdesi mutlak değerce $100 \cdot (\text{min-ort}) / \text{ort}$ ile hesaplanmıştır.

**Maksimum-ortalama değişim yüzdesi $100 \cdot (\text{maks-ort}) / \text{ort}$ ile hesaplanmıştır.

TDM-1'in ölçümün gerçekleştirildiği esnada kuru, ıslak ve doymun durumlarına göre frekanslar, modelin farklı durumları için belirlenmiştir. Elde edilen değerler Tablo 7'de verilmiş ve tablonun alt kısmında doğal frekansların maksimumu, minimumu, ortalaması, standart sapması ve mutlak değerce değişim yüzdeleri sunulmuştur. Yapılan ölçümlerde TDM-1'in ilk 5 moduna ait deneysel doğal frekanslarının tamamı %100 oranında tespit edilmiştir. Bu veriler değerlendirildiğinde frekanslardaki ortalama değişimin %9.776 ile en az 5. modda ve %15.114 ile en çok 3. modda olduğu görülmüştür.

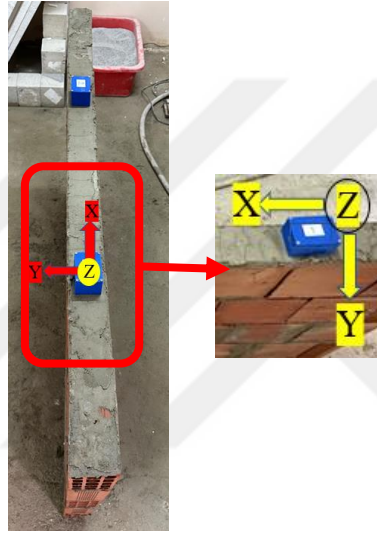
2.3.2. TDM-2'nin Ölçümleri

TDM-2'nin doğal frekanslarını elde etmek amacıyla çevresel titreşim testleri geliştirilen yüksek hassasiyetli CEVS titreşim ölçüm sistemiyle gerçekleştirilmiş ve titreşim ölçümleri alınırken sıcaklık ile nem değerleri de dijital sıcaklık-nem ölçer kullanılarak ölçülmüştür. CEVS titreşim ölçüm sistemi model üzerine sıcak silikon eritilerek sabitlenmiş ve titreşim ölçümleri rastgele oluşturulan titreşimler altında modelin “kuru, ıslak ve extra doymun (doymun)” durumları için toplanmıştır (Şekil 53).



Şekil 53. TDM-2'nin kuru, ıslak ve doymun durumları için ÇTT'sine ait görüntü

Titreşim ölçüm verileri saniyede 250/500/1000Hz örnekleme alınarak 2-20 dakika aralığında toplamda 39 farklı ölçüm verisi toplanarak kaydedilmiştir. Ayrıca ölçümlerde G Range parametresi $\pm 2g$ olarak seçilmiştir. CEVS sistemi tüm ölçümlerde tuğla modelin en üst noktasındaki rastgele bir yere sıcak silikon yardımıyla sabitlenmiştir (Şekil 54). CEVS sisteminde kullanılan yüksek hassasiyetli 3 eksenli ivmeölçer sensörü sayesinde titreşim verileri belirlenmiştir. Modelin üzerine yatay olarak yerleştirilen CEVS ölçüm sisteminde yatay eksen X, ona dik olan diğer yatay eksen Y ve yatay eksenlere dik olan düşey eksen de Z eksenidir.



Şekil 54. TDM-2 üzerinde CEVS yerleşim düzeni ve eksenleri

TDM-2 üzerinden toplanan veriler yapılan parametre ayarlarıyla birlikte “.txt” ya da “.csv” uzantılı olarak veri dosyasına kaydedilmiştir. TDM-2’nin doğal frekanslarının sıcaklık ve neme bağlı olarak değişimleri için ölçüm sırasında TDM-2’nin sıcaklık değerleri ile nem değerleri Şekil 55’te verilen dijital ölçüm cihazıyla belirlenmiştir.



Şekil 55. TDM-2’nin sıcaklık ve nem ölçümü

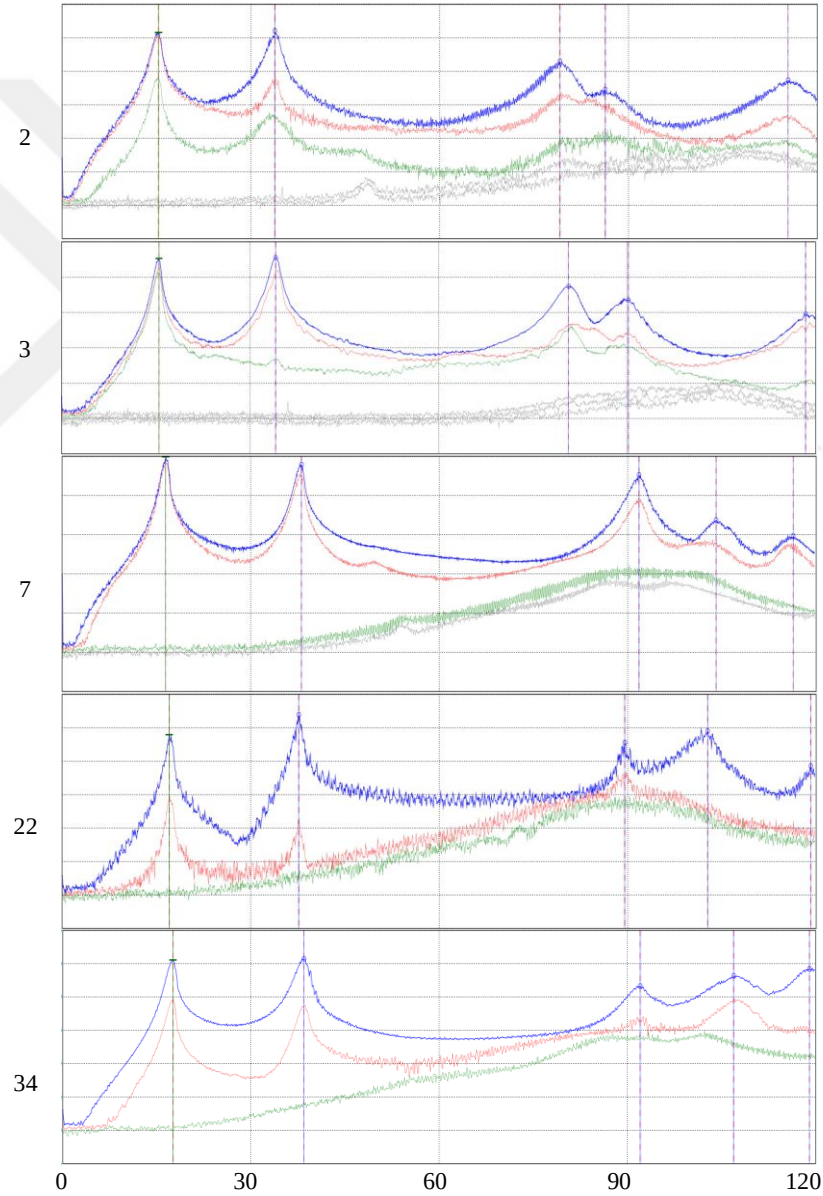
TDM-2 için yapılan testlerin sonucunda titreşim ölçümlerinin sayıları ile tarihleri, dakika cinsinden ölçüm süreleri, G Range, örnekleme frekansı, bağıl nem ile sıcaklık değerleri ve görsel durum gibi değerleri aşağıda verilmiştir (Tablo 8).

Tablo 8. TDM-2’de gerçekleştirilen ölçümlere ait bilgiler

Ölçüm No	Tarih	Süre (dk)		Fs (Hz)	Bağıl Nem (%)	Sıcaklık (°C)	Durum
1	15.06.2023	10	2	500	81	37.8	Kuru
2	15.06.2023	10	2	250	81	37.8	Kuru
3	15.06.2023	10	2	250	85	21.5	Islak
4	15.06.2023	20	2	250	85	21.5	Islak
5	15.06.2023	5	2	250	85	21.5	Islak
6	15.06.2023	10	2	250	85	21.5	Islak
7	23.06.2023	10	2	250	81	18.9	Islak
8	23.06.2023	5	2	250	83	18.9	Islak
9	23.06.2023	10	2	1000	84	18.9	Islak
10	26.07.2023	10	2	250	84	18.8	Islak
11	26.07.2023	5	2	250	84	18.8	Islak
12	26.07.2023	10	2	500	85	18.9	Islak
13	10.07.2023	5	2	250	89	20.6	Doygun
14	10.07.2023	10	2	250	88	20.6	Doygun
15	10.07.2023	5	2	1000	89	20.6	Doygun
16	2.08.2023	5	2	250	92	67.2	Kuru
17	2.08.2023	10	2	250	91	50.0	Kuru
18	2.08.2023	5	2	1000	91	40.2	Kuru
19	2.08.2023	10	2	1000	91	35.0	Kuru
20	2.08.2023	5	2	250	91	22.8	Kuru
21	2.08.2023	10	2	250	90	22.8	Kuru
22	16.08.2023	5	2	250	74	22.6	Doygun
23	16.08.2023	5	2	250	78	22.7	Doygun
24	16.08.2023	5	2	1000	78	22.7	Doygun
25	16.08.2023	5	2	500	86	22.8	Doygun
26	16.08.2023	10	2	500	86	22.8	Doygun
27	16.08.2023	5	2	1000	90	22.8	Doygun
28	16.08.2023	2	2	250	92	23.0	Islak
29	16.08.2023	5	2	250	92	23.1	Islak
30	16.08.2023	2	2	1000	92	23.1	Islak
31	16.08.2023	5	2	500	93	23.0	Islak
32	16.08.2023	5	2	1000	93	23.0	Islak
33	16.08.2023	10	2	250	93	23.0	Islak
34	23.10.2023	5	2	250	65	19.6	Doygun
35	23.10.2023	4	2	250	66	19.2	Doygun
36	23.10.2023	3	2	250	70	18.2	Doygun
37	23.10.2023	5	2	250	71	18.0	Doygun
38	23.10.2023	4	2	250	72	18.0	Doygun
39	23.10.2023	5	2	250	73	17.9	Doygun
Maksimum		20	2	1000	93	67.2	-
Minimum		2	2	250	65	17.9	-
Ortalama		7	2	436	84	25.5	-

TDM-2 için tüm ölçümler laboratuvar ortamında minimum 17.9°C sıcaklık ile %65 bağıl nem ve maksimum 67.2°C sıcaklık ile %93 bağıl nem aralığında gerçekleştirilmiştir.

Titreşim ölçüm sistemiyle toplanan ivme verileri ARTeMIS yazılımı kullanılarak farklı frekans aralığında ve çözünürlük değeri 1024, 2048 veya 4096 seçilerek ayrıştırılmıştır. Bu ayrıştırma işlemi sonucunda toplanan 39 ölçüme ait 39 tane tekil değer diyagramları elde edilmiş ve bunlardan birkaçı sunulmuştur. (Şekil 56). Ayrıca şekilde 1. düşey eksen ölçüme ait ölçüm numarasını, 2. düşey eksen ölçüme ait tekil değer diyagramlarını ve yatay eksen ise TDM-2'ye ait doğal frekansları ifade etmektedir. Tekil değer grafiklerinde pik seçme metodu kullanılarak TDM-2'nin frekansları belirlenmiştir (Tablo 9). Şekil 56'da gösterilen yatay eksen 0-120Hz arasında sınırlandırılmıştır.



Şekil 56. TDM-2'nin tekil değer grafiklerinden bazıları

Tablo 9. TDM-2'nin deneysel doğal frekansları

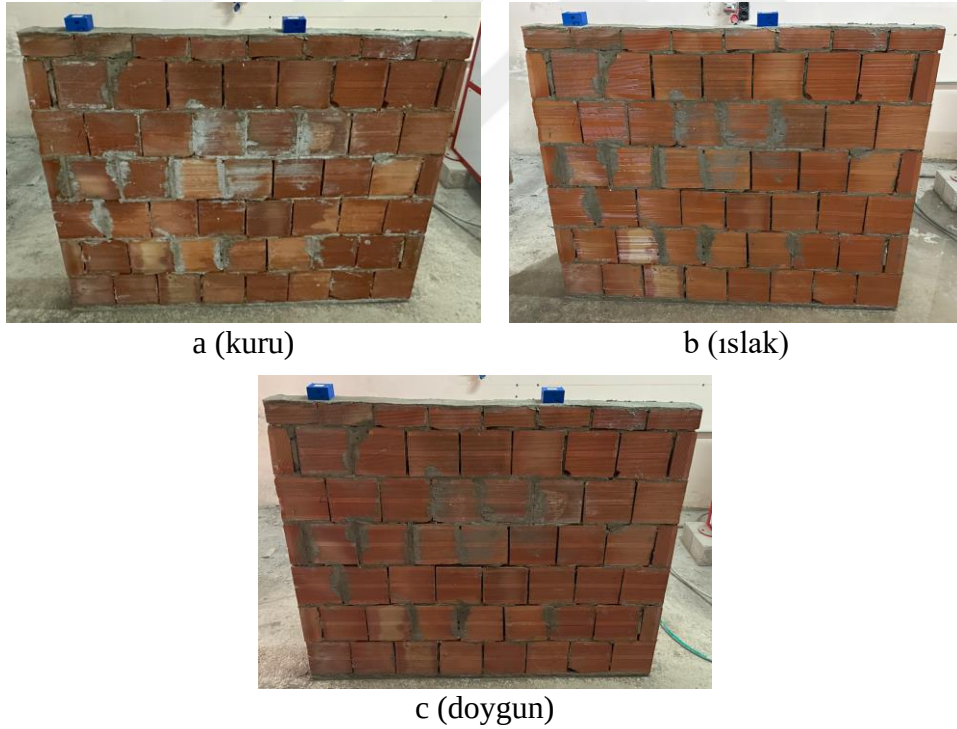
Ölçüm No	Tarih	Deneysel Doğal Frekanslar (Hz)			
		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod
1	15.06.2023	15.519	34.544	80.797	85.576
2	15.06.2023	15.320	33.813	79.102	86.304
3	15.06.2023	15.503	34.058	80.688	90.210
4	15.06.2023	15.564	34.241	81.360	89.905
5	15.06.2023	15.625	34.546	81.543	89.783
6	15.06.2023	15.808	34.607	82.092	89.783
7	23.06.2023	16.479	38.086	91.797	104.065
8	23.06.2023	16.418	37.964	91.919	103.943
9	23.06.2023	16.848	38.640	91.923	107.745
10	26.07.2023	16.541	38.147	91.431	104.492
11	26.07.2023	16.724	37.964	91.248	103.516
12	26.07.2023	16.479	37.476	90.942	103.760
13	10.07.2023	17.883	39.917	96.069	112.366
14	10.07.2023	18.005	39.978	96.375	112.305
15	10.07.2023	17.822	40.039	96.436	112.305
16	2.08.2023	13.306	30.823	67.993	78.613
17	2.08.2023	13.916	32.166	75.012	79.590
18	2.08.2023	14.893	33.203	74.219	83.008
19	2.08.2023	14.648	32.959	75.928	83.984
20	2.08.2023	15.137	33.691	76.843	86.426
21	2.08.2023	15.381	32.898	76.904	84.473
22	16.08.2023	17.029	37.659	89.539	102.722
23	16.08.2023	17.212	37.170	88.379	102.051
24	16.08.2023	17.090	37.354	88.135	101.563
25	16.08.2023	16.602	36.865	86.670	99.854
26	16.08.2023	16.479	36.621	86.060	98.877
27	16.08.2023	16.602	36.621	85.449	97.900
28	16.08.2023	15.442	35.461	81.604	93.506
29	16.08.2023	15.320	34.607	81.238	92.346
30	16.08.2023	15.137	34.424	80.811	91.309
31	16.08.2023	15.137	33.936	79.959	90.576
32	16.08.2023	15.137	33.936	78.369	90.576
33	16.08.2023	14.893	33.875	77.881	89.722
34	23.10.2023	17.578	38.452	92.041	106.934
35	23.10.2023	17.212	38.208	91.187	106.567
36	23.10.2023	17.334	38.086	91.553	104.492
37	23.10.2023	17.334	38.086	89.844	104.858
38	23.10.2023	17.212	37.964	90.576	104.126
39	23.10.2023	17.090	37.964	89.335	104.004
Maksimum		18.005	40.039	96.436	112.366
Minimum		13.306	30.823	67.993	78.613
Ortalama		16.145	36.078	85.109	96.773
Standart Sapma		1.129	2.389	7.029	9.573
Min-Ort. Değişim (%)		17.585	14.566	20.111	18.765
Maks-Ort. Değişim (%)		11.520	10.978	13.309	16.113
Ortalama Değişim (%)		14.552	12.772	16.710	17.439

Ölçüm esnasında seçilen örnekleme frekansına bağlı olarak analiz ayarlarında en büyük frekans baz alınarak sinyaller işlenmiştir. 250Hz ile alınan ölçümler 0-125Hz arasında, 500Hz örnekleme frekansı ile alınan ölçümler 0-250Hz ve 1000Hz örnekleme ile alınan ölçümler 0-500Hz frekans aralığında ayrıştırılmıştır. TDM-2'nin ölçümün

gerçekleştirildiği esnada modelin kuru, ıslak ve doygun durumlarına göre doğal frekanslar farklı durumlar için belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde TDM-2'nin ilk 4 moduna ait deneysel doğal frekanslarının tamamı %100 oranında tespit edilmiştir. Bu veriler değerlendirildiğinde doğal frekanslardaki ortalama değişimin %12.772 ile en az 2. modda ve %17.439 ile en çok 4. modda olduğu görülmüştür.

2.3.3. TDM-3'ün Ölçümleri

TDM-3'ün doğal frekanslarını elde etmek amacıyla çevresel titreşim testleri geliştirilen yüksek hassasiyetli CEVS titreşim ölçüm sistemiyle gerçekleştirilmiş ve titreşim ölçümleri alınırken sıcaklık ile nem değerleri de dijital sıcaklık-nem ölçer kullanılarak ölçülmüştür. CEVS titreşim ölçüm sistemi model üzerine sıcak silikon eritilerek sabitlenmiş ve titreşim ölçümleri rastgele oluşturulan titreşimler altında modelin “Kuru, Islak ve Extra Doygun (Doygun)” durumları için toplanmıştır (Şekil 57).



Şekil 57. TDM-3'ün kuru, ıslak ve doygun durumları için ÇTT'sine ait görüntü

Titreşim ölçümleri sırasında saniyede 250/500/1000Hz örnek sayısı ile 2-15 dakika aralığında toplamda 39 farklı ölçüm verisi alınarak kaydedilmiştir. Ayrıca ölçümlerde G

Range parametresi $\pm 2g$ olarak seçilmiştir. CEVS sistemler tüm ölçümlerde tuğla modelin en üst noktasındaki rastgele bir yere sıcak silikon yardımıyla sabitlenmiştir (Şekil 58).



Şekil 58. TDM-3 üzerinde CEVS yerleşim düzeni ve eksenleri

TDM-3'ten alınan titreşim, sıcaklık, nem ve basınç ölçümleri ölçümden önce yapılan parametre ayarları ile “.txt” ya da “.csv” uzantılı olarak kaydedilmiştir. TDM-3'ün ölçüm sırasında sıcaklık ile nem değerleri Şekil 59'da verilen dijital ölçüm cihazıyla kaydedilmiştir. Ayrıca CEVS sisteminden elde edilen değerler ile kıyaslanmıştır.



Şekil 59. TDM-3'ün sıcaklık ve nem ölçümü

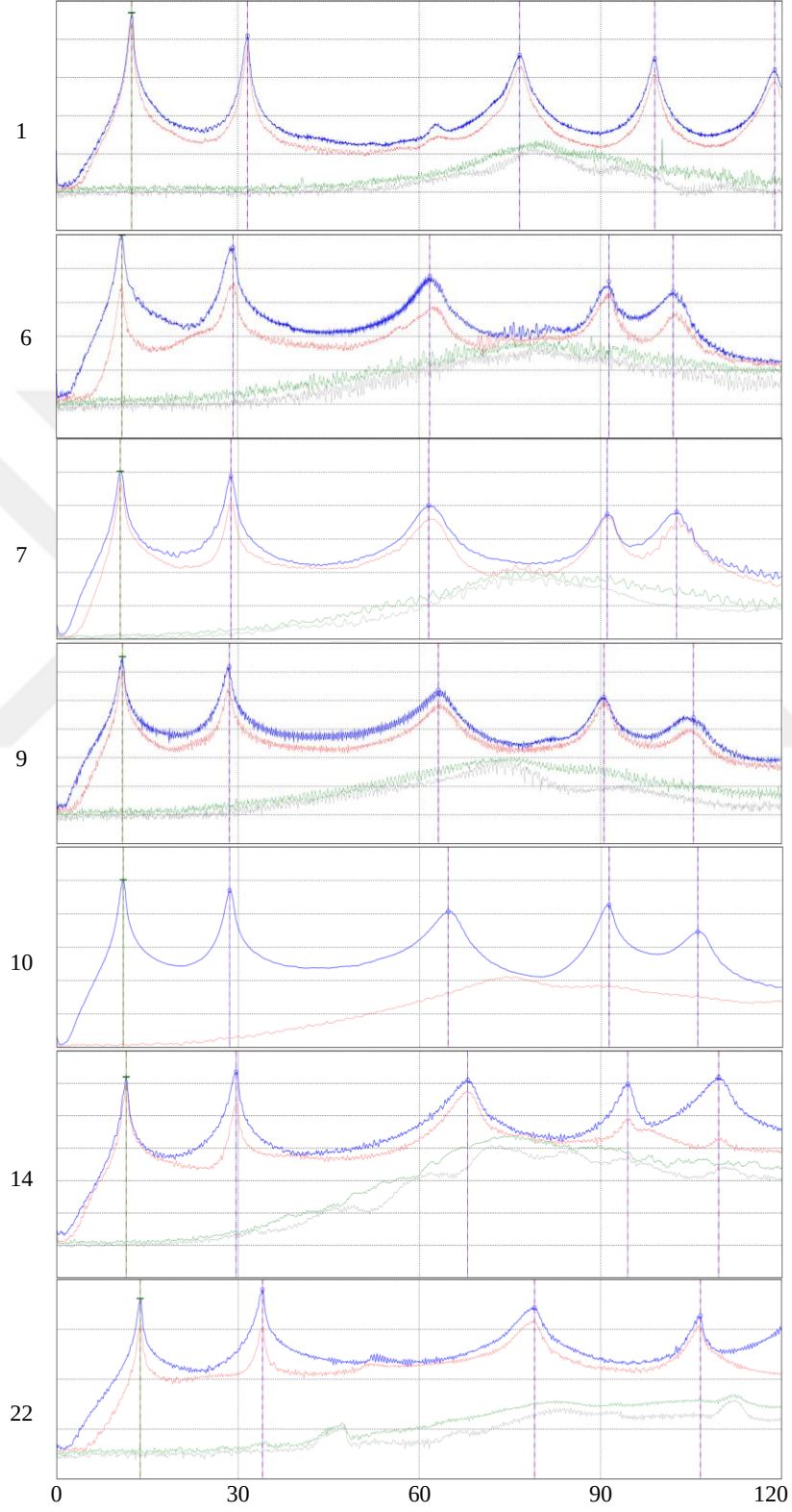
TDM-3 için yapılan testlerin sonucunda titreşim ölçümlerinin sayıları ile tarihleri, dakika cinsinden ölçüm süreleri vb. bilgiler aşağıda verilmiştir (Tablo 10).

Tablo 10. TDM-3'te gerçekleştirilen ölçümlere ait bilgiler

Ölçüm No	Tarih	Süre (dk)	G Range	Fs (Hz)	Nem (%)	Sıcaklık (°C)	Görsel Durum
1	19.06.2023	10	2	250	91	20.7	Doygun
2	19.06.2023	15	2	250	88	20.6	Doygun
3	19.06.2022	10	2	250	90	20.4	Doygun
4	19.06.2023	10	2	1000	90	20.3	Doygun
5	21.06.2023	10	2	250	79	33.5	Kuru
6	21.06.2023	5	2	250	79	32.0	Kuru
7	21.06.2023	10	2	1000	79	31.0	Kuru
8	21.06.2023	10	2	250	88	26.0	Islak
9	21.06.2023	5	2	250	89	26.4	Islak
10	21.06.2023	10	2	1000	88	26.2	Islak
11	23.06.2023	10	2	250	88	19.0	Islak
12	23.06.2023	5	2	250	92	19.2	Islak
13	23.06.2023	10	2	1000	92	19.1	Islak
14	23.06.2023	10	2	500	90	19.1	Islak
15	26.07.2023	5	2	250	88	19.0	Islak
16	26.07.2023	5	2	1000	90	19.1	Islak
17	26.07.2023	10	2	250	90	19.0	Islak
18	6.10.2023	2	2	250	62	18.3	Doygun
19	6.10.2023	5	2	250	63	18.1	Doygun
20	6.10.2023	5	2	250	62	18.0	Doygun
21	6.10.2023	5	2	250	64	17.9	Doygun
22	6.10.2023	3	2	250	66	17.8	Doygun
23	6.10.2023	4	2	250	66	17.7	Doygun
24	6.10.2023	5	2	250	66	17.9	Doygun
25	6.10.2023	5	2	250	67	18.1	Doygun
26	6.10.2023	3	2	250	72	18.1	Doygun
27	6.10.2023	2	2	250	72	17.7	Doygun
28	6.10.2023	3	2	250	75	17.9	Islak
29	6.10.2023	4	2	250	77	18.1	Islak
30	6.10.2023	5	2	250	77	18.6	Islak
31	6.10.2023	4	2	250	77	18.5	Islak
32	6.10.2023	6	2	250	79	18.5	Islak
33	23.10.2023	4	2	250	74	17.5	Doygun
34	23.10.2023	5	2	250	74	17.5	Doygun
35	23.10.2023	5	2	250	75	17.3	Doygun
36	23.10.2023	4	2	250	76	17.2	Doygun
37	23.10.2023	5	2	250	76	17.1	Doygun
38	23.10.2023	4	2	250	77	17.1	Doygun
39	23.10.2023	5	2	250	78	17.1	Doygun
Maksimum		15	2	1000	92	33.5	-
Minimum		2	2	250	62	17.1	-
Ortalama		6	2	353	79	20.1	-

TDM-3 için tüm ölçümler laboratuvar ortamında minimum 17.1°C sıcaklık ile %62 bağıl nem ve maksimum 33.5°C sıcaklık ile %92 bağıl nem aralığında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sistemiyle toplanan ivme verileri ARTeMIS yazılımı kullanılarak ayrıştırılmış ve bu ayrıştırma işlemi sonucu tekil değer diyagramları grafikleri elde edilmiştir (Şekil 60). Şekilde gösterilen yatay eksen 0-120Hz arasında sınırlandırılmıştır. Ölçüm esnasında seçilen örnekleme frekansına bağlı olarak analiz ayarlarında en büyük frekans baz alınarak sinyaller

işlenmiştir. Toplanan 39 ölçüme ait 39 tane grafik elde edilmiş olup aşağıdaki şekilde bunlardan birkaçı sunulmuştur.



Şekil 60. TDM-3'ün tekil değer grafiklerinden bazıları

Şekil 60'ta 1. düşey eksen ölçüme ait ölçüm numarasını, 2. düşey eksen ölçüme ait tekil değer diyagramlarını ve yatay eksen ise TDM-3'e ait deneysel doğal frekans değerlerini ifade etmektedir. Tekil değer grafiklerinden TDM-3'ün deneysel doğal frekansları belirlenmiştir (Tablo 11).

Tablo 11. TDM-3'ün deneysel doğal frekansları

Ölçüm No	Tarih	Deneysel Doğal Frekanslar (Hz)			
		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod
1	19.06.2023	12.451	31.616	76.599	98.938
2	19.06.2023	12.390	31.433	76.782	98.816
3	19.06.2022	12.390	31.372	76.172	98.938
4	19.06.2023	12.451	31.006	76.172	98.633
5	21.06.2023	10.864	28.381	62.866	90.881
6	21.06.2023	10.864	29.236	61.768	91.431
7	21.06.2023	10.498	28.809	61.523	91.064
8	21.06.2023	10.986	28.442	64.819	90.759
9	21.06.2023	10.864	28.564	63.171	90.576
10	21.06.2023	10.986	28.564	64.697	91.309
11	23.06.2023	11.658	30.090	71.167	96.619
12	23.06.2023	11.108	29.114	66.650	94.055
13	23.06.2023	11.475	29.785	68.115	94.727
14	23.06.2023	11.475	29.663	67.993	94.482
15	26.07.2023	13.916	33.813	82.947	104.614
16	26.07.2023	14.160	34.424	83.496	105.713
17	26.07.2023	13.797	33.752	82.825	104.675
18	6.10.2023	13.916	34.546	80.688	107.178
19	6.10.2023	14.038	34.302	80.933	107.178
20	6.10.2023	14.038	34.180	80.200	106.812
21	6.10.2023	14.038	34.302	80.444	106.812
22	6.10.2023	13.794	34.058	79.102	106.567
23	6.10.2023	13.794	33.936	78.979	105.957
24	6.10.2023	13.672	33.813	78.735	106.201
25	6.10.2023	13.794	33.691	78.125	106.323
26	6.10.2023	13.916	34.180	79.102	106.445
27	6.10.2023	13.672	33.691	78.735	106.201
28	6.10.2023	13.672	33.447	78.003	104.614
29	6.10.2023	13.672	32.959	77.148	103.516
30	6.10.2023	13.428	32.593	76.294	102.661
31	6.10.2023	13.306	32.349	75.317	101.807
32	6.10.2023	13.184	31.982	74.463	101.563
33	23.10.2023	13.550	32.959	77.759	102.905
34	23.10.2023	13.184	32.715	76.050	101.929
35	23.10.2023	13.184	32.593	75.684	101.807
36	23.10.2023	13.062	32.227	75.317	101.440
37	23.10.2023	13.062	32.349	74.585	101.074
38	23.10.2023	13.062	32.227	74.585	100.708
39	23.10.2023	13.062	31.982	74.219	100.952
Maksimum		14.160	34.546	83.496	107.178
Minimum		10.498	28.381	61.523	90.576
Ortalama		12.832	32.029	74.673	100.689
Standart Sapma		1.152	2.004	6.226	5.509
Min-Ort. Değişim (%)		18.186	11.391	17.610	10.044
Maks-Ort. Değişim (%)		10.352	7.857	11.816	6.444
Ortalama Değişim (%)		14.269	9.624	14.713	8.244

Yapılan ölçümlerde TDM-3'ün ilk 4 moduna ait deneysel doğal frekanslarının tamamı %100 oranında tespit edilmiştir. Bu veriler değerlendirildiğinde doğal frekanslardaki ortalama değişimin %8.244 ile en az 4. modda ve %14.713 ile en çok 3. modda olduğu görülmüştür.

2.3.4. Tuğla Modellerin Regresyon Analiz Çalışmaları

Laboratuvarında inşa edilen tuğla modeller üzerinde CEVS titreşim ölçüm sistemiyle alınan titreşim verilerinin analizleri sonucunda modellere ait deneysel doğal frekanslar belirlenmiştir. Titreşim ölçümleri alınırken modellere ait sıcaklık değerleri, nem değerleri ve modellerin görsel durumlarına (kuru, ıslak, doygun) ait veriler toplanmıştır. Toplanan veriler bağımlı ve bağımsız değişkenler olarak 2 gruba ayrılmış ve aşağıda sıralanan regresyon analizlerine tabi tutulmuştur.

- Basit doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri ilk 4 veya 5 frekans değeri için yapılmıştır. Bu analizlerde bağımsız değişkenler sıcaklık ve bağıl nem, bağımlı değişken ise deneysel doğal frekanslardır. Analizlerde sıcaklık ve bağıl nem değişkenleri için analizler ayrı ayrı yapılmıştır. Analizlerde bağımlı değişken ile 1 bağımsız değişken (sıcaklık ya da nem) arasında doğrusal veya doğrusal olmayan irdelemeler gerçekleştirilmiştir.
- ÇDRA bağımsız değişkenler sıcaklık ve bağıl nem seçilerek gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde modele ait deneysel doğal frekans değerleri bağımlı değişken olup bağımsız değişkenler arasında doğrusal olarak irdelemeler gerçekleştirilmiştir.
- MARS yöntemiyle regresyon analizleri her bir model için ayrı ayrı birden çok parametreye bağlı olarak yapılmıştır. Bu analizlerde frekans değerleri bağımlı değişkenler olup seçilen 2 ve 3 farklı bağımsız değişken arasında analizler gerçekleştirilmiştir. Modellerin 2 parametrelili nem ve sıcaklık (N-S) ve 3 parametrelili nem, sıcaklık ve doygunluk (N-S-D) için analizler yapılmış ve analiz çıktılarından bazıları sunulmuştur.
- MARS yöntemiyle TDM-1, TDM-2 ve TDM-3 modellerin tüm verilerini içeren model üzerinde regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Tüm veriyi içeren modelde 3 parametrelili nem, sıcaklık ve hacim (N-S-H) ve 4 parametrelili nem, sıcaklık, doygunluk ve hacim (N-S-D-H) bağımsız değişkenler olarak seçilmiş ve bağımlı

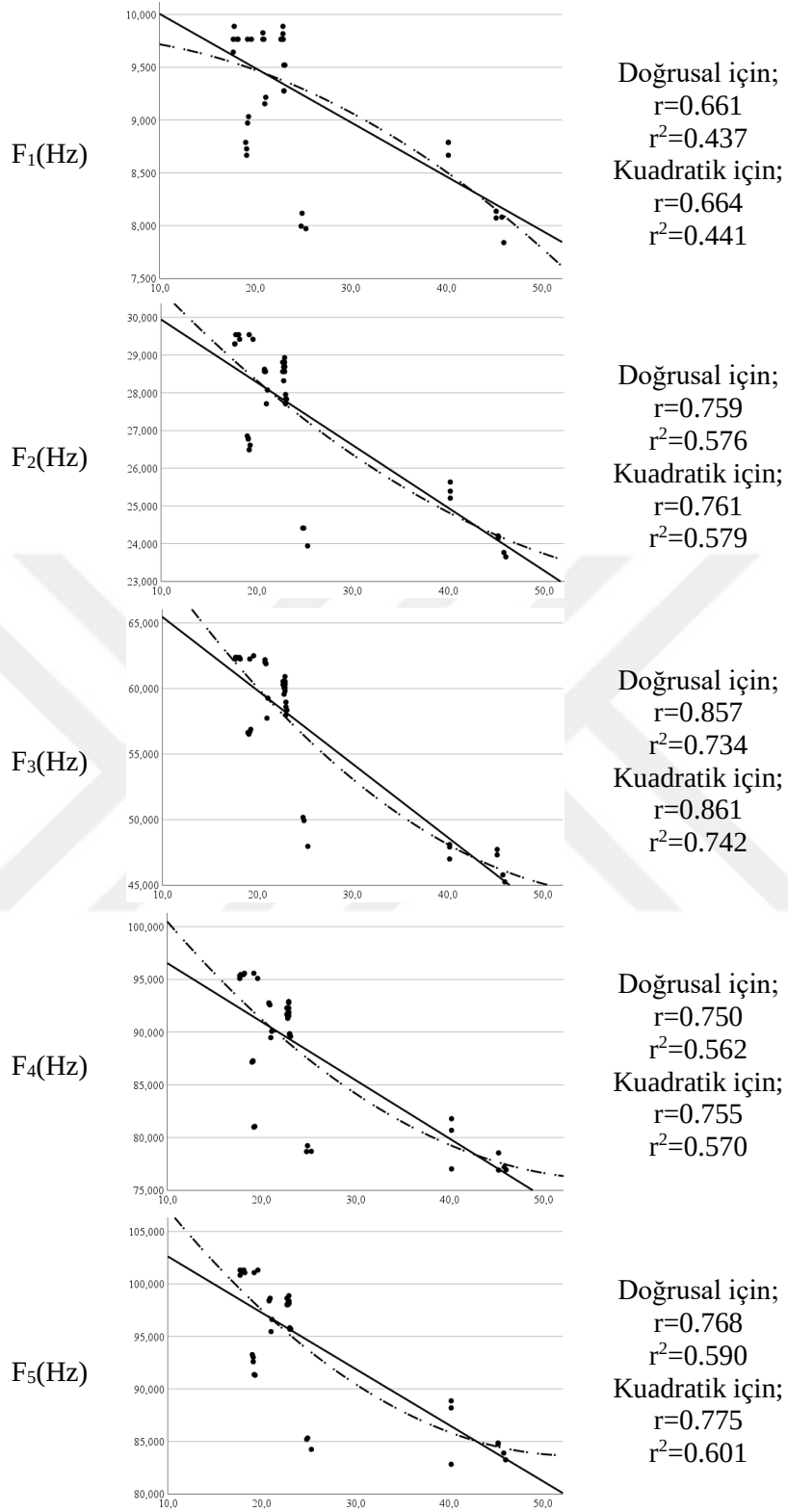
ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişki fonksiyonel bir biçimde belirlenmiştir. Bu modellerde bağımlı değişkenler olarak ilk 4 doğal frekans değerleri seçilmiştir.

- Modellerin Sıcaklığa Bağlı Analizleri

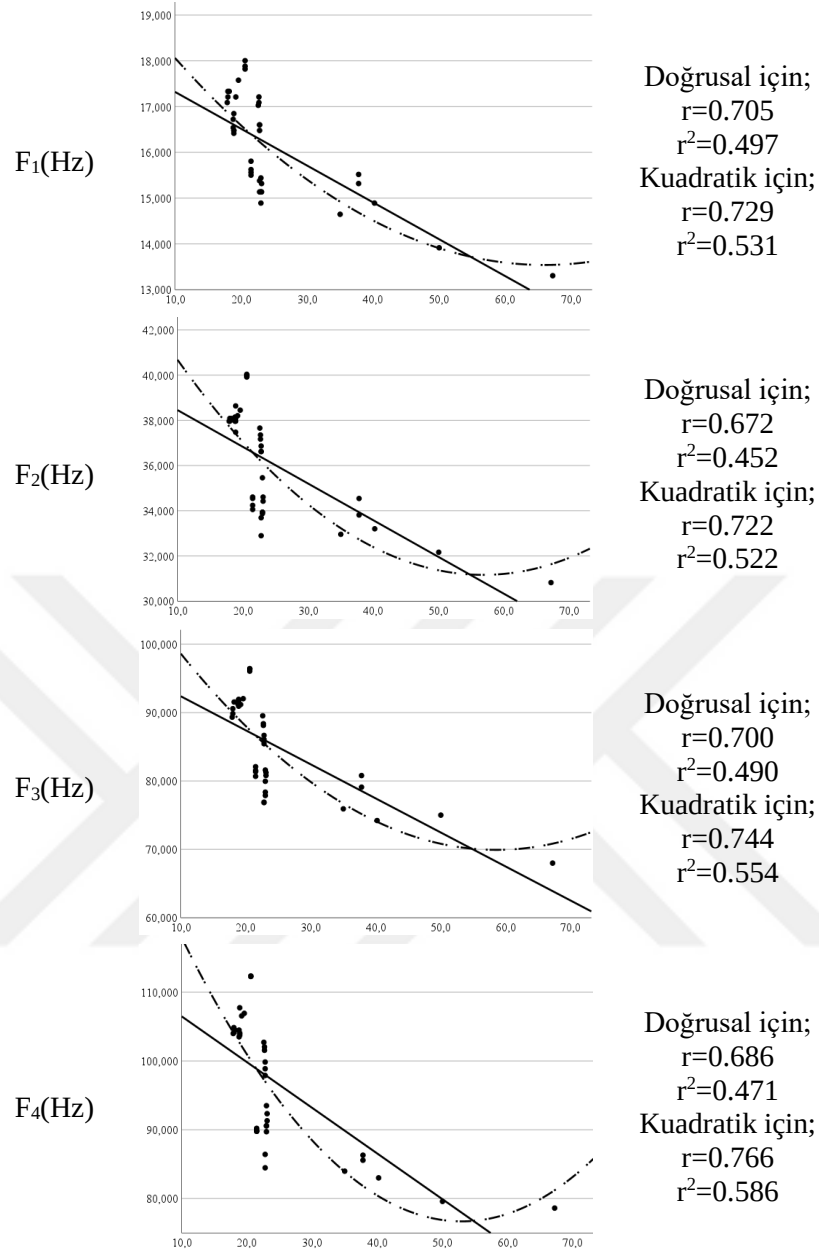
TDM-1, TDM-2 ve TDM-3'e ait deneysel doğal frekansların sıcaklıkla ilişkileri BDRA ve basit doğrusal olmayan regresyon analiz yöntemleriyle belirlenmiş ve aşağıdaki dağılım grafiklerinde sırasıyla verilmiştir (Şekil 61-63). Şekillerde siyah noktalar ölçüm verilerini, devamlı çizgi doğrusal eğriyi, kesikli çizgi ise kuadratik (quadratic) eğriyi ifade etmektedir. Şekillerdeki yatay eksen °C cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir ve S harfi ile gösterilmiştir. Tüm modlara ait korelasyon ve determinasyon katsayıları doğrusal (lineer) ve kuadratik (quadratic) olarak hesaplanmış ve modellere ait determinasyon katsayısının en yüksek değerini veren mod için frekansların sıcaklıkla ilişkilerini ifade eden denklemler Tablo 12'de sunulmuştur.

Tablo 12. Tuğla modellerin doğal frekanslarının sıcaklığa bağlı denklemleri

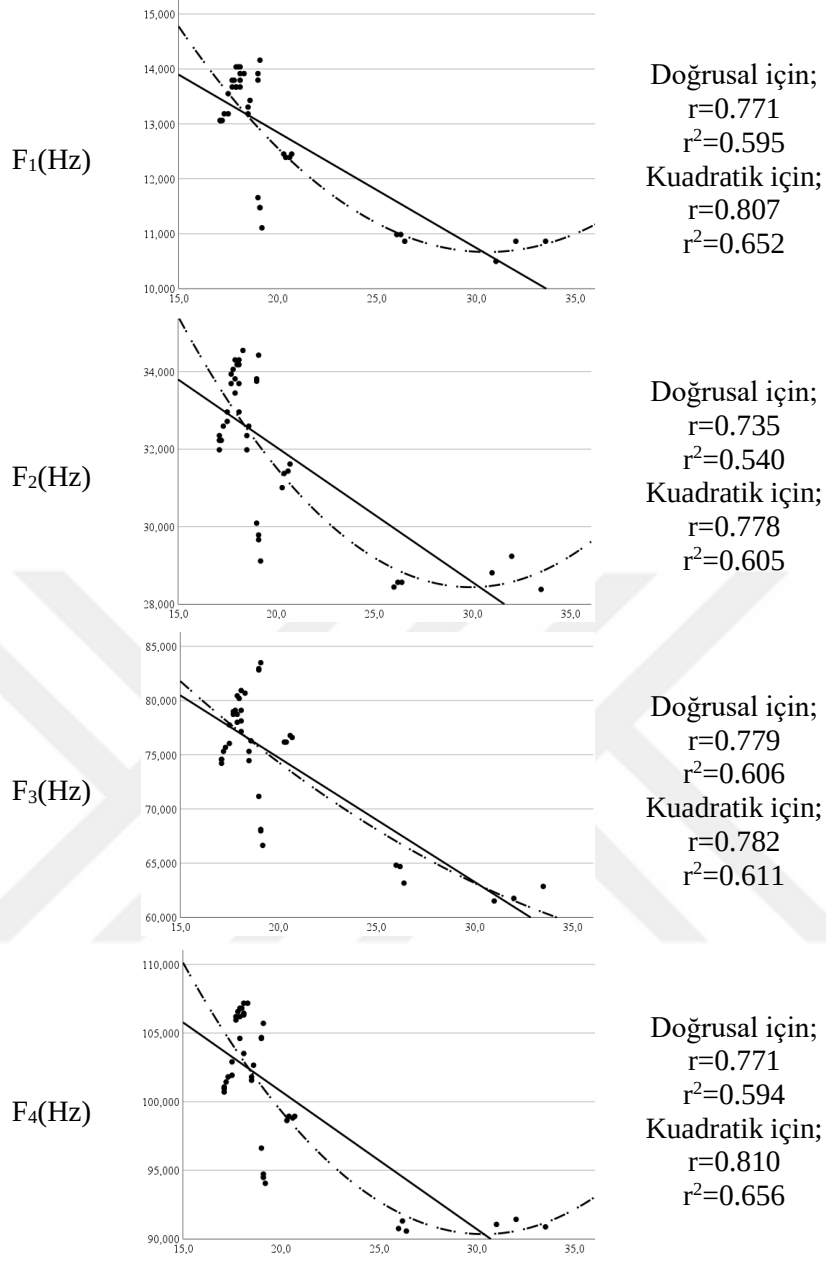
Model	Basit Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Denklemleri
TDM-1	$F_{3Lineer}=71.070-0.560S$
	$F_{3Quadratic}=79.997-1.195S+0.010S^2$
TDM-2	$F_{4Lineer}=113.137-0.665S$
	$F_{4Quadratic}=139.379-2.367S+0.022S^2$
TDM-3	$F_{4Lineer}=120.848-1.005S$
	$F_{4Quadratic}=167.701-5.098S+0.084S^2$



Şekil 61. TDM-1'in doğal frekanslarının sıcaklıkla ilişkisi



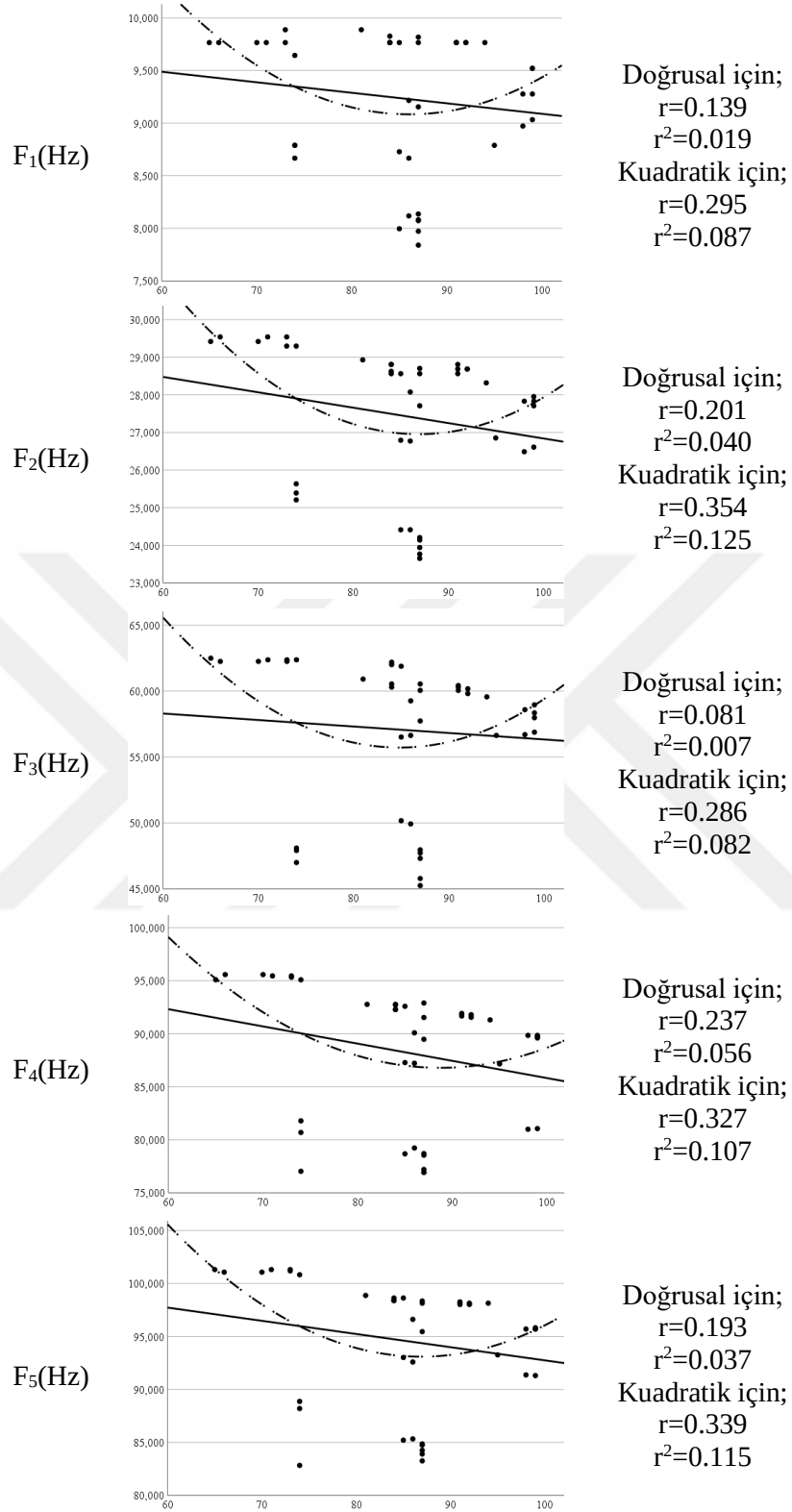
Şekil 62. TDM-2'nin doğal frekanslarının sıcaklıkla ilişkisi



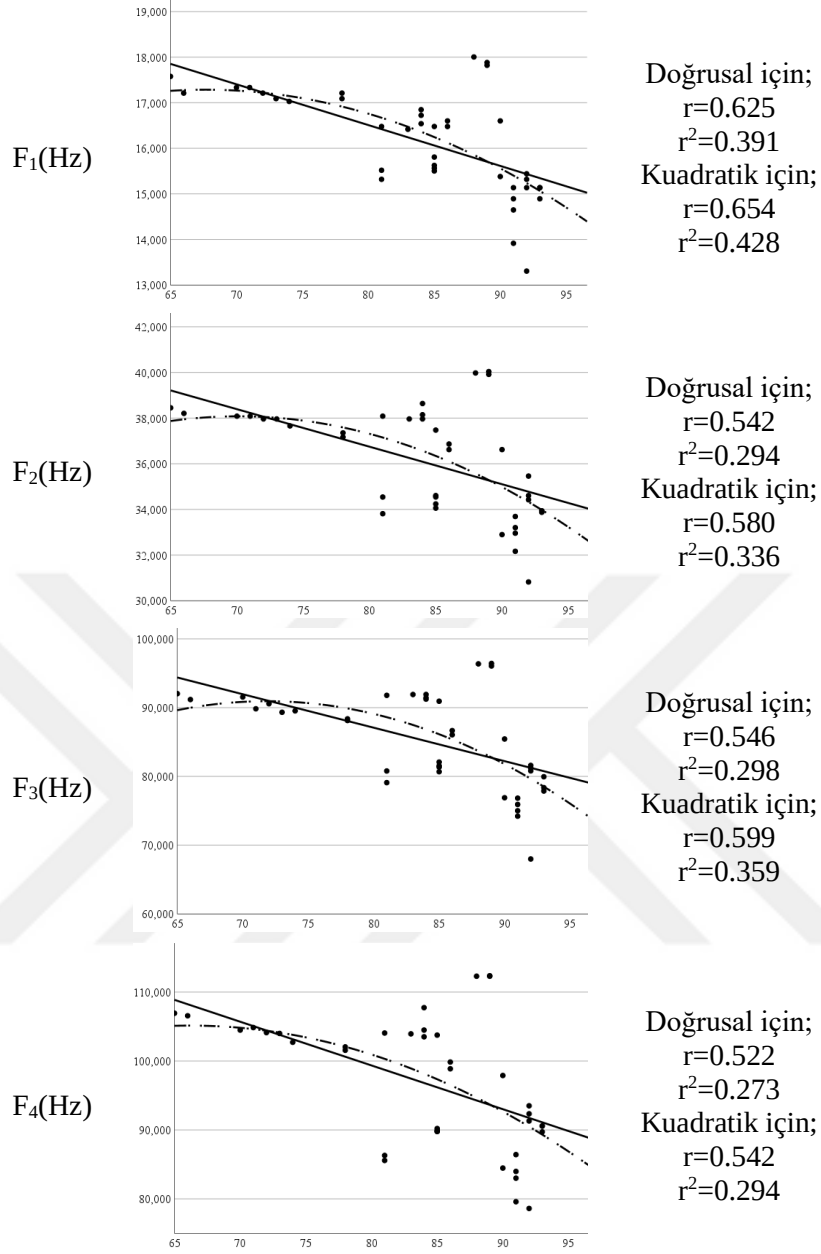
Şekil 63. TDM-3'ün doğal frekanslarının sıcaklıkla ilişkisi

- Modellerin Neme Bağlı Analizleri

TDM-1, TDM-2 ve TDM-3'e ait deneysel doğal frekansların nemle ilişkileri BDRA ve basit doğrusal olmayan regresyon analiz yöntemleriyle belirlenmiştir (Şekil 64-66). Tüm modlara ait korelasyon ve determinasyon katsayıları doğrusal (lineer) ve kuadratik (quadratic) olarak hesaplanmış ve modellere ait en yüksek determinasyon katsayısı için denklemler verilmiştir (Tablo 13). Şekillerdeki yatay eksen % cinsinden bağıl nemi ifade etmektedir ve N harfi ile gösterilmiştir.



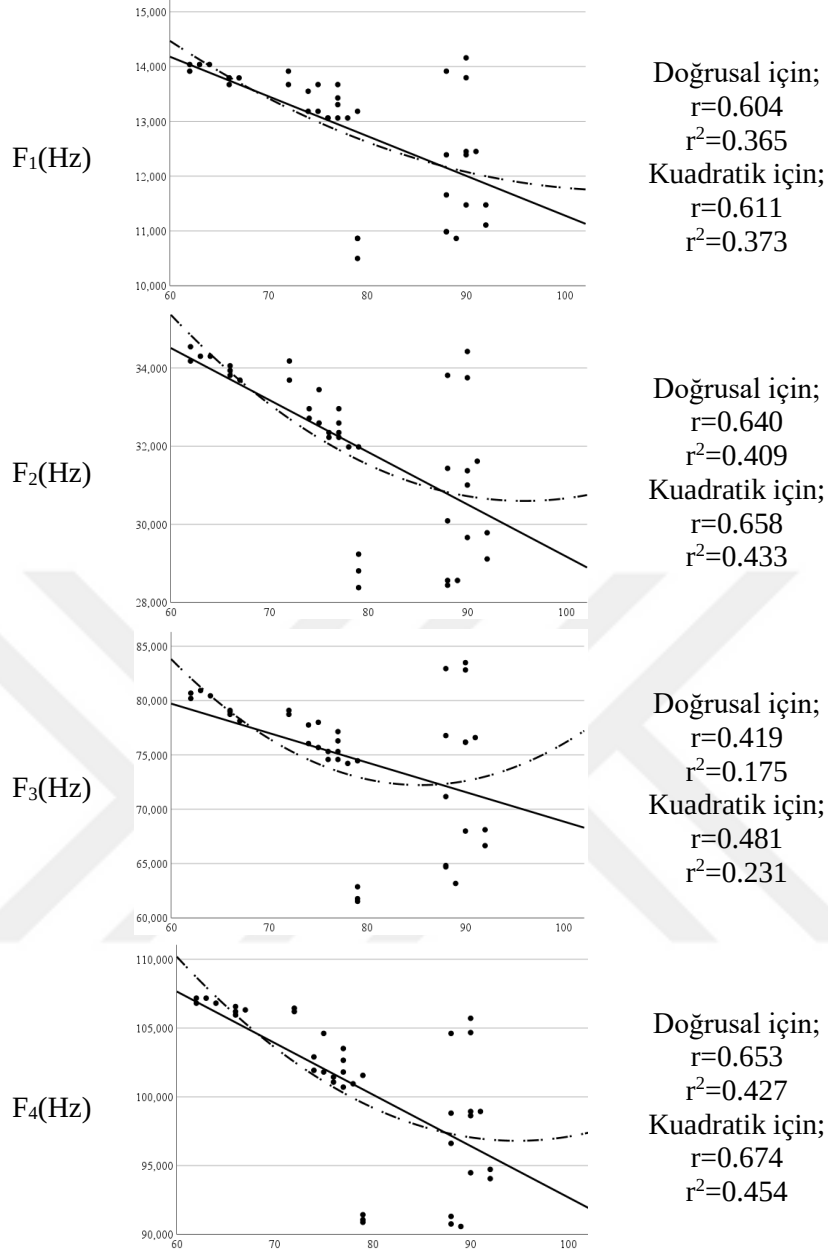
Şekil 64. TDM-1'in doğal frekanslarının nem ile ilişkisi



Şekil 65. TDM-2'nin doğal frekanslarının nem ile ilişkisi

Tablo 13. Tuğla modellerin doğal frekanslarının neme bağlı denklemleri

Model	Basit Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Denklemleri
TDM-1	$F_{2\text{Lineer}}=30.931-0.041N$
	$F_{2\text{Quadratic}}=69.830-0.987N+0.006N^2$
TDM-2	$F_{1\text{Lineer}}=23.673-0.090N$
	$F_{1\text{Quadratic}}=1.453+0.468N-0.003N^2$
TDM-3	$F_{4\text{Lineer}}=130.131-0.375N$
	$F_{4\text{Quadratic}}=196.390-2.102N+0.011N^2$



Şekil 66. TDM-3'ün doğal frekanslarının nem ile ilişkisi

- Modellerin Nem ve Sıcaklığa Bağlı Analizleri

TDM-1, TDM-2 ve TDM-3'ün deneysel doğal frekanslarının her biri için nem ve sıcaklık ile ilişkileri çoklu doğrusal regresyon ve MARS analiz yöntemleriyle belirlenmiştir. ÇDRA sonucu elde edilen korelasyon (r) ve determinasyon katsayıları (r^2) ile tüm modlara ait deneysel doğal frekansların nem ve sıcaklık değişkenlerine bağlı denklemleri Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Tuğla modellerin frekanslarının nem ve sıcaklık ile ilişkileri (ÇDRA)

Model	Mod No	r	r ²	ÇDRA Denklemleri
TDM-1	1	0.679	0.461	F _{1Lineer} =11.484-0.011N-0.052S
	2	0.790	0.624	F _{2Lineer} =35.463-0.045N-0.168S
	3	0.863	0.745	F _{3Lineer} =76.444-0.063N-0.562S
	4	0.792	0.628	F _{4Lineer} =117.183-0.176N-0.560S
	5	0.797	0.636	F _{5Lineer} =119.764-0.137N-0.539S
TDM-2	1	0.815	0.664	F _{1Lineer} =22.948-0.063S-0.062N
	2	0.750	0.563	F _{2Lineer} =48.374-0.133S-0.107N
	3	0.773	0.597	F _{3Lineer} =121.303-0.414S-0.309N
	4	0.752	0.565	F _{4Lineer} =143.752-0.557S-0.396N
TDM-3	1	0.864	0.746	F _{1Lineer} =20.220-0.177S-0.049N
	2	0.855	0.732	F _{2Lineer} =45.228-0.282S-0.096N
	3	0.802	0.643	F _{3Lineer} =106.131-1.057S-0.130N
	4	0.888	0.788	F _{4Lineer} =138.017-0.822S-0.265N

MARS yöntemiyle TDM-1, TDM-2 ve TDM-3 modeller üzerinde regresyon analizleri MATLAB’da ARESLab araç kutusu kullanılarak gerçekleştirilmiştir (URL-41, 2023). MARS yöntemiyle oluşturulan tüm modeller üzerinde gerçekleştirilen analizlerde 2 parametrelilik olarak nem ve sıcaklık (N-S) bağımsız değişkenler olarak seçilmiş ve ilk 4 veya 5 doğal frekans değerleri (bağımlı değişken) ile analizler gerçekleştirilmiştir (Tablo 15-17). Tablolardaki modlara ait kullanılan denklem türü doğrusal (Lin) ile kübik (Cbc), parametrenin (Prmt.) bağıl önemine (RI) ait veriler ve parametrelere ait bilgiler verilmiştir. Analiz sonucunda modların her birine ait formülasyonlar, MSE (ortalama karesel hata), RMSE (ortalama karekök hata), MAE (ortalama mutlak hata) ve NS (r²) değerleri bulunmuş ve bunlardan bazıları aşağıdaki tablolarda sunulmuştur. NS değerleri Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı olarak da bilinmektedir.

Tablo 15. TDM-1 için 2 parametrelilik (N-S) MARS analizi

Tipi	Lin/Cbc	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
		Lin	Lin	Cbc	Lin	Lin
Prmt. 1 (%)	RI	23.537	22.376	18.815	27.845	100.000
Prmt. 2 (%)	RI	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
	r ²	0.976	0.993	0.990	0.985	0.978

Tablo 16. TDM-2 için 2 parametrelilik (N-S) MARS analizi

Tipi	Lin/Cbc	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod
		Lin	Lin	Lin	Lin
Prmt. 1 (%)	RI	61.572	100.000	100.000	100.000
Prmt. 2 (%)	RI	100.000	100.000	65.767	80.469
	r ²	0.963	0.949	0.964	0.960

Tablo 17. TDM-3 için 2 parametrelili (N-S) MARS analizi

		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod
Tipi	Lin/Cbc	Lin	Lin	Lin	Lin
Prmt. 1 (%)	RI	27.975	38.538	100.000	29.303
Prmt. 2 (%)	RI	100.000	100.000	100.000	100.000
	r ²	0.821	0.827	0.819	0.884

- Modellerin Nem, Sıcaklık ve Doygunluğa Bağlı Analizleri

MARS yöntemiyle tuğla duvar modeller üzerinde nem, sıcaklık ve doyumluk (N-S-D) bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler olan doğal frekanslar arasındaki ilişki için analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde elde edilen değerlerden bazıları aşağıdaki tablolarda verilmiştir (Tablo 18-20).

Tablo 18. TDM-1 için 3 parametrelili (N-S-D) MARS analizi

		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
Tipi	Lin/Cbc	Lin	Cbc	Lin	Lin	Cbc
Prmt. 1 (%)	RI	55.813	0.693	34.519	30.625	22.182
Prmt. 2 (%)	RI	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Prmt. 3 (%)	RI	59.415	23.852	31.584	11.116	45.371
	r ²	0.991	0.995	0.997	0.989	0.979

Tablo 19. TDM-2 için 3 parametrelili (N-S-D) MARS analizi

		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod
Tipi	Lin/Cbc	Lin	Lin	Lin	Lin
Prmt. 1 (%)	RI	8.096	13.396	19.981	15.999
Prmt. 2 (%)	RI	100.000	100.000	100.000	100.000
Prmt. 3 (%)	RI	49.267	52.234	50.044	23.817
	r ²	0.983	0.987	0.994	0.992

Tablo 20. TDM-3 için 3 parametrelili (N-S-D) MARS analizi

		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod
Tipi	Lin/Cbc	Lin	Lin	Lin	Lin
Prmt. 1 (%)	RI	27.975	38.538	3.611	29.467
Prmt. 2 (%)	RI	100.000	100.000	100.000	100.000
Prmt. 3 (%)	RI	0.000	0.000	0.000	0.000
	r ²	0.821	0.827	0.778	0.874

- Modelde Nem, Sıcaklık ve Hacme Bağlı Analizler

MARS yöntemiyle tuğla duvar modellerin tüm verilerini içinde barındıran model üzerinde 3 parametrelili nem, sıcaklık ve hacim (N-S-H) bağımsız değişkenlerle bağımlı

değişkenler arasında analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizde elde edilen değerlerden bazıları Tablo 21’de verilmiştir.

Tablo 21. Tüm verili model için 3 parametrelili (N-S-H) MARS analizi

		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod
Tipi	L/C	Lin	Lin	Lin	Lin
Prmt. 1 (%)	RI	5.010	100.000	3.272	23.640
Prmt. 2 (%)	RI	9.094	53.709	20.334	100.000
Prmt. 3 (%)	RI	100.000	100.000	100.000	40.241
	r ²	0.990	0.980	0.983	0.967

- Modelde Nem, Sıcaklık, Doygunluk ve Hacme Bağlı Analizler

Tüm tuğla model verilerini içeren modelde 4 parametrelili nem, sıcaklık, doymunluk ve hacim (N-S-D-H) bağımsız değişkenlerle bağımlı değişkenler arasında MARS yöntemiyle regresyon analizleri yapılmıştır. Elde edilen değerlerden bazıları Tablo 22’de sunulmuştur.

Tablo 22. Tüm verili model için 4 parametrelili (N-S-D-H) MARS analizi

		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod
Tipi	Lin/Cbc	Lin	Lin	Lin	Lin
Prmt. 1 (%)	RI	2.717	100.000	6.058	9.272
Prmt. 2 (%)	RI	9.358	28.960	28.159	100.000
Prmt. 3 (%)	RI	2.717	6.950	6.058	27.533
Prmt. 4 (%)	RI	100.000	100.000	100.000	43.287
	r ²	0.990	0.985	0.987	0.982

2.4. Trabzon Ayasofya’daki Kule Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Yapılar birçok farklı malzeme ile farklı yöntemlerde farklı koşullarda inşa edilmiştir. Bunların arasında tarihi yapılar inşa edildiği döneme göre farklı anlamlar kazanmakta olup önemli kültürel miraslardır. Tarihi yapılar oldukça etkili bir mimari ve mühendislik harikaları olmakla birlikte genellikle yığma taş kullanılarak inşa edilmiştir.

Doktora tez çalışması kapsamında taşınmaz kültür varlığı olarak tescilli Trabzon ilindeki Ayasofya Cami’sinin yanında bulunan kulenin dinamik karakteristikleri deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Yapı üzerinde öncelikle, geliştirilen yüksek hassasiyetli titreşim ölçüm sistemi ve dijital sıcaklık-nem sensörü ile deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu yapı modeli üzerinde regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Kulenin oluşturulan SE modeli üzerinde modal analizleri, model güncelleme işlemleri ve deprem analizleri yapılmıştır.

2.4.1. Kuleye ait Genel Bilgiler

Trabzon’da 1204 yılında Trabzon İmparatorluğu’nu inşa eden Komninos Hanedanı’ndan İmparator I. Manuel (1238-1263) tarafından 1250-1260 yılları arasında yaptırılan ve bir manastır kilisesi olan Ayasofya adı “Kutsal Bilgelik” anlamına gelmektedir. Kilise yıllar içinde çeşitli amaçlar için kullanılmıştır. Kule, caminin batısında yer almaktadır (Şekil 67). Tarihi belgelerden kulenin yapımına 1426 yılında başlandığı anlaşılmaktadır (Rice, 1968).



Şekil 67. Ayasofya Cami’si ve kuleye ait görüntü

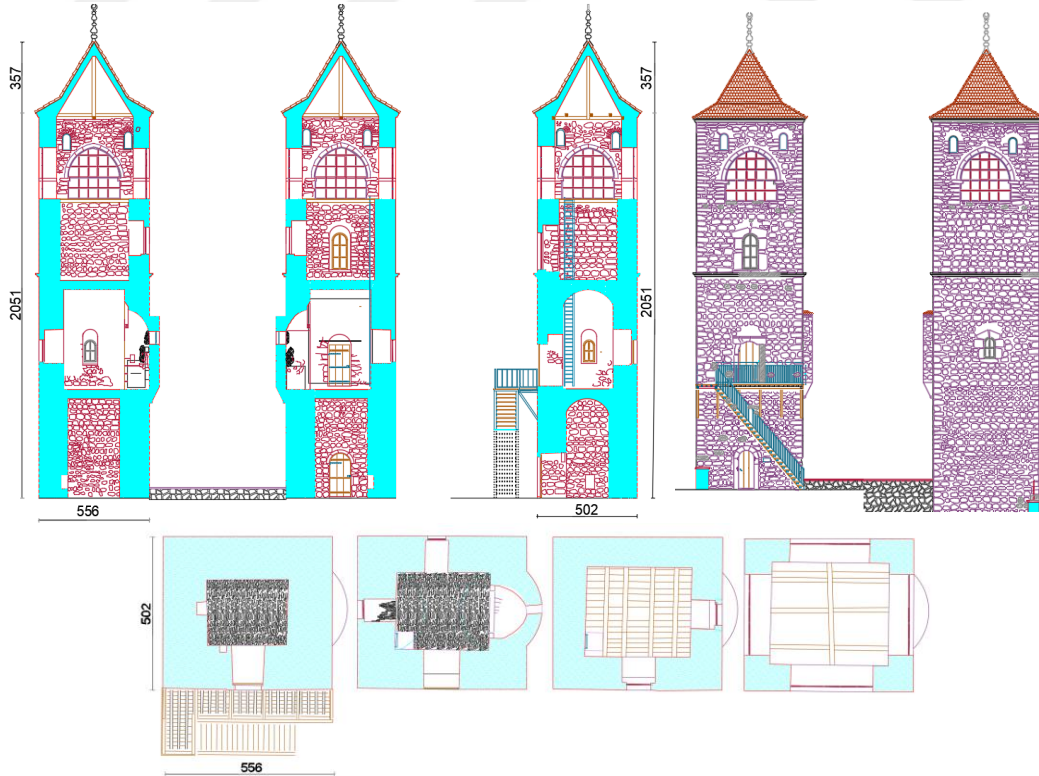
Yapı 1584 yılında camiye çevrilmiştir. 1610 yılında şehre gelen Julian Bordier, yapının onarılmadığı için boş olduğunu bildirmiştir. Ayasofya, I. Dünya Savaşı sırasında Trabzon’u işgal eden Rus ordusu tarafından depo ve askeri hastane olarak kullanılmıştır. Kule, çan kulesi amacıyla inşa edilmiş ve deniz feneri ile gözlemevi olarak da kullanıldığı bilinmektedir. Kuleye ait genel bilgiler aşağıda verilmiştir.

Yapının kullanım türleri	Kilise (1250-1584), Cami (1584-1964), Müze (1964-2013), Cami (2013-günümüz)
Yapının rakımı (yaklaşık)	10m
Yapının koordinatları	41°0’12”K - 39°41’46”D
Kulenin boyutları	5.0 x 5.5 x 23.0m
Kulenin inşa malzemesi ve şekli	Kesme taş ve dikdörtgen geometrik şekilli

Ayasofya Cami yetersiz bakım-onarımdan, geçmişte yaşanmış depremlerden ve diğer çevresel etmenlerden dolayı zaman içinde hasar görmüştür. Bundan dolayı yapı üzerinde birçok restorasyon gerçekleştirilmiş ve yapının bilinen restorasyon çalışmaları 2009, 2012 ve 2020 yıllarında yapılmıştır (Şekil 68) (Bayraktar vd., 2009; Bayraktar vd., 2010; Osmancikli vd., 2012). Yapının son restorasyonu Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından yapılmıştır (Şekil 69).



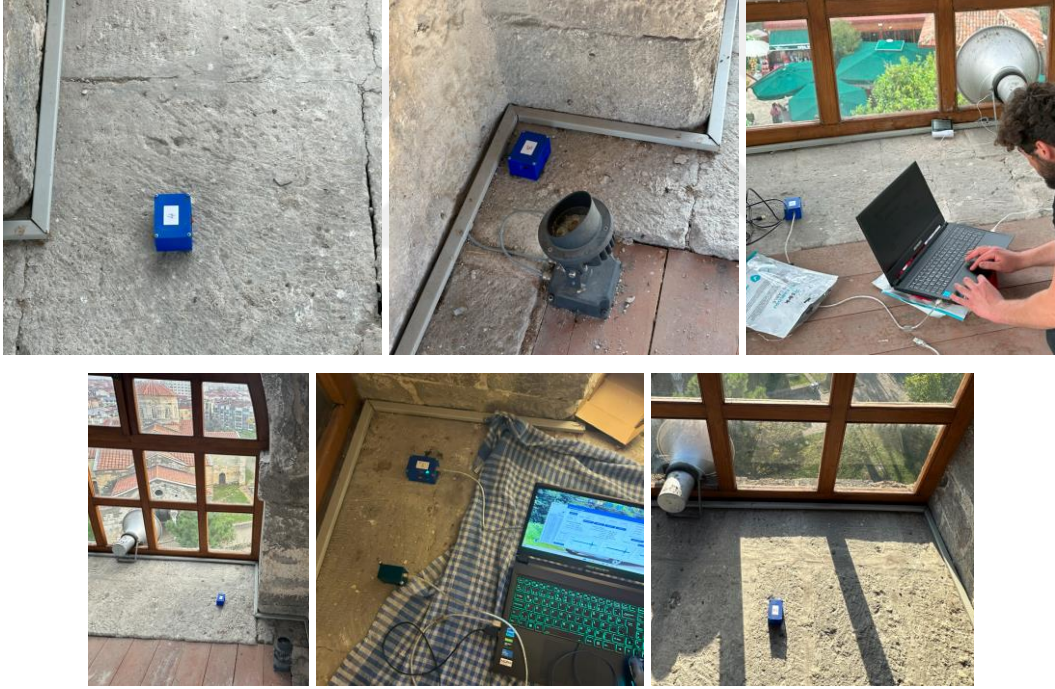
Şekil 68. Kule'nin 2009 ve 2012 yıllarına ait görüntüsü (Osmancikli vd., 2012)



Şekil 69. Kule'nin son restorasyonuna ait cephe görüntüleri

2.4.2. Kulenin Ölçümleri

Geliştirilen titreşim ölçüm sistemi yardımıyla kule üzerinde yapının dinamik karakteristiklerinden olan doğal frekansların elde edilmesi amacıyla 2020 yılında yapılan restorasyondan sonra çevresel titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiş ve titreşim verileri toplanmıştır. Kuleden farklı zamanlarda birçok titreşim ölçümleri geliştirilen CEVS sistemiyle ve geliştirilen CEVA yazılımıyla kauçuk tokmak yardımıyla rastgele oluşturulan sinyaller ile çevresel titreşimler altında toplanmıştır. Gerçekleştirilen ölçümlerde CEVS sistemi kulenin çıkılabilecek en üst seviyesine ve kulenin iç kısmına (kesme taşlı döşeme üzerine) sıcak silikon eritilerek yerleştirilmiştir. Ayrıca dijital sıcaklık-nem ölçer ile sıcaklık ve nem değerleri titreşim ölçümleriyle eş zamanlı olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Aşağıdaki şekillerde kurulan ölçüm düzeneği örneklerinden bazıları sunulmuştur (Şekil 70).



Şekil 70. Kuleye yerleştirilen sistemlere ait ölçüm düzeneklerinden bazıları

Ölçümlere ait CEVS sistemi yerleşimlerinden bazıları yukarıdaki şekilde verilmiştir. Titreşim ölçümleri, sistemlerin örnekleme frekansı gibi farklı özelliklerde kullanılmasıyla farklı şekillerde gerçekleştirilmiştir. Kuleden alınan ivme ve diğer veriler “.txt” ya da “.csv” uzantılı olarak aynı dosya içinde kaydedilmiştir. Ayrıca ölçüme başlamadan önce bağlanan CEVS ölçüm sistemi “Test (T)” butonu ile canlı olarak anlık görüntülenmiş ve sistemin veri iletiminin sağlanıp sağlanmadığı test edilmiştir. İvme değerlerini toplamak amacıyla CEVA

Data Logger yazılımı kullanılmış olup bu yazılımda, alınan sinyal örnekleri X, Y ve Z eksenleri için ayrı ayrı görüntülenmiştir (Şekil 71). Ayrıca Şekil 71’de bir ölçüme ait 3 eksendeki ivme değerlerinin zaman ekseninde gösterilmiş hali de sunulmuştur.

Kuleye ait sıcaklık ve nem değerleri titreşim ölçümleriyle eş zamanlı olarak dijital sıcaklık-nem ölçer ile toplanmış ve görüntülerden bazıları Şekil 72’de verilmiştir.



Şekil 71. CEVA Data Logger yazılımı ile ivme verilerine ait görüntü



Şekil 72. Kulenin sıcaklık-nem ölçümüne ait bazı görüntüler

Kulede yapılan testlerin sonucunda titreşim ölçümlerinin sayıları ile tarihleri, dakika cinsinden ölçüm süreleri, G Range, örnekleme frekansı, bağıl nem ile sıcaklık değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 23).

Tablo 23. Kulede gerçekleştirilen ölçümlere ait bilgiler

Ölçüm No	Tarih	Süre (dk)	G Range	Fs (Hz)	Nem (%)	Sıcaklık(°C)
1	10.06.2021	20	2	400	61	20.9
2	10.06.2021	5	2	400	63	20.6
3	10.06.2021	15	2	250	63	20.6
4	10.06.2021	15	2	250	64	20.2
5	10.06.2021	15	2	250	65	19.8
6	10.06.2022	15	2	250	67	24.0
7	10.06.2022	15	2	250	66	24.0
8	10.06.2022	15	2	250	66	24.0
9	10.06.2022	15	2	250	65	24.2
10	10.06.2022	15	2	250	65	24.2
11	27.05.2023	10	2	1000	62	18.0
12	27.05.2023	5	2	1000	63	18.0
13	27.05.2023	15	2	250	62	18.0
14	27.05.2023	12	2	250	64	18.0
15	27.05.2023	10	2	1000	63	18.1
16	27.05.2023	5	2	1000	62	18.1
17	27.05.2023	12	2	250	61	18.1
18	4.06.2023	20	2	250	62	22.9
19	4.06.2023	15	2	250	62	22.4
20	4.06.2023	15	2	250	62	22.5
21	7.06.2023	30	2	250	49	25.3
22	8.09.2023	10	2	250	62	26.0
23	8.09.2023	10	2	250	59	26.3
24	8.09.2023	10	2	250	51	27.5
25	8.09.2023	10	2	250	51	27.3
26	8.09.2023	10	2	250	49	29.0
27	8.09.2023	10	2	250	49	28.3
28	8.09.2023	10	2	250	51	27.0
29	8.09.2023	10	2	250	49	27.4
30	8.09.2023	10	2	250	50	26.9
31	8.09.2023	10	2	250	51	26.2
32	8.09.2023	3	2	250	51	26.1
33	8.09.2023	10	2	250	53	25.7

Tablo 23'ün devamı,

Ölçüm No	Tarih	Süre (dk)	G Range	Fs (Hz)	Nem (%)	Sıcaklık(°C)
34	8.09.2023	10	2	250	53	25.5
35	8.09.2023	10	2	250	53	25.5
36	8.09.2023	10	2	250	53	25.5
37	8.09.2023	10	2	250	50	25.2
38	8.09.2023	10	2	250	50	25.1
39	8.09.2023	10	2	250	53	24.7
40	8.09.2023	10	2	250	53	24.7
41	8.09.2023	7	2	250	53	24.7
42	8.09.2023	7	2	250	53	24.4
43	8.09.2023	10	2	250	55	24.0
44	8.09.2023	10	2	250	55	23.9
45	8.09.2023	11	2	250	55	23.9
46	8.09.2023	11	2	250	55	23.8
47	8.09.2023	10	2	250	54	23.7
48	8.09.2023	11	2	250	52	23.6
49	8.09.2023	11	2	250	51	22.7
50	8.09.2023	10	2	250	53	22.8
51	8.09.2023	10	2	250	53	22.7
52	8.09.2023	10	2	250	54	22.0
53	8.09.2023	10	2	250	54	21.6
54	8.09.2023	10	2	250	54	21.5
55	8.09.2023	10	2	250	54	21.3
56	9.09.2023	10	2	250	53	21.2
57	9.09.2023	11	2	250	51	21.9
58	9.09.2023	11	2	250	51	22.0
59	9.09.2023	10	2	250	51	22.1
60	9.09.2023	11	2	250	51	22.2
61	9.09.2023	12	2	250	51	22.3
62	9.09.2023	10	2	250	52	23.0
63	24.10.2023	10	2	250	55	21.3
64	24.10.2023	10	2	250	56	21.5
65	24.10.2023	10	2	250	55	20.1
66	24.10.2023	10	2	250	54	20.3
67	24.10.2023	9	2	250	55	20.9
68	24.10.2023	12	2	250	54	21.0
69	24.10.2023	12	2	250	52	21.3
70	24.10.2023	15	2	250	52	21.4
71	24.10.2023	7	2	250	52	21.1
72	24.10.2023	7	2	250	52	21.1
73	24.10.2023	8	2	250	52	21.1
74	3.11.2023	10	2	250	60	22.3
75	3.11.2023	10	2	250	60	22.9
76	3.11.2023	12	2	250	60	23.0
77	3.11.2023	5	2	250	60	23.9
78	9.11.2023	10	2	250	45	22.7
79	9.11.2023	10	2	250	44	23.1
80	9.11.2023	10	2	250	44	24.0
81	9.11.2023	10	2	250	44	19.9
82	9.11.2023	14	2	250	45	19.8
83	9.11.2023	15	2	250	42	19.8
84	13.11.2023	10	2	250	65	18.2
85	13.11.2023	10	2	250	63	18.1
86	13.11.2023	10	2	250	65	18.3
87	13.11.2023	10	2	250	60	18.0
88	23.11.2023	15	2	250	67	12.3

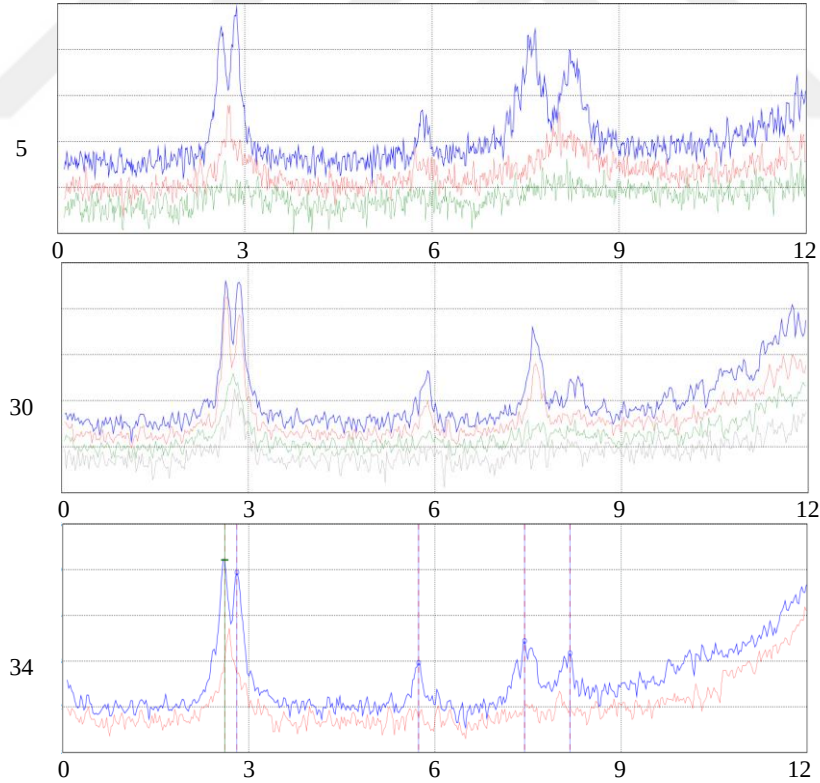
Tablo 23'ün devamı,

Ölçüm No	Tarih	Süre (dk)	G Range	Fs (Hz)	Nem (%)	Sıcaklık(°C)
89	23.11.2023	15	2	250	67	12.1
90	23.11.2023	10	2	250	72	12.0
91	23.11.2023	12	2	250	74	12.0
92	27.11.2023	14	2	250	58	7.9
93	27.11.2023	10	2	250	54	7.4
94	27.11.2023	12	2	250	55	7.4
95	12.12.2023	15	2	250	71	13.9
96	12.12.2023	15	2	250	77	14.0
97	12.12.2023	15	2	250	78	13.3
98	12.12.2023	15	2	250	78	13.2
99	24.12.2023	15	2	250	76	4.0
100	24.12.2023	15	2	250	72	4.1
101	24.12.2023	5	2	250	77	5.5
102	24.12.2023	7	2	250	75	4.0
103	24.12.2023	15	2	250	77	5.5
104	24.12.2023	15	2	250	74	4.0
105	9.01.2024	15	2	250	65	14.8
106	9.01.2024	15	2	250	63	13.9
107	9.01.2024	10	2	500	65	14.8
108	9.01.2024	12	2	250	63	13.9
109	9.01.2024	3	2	1000	71	16.0
110	9.01.2024	4	2	250	62	13.8
111	28.01.2024	15	2	250	61	6.0
112	28.01.2024	15	2	250	55	6.3
113	28.01.2024	15	2	250	61	6.0
114	28.01.2024	15	2	250	60	6.1
115	13.02.2024	15	2	250	39	19.2
116	13.02.2024	15	2	250	39	19.0
117	13.02.2024	15	2	250	39	19.4
118	13.02.2024	15	2	250	39	19.1
119	02.03.2024	15	2	250	51	16.3
120	02.03.2024	15	2	250	49	16.1
121	02.03.2024	15	2	250	49	15.9
122	02.03.2024	15	2	250	49	15.6
123	02.03.2024	10	2	250	49	15.7
124	02.03.2024	13	2	250	49	14.9
125	22.03.2024	15	2	250	58	7.5
126	22.03.2024	15	2	250	57	7.7
127	23.04.2024	15	2	250	53	21.0
128	23.04.2024	15	2	250	51	19.4
129	23.04.2024	15	2	250	51	20.3
130	23.04.2024	15	2	250	52	19.0
131	02.05.2024	15	2	250	72	15.7
132	02.05.2024	15	2	250	70	15.1
133	02.05.2024	15	2	250	71	16.1
134	02.05.2024	15	2	250	71	15.5
135	31.05.2024	15	2	250	71	20.0
Maksimum		30	2	1000	78	29.0
Minimum		3	2	250	39	4.0
Ortalama		12	2	282	58	19.1

Kule için tüm ölçümler minimum 4°C sıcaklık ile %39 bağıl nem ve maksimum 29°C sıcaklık ile %78 bağıl nem aralığında gerçekleştirilmiştir.

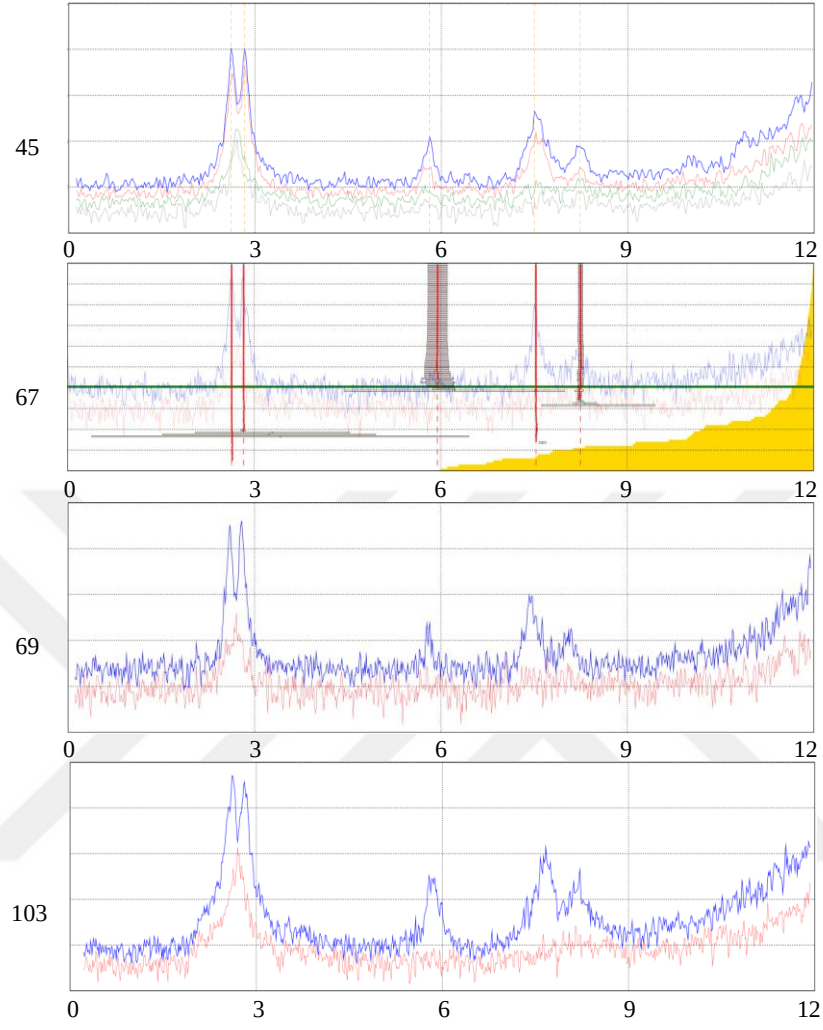
Kuleden alınan titreşim sinyalleri ARTeMIS yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Bu işlemde çözünürlük değeri (resolution) 2048 seçilmiş ve 0-12.5Hz aralığında ayrıştırma gerçekleştirilmiştir. Sinyallerin işlenmesi sonucu elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonları ve tekil değer diyagramlarından bazıları Şekil 73'te verilmiştir. Aşağıdaki şekilde verilen grafiklerde frekans tanım alanında ayrıştırma (FTAA), geliştirilmiş frekans tanım alanında ayrıştırma (GFTAA) ve stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemleri kullanılarak elde edilmiş farklı görsellere sahip analiz çıktıları gösterilmiştir. Grafiklerde 1. düşey eksen ölçüme ait ölçüm numarasını, 2. düşey eksen ölçüme ait tekil değer diyagramını ve yatay eksen kuleye ait frekans değerlerini ifade etmektedir. Grafiklerde çözünürlük değerleri değişkenlik göstermekle birlikte yatay eksen 12Hz'e kadar gösterilmiştir.

Kulenin deneysel doğal frekansları pik seçme metodu ile tüm ölçümler için belirlenen bir sistematiğe belirlenmiştir (Tablo 24). Tablonun alt kısmında doğal frekansların maksimum, minimum, minimum ve maksimumun ortalamaya göre mutlak değerce değişim yüzdeleri, ortalama ve standart sapma değerleri sunulmuştur.



Şekil 73. Kulenin tekil değer grafiklerinden bazıları

Şekil 73'ün devamı,



Tablo 24. Kulenin deneysel doğal frekansları (Hz)

Ölçüm No	Tarih	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
1	10.06.2021	2.652	2.885	5.762	7.676	8.320
2	10.06.2021	2.652	2.850	5.859	7.695	8.184
3	10.06.2021	2.651	2.857	5.899	7.636	8.224
4	10.06.2021	2.638	2.857	5.933	7.608	8.221
5	10.06.2021	2.626	2.852	5.843	7.604	8.232
6	10.06.2022	2.686	2.869	5.969	7.666	8.252
7	10.06.2022	2.673	2.869	5.908	7.642	8.215
8	10.06.2022	2.673	2.856	5.896	7.666	8.203
9	10.06.2022	2.686	2.869	5.933	7.690	8.228
10	10.06.2022	2.686	2.859	5.859	7.666	8.228
11	27.05.2023	2.661	2.881	5.981	7.690	8.325
12	27.05.2023	2.686	2.881	6.006	7.642	8.35
13	27.05.2023	2.661	2.856	5.981	7.690	8.252
14	27.05.2023	2.661	2.856	5.981	7.666	8.252
15	27.05.2023	2.667	2.859	5.988	7.673	8.377
16	27.05.2023	2.637	2.873	5.968	7.610	8.238
17	27.05.2023	2.649	2.863	5.969	7.575	8.173
18	04.06.2023	2.686	2.881	5.908	7.617	8.252
19	04.06.2023	2.661	2.881	5.884	7.666	8.276
20	04.06.2023	2.637	2.856	5.835	7.593	8.203
21	07.06.2023	2.661	2.881	5.933	7.617	8.325
22	08.09.2023	2.667	2.863	5.914	7.562	8.282
23	08.09.2023	2.661	2.850	5.902	7.574	8.307
24	08.09.2023	2.673	2.875	5.847	7.587	8.344
25	08.09.2023	2.673	2.856	5.957	7.581	8.246
26	08.09.2023	2.649	2.850	5.939	7.642	8.276
27	08.09.2023	2.631	2.850	5.872	7.599	8.362
28	08.09.2023	2.649	2.863	5.859	7.635	8.221
29	08.09.2023	2.655	2.869	5.878	7.574	8.270
30	08.09.2023	2.649	2.869	5.896	7.660	8.221
31	08.09.2023	2.637	2.844	5.774	7.562	8.252
32	08.09.2023	2.618	2.814	5.811	7.697	8.301
33	08.09.2023	2.655	2.814	5.792	7.520	8.282
34	08.09.2023	2.600	2.808	5.695	7.422	8.093
35	08.09.2023	2.643	2.844	5.841	7.574	8.240
36	08.09.2023	2.612	2.808	5.762	7.495	8.130
37	08.09.2023	2.655	2.832	5.774	7.520	8.191
38	08.09.2023	2.618	2.808	5.713	7.526	8.191
39	08.09.2023	2.637	2.850	5.804	7.483	8.252
40	08.09.2023	2.606	2.820	5.731	7.446	8.185
41	08.09.2023	2.643	2.869	5.811	7.513	8.252
42	08.09.2023	2.612	2.832	5.768	7.440	8.105
43	08.09.2023	2.631	2.826	5.859	7.562	8.179
44	08.09.2023	2.600	2.795	5.725	7.465	8.087
45	08.09.2023	2.655	2.832	5.811	7.526	8.289
46	08.09.2023	2.618	2.802	5.737	7.452	8.075
47	08.09.2023	2.637	2.856	5.817	7.574	8.191
48	08.09.2023	2.643	2.826	5.853	7.477	8.185
49	08.09.2023	2.625	2.802	5.762	7.458	8.167
50	08.09.2023	2.612	2.814	5.762	7.489	8.130
51	08.09.2023	2.661	2.850	5.756	7.550	8.154
52	08.09.2023	2.631	2.820	5.725	7.483	8.069
53	08.09.2023	2.643	2.832	5.798	7.562	8.246
54	08.09.2023	2.618	2.802	5.707	7.574	8.209
55	08.09.2023	2.625	2.881	5.762	7.538	8.240

Tablo 24'ün devamı,

Ölçüm No	Tarih	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
56	09.09.2023	2.600	2.850	5.743	7.458	8.179
57	09.09.2023	2.631	2.844	5.841	7.568	8.209
58	09.09.2023	2.612	2.820	5.731	7.568	8.118
59	09.09.2023	2.637	2.820	5.853	7.581	8.203
60	09.09.2023	2.606	2.808	5.750	7.471	8.191
61	09.09.2023	2.643	2.838	5.835	7.581	8.154
62	09.09.2023	2.606	2.789	5.768	7.501	8.160
63	24.10.2023	2.649	2.844	5.969	7.544	8.246
64	24.10.2023	2.618	2.802	5.817	7.446	8.087
65	24.10.2023	2.643	2.820	5.859	7.581	8.221
66	24.10.2023	2.618	2.814	5.798	7.501	8.087
67	24.10.2023	2.625	2.808	5.859	7.507	8.179
68	24.10.2023	2.649	2.820	5.890	7.581	8.191
69	24.10.2023	2.612	2.826	5.774	7.465	8.057
70	24.10.2023	2.600	2.826	5.774	7.471	8.105
71	24.10.2023	2.612	2.808	5.786	7.501	8.051
72	24.10.2023	2.637	2.832	5.859	7.556	8.191
73	24.10.2023	2.612	2.808	5.792	7.483	8.087
74	03.11.2023	2.649	2.826	5.829	7.593	8.185
75	03.11.2023	2.618	2.802	5.792	7.513	8.038
76	03.11.2023	2.612	2.826	5.743	7.477	8.142
77	03.11.2023	2.606	2.814	5.841	7.471	8.112
78	09.11.2023	2.576	2.783	5.621	7.355	8.063
79	09.11.2023	2.600	2.814	5.676	7.428	7.983
80	09.11.2023	2.600	2.814	5.664	7.404	8.228
81	09.11.2023	2.570	2.783	5.603	7.324	8.093
82	09.11.2023	2.570	2.808	5.670	7.404	8.087
83	09.11.2023	2.557	2.759	5.548	7.391	8.002
84	13.11.2023	2.563	2.783	5.798	7.428	8.148
85	13.11.2023	2.588	2.814	5.902	7.513	8.209
86	13.11.2023	2.612	2.802	5.811	7.446	8.124
87	13.11.2023	2.618	2.832	5.872	7.593	8.197
88	23.11.2023	2.655	2.869	6.042	7.654	8.258
89	23.11.2023	2.631	2.838	5.878	7.593	8.221
90	23.11.2023	2.667	2.838	6.000	7.703	8.337
91	23.11.2023	2.637	2.808	5.920	7.715	8.099
92	27.11.2023	2.612	2.808	5.768	7.623	8.136
93	27.11.2023	2.637	2.832	5.945	7.672	8.191
94	27.11.2023	2.612	2.802	5.786	7.526	8.057
95	12.12.2023	2.643	2.820	5.957	7.648	8.124
96	12.12.2023	2.667	2.850	5.963	7.794	8.301
97	12.12.2023	2.637	2.826	5.933	7.690	8.368
98	12.12.2023	2.661	2.820	5.951	7.739	8.252
99	24.12.2023	2.600	2.783	5.890	7.574	8.173
100	24.12.2023	2.576	2.759	5.621	7.501	8.142
101	24.12.2023	2.606	2.808	5.835	7.538	8.185
102	24.12.2023	2.576	2.783	5.847	7.556	8.032
103	24.12.2023	2.612	2.802	5.878	7.666	8.215
104	24.12.2023	2.588	2.789	5.792	7.593	8.130
105	09.01.2024	2.673	2.856	5.969	7.782	8.142
106	09.01.2024	2.643	2.826	6.000	7.642	8.228
107	09.01.2024	2.673	2.850	5.951	7.727	8.240
108	09.01.2024	2.643	2.826	5.884	7.648	8.160
109	09.01.2024	2.704	2.887	6.152	7.965	8.453
110	09.01.2024	2.631	2.808	5.896	7.599	8.234

Tablo 24'ün devamı,

Ölçüm No	Tarih	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
111	28.01.2024	2.600	2.789	5.896	7.635	8.191
112	28.01.2024	2.576	2.789	5.841	7.562	8.014
113	28.01.2024	2.631	2.808	5.847	7.581	8.093
114	28.01.2024	2.606	2.753	5.823	7.574	8.020
115	13.02.2024	2.637	2.789	5.756	7.635	8.008
116	13.02.2024	2.612	2.759	5.743	7.513	7.953
117	13.02.2024	2.655	2.808	5.817	7.520	8.099
118	13.02.2024	2.631	2.777	5.768	7.507	8.026
119	02.03.2024	2.643	2.814	5.811	7.556	8.087
120	02.03.2024	2.612	2.783	5.780	7.483	7.996
121	02.03.2024	2.612	2.777	5.835	7.587	8.075
122	02.03.2024	2.606	2.765	5.835	7.513	7.983
123	02.03.2024	2.618	2.795	5.768	7.526	8.044
124	02.03.2024	2.594	2.765	5.725	7.501	7.916
125	22.03.2024	2.661	2.808	5.920	7.800	8.264
126	22.03.2024	2.631	2.820	5.859	7.642	8.221
127	23.04.2024	2.612	2.802	5.804	7.538	8.057
128	23.04.2024	2.588	2.777	5.640	7.477	7.959
129	23.04.2024	2.612	2.795	5.707	7.471	7.990
130	23.04.2024	2.588	2.771	5.652	7.434	7.941
131	02.05.2024	2.625	2.850	5.835	7.629	8.118
132	02.05.2024	2.612	2.814	5.762	7.526	8.014
133	02.05.2024	2.649	2.838	5.817	7.709	8.093
134	02.05.2024	2.625	2.802	5.737	7.538	8.032
135	31.05.2024	2.661	2.832	5.890	7.678	8.252
Maksimum		2.704	2.887	6.152	7.965	8.453
Minimum		2.557	2.753	5.548	7.324	7.916
Ortalama		2.631	2.825	5.833	7.570	8.170
Standart Sapma		0.029	0.032	0.098	0.097	0.103
Min-Ort. Değişim (%)		2.806	2.561	4.892	3.245	3.114
Maks-Ort. Değişim (%)		2.781	2.182	5.462	5.223	3.459
Ortalama Değişim (%)		2.794	2.371	5.177	4.234	3.286

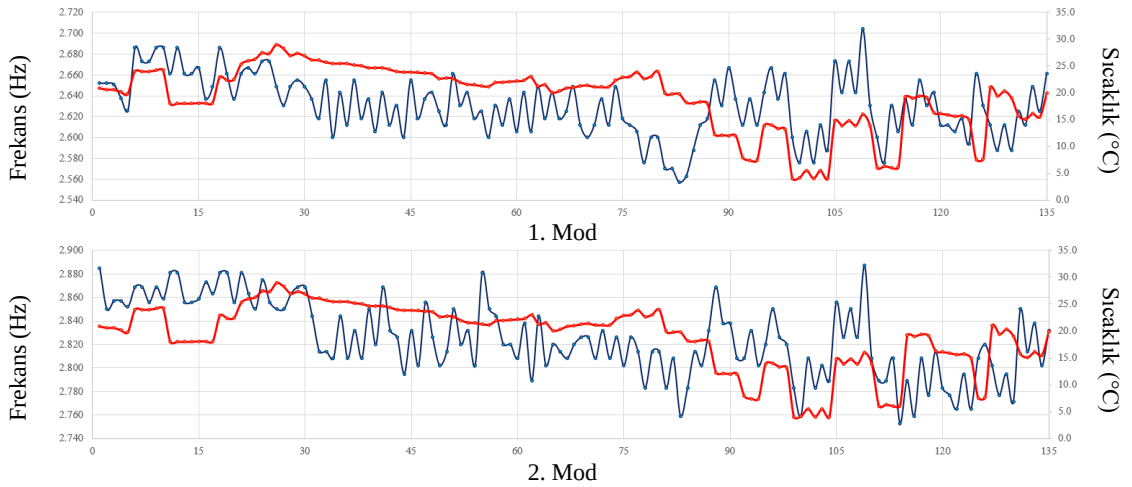
Yapılan ölçümlerde kulenin ilk 5 moduna ait deneysel doğal frekanslarının tamamı %100 oranında tespit edilmiştir. Bu veriler değerlendirildiğinde doğal frekanslardaki ortalama değişimin %2.371 ile en az 2. modda ve %5.177 ile en çok 3. modda olduğu görülmüştür.

2.4.3. Kuleye ait Modelin Regresyon Analiz Çalışmaları

Kule üzerinde CEVS titreşim ölçüm sistemiyle alınan titreşim verilerinin analizleri sonucunda kuleye ait deneysel doğal frekanslar elde edilmiştir. Titreşim ölçümlerin yapılması esnasında modellere ait sıcaklık ve nem değerleri de toplanmıştır. Toplanan veriler bağımlı değişkenler ve bağımsız değişkenler olarak 2 gruba ayrılmış ve aşağıda sıralanan regresyon analizlerine tabi tutulmuştur.

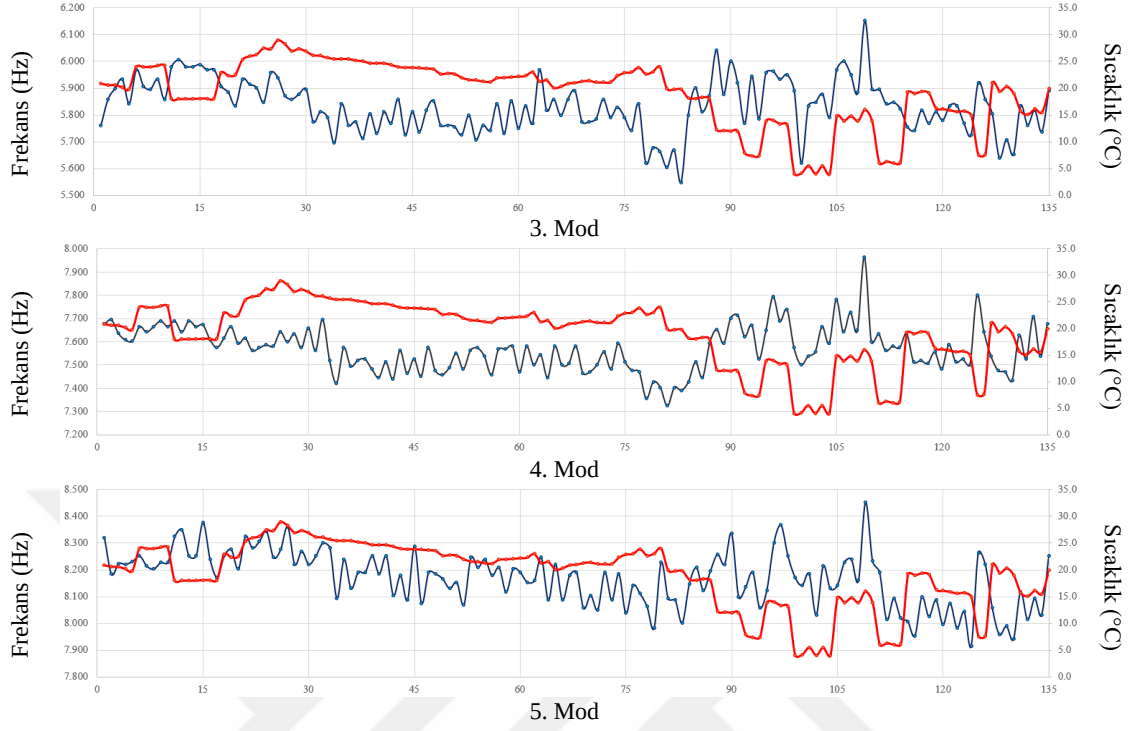
- Basit doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri ilk 5 frekans değeri için yapılmıştır. Bu analizlerde bağımsız değişkenler sıcaklık ve nem, bağımlı değişken ise deneysel doğal frekanslardır. Analizlerde sıcaklık ve nem değişkenleri ayrı ayrı incelenmiştir. Analizlerde bağımlı değişken ile 1 bağımsız değişken (sıcaklık ya da nem) arasında doğrusal ve doğrusal olmayan irdelemeler yapılmıştır.
- ÇDRA bağımsız değişkenler nem ve sıcaklık ile bağımlı değişken doğal frekanslar arasında doğrusal olarak gerçekleştirilmiştir.
- MARS analizleri MATLAB yazılımında gerçekleştirilmiştir. Kulenin frekansları bağımlı değişkenler olup bağımsız değişkenler ise sıcaklık, nem ve nem-sıcaklık değişkenleridir. Gerçekleştirilmiş 3 farklı MARS analizi için input ve output dosyaları ayrı ayrı hazırlanmıştır. Kulenin ilk 5 moduna ait frekanslar incelendiğinden her bir MARS analizi için 1 input 5 output veri kümesi hazırlanmıştır.
- Kuleye ait Modelin Sıcaklığa Bağlı Analizleri

Kulenin ilk 5 moda ait frekans değerinin sıcaklık ve ölçüm sayısına göre değişimi sırasıyla Şekil 74'teki gibi elde edilmiştir. Bu grafiklerde sıcaklık arttıkça frekanslarda genel bir artış, azaldıkça genel bir azalış ve farklı zamanlarda dalgalanmalar gözlenmiştir. Grafiklerdeki mavi renkli çizgi frekans değerleri, kırmızı renkli çizgi sıcaklık değerleri, soldaki sütun kulenin her bir moda ait frekansları, en sağdaki sütun ise ölçülen sıcaklık değerleridir.



Şekil 74. Kulenin doğal frekanslarının sıcaklığa göre değişimi

Şekil 74'ün devamı,

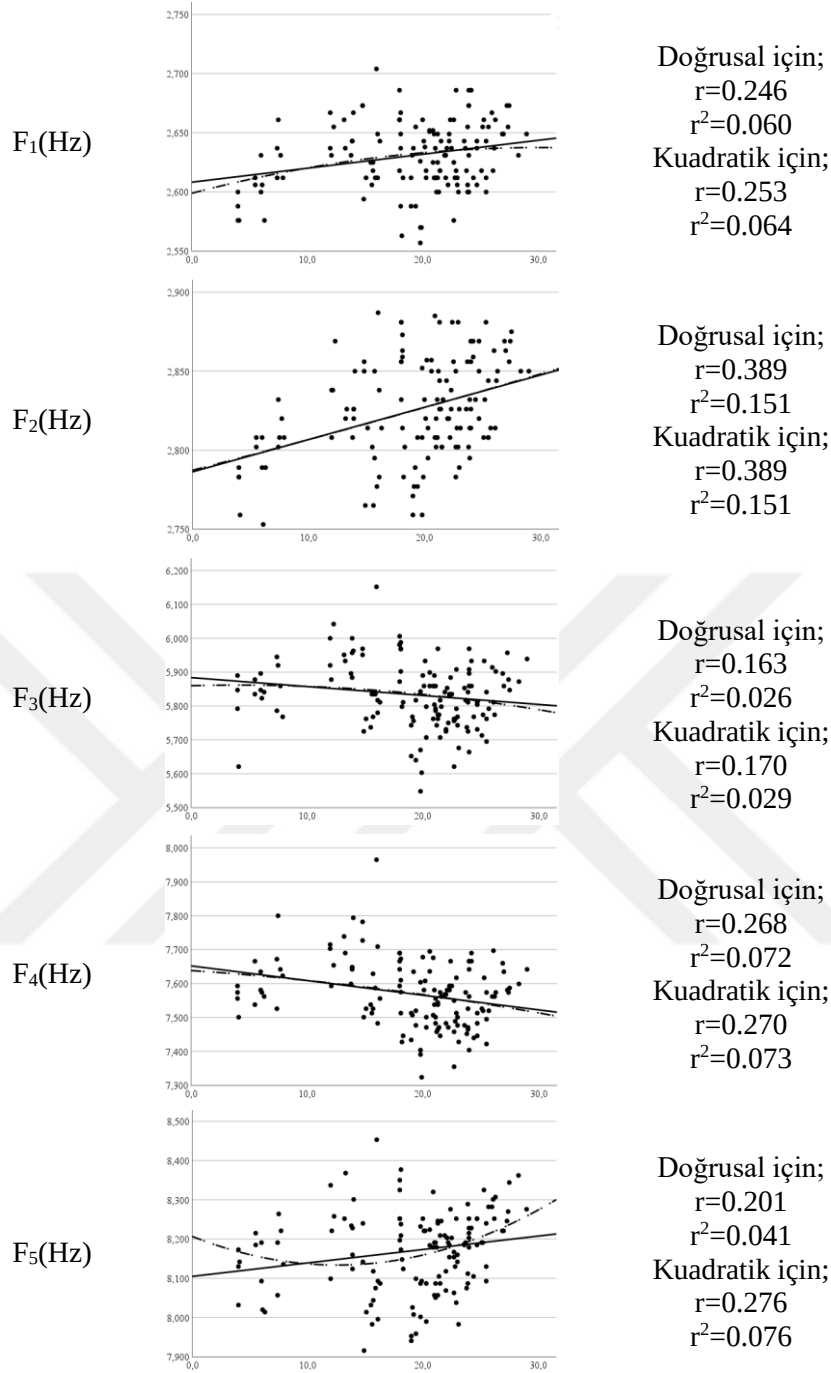


Kulenin deneysel frekanslarının sıcaklıkla ilişkileri basit doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle belirlenmiş ve aşağıdaki dağılım grafiğinde verilmiştir (Şekil 75). Modele ait en yüksek r^2 değerini veren mod için frekansların sıcaklıkla ilişkilerini ifade eden doğrusal ve doğrusal olmayan denklemler Tablo 25'te sunulmuştur. Şekillerde siyah noktalar ölçüm verilerini, devamlı çizgi doğrusal eğriyi, kesikli çizgi ise kuadratik (quadratic) eğriyi ifade etmektedir. Şekillerdeki yatay eksen $^{\circ}\text{C}$ cinsinden sıcaklığı (S) göstermektedir.

Tablo 25. Kulenin frekanslarının sıcaklığa bağlı denklemleri

Yapı	Basit Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Denklemleri
Kule	$F_{2\text{Lineer}}=2.786+0.002S$
	$F_{2\text{Quadratic}}=2.787+0.002S+(4.516E-6)S^2$

Kule üzerinde gerçekleştirilen ölçüm verileri MARS yöntemiyle de analiz edilmiştir. Bu analizlerde doğal frekanslar bağımlı değişken (output), sıcaklık değerleri ise bağımsız değişken (input) tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen değerlerden bazıları Tablo 26'da verilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde tüm veriler kullanılmıştır.



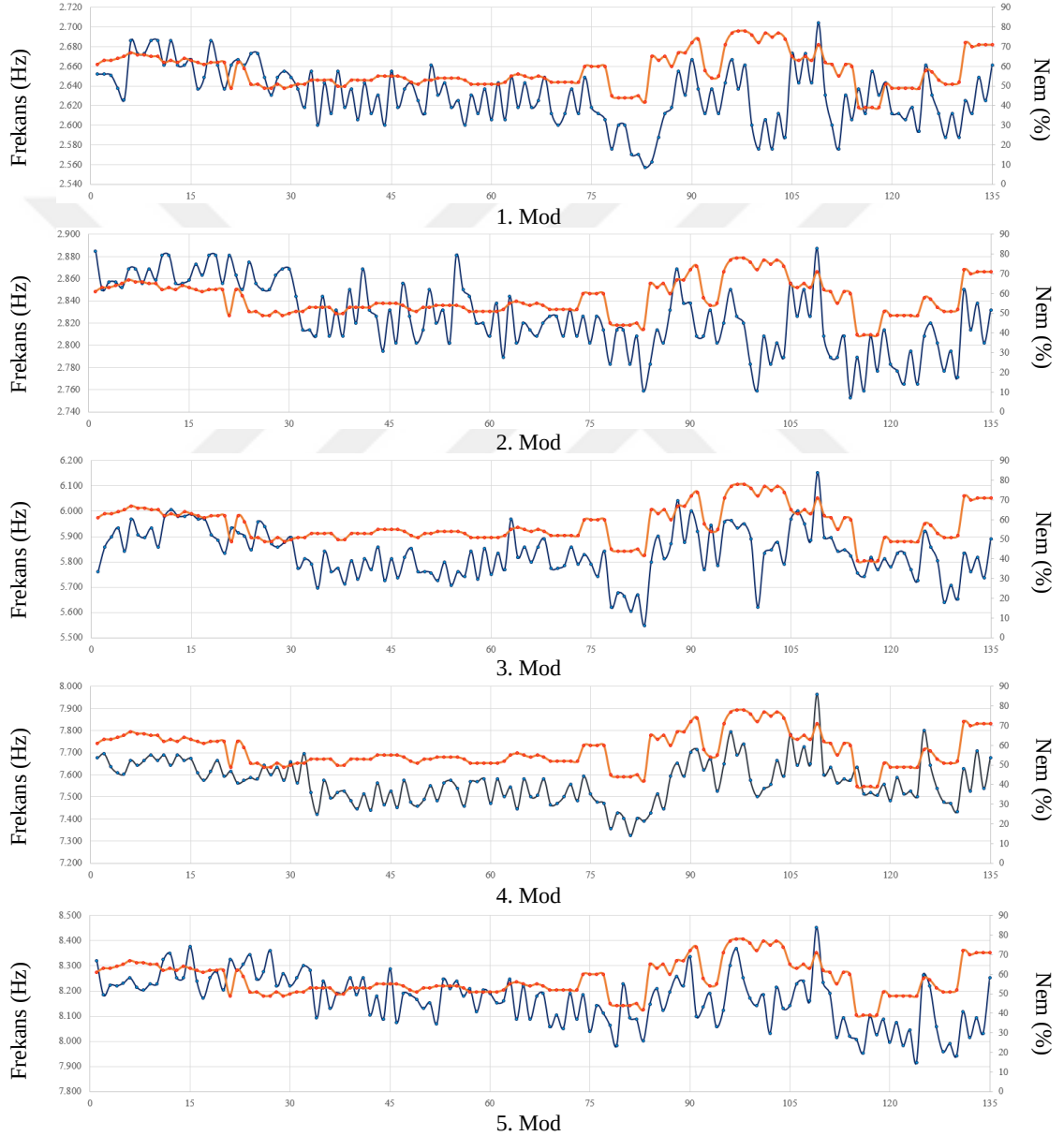
Şekil 75. Kulenin doğal frekanslarının sıcaklıkla ilişkisi

Tablo 26. Kulenin 1 parametrel (S) MARS analizi

Tipi	Lin/Cbc	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
Prmt. 1 (%)	RI	Cbc	Cbc	Cbc	Cbc	Cbc
	r^2	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
		0.132	0.243	0.310	0.230	0.330

- Kuleye ait Modelin Neme Bağlı Analizleri

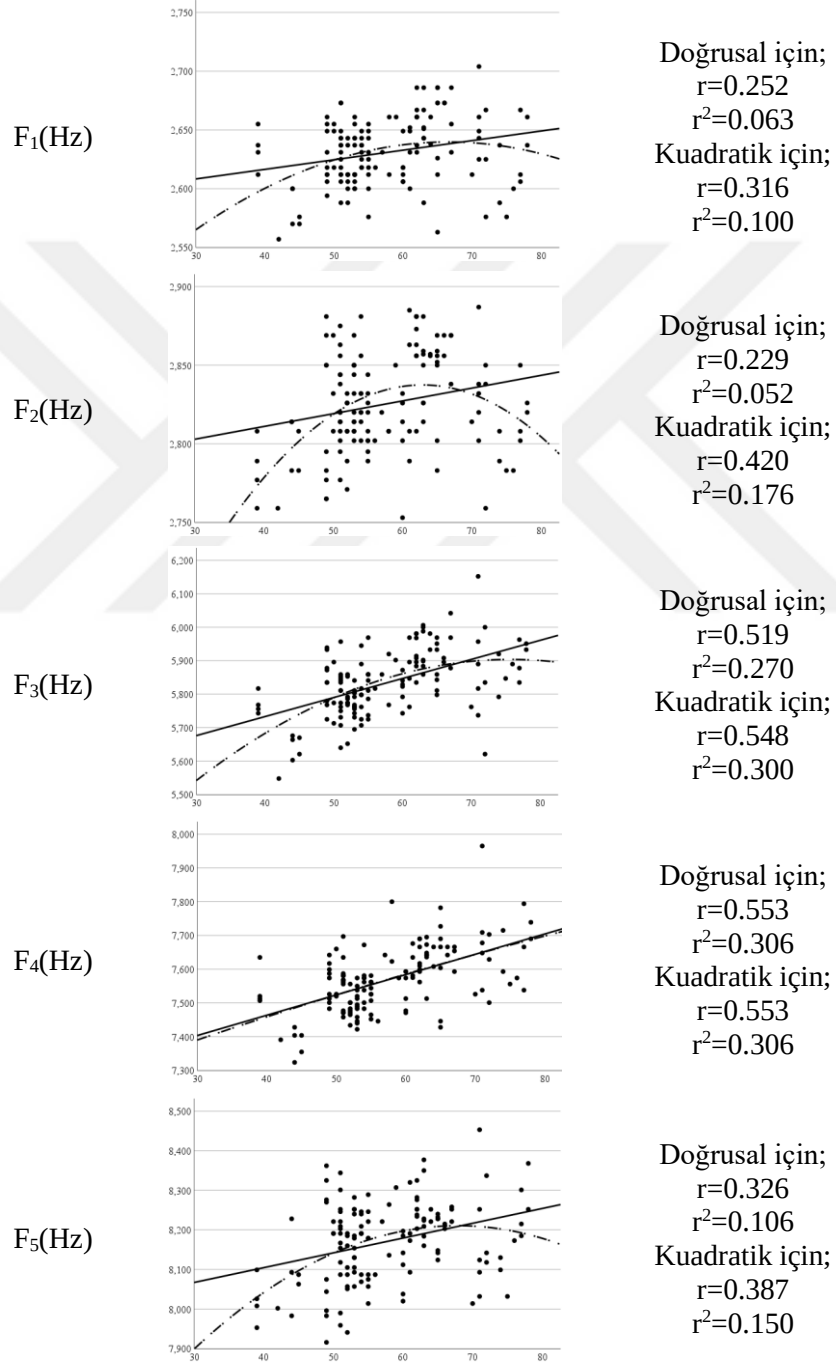
Kulenin ilk 5 frekans değerinin bağıl nem ve ölçüm sayısına göre değişimi sırasıyla Şekil 76'daki gibi elde edilmiştir. Bu grafiklerde nem arttıkça frekanslarda genel bir artış, azaldıkça genel bir azalış ve farklı zamanlarda dalgalanmalar gözlenmiştir. Grafiklerdeki mavi renkli çizgi frekans değerleri, turuncu renkli çizgi nem değerleridir.



Şekil 76. Kulenin doğal frekanslarının neme göre değişimi

Kulenin doğal frekanslarının bağıl nemle ilişkileri basit doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle belirlenmiştir (Şekil 77). Bu şekillerde tüm modlara ait korelasyon ve

determinasyon katsayıları sunulmuştur. Kuleye ait en yüksek r^2 değerini veren mod için frekansların nemle ilişkilerini ifade eden denklemler verilmiştir (Tablo 27). Şekillerde siyah noktalar ölçüm verilerini, devamlı çizgi doğrusal eğriyi, kesikli çizgi ise kuadratik (quadratic) eğriyi ifade etmektedir. Şekillerdeki yatay eksen % cinsinden bağıl nemi (N) ifade etmektedir.



Şekil 77. Kulenin doğal frekanslarının nemle ilişkisi

Tablo 27. Kulenin doğal frekanslarının neme bağlı denklemleri

Yapı	Basit Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Denklemleri
Kule	$F_{4\text{Lineer}}=7.223+0.006N$ $F_{4\text{Quadratic}}=7.165+0.008N-(1.705E-5)N^2$

Kulenin doğal frekanslarının nemle ilişkileri MARS yöntemiyle de analiz edilmiştir (Tablo 28).

Tablo 28. Kulenin 1 parametrelili (N) MARS analizi

		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
Tipi	Lin/Cbc	Cbc	Cbc	Cbc	Cbc	Cbc
Prmt. 1 (%)	RI	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
	r ²	0.230	0.260	0.405	0.461	0.213

- Kuleye ait Modelin Nem ve Sıcaklığa Bağlı Analizleri

Kulenin her bir moda ait deneysel doğal frekanslarıyla nem-sıcaklık ilişkileri çoklu doğrusal regresyon analiz ve MARS yöntemiyle belirlenmiştir. ÇDRA sonucu elde edilen korelasyon (r) ve determinasyon katsayıları (r²) ile doğal frekansların sıcaklık (S) ve bağıl nem (N) değişkenlerine bağlı denklemler Tablo 29’da verilmiştir. MARS yöntemiyle kulenin frekansları üzerinde yapılan 2 parametrelili regresyon analizlerinde nem ve sıcaklık (N-S) bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir (Tablo 30).

Tablo 29. Kulenin doğal frekanslarının nem-sıcaklık ile ilişkileri (ÇDRA)

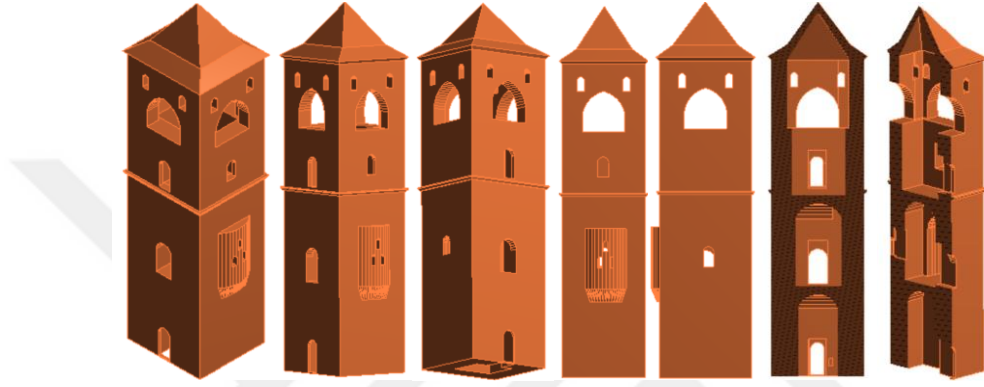
Yapı	Mod No	r	r ²	ÇDRA Denklemleri
Kulesi	1	0.504	0.254	$F_{1\text{Lineer}}=2.488+0.002N+0.002S$
	2	0.633	0.400	$F_{2\text{Lineer}}=2.637+0.002N+0.004S$
	3	0.533	0.284	$F_{3\text{Lineer}}=5.416+0.006N+0.002S$
	4	0.553	0.306	$F_{4\text{Lineer}}=7.210+0.006N$
	5	0.539	0.291	$F_{5\text{Lineer}}=7.623+0.007N+0.009S$

Tablo 30. Kulenin 2 parametrelili (N-S) MARS analizi

		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod
Tipi	Lin/Cbc	Lin	Lin	Lin	Lin	Lin
Prmt. 1 (%)	RI	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Prmt. 2 (%)	RI	100.000	100.000	6.116	100.000	100.000
	r ²	0.612	0.663	0.623	0.683	0.502

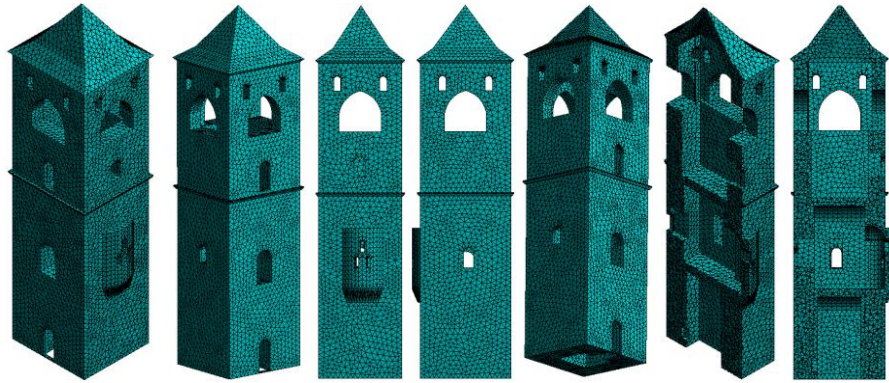
2.4.4. Kulenin Sonlu Eleman Modellemesi

Kulenin SE modeli ANSYS WB yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Yapıya ait boyutlar, malzeme özellikleri, zemin sınıfı ve çizimler vb. gerekli bilgiler Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Kulenin SE modelinde katı eleman tipi kullanılmış olup kule makro modelleme tekniğiyle oluşturulmuştur. Kulenin SE modeline ait görünüş ve kesitlerden bazıları Şekil 78'de verilmiştir.



Şekil 78. 3-D görünüş ve kesitler

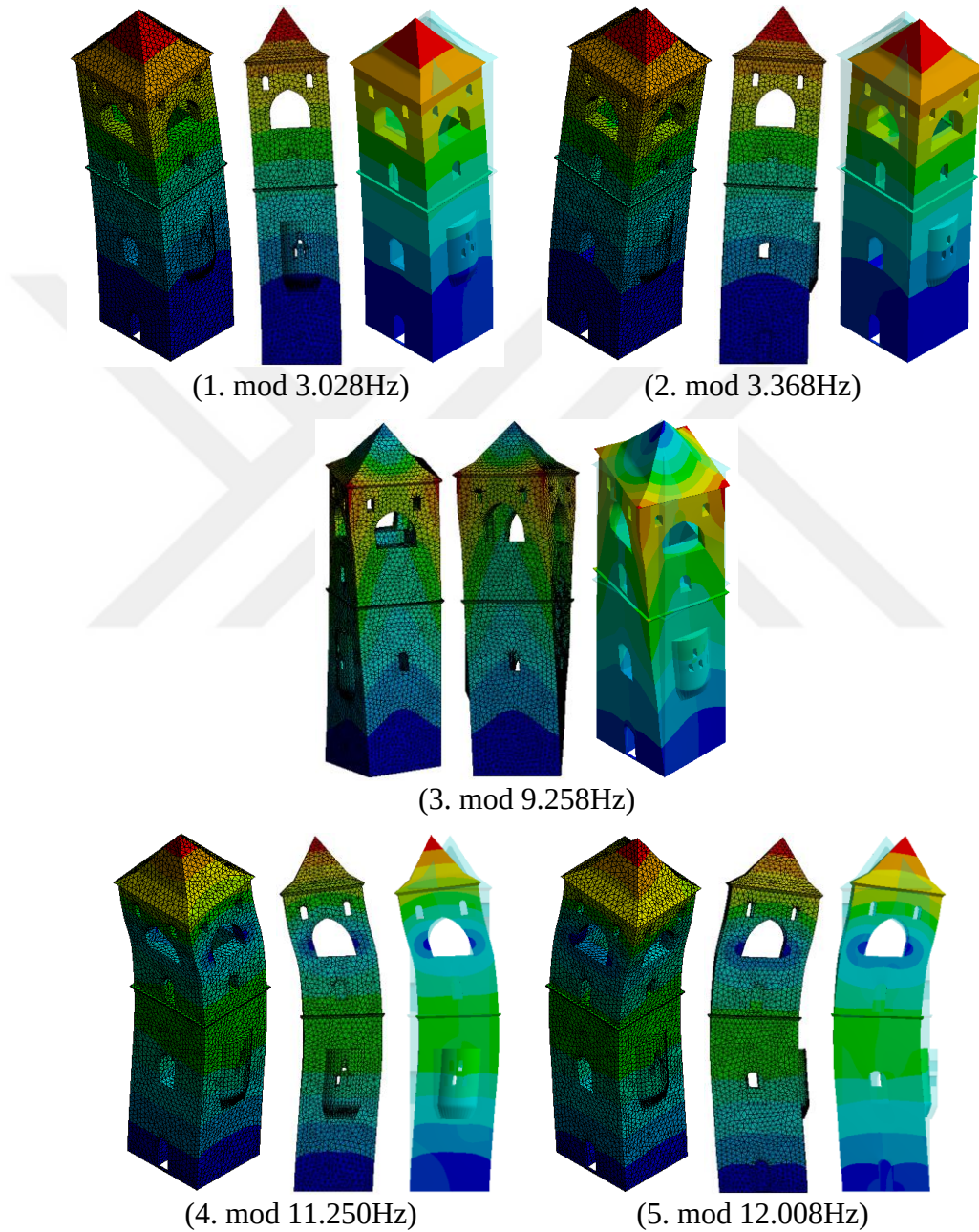
Kulenin başlangıç SE modeli 30cm mesh yapılarak 185250 düğüm ve 121714 katı elemandan oluşturulmuştur. Meshlenmiş başlangıç SE modelinin 3-D görünüş ve kesitleri Şekil 79'da verilmiştir. Başlangıç SE modelinde mesnet tipi olarak ankastre mesnet seçilmiştir.



Şekil 79. Kulenin SE modeline ait mesh görünüş ve kesitleri

Yapının başlangıç SE modelinde birim hacim ağırlığı 2000kg/m^3 , elastisite modülü $3.5\text{E}9\text{N/m}^2$ ve Poisson oranı 0.2 olarak kabul edilmiştir. Kulenin başlangıç sayısal dinamik

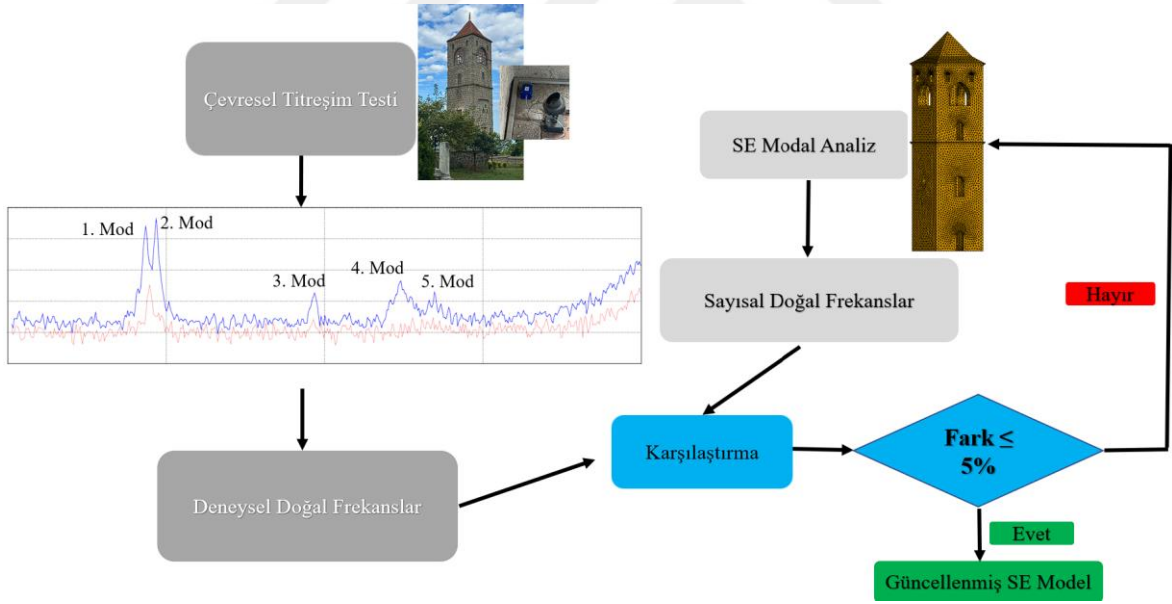
karakteristikleri için modal analiz yapılmış ve kulenin ilk 5 frekans değeri 3.028Hz ile 12.008Hz aralığında elde edilmiştir (Şekil 80). Kulenin ilk 2 modu 1. eğilme modları (enine ve boyuna), 3. modu burulma modu ve 4. ve 5. modları ise 2. eğilme modları olarak belirlenmiştir (Yanık vd., 2022).



Şekil 80. Kulenin ilk 5 moduna ait mod şekilleri ve frekans değerleri

2.4.5. Kulenin SE Model Güncellemeleri

Kulenin başlangıç SE modeli üzerinde manuel model güncelleme yöntemi kullanılarak kulenin güncelleme işlemleri tamamlanmıştır. Güncelleme işlemlerinde kulenin ilk 5 deneysel doğal frekans değerleri, sıcaklık ve nem değerlerine karşılık gelen frekans değerleriyle başlangıç SE modelinin sayısal doğal frekans değerleri arasındaki fark en aza indirgenmeye çalışılmıştır (Şekil 81). Kulenin başlangıç SE modeli ilk 5 doğal frekans değerlerinin minimum ve maksimum değerlerine göre iki farklı şekilde güncellenmiştir. Doğal frekansların maksimum ve minimum değerlerine göre güncellenmiş SE modelden elde edilen sayısal doğal frekanslar deneysel doğal frekanslarla karşılaştırılmış ve aralarındaki fark %5'in altına indirilmeye çalışılmıştır. Kulenin mesnet şartlarındaki ankastre mesnet yerine 3 yönde yay sabitleri kullanılarak ve malzeme özelliklerinde yapılan değişimlerle kulenin güncellenmiş SE modelleri elde edilmiştir. Bu sayede çevresel etkilere bağlı olarak elastisite modülünün de değişim aralığı belirlenebilmiştir.



Şekil 81. Kulenin SE model güncelleme aşaması

Model güncellemede elastisite modülünde (N/m^2) ve birim hacim ağırlığında (kg/m^3) yapılan değişiklikler Tablo 31'de verilmiştir. Poisson oranı kulenin tüm SE modellerinde 0.2 olarak alınmıştır.

Tablo 31. Kulenin SE modellerindeki malzeme özellikleri

Eleman	Elastisite Modülü			Birim Hacim Ağırlığı		
	Başlangıç	Güncel _{min}	Güncel _{maks}	Başlangıç	Güncel _{min}	Güncel _{maks}
Taş	3.50E9	2.80E9	3.209E9	2000	1850	1850

Güncelleme işlemleri sonucunda elde edilen frekans değerleri ile deneysel doğal frekans değerleri arasındaki farklar Tablo 32’de sunulmuştur. Deneysel sonuçlarla güncellenmiş SE modellerine ait sonuçları karşılaştırıldığında güncellenmiş SE modellerinin daha gerçekçi bir model olduğu belirlenmiştir.

Tablo 32. Kulenin deneysel, sayısal doğal frekansları (Hz) ve farkları

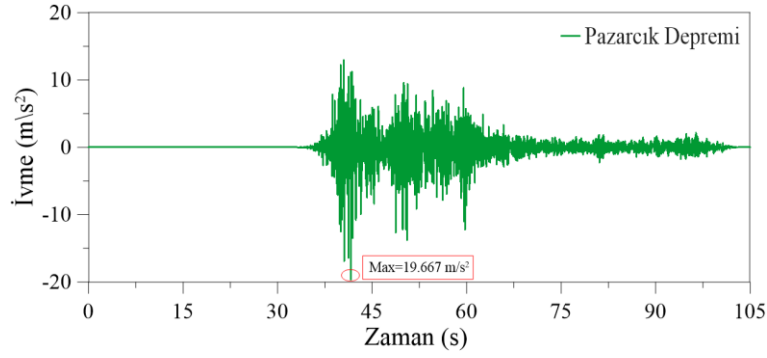
Mod No	Güncel _{min} SE	Deneysel- Güncel _{min} Farklar* (%)	Deneysel _{min}	Güncel _{maks} SE	Deneysel- Güncel _{maks} Farklar* (%)	Deneysel _{maks}
1	2.525	-1.25	2.557	2.663	-1.53	2.704
2	2.783	1.09	2.753	2.932	1.57	2.887
3	5.700	2.74	5.548	5.847	-4.96	6.152
4	7.649	4.44	7.324	7.916	-0.62	7.965
5	7.899	-0.22	7.916	8.172	-3.32	8.453

*Farklar $100 \times (\text{Sayısal} - \text{Deneysel}) / \text{Deneysel}$ olarak hesaplanmıştır.

2.4.6. Kulenin Deprem Analizleri

Kulenin başlangıç ve güncellenmiş SE modelleri üzerinde deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde gerçekte kaydedilen yer hareketi verileri kullanılarak zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Zaman tanım alanı analizi, bir yapının deprem altındaki dinamik tepkisinin daha doğru bir temsilini sağlayabilmesi açısından tercih edilmiştir.

Ülkemizde mevcut çok sayıda aktif fay hattı nedeniyle yıkıcı depremler yaşanmış ve bu yıkıcı depremlerden yakın bir geçmişte meydana gelen 6 Şubat Kahramanmaraş deprem ivme verileri deprem analizlerinde kullanılmak üzere seçilmiştir. Doğrusal dinamik zaman alanı analizlerini gerçekleştirmek amacıyla seçilen ivme kaydı Şekil 82’de verilmiştir (URL-42, 2024).

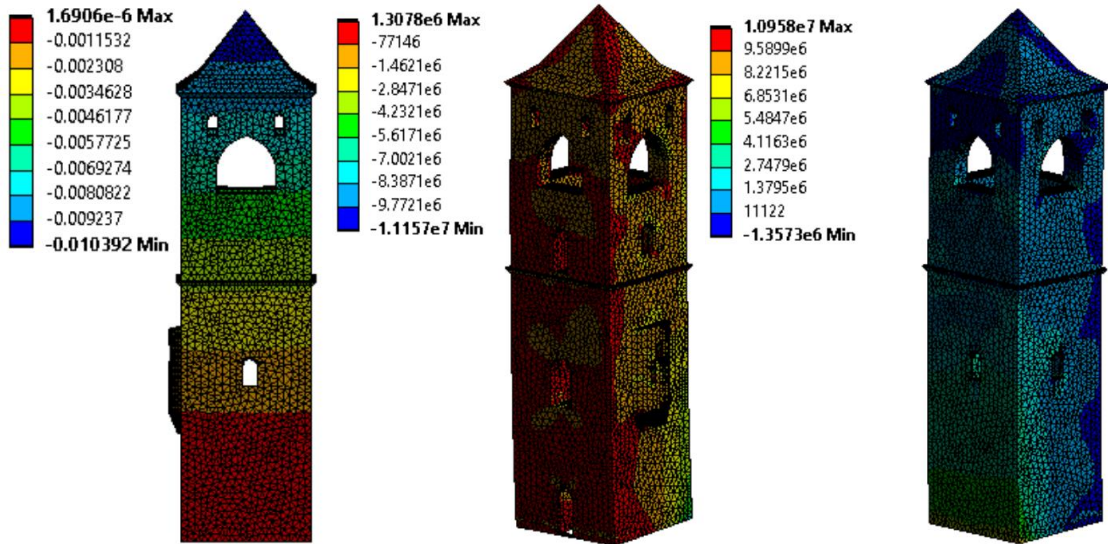


Şekil 82. Pazarcık depremine ait ivme zaman grafiği

Kulenin başlangıç SE ve güncellenmiş SE modelleri üzerinde yapılan zaman tanım analizlerinden elde edilen toplam deformasyon (m), minimum ve maksimum asal gerilmeler (N/m^2) Tablo 33'teki gibi elde edilmiştir. Kulenin başlangıç SE modeli üzerinde gerçekleştirilen deprem analizinden elde edilen maksimum ve minimum asal gerilme dağılımları aşağıda verilmiştir (Şekil 83).

Tablo 33. Kulenin deprem analizlerinden elde edilen değerler

Kulenin SE Modeli	Yer Değiştirme	Minimum Gerilme	Maksimum Gerilme
Başlangıç	0.10392	-1.1157E7	1.0958E7
Güncel _{min}	0.14551	-1.0064E7	1.1201E7
Güncel _{maks}	0.15079	-1.4602E7	1.3364E7



Şekil 83. Kulenin başlangıç modeline ait yer değiştirme ve gerilme değerleri

2.5. İskenderpaşa Cami'sinin Minaresi Üzerinde Yapılan Çalışmalar

2.5.1. İskenderpaşa Cami'sine ve Minaresine ait Genel Bilgiler

İskenderpaşa Cami, Osmanlı İmparatorluğu zamanında padişah Kanuni Sultan Süleyman döneminde, camiye ismini veren Trabzon Valisi İskender Paşa tarafından 1529 yılında kesme taş kullanılarak yapılmıştır (Tuluk, 2007). Caminin iç alanı 650m² olup 800 kişilik bir kapasiteye sahip cami, 1103m² arsanın üzerine kuruludur. Yapının mülkiyeti Vakıflar Genel Müdürlüğü'ne aittir. Ana mekanın üzerinde kiremit ile örtülü bir kubbe bulunmaktadır. Caminin yığma malzemeden yapılmış tek şerefeli bir minaresi mevcuttur (Şekil 84). Yapıda yer alan kitabeler, yapının farklı dönemlerde onarım geçirdiğini gösterirken bu yapı son olarak 2010 yılında Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından restore edilmiştir.



Şekil 84. İskenderpaşa Cami'sine ve minaresine ait görüntü

Minarenin yaklaşık olarak 4.8m'si caminin batı duvarının orta kısmında camiye bitişiktir. Minare tuğla malzeme ile kesme taşın almaşık bir düzende inşa edilmesiyle yapılmıştır. Ayrıca minare içinde metal bağlantı çubuklar (kenetler) bulunmaktadır. Minare tabandan üste doğru sırasıyla kaide, küp, gövde, mukarnas, şerefe, petek, külah ve alem bölümlerinden oluşmaktadır. Minarenin kaide bölümü kesme taştan, gövde ve petek bölümü kesme taş ve tuğladan, külah bölümü ise ahşap malzeme ile yapılmış ve külahın üzeri kurşun kaplanmıştır. Şerefe korkulukları üzerinde motiflerle süslenmiş taşlar, şerefe altında ise tuğladan yapılmış süslemeler mevcuttur (Rölöve, 2007). Minarenin boyu 21.41m olup iç kısmında yer alan taştan yapılmış çekirdeğin çapı tabandan yukarı doğru 18.5cm ile 27cm

aralığında değişmektedir (Aymelek, 2022). Çekirdeğin etrafında basamaklarının ortalama yüksekliği 20.78cm olan 79 adet merdiven bulunmaktadır (Aymelek, 2023). Merdivenin iç ve dış yarıçapları ortalama olarak sırasıyla 9.4cm ve 62.79cm olup bir turda toplamda 13 adet merdiven basamağı yer almaktadır. Minarenin kaidesi dokuzgen şeklindedir (Şekil 85) (Rölöve, 2007).



Şekil 85. Minareye ait görüntüler

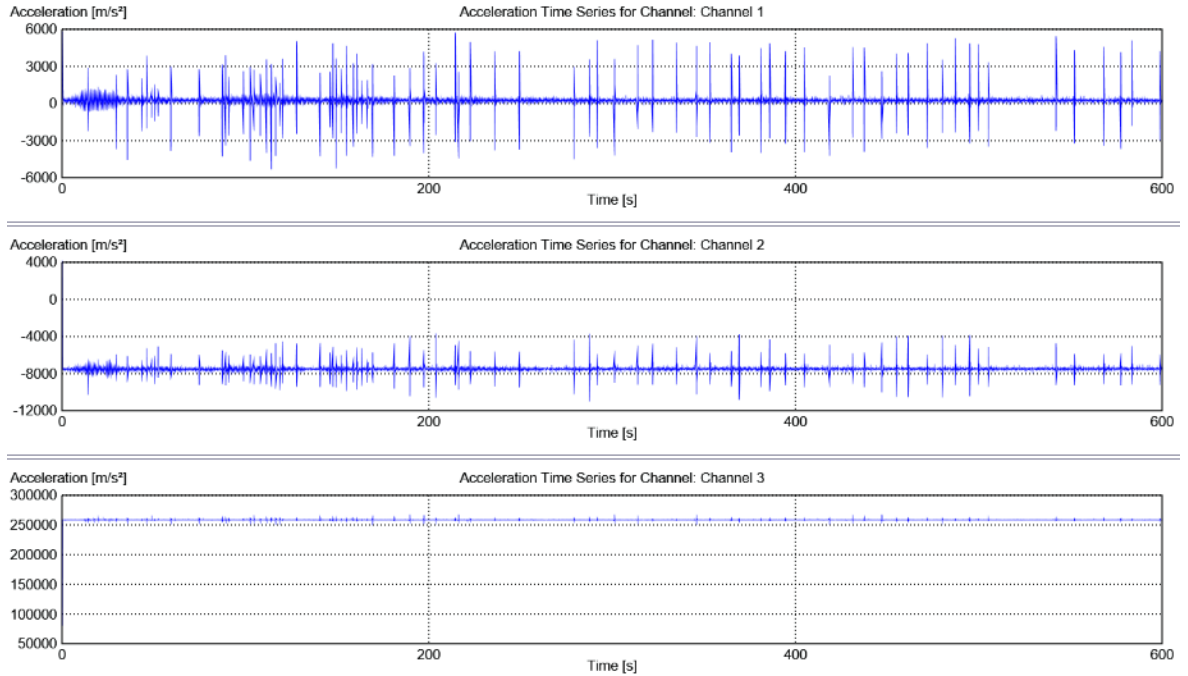
2.5.2. Minarenin Ölçümleri

Minare üzerinde geliştirilen CEVS titreşim ölçüm sistemiyle 2021, 2022 ve 2023 yıllarının farklı zamanlarında titreşim verileri toplanmış ve toplanan verilerin analizleri sonucunda elde edilen doğal frekans değerlerinin çevresel etkilerle ne kadar değiştiği gözlemlenmeye çalışılmıştır. Yapısal takipte doğal frekanslar ÇTT yöntemiyle ve sıcaklık-nem değerleri ise dijital ölçüm cihazıyla eş zamanlı olarak belirlenmiştir. Minarenin ölçümleri trafik, insan hareketi, rüzgâr, kazı çalışmaları gibi çevresel etkiler ve kauçuk tokmakla oluşturulan rastgele küçük titreşimler altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 86'da titreşim ölçüm düzeneği örneklerinden bazıları verilmiştir.



Şekil 86. Minarenin ölçüm düzeneklerinden bazıları

Ölçümlerde kullanılan CEVS sistemi, minarenin çeper duvarının iç yüzüne, çekirdeğin üst yüzeyine yatay olarak ya da çekirdeğin yan yüzeyine dikey olarak sıcak silikon yardımıyla sabitlenmiştir. Titreşim ölçümleri sırasında farklı örnekleme sayılarıyla farklı sürelerde titreşim verileri kaydedilmiştir. Benzer minareler üzerinde yapılan literatür taramasından ve elde edilen frekans değerleri baz alındığında bu sayıların yeterli olduğu görülmüştür. Şekil 87’de alınan sinyal verisine ait ivme verilerinden biri sunulmuştur. Minarede gerçekleştirilen titreşim ölçümlerine ait bilgiler Tablo 34’te verilmiştir.



Şekil 87. Minare üzerinde gerçekleştirilen bir ölçüme ait ivme değerleri

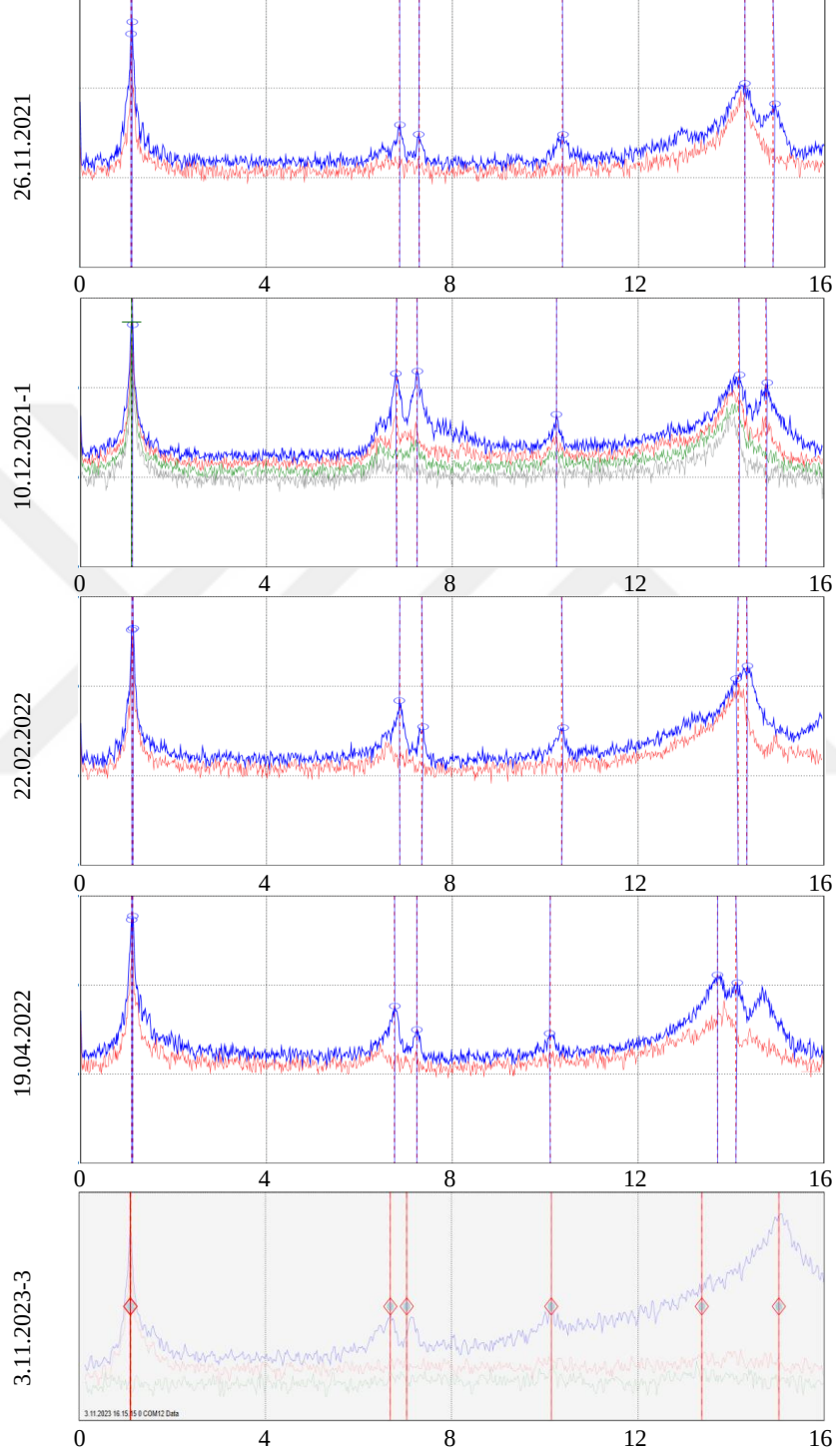
Tablo 34. Minarede gerçekleştirilen ölçümlere ait bilgiler

Ölçüm No	Tarih	Süre (dk)	G Range	Fs (Hz)	Nem (%)	Sıcaklık (°C)
1	10.06.2021	14.59	2	250	76	18.0
2	10.06.2021	15.08	2	250	76	18.0
3	1.07.2021	15.09	2	250	68	21.0
4	1.07.2021	13.88	2	250	68	21.0
5	22.10.2021	9.08	2	250	67	17.0
6	22.10.2021	15.11	2	250	67	17.0
7	22.10.2021	9.98	2	250	67	17.0
8	12.11.2021	15.09	2	250	47	12.1
9	26.11.2021	15.08	2	250	61	12.3
10	10.12.2021	12.99	2	250	55	12.5
11	10.12.2021	13.02	2	250	55	12.5
12	27.12.2021	15.09	2	250	43	12.4
13	13.01.2022	14.33	2	250	71	9.0
14	24.01.2022	15.08	2	250	66	5.6
15	8.02.2022	15.10	2	250	41	15.2
16	22.02.2022	15.08	2	250	59	11.7
17	8.03.2022	15.07	2	250	57	9.3
18	22.03.2022	15.07	2	250	64	7.1
19	19.04.2022	15.08	2	250	64	12.5
20	7.05.2022	13.37	2	250	71	12.8
21	19.05.2022	15.09	2	250	64	14.3
22	9.06.2022	15.15	2	250	79	23.0
23	26.05.2023	10.00	2	1000	70	18.0
24	26.05.2023	10.00	2	250	76	17.7
25	26.05.2023	10.00	2	250	72	18.0
26	26.05.2023	7.00	2	1000	72	18.0
27	3.11.2023	10.00	2	250	61	18.9
28	3.11.2023	10.00	2	250	65	19.1
29	3.11.2023	5.00	2	250	61	18.9
30	3.11.2023	3.00	2	250	64	19.0
31	3.11.2023	10.00	2	250	64	19.0
32	3.11.2023	10.00	2	250	65	19.3
33	3.11.2023	10.00	2	250	65	19.3
34	9.11.2023	10.00	2	250	71	19.6
35	9.11.2023	15.00	2	250	70	19.7
36	9.11.2023	15.00	2	250	62	20.3
37	17.11.2023	15.00	2	250	62	13.8
38	17.11.2023	15.00	2	250	67	14.3
39	17.11.2023	15.00	2	250	66	14.1
40	7.12.2023	10.00	2	500	74	13.9
41	7.12.2023	10.00	2	250	79	13.9
42	7.12.2023	10.00	2	250	77	13.7
Maksimum		15.15	2	1000	79	23.0
Minimum		3.00	2	250	41	5.6
Ortalama		12.44	2	292	65	15.7

Minare için tüm ölçümler minimum 5.6°C sıcaklık ile %41 bağıl nem ve maksimum 23°C sıcaklık ile %79 bağıl nem aralığında gerçekleştirilmiştir.

Titreşim ölçümleriyle elde edilen titreşim sinyalleri ARTeMIS programı kullanılarak çözünürlük (resolution) değeri 2048 veya 4096 seçilerek 0-25Hz frekans aralığında analiz edilmiş ve pik seçme yöntemiyle de analiz sonucu oluşan tekil değer grafiğindeki pikler

seçilerek minarenin deneysel doğal frekansları belirlenmiştir (Tablo 35). Sinyal işlemeden elde edilen tekil değer grafiklerinden bazıları Şekil 88’de verilmiştir (Aymelek, 2022).



Şekil 88. Minarenin tekil değer grafiklerinden bazıları

Tablo 35. Minarenin doğal frekansları

Ölçüm No	Tarih	DeneySEL Doğal Frekanslar (Hz)						
		1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod	6.Mod	7.Mod
1	10.06.2021	1.081	1.119	6.771	7.324	10.080	13.886	14.303
2	10.06.2021	1.077	1.125	6.706	7.433	10.076	13.871	14.368
3	1.07.2021	1.081	1.099	6.751	7.262	10.132	13.587	13.977
4	1.07.2021	1.076	1.104	6.798	7.219	-	13.621	13.988
5	22.10.2021	1.054	1.095	6.543	6.972	10.011	13.344	13.764
6	22.10.2021	1.053	1.094	6.535	7.060	9.995	13.382	13.868
7	22.10.2021	1.050	1.099	6.592	6.934	10.010	13.306	13.843
8	12.11.2021	1.065	1.099	6.641	7.035	10.137	13.582	13.853
9	26.11.2021	1.099	1.115	6.866	7.287	10.363	14.281	14.888
10	10.12.2021	1.094	1.119	6.804	7.243	10.245	14.172	14.754
11	10.12.2021	1.099	1.123	6.812	7.251	10.242	14.148	14.783
12	27.12.2021	1.081	1.125	6.797	7.356	10.340	14.110	14.507
13	13.01.2022	1.075	1.119	6.776	7.341	10.209	14.138	14.943
14	24.01.2022	1.076	1.111	6.768	7.303	10.717	14.149	14.455
15	8.02.2022	1.057	1.099	6.777	7.197	10.737	14.000	14.323
16	22.02.2022	1.106	1.128	6.871	7.346	10.357	14.062	14.340
17	8.03.2022	1.075	1.123	6.763	7.293	10.699	14.076	14.367
18	22.03.2022	1.094	1.143	6.851	7.412	10.396	14.272	14.528
19	19.04.2022	1.099	1.123	6.757	7.238	10.111	13.712	14.108
20	7.05.2022	1.074	1.111	6.763	7.299	10.711	14.261	14.466
21	19.05.2022	1.058	1.094	6.682	7.176	10.672	13.616	13.892
22	9.06.2022	1.098	1.135	6.868	7.324	10.155	14.141	14.333
23	26.05.2023	1.074	1.099	6.738	7.178	10.010	13.892	14.868
24	26.05.2023	1.086	1.123	6.763	7.312	10.181	13.867	15.063
25	26.05.2023	1.074	1.099	6.616	7.251	10.010	13.770	14.917
26	26.05.2023	1.074	1.123	6.714	7.300	10.120	13.989	15.039
27	3.11.2023	1.093	1.117	6.738	7.166	10.101	13.568	14.386
28	3.11.2023	1.080	1.105	6.665	7.050	9.961	13.428	14.899
29	3.11.2023	1.095	1.109	6.683	7.036	10.138	13.371	15.026
30	3.11.2023	1.086	1.099	6.604	7.043	10.034	13.196	14.783
31	3.11.2023	1.088	1.110	6.703	7.122	10.229	13.461	14.976
32	3.11.2023	1.074	1.099	6.665	7.080	10.120	13.306	14.819
33	3.11.2023	1.074	1.099	6.653	7.068	9.985	13.318	14.783
34	9.11.2023	1.074	1.086	6.433	7.080	9.900	13.184	14.539
35	9.11.2023	1.068	1.086	6.476	7.037	9.949	13.049	14.410
36	9.11.2023	1.058	1.083	6.445	7.031	10.010	13.208	14.551
37	17.11.2023	1.062	1.074	6.702	7.043	10.107	13.623	14.587
38	17.11.2023	1.074	1.099	6.775	7.117	10.205	13.782	14.758
39	17.11.2023	1.062	1.099	6.702	7.043	10.181	13.635	14.587
40	7.12.2023	1.086	1.111	6.909	7.202	10.474	13.904	14.636
41	7.12.2023	1.099	1.111	6.885	7.214	10.425	13.733	14.307
42	7.12.2023	1.099	1.123	6.860	7.239	10.388	13.696	14.844
Maksimum		1.106	1.143	6.909	7.433	10.737	14.281	15.063
Minimum		1.050	1.074	6.433	6.934	9.900	13.049	13.764
Ortalama		1.079	1.108	6.720	7.189	10.218	13.731	14.510
Standart Sapma		0.015	0.015	0.117	0.128	0.231	0.347	0.370
Min-Ort. Değişim (%)		2.653	3.110	4.264	3.540	3.089	4.966	5.143
Maks-Ort. Değişim (%)		2.539	3.115	2.819	3.401	5.104	4.006	3.810
Ortalama Değişim (%)		2.596	3.113	3.542	3.471	4.097	4.486	4.477

Minare geometrisinin simetriğe yakın olmasından dolayı 1. ve 2. modlara ait doğal frekanslar birbirine oldukça yakın olarak elde edilmiştir. Minare üzerinde gerçekleştirilen

titreşim ölçümlerinde minarenin ilk 7 moduna ait deneysel doğal frekanslarının hemen hemen hepsi %100 oranında tespit edilmiştir. Bu veriler değerlendirildiğinde doğal frekanslardaki ortalama değişimin %2.596 ile en az 1. modda ve %4.486 ile en çok 6. modda olduğu görülmüştür.

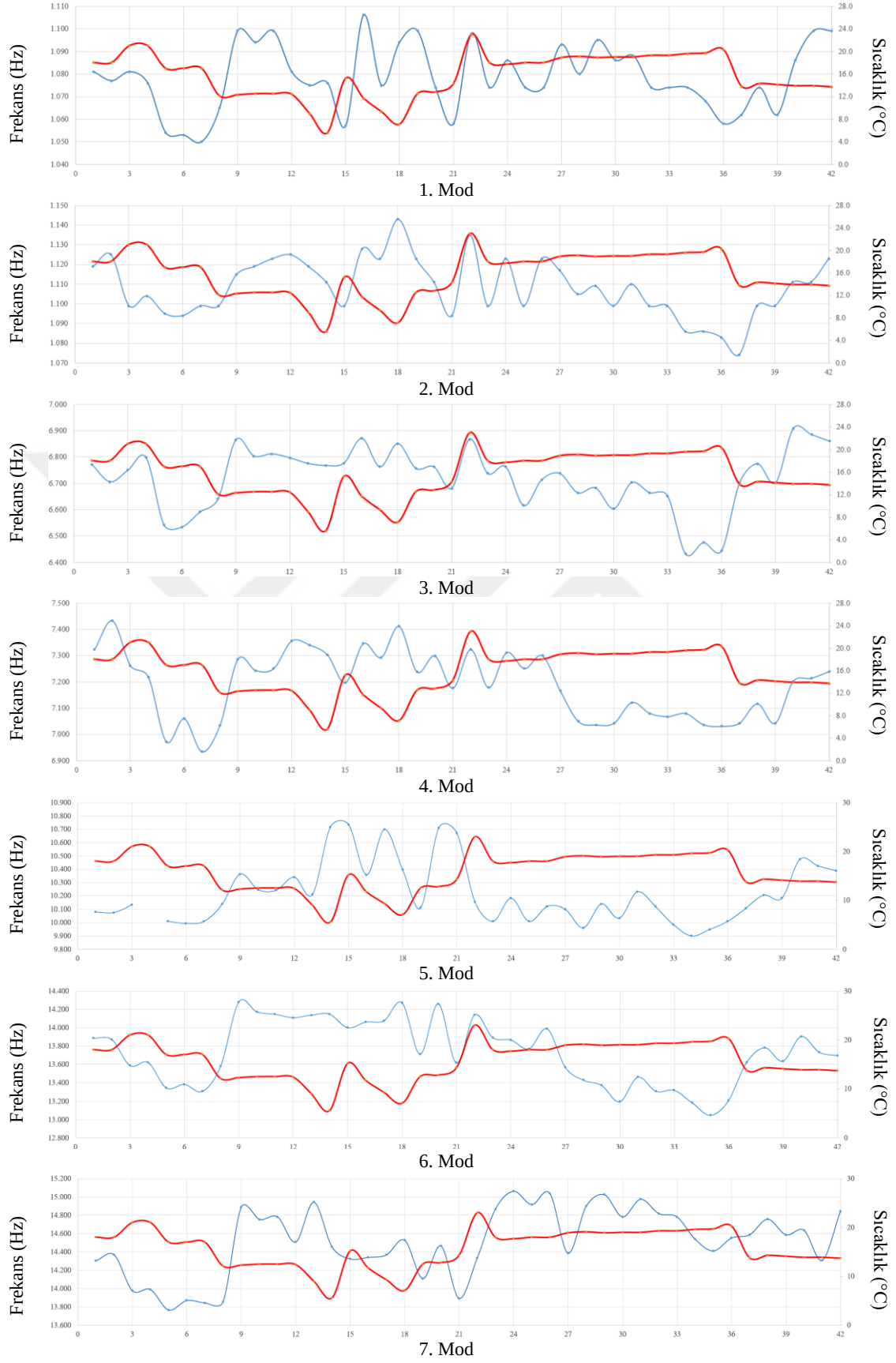
2.5.3. Minareye ait Modelin Regresyon Analiz Çalışmaları

Minare üzerinde CEVS titreşim ölçüm sistemiyle alınan titreşim verilerinin analizleri sonucunda minareye ait deneysel doğal frekanslar elde edilmiştir. Titreşim ölçümlerin yapılması esnasında modellere ait sıcaklık ve nem değerleri de toplanmıştır. Toplanan veriler bağımlı değişkenler ve bağımsız değişkenler olarak 2 gruba ayrılmış ve aşağıda sıralanan regresyon analizlerine tabi tutulmuştur.

- Basit doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri ilk 7 frekans değeri için yapılmıştır. Bu analizlerde bağımsız değişkenler sıcaklık ve nem, bağımlı değişken ise deneysel doğal frekanslardır. Analizlerde sıcaklık ve nem değişkenleri ayrı ayrı incelenmiştir. Analizlerde bağımlı değişken ile 1 bağımsız değişken (sıcaklık ya da nem) arasında doğrusal ve doğrusal olmayan irdelemeler yapılmıştır.
- ÇDRA bağımsız değişkenler nem ve sıcaklık ile bağımlı değişken doğal frekanslar arasında doğrusal olarak gerçekleştirilmiştir.
- MARS analizleri MATLAB yazılımında gerçekleştirilmiştir. Minarenin frekansları bağımlı değişkenler olup bağımsız değişkenler ise sıcaklık, nem ve nem-sıcaklık değişkenleridir. Gerçekleştirilmiş 3 farklı MARS analizi için input ve output dosyaları ayrı ayrı hazırlanmıştır. Minarenin ilk 7 moduna ait frekanslar incelendiğinden her bir MARS analizi için 1 input 7 output veri kümesi hazırlanmıştır.

• Minareye ait Modelin Sıcaklığa Bağlı Analizleri

Minarenin ilk 7 frekans değerinin sıcaklık ve ölçüm sayısına göre değişimi sırasıyla Şekil 89'daki gibi elde edilmiştir. Grafiklerdeki mavi renkli çizgi frekans değerleri, kırmızı renkli çizgi sıcaklık değerleridir. Grafiklerde sıcaklık arttıkça frekanslarda genellikle bir azalma eğilimi ve farklı zamanlarda dalgalanmalar gözlenmiştir.

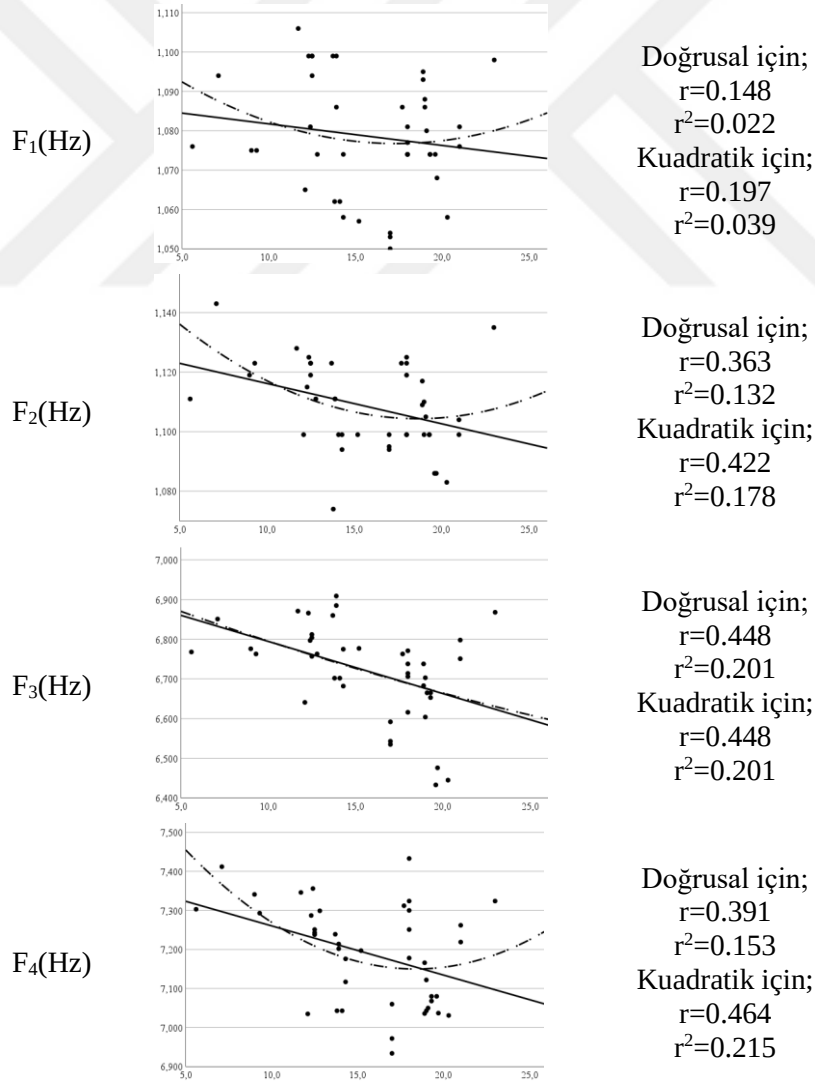


Şekil 89. Minarenin ilk 7 frekansının sıcaklığa göre değişimi

Minarenin frekanslarının sıcaklıkla ilişkileri BRA yöntemleriyle belirlenmiş ve aşağıda verilmiştir (Şekil 90). Şekil 90'da tüm modlara ait korelasyon ve determinasyon katsayıları sunulmuştur. Şekillerde siyah noktalar ölçüm verilerini, devamlı çizgi doğrusal eğriyi, kesikli çizgi ise kuadratik (quadratic) eğriyi ifade etmektedir. Şekillerdeki yatay eksen °C cinsinden sıcaklığı (S) göstermektedir. Determinasyon katsayısının en yüksek değerini veren mod için frekansların sıcaklıkla ilişkilerini ifade eden denklemler verilmiştir (Tablo 36).

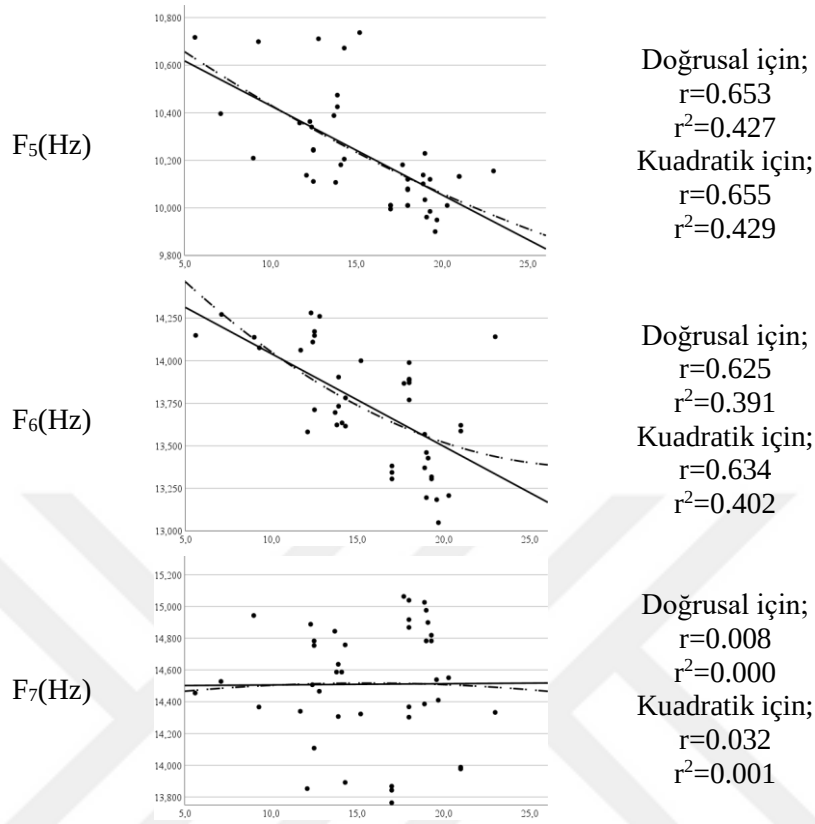
Tablo 36. Minarenin doğal frekanslarının sıcaklığa bağlı denklemleri

Yapı	Basit Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Denklemleri
Minare	$F_{5\text{Linear}}=10.806-0.038S$
	$F_{5\text{Quadratic}}=10.905-0.052S+0.001S^2$



Şekil 90. Minarenin doğal frekanslarının sıcaklıkla ilişkisi

Şekil 90'ın devamı,



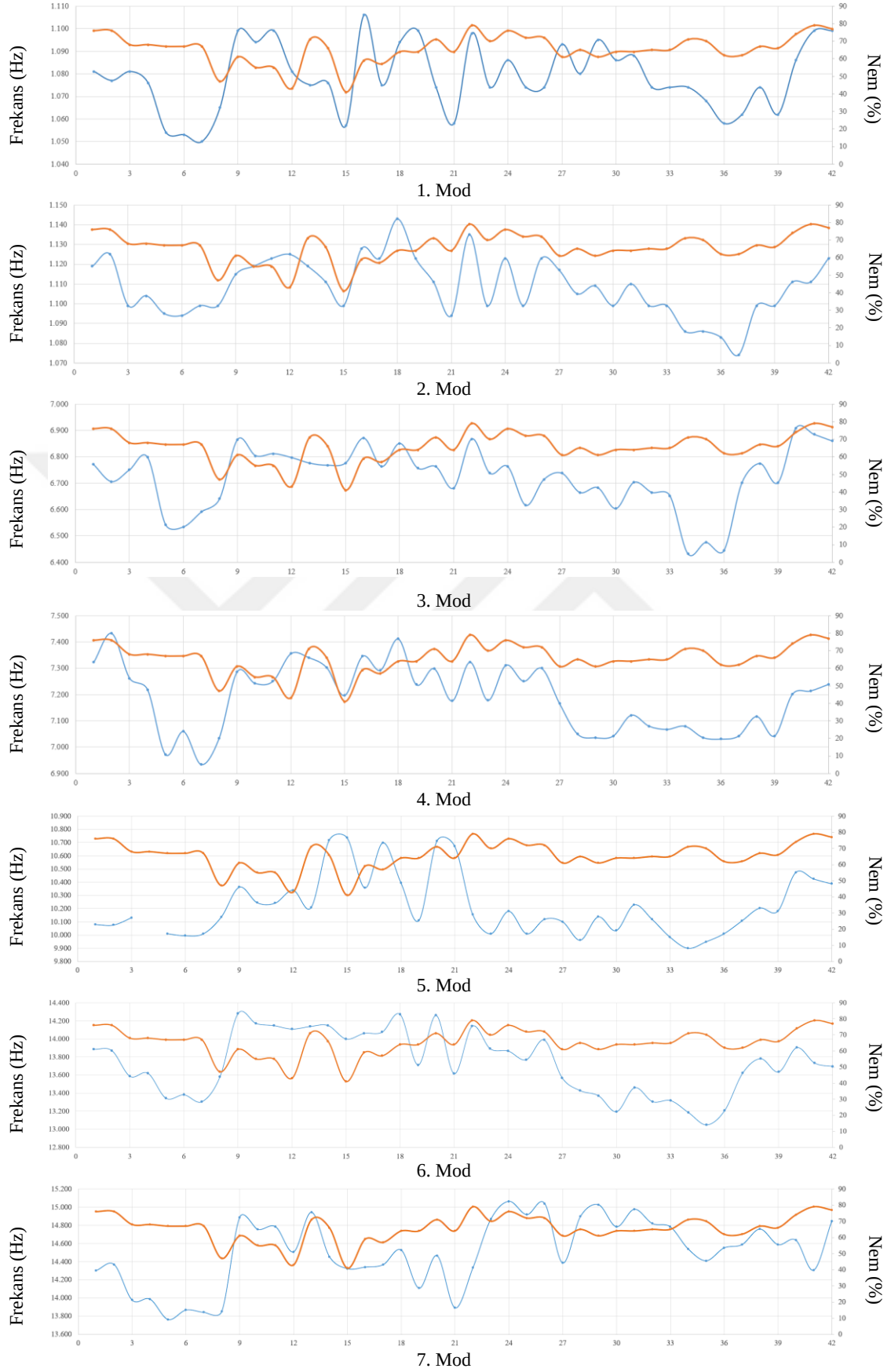
Minaresi üzerinde gerçekleştirilen ölçüm verileri ile sıcaklık verileri MARS yöntemiyle analiz edilmiştir (Tablo 37).

Tablo 37. Minarenin 1 parametrelili (S) MARS analizi

		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod	6. Mod	7. Mod
Tipi	Lin/Cbc	Cbc	Cbc	Cbc	Cbc	Cbc	Cbc	Cbc
Prmt. 1 (%)	RI	100.000	0.000	100.000	100.000	100.000	100.000	0.000
	r^2	0.520	0.171	0.615	0.669	0.573	0.758	0.000

- Minareye ait Modelin Neme Bağlı Analizleri

Minarenin ilk 7 frekans değerinin nem ve ölçüm sayısına göre değişimi sırasıyla Şekil 91'deki gibi elde edilmiştir. Grafiklerdeki mavi renkli çizgi frekans değerleri, turuncu renkli çizgi nem değerleridir. Grafiklerde nem arttıkça frekanslarda genellikle bir artma eğilimi ve farklı zamanlarda dalgalanmalar gözlenmiştir.

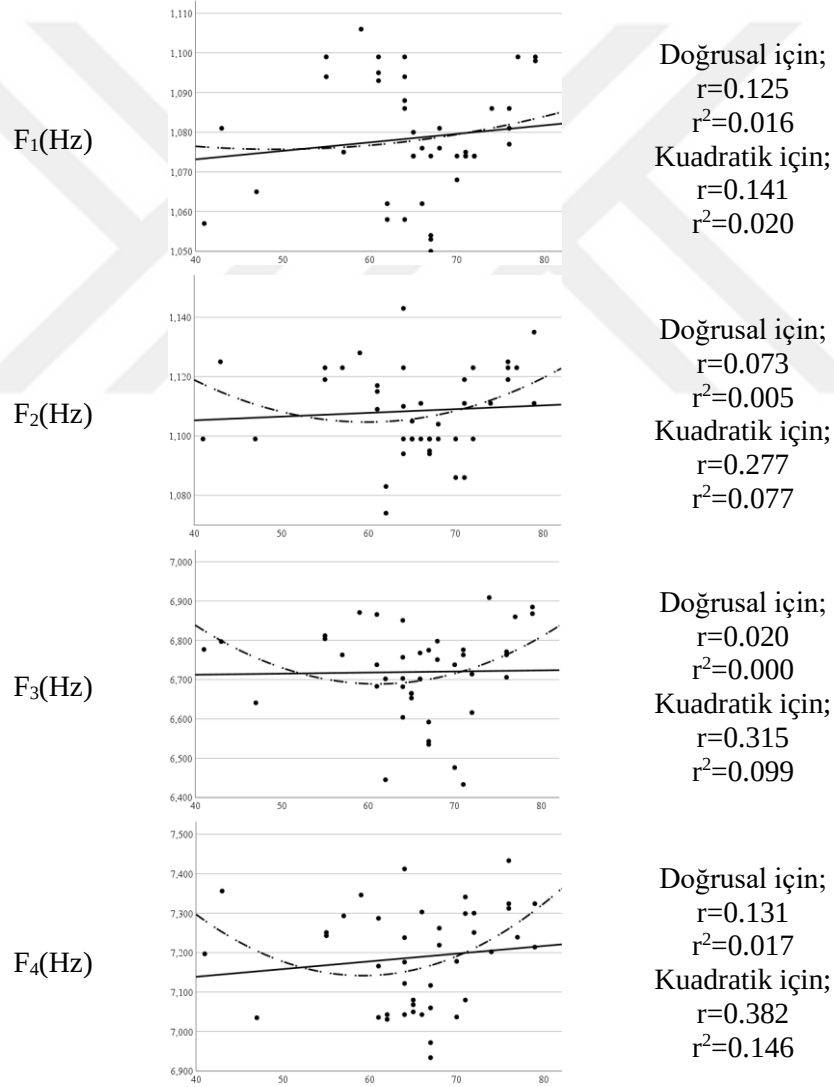


Şekil 91. Minarenin ilk 7 frekansının neme göre değişimi

Minarenin frekanslarının bağıl nemle ilişkileri basit doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle belirlenmiştir (Şekil 92). Bu şekilde tüm modlara ait korelasyon ve determinasyon katsayıları sunulmuştur. Minareye ait determinasyon katsayısının en yüksek değerini veren mod için frekansların nemle ilişkilerini ifade eden denklemler verilmiştir (Tablo 38). Şekillerdeki yatay eksen % cinsinden bağıl nemi (N) ifade etmektedir.

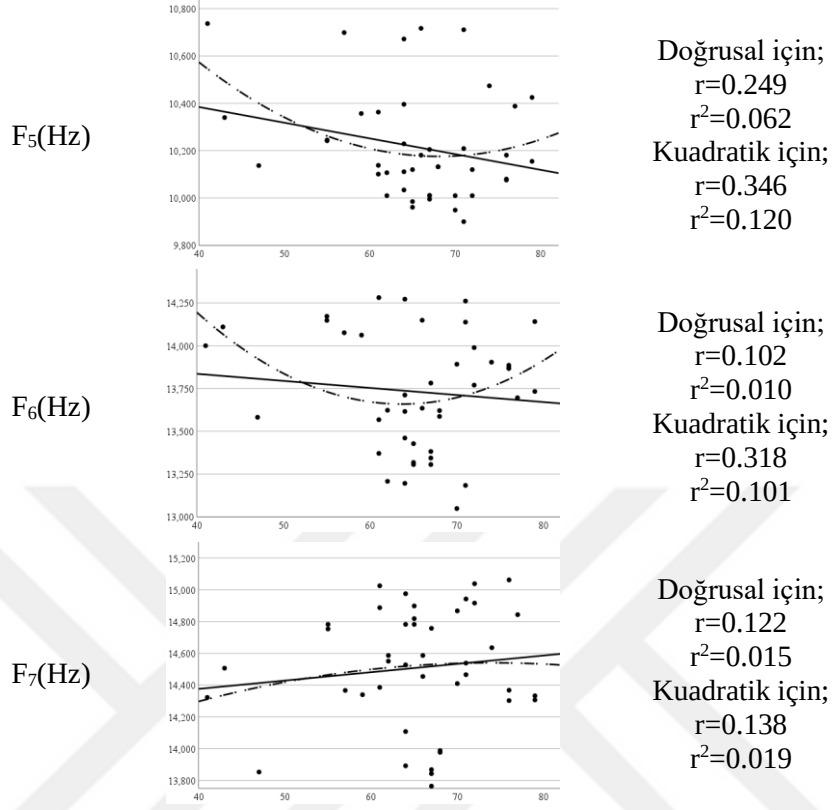
Tablo 38. Minarenin doğal frekanslarının neme bağlı denklemleri

Yapı	Basit Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Denklemleri
Minare	$F_{4\text{Lineer}}=7.061+0.002N$
	$F_{4\text{Quadratic}}=8.617-0.050N$



Şekil 92. Minarenin doğal frekanslarının nem ile ilişkisi

Şekil 92'nin devamı,



Minarenin deneysel doğal frekanslarının nemle ilişkisi MARS yöntemiyle analiz edilmiştir (Tablo 39).

Tablo 39. Minarenin 1 parametrelili (N) MARS analizi

		1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod	6. Mod	7. Mod
Tipi	Lin/Cbc	Cbc	Cbc	Cbc	Cbc	Cbc	Cbc	Cbc
Prmt. 1 (%)	RI	100.000	100.000	0.000	0.000	0.000	100.000	0.000
	r^2	0.522	0.475	0.132	0.111	0.000	0.237	0.000

- Minareye ait Modelin Nem ve Sıcaklığa Bağlı Analizleri

Minarenin her bir moda ait deneysel doğal frekanslarıyla nem-sıcaklık ilişkileri çoklu doğrusal regresyon analiz ve MARS yöntemiyle belirlenmiştir. ÇDRA sonucu elde edilen r ve r^2 değerleriyle doğal frekansların sıcaklık ve bağıl nem değişkenlerine bağlı denklemler Tablo 40'ta verilmiştir.

Tablo 40. Minarenin frekanslarının nem-sıcaklıkla ilişkileri (ÇDRA)

Yapı	Mod No	r	r ²	ÇDRA Denklemleri
Minare	1	0.234	0.055	$F_{1Lineer}=1.069-0.001S$
	2	0.413	0.170	$F_{2Lineer}=1.110-0.002S$
	3	0.479	0.229	$F_{3Lineer}=6.793+0.002N-0.015S$
	4	0.473	0.224	$F_{4Lineer}=7.156+0.004N-0.015S$
	5	0.655	0.429	$F_{5Lineer}=10.877-0.001N-0.037S$
	6	0.633	0.400	$F_{6Lineer}=14.355+0.004N-0.057S$
	7	0.126	0.016	$F_{7Lineer}=14.185+0.006N-0.003S$

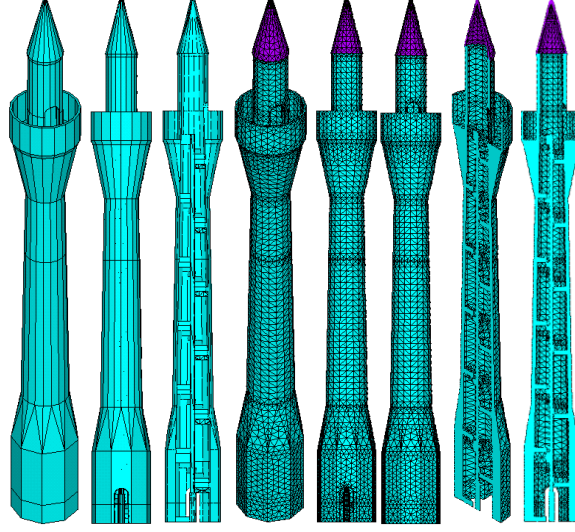
Minare üzerinde MARS yöntemiyle oluşturulan tüm modeller üzerinde gerçekleştirilen analizlerde 2 parametrelilik olarak nem-sıcaklık (N-S) bağımsız değişkenleri ve ilk 7 doğal frekans değerleri kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda formülasyonlar, r² değerleri, parametre önemi vb. değerler elde edilmiş ve bunlardan bazıları aşağıda sunulmuştur (Tablo 41).

Tablo 41. Minarenin 2 parametrelilik (N-S) MARS analizi

Tipi	Lin/Cbc	1. Mod	2. Mod	3. Mod	4. Mod	5. Mod	6. Mod	7. Mod
		Lin	Lin	Lin	Lin	Cbc	Lin	Cbc
Prmt. 1 (%)	RI	-8.934	100.000	100.000	100.000	-8.650	-74.173	0.000
Prmt. 2 (%)	RI	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	-0.004
	r ²	0.879	0.719	0.798	0.709	0.696	0.859	0.405

2.5.4. Minarenin Sonlu Eleman Modellemesi

Minarenin SE modeli ANSYS yazılımındaki SOLID186 katı eleman tipi kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 93). SOLID186 katı elemanın başlıca özellikleri arasında 20 düğüm noktasına sahip olması, her bir düğüm noktası 3 serbestlik derecesine sahip olması, elastik, plastik ve sünme gibi özelliklere sahip olması, meshleme için dörtgen, piramit veya prizma seçeneklere sahip olması ve kolay meshleme yapabilmesi gelmektedir (ANSYS, 2016).



Şekil 93. Minarenin başlangıç SE modeline ait bazı görünüşler

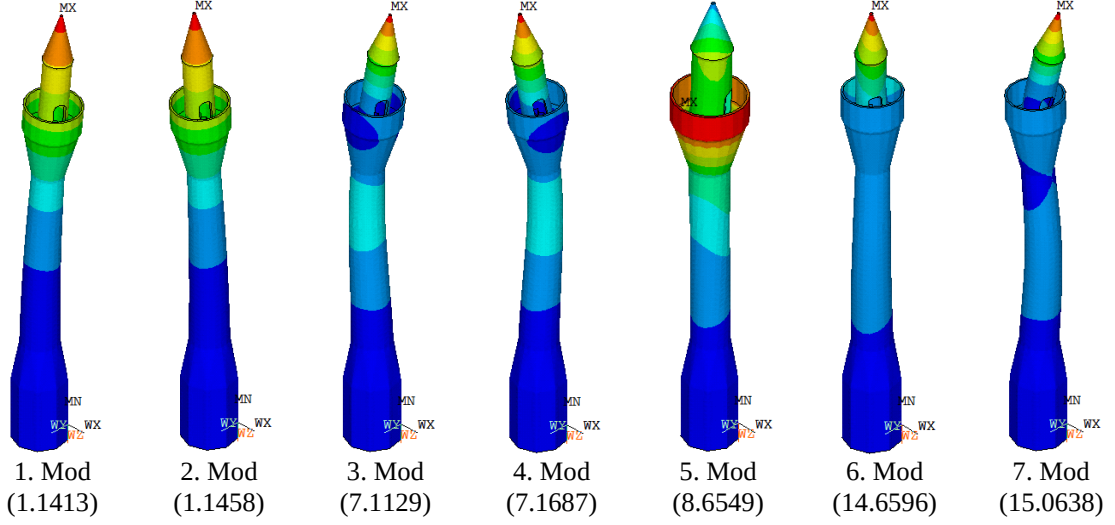
Minarenin başlangıç SE modelinde birim hacim ağırlığı (kg/m^3), elastisite (Young) modülü (N/m^2) ve Poisson oranı Tablo 42'deki gibi kabul edilmiştir.

Tablo 42. Minarenin başlangıç SE modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Elemanlar	Elastisite Modülü	Poisson Oranı	Birim Hacim Ağırlığı
Kaide ve geçiş kısmı	2.50E9	0.2	2000
Gövde	2.50E9	0.2	2000
Çekirdek	2.50E9	0.2	2000
Merdiven	2.50E9	0.2	2000
Şerefe	2.50E9	0.2	2000
Külâh	1.4E12	0.4	400

Minarenin başlangıç SE modeli 25cm mesh aralığı ile 37027 elemandan ve 64152 düğümden (node) oluşturulmuştur. Bu modelde yapının zemine oturduğu kısımlar ankastre mesnet olarak varsayılmıştır. Minarenin SE modelinde yer alan elemanların birbirleri ile tam bağlı olduğu kabul edilmiştir.

Minarenin başlangıç sayısal dinamik karakteristikleri SE modal analizi yardımıyla bulunmuştur. Bu analizden ilk 7 frekans değeri 1.141Hz ile 15.064Hz aralığında elde edilmiştir. Minarenin mod şekilleri sırasıyla ilk 2 modu 1. eğilme modları (enine-boyuna), 3. ile 4. modları 2. eğilme modları (enine-boyuna), 5. modu burulma modu ve 6. ile 7. modları ise 3. eğilme modları olarak elde edilmiştir (Şekil 94).

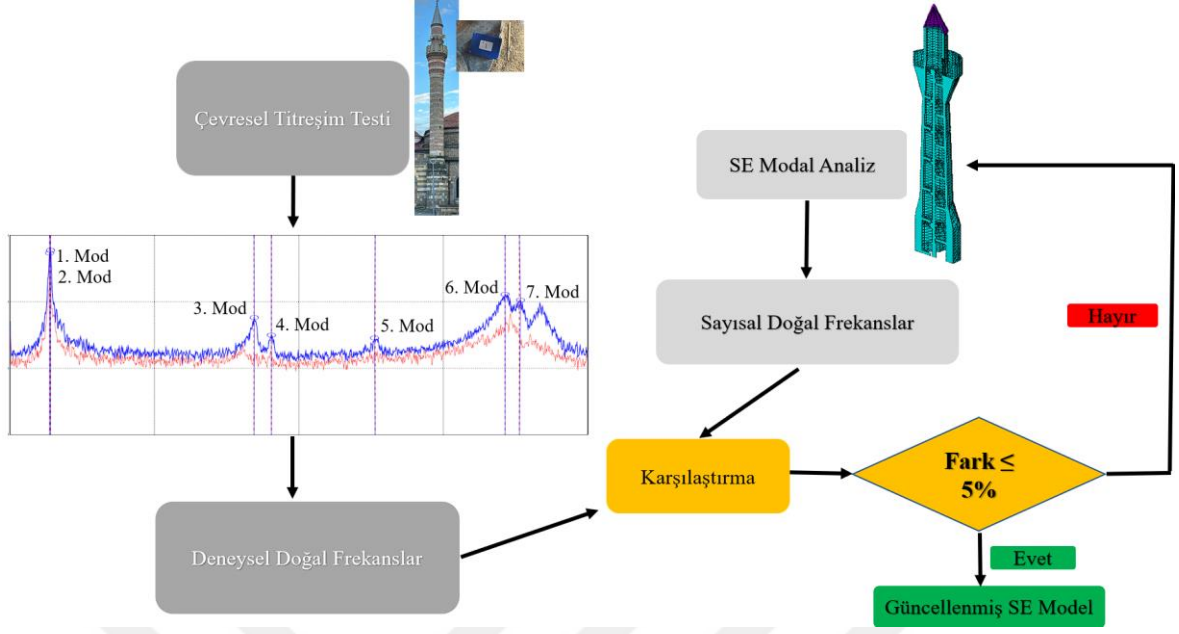


Şekil 94. Minarenin ilk 7 moduna ait mod şekilleri ve frekansları

2.5.5. Minarenin SE Model Güncellemeleri

Deneysel ölçüm verilerinden ve SE modal analizden elde edilen sonuçlara bakıldığında bazı farklılıkların olduğu, bu farklılıkların malzeme özelliklerindeki ve sınır şartlarındaki bazı bilinmeyen belirsizliklerden oluşabileceği bilinmektedir (Bayraktar vd., 2009). Bu farklılıkları gidermek ve minarenin gerçeğe daha yakın bir SE modelini elde etmek amacıyla minarenin SE model güncelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Minarenin başlangıç SE modeli üzerinde manuel olarak model güncelleme yöntemi kullanılarak minarenin güncelleme işlemi tamamlanmıştır. Başlangıç SE modeli deneysel ilk 7 minimum ve maksimum doğal frekans değerlerine göre iki farklı şekilde güncellenmiştir. Deneysel doğal frekans değerleri baz alınarak başlangıç SE modelinin sayısal doğal frekans değerleri arasındaki fark deneme yanılma yöntemiyle en aza indirgenmeye çalışılmıştır. Burada elemanların elastisite modülleri ve birim hacim ağırlıkları malzeme özelliklerindeki değişim parametresi olarak seçilmiş, mesnet şartında da bazı değişimler yapılarak minare için manuel güncelleme işlemleri gerçekleştirilmiş ve minarenin güncellenmiş SE modelleri elde edilmiştir (Şekil 95).



Şekil 95. Minarenin SE model güncelleme aşaması

Model güncellemesindeki elastisite modülü (N/m^2) ve birim hacim ağırlığında (kg/m^3) yapılan değişiklikler Tablo 43'te verilmiştir. Poisson oranı minarenin tüm SE modellerinde külahta 0.4 olarak, diğer tüm elemanlar için 0.2 alınmıştır.

Tablo 43. Minarenin SE modellerindeki malzeme özellikleri

Elemanlar	Elastisite Modülü			Birim Hacim Ağırlığı		
	Başlangıç	Güncel _{min}	Güncel _{maks}	Başlangıç	Güncel _{min}	Güncel _{maks}
Kaide ve geçiş kısmı	2.50E9	1.92E9	2.20E9	2000	1800	1800
Gövde	2.50E9	1.92E9	2.20E9	2000	1800	1800
Çekirdek	2.50E9	1.92E9	2.20E9	2000	1800	1800
Merdiven	2.50E9	1.92E9	2.20E9	2000	1800	1800
Şerefe	2.50E9	1.92E9	2.20E9	2000	1800	1800
Külâh	1.40E12	1.40E12	1.40E12	400	400	400

Güncelleme işlemleri sonucunda elde edilen frekans değerleri ile deneysel doğal frekans değerleri arasındaki farklar Tablo 44'te sunulmuştur.

Tablo 44. Minarenin deneysel, sayısal doğal frekansları (Hz) ve farkları

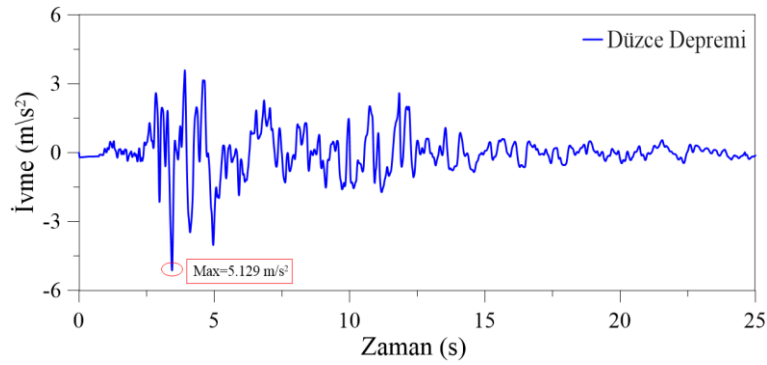
Mod No	Güncel _{min} SE	Deneysel- Güncel _{min} Farklar* (%)	Deneysel _{min}	Güncel _{maks} SE	Deneysel- Güncel _{maks} Farklar* (%)	Deneysel _{maks}
1	1.053	0.29	1.050	1.127	1.90	1.106
2	1.057	-1.58	1.074	1.132	-0.96	1.143
3	6.554	1.88	6.433	7.016	1.55	6.909
4	6.607	-4.72	6.934	7.072	-4.86	7.433
5	---	---	9.900	---	---	10.737
6	13.516	3.58	13.049	14.468	1.31	14.281
7	13.868	0.76	13.764	14.845	-1.45	15.063

*Farklar $100 \times (\text{Sayısal} - \text{Deneysel}) / \text{Deneysel}$ olarak hesaplanmıştır.

2.5.6. Minarenin Deprem Analizleri

Minarenin başlangıç ve güncellenmiş SE modelleri üzerinde deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler gerçek zamanlı kaydedilen yer hareketi verileri kullanılarak zaman tanım alanında yapılmıştır. Bu analiz minarenin deprem altındaki dinamik tepkisinin daha doğru bir temsilini sağlayabilmesi açısından tercih edilmiştir.

Ülkemizde mevcut çok sayıda aktif fay hattı nedeniyle yıkıcı depremler yaşanmış ve bu yıkıcı depremlerden Düzce ivme verileri deprem analizlerinde kullanılmak üzere seçilmiştir. AFAD'dan alınan ve büyük bir PGA değerine sahip 1999 yılına ait Düzce ivme kaydının grafiği Şekil 96'da verilmiştir (URL-43, 2022).



Şekil 96. Düzce depremine ait ivme-zaman grafiği

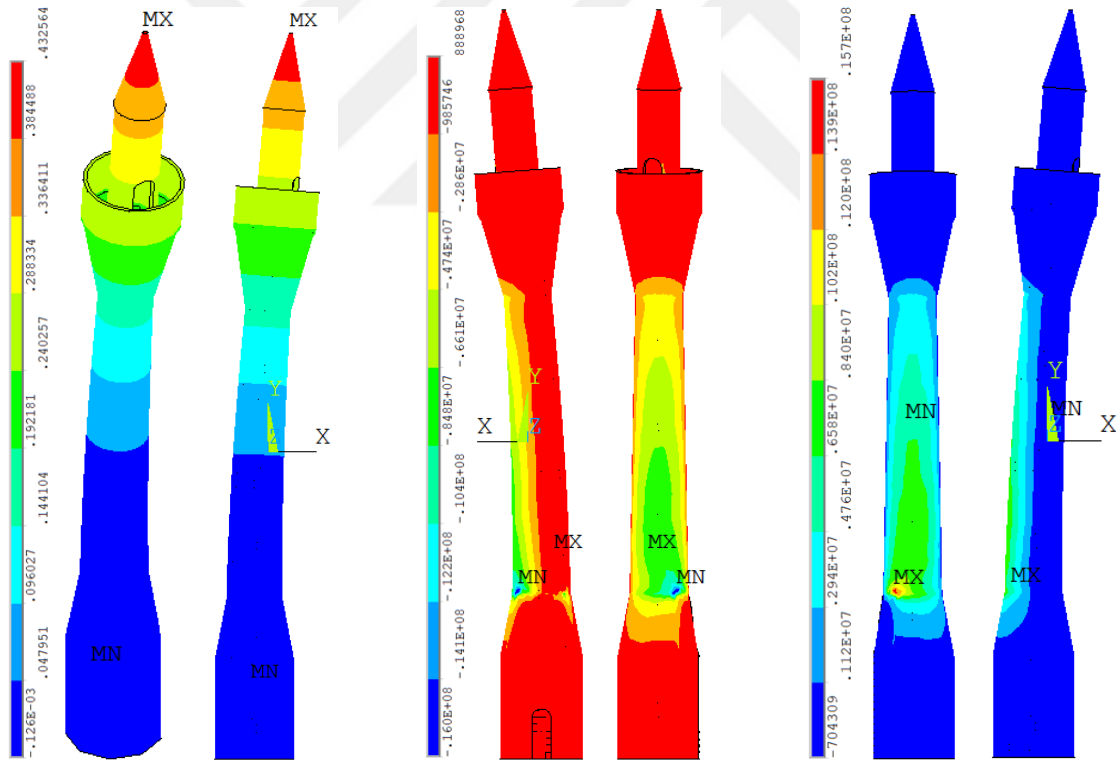
Başlangıç ve güncellenmiş SE modellerine zaman tanım alanı analizi uygulanarak model güncellenmenin minarenin yapısal davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Düzce verileri kullanılarak başlangıç SE modelinde yer değiştirme (deformasyon), minimum ve maksimum asal gerilme değerleri sırasıyla 0.432564m, -1.60E7Pa ve 1.57E7Pa olarak

bulunmuştur (Şekil 97). Minarenin başlangıç SE ve güncellenmiş SE modelleri üzerinde yapılan zaman tanım analizlerinden elde edilen yer değiştirme (m), minimum ve maksimum asal gerilmeler (N/m^2) Tablo 45'teki gibi elde edilmiştir.

Tablo 45. Minarenin deprem analizlerinden elde edilen değerler

Minarenin SE Modeli	Yer Değiştirme	Minimum Gerilme	Maksimum Gerilme
Başlangıç	0.432564	-1.60E7	1.57E7
Güncel _{min}	0.405415	-1.15E7	1.13E7
Güncel _{maks}	0.431909	-1.40E7	1.38E7

Minarenin başlangıç SE modeli üzerinde gerçekleştirilen deprem analizinden elde edilen maksimum ve minimum asal gerilme dağılımları aşağıda verilmiştir (Şekil 97). Minimum ve maksimum değerlere göre güncellenmiş SE modellerinde de deprem analizleri sonucunda benzer gerilme dağılımlarının olduğu görülmüştür.



Şekil 97. Minarenin başlangıç SE modelinin yer değiştirme (m) ve gerilmeleri (N/m^2)

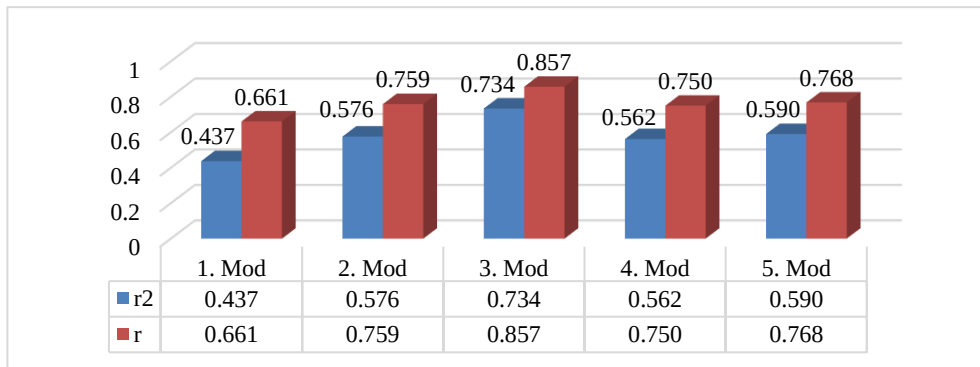
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde geliştirilen titreşim ölçüm sistemi yardımıyla laboratuvar modelleri ile gerçek yapılar üzerinde gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri ve sıcaklık-nem ölçümleri neticesinde elde edilen doğal frekans, nem, sıcaklık değerleri, diğer çevresel etkiler arasındaki ilişkiler incelenmiş ve bunlarla ilgili istatistiki veriler irdelenmiştir. Tuğla modellerin, kulenin ve minarenin frekanslarının çevresel etkiler ile ilişkileri çeşitli regresyon analizleriyle değerlendirilmiş ve aralarındaki ilişki ortaya konulmuştur. Böylece çevresel faktörlerin laboratuvar ve gerçek yapıların yapısal davranışına etkileri ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Ayrıca kulenin ve minarenin model güncellemelerinin etkileri, başlangıç ile güncellenmiş SE modellerinde gerçekleştirilen deprem analizlerinin sonuçları değerlendirilmiştir.

3.1. Tuğla Duvar Model Verilerinin İncelenmesi

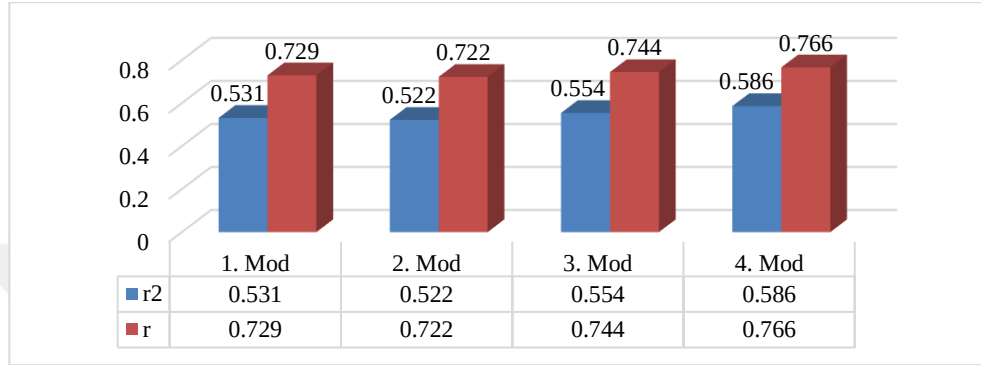
3.1.1. Tuğla Modellerin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

TDM-1 üzerinde gerçekleştirilen basit doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizlerinden TDM-1'in doğal frekansları ile sıcaklık arasında tüm modlarda doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. 1. mod dışında diğer 4 modda güçlü korelasyon; 1. modda ise orta düzeyde korelasyon elde edilmiştir. Sıcaklıkla 1. modda zayıf fonksiyonel ilişki bulunurken diğer 4 modda kuvvetli fonksiyonel ilişki bulunmuştur (Şekil 98). Tüm modlarda sıcaklık artarsa frekanslarda bir azalma eğilimi görülmüştür.



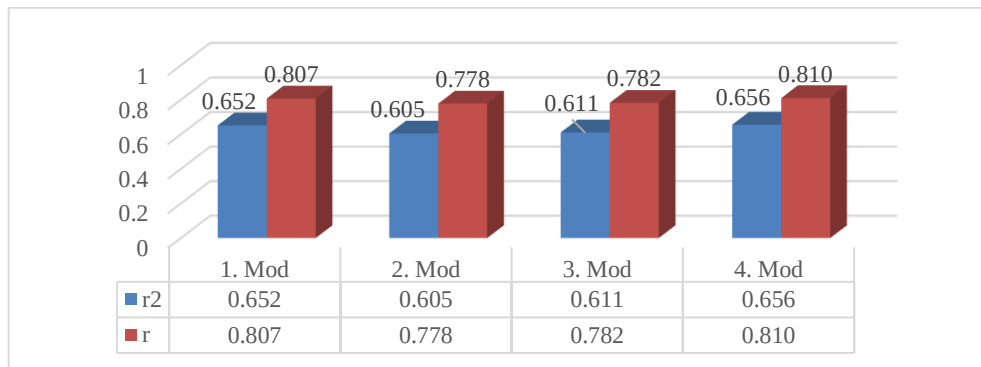
Şekil 98. TDM-1'in frekansları ile sıcaklık ilişkisindeki r ve r² değerleri

TDM-2 üzerinde gerçekleştirilen basit doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizlerinden TDM-2'nin doğal frekansları ile sıcaklık arasında tüm modlarda doğrusal olmayan bir ilişki tespit edilmiştir. Tüm modlarda güçlü korelasyon ile kuvvetli fonksiyonel ilişki bulunmuştur (Şekil 99). Tüm modlarda sıcaklık artarsa frekanslarda bir azalma eğilimi görülmüştür.



Şekil 99. TDM-2'nin frekansları ile sıcaklık ilişkisindeki r ve r^2 değerleri

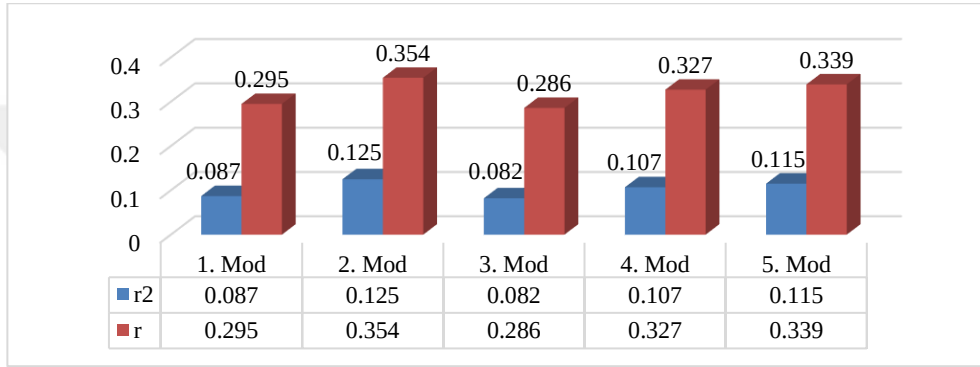
TDM-3 üzerinde gerçekleştirilen basit doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizlerinden TDM-3'ün frekanslar ile sıcaklık arasında 1 modu dışında doğrusal olmayan bir ilişki tespit edilmiştir. Tüm modlarda güçlü korelasyon ile kuvvetli fonksiyonel ilişki bulunmuştur (Şekil 100). Ayrıca tüm modlarda sıcaklık artarsa frekanslarda bir azalma eğilimi görülmüştür.



Şekil 100. TDM-3'ün frekansları ile sıcaklık ilişkisindeki r ve r^2 değerleri

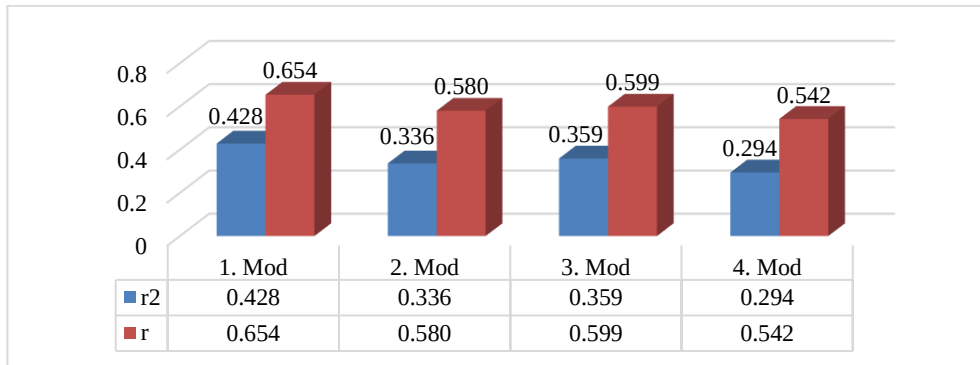
3.1.2. Tuğla Modellerin Neme Bağlı Değişimleri

TDM-1 üzerinde gerçekleştirilen basit doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizlerinden TDM-1'in doğal frekansları ile bağıl nem arasında tüm modlarda doğrusal olmayan bir ilişki tespit edilmiştir. 1. ve 3. modlarda zayıf korelasyon diğer tüm modlarda orta düzeyde korelasyon elde edilmiştir (Şekil 101). Bağıl nemle tüm modlar arasında zayıf fonksiyonel ilişki bulunmuştur. Ayrıca tüm modlarda bağıl nem artarsa frekanslarda bir azalma eğilimi görülmüştür.



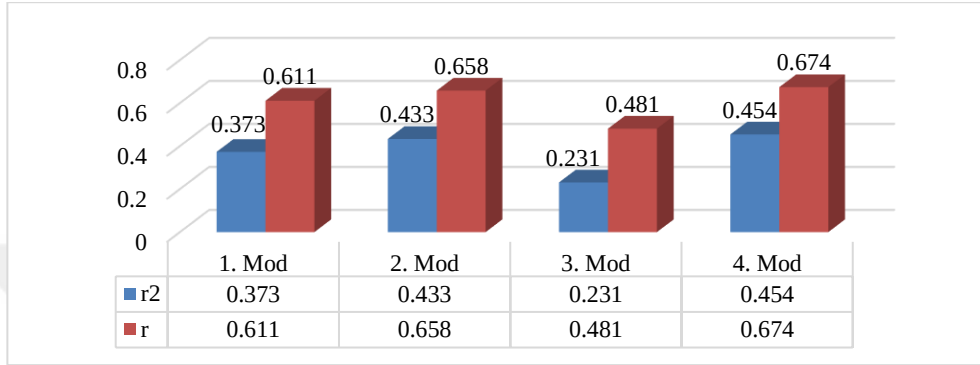
Şekil 101. TDM-1'in frekansları ile nem ilişkisindeki ait r ve r² değerleri

TDM-2 üzerinde gerçekleştirilen basit doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizlerinden TDM-2'nin doğal frekansları ile bağıl nem arasında tüm modlar arasında doğrusal olmayan (doğrusala yakın) bir ilişki, orta düzeyde korelasyon ve zayıf fonksiyonel bağlantı bulunmuştur (Şekil 102). Ayrıca tüm modlarda bağıl nem artarsa frekanslarda bir azalma eğilimi görülmüştür.



Şekil 102. TDM-2'nin frekansları ile nem ilişkisindeki r ve r² değerleri

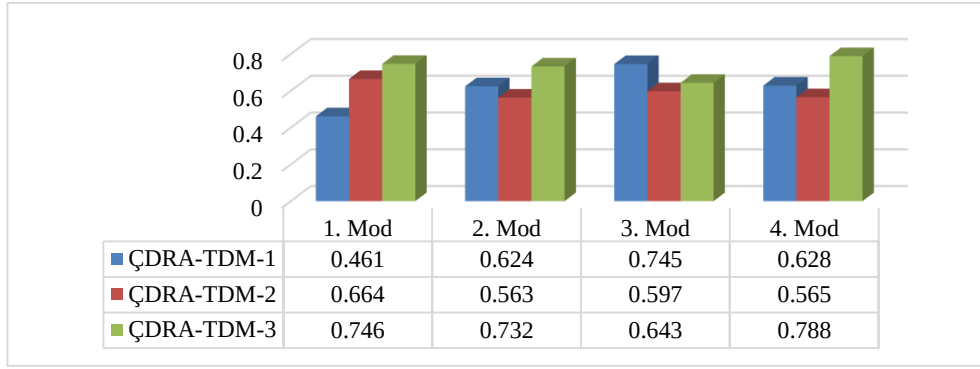
TDM-3 üzerinde gerçekleştirilen basit doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizlerinden TDM-3'ün doğal frekansları ile bağıl nem arasında tüm modlar arasında doğrusal olmayan (doğrusala yakın) bir ilişki ve orta düzeyde bir korelasyon elde edilmiştir (Şekil 103). Tüm modlarda zayıf fonksiyonel bağlantı bulunurken bağıl nem arttığında frekanslarda bir azalma eğilimi görülmüştür.



Şekil 103. TDM-3'ün frekansları ile nem ilişkisindeki r ve r^2 değerleri

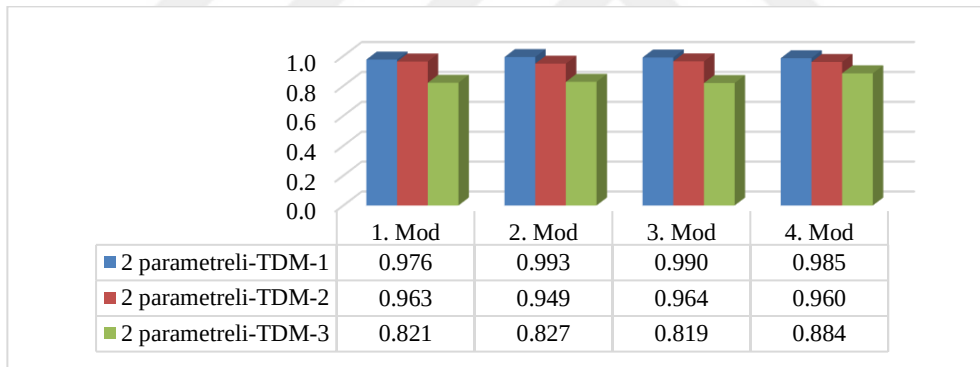
3.1.3. Tuğla Modellerin Nem ve Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

TDM-1, TDM-2 ve TDM-3 için elde edilen deneysel doğal frekansların nem-sıcaklık ilişkileri ÇDRA yöntemiyle belirlenmiştir. TDM-1 için ilk 5 moda ait korelasyon sayıları (r) sırasıyla 0.679, 0.790, 0.863, 0.792, 0.797 olarak ve determinasyon katsayıları (r^2) sırasıyla 0.461, 0.624, 0.745, 0.628, 0.636 olarak elde edilmiştir. TDM-1 için ilk mod dışında diğer 4 modda yüksek korelasyon, ilk modda orta düzeyli korelasyon elde edilmiştir. Ayrıca bu modelde ilk modda zayıf fonksiyonel ilişki ve diğer tüm modlarda güçlü bir fonksiyonel ilişki bulunmuştur. TDM-2 için ilk 4 moda ait korelasyon sayıları sırasıyla 0.815, 0.750, 0.773, 0.752 olarak ve determinasyon katsayıları sırasıyla 0.664, 0.563, 0.597, 0.565 olarak elde edilmiştir. TDM-2 için ilk 4'ün tamamında yüksek korelasyon ve bu modlarda güçlü bir fonksiyonel ilişki bulunmuştur. TDM-3 için ilk 4 moda ait korelasyon sayıları sırasıyla 0.864, 0.855, 0.802, 0.888 olarak ve determinasyon katsayıları sırasıyla 0.746, 0.732, 0.643, 0.788 olarak elde edilmiştir. TDM-3 için de ilk 4'ün tamamında yüksek korelasyon ve bu modlarda güçlü bir fonksiyonel ilişki bulunmuştur (Şekil 104).



Şekil 104. ÇDRA ile elde edilen nem ve sıcaklığa bağlı r^2 değerleri

TDM-1, TDM-2 ve TDM-3 için elde edilen deneysel doğal frekansların bağlı nem ve sıcaklıkla ilişkileri MARS yöntemiyle de belirlenmiş ve yüksek determinasyon katsayıları elde edilmiştir (Şekil 105). MARS yöntemiyle ayrıca tüm modlara ait denklemler de bulunmuştur. TDM-1 için r^2 değerleri 0.976 ile 0.993 arasında, TDM-2 için 0.949 ile 0.964 arasında ve TDM-3 için 0.819 ile 0.884 arasında elde edilmiştir.



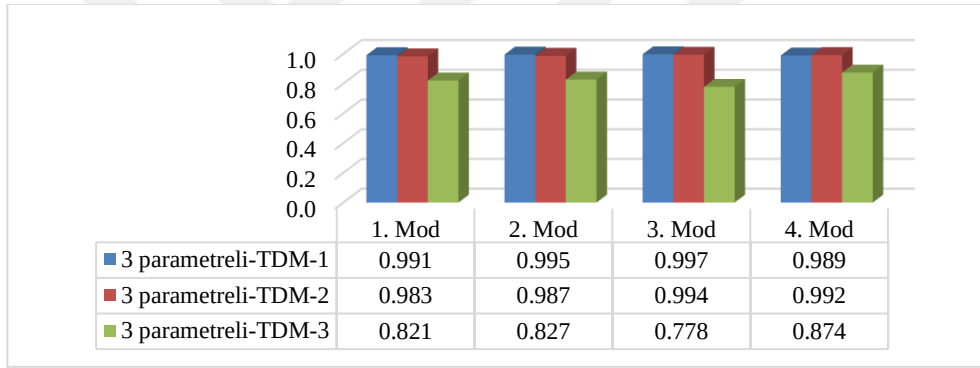
Şekil 105. Tuğla modeller için nem ve sıcaklığa bağlı r^2 değerleri (MARS)

MARS yöntemiyle parametrelerin analizdeki önemi elde edilmiştir. TDM-1'deki analizlerde ilk 4 modda sıcaklığın (Prmt. 2) etkisinin neme (Prmt. 1) göre daha yüksek çıktığı, son modda ise eşit düzeyde ve %100 olduğu bulunmuştur. Tüm modlarda sıcaklığın etkisi %100 olarak elde edilirken nemin etkisinin ise %18.815 ile %100 aralığında değiştiği belirlenmiştir. TDM-2'deki analizlerde 1. modda sıcaklığın etkisi neme göre daha yüksek, 2. modda eşit düzeyde (%100) ve son 2 modda daha düşük çıkmıştır. Tüm modlarda sıcaklığın etkisi %65.767 ile %100 aralığında, nemin etkisi %61.572 ile %100 aralığında değiştiği belirlenmiştir. TDM-3'teki analizlerde 3. modda sıcaklığın etkisi nemle eşit düzeyde (%100) olduğu, diğer 3 modda ise daha yüksek olduğu görülmüştür. Tüm modlarda

sıcaklığın etkisi %100 olarak elde edilirken nemin etkisi %27.975 ile %100 aralığında değiştiği belirlenmiştir.

3.1.4. Tuğla Modellerin Nem, Sıcaklık ve Doygunluğa Bağlı Değişimleri

TDM-1, TDM-2 ve TDM-3 için deneysel doğal frekanslarının nem, sıcaklık ve doymunluğa (N-S-D) bağılı ilişkileri MARS yöntemiyle belirlenmiştir. TDM-1 için r^2 değeri 0.979 ile 0.997 arasında, TDM-2 için 0.983 ile 0.994 arasında ve TDM-3 için 0.778 ile 0.874 arasında elde edilmiştir (Şekil 106). Tuğla modeller arasında TDM-3 için elde edilen MARS modelinin diğere duvar modellerine göre tahmin performansının daha düşük olduğu görülmüştür. Ancak bu modelde elde edilen r^2 değeri ilişkinin, deneysel veriyle yüksek düzeyde uyumlu olduğunu da göstermektedir.



Şekil 106. Tuğla modeller için 3 değişkene bağılı r^2 değeri

MARS yöntemiyle parametrelerin analizdeki önemi elde edilmiştir. TDM-1'deki analizlerde tüm modlarda sıcaklığın (Prmt. 2) etkisi neme (Prmt. 1) ve doymunluğa (Prmt. 3) göre daha yüksek oranda elde edilmiştir. Tüm modlarda sıcaklığın etkisi %100 olarak, nemin etkisinin %0.693 ile %55.813 aralığında ve doymunluğun etkisinin %11.116 ile %59.415 aralığında değiştiği belirlenmiştir. TDM-1'de 3. ve 4. modlarda nemin etkisi doymunluğa göre etkiden daha yüksek oranda elde edilirken diğere 3 modda doymunluğun etkisi neme göre etkiden daha yüksek oranda elde edilmiştir. TDM-2'deki analizlerde tüm modlarda sıcaklığın etkisi neme ve doymunluğa göre daha yüksek olarak elde edilmiştir. Tüm modlarda sıcaklığın etkisi %100 olarak, nemin etkisi %8.096 ile %19.981 aralığında ve doymunluğun etkisi %23.817 ile %52.234 aralığında değiştiği belirlenmiştir. TDM-2'de tüm modlarda nemin etkisinin doymunluğun etkisinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. TDM-3'teki

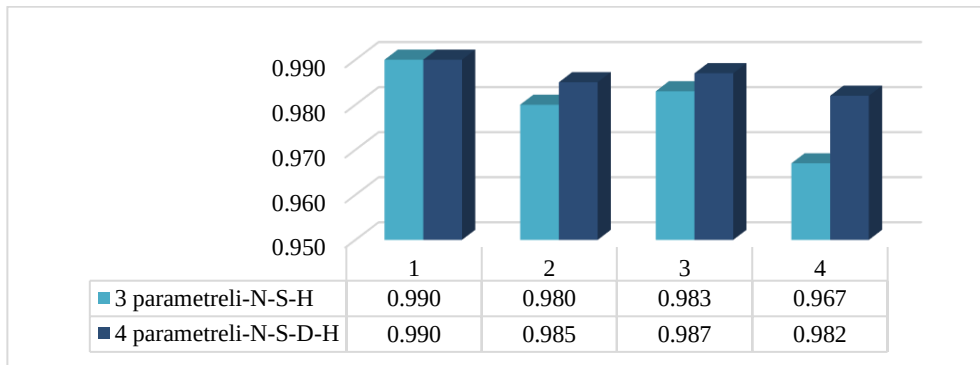
analizlerde tüm modlarda sıcaklığın etkisi neme ve doygunluğa göre etkiden daha yüksek oranda elde edilmiştir. Tüm modlarda sıcaklığın etkisi %100 olarak, nemin etkisinin %3.611 ile %38.538 aralığında değiştiği ve doygunluğun etkisinin %0 olduğu belirlenmiştir. TDM-2’de tüm modlarda nemin etkisinin doygunluğun etkisinden daha yüksek olduğu görülmüştür.

3.1.5. Tuğla Modelde Nem, Sıcaklık ve Hacme Bağlı Değişimler

Tuğla Duvar Model-1-2-3’ün tüm verileri birleştirilerek oluşturulan modelin doğal frekanslarının nem, sıcaklık ve hacimsel (N-S-H) ilişkileri MARS yöntemiyle belirlenmiştir. Modelden elde edilen r^2 değerleri sırasıyla 0.990, 0.980, 0.983, 0.967 olarak belirlenmiştir (Şekil 107). Bu modelde tahmin performansı oldukça yüksek olarak elde edilmiştir. MARS yöntemiyle parametrelerin analizdeki önemi ise genellikle hacimsel (Prmt. 3) etkinin nem (Prmt. 1) ve sıcaklık (Prmt. 2) etkilerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Tüm modlarda nemin etkisinin %3.272 ile %100 aralığında, sıcaklığın etkisinin %9.094 ile %100 aralığında ve hacimsel etkinin ise %40.241 ile %100 aralığında değiştiği belirlenmiştir.

3.1.6. Tuğla Modelde Nem, Sıcaklık, Doygunluk ve Hacme Bağlı Değişimler

Tuğla Duvar Model-1-2-3’ün tüm verileri birleştirilerek oluşturulan modelin doğal frekanslarının nem, sıcaklık, doygunluk ve hacimsel (N-S-D-H) ilişkileri MARS yöntemiyle elde edilmiştir. Modelden elde edilen r^2 değerleri sırasıyla 0.990, 0.985, 0.987, 0.982 olarak belirlenmiştir. Bu modelde tahmin performansının oldukça yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 107).



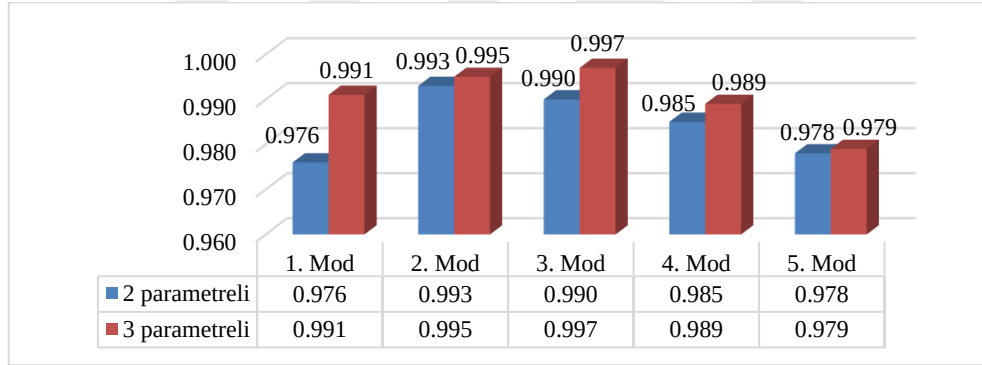
Şekil 107. Tüm veriyi içeren model için 3 ve 4 parametrel r^2 değerleri

Şekilden görüldüğü üzere 3 ve 4 parametrelili analizlerde tüm veriyi içeren model üzerinde yüksek r^2 değerleri elde edilmiştir. Parametre sayısının artmasıyla tahmin performansının da genellikle arttığı belirlenmiştir.

MARS yöntemiyle parametrelerin analizdeki önemi belirlenmiştir. Nem (Prmt. 1) etkisinin %2.717 ile %100 aralığında olduğu, sıcaklığın (Prmt. 2) etkisinin %9.358 ile %100 aralığında olduğu, doymunluğun (Prmt. 3) etkisinin %2.717 ve %27.533 aralığında olduğu ve hacimsel (Prmt. 4) etkinin %43.287 ile %100 aralığında olduğu belirlenmiştir. Modelde 2 modda hacimsel etkinin diğer 3 etkiden daha yüksek olduğu görülmüştür.

3.1.7. Parametre Sayısına Göre Elde Edilen Sonuçların İrdelenmesi

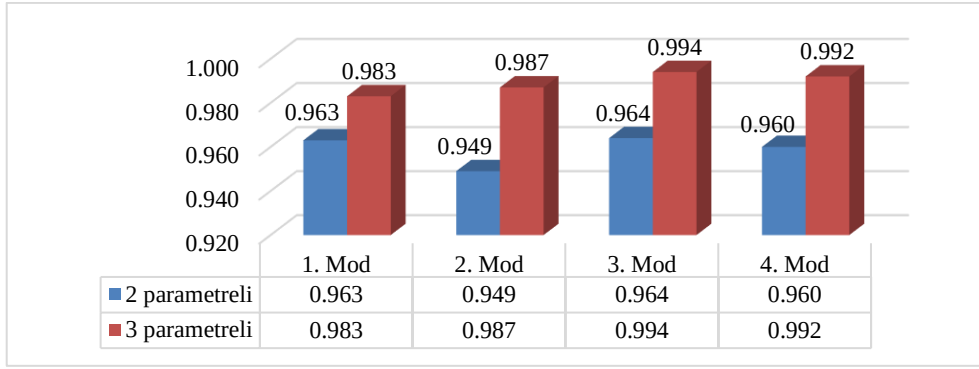
TDM-1 için nem-sıcaklık bağımsız 2 parametrelili ve nem-sıcaklık-doymunluk bağımsız 3 parametrelili olarak yapılan analizler neticesinde elde edilen değerler aşağıdaki grafikte karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Şekil 108).



Şekil 108. TDM-1 için 2 ve 3 parametrelili r^2 karşılaştırma grafikleri

Şekil 108'den görüldüğü gibi parametre sayısının artması TDM-1'in model performansına olumlu bir etkisinin olduğu görülmüştür. TDM-1 için elde edilen 2 parametrelili r^2 değerleri oldukça yüksek iken parametre sayısının artmasıyla bu değerler daha da artmıştır.

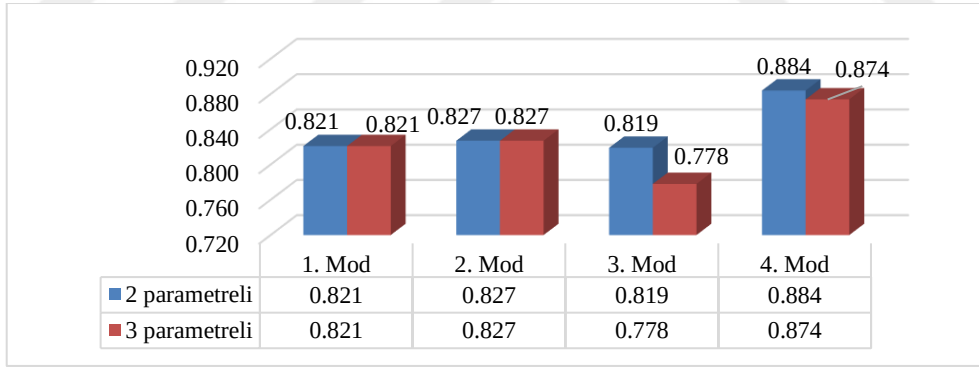
TDM-2 için nem-sıcaklık bağımsız 2 parametrelili ve nem-sıcaklık-doymunluk bağımsız 3 parametrelili olarak yapılan analizler neticesinde elde edilen değerler aşağıdaki grafikte karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Şekil 109).



Şekil 109. TDM-2 için 2 ve 3 parametrelili r^2 karşılaştırma grafikleri

Şekil 109'dan görüldüğü gibi parametre sayısının artması TDM-2'nin model performansına olumlu bir etkisinin olduğu görülmüştür. TDM-2 için elde edilen 2 parametrelili r^2 değerleri oldukça yüksek iken parametre sayısının artmasıyla bu değerler daha da artmıştır.

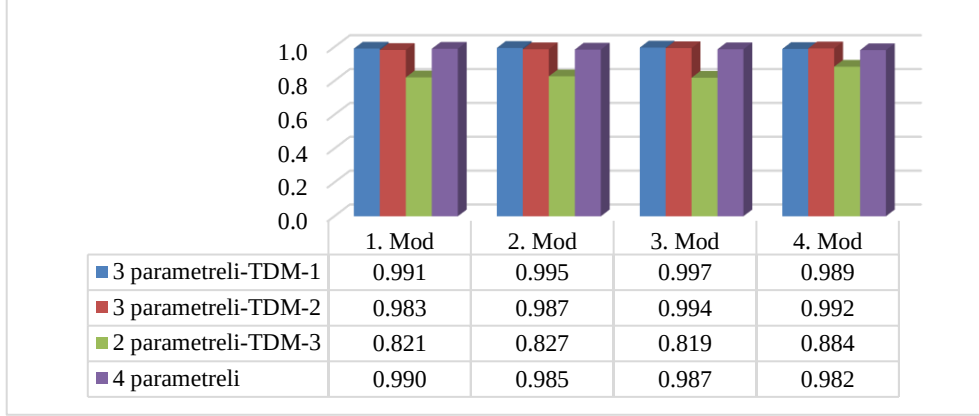
TDM-3 için nem-sıcaklık bağımsız 2 parametrelili ve nem-sıcaklık-doygunluk bağımsız 3 parametrelili olarak yapılan analizler neticesinde elde edilen değerler aşağıdaki grafikte karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Şekil 110).



Şekil 110. TDM-3 için 2 ve 3 parametrelili r^2 karşılaştırılması

Şekil 110'dan görüldüğü gibi parametre sayısının artması TDM-3'ün model performansına genelde olumsuz bir etkisinin olduğu görülmüştür. TDM-3 için elde edilen 2 parametrelili r^2 değerleri 3 parametrelili değerlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Fakat 3 parametrelili değerlerin de oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir.

TDM-1, 2, 3 ve tüm verileri içinde barındıran modellerin en yüksek r^2 değerleri dikkate alındığında Şekil 111'deki gibi grafik elde edilmiştir.



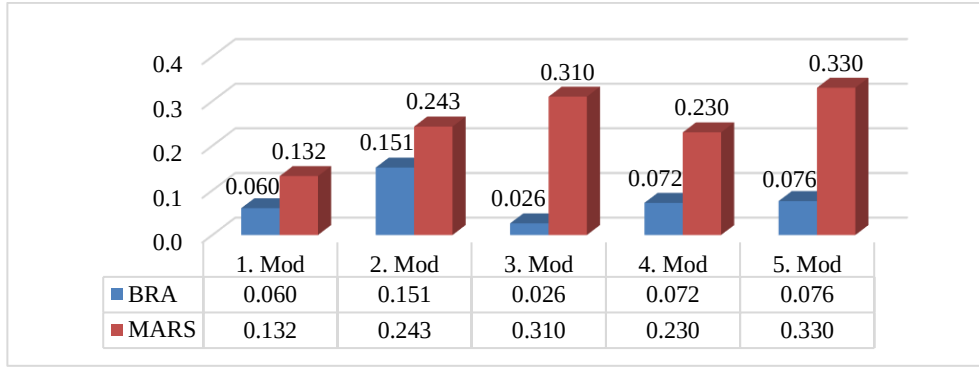
Şekil 111. Modellerin en yüksek r^2 değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 111'den görüldüğü gibi parametre sayısının artması tüm modellerin tahmin performansına genellikle olumlu bir etkisinin olduğu görülmüştür. Ayrıca tahmin performansı arttıkça modelin kullanılabilirliği de deneysel veriyle daha uyumlu olduğundan artmaktadır.

3.2. Trabzon Ayasofya'daki Kuleye ait Verilerin İncelenmesi

3.2.1. Kulenin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

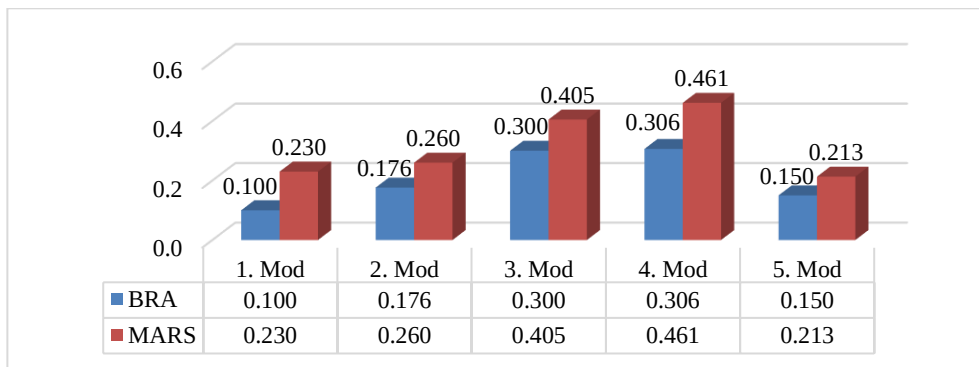
Kulenin deneysel doğal frekans değerleri sıcaklıkla belirli bir yönde artmadığı ya da azalmadığı ve dönemsel sıcaklık değerlerine göre dalgalandığı tespit edilmiştir. Basit doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri sonucunda kulenin frekansları ile sıcaklık arasında 5. mod dışında diğer tüm modlarda doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. Sıcaklıkla tüm modlar arasında zayıf korelasyon ve zayıf fonksiyonel ilişki bulunmuştur. Bunun sebebinin doğal frekansların sadece sıcaklıktan değil nem gibi diğer parametrelerden de etkilenmesidir. Bu yüzden tek bir parametreye bağlı korelasyonun yeterince güçlü olmadığı görülmüştür. Kulenin 3. ve 4. moduna ait frekansların haricinde diğer tüm modlarda sıcaklık artışına bağlı bir artış eğilimi görülmüştür. MARS yöntemiyle gerçekleştirilen analiz sonucunda tüm modlarda basit regresyon analizlerdeki gibi düşük determinasyon katsayıları elde edilmiştir (Şekil 112).



Şekil 112. Kulenin frekans-sıcaklık ilişkisinde elde edilen r^2 değerleri

3.2.2. Kulenin Neme Bağlı Değişimleri

Kulenin deneysel doğal frekans değerleri ile nem arasındaki ilişkisinin belirli bir yönde artmadığı ya da azalmadığı dönemsel değerlere göre dalgalandığı tespit edilmiştir. Kulenin frekanslarının nemle ilişkileri basit doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle 4. mod için doğrusal, diğer tüm modlarda doğrusal olmayan bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Tüm modlarda orta düzeyde korelasyon ve zayıf fonksiyonel ilişki bulunmuştur. Bunun sebebinin doğal frekansların sadece nemden değil sıcaklık gibi diğer parametrelerden de etkilenmesidir. Bu yüzden tek bir parametreye bağlı korelasyonun yeterince güçlü olmadığı görülmüştür. Tüm modlarda nem artışına bağlı olarak bir artış eğilimi görülmüştür. MARS yöntemiyle gerçekleştirilen analizlerde basit regresyon sonuçları gibi tüm modlarda düşük r^2 değerleri elde edilmiştir (Şekil 113).

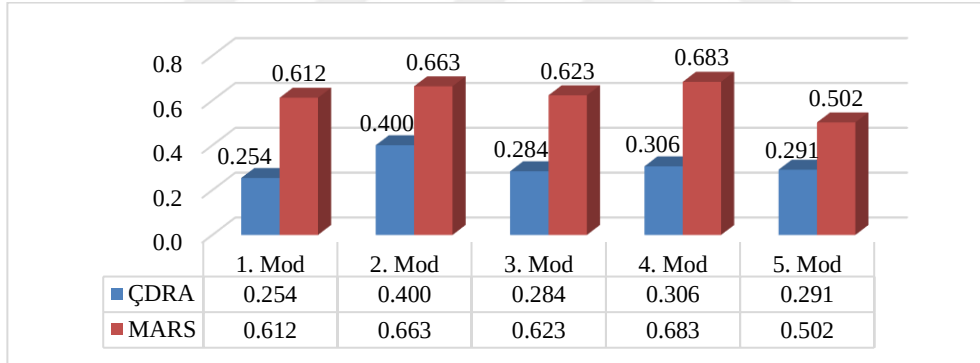


Şekil 113. Kulenin frekans-nem ilişkisinde elde edilen r^2 değerleri

3.2.3. Kulenin Nem ve Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

Kulenin deneysel doğal frekanslarının nem-sıcaklık ilişkileri çoklu doğrusal regresyon analiz yöntemiyle ve MARS yöntemiyle belirlenmiştir. ÇDRA analizlerinde kule için ilk 5 moda ait korelasyon sayıları (r) sırasıyla 0.504, 0.633, 0.533, 0.553, 0.539 olarak ve determinasyon katsayıları (r^2) sırasıyla 0.254, 0.400, 0.284, 0.306, 0.291 olarak elde edilmiştir. Kule için tüm modlarda orta düzeyli korelasyon ve zayıf bir fonksiyonel ilişki bulunmuştur.

Kulenin deneysel doğal frekanslarının nem-sıcaklık ilişkileri MARS yöntemiyle de belirlenmiş ve frekans değerini veren denklemler elde edilmiştir. İlk 5 moda ait r^2 değerleri sırasıyla 0.612, 0.663, 0.623, 0.683, 0.502 olarak belirlenmiştir (Şekil 114). Kulenin tek parametrelili yapılan analizlerinde düşük r^2 değerleri elde edilirken 2 parametrelili analizlerde tüm modlarda 0.5'ten daha yüksek değerler elde edilmiş ve tüm modlarda güçlü bir fonksiyonel ilişki bulunmuştur.



Şekil 114. Kulenin frekanslarıyla N-S ilişkisinde elde edilen r^2 değerleri

MARS yöntemiyle parametrelerin analizdeki önemi elde edilmiştir. Yapılan analizlerde 3. mod hariç tüm modlarda nemin (Prmt. 1) etkisi sıcaklıkla (Prmt. 2) eşit düzeyde ve %100 olarak belirlenmiştir. 3. modda sıcaklığın etkisi ise %6.116 olarak bulunmuştur.

3.2.4. Kulenin Model Güncelleme Etkilerinin İncelenmesi

Kulenin deneysel doğal frekanslarının minimum ve maksimum değerlerine göre başlangıç SE modeli üzerinde model güncelleme işlemleri yapılmıştır. Güncelleme işleminde deneysel ve sayısal değerler arasında farklar tüm modlar için %5'in altına

düşürülmüştür. Deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalaması $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ için sırasıyla %1.95 ve %2.40 olarak elde edilmiştir.

Kulenin başlangıç SE modeline ait elastisite modülü 3500MPa iken minimum deneysel frekanslara göre güncellenmiş SE modelinin elastisite modülü 2800MPa ve maksimum deneysel frekanslara göre güncellenmiş SE modelinin elastisite modülü 3209MPa'dır. Başlangıca ait elastisite modülünün minimum ve maksimum değerlere göre güncellenmiş SE modellerinin elastisite modülleriyle değişimi mutlak değerce sırasıyla %20 ve %8.314 olarak elde edilmiştir. Elastisite modülünün ortalama değişimi ise %6.806 olarak bulunmuştur. Bulunan değişim yapısal analizlerde çevresel faktörlerin önemli bir etkiye sahip olduğu ve bu etkinin yapısal analizlerde dikkate alınmasının önemli olacağını belirtmektedir.

3.2.5. Kulenin Deprem Analizlerinin Değerlendirilmesi

Kulenin deprem analizleri sonucunda başlangıç, $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ SE modellerinden toplam yer değiştirmeler sırasıyla 0.10392m, 0.14551m ve 0.15079m olarak bulunmuştur. $G_{\min}$ SE modelinden ve $G_{\max}$ SE modelinden elde edilen yer değiştirmeler başlangıç modeldeki yer değiştirmeye göre sırasıyla %40.02 ve %45.1 daha fazla olarak elde edilmiştir. $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ arasında yer değiştirmelerde maksimum değer minimum değerden %3.63 daha fazla olduğu görülmüştür. Ortalama değişim ise %1.78 olarak elde edilmiştir.

Kulenin başlangıç, $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ SE modellerinden minimum asal gerilmeler sırasıyla -1.1157E7Pa, -1.0064E7Pa ve -1.4602E7Pa olarak bulunmuştur. $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ SE modellerinden elde edilen minimum asal gerilmeler başlangıç modele göre sırasıyla %9.8 daha az ve %30.88 daha fazla olarak elde edilmiştir. Minimum asal gerilmelerin ortalama değişimi ise %18.4 olarak bulunmuştur.

Kulenin başlangıç, $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ SE modellerinden maksimum asal gerilmeler sırasıyla 1.0958E7Pa, 1.1201E7Pa ve 1.3364E7Pa olarak bulunmuştur. $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ SE modellerinden elde edilen maksimum asal gerilmeler başlangıç modele göre sırasıyla %2.22 ve %21.96 daha fazla olarak elde edilmiştir. Maksimum asal gerilmelerin ortalama değişimi ise %8.81 olarak bulunmuştur.

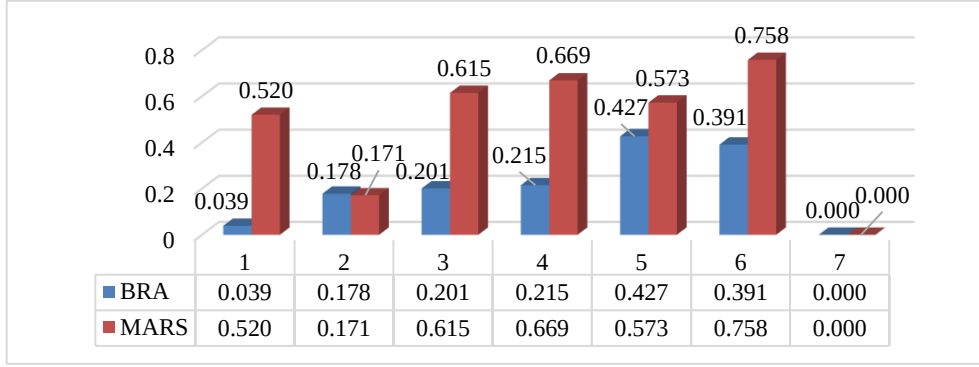
Kulenin bütün frekansları ele alındığında maksimum doğal frekans değerlerinin minimum doğal frekans değerlerinden %7.41 daha fazla olduğu, bu fazlalığın elastisite

modüllerinde ortalama değişimde %6.806'lık bir farka, yer değiştirmelerde ortalama %1.78'lik bir farka, maksimum gerilmelerde %8.81'lik bir farka ve minimum gerilmelerde %18.4'lük bir farka neden olduğu belirlenmiştir. Görülen bu farklılıklar yapısal davranışta çevresel etkilerin oluşturabileceği değişimi ortaya koymuştur. Kulenin bütün frekansları ele alındığında, çıkan bu frekans değerlerinin genellenebileceği, lakin SE modelleri üzerinde yapılan deprem analiz sonuçlarının seçilen ivme kaydına bağlı olduğu ve ivme kaydı değiştiğinde yer değiştirme ile gerilme değerlerinin değişecektir.

3.3. İskenderpaşa Cami'sinin Minaresine ait Verilerin İncelenmesi

3.3.1. Minarenin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

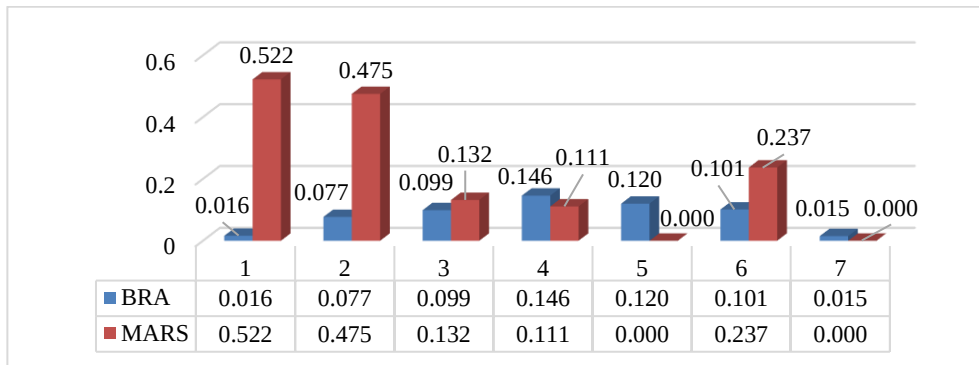
Minarenin deneysel doğal frekans değerlerinin sıcaklıkla ilişkisinin belirli bir yönde artmadığı ya da azalmadığı, dönemsel sıcaklık değerlerine göre dalgalandığı tespit edilmiştir. Minarenin basit doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modelleri için yapılan analizlerde sıcaklık ile frekanslar arasında 1., 2. ve 4. modlar için doğrusal olmayan; 3., 5., 6. ve 7. modlar için doğrusal bir ilişki görülmüştür. 4., 5. ve 6. modlarda orta düzeyde korelasyon, bu modların dışındaki diğer tüm modlarda zayıf korelasyon elde edilmiştir. Bu sebeple sıcaklıkla belirlenen ilk 7 mod arasında zayıf fonksiyonel ilişki bulunmaktadır. Bunun sebebinin doğal frekansların sadece sıcaklıktan değil nem gibi diğer parametrelerden de etkilenmesidir. Bu yüzden tek bir parametreye bağlı korelasyonun yeterince güçlü olmadığı görülmüştür. 7. mod dışında tüm modlarda sıcaklık artışına bağlı olarak bir azalış eğilimi görülmüş ve bu durum yığma bir minare olan İskenderpaşa Cami'sinin minaresinde bazı yapı elemanlarının metal kenetlerle birbirine bağlanmış olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca minarenin gövde duvarlarının bir kısmı kesme taş bir kısmı ise tuğla elemanlardan oluşmasının da bu sonucun ortaya çıkmasında etkili olduğu değerlendirilmiştir. Minarenin frekansları ile sıcaklık değerleri arasında gerçekleştirilen MARS analizleri sonucunda 2. ve 7. mod dışındaki tüm modlarda yüksek determinasyon katsayıları elde edilmiştir (Şekil 115). MARS analizi sonucunda belirtilen modlar dışındaki diğer tüm modlarda güçlü bir fonksiyonel ilişki bulunmuştur. Bu durum, sıcaklığın minarenin frekansları üzerinde önemli bir etkisini göstermiştir.



Şekil 115. Minarenin frekans-sıcaklık ilişkisinde elde edilen r^2 değerleri

3.3.2. Minarenin Neme Bağlı Değişimleri

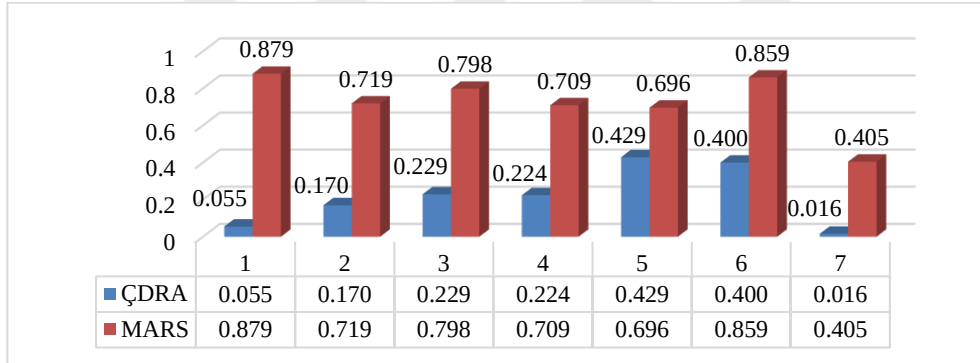
Minarenin deneysel doğal frekans değerleri ile nem arasındaki ilişkisinin belirli bir yönde artmadığı ya da azalmadığı dönemsel değerlere göre dalgalandığı tespit edilmiştir. Minarenin deneysel doğal frekansları ile nem değerleri arasında gerçekleştirilen basit doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerden minarenin 1. ve 7. modlarında doğrusal bir ilişki, diğer tüm modlarda ise doğrusal olmayan bir ilişki görülmüştür. Bağlı nemle tüm modlar arasında zayıf fonksiyonel ilişki bulunmuştur. Bunun sebebinin doğal frekansların sadece nemden değil sıcaklık gibi diğer parametrelerden de etkilenmesidir. Bu yüzden tek bir parametreye bağlı korelasyonun yeterince güçlü olmadığı görülmüştür. 2 modda bağlı nem artışına bağlı olarak azalış eğilimi, diğer 5 modda da artış eğilimi görülmüştür. MARS yöntemiyle gerçekleştirilen analiz sonucunda sadece 1. modda yüksek determinasyon katsayısı diğer tüm modlarda düşük değerler elde edilmiştir (Şekil 116).



Şekil 116. Minarenin frekans-nem ilişkisinde elde edilen r^2 değerleri

3.3.3. Minarenin Nem ve Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

Minarenin deneysel doğal frekanslarının nem-sıcaklık ilişkileri ÇDRA ve MARS yöntemleriyle belirlenmiştir. ÇDRA sonucunda minarenin ilk 7 moduna ait korelasyon sayıları sırasıyla 0.234, 0.413, 0.479, 0.473, 0.655, 0.633, 0.126 olarak ve determinasyon katsayıları sırasıyla 0.055, 0.170, 0.229, 0.224, 0.429, 0.400, 0.016 olarak elde edilmiştir. Minare için ÇDRA ile 2 modda düşük korelasyon, diğer 5 modda orta düzeyli korelasyon ve tüm modlarda zayıf bir fonksiyonel ilişki bulunmuştur. Minarenin deneysel doğal frekanslarının nem-sıcaklık ilişkileri MARS yöntemiyle de belirlenmiş ve her bir moda ait frekans değerini veren denklemler elde edilmiştir. İlk 7 moda ait r^2 değerleri sırasıyla 0.879, 0.719, 0.798, 0.709, 0.696, 0.859, 0.405 olarak elde edilmiştir (Şekil 117). Minarenin tek parametrelili yapılan analizlerde daha düşük r^2 değerleri elde edilirken 2 parametrelili analizde 7. mod hariç modlarda 0.695'ten daha yüksek değerler elde edilmiş ve ilk 6 modda bağımlı ve bağımsız parametreler arasında güçlü bir fonksiyonel ilişki bulunmuştur.



Şekil 117. Minarenin frekanslarıyla N-S ilişkisinde elde edilen r^2 değerleri

MARS yöntemiyle parametrelerin analizdeki önemi elde edilmiştir. Yapılan analizlerde 1., 5., 6. ve 7. modlar hariç tüm modlarda nemin (Prmt. 1) etkisi sıcaklıkla (Prmt. 2) eşit düzeyde ve %100 olduğu belirlenmiştir.

3.3.4. Minarenin Model Güncelleme Etkilerinin İncelenmesi

Model güncelleme işlemlerinde ilk 7 moda ait deneysel ve güncellenmiş frekans değerlerindeki farkların 5. mod (burulma modu) dışındaki diğer modlarda maksimum değerinin mutlak değerce %5'ten az olduğu görülmüştür. Kümülatif kütleinin, toplam kütleinin yaklaşık %90'ına ulaşması nedeniyle minarenin ilk 4 modunun yapısal dinamik

analiz için yeterli olduğu ve üst modların etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu düşünülmüştür. Deneysel ve sayısal frekansları arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalaması $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ için sırasıyla %2.14 ve %2.01'dir. Güncellenmiş modellerin frekans değerleri deneysel frekans değerlerine oldukça yakın olduğundan güncellenmenin analiz için yeterli olduğu kabul edilmiştir. Güncelleme işlemi sonucunda minarenin mod şekilleri ilk modeldekiyle aynı olduğu belirlenmiştir.

Minarenin başlangıç SE modeline ait elastisite modülü 2500MPa iken minimum deneysel frekanslara göre güncellenmiş SE modelinin elastisite modülü 1920MPa ve maksimum deneysel frekanslara göre güncellenmiş SE modelinin elastisite modülü 2200MPa'dır. Başlangıca ait elastisite modülünün minimum ve maksimum değerlere göre güncellenmiş SE modellerinin elastisite modülleriyle mutlak değerce değişimi sırasıyla %23.2 ve %12'dir. Elastisite modülünün ortalama değişimi ise %6.796 bulunmuştur. Bulunan değişimin yapı malzemesindeki mekanik özelliklerinde çevresel faktörlerin etkisiyle bir değişikliğe sebep olduğu ve bu değişikliğin dikkate alınması gerektiğini belirtmektedir.

3.3.5. Minarenin Deprem Analizlerinin Değerlendirilmesi

Minarenin deprem analizleri sonucunda başlangıç, $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ SE modellerinden toplam yer değiştirmeler sırasıyla 0.432564m, 0.405415m ve 0.431909m olarak bulunmuştur. $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ SE modellerinden elde edilen yer değiştirmeler başlangıç modele göre %6.28 ve %0.15 daha az olarak elde edilmiştir. $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ arasında yer değiştirmelerde maksimum değerin minimum değerden %6.54 daha fazla olduğu görülmüştür. Ortalama değişim ise %3.16 olarak elde edilmiştir.

Minarenin başlangıç, $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ SE modellerinden minimum asal gerilmeler sırasıyla -1.6E7Pa, -1.15E7Pa ve -1.4E7Pa olarak bulunmuştur. $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ SE modellerinden elde edilen minimum asal gerilmeler başlangıç modele göre %28.13 ve %12.5 daha az olarak elde edilmiştir. Minimum asal gerilmelerin ortalama değişimi ise %9.8 olarak bulunmuştur.

Minarenin başlangıç, $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ SE modellerinden maksimum asal gerilmeler sırasıyla 1.57E7Pa, 1.13E7Pa ve 1.38E7Pa olarak bulunmuştur. $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ SE modellerinden elde edilen maksimum asal gerilmeler başlangıç modele göre

%28.03 ve %12.1 daha az olarak elde edilmiştir. Maksimum asal gerilmelerin ortalama değişimi ise %9.96 olarak bulunmuştur.

Minarenin bütün frekansları ele alındığında maksimum doğal frekans değerlerinin minimum doğal frekans değerlerinden %7.67 daha fazla olduğu, bu fazlalığın elastisite modüllerinde ortalama değişimde %6.796'lık bir farka, yer değiştirmelerde ortalama %3.16'lık bir farka, maksimum gerilmelerde %9.96'lık bir farka ve minimum gerilmelerde %9.8'lik bir farka neden olduğu belirlenmiştir. Görülen bu farklılıklar yapısal davranışta çevresel etkilerin oluşturabileceği değişimi ortaya koymuştur. Minarenin bütün frekansları ele alındığında, çıkan bu frekans değerlerinin genellenebileceği, lakin SE modelleri üzerinde yapılan deprem analiz sonuçlarının seçilen ivme kaydına bağlı olduğu ve ivme kaydı değiştiğinde yer değiştirme ile gerilme değerlerinin değişecektir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapıların yapısal davranışlarının anlık olarak belirlenmesinde, herhangi bir doğal afet sonrası o andaki dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde, çevresel koşulların yapı üzerindeki etkilerinin incelenmesinde ve daha birçok alanda titreşim verilerine dayalı yapısal parametrelerin belirlenmesi günümüzde önemli bir yere sahiptir. Bu sebeple belirtilen işlemleri yapabilmek için gelişmiş özelliklere sahip titreşim ölçüm sistemleri kullanılmaktadır.

Tez çalışması kapsamında piyasadaki sistemlere göre birçok avantajı bulunan CEVS titreşim ölçüm sistemi ve CEVA veri toplama yazılımı geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemin doğrulanması farklı yöntemlerle yapılmış ve laboratuvar ile gerçek yapılar üzerinde titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında oluşturulan tuğla modellerin, seçilen kulenin ve minarenin yapısal takipleri bu sistem ile yapılmıştır. Bu yapıların doğal frekanslarının çevresel etkiler altındaki değişimleri belirli aralıklarla deneysel testlerle gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda tuğla modellere, kuleye ve minareye ait deneysel doğal frekanslar belirlenmiş ve çevresel etkilerin frekanslar üzerindeki etkisi regresyon analizleriyle incelenmiştir. Daha sonra kuleye ve minareye ait SE modelleri oluşturulmuş ve sayısal dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Bu yapıların başlangıç SE modelleri, deneysel doğal frekansların maksimum ve minimum değerlerine göre ayrı ayrı güncellenmiştir. Kule ve minarenin başlangıç, $Güncel_{min}$ ve $Güncel_{maks}$ SE modelleri üzerinde seçilen ivme kayıtları kullanılarak zaman tanım alanındaki yöntemle deprem analizleri yapılmıştır.,

Tez çalışması kapsamında genel olarak elde edilen ve gözlemlenen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- ✓ Geliştirilen sistem ile ilgili olarak,
 - Geliştirilen sistem genel olarak donanım (CEVS) ve yazılım (CEVA) kısımlarından oluşmaktadır. CEVS sistemlerinde 3 eksenli 20-bitlik ADC'ye sahip dijital ivmeölçerlerin kullanılması ölçüm sonuçlarının etkinliğini artırmaktadır. Ayrıca kullanılan sensör sayesinde gürültüsüz olarak daha temiz veriler elde edilebilmektedir.

- Yüksek hassasiyetiyle en küçük titreşimleri bile algılayabilen ivmeölçer sensörü farklı örnekleme frekansına, farklı g hassasiyetine ayarlanabilmekte ve çeşitli yapılarda istenilen özelliklerde ölçümler yapılabilir.
 - Sistem üzerinden ölçümler alınırken sıcaklığa bağlı değişimler, nem ve yükseklik değerleri, batarya voltajı değerleri de ölçülebilmektedir. Yapı üzerinde gerçekleştirilen ölçümler kablolu ya da kablosuz olarak yapılabilir.
 - CEVA Data Logger yazılımıyla yapıdan toplanan veriler bilgisayar ortamına aktarılmakta, istenilen dosya formatlarında kaydedilebilmekte ve kaydedilen titreşim verileri istenilen analiz programlarında işlenebilmektedir.
 - CEVS sisteminde harici bir veri toplama ünitesi bulunmadığından ve bütün sistem tek kutu içinden olmasından ötürü oldukça ergonomik bir yapıya sahiptir.
 - Geliştirilen sistemin yerli üretim olması sebebiyle benzer özellikteki cihazlara göre daha ucuz olmaktadır.
 - Geliştirilen sistemde kablosuz veri aktarımı sağlayan bluetooth modülüyle kanal sayısı kısıtlanmamakta ve ilgili cihazın kapasitesine göre istenilen sayıda kanal ilave edilebilmektedir. Ayrıca bir günümüzde birçok cihazda bluetooth modülünün olması nedeniyle ilave bir alıcı modüle ihtiyaç duyulmamaktadır.
- ✓ Laboratuvar ortamında tuğla duvar modeller üzerinde yapılan çalışmalardan,
- Tuğla modellerin frekanslarının sıcaklıkla ilişkisinde toplamda 13 moddan 12'sinde güçlü korelasyon ile kuvvetli fonksiyonel ilişki bulunurken 1'i ile orta düzeyli korelasyon ve zayıf fonksiyonel ilişki elde edilmiştir. TDM-1 için tüm modlarda doğrusal, TDM-2 için tüm modlarda doğrusal olmayan ve TDM-3 için 1 mod hariç diğer tüm modlarda doğrusal olmayan bir ilişki bulunmuştur.
 - Tuğla modeller üzerinde yapılan analizlerden tüm modlarda sıcaklık artarsa frekans değerlerinde bir azalma eğilimi görülmüştür.
 - Tuğla modellerin frekanslarının nemle ilişkisinde incelenen 13 moddan 11'inde orta düzeyde korelasyon ve tüm modlarda zayıf fonksiyonel ilişki elde edilmiştir.
 - 3 farklı tuğla model üzerinde yapılan analizler neticesinde tüm modlarda nem artarsa frekans değerlerinde bir azalma eğilimi görülmüştür.

- Modellerin doğal frekanslarının N-S-D ile ilişkilerinde MARS yöntemiyle elde edilen r^2 değerleri TDM-1 için 0.979 ile 0.997 arasında, TDM-2 için 0.983 ile 0.994 arasında ve TDM-3 için 0.778 ile 0.874 arasındadır.
 - Tuğla modeller üzerinde yapılan incelemelerde parametre sayısındaki artışla genellikle modelin kullanılabilirliği artmış ve daha yüksek r^2 değerleri elde edilmiştir.
- ✓ Kule ve minare üzerinde yapılan çalışmalardan,
- Titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiş ve kulenin doğal frekansları ilk 5 mod için 2.557Hz ile 8.453Hz, minarenin doğal frekansları ilk 7 mod için 1.050Hz ile 15.063Hz arasında elde edilmiştir.
 - Kuledeki ölçümler minimum %39 nem ile 4°C sıcaklık aralığında ve maksimum %78 nem ile 29°C sıcaklık aralığında, minare üzerindeki ölçümler minimum %41 nem ile 5.6°C sıcaklık aralığında ve maksimum %79 nem ile 23°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir.
 - Kulenin frekanslarındaki ortalama değişimin %3.573 ve minarenin frekanslarındaki ortalama değişimin %3.683 olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre sıcaklık-nemin bu gibi tarihi yapılarda minimum %3.5 olduğu belirlenmiş ve bu etkinin yapısal değerlendirmelerde dikkate alınmasının gerekliliği ortaya konulmuştur.
 - Kulenin frekanslarıyla sıcaklık arasında BRA'da 5. mod dışında diğer tüm modlarda doğrusal bir ilişki, sıcaklıkla tüm modlar arasında zayıf korelasyon ve zayıf fonksiyonel ilişki bulunmuştur. 3. ve 4. modlar hariç tüm modlar sıcaklık artışına bağlı bir artış eğiliminde pozitif bir ilişki bulunmuştur. MARS yöntemiyle yapılan analizlerde zayıf bir ilişki tespit edilmiştir.
 - Kulenin frekanslarıyla nem arasında BRA'da 4. mod için doğrusal, diğer tüm modlarda doğrusal olmayan bir ilişki, tüm modlarda orta düzeyde korelasyon ve zayıf fonksiyonel ilişki bulunmuştur. Tüm modlarda nem artışına bağlı olarak bir artış eğilimi görülmüştür. MARS yöntemiyle yapılan analizlerde zayıf bir ilişki tespit edilmiştir.
 - Kulenin frekanslarıyla nem-sıcaklık ilişkilerinde ilk 5 mod için ÇDRA'da tüm modlarda orta düzeyli korelasyon bulunurken MARS yöntemiyle yapılan analizlerde tüm modlarda güçlü bir ilişki bulunmuştur.

- Kulenin frekanslarıyla 2 parametrelili ÇDRA ve MARS analizlerinde tek parametrelili yapılan analizlere göre daha yüksek r^2 değerleri bulunmuştur. MARS yöntemiyle parametrelerin önemi için yapılan analizlerde 3. mod hariç tüm modlarda nemin etkisinin sıcaklıkla eşit düzeyde ve %100 olduğu belirlenmiştir.
- Minarenin frekanslarıyla sıcaklık arasında 1., 2. ve 4. modlar için doğrusal olmayan; diğer modlar için doğrusal bir ilişki; 5. ve 6. modlarda orta düzeyde korelasyon, bu modların dışındaki diğer tüm modlarda zayıf korelasyon elde edilmiştir. 7. mod dışında tüm modlarda sıcaklık artışına bağlı olarak bir azalış eğilimi görülmüştür. MARS yöntemiyle gerçekleştirilen analiz sonucunda 2. ve 7. modlar dışındaki diğer tüm modlarda güçlü bir ilişki bulunmuştur.
- Minarenin frekanslarıyla nem arasında BRA'dan minarenin 1. ve 7. modlarında doğrusal bir ilişki, diğer tüm modlarda ise doğrusal olmayan bir ilişki ve nemle tüm modlar arasında zayıf fonksiyonel bir ilişki bulunmuştur. 2 modda nem artışına bağlı olarak bir azalış eğilimi, diğer 5 modda ise bir artış eğilimi görülmüştür. MARS analizi sonucunda 1. modla güçlü bir ilişki bulunmuştur.
- Minarenin frekanslarıyla N-S ile ÇDRA analizlerinde 2 modda düşük korelasyon, diğer 5 modda orta düzeyli korelasyon ve tüm modlarda zayıf bir fonksiyonel ilişki bulunmuştur. Minarenin frekanslarının N-S ile ilişkileri MARS yöntemiyle belirlenmiş ve 7 moda ait r^2 değerlerinin ÇDRA değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Minarenin frekanslarıyla N-S ile ÇDRA ve MARS analizlerde tek parametrelili yapılan analizlere göre daha yüksek r^2 değerleri bulunmuştur. MARS yöntemiyle parametrelerin analizdeki önemi 1., 5., 6. ve 7. modlar hariç diğer tüm modlarda nemin etkisi sıcaklıkla eşit düzeyde ve %100 olduğu belirlenmiştir.
- Deneyisel frekansların belirli bir yönde sürekli azalış veya artış göstermemekte ve zamana bağlı olarak dalgalanarak değişmektedir. Bu sebeple tuğla modellerin ve gerçek yapıların frekanslarındaki değişimler, kalıcı bir değişimden değil de çevresel etkilerle oluşan geçici bir değişimden kaynaklandığı gözlenmiştir.
- Kulenin ve minarenin başlangıç SE modelleri oluşturulmuş ve kulenin ilk 5 moda ait mod şekillerinden 3. mod (burulma modu) dışındaki tüm modlar eğilme modu olarak elde edilmiştir. Minarenin ilk 7 moda ait mod şekillerinden 5. mod (burulma modu) dışındaki tüm modlar eğilme modu olarak belirlenmiştir.

- Kulenin başlangıç SE modelinde yapılan modal analizle ilk 5 moda ait frekans değerleri 3.028Hz ile 12.008Hz aralığında elde edilmiştir.
- Kulenin güncellenmiş SE modellerinden elde edilen frekanslar ile deneysel frekanslar karşılaştırılmış ve aralarındaki farkların mutlak değerlerinin ortalaması $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ için sırasıyla %1.95 ve %2.40 olarak elde edilmiştir.
- Kulenin bütün frekansları ele alındığında maksimum doğal frekans değerlerinin minimum değerlerden %7.41 daha fazla olduğu, bu fazlalığın elastisite modüllerinde ortalama değişimde %6.806'lık bir farka, yer değiştirmelerde ortalama %1.78'lik bir farka, maksimum gerilmelerde %8.81'lik bir farka ve minimum gerilmelerde %18.4'lük bir farka neden olduğu belirlenmiştir.
- Minarenin başlangıç SE modelinde yapılan modal analizle ilk 7 moda ait frekans değerleri 1.141Hz ile 15.064Hz aralığında elde edilmiştir.
- Minarenin güncellenmiş SE modellerinden elde edilen frekanslar ile deneysel frekanslar karşılaştırılmış ve aralarındaki farkların mutlak değerlerinin ortalaması $G_{\min}$ ve $G_{\max}$ için sırasıyla %2.14 ve %2.01 olarak elde edilmiştir.
- Minarenin bütün frekansları ele alındığında maksimum doğal frekans değerlerinin minimum değerlerden %7.67 daha fazla olduğu, bu fazlalığın elastisite modüllerinde ortalama değişimde %6.796'lık bir farka, yer değiştirmelerde ortalama %3.16'lık bir farka, maksimum gerilmelerde %9.96'lık bir farka ve minimum gerilmelerde %9.8'lik bir farka neden olduğu belirlenmiştir. Görülen bu farklılıklar yapısal davranışta çevresel etkilerin oluşturabileceği değişimi ortaya koymuştur.

Bu tez çalışmasından geliştirilen titreşim ölçüm sisteminin yapıların yapısal davranışlarının takibinde etkili bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür. Yapılan doğrulanmanın ardından oluşturulan laboratuvar modelleri ve gerçek yapılar üzerinde yapılan çalışmalarla çevresel etkilerin doğal frekansları belirli bir ölçüde değiştirebildiği ve yapının hasar tespitinde bu durumun dikkate alınmasının önemli olabileceği vurgulanmıştır. Yapılan bu çalışmayı geliştirebileceği düşünülen bazı öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Yapılar üzerinde gerçekleştirilecek sürekli izlemelerle elde edilen veriler yapı modeli ve davranışı hakkında daha detaylı bilgiler elde edinilebilir.
- Yapıların içine yerleştirilecek kalıcı sensörlerle mevsimsel değişimler daha detaylı olarak elde edinilebilir.
- Uzak mesafelerle haberleşebilen, topladığı titreşim ölçüm verilerini cep telefonu vb. cihaz ile paylaşabilen bir titreşim ölçüm sistemi geliştirilebilir.
- Çeşitli yapıların mevsimsel döngü içindeki frekans aralıkları belirlenerek yapı üzerinde oluşabilecek hasarların varlığı belirlenebilir.
- Çevresel etkilerin yapıların doğal frekansları üzerindeki etkisi çeşitli makine öğrenme yöntemleri kullanılarak yöntem farklılıkları ve ilişkiler değerlendirilebilir.



5. KAYNAKLAR

- Abu-Haifa, M., & Lee, S. J. (2022). Image-Based Modeling-to-Simulation of Masonry Walls. *Journal of Architectural Engineering*, 28(4), 06022001.
- Adam, M. A., El-Salakawy, T. S., Salama, M. A., & Mohamed, A. A. (2020). Assessment of Structural Condition of a Historic Masonry Minaret in Egypt. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00409.
- Akhlaq, H., Butt, F., Alwetaishi, M., Riaz, M., Benjeddou, O., & Hussein, E. E. (2022). Structural Identification of a 90m High Minaret of a Landmark Structure under Ambient Vibrations. *Buildings*, 12(2), 252.
- Alamehmet, A. Z. (2019). *Bursa Ulucami Doğu Minaresinin Davranışının Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizler ile İncelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Allemang, R. J., & Brown, D. L. (1982). A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis. *1st IMAC*, Orlando, Florida, USA, 110-116.
- Alpar, R. (2003). *Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemlere Giriş 1*. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- Alpaslan, E., Hacıfendioğlu, K., Demir, G., & Birinci, F. (2020). Response Surface-Based Finite-Element Model Updating of a Historic Masonry Minaret for Operational Modal Analysis. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 29(9), e1733.
- Altıok, T. Y. (2019). *Tarihi Minarelerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel ve Nümerik Yöntemler ile Araştırılması*. T.C. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa.
- ANSYS (2016). Swanson Analysis System. ABD.
- Arraigada, M., & Part, M. (2006). Calculation of Displacements of Measured Accelerations, Analysis of Two Accelerometers and Application in Road Engineering. *Proceedings of 6th Swiss Transport Research Conference*, Monte Verità / Ascona, Swiss, March 15-17.
- ARTEMIS V5.3 (2011). Ambient Response Testing and Modal Identification Software, Structural Vibration Solutions A/S, Denmark.
- Aslan, T. A., Noori, A. R., & Temel, B. (2020). Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemeli Kirişlerin Sönümlü ve Sönümsüz Zorlanmış Titreşim Analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(2), 497-510.
- Atmaca, S. (2002). *I2C-Bus Seri İletişimi Protokolü için Veri İzleme Sistemi*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.

- Aymelek, A. (2022). *Minarelerin Sıcaklık ve Nem Gibi Çevresel Etkilere Bağlı Olarak Yapısal Davranışlarının Takibi ve Değerlendirilmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Aymelek, A., Yanık, Y., Demirtaş, B., Yıldırım, Ö., Çalik, İ., & Türker, T. (2023). Full-Scale Structural Evaluations of İskenderpaşa Minaret. *Structures*, 55, 1028-1044.
- Azzara, R. M., De Roeck, G., Girardi, M., Padovani, C., Pellegrini, D., & Reynders, E. (2018). The Influence of Environmental Parameters on the Dynamic Behaviour of the San Frediano Bell Tower in Lucca. *Engineering Structures*, 156, 175-187.
- Bağbancı, M. B., & Köprülü Bağbancı, Ö. (2018). The Effects of Construction Techniques and Geometrical Properties on the Dynamic Behavior of Historic Timber Minarets in Sakarya, Türkiye. *Shock and Vibration*, 2018(1), 9853896.
- Baki, O. T. (2023). *Trabzon Akarsularında Askıda Katı Madde Konsantrasyonunun Mekana ve Zamana Bağlı Değişiminin İncelenmesi ve Modellenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Baraccani, S., Azzara, R. M., Palermo, M., Gasparini, G., & Trombetti, T. (2020). Long-Term Seismometric Monitoring of the Two Towers of Bologna (Italy): Modal Frequencies Identification and Effects Due to Traffic Induced Vibrations. *Frontiers in Built Environment*, 6, 85, 1-14.
- Barsocchi, P., Bartoli, G., Betti, M., Girardi, M., Mammolito, S., Pellegrini, D., & Zini, G. (2021). Wireless Sensor Networks for Continuous Structural Health Monitoring of Historic Masonry Towers. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(1), 22-44.
- Bartoli, G., Betti, M., Marra, A. M., & Monchetti, S. (2017). Semiempirical Formulations for Estimating the Main Frequency of Slender Masonry Towers. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(4), 04017025.
- Bassoli, E., Vincenzi, L., Bovo, M., & Mazzotti, C. (2015). Dynamic Identification of an Ancient Masonry Bell Tower Using a MEMS-Based Acquisition System. *IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS) Proceedings*, 226-231.
- Başaran, H., Demir, A., Ercan, E., Nohutçu, H., Hökelekli, E., & Kozanoğlu, C. (2016). Investigation of Seismic Safety of a Masonry Minaret Using Its Dynamic Characteristics. *Earthquake and Structures*, 10(3), 523-538.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A. C., & Türker, T. (2009). Analytical and Operational Modal Analyses of Turkish Style Reinforced Concrete Minarets for Structural Identification. *Experimental Techniques*, 33(2), 65-75.
- Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunışık, A. C., & Yıldırım, F. (2009). Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 28, 37-47.

- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A. C., & Türker, T. (2010). Earthquake Analysis of Reinforced Concrete Minarets Using Ambient Vibration Test Results. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 19(3), 257-273.
- Bayraktar, A., Şahin, A., Özcan, D. M., & Yildirim, F. (2010). Numerical Damage Assessment of Hagia Sophia Bell Tower by Nonlinear FE Modeling. *Applied Mathematical Modelling*, 34(1), 92-121.
- Bayraktar, A., Çalık, İ., Türker, T., & Ashour, A. (2018a). Restoration Effects on Experimental Dynamic Characteristics of Masonry Stone Minarets. *Materials and Structures*, 51(6), 141.
- Bayraktar, A., Hökelekli, E., Halifeoğlu, F. M., Mosallam, A., & Karadeniz, H. (2018b). Vertical Strong Ground Motion Effects on Seismic Damage Propagations of Historical Masonry Rectangular Minarets. *Engineering Failure Analysis*, 91, 115-128.
- Bayraktar, A., & Hökelekli, E. (2021). A Cost-Effective FRCM Technique for Seismic Strengthening of Minarets. *Engineering Structures*, 229, 111672.
- Bayraktar, A., Akköse, M., Taş, Y., Erdiş, A., & Kurşun, A. (2022). Long-Term Strain Behavior of In-Service Cable-Stayed Bridges under Temperature Variations. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 12(4), 833-844.
- Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2004). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley and Sons.
- Bicanic, N., & Chen, H. (1997). Damage Identification in Framed Structures Using Natural Frequencies. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40(23), 4451-4468.
- Bikçe, M., Genes, M. C., Kacın, S., & Zubaroglu, A. (2011). Betonarme Bir Yapıda Duvarsız ve Duvarlı Hallerin Dinamik Testleri. *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 11-14.
- Binda, L., Gatti, G., Mangano, G., Poggi, C., & Landriani, G. S. (1992). Collapse of the Civic Tower of Pavia: A Survey of the Materials and Structure. *Masonry International*, 6(1), 11-20.
- Blakely, K. D., & Walton, W. B. (1984). Selection of Measurement and Parameter Uncertainties for Finite Element Model Revision. In *Proceedings of the 2nd International Modal Analysis Conference*, Florida, USA, 82-88.
- Boffill, Y., Blanco, H., Lombillo, I., & Villegas, L. (2019). Device for Continuous Assessment of Uniaxial Stress of Existing Masonry Structures: Laboratory Validation. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(5), e2344.
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2000). Modal Identification from Ambient Responses Using Frequency Domain Decomposition. *Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference*, February, San Antonio, USA, 625-630.

- Brincker, R., Ventura, C. E., & Andersen, P. (2003). Why Output-Only Modal Testing is a Desirable Tool for a Wide Range of Practical Applications. *Proceedings of the 21st International Modal Analysis Conference*, February, Florida, USA, 265-272.
- Büyüköztürk, Ş. (2006). *Sosyal Bilimler İçin Veri Analizi El Kitabı: İstatistik, Araştırma Deseni, SPSS Uygulamaları ve Yorum*. Pegem Akademi Yayıncılık, Ankara.
- Cabboi, A., Gentile, C., & Saisi, A. (2017). From Continuous Vibration Monitoring to FEM-Based Damage Assessment: Application on a Stone-Masonry Tower. *Construction and Building Materials*, 156, 252-265.
- Cai, Y., Zhang, K., Ye, Z., Liu, C., Lu, K., & Wang, L. (2021). Influence of Temperature on The Natural Vibration Characteristics of Simply Supported Reinforced Concrete Beam. *Sensors*, 21(12), 4242.
- Calayır, Y., Yetkin, M., & Erkek, H. (2021). Finite Element Model Updating of Masonry Minarets by Using Operational Modal Analysis Method. *Structures*, 34, 3501-3507.
- Calp, C. (2018). *Tarihi Minarelerin Dinamik Özellikleri ve Deprem Performansları*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Cavalagli, N., Comanducci, G., Gentile, C., Guidobaldi, M., Saisi, A., & Ubertini, F. (2017). Detecting Earthquake-Induced Damage in Historic Masonry Towers Using Continuously Monitored Dynamic Response-Only Data. *Procedia Engineering*, 199, 3416-3421.
- Cavalagli, N., Kita, A., Castaldo, V. L., Pisello, A. L., & Ubertini, F. (2019). Hierarchical Environmental Risk Mapping of Material Degradation in Historic Masonry Buildings: An Integrated Approach Considering Climate Change and Structural Damage. *Construction and Building Materials*, 215, 998-1014.
- Chácará, C., Reátegui, R., Oré, Á., Suarez, P., & Aguilar, R. (2023). Integration of NDT, 3D Parametric Modelling, and Nonlinear Numerical Analysis for the Seismic Assessment of a Vaulted Stone-Masonry Historical Building. *Journal of Building Engineering*, 70, 106347.
- Chang, P. C., Flatau, A., & Liu, S. C. (2003). Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Structural Health Monitoring*, 2(3), 257-267.
- Chen, H. P. (2018). *Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures*. John Wiley and Sons.
- Chiostrini, S., Foraboschi, P., & Vignoli, A. (1992). Structural Analysis and Damage Evaluation of Existing Masonry Buildings by Dynamic Experimentation and Numerical Modelling. *10th World Conference on Earthquake Engineering*, 3481-3486.
- Chopan, A., & Noori, A. R. (2023). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişlerin Zorlanmış Titreşim Analizi. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*.

- Chopra, A. K. (2007). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- Cuadros-Rojas, E., Saloustros, S., Tarque, N., & Pelà, L. (2024). Photogrammetry-Aided Numerical Seismic Assessment of Historical Structures Composed of Adobe, Stone and Brick Masonry. Application to the San Juan Bautista Church Built on the Inca Temple of Huaytará, Peru. *Engineering Failure Analysis*, 158, 107984.
- Çakır, F. (2021). A Simplified Method for Determining the Seismic Performance of Historical Structures: A Case of Kaya Çelebi Mosque. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(3), 1643-1656.
- Çaktı, E., Saygılı, Ö., Lemos, J. V., & Oliveira, C. S. (2020). Nonlinear Dynamic Response of Stone Masonry Minarets under Harmonic Excitation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(10), 4813-4838.
- Çalık, İ. (2017). *Tarihi Cami ve Minarelerin Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Restorasyon Etkilerinin Değerlendirilmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Çelik, L. F. (2019). *Yivli Minare'nin Depreme Karşı Dayanıklılığının Araştırılması*. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Antalya.
- DBYBHY (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- Durgut, E. (2021). *Bursa Hocaalızade Cami Minaresi Davranışının Farklı Deprem Kayıtları Altında Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz Yaklaşımları ile İncelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Ekmen, Ş. (2017). *Tarihi Urfa Ulu Cami Minaresinin Çevresel Titreşim Yöntemiyle Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi*. T.C. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- Erdoğan, H. A. (2018). *Türk Minarelerinin Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemiyle Deprem Performanslarının Karşılaştırılması*. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya.
- Ergün, M., & Tayfur, B. (2024). Evaluation of the Seismic Performance Pre- and Post-Restoration of a Masonry Clock Tower's FE Model Updated via Experimental and Optimization Methods. *Engineering Failure Analysis*, 158, 107986.
- Erkal, A. (2017). Transmission of Traffic-Induced Vibrations on and around the Minaret of Little Hagia Sophia. *International Journal of Architectural Heritage*, 11(3), 349-362.
- Erkek, H., & Yetkin, M. (2023). Assessment of the Performance of a Historic Minaret During the Kahramanmaraş Earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6). *Structures*, 58, 105620.
- Ewins, D. J. (1995). *Modal Testing: Theory and Practice*. John Wiley and Sons.

- Eyer, L., & Bartholdi, P. (1999). Variable Stars: Which Nyquist Frequency. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 135(1), 1-3.
- Fan, W., & Qiao, P. (2011). Vibration-Based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study. *Structural Health Monitoring*, 10(1), 83-111.
- Felber, A. J. (1993). *Development of Hybrid Bridge Evaluation System*. British Columbia Üniversitesi, Doktora Tezi, Vancouver, Kanada.
- Fessler, J. (2004). *FFT Algorithms* (Student Version).
- Field, A. (2013). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. Sage Publishing, Los Angeles, California, USA.
- Frangopol, D., & Messervey, T. (2009). Maintenance Principles for Civil Structures. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, John Wiley and Sons.
- Friedman, J. H. (1991). Multivariate Adaptive Regression Splines. *The Annals of Statistics*, 19(1), 1-67.
- Garavaglia, E., Anzani, A., Binda, L., & Cardani, G. (2008). Fragility Curve Probabilistic Model Applied to Durability and Long Term Mechanical Damage of Masonry. *Materials and Structures*, 41(4), 733-749.
- García-Macías, E., & Ubertini, F. (2020). Automated Operational Modal Analysis and Ambient Noise Deconvolution Interferometry for the Full Structural Identification of Historic Towers: A Case Study of the Sciri Tower in Perugia, Italy. *Engineering Structures*, 215, 110615.
- García-Macías, E., Ierimonti, L., Venanzi, I., & Ubertini, F. (2021). An Innovative Methodology for Online Surrogate-Based Model Updating of Historic Buildings Using Monitoring Data. *International Journal of Architectural Heritage*, 15, 92-112.
- Genç, A. F. (2023). *Tarihi Yiğma Yapılarda Deneyisel Yöntemlere Dayalı Hasar Tespiti*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Gentile, C., Guidobaldi, M., & Saisi, A. (2016). One-Year Dynamic Monitoring of a Historic Tower: Damage Detection under Changing Environment. *Meccanica*, 51(11), 2873-2889.
- Gentile, C., Ruccolo, A., & Canali, F. (2019a). Continuous Monitoring of the Milan Cathedral: Dynamic Characteristics and Vibration-Based SHM. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 9(5), 671-688.
- Gentile, C., Ruccolo, A., & Saisi, A. (2019b). Continuous Dynamic Monitoring to Enhance the Knowledge of a Historic Bell-Tower. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(7), 992-1004.
- Gentile, C., Ruccolo, A., & Saisi, A. (2023). Vibration Monitoring and Seismic Response of the Milan Cathedral. In *International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, 736-747.

- Ghini, E., Marra, M., Palermo, M., Gasparini, G., Silvestri, S., & Azzara, R. M. (2023). Peak Displacement Response Induced by Bell-Swinging on the Masonry Tower in Castel San Pietro Terme, Bologna. *In International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, 849-861.
- Giordano, P. F., Ubertini, F., Cavalagli, N., Kita, A., & Masciotta, M. G. (2020). Four Years of Structural Health Monitoring of the San Pietro Bell Tower in Perugia, Italy: Two Years Before the Earthquake Versus Two Years After. *International Journal of Masonry Research and Innovation*, 5(4), 445-467.
- Giordano, E., Marcheggiani, L., Formisano, A., & Clementi, F. (2022). Application of a Non-Invasive Technique for the Preservation of a Fortified Masonry Tower. *Infrastructures*, 7(3), 30.
- Günaşdı, N. E. (2014). *Çok Değişkenli Çoklu Doğrusal Regresyon Analizinin İncelenmesi*. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Hanbay, S. (2019). *Bir Rüzgâr Türbininin Çevresel ve İşletim Koşullarını Kapsayan Titreşim Bazlı Yapı Sağlığı İzlemesi*. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Hejazi, M., Moayedian, S. M., & Daei, M. (2016). Structural Analysis of Persian Historical Brick Masonry Minarets. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(2), 04015009.
- Heylen, W., Lammens, S., & Sas, P. (2007). Modal Analysis Theory and Testing, *Leuven Katholieke University Department of Mechanical Engineering*, Leuven, Belgium.
- Hökelekli, E. (2015). *Manisa Hafsa Sultan Camii Deprem Davranışının Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İncelenmesi*. T.C. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Manisa.
- Hökelekli, E., & Al-Helwani, A. (2020). Effect of Soil Properties on the Seismic Damage Assessment of Historical Masonry Minaret-Soil Interaction Systems. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 29(2), e1694.
- Hökelekli, E., Demir, A., Ercan, E., Nohutçu, H., & Karabulut, A. (2020). Seismic Assessment in a Historical Masonry Minaret by Linear and Non-Linear Seismic Analyses. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(2), 438-448.
- Işık, E., Harirchian, E., Arkan, E., Avcil, F., & Günay, M. (2022). Structural Analysis of Five Historical Minarets in Bitlis (Turkey). *Buildings*, 12(2), 159.
- Işık, E., Avcil, F., Arkan, E., Büyüksaraç, A., İzol, R., & Topalan, M. (2023). Structural Damage Evaluation of Mosques and Minarets in Adıyaman Due to the 06 February 2023 Kahramanmaraş Earthquakes. *Engineering Failure Analysis*, 151, 107345.
- Jacobsen, N. J., Andersen, P., & Brincker, R. (2006). Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis. *Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Leuven, Belgium, Bildiriler Kitabı: 3129-3141.

- Karagöz, M. (2009). *İstatistik Yöntemleri*. Ekin Yayınevi, Bursa.
- Karantoni, F. V., & Dimakopoulou, D. (2021). Displacement-Based Assessment of the Gazi Hasan Pasha Mosque in Kos Island (GR) under the 2017 M6.6 Earthquake and Eurocode 8, with Proposals for Upgrading. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(2), 1213-1230.
- Kiş, Ö., & Parmar, K. S. (2015). Application of Least Square Support Vector Machine and Multivariate Adaptive Regression Spline Models in Long Term Prediction of River Water Pollution. *Journal of Hydrology*, 534, 104-112.
- Kita, A., Cavalagli, N., & Ubertini, F. (2019). Temperature Effects on Static and Dynamic Behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 180-202.
- Köklü, N., Büyükoztürk, Ş., & Çokluk Bökeoğlu, Ö. (2006). *Sosyal Bilimler İçin İstatistik*. Pegem Akademi Yayıncılık, Ankara.
- Kömür, M. A., & Deneme, İ. Ö. (2015). Simetrik ve Simetrik Olmayan Üç Boyutlu Çelik Yapıların Operasyonel Modal Analizi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1), 64-72.
- Lacanna, G., Lancellotta, R., & Ripepe, M. (2019a). Integrating Modal Analysis and Seismic Interferometry for Structural Dynamic Response the Case Study of Giotto's Bell Tower in Florence (Italy). In *Proceedings of the 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, 18799.
- Lacanna, G., Ripepe, M., Coli, M., Genco, R., & Marchetti, E. (2019b). Full Structural Dynamic Response from Ambient Vibration of Giotto's Bell Tower in Firenze (Italy), Using Modal Analysis and Seismic Interferometry. *NDT & E International*, 102, 9-15.
- Livaoğlu, R., Baştürk, M. H., Doğançün, A., & Serhatoğlu, C. (2016). Effect of Geometric Properties on Dynamic Behavior of Historic Masonry Minaret. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(6), 2392-2402.
- Lord, J. F., Ventura, C. E., Dascotte, E., Brincker, R., & Anderson, P. (2003). FEM Updating Using Ambient Vibration Data From A 48 Storey Building in Vancouver British Colombia Canada. *The 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, Jeju International Convention Center, Segowipo, Korea.
- Lourenço, P. B. (1996). *Computational Strategies for Masonry Structures*. Delft University Press, Delft University of Technology, Doktora Tezi, Delft, Netherlands.
- Loverdos, D., & Sarhosis, V. (2022). Automatic Image-Based Brick Segmentation and Crack Detection of Masonry Walls Using Machine Learning. *Automation in Construction*, 140, 104389.

- Maraş, M. M., Özmen, A., Sayın, E., & Ayaz, Y. (2022). Seismic Assessment of the Historical Sötlü Minaret Mosque. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(2), 445-459.
- Mardani-Aghabaglou, A., Öztürk, H. T., Kankal, M., & Ramyar, K. (2021). Assessment and Prediction of Cement Paste Flow Behavior; Marsh-Funnel Flow Time and Mini-Slump Values. *Construction and Building Materials*, 301, 124072.
- Masciotta, M. G., Roque, J. C. A., Ramos, L. F., & Lourenço, P. B. (2016). A Multidisciplinary Approach to Assess the Health State of Heritage Structures: The Case Study of the Church of Monastery of Jerónimos in Lisbon. *Construction and Building Materials*, 116, 169-187.
- Matlab (2023). Mathworks Inc, MATLAB User Guide, Natick, MA.
- Milani, G., & Clementi, F. (2021). Advanced Seismic Assessment of Four Masonry Bell Towers in Italy After Operational Modal Analysis (OMA) Identification. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(1), 157-186.
- Mortaş, C. (2018). *Dijital Kamera ve Lazer İşaretleyci Kullanılarak Görüntü İşleme Yöntemiyle Yer Değıştirmenin Ölçülmesi*. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Nacar, S., Kankal, M., & Hınıs, M. A. (2018). Çok Değışkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (ÇDURE) ile Günlük Akarsu Akımlarının Tahmini-Haldizen Deresi Örneğı. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 38-47.
- Nacar, S., Mete, B., & Bayram, A. (2020). Günlük Çözünmüş Oksijen Konsantrasyonunun Çok Değışkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri ile Tahmin Edilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1479-1498.
- Nguyen, Q. T., & Livaoğlu, R. (2022a). A Health Monitoring Solution on Damage Detection of Minarets. *Engineering Failure Analysis*, 135, 106154.
- Nguyen, Q. T., & Livaoğlu, R. (2022b). Damage Detection of High-Rise Buildings Using an Eigenvalue Problem-Based Inverse Solution. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 152, 107019.
- Nguyen, Q. T., Livaoğlu, R., & Vu, V. T. (2023). Model Calibration of Slender Minarets Based on Artificial Neural Networks. In *International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, 676-685.
- Okur, F. Y. (2017). *Mühendislik Yapılarında Analitik, Sayısal ve Deneysel Yöntemlere Dayalı Hasar Tespiti*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Onat, O., Toy, A. T., & Özdemir, E. (2023). Block Masonry Equation-Based Model Updating of a Masonry Minaret and Seismic Performance Evaluation. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 13(6), 1221-1241.

- Osmancikli, G., Uçak, Ş., Turan, F. N., Türker, T., & Bayraktar, A. (2012). Investigation of Restoration Effects on the Dynamic Characteristics of the Hagia Sophia Bell-Tower by Ambient Vibration Test. *Construction and Building Materials*, 29, 564-572.
- Oudjida, A. K., Berrandjia, M. L., Tiar, R., Liacha, A., & Tahraoui, K. (2009). FPGA Implementation of I2C & SPI Protocols: A Comparative Study. *16th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS 2009)*, 507-510.
- Overschee, P. V., & Moor, B. D. (1996). *Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Özen, H., Tuluk, Ö. İ., Engin, H. E., Düzenli, H. İ., Sümerkan, M. R., Tutkun, M., Demirkaya, F. Ü., & Keleş, S. (2010). *Trabzon Kent İçi Kültür Varlıkları Envanteri*. Trabzon Valiliği İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü Yayınları, Trabzon.
- Özfalcı, Y. (2008). *Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Kesitleri: Mars*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Özkul, M. (2016). *Tarihi Bir Yapının Deneysel Modal Analiz ile Yapısal Güvenliğinin Belirlenmesi*. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Öztürkcan, M. (2009). *Regresyon Analizi*. T.C. Maltepe Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- Pallarés, F. J., Betti, M., Bartoli, G., & Pallarés, L. (2021). Structural Health Monitoring (SHM) and Nondestructive Testing (NDT) of Slender Masonry Structures: A Practical Review. *Construction and Building Materials*, 297, 123768.
- Park, K. T., Kim, S. H., Park, H. S., & Lee, K.W. (2005). The Determination of Bridge Displacement Using Measured Acceleration. *Engineering Structures*, 27, 371-378.
- Pavlovic, M., Trevisani, S., & Cecchi, A. (2019). A Procedure for the Structural Identification of Masonry Towers. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 38(2), 38.
- Peeters, B. (2000). *System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*. K.U, Leuven, Doktora Tezi, Belgium.
- Peeters, B., & Roeck, G. D. (2000). Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering. *Inverse Problems in Civil Engineering*, 8, 47-74.
- Pellegrini, D., Barontini, A., Girardi, M., Lourenço, P. B., Masciotta, M. G., Mendes, N., Padovani, C., & Ramos, L. F. (2023). Effects of Temperature Variations on the Modal Properties of Masonry Structures: An Experimental-Based Numerical Modelling Approach. *Structures*, 53, 595-613.
- Petyt, M. (1990). *Introduction to Finite Element Vibration Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, England.

- Pieraccini, M., Fratini, M., Parrini, F., Pinelli, G., & Atzeni, C. (2005). Dynamic Survey of Architectural Heritage by High-Speed Microwave Interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(1), 28-30.
- Pieraccini, M., Fratini, M., Dei, D., & Atzeni, C. (2009). Structural Testing of Historical Heritage Site Towers by Microwave Remote Sensing. *Journal of Cultural Heritage*, 10(2), 174-182.
- Pouraminian, M. (2022). Multi-Hazard Reliability Assessment of Historical Brick Minarets. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7(1), 10.
- Proteus, Beechcroft House 21 Hardy Grange Grassington North Yorkshire BD23 5AJ, <https://www.labcenter.com/contact>.
- Providakis, C. P., Mousteraki, M. G., & Providaki, G. C. (2023). Operational Modal Analysis of Historical Buildings and Finite Element Model Updating Using α Laser Scanning Vibrometer. *Infrastructures*, 8(2), 37.
- Rainieri, C., Fabbrocino, G., Cosenza, E., & Manfredi, G. (2007). Implementation of OMA Procedures Using Labview: Theory and Application. *2nd International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Danimarka.
- Ramos, J. L. F. S. (2007). *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures*. University of Minho, Doktora Tezi, Guimarães, Portugal.
- Requena-Garcia-Cruz, M. V., Romero-Sánchez, E., López-Piña, M. P., & Morales-Esteban, A. (2023). Preliminary Structural and Seismic Performance Assessment of the Mosque-Cathedral of Cordoba: The Abd al-Rahman I Sector. *Engineering Structures*, 291, 116465.
- Rice D. T. (1968). The Church of Haghia Sophia at Trebizond. *Edinburgh University Press*, 56-60.
- Riva, G. (1994). Il Contributo Del Leindagini Non Distruttive Nella Valutazione Del Patrimonio Architettonico A Struttura Muraria. In *Atti del X Convegno di Studi Scienza e Beni Culturali*, 559-566. Edizioni Libreria Progetto.
- Romero-Sánchez, E., Morales-Esteban, A., Bento, R., & Navarro-Casas, J. (2023). Numerical Modelling for the Seismic Assessment of Complex Masonry Heritage Buildings: The Case Study of the Giralda Tower. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(9), 4669-4701.
- Rozsas, A., Slobbe, A., Huizinga, W., Kruithof, M., Ajithkumar Pillai, K., Kleijn, K., & Giardina, G. (2022). Siamese Convolutional Neural Networks to Quantify Crack Pattern Similarity in Masonry Facades. *International Journal of Architectural Heritage*, 7(1), 147-169.
- Rölöve (2007). *Trabzon Ortahisar İskenderpaşa Camii*. Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğü, Trabzon.

- Rytter, A. (1993). *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Aalborg Üniversitesi, Doktora Tezi, Danimarka.
- Saidin, S. S., Kudus, S. A., Jamadin, A., Anuar, M. A., Amin, N. M., Ibrahim, Z., Zakaria, A. Bt., & 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*, 16, e01117.
- Saisi, A., Gentile, C., & Guidobaldi, M. (2015). Post-Earthquake Continuous Dynamic Monitoring of the Gabbia Tower in Mantua, Italy. *Construction and Building Materials*, 81, 101-112.
- Saisi, A., Guidobaldi, M., & Gentile, C. (2016). On Site Investigation and Health Monitoring of a Historic Tower in Mantua, Italy. *Applied Sciences*, 6(6), 173.
- Saisi, A., Gentile, C., & Ruccolo, A. (2018). Continuous Monitoring of a Challenging Heritage Tower in Monza, Italy. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8, 77-90.
- Sangirardi, M., Altomare, V., De Santis, S., & De Felice, G. (2022). Detecting Damage Evolution of Masonry Structures Through Computer-Vision-Based Monitoring Methods. *Buildings*, 12(6), 831.
- Sen, D., Erazo, K., Zhang, W., Nagarajaiah, S., & Sun, L. (2019). On the Effectiveness of Principal Component Analysis for Decoupling Structural Damage and Environmental Effects in Bridge Structures. *Journal of Sound and Vibration*, 457, 280-298.
- Serhatoğlu, C. (2015). *Bursa Tarihi Minarelerinin Dinamik Davranışlarının ve Performanslarının İncelemesi*. T.C. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.
- Shabani, A., Feyzabadi, M., & Kioumarsi, M. (2022). Model Updating of a Masonry Tower Based on Operational Modal Analysis: The Role of Soil-Structure Interaction. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00957.
- Soyöz, S., Taciroğlu, E., Orakçal, K., & Luş, H. (2011). Depreme Karşı Güçlendirme Öncesi ve Sonrasında Bir Binanın Dinamik Özelliklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi. *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 11-14 Ekim ODTÜ, Ankara.
- Sözen, Ş. (2022). Assessment of Seismic Load Capacity of a Slender Masonry Clock Tower. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(2), 491-501.
- Spinelli, P., Salvatori, L., Lancellotta, R., & Betti, M. (2023). Preliminary Assessment of the Seismic Behaviour of Giotto's Bell Tower in Florence. *International Journal of Architectural Heritage*, 17(1), 23-45.
- Standoli, G., Giordano, E., Milani, G., & Clementi, F. (2021). Model Updating of Historical Belfries Based on Oma Identification Techniques. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(1), 132-156.

- Standoli, G., Clementi, F., Gentile, C., & Lenci, S. (2023). Post-Earthquake Continuous Dynamic Monitoring of the Twin Belfries of the Cathedral of Santa Maria Annunziata of Camerino, Italy. *Procedia Structural Integrity*, 44, 2066-2073.
- Suman, S. (2015). *Prediction of Pile Capacity Parameters Using Functional Networks and Multivariate Adaptive Regression Splines*. Doktora Tezi.
- Şakalak, E. (2023). Yığma Kule Yapılarının Sismik Davranışı Üzerinde Farklı Malzeme Etkilerinin İncelenmesi. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 20-30.
- TBDY (2018). Türk Bina Deprem Yönetmeliği, Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara.
- Teng, J., Tang, D. H., Hu, W. H., Lu, W., Feng, Z. W., Ao, C. F., & Liao, M. H. (2021). Mechanism of the Effect of Temperature on Frequency Based on Long-Term Monitoring of an Arch Bridge. *Structural Health Monitoring*, 20(4), 1716-1737.
- Tomazevic, M. (1999). Earthquake Resistant Design of Masonry Buildings. *Singapore: Imperial College Press*, 268.
- Teughels, A., & Roeck, G. D. (2003). Damage Assessment of the Z24 Bridge by FE Model Updating. *Key Engineering Materials*, 245, 19-26.
- Tongut, A. (2017). *Dynamic Response Characteristics of the Fatih Mosque in İstanbul Estimated from Earthquake Data*. Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Toprak, S. (2011). *Çok Değişkenli Uyarlamalı Regresyon Eğrileri ve Konik Programlama ile Zaman Serilerinin Modellenmesi*. Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır.
- Torres, W., Almazan, J. L., Sandoval, C., & Boroschek, R. (2017). Operational Modal Analysis and FE Model Updating of the Metropolitan Cathedral of Santiago, Chile. *Engineering Structures*, 143, 169-188.
- Trešnja, F., Humo, M., Casarin, F., & Ademović, N. (2023). Experimental Investigations and Seismic Assessment of a Historical Stone Minaret in Mostar. *Buildings*, 13(2), 536.
- Tronci, E. M., De Angelis, M., Betti, R., & Altomare, V. (2020). Vibration-Based Structural Health Monitoring of A RC-Masonry Tower Equipped with Non-Conventional TMD. *Engineering Structures*, 224, 111212.
- Tuluk, Ö. İ. (2007). Trabzon İskender Paşa Camii: Fiziksel Gelişim Süreci Üzerine Tarihsel Bir Değerlendirme. *Uluslararası Karadeniz İncelemeleri Dergisi*, 3(3), 9-24.
- Türkeli, E. (2020). Dynamic Seismic and Wind Response of Masonry Minarets. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(2), 353-369.

- Türker, T. (2005). *Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneyisel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Türker, T. (2011). *Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti ve Değerlendirilmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Trabzon.
- Türker, T., & Yanık, Y. (2020). İlyasbey Camisi'nin Yapısal Davranışının Çevresel Titreşim Testi ve Sonlu Eleman Yöntemleriyle İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(2), 1431-1453.
- Ubertini, F., Comanducci, G., Cavalagli, N., Laura Pisello, A., Luigi Materazzi, A., & Cotana, F. (2017). Environmental Effects on Natural Frequencies of the San Pietro Bell Tower in Perugia, Italy, and Their Removal for Structural Performance Assessment. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 82, 307-322.
- Uğurlu, M. A. (2019). *Dört Ayaklı Minarenin Analitik Modeli ve Yapısal Hasarlarının İncelenmesi*. Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Diyarbakır.
- URL-1. (2024, Mayıs 30). <https://patents.google.com/patent/KR101477993B1/en> adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2024, Mayıs 30). <https://patents.google.com/patent/KR20200142741A/en?q=KR20200142741> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2024, Ağustos 2). <https://delphisonic.com/portfolio/ds-xr-solution-for-smart-railway-transportation> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2024, Ağustos 2). <https://delphisonic.com/portfolio/ds-wg-solution-for-renewable-energy-systems> adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2024, Ağustos 2). <https://tdg.com.tr/tr/cozumler/yapi-sagligi-izleme/kopruler--tuneller--metrolar> adresinden alınmıştır.
- URL-6. (2024, Şubat 25). <https://www.bksv.com/en/transducers/vibration/accelerometers/ccld-iepe> adresinden alınmıştır.
- URL-7. (2024, Şubat 25). <https://www.bksv.com/en/transducers/vibration/accelerometers/charge> adresinden alınmıştır.
- URL-8. (2024, Şubat 25). <https://www.microstrain.com/wireless-sensors/G-Link-200-R> adresinden alınmıştır.
- URL-9. (2024, Şubat 25). <https://tdg.com.tr/tr/urunler/ivmeolcer---tiltmetre---sensorler/dijital-ivmeolcer---tiltmetreler/sensebox7003-d> adresinden alınmıştır.
- URL-10. (2024, Şubat 25). <https://www.syy.com.tr/yapisal-saglik-izleme-muhendislik> adresinden alınmıştır.

- URL-11. (2024, Şubat 25). <https://www.bksv.com/en/instruments/daq-data-acquisition/analyzer-system/type-3670> adresinden alınmıştır.
- URL-12. (2024, Şubat 25). <https://marmatek.com/urun/purec-yuksek-hizli-data-logger> adresinden alınmıştır.
- URL-13. (2024, Şubat 25). <https://dewesoft.com/products/sbox> adresinden alınmıştır.
- URL-14. (2024, Şubat 25). <https://tdg.com.tr/tr/urunler/sayisallastiricilar/testbox2010-rack> adresinden alınmıştır.
- URL-15. (2024, Şubat 25). <https://www.oros.com/products/instruments-accessories/or36-mobipack-16-channels-teamwork-analyzer-recorder> adresinden alınmıştır.
- URL-16. (2024, Şubat 22). <https://koddefteri.net/nedir/seri-haberlesme-nedir.html> adresinden alınmıştır.
- URL-17. (2024, Şubat 22). <https://herenkeskin.com/seri-haberlesme-protokolleri-uart-spi-i2c> adresinden alınmıştır.
- URL-18. (2024, Şubat 22). <http://web.itu.edu.tr/~sgunduz/courses/mikroisl/slides/d8.pdf> adresinden alınmıştır.
- URL-19. (2024, Şubat 22). www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/veri-iletimi-1-bolum-elektrikport-akademi/17252 adresinden alınmıştır.
- URL-20. (2024, Şubat 22). <http://support.usr.com/support/s-cour/s-cour-docs/10589.htm> adresinden alınmıştır.
- URL-21. (2024, Şubat 22). https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_asynchronous_receiver_transmitter adresinden alınmıştır.
- URL-22. (2024, Şubat 22). <https://www.slideshare.net/canezgiaydemir/uart-ve-seri-haberleme> adresinden alınmıştır.
- URL-23. (2024, Temmuz 7). <https://www.megaplc.com.tr/uart-usart-haberlesme-protokolu-nedir> adresinden alınmıştır.
- URL-24. (2024, Şubat 23). <https://dronebotworkshop.com/i2c-arduino-arduino> adresinden alınmıştır.
- URL-25. (2024, Şubat 23). <https://www.elektrobot.net/i2c-haberlesme-protokolu> adresinden alınmıştır.
- URL-26. (2024, Şubat 23). <https://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C> adresinden alınmıştır.
- URL-27. (2024, Şubat 23). <https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c> adresinden alınmıştır.
- URL-28. (2024, Şubat 23). https://demirten.gitbooks.io/gomulu-linux/content/i2c_protokolunun_tanitilmasi.html adresinden alınmıştır.

- URL-29. (2024, Şubat 23). https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus adresinden alınmıştır.
- URL-30. (2024, Şubat 23). <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi> adresinden alınmıştır.
- URL-31. (2024, Şubat 23). <http://ramazansural.blogspot.com/2009/09/spi-nedir-nasil-calisir-spi.html> adresinden alınmıştır.
- URL-32. (2024, Şubat 23). <https://www.megaplc.com.tr/spi-haberlesme-protokolu-nedir> adresinden alınmıştır.
- URL-33. (2024, Temmuz 6). https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/73919/mod_resource/content/3/Unite_1.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-34. (2022, Şubat 24). https://www.analog.com/en/products/adxl355.html?doc=ADXL354_355.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-35. (2022, Şubat 24). <https://www.direnc.net/klon-arduino-nano-328-ft232rl> adresinden alınmıştır.
- URL-36. (2022, Şubat 24). https://www.direnc.net/hc05-arduino-bluetooth-modul?gclid=EAIaIQobChMInf28iLLY7QIVJgZ7Ch1zmQ-9EAAYASAAEgK4evD_BwE adresinden alınmıştır.
- URL-37. (2024, Nisan 28). <https://www.n11.com/urun/robizstore-tp4056-18650-lityum-pil-sarj-micro-usb-ayarli-voltaj-yukseltici-15500770?magaza=robizstore> adresinden alınmıştır.
- URL-38. (2024, Nisan 28). <https://www.direnc.net/37v-1170-mah-li-polymer-pil> adresinden alınmıştır.
- URL-39. (2024, Nisan 28). <https://www.direnc.net/bmp180-dijital-barometrik-sensor> adresinden alınmıştır.
- URL-40. (2024, Nisan 28). <https://www.direnc.net/aht10-dijital-sicaklik-ve-nem-sensoru-modulu-i2c> adresinden alınmıştır.
- URL-41. (2023, Temmuz 20). <http://www.cs.rtu.lv/jekabsons/regression.html> adresinden alınmıştır.
- URL-42. (2024, Ocak 17). <https://deprem.afad.gov.tr> adresinden alınmıştır.
- URL-43. (2022, Mayıs 17). <https://deprem.afad.gov.tr> adresinden alınmıştır.
- Usta, P. (2021). Assessment of Seismic Behavior of Historic Masonry Minarets in Antalya, Turkey. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00665.
- Ünal, B. (2009). *Çok Değişkenli Uyarlamalı Regresyon Uzanımları*. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

- Vanhonacker, P. (1980). *The Use of Modal Parameters of Mechanical Structures In Sensitivity Analysis, System Synthesis And System Identification Methods*. Ph.D. Dissertation, 80D04, Mechanical Engineering Department, K.U. Leuven.
- Visual Studio (2022). <https://visualstudio.microsoft.com/tr>.
- Vuoto, A., Ortega, J., Lourenço, P. B., Suárez, F. J., & Núñez, A. C. (2022). Safety Assessment of the Torre de la Vela in la Alhambra, Granada, Spain: The Role of on Site Works. *Engineering Structures*, 264, 114443.
- Wang, N., Zhao, X., Zhao, P., Zhang, Y., Zou, Z., & Ou, J. (2019). Automatic Damage Detection of Historic Masonry Buildings Based on Mobile Deep Learning. *Automation in Construction*, 103, 53-66.
- Worden, K., & Dulieu-Barton, J. M. (2004). An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures. *Structural Health Monitoring*, 3(1), 85-98.
- Xu, D., Xie, Q., & Hao, W. (2024). Seismic Damage Evaluation of Historical Masonry Towers Through Numerical Model. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(4), 2235-2266.
- Yam, L. H., Yan, Y. J., & Wei, Z. (2004). Vibration-Based Non Destructive Structural Damage Detection. *Key Engineering Materials*, 270, 1446-1453.
- Yan, X., & Su, X. (2009). *Linear Regression Analysis: Theory and Computing*. World Scientific Publishing Company. Created from ktulibrary-ebooks on 2022-02-05 15:40:39.
- Yanık, Y. (2018). *Malzeme Özelliklerinin Titreşim Testi Verilerine Dayalı Model Kalibrasyon Yöntemiyle Belirlenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Yanık, Y., Türker, T., Yıldırım, Ö., & Dede, T. (2020). Identification Material Properties by Modal Calibration Method Based on Ambient Vibration Tests. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25, 573-590.
- Yanık, Y., Aymelek, A., Çalık, İ., & Türker, T. (2022). Vibration Testing and Performance Evaluation of Hagia Sophia Bell Tower After Recent Restoration. *Construction and Building Materials*, 347, 128617.
- Yerlikaya, F. (2008). *A New Contribution to Nonlinear Robust Regression and Classification with MARS and its Applications to Data Mining for Quality Control in Manufacturing*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Yu, D. J., & Ren, W. X. (2005). EMD-Based Stochastic Subspace Identification of Structures from Operational Vibration Measurements. *Engineering Structures*, 27, 1741-1751.
- Zhang, L., Brincker, R., & Andersen, P. (2002). An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues. *B&K Technical Paper*, 152-161.

- Zhang, L., & Brincker, R. (2005). An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues. *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, April, Copenhagen, Denmark, 179-190.
- Zhang, W., & Goh, A. T. (2016). Multivariate Adaptive Regression Splines and Neural Network Models For Prediction of Pile Drivability. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 45-52.
- Zini, G., Betti, M., & Bartoli, G. (2022). A Pilot Project for the Long-Term Structural Health Monitoring of Historic City Gates. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 12(3), 537-556.
- Zonno, G., Aguilar, R., Boroschek, R., & Lourenço, P. B. (2019). Experimental Analysis of the Thermohygrometric Effects on the Dynamic Behavior of Adobe Systems. *Construction and Building Materials*, 208, 158-174.



ÖZGEÇMİŞ

Yusuf YANIK, lise öğrenimini Vakfıkebir Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2009 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Lisans eğitimine başladı. 2014 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki Lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak atanan Yanık, 2018 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora eğitimine başladı. Halen Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak görev yapan Yanık, Nurgül YANIK ile evlidir.

Yusuf YANIK iyi derecede İngilizce, orta derecede Almanca bilmekte ve “Titreşim Ölçüm Sistemi” adında “2019/05828” tescil numaralı bir faydalı modeli bulunmaktadır. Ayrıca “Çok Kanallı Kablosuz Titreşim Ölçüm Sistemi” adında “2021/019356” numarasıyla faydalı model tescilleme işlemleri devam etmektedir. Yusuf YANIK'ın lisansüstü eğitimi boyunca yayınladığı makaleler (SCI ve SCI expanded) aşağıda sunulmaktadır.

- Yanık, Y., Türker, T., Çalık, İ., & Yıldırım, Ö. (2022). Investigation of Environmental and Time Depended Effects on Historical Masonry Minarets by Vibration Test. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(2), 799-813.
- Yanık, Y., Aymelek, A., Çalık, İ., & Türker, T. (2022). Vibration Testing and Performance Evaluation of Hagia Sophia Bell Tower After Recent Restoration. *Construction and Building Materials*, 347, 128617.
- Aymelek, A., Yanık, Y., Demirtaş, B., Yıldırım, Ö., Çalık, İ., & Türker, T. (2023). Full-Scale Structural Evaluations of İskenderpaşa Minaret. *Structures*, 55, 1028-1044.
- Yanık, Y., Aymelek, A., Yıldırım, Ö., Demirtaş, B., & Türker, T. (2023). Variations of Natural Frequencies of Masonry Minarets Due to Environmental Effects. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 13(8), 1-27.